



ESCOLA NAVAL

talant de bi-faire



João Paulo Amaro Vitorino

Gerador elétrico portátil

Estudo de viabilidade de um gerador piezoelétrico para
alimentação de equipamentos militares.

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Ciências Militares Navais,
na especialidade de Engenharia Naval Ramo de Armas e Electrónica.



Alfeite

2022



João Paulo Amaro Vitorino

Gerador elétrico portátil
Estudo de viabilidade de um gerador piezoelétrico para
alimentação de equipamentos militares.

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Ciências Militares Navais,
na especialidade de Engenharia Naval Ramo de Armas e Electrónica.

Orientação de: Vítor Manuel Rodrigues Viegas

Co-orientação de: Bruno Duarte Damas

O Aluno Mestrando

Assinado por: **João Paulo Amaro Vitorino**
Num. de Identificação: 14304961
Data: 2022.09.12 15:30:22+01'00'

João Paulo Amaro Vitorino

O Orientador

Assinado por: **Vítor Manuel Rodrigues Viegas**
Num. de Identificação: 10707212
Data: 2022.09.12 17:31:50+01'00'

Vítor Manuel Rodrigues Viegas

Alfeite

2022

“It is not in the nature of things for any one man to make a sudden violent discovery; science goes step by step, and every man depends on the work of his predecessors.”

Ernest Rutherford

Agradecimentos

Esta dissertação de mestrado é o culminar do meu percurso académico inicial, marcado por inúmeras pessoas que, cada uma de sua maneira, contribuíram para que a sua elaboração fosse possível.

Em primeiro lugar, agradeço aos meus pais, João e Graciete, pela educação, apoio e por todas as oportunidades que me deram, sem as quais não conseguiria ter chegado onde cheguei hoje.

Ao meu irmão, João Pedro, que sempre foi um exemplo para mim e sempre me deu o apoio académico quando necessitei.

À minha namorada, Catarina Guerreiro, pela paciência, compreensão e por todo o apoio que me tem dado no meu percurso.

Ao meu orientador, Professor Vítor Viegas e co-orientador, Professor Bruno Damas, por terem aceite a minha proposta de trabalho neste tema, pelas suas sugestões e orientações, e pela disponibilidade que sempre demonstraram para a resolução de problemas com os quais me fui deparando durante o processo.

Ao CTEN FZ Franco Preto pela disponibilidade e entusiasmo com que me recebeu, partilhando o seu elevado conhecimento técnico sobre equipamentos militares.

À minha família e amigos que me deram o alento que precisei nos momentos mais difíceis.

Ao curso “CMG Fernando Amor Monteiro de Barros”, por todas as vivências durante estes cinco anos e pelo espírito de camaradagem, que me deram motivação para atingir os meus objetivos.

À Escola Naval e à Marinha Portuguesa que providenciaram o conhecimento, condições e materiais necessários para a elaboração desta dissertação.

À guarnição do NRP Viana do Castelo pelo estágio de embarque que me proporcionaram, no qual adquiri e desenvolvi inúmeras competências técnicas.

Finalmente quero agradecer a todos os que marcaram o meu percurso na Escola Naval, em especial ao 2TEN EN-AEL Santos Baptista, ao ASPOF EN-MEC Cordeiro Gaio, aos meus camaradas de classe e aos meus imediatos.

A todos vós, o meu sincero obrigado!

Resumo

Atualmente tem-se verificado uma crescente dependência em equipamentos elétricos e eletrônicos, em todos os setores da economia, na investigação científica e até no cidadão comum. O mundo militar não é exceção, recorrendo cada vez mais a estes equipamentos para aumentar a eficiência e eficácia de operações militares.

O principal problema destes equipamentos é a sua autonomia, dependente de uma fonte de energia elétrica: ainda que os equipamentos possuam baterias ou outras formas de armazenamento de energia, estas precisam de ser carregadas, tendo uma capacidade de armazenamento geralmente proporcional ao seu peso. Por sua vez, o peso das baterias transportadas por um militar apeado pode afetar de forma negativa a sua agilidade, diminuindo a sua capacidade operacional.

Têm vindo a ser desenvolvidas várias fontes de energia elétrica portáteis, visando o seu transporte e utilização por parte de um indivíduo apeado. Os geradores piezoelétricos transformam energia mecânica em energia elétrica, o que permite o aproveitamento de energia cinética dissipada para a produção de energia elétrica.

Nesta dissertação foi desenvolvido um protótipo de um gerador piezoelétrico integrado numa bota, passível de ser utilizado por um militar apeado para carregamento dos seus equipamentos elétricos e eletrônicos através do caminhar. Num ritmo de caminhada de um passo por segundo, o protótipo gerou $800.90 \mu\text{J}$ de energia por passo, significando que são necessários aproximadamente sete milhões de passos para carregar totalmente uma pilha do tipo AAA.

Apesar de o protótipo isolado não se apresentar como uma fonte de energia elétrica eficaz para alimentar os equipamentos de um militar apeado, este pode ser utilizado juntamente com outras fontes de energia elétrica para o mesmo efeito, ou para aumentar a autonomia de sistemas de emergência de localização de indivíduos, tais como sistemas de deteção de Homem ao Mar.

Palavras-chave: Piezoeletricidade, gerador piezoelétrico, aproveitamento de energia, energias renováveis.

Abstract

Nowadays there is an increasing dependence on electric and electronic devices, seen in all sectors of the economy, in the scientific research and in the average person's life. The military world is no exception, employing these devices more frequently in order to improve the efficiency and the effectiveness of military operations.

The main problem of these devices is their autonomy, which is dependent on an electrical power source: although these devices have batteries or other energy storage components, these also need to be recharged, having a storage capacity often proportional to their weight. The weight of the batteries carried by a soldier can reduce his agility, decreasing his operational capabilities.

Several portable electrical power sources have been developed, with the purpose of being carried and used by a single person on foot. Piezoelectric generators convert mechanical energy in electric energy, allowing the harvesting of dissipated kinetic energy to produce electric energy.

In this thesis a prototype of a boot-integrated piezoelectric generator was developed that could be worn by a soldier on foot to supply electrical power to his devices. This prototype generated $800.90\text{ }\mu\text{J}$ per step, on a one pace per second rhythm, meaning that it would take almost seven million steps to fully charge a AAA battery.

Although this prototype is not an effective way to supply electrical power to a ground troop's devices, it can be used, along with other types of electrical power sources to the same effect, or to increase the autonomy of emergency localizing systems such as Man Overboard detecting systems.

Keywords: Piezoelectricity, piezoelectric generator, energy harvesting, renewable energies.

Índice

Resumo	VII
Abstract	IX
Índice	XI
Índice de Figuras	XV
Índice de Tabelas	.XIX
Siglas e acrónimos	.XXI
Simbologia e unidades	.XXIII
1 Introdução	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Motivação	1
1.3 Objetivos	2
1.4 Estrutura da dissertação	2
2 Fontes de energia elétrica	5
2.1 Energia nuclear	6
2.2 Baterias	8
2.3 Células de Combustível	12
2.4 Aproveitamento de energia	13
2.4.1 Energia solar	13
2.4.2 Energia eólica e energia hídrica	15
2.4.3 Energia térmica	17
2.4.4 Radiação	18
2.4.5 Triboeletricidade	18
2.4.6 Piezoeletricidade	19
3 Piezoeletricidade	21
3.1 O efeito piezoelétrico	21
3.1.1 Cristal de quartzo	21
3.1.2 Cerâmicas piezoelétricas	23
3.2 Materiais piezoelétricos	24
3.3 Definições e notação	27
3.3.1 Localização no espaço	27

3.3.2	Definições	28
3.4	Parâmetros dos materiais piezoelétricos	29
3.5	Circuito elétrico equivalente	32
3.6	Aplicações	35
4	Estado da arte	43
4.1	Geradores piezoelétricos	43
4.2	Geradores piezoelétricos em calçado	47
4.3	Circuito de aproveitamento de energia	53
5	Desenvolvimento de um protótipo	61
5.1	Material piezoelétrico	62
5.2	Circuito eletrónico	62
5.3	Primeira fase	64
5.3.1	Desenvolvimento de uma plataforma fixa	64
5.3.2	Otimização da estrutura do material piezoelétrico	65
5.3.3	Estudo das propriedades do material piezoelétrico integrado em calçado	67
5.3.4	Ensaio do circuito eletrónico	70
5.4	Segunda fase	72
5.4.1	Incorporação do material piezoelétrico numa bota	72
5.4.2	Ensaio das ligações elétricas	73
5.4.3	Fabrico de uma placa de circuito impresso para incorporação de todos os componentes	79
5.4.4	Ensaio do protótipo	80
6	Conclusão	81
6.1	Análise dos resultados	81
6.2	Viabilidade de utilização do protótipo	82
6.3	Trabalhos futuros	83
	Bibliografia	85
	Apêndices	89
A	Código desenvolvido em Matlab	89
B	Estruturas de PLA testadas	93
C	Estrutura de PLA incorporada nos transdutores	95

D	Placa de circuito impresso desenvolvida	97
E	Suporte para a placa de circuito impresso desenvolvido	99
F	Equipamentos utilizados pelos Fuzileiros Portugueses	101
Anexos		103
A	Extrato da ficha técnica dos transdutores 7BB-20-6LO da muRata .	103
B	Ficha técnica do circuito integrado LTC3588-1	109
C	Esquemas do circuito integrado <i>Energy Harvester Breakout</i> -LTC3588	129
D	Ficha técnica do retificador de onda completa DB107	131

Índice de Figuras

2.1	Gerador elétrico utilizado pela Marinha Portuguesa.	6
2.2	Esquema de um semicondutor de junção PN.	7
2.3	Fonte de energia betavoltaica.	8
2.4	Circuito de carregamento de um condensador.	8
2.5	Esquema simplificado de uma pilha alcalina.	9
2.6	Esquema simplificado de uma célula de uma bateria de ácido de chumbo.	10
2.7	Esquema simplificado de uma bateria de íões de lítio.	11
2.8	Esquema simplificado de uma célula de combustível.	12
2.9	Esquema simplificado de uma célula fotovoltaica básica.	14
2.10	Célula fotovoltaica destacada de um painel fotovoltaico.	15
2.11	Painel fotovoltaico portátil instalado numa mochila.	15
2.12	Parque eólico e barragem hidroelétrica.	16
2.13	Equipamentos <i>WaterLily</i> , <i>WindLily</i> e acessórios.	16
2.14	Esquema de um gerador termoelétrico.	17
2.15	Representação do efeito triboelétrico.	19
3.1	Cristais de quartzo.	22
3.2	Representação dos átomos do cristal de quartzo.	22
3.3	Polaridade dos domínios das cerâmicas piezoelétricas.	23
3.4	Esquema de estrutura perovskita.	25
3.5	Fases do PVDF.	26
3.6	Circuito elétrico equivalente de um material piezoelétrico.	33
3.7	Reactância de um material piezoelétrico.	34
3.8	Esquema elétrico equivalente de um gerador piezoelétrico.	35
3.9	Esquema simplificado de um aparelho de ignição piezoelétrico.	36
3.10	Campainha piezoelétrica.	37
3.11	Aparelho piezoelétrico desenvolvido pelos irmãos Curie.	37
3.12	Esquema simplificado de um acelerómetro piezoelétrico.	38
3.13	Motores piezoelétricos.	39
3.14	Cristal utilizado em osciladores.	40
3.15	Esquema simplificado de um amortecedor piezoelétrico.	41
3.16	Esquema de um sistema de aproveitamento de energia motriz humana.	42

4.1	Experiência de aproveitamento de energia de movimento oscilatório. . .	44
4.2	Mosaico piezoelétrico.	45
4.3	Plataforma intermédia do mosaico piezoelétrico.	45
4.4	Exemplos de uma estrutura em címbalo e dimórfica.	47
4.5	Tensão nos elétrodos do PVDF instalado numa sapatilha.	48
4.6	Energia produzida numa hora por um indivíduo a correr.	49
4.7	Esquema das plataformas desenvolvidas por Zhao e You.	50
4.8	Protótipos desenvolvidos por Zhao e You.	50
4.9	Resultados do primeiro ensaio de Zhao e You.	51
4.10	Diagrama de blocos de um gerador piezoelétrico.	54
4.11	Esquema de um retificador de onda completa.	54
4.12	Esquemas elétricos de conversores DC/DC básicos.	55
4.13	Fase <i>on</i> do ciclo do <i>buck converter</i>	56
4.14	Fase <i>off</i> do ciclo do <i>buck converter</i>	57
4.15	<i>Buck converter</i> utilizando MOSFET.	58
4.16	<i>Schmitt trigger</i> não inversor.	59
4.17	<i>Buck converter</i> controlado por histerese.	60
5.1	Transdutor 7BB-20-6LO.	62
5.2	Esquema elétrico do circuito integrado da Sparkfun.	63
5.3	Plataforma fixa desenvolvida na primeira fase.	65
5.4	Quatro zonas do pé consideradas.	65
5.5	Gráfico das tensões geradas por um transdutor.	66
5.6	Valores médios da potência média medida com cada estrutura de PLA. . .	66
5.7	Tensões geradas por um transdutor com e sem estrutura de PLA. . .	67
5.8	Energia, corrente média e potência média geradas por um transdutor. .	68
5.9	Potência média gerada por um transdutor em cada zona.	69
5.10	Ensaio com dois transdutores ligados em paralelo.	69
5.11	Ensaio do circuito eletrónico com um transdutor isolado.	70
5.12	Protótipo desenvolvido.	72
5.13	Esquemas dos circuitos de ensaio das ligações.	73
5.14	Ensaio das ligações 1 e 2.	74
5.15	Ensaio das ligações 1 e 3.	74
5.16	Ensaio das ligações 2 e 3.	75
5.17	Ensaio das três ligações ligadas em paralelo.	75
5.18	Esquemas dos circuitos de ensaio das ligações com retificadores. . . .	77

5.19	Ensaio das ligações com retificadores de onda completa.	78
5.20	Esquema do circuito eletrónico da placa de circuito impresso.	79
5.21	Resultados do ensaio do protótipo.	80

Índice de Tabelas

3.1	Valores típicos de vários materiais piezoelétricos.	27
4.1	Capacitância dos protótipos e respetiva carga resistiva adaptada. . . .	51
5.1	Hardwares e softwares utilizados no desenvolvimento do protótipo. . .	61
5.2	Resultados dos ensaios das ligações.	76
5.3	Resultados dos ensaios das ligações utilizando retificadores.	77
5.4	Regulação da tensão de saída do gerador piezoelétrico.	80
6.1	Tempo de carregamento de cada pilha com o protótipo.	83

Siglas e acrónimos

AC	<i>Alternated current</i>
AIP	<i>Air independent propulsion</i>
AMPOP	Amplificador operacional
ASW	<i>Anti-submarine warfare</i>
BT	Titanato de bário
CAD	<i>Computer-aided design</i>
DC	<i>Direct current</i>
GNSS	<i>Global navigation satellite system</i>
GPS	<i>Global positioning system</i>
MOSFET	<i>Metal oxide semiconductor field effect transistor</i>
NMOS	MOSFET de canal N
PDA	<i>Personal digital assistant</i>
PEM	<i>Proton-exchange membrane</i>
Pgood comparator	<i>Power good comparator</i>
PLA	Ácido polilático
PMN	Niobato de chumbo e magnésio
PMOS	MOSFET de canal P
PVDF	Fluoreto de polivinilideno
PZN	Niobato chumbo e zinco
PZT	Titanato zirconato de chumbo
RUMM	Regulamento de uniformes dos militares da Marinha
SONAR	<i>Sound navigation and ranging</i>
UVLO	<i>Undervoltage lockout</i>

Simbologia e unidades

A	Área	m^2
a	Aceleração	m s^{-2}
C	Capacitância	F
D	Deslocamento elétrico	C m^{-2}
d	Constante piezoelétrica de deformação	$\text{m V}^{-1} = \text{C N}^{-1}$
D_{cycle}	<i>Duty cycle</i>	adimensional
Dim	Dimensão	
E	Campo elétrico	V m^{-1}
F	Força	N
f	Frequência	Hz
g	Constante piezoelétrica de tensão	$\text{V m N}^{-1} = \text{m}^2 \text{C}^{-1}$
I e i	Corrente elétrica	A
k	Fator de acoplamento eletromecânico	adimensional
k_e	Constante elástica	N m^{-1}
L	Indutância	H
l	Comprimento	m
P	Polarização	C m^{-2}
p	Momento dipolar	C m
Q	Carga elétrica	C
Q_M	Fator de qualidade mecânica	adimensional
R	Resistência elétrica	Ω

S	Deformação	adimensional
s	Flexibilidade	N m^{-2}
T	Tensão mecânica	N m^{-2}
t	Tempo	s
T_C	Temperatura de Curie	$^{\circ}\text{C}$
T_{cycle}	Período	s
V e v	Tensão elétrica	V
Vol	Volume	m^3
Y	Módulo de Young	$\text{m}^2 \text{N}^{-1}$
$\bar{Z}$	Impedância	Ω
Z	Módulo da impedância	Ω
Δ	Variação de uma grandeza	
ϵ_0	Permitividade elétrica no vácuo	$8.854 \times 10^{-12} \text{ F m}^{-1}$
ϵ_r	Permitividade elétrica relativa	adimensional
χ_e	Suscetibilidade elétrica	adimensional

1. Introdução

1.1 Enquadramento

A evolução da tecnologia tem vindo cada vez mais a convergir para o desenvolvimento de equipamentos elétricos e eletrónicos. Atualmente estes dispositivos estão cada vez mais presentes em todos os setores da economia, na investigação científica e até mesmo no quotidiano do cidadão comum, tendo vindo a ser criada uma dependência cada vez maior aos mesmos.

O mundo militar não é exceção a esta crescente dependência destes meios, sendo um dos principais fomentadores e investidores no desenvolvimento tecnológico. Tem-se vindo a alterar procedimentos, estratégias, táticas, e visões operacionais através da integração das novas tecnologias, auxiliando os operadores e melhorando a eficiência das operações militares, exigindo a permanente disponibilidade dos equipamentos para serem utilizados. Esta necessidade tem vindo a ser satisfeita com o desenvolvimento de baterias e meios de armazenamento de energia, para aumentar a autonomia dos equipamentos.

Ainda que sejam utilizadas baterias com elevada capacidade, estas têm que ser carregadas, recorrendo a uma fonte de energia elétrica, limitando a autonomia dos equipamentos. Por outro lado, é de notar que por norma, as baterias com maior capacidade são mais pesadas, influenciando a portabilidade das mesmas. Para satisfazer esta necessidade têm sido desenvolvidos geradores elétricos portáteis de vários tipos.

O gerador piezoelétrico transforma energia mecânica empregue na deformação de um material piezoelétrico, em energia elétrica, podendo ser utilizado como um meio passivo de produção de energia elétrica quando incorporado no calçado, possibilitando a geração passiva de energia elétrica quando um militar apeado se desloca.

1.2 Motivação

Na área das operações militares terrestres são utilizados vários equipamentos, nomeadamente de comunicações, fundamentais para o comando e controlo das operações, equipamentos eletro-óticos e equipamentos de cartografia e navegação terres-

tre. Estes equipamentos possuem baterias ou pilhas, as quais têm uma determinada autonomia que pode nem sempre ser adequada à duração da missão, ou não se adaptar a eventuais imprevistos que causem demoras, comprometendo a sua aplicação. Além disso, o peso excessivo de algumas baterias diminui a mobilidade e agilidade dos operacionais (Swanner et al.).

O aumento da autonomia dos equipamentos elétricos e eletrônicos constitui a motivação para o trabalho desenvolvido nesta dissertação.

1.3 Objetivos

Nesta dissertação pretende-se:

- estudar meios portáteis de produção e armazenamento de energia elétrica, a utilizar por forças militares, aproveitando a energia fornecida pelo meio ambiente (como a energia solar, a energia eólica e a radiação eletromagnética envolvente) e a energia que é dissipada para o meio ambiente (como os gradientes térmicos e o movimento do corpo humano);
- desenvolver um meio de produção de energia elétrica através de material piezoelétrico, de modo a resolver o problema do peso excessivo das baterias;
- estudar a viabilidade da utilização do equipamento desenvolvido para alimentação elétrica de equipamentos de forças militares terrestres.

1.4 Estrutura da dissertação

Esta dissertação encontra-se dividida em seis capítulos, sendo o capítulo 1 a introdução, no qual são descritos o enquadramento, a motivação e os objetivos desta dissertação, bem como a sua estrutura.

No capítulo 2 são abordadas várias tecnologias de produção de energia elétrica, nomeadamente através de materiais radioativos, de células de combustível e do aproveitamento de energia sob outras formas (“energias renováveis”), bem como uma ligeira abordagem teórica do funcionamento de componentes de armazenamento de energia elétrica (como pilhas, baterias e condensadores).

No capítulo 3 é feita uma revisão dos fundamentos teóricos da piezoeletricidade, começando pela análise do efeito piezoelétrico e de materiais piezoelétricos. Uma vez abordados os aspectos físicos do efeito piezoelétrico são estudadas convenções e definições sobre o mesmo, culminando na enumeração de várias aplicações deste efeito.

A aplicação do efeito piezoelétrico na produção de energia elétrica é o foco do capítulo 4, no qual se analisam trabalhos de vários investigadores, bem como vários circuitos eletrônicos a fim de projetar e desenvolver um protótipo de um gerador piezoelétrico integrado numa bota.

O projeto, desenvolvimento, otimização e ensaios do protótipo referido são pormenorizadamente descritos no capítulo 5, assim como a análise dos resultados obtidos nos diversos ensaios.

Finalmente, no capítulo 6 são apresentadas conclusões da análise dos resultados obtidos nos ensaios e feito o estudo de viabilidade da utilização de um gerador piezoelétrico para alimentação de equipamentos militares, o propósito desta dissertação.

2. Fontes de energia elétrica

Nos últimos anos, as forças militares terrestres têm recorrido cada vez mais a equipamentos elétricos e eletrônicos na condução de operações militares, traduzindo-se num aumento acentuado do consumo de energia elétrica por parte dos combatentes (Harper, 2015). O comando e controlo de operações militares é, desde sempre um elemento fundamental para o sucesso das mesmas, e o advento dos aparelhos de comunicações portáteis permitiu o comando e controlo de operações a grandes distâncias, inclusive entre continentes. Daí, um dos equipamentos que se vê com maior frequência em forças militares terrestres, desde o período da Segunda Guerra Mundial, é um sistema de comunicações.

As estratégias atuais dão primazia à redução dos danos colaterais e para tal é necessário recorrer a equipamentos que tenham uma exatidão elevada. Por outro lado, para minimizar a probabilidade de erro humano, e ao mesmo tempo auxiliar o comando e os operacionais no terreno na tomada de decisão, recorre-se cada vez mais a equipamentos capazes de recolher, processar e mostrar ao operador, uma elevada quantidade de dados.

Para alcançar tais capacidades, tem vindo a aumentar a utilização de equipamentos de navegação e rádio-posicionamento (através de um *Global Navigation Satellite System*, abreviado por GNSS), computadores, *smartphones*, *tablets*, sistemas eletro-óticos e demais meios de deteção e recolha de informação.

Por um lado, conseguiu-se reduzir o peso de equipamento de combate tradicional; por outro lado, pretendeu-se dar ao combatente cada vez mais aparelhos e equipamentos para atingir os objetivos descritos.

Da utilização de equipamentos elétricos e eletrônicos advém o problema da autonomia e peso das suas baterias. Uma das soluções para resolver o problema do carregamento de baterias de equipamentos elétricos e eletrônicos passa por disponibilizar às forças um gerador elétrico. O gerador da figura 2.1 é utilizado pela Marinha Portuguesa, sendo um gerador móvel, através de reboque por meio de um veículo motorizado.

Por forma a garantir uma maior disponibilidade de energia elétrica a forças terrestres apeadas, tendo em conta o fator do peso, seguiram-se várias abordagens, entre as quais:

- desenvolvimento de células betavoltaicas baseadas em energia nuclear;
- desenvolvimento de baterias eletroquímicas;
- desenvolvimento de pequenas células de combustível portáteis;
- desenvolvimento de sistemas integrados de aproveitamento de energia dissipada sob outras formas.



Figura 2.1: Gerador elétrico utilizado pela Marinha Portuguesa.

2.1 Energia nuclear

Os materiais radioativos têm átomos cujos núcleos são instáveis por possuírem prótons ou neutrões em excesso, levando à ejeção de matéria do núcleo, por forma a atingir uma maior estabilidade. Este fenómeno é denominado decaimento radioativo.

No núcleo do trítio (${}^3_1\text{H}$), um isótopo do hidrogénio, existem um protão e dois neutrões. Devido ao decaimento radioativo, um dos neutrões transforma-se num protão. Deste processo resulta a transformação do isótopo de trítio num isótopo de hélio-3 (${}^3_2\text{He}$), que contém dois protões e um neutrão no seu núcleo, na libertação de um antineutrino de eletrão ($\bar{\nu}_e$) e na libertação de um eletrão muito energético (e^-), denominado de partícula β . O processo descrito neste parágrafo denomina-se decaimento β^- , e traduz-se na equação 2.1.



Projetando partículas β num material semiconductor, gera-se uma corrente elétrica. A este fenómeno dá-se o nome de efeito betavoltaico (Guo e Lal, 2003).

Considere-se um semiconductor de junção PN, constituído por um material do tipo N que apresenta um excesso de eletrões livres, e material do tipo P que apresenta carência de eletrões, designadas lacunas. Para apresentarem estas características, os materiais são dopados (processo em que um substrato de silício é misturado com fósforo ou boro). Parte dos eletrões em excesso move-se por difusão para o material do tipo P, assim como parte das lacunas para o material do tipo N, até surgir uma barreira de potencial (de aproximadamente 0.7 V) que faz cessar as correntes de difusão. Nestas condições, a região em torno da junção, denominada zona de depleção, fica depleta de cargas (eletricamente neutra) e funciona como uma barreira isolante (figura 2.2).

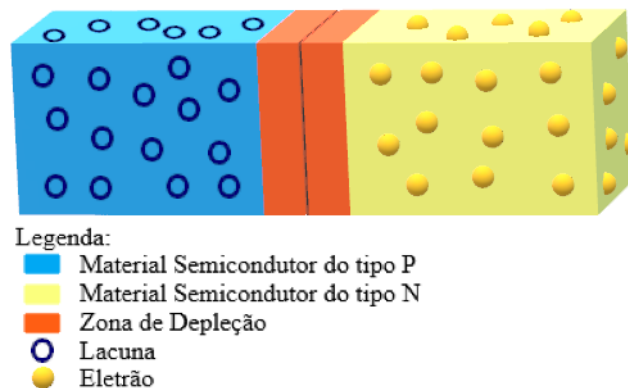


Figura 2.2: Esquema de um semiconductor de junção PN.

A radiação incidente, constituída por partículas β , fornece energia suficiente aos pares eletrão-lacuna para vencerem a barreira de potencial e passarem para o lado onde são maioritários, assegurando uma corrente elétrica quando o circuito se encontra fechado externamente.

Utilizando este processo, produziram-se pequenas fontes de energia betavoltai- cas (figura 2.3), contendo camadas de isolamento contra a radiação resultante das reações nucleares. Esta tecnologia é utilizada em equipamentos elétricos e eletrónicos em que não é viável a troca ou o carregamento de baterias, visto que o material radioativo é capaz de libertar partículas β durante anos. Menciona-se a sua aplicação na indústria espacial, em satélites e na medicina, nomeadamente em implantes de controlo do funcionamento do coração, conhecidos como *pacemakers*. Neste último

caso a sua aplicação foi bastante reduzida devido ao desenvolvimento das baterias de íons de lítio que apresentam um custo menor (Guo e Lal, 2003).



Figura 2.3: Fonte de energia betavoltaica NanoTritium™ P100 da City Labs.

2.2 Baterias

As baterias são um meio de armazenar energia química através da ionização de átomos e moléculas. Baseiam-se em várias tecnologias tais como baterias de ácido de chumbo ou baterias de íons de lítio, que diferem nos materiais utilizados e no seu funcionamento interno. É importante conhecer a diferença entre uma bateria, uma pilha e um condensador.

Um condensador é formado por duas placas metálicas com as mesmas características separadas por material dielétrico, logo não é atravessado por corrente elétrica. A expressão 2.2 define matematicamente o condensador, em que V_C é a diferença de potencial nos seus terminais, Q é a carga elétrica acumulada nas suas placas e C é a sua capacitância.

$$V_C = \frac{Q}{C} \quad (2.2)$$

Um condensador pode ser carregado através do circuito da figura 2.4, seguindo a equação 2.4, $i_C(\tau)$ é a corrente que atravessa o circuito e R é o valor da resistência. A corrente $i_C(\tau)$ relaciona-se com Q através da equação 2.3.

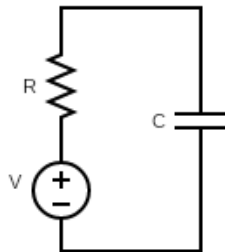


Figura 2.4: Circuito de carregamento de um condensador.

$$Q(t) = \int_0^t i_C(\tau) d\tau \quad (2.3)$$

$$v_C(t) = \frac{1}{C} \int_0^t i_C(\tau) d\tau \quad (2.4)$$

A placa metálica do condensador que está ligada ao terminal negativo da fonte de tensão, acumula elétrons até $v_C(t)$ ser igual à tensão gerada pela fonte. Deste modo, quando se retira o condensador carregado do circuito, este tem uma placa metálica carregada de elétrons (terminal negativo) e outra com carga elétrica aproximadamente nula (terminal positivo), armazenando energia sob a forma de um campo elétrico.

Uma pilha é composta por dois elétrodos, um eletrólito (substância que contém iões) e um separador que isola galvanicamente os dois elétrodos mas é atravessado pelo eletrólito, ou seja, impede a passagem de elétrons.

Ao contrário do condensador, o terminal positivo e o terminal negativo são constituídos por materiais diferentes, como por exemplo uma pilha alcalina de dióxido de manganês e zinco, respetivamente. O zinco tem tendência a formar iões positivos, libertando elétrons, enquanto que o dióxido de manganês tem tendência a formar iões negativos, com a captação de elétrons. Numa pilha alcalina, o dióxido de manganês encontra-se misturado com um eletrólito (por exemplo potássio) e separado do zinco por um separador. Para aumentar a rapidez das reações utiliza-se um condutor de grafite, obtendo uma maior superfície de contacto com o dióxido de manganês.

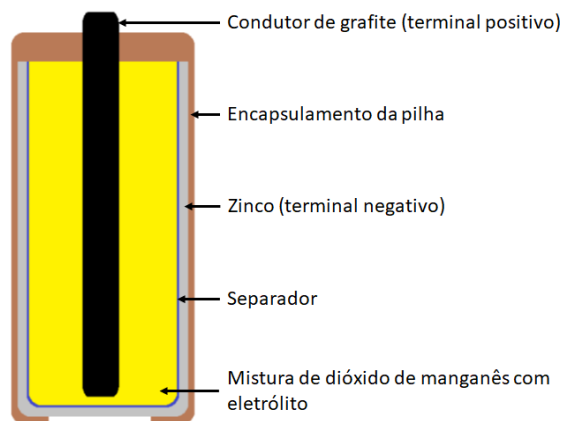


Figura 2.5: Esquema simplificado de uma pilha alcalina.

Quando a pilha está em repouso, as moléculas encontram-se em equilíbrio iônico, havendo uma concentração de elétrons no terminal negativo. Quando se ligam os elétrodos da pilha a um circuito, os elétrons vão-se deslocar no circuito, gerando uma corrente elétrica convencional, do terminal positivo para o terminal negativo. Consequentemente, os elétrodos vão sofrer reações de oxidação-redução através do eletrólito gerando iões e compostos iônicos. No terminal negativo são libertados mais elétrons para o circuito, até o mesmo ser aberto ou até já não ser possível realizar mais reações de oxidação-redução (isto é, até se esgotar a energia potencial química).

A estrutura e o funcionamento das baterias é similar ao das pilhas, contudo existe a possibilidade do carregamento das mesmas quando se esgota a energia que estava armazenada no seu interior, o que leva à utilização de materiais distintos das pilhas.

As baterias de ácido de chumbo são normalmente constituídas por um terminal positivo de óxido de chumbo e um terminal negativo de chumbo, galvanicamente isolados por um separador, mergulhados no eletrólito de ácido sulfúrico (figura 2.6).

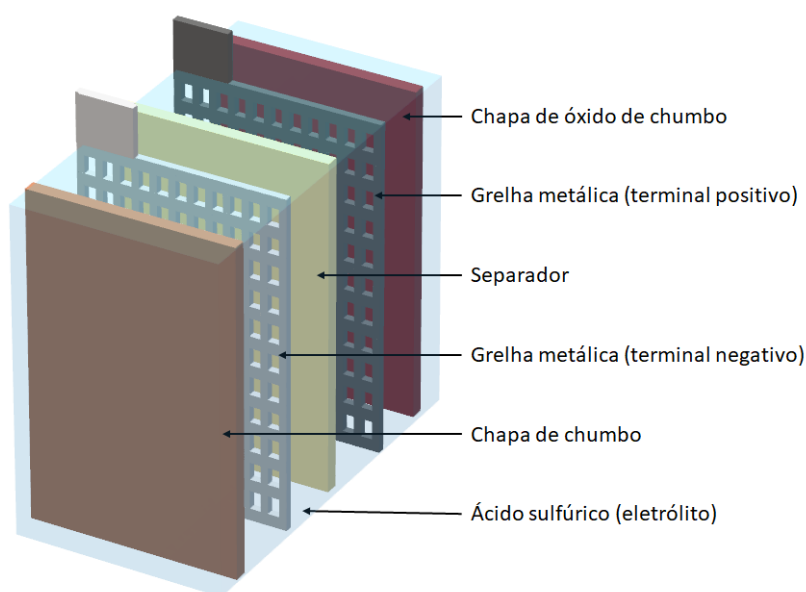


Figura 2.6: Esquema simplificado de uma célula de uma bateria de ácido de chumbo (com os componentes afastados). Uma bateria é composta por várias células ligadas em série de modo a obter uma determinada tensão aos seus terminais.

Quando a bateria é ligada a um circuito, iniciam-se reações de oxidação-redução entre as moléculas de água e os diversos iões e compostos iônicos, resultando numa libertação de elétrons no terminal negativo, que seguem para o circuito. Estas reações

ocorrem até ambos os elétrodos se transformarem maioritariamente em sulfato de chumbo, situação em que a bateria está descarregada, isto é, não possui energia química armazenada.

Esta situação é reversível, fornecendo energia à bateria. Colocando o terminal positivo a uma tensão elétrica superior à do terminal negativo, recorrendo a uma fonte de alimentação, origina-se um fluxo de eletrões com origem no terminal positivo em direção ao terminal negativo. Ocorrerão reações de oxidação-redução no sentido inverso, originando um terminal positivo maioritariamente composto por óxido de chumbo e um terminal negativo maioritariamente composto apenas por chumbo. Devido à normal degradação da bateria, alguns iões sulfato, constituintes do eletrólito, depositar-se-ão no fundo da bateria, deixando de entrar nas reações. Tal facto resulta na perda de capacidade da bateria ao longo da sua utilização.

Outra tecnologia que se encontra bastante em uso é a bateria de iões de lítio. Neste caso, o terminal positivo está em contacto com um composto de óxido metálico de lítio, o terminal negativo com grafite, e os dois estão em contacto com um eletrólito (que pode ser de várias naturezas e composições químicas) e isolados galvanicamente por um separador (figura 2.7).

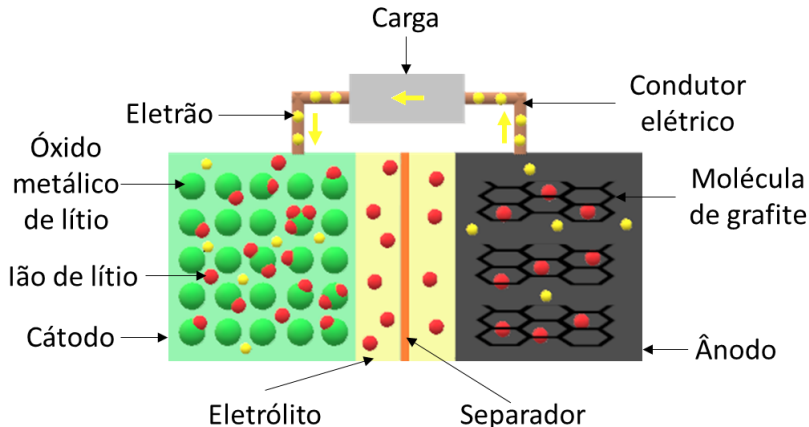


Figura 2.7: Esquema simplificado de uma bateria de iões de lítio.

No ato do carregamento da bateria, os iões mono-positivos de lítio são destacados do composto do terminal positivo e são depositados na grafite do terminal negativo onde captam um eletrão ficando eletricamente estáveis. É importante referir que a estabilidade do átomo de lítio no composto do terminal positivo é bastante superior do que no terminal negativo, daí existir um equilíbrio criticamente estável: o ião

de lítio é mantido no terminal negativo devido à existência dos eletrões livres (que se tornam eletrões de valência do átomo de lítio), que não conseguem atravessar o separador. Quando a bateria fornece energia a um circuito, os iões de lítio são forçados a integrar a estrutura do terminal positivo, atravessando o separador e os eletrões seguem para o circuito, até ao terminal positivo, gerando uma corrente elétrica.

2.3 Células de Combustível

As células de combustível constituem um método de produção de energia elétrica, recorrendo a reações eletroquímicas entre materiais que lhes são fornecidos (o combustível). Ao contrário das baterias, que armazenam energia, estas células são meios de produção de energia elétrica, equiparáveis, por exemplo, a grupos eletrogéneos constituídos por um alternador acoplado a um motor diesel bastante utilizados em navios da Marinha Portuguesa.

A estrutura de células de combustível do tipo *proton-exchange membrane* (*PEM*) assemelha-se à de uma bateria, contendo um ânodo e um cátodo separados por uma membrana que não conduz eletrões (*PEM*), e ligados a um circuito elétrico (Carrette, Friedrich, e Stimming, 2001).

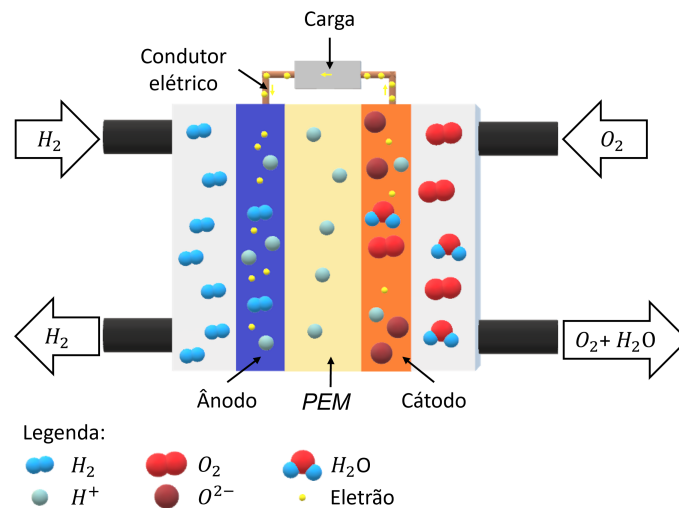


Figura 2.8: Esquema simplificado de uma célula de combustível.

Tomando o caso das células de combustível alimentadas por oxigénio e hidrogénio, estas são constituídas por dois eletrodos (de material poroso permitindo a

passagem de gases): um ânodo, alimentado por hidrogénio molecular (H_2) no estado gasoso, e um cátodo alimentado por oxigénio molecular (O_2) no estado gasoso; e um eletrólito. Os elétrodos estão em contacto com catalisadores que aceleram as reações de oxidação-redução.

No ânodo, os átomos de hidrogénio, que contêm um próton e um eletrão, libertam os seus eletrões. Os prótons conseguem atravessar a membrana, enquanto que os eletrões não. Quando a célula está ligada a um circuito elétrico os eletrões fluem pelo circuito até ao cátodo, gerando uma corrente elétrica. O oxigénio que é fornecido ao cátodo, sob a forma molecular, divide-se em dois iões de oxigénio ($2O^{2-}$). No cátodo, os iões, os prótons e os eletrões reorganizam-se, dando origem a moléculas de água. A equação 2.5 é a equação geral das reações que ocorrem numa célula de combustível de hidrogénio e oxigénio (Carrette, Friedrich, e Stimming, 2001).



Os submarinos da Marinha Portuguesa da Classe Tridente possuem um sistema de *AIP* (*Air Independent Propulsion*), que permite a produção de energia elétrica através de células de combustível de hidrogénio e oxigénio. Esta energia pode ser utilizada para alimentar o motor elétrico principal do submarino, quando este está submerso, permitindo a sua deslocação sem acesso ao ar atmosférico.

2.4 Aproveitamento de energia

Existem vários processos, naturais, artificiais e decorrentes da ação humana, em que está envolvida grande quantidade de energia, da qual, grande parte é dissipada. O aproveitamento dessa energia tem vindo a ser matéria de estudo há alguns anos, tendo sido desenvolvidos vários métodos de aproveitamento da mesma, denominada energia renovável, nomeadamente para a produção de energia elétrica.

2.4.1 Energia solar

Através do efeito fotovoltaico é possível gerar energia elétrica recorrendo à radiação solar. Este efeito assemelha-se ao efeito betavoltaico, explicado anteriormente, só que em vez de haver a interação de partículas β , existem fotões consti-

tuíntes da radiação solar.

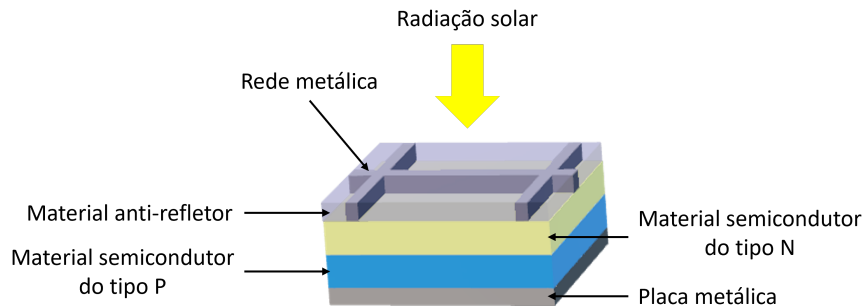


Figura 2.9: Esquema simplificado de uma célula fotovoltaica básica.

Na figura 2.9 encontra-se esquematizada uma célula fotovoltaica básica. A célula é constituída por uma rede metálica (responsável por captar os elétrons e conduzi-los para um circuito elétrico), uma camada de material anti-refletor (de modo a aumentar a absorção da radiação solar), uma camada de material semicondutor do tipo N, uma camada de material semicondutor do tipo P, e uma placa metálica (Luque e Hegedus, 2003).

Os dois materiais semicondutores formam um semicondutor de junção PN, esquematizado na figura 2.2. No caso do efeito fotovoltaico, os fótons fornecem energia suficiente aos pares elétron-lacuna para estes vencerem a barreira de potencial da zona de depleção, dirigindo-se os elétrons e as lacunas para as zonas onde são maioritários. Os elétrons são captados pela grelha metálica que por sua vez está ligada a um circuito elétrico, sendo este o terminal negativo. O circuito elétrico termina na placa metálica em contacto com o material do tipo P, o terminal positivo.

Uma célula fotovoltaica baseada em material semicondutor à base de silício, nas condições de fornecimento da máxima potência elétrica, apresenta geralmente uma tensão de aproximadamente 0.5 V e uma corrente de 3.5 A (Luque e Hegedus, 2003). Para se obter uma tensão de saída superior, ligam-se várias células em série. Ligando em paralelo, grupos com o mesmo número de células ligadas em série, aumenta-se a potência de saída das células. O conjunto de células ligadas entre si sobre uma mesma estrutura denomina-se painel fotovoltaico (figura 2.10).

Em comparação com o efeito betavoltaico, um fóton não é capaz de originar tantos pares elétrons-lacuna, mas por outro lado, existe maior densidade de fótons incidentes do que partículas β (devido ao baixo nível de radioatividade dos materiais utilizados). Estas diferenças são motivos pelos quais as fontes de energia betavol-

2.4. Aproveitamento de energia

taicas são muito menos eficientes que as fontes de energia fotovoltaicas (Zhou et al., 2021).

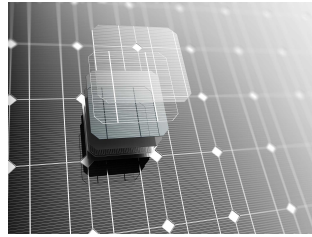


Figura 2.10: Célula fotovoltaica destacada de um painel fotovoltaico (EDP, 2020).

Existem painéis fotovoltaicos das mais variadas dimensões, tendo sido desenvolvidos e comercializados painéis portáteis para carregamento de pequenos equipamentos eletrônicos (figura 2.11).



Figura 2.11: Painel fotovoltaico portátil instalado numa mochila (Decathlon, 2022).

2.4.2 Energia eólica e energia hídrica

Os alternadores elétricos são constituídos por dois componentes fundamentais: o “rotor” que roda dentro de uma estrutura fixa conhecida por “estator”. Os dois componentes contêm materiais que permitem gerar campos eletromagnéticos, e o movimento de rotação dos campos eletromagnéticos gerados pelo rotor em relação aos materiais do estator (como enrolamentos de fios de cobre) permitem transformar a energia mecânica da rotação do rotor em energia elétrica.

Para obter a energia mecânica para a rotação do rotor, pode-se recorrer a energias renováveis, tais como a energia da movimentação de massas de ar (o vento), de locais de maior pressão atmosférica para locais de menor pressão atmosférica, conhecida como energia eólica; ou o aproveitamento da movimentação de massas de água de

loais de maior energia potencial para locais de menor energia potencial: energia hídrica.

O aproveitamento destas energias tem o mesmo princípio: a deslocação de um fluido. Esta deslocação faz rodar uma turbina (com um perfil aerodinâmico ou hidrodinâmico, consoante seja vento ou água, respetivamente), que está acoplada a um rotor cuja rotação no estator gera energia elétrica. Estas tecnologias são bastante utilizadas na produção da energia elétrica que é distribuída na rede elétrica dos países, em turbinas eólicas e barragens hidroelétricas (figura 2.12).



(a)



(b)

Figura 2.12: Fotografia de um parque eólico (2.12a) e da barragem hidroelétrica do Alqueva (2.12b) (EDP, 2018).

De forma a carregar pequenos dispositivos eletrónicos foram desenvolvidos vários equipamentos portáteis de aproveitamento das energias eólica e hídrica, como o *WaterLily* e o *WindLily* (figura 2.13). Este equipamentos possibilitam o aproveitamento de energia hídrica, eólica e na sua ausência, da força humana, através da rotação da sua turbina.



Figura 2.13: Equipamentos *WaterLily*, *WindLily* e acessórios (WaterLily, 2022).

2.4.3 Energia térmica

Quando as extremidades de um fio metálico condutor são colocadas a diferentes temperaturas, os elétrons da extremidade de temperatura superior ficam mais energéticos e deslocam-se no sentido da extremidade mais fria, gerando uma corrente elétrica. Este fenómeno é conhecido por efeito de Seebeck (Tawil e Zainal, 2018).

Este efeito ocorre em materiais semicondutores do seguinte modo:

- os semicondutores do tipo N apresentam um comportamento semelhante ao dos metais, em que os elétrons se deslocam para a extremidade mais fria do material, ficando esta carregada negativamente;
- na extremidade mais quente dos semicondutores do tipo P, os átomos encontram-se num estado mais energético, captando mais facilmente os elétrons que existem em menor quantidade do que as lacunas, resultando numa deslocação das lacunas para a extremidade mais fria do semicondutor, ficando esta carregada positivamente.

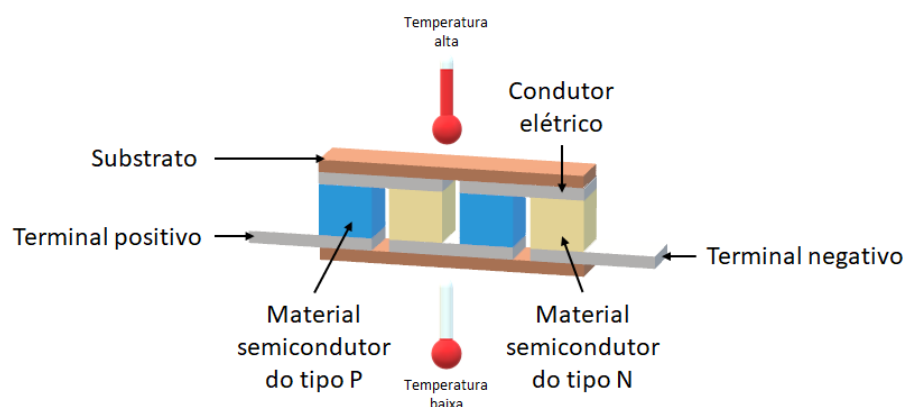


Figura 2.14: Esquema de um gerador termoelétrico.

A figura 2.14 é um esquema de um gerador termoelétrico básico, capaz de produzir energia elétrica através da diferença de temperaturas entre os seus dois substratos. Tal diferença de temperaturas pode ser obtida colocando um substrato em contacto com o corpo humano e o outro em contacto com a atmosfera.

2.4.4 Radiação

As ondas eletromagnéticas, utilizadas por sistemas de telecomunicações, radio-difusão e radioposicionamento transportam energia. Estas são geradas e emitidas por um transmissor (alimentado por energia elétrica) acoplado a uma antena, sendo capazes de gerar correntes elétricas noutra antena, que se encontra acoplada a um recetor.

Através de uma antena ligada a um circuito de condicionamento da corrente elétrica, uma parte da radiação eletromagnética recebida (dependente da gama de frequências de operação da antena) pode ser aproveitada para alimentar circuitos elétricos (Zungeru et al., 2012).

2.4.5 Triboeletricidade

Quando um material de certa natureza entra em contacto com um segundo material de outra natureza, os eletrões presentes nas superfícies de ambos os materiais reorganizam-se pelas moléculas de ambos, de modo a equilibrar o potencial eletroquímico causado pelas diferentes eletronegatividades dos átomos dos materiais (Zhu et al., 2020). Quando se separam, os eletrões podem não voltar ao material onde se encontravam inicialmente, permanecendo no segundo material com o qual estiveram em contacto. Deste modo, o primeiro material, que forneceu eletrões, fica carregado positivamente e o segundo material, que recebeu eletrões fica carregado negativamente. Este fenómeno denomina-se efeito triboelétrico, conhecido por causar “eletricidade estática”.

A série triboelétrica estabelece uma hierarquia entre materiais consoante a sua tendência para captar eletrões, designada de afinidade eletrónica, isto é, de ficarem carregados positivamente ou negativamente.

Para alimentar um circuito elétrico, conectam-se os seus terminais, um a cada material que se encontra eletrostaticamente carregado (um positivo e outro negativo).

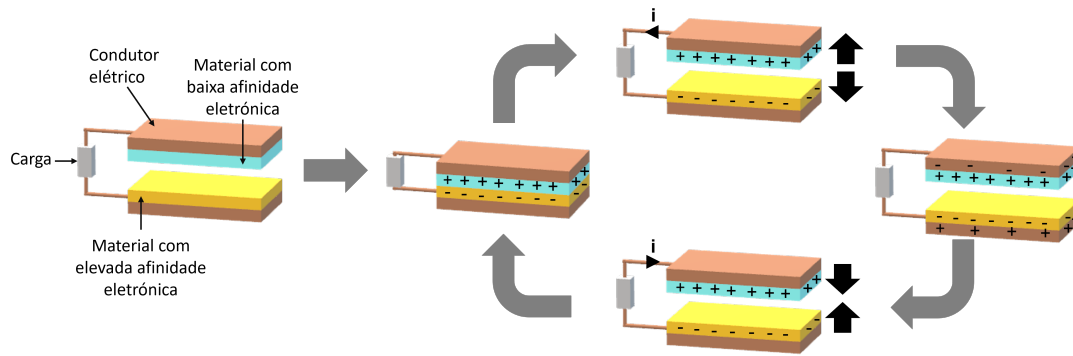


Figura 2.15: Representação do efeito triboelétrico.

Têm vindo a ser desenvolvidos nanogeradores triboelétricos, cada vez mais eficientes graças a integração de grandes quantidades de nanocomponentes, que apresentam dimensões e características que os tornam portáteis e passíveis de instalar em têxteis, por exemplo, para aproveitamento da energia do movimento do corpo humano (Zhu et al., 2020, Swanner et al., 2017)

2.4.6 Piezoeletricidade

Determinados materiais, quando sofrem uma deformação física, apresentam uma diferença de potencial elétrico nas suas extremidades. Estes materiais são materiais piezoeletricos.

A piezoeletricidade é um dos objetos de estudo desta dissertação, sendo abordada mais em pormenor no capítulo 3.

3. Piezoeletricidade

Em 1880 os irmãos Pierre e Jacques Curie descobriram o efeito piezoelétrico (do grego *piezin* que significa pressionar) que se traduz no aparecimento de uma diferença de potencial nas extremidades de um material, no seu caso, de um cristal de quartzo, quando este sofre uma deformação física (Jaffe, Cook e Jaffe, 1971).

No ano seguinte, em 1881, Gabriel Lippman, demonstrou teoricamente o seu recíproco: efeito piezoelétrico inverso, em que um cristal sofre uma deformação física quando as suas extremidades são submetidas a uma diferença de potencial, tendo sido comprovado experimentalmente de imediato.

Estas descobertas vieram a ser bastante implementadas na indústria bélica, mais tarde, no início do século XX, com o desencadeamento da Primeira Guerra Mundial, quando houve a necessidade de desenvolver equipamentos capazes de detetar os submarinos alemães (Uchino, 2017). No final da guerra surgiram os primeiros sistemas de *SONAR* (*sound navigation and ranging*) utilizando transdutores piezoelétricos, denominados hidrofones.

Na década de 1920 a 1930, observaram-se as propriedades de ressonância dos cristais de quartzo (que apresentam propriedades piezoelétricas), e produziram-se osciladores elétricos de cristal capazes de gerar um sinal elétrico periódico com uma frequência bastante exata (Heywang, Lubitz e Wersing, 2008).

3.1 O efeito piezoelétrico

3.1.1 Cristal de quartzo

O cristal de quartzo é constituído por moléculas de dióxido de silício (SiO_2), formadas por átomos de oxigénio (O) e de silício (Si). No cristal, as moléculas de SiO_2 reorganizam-se, ficando cada átomo de silício ligado a quatro átomos de oxigénio e cada átomo de oxigénio ligado a dois átomos de silício. Este rearranjo resulta em grupos de SiO_4 ligados entre si, que apresentam uma estrutura tetraédrica.

Os grupos de SiO_4 ligam-se em espiral, na direção do eixo z (coincidente com a reta que une as duas extremidades pontiagudas do cristal de quartzo da figura 3.1). Ao olhar de uma determinada perspetiva, é possível verificar uma disposição

hexagonal dos átomos de silício e de oxigénio (não se encontrando estes no mesmo plano).

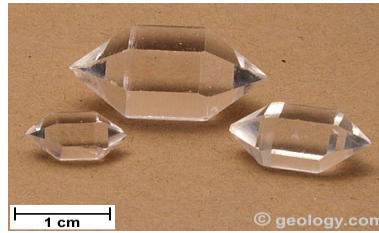


Figura 3.1: Cristais de quartzo (Geology.com, 2022).

O átomo de oxigénio apresenta uma eletronegatividade superior à do átomo de silício, pelo que apresenta maior tendência para atrair eletrões, ficando com uma carga elétrica ligeiramente negativa e o átomo de silício com uma carga elétrica ligeiramente positiva. Devido a este desequilíbrio entre cargas elétricas (momento dipolar), um par formado pelos dois diferentes átomos constitui um dipolo elétrico.

Num cristal de quartzo em repouso, os grupos de SiO_4 organizam-se de modo a que o cristal apresente um momento dipolar nulo (Uchino, 2017). Analisando a estrutura hexagonal da figura 3.2a, nota-se que o centro geométrico entre os três átomos de silício é coincidente com o centro geométrico entre os três átomos de oxigénio, justificando o momento dipolar nulo. Quando o cristal é pressionado, as moléculas rearranjam-se, e os dois centros geométricos deixam de coincidir, aparecendo um dipolo (figura 3.2b). Macroscopicamente todo o cristal sofre este efeito, resultando no aparecimento de uma diferença de potencial elétrico entre duas das suas extremidades.

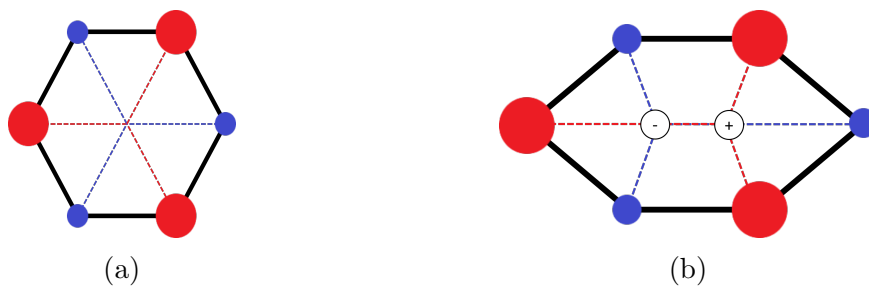


Figura 3.2: Representação dos átomos do cristal de quartzo em repouso (3.2a) e quando é pressionado (3.2b) (os átomos de oxigénio encontram-se representados a azul e os de silício a vermelho).

Quando se conectam as duas extremidades (com potenciais elétricos opostos) a

um condutor elétrico, os elétrons do condutor (pois o cristal é um material dielétrico) vão-se deslocar de acordo com o campo elétrico gerado pelo cristal, criando uma corrente elétrica convencional do polo positivo para o polo negativo. Os elétrons acumulam-se no polo positivo até este igualar o potencial elétrico do polo negativo. Nesse momento, extingue-se a diferença de potencial entre os dois polos e consequentemente, a corrente elétrica.

Quando o cristal deixa de ser pressionado, as moléculas regressam ao seu estado inicial, extinguindo-se o momento dipolar do cristal. No entanto, existe uma concentração de elétrons no anterior polo positivo, superior à do anterior polo negativo. Invertem-se deste modo os potenciais elétricos dos polos, gerando uma diferença de potencial e consequentemente uma corrente elétrica em sentidos inversos dos da primeira situação.

No caso oposto, do efeito piezoelétrico inverso, quando as extremidades do cristal são sujeitas a uma diferença de potencial elétrico, as suas moléculas vão-se deslocar segundo o campo elétrico, causando uma deformação do cristal.

3.1.2 Cerâmicas piezoelétricas

Ao contrário dos cristais, as cerâmicas piezoelétricas não apresentam uma estrutura cristalina, mas sim um conjunto de domínios, em que todos apresentam a mesma constituição molecular. As moléculas agregam-se consoante as suas diferentes polaridades, resultando em domínios cujas polaridades estão orientadas em múltiplas direções diferentes, e a cerâmica não apresenta momento dipolar, mesmo quando sofre deformações.

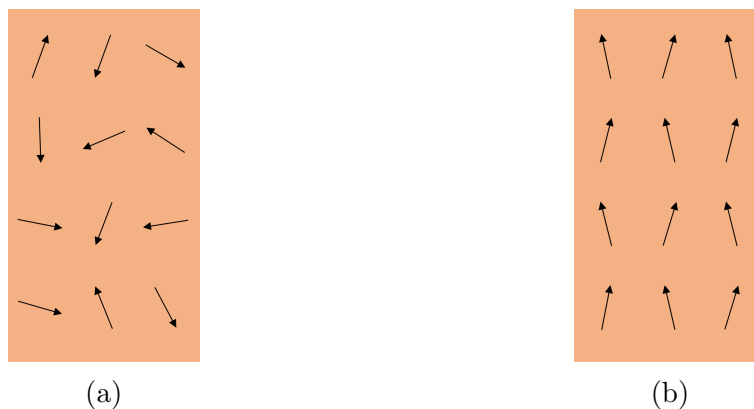


Figura 3.3: Cerâmica não polarizada (3.3a) e cerâmica polarizada (3.3b).

Para a cerâmica obter propriedades piezoelétricas consideráveis, é necessário orientar as polaridades desses domínios segundo uma direção principal: o processo da polarização. Estas cerâmicas apresentam a propriedade da ferroeletricidade. A ferroeletricidade refere-se à capacidade de alterar a polaridade de um material através da aplicação de um campo elétrico externo (Jaffe, Cook e Jaffe, 1971).

Quando as cerâmicas se encontram a uma temperatura igual ou superior à temperatura de Curie, estas sofrem rearranjos na sua estrutura molecular, ficando no estado de material paraelétrico, isto é, sem polaridade. O processo de polarização das cerâmicas envolve a colocação das mesmas sob um campo elétrico bastante intenso (na ordem dos milhares de Volt por milímetro) e o seu aquecimento e posterior arrefecimento, forçando o rearranjo das moléculas que as compõem, ficando polarizadas devido ao seu comportamento ferroelétrico abaixo da temperatura de Curie.

Quando a cerâmica se encontra em repouso, esta apresenta um determinado momento dipolar, derivado da sua polaridade. Ao conectar os seus terminais a um circuito elétrico, os eletrões deslocam-se de forma a anular a diferença de potencial entre os seus terminais. De modo semelhante ao cristal de quartzo, quando a cerâmica sofre uma deformação, na direção da sua polaridade, o seu momento dipolar varia, resultando na geração de corrente elétrica.

3.2 Materiais piezoelétricos

Os materiais piezoelétricos podem ser classificados em quatro grupos: cristais, cerâmicas, polímeros e compósitos poliméricos (Covaci e Gontean, 2020).

Os cristais são materiais sólidos cujos átomos que os compõem encontram-se dispostos num determinado padrão específico. Apenas os cristais que não possuem uma simetria central apresentam a propriedade piezoelétrica.

Os cristais foram o primeiro tipo de materiais piezoelétricos a serem estudados e aplicados, sendo ainda amplamente utilizados.

São cristais piezoelétricos o quartzo, o sal de Rochelle, a turmalina, entre outros. Existem também materiais orgânicos, como açúcar de cana, que apresentam a propriedade piezoelétrica.

As cerâmicas são agregados sólidos de domínios, em que cada domínio apresenta uma estrutura molecular idêntica. As cerâmicas distinguem-se dos cristais por não

apresentarem um padrão no seu todo, mas apresentam o mesmo padrão em cada domínio, que podem estar dispostos de várias formas, como foi abordado no sub-capítulo 3.1.

São cerâmicas piezoelétricas o titanato de bário ($BaTiO_3$, conhecido por BT) e o titanato zirconato de chumbo (conhecido por PZT). Ambas as cerâmicas apresentam uma estrutura perovskita (também designada por ABO_3). No caso do BT, quando se encontra a uma temperatura inferior à sua temperatura de Curie, o átomo de titânio não se encontra no centro da estrutura, assim como a estrutura se alonga numa direção, não apresentando simetria central e por isso apresenta polaridade.

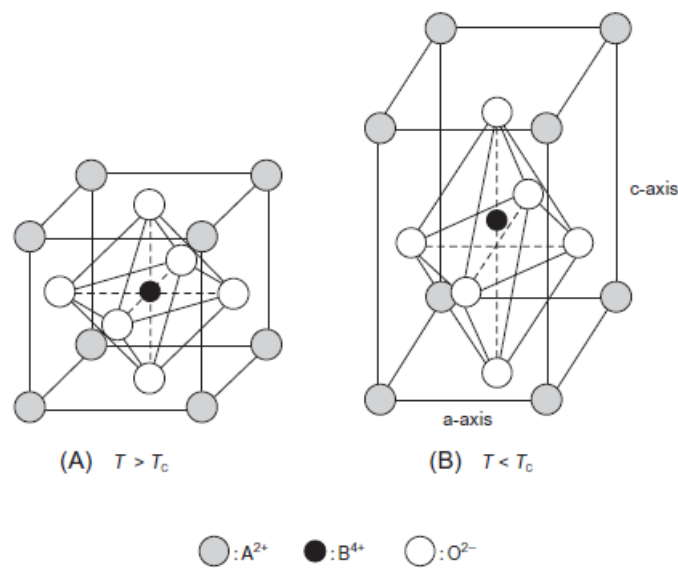


Figura 3.4: Esquema de estrutura perovskita (Uchino, 2017). No caso do BT, “A” e “B” correspondem a bário (Ba) e titânio (Ti), respetivamente. “T” e “ T_C ” representam temperatura e temperatura de Curie respetivamente.

Os polímeros são estruturas constituídas por monómeros (moléculas) que apresentam uma flexibilidade elevada relativamente às cerâmicas e aos cristais.

Um polímero piezolétrico bastante utilizado é o fluoreto de polivinilideno (PVDF). De modo a apresentar a propriedade piezoelétrica, o material também é sujeito a um processo de polarização, que pode ser idêntico ao das cerâmicas ou envolver extensão mecânica do material.

Normalmente os monómeros encontram-se dispostos de forma não polar, denominada fase α . Durante a polarização, o polímero é sujeito a um campo elétrico intenso e é aquecido a uma temperatura superior à sua temperatura de Curie, so-

frendo um rearranjo das suas moléculas, passando a estar na fase β . Por fim, quando é arrefecido e deixa de estar sujeito ao campo elétrico, as suas moléculas tornam a sofrer um novo rearranjo, ficando o material polarizado, na fase γ (Bera e Sarkar, 2017).

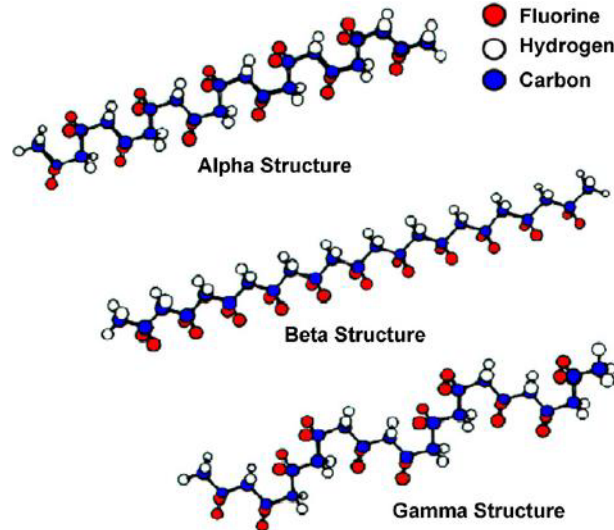


Figura 3.5: Fases do PVDF (Bera e Sarkar, 2017).

Os compósitos poliméricos são estruturas constituídas por vários tipos de materiais, conjugando características dos mesmos, como por exemplo a flexibilidade de um material com a qualidade das propriedades piezoelétricas de outro.

Um exemplo de um compósito são as poli-imidas de PZT, em que se consegue conjugar a flexibilidade e a resistência da poli-imida com as características piezoelétricas do PZT.

Na tabela 3.1 são apresentados os valores típicos da constante piezolétrica de deformação d_{33} , da constante piezolétrica de tensão g_{33} , do fator de acoplamento eletromecânico k_{33} , da permitividade elétrica relativa ϵ_r^T , do fator de qualidade mecânica Q_M e da temperatura de Curie T_C de materiais representativos de cada classe. Os materiais tabelados são o cristal de quartzo, as cerâmicas de BT, PZT 4 e PZT 5H (diferem nas quantidades de titânio e zircônio que o compõem) e o polímero PVDF. De seguida serão abordados os fundamentos teóricos destes parâmetros.

Tabela 3.1: Valores típicos de vários materiais piezoelétricos.

Parâmetro	Quartzo	BT	PZT 4	PZT 5H	PVDF
$d_{33} (\times 10^{-12} \text{ m V}^{-1})$	2.3	190	289	593	40
$g_{33} (\times 10^{-3} \text{ V m N}^{-1})$	57.8	12.6	26.1	19.7	340
k_{33}	0.1	0.33	0.58	0.65	0.12
ϵ_r^T	5	1700	1300	3400	10
Q_M	$> 10^5$	1300	500	65	20
$T_C (^{\circ}\text{C})$	573	120	328	193	80

3.3 Definições e notação

3.3.1 Localização no espaço

No estudo de materiais piezoelétricos, utilizam-se tensores (Jaffe, Cook e Jaffe, 1971 e IEEE Std 176-1987), para representar vários parâmetros em relação às várias direções no espaço. Os tensores tomam forma presente na fórmula 3.1, em que X representa uma propriedade, i representa a direção em que é medido o campo elétrico, e j representa a direção da deformação física do material.

$$X_{ij} \tag{3.1}$$

Os índices i e j podem tomar os valores 1, a 6, em que:

- 3 é a direção da polaridade (macroscópica) do material;
- 1 e 2 são direções arbitrárias, ortogonais a 3 e entre si;
- 4, 5 e 6 referem-se à tensão de corte nos planos normais às direções 1, 2 e 3, respetivamente. Por exemplo, a medição da deformação em relação à direção 4 traduz-se na medição da variação do ângulo entre as direções inicialmente ortogonais entre si, que se encontram no plano perpendicular à direção 1 (Jaffe, Cook e Jaffe, 1971), ou seja, a variação do ângulo entre as direções 2 e 3.

Existem propriedades ou grandezas que são mensuráveis em apenas três direções. Para demarcar essa diferença, admite-se que os índices k e l podem apenas tomar os valores de 1, 2 e 3.

3.3.2 Definições

A tensão mecânica T (pressão) aplicada a um objeto no estado sólido, gera uma deformação S (alteração das dimensões físicas do objeto) diretamente proporcional ao seu comportamento elástico (dado pelo módulo de Young Y , na fase linear).

$$S = YT \quad (3.2)$$

A deformação S representa a relação entre a alteração da dimensão ΔDim e a dimensão inicial Dim .

$$S = \frac{\Delta Dim}{Dim} \quad (3.3)$$

A polarização P de um material dielétrico exprime o momento dipolar por unidade de volume Vol . O momento dipolar macroscópico de um material é a soma de todos os momentos dipolares p de cada molécula.

$$P = \frac{\sum p}{Vol} \quad (3.4)$$

O campo elétrico E é gerado por partículas eletricamente carregadas, e define-se pela força elétrica exercida sobre uma carga elétrica num determinado ponto do espaço.

O campo de deslocamento elétrico D é uma grandeza similar à polarização (tem a mesma unidade), exprimindo o momento dipolar por unidade de volume de um material, tendo em conta a sua polarização e a sujeição um campo elétrico.

$$D = \epsilon_0 E + P \quad (3.5)$$

Em certos materiais a polarização é diretamente proporcional ao campo elétrico aplicado. A suscetibilidade elétrica χ_e define-se como a razão entre a polarização do material e o campo elétrico a que está sujeito.

$$P = \epsilon_0 \chi_e E \quad (3.6)$$

Para estes materiais é possível reescrever a equação 3.5 das formas apresentadas

na expressão 3.7, em que ϵ_r representa a permitividade elétrica relativa do material.

$$D = \epsilon_0 E + \epsilon_0 \chi_e E = \epsilon_0 E(1 + \chi_e) = \epsilon_0 \epsilon_r E \quad (3.7)$$

3.4 Parâmetros dos materiais piezoelétricos

Por forma a caracterizar os materiais piezoelétricos, definiram-se vários parâmetros, dos quais serão abordados: a constante piezoelétrica de deformação d , a constante piezoelétrica de tensão g , o fator de acoplamento eletromecânico k e o fator de qualidade mecânica Q_M (Jaffe, Cook e Jaffe, 1971, Uchino, 2017 e Li, 2021).

Constante piezoelétrica de deformação d

Existe uma relação proporcional entre a deformação S e o campo elétrico E aplicado a um material piezoelétrico, cuja constante de proporcionalidade é d (expressão 3.8).

$$S = dE \quad (3.8)$$

A constante d também caracteriza o efeito piezoelétrico direto segundo a expressão 3.9, que relaciona a polarização P do material com a tensão mecânica T aplicada ao mesmo.

$$P = dT \quad (3.9)$$

Constante piezoelétrica de tensão g

A constante g é a razão entre o campo elétrico gerado pelo material e a tensão mecânica aplicada, no caso do efeito piezoelétrico direto (expressão 3.10). No caso inverso representa a razão entre a deformação mecânica gerada e o deslocamento elétrico aplicado ao material (expressão 3.11).

$$E = gT \quad (3.10)$$

$$S = gD \quad (3.11)$$

As constantes d e g relacionam-se segundo as expressões 3.7, 3.9 e 3.10, da forma presente na expressão 3.12.

$$\frac{d}{g} = \epsilon_0 \epsilon_r \quad (3.12)$$

Fator de acoplamento eletromecânico k

O fator de acoplamento eletromecânico relaciona a quantidade de energia potencial mecânica obtida através do fornecimento de energia elétrica ao material, no caso do efeito piezoelétrico inverso (expressão 3.13), ou a quantidade de energia potencial elétrica gerada pelo fornecimento de energia mecânica ao material (efeito piezoelétrico direto, expressão 3.14).

$$k = \sqrt{\frac{\text{Energia potencial mecânica gerada}}{\text{Energia elétrica fornecida}}} \quad (3.13)$$

$$k = \sqrt{\frac{\text{Energia potencial elétrica gerada}}{\text{Energia mecânica fornecida}}} \quad (3.14)$$

Tomando o caso do efeito piezoelétrico inverso, a energia elétrica fornecida ao material pode ser calculada através da expressão 3.16, baseada na expressão 2.2, em que a capacitância refere-se à capacitância do material (expressão 3.15), relacionada com a permitividade elétrica relativa do material ϵ_r , a área A da superfície do material e a espessura l do material. A tensão elétrica aos terminais do material é representada por V .

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{l} \quad (3.15)$$

$$Energia_{elétrica} = \frac{1}{2}CV^2 \quad (3.16)$$

Define-se ϵ^T como a permitividade elétrica do material que sofre uma tensão mecânica constante.

$$\epsilon^T = \epsilon_0 \epsilon_r^T \quad (3.17)$$

$$Energia_{elétrica} = \frac{1}{2} \frac{\epsilon^T A}{l} (El)^2 = \frac{1}{2} \epsilon^T Al E^2 \quad (3.18)$$

O cálculo da energia mecânica tem por base a lei de Hooke (expressão 3.19), em que F_e é a força elástica exercida pelo material, k_e é a constante elástica do material e Δl é a variação da espessura do material.

$$F_e = k_e \Delta l \quad (3.19)$$

A energia potencial elástica é dada pela expressão 3.20.

$$Energia_{mecânica} = \frac{1}{2} k_e (\Delta l)^2 \quad (3.20)$$

A constante elástica da mola pode ser escrita sob a a forma da expressão 3.21, em que s^E é a flexibilidade do material (ou seja, é o inverso do módulo de Young) sob influência de um campo elétrico constante.

$$k_e = \frac{A}{s^E l} \quad (3.21)$$

Através das equações 3.3, 3.20 e 3.21 é possível estabelecer as igualdades presentes na expressão 3.22.

$$Energia_{mecânica} = \frac{1}{2} \frac{A}{s^E l} (\Delta l)^2 \frac{l}{l} = \frac{1}{2} \frac{Al}{s^E} S^2 \quad (3.22)$$

Através das expressões 3.8, 3.13, 3.18 e 3.22 é possível obter a igualdade 3.23.

$$k^2 = \frac{d^2}{s^E \epsilon^T} \quad (3.23)$$

Fator de qualidade mecânica Q_M

O fator de qualidade mecânica é uma figura de mérito adimensional que representa as perdas mecânicas do material. Pode ser calculado a partir das expressões 3.24 e 3.25.

$$Q_M = \frac{f_s}{f_2 - f_1} \quad (3.24)$$

O parâmetro f_s representa a frequência de ressonância série do material, e f_1 e f_2 delimitam uma banda de frequências em que a admitância do material é igual ou superior a -3 dB da admitância máxima.

$$Q_M = \frac{\sqrt{\frac{L_s}{C_s}}}{R_s} \quad (3.25)$$

Os parâmetros L_s , C_s e R_s são abordados no subcapítulo 3.5.

Equações constitutivas da piezoeletricidade

Utilizando os parâmetros dos materiais piezoelétricos, torna-se possível caracterizar o seu estado, analisando em simultâneo interações elétricas e mecânicas, através das equações constitutivas da piezoeletricidade (a equação 3.26 relativa ao efeito piezoelétrico inverso e a equação 3.27 relativa ao efeito piezoelétrico).

$$S_i = s_{ij}^E T_j + d_{li} E_l \quad (3.26)$$

$$D_l = d_{li} T_i + \epsilon_{lk}^T E_k \quad (3.27)$$

3.5 Circuito elétrico equivalente

O comportamento elétrico dos materiais piezoelétricos pode ser expresso através de um circuito elétrico equivalente. O circuito equivalente, é constituído por uma resistência R_s , uma indutância L_s e duas capacitâncias C_s e C_p , quando o cristal oscila a uma frequência próxima das suas frequências de ressonância (figura 3.6).

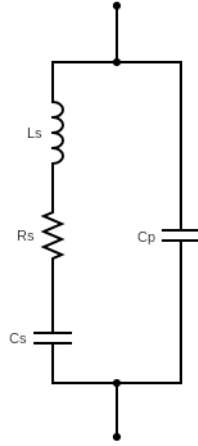


Figura 3.6: Circuito elétrico equivalente de um material piezoelétrico.

Os componentes em série são obtidos por analogia de um sistema mecânico, em que a resistência R_s representa as perdas de energia no material (equivalente a um amortecedor), a indutância L_s representa a sua massa e a capacitância C_s representa a elasticidade do material (equivalente a uma mola). A capacitância em paralelo C_p refere-se à capacitância do material tendo em conta a colocação dos elétrodos.

Considerando um material sem perdas, é possível exprimir a sua impedância $\bar{Z}$ através da expressão 3.28.

$$\bar{Z} = \frac{1}{\frac{1}{j\omega C_p} + \frac{1}{j\omega L_s + \frac{1}{j\omega C_s}}} \quad (3.28)$$

A expressão 3.28 pode ser escrita da forma da expressão 3.29, sendo possível identificar duas frequências de ressonância: a frequência de ressonância série f_s e a frequência de ressonância paralelo f_p , que são muito próximas.

$$\bar{Z} = \frac{1}{j\omega C_p} \frac{-\omega^2 + \frac{1}{L_s C_s}}{-\omega^2 + \frac{C_p + C_s}{L_s C_p C_s}} \quad (3.29)$$

$$f_s = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{L_s C_s}} \quad (3.30)$$

$$f_p = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{\frac{L_s C_s C_p}{C_s + C_p}}} \quad (3.31)$$

Incluindo a resistência de perdas R_s , a impedância do material é calculada através da associação em paralelo das impedâncias $\bar{Z}_s$ e $\bar{Z}_p$ (expressão 3.32).

$$\bar{Z} = \bar{Z}_s // \bar{Z}_p = \frac{\bar{Z}_s \times \bar{Z}_p}{\bar{Z}_s + \bar{Z}_p} \quad (3.32)$$

$$\bar{Z}_s = R_s + j\omega L_s + \frac{1}{j\omega C_s} \quad (3.33)$$

$$\bar{Z}_p = \frac{1}{j\omega C_p} \quad (3.34)$$

A reactância X do material (a parte imaginária da impedância) encontra-se graficamente representada na figura 3.7, onde é possível verificar que o material apresenta um carácter indutivo (reactância positiva) na banda de frequências delimitada pelas duas frequências de ressonância, e um carácter capacitivo (reactância negativa) fora dessa banda (Jabbar et al., 2017).

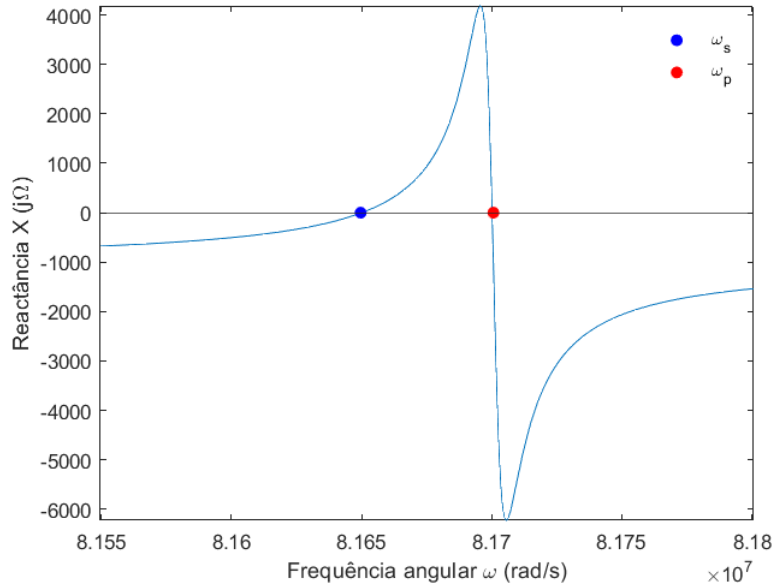


Figura 3.7: Reactância de um material piezoelétrico cujos parâmetros são: $R_s = 100 \Omega$, $L_s = 10 \text{ mH}$, $C_s = 15 \text{ fF}$ e $C_p = 12 \text{ pF}$.

Utilizado como gerador elétrico, o esquema elétrico geralmente utilizado (figura 3.8) é constituído por uma fonte de corrente I_s , a capacitância do material desligado de circuitos C_p e a resistência de perdas R_s que exprime as perdas no dielétrico

(Ramadass e Chandrakasan, 2010). Com base na figura 3.7 é possível concluir que um gerador piezoelétrico apresenta uma alta impedância para frequências distantes das frequências de ressonância, ou seja, o material pode gerar tensões elevadas mas correntes baixas.

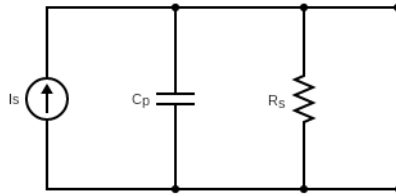


Figura 3.8: Esquema elétrico equivalente de um gerador piezoelétrico.

3.6 Aplicações

Os materiais piezoelétricos são utilizados em diversas áreas, em aplicações bastante distintas, nomeadamente em utensílios do dia-a-dia (como isqueiros e esquentadores), alarmes, sensores, osciladores eletrónicos (em relógios e em equipamentos eletrónicos), em sistemas eletromecânicos (como amortecedores) e em sistemas de aproveitamento de energia.

Aparelhos de ignição

Em sistemas de combustão de gases, como são os casos dos isqueiros e dos esquentadores, é comum terem incorporado um aparelho de ignição piezoelétrico. Este dispositivo é geralmente constituído por um material piezoelétrico, ao qual se ligam dois condutores, cujas outras extremidades se encontram desligadas de outro elemento (isto é, o circuito elétrico encontra-se aberto). Existe um sistema mecânico composto por um percutor inserido numa calha e uma mola de compressão. No início o percutor está bloqueado (através de uma força de atrito estático), e a mola é comprimida através de uma força (como a força humana) acumulando energia potencial elástica.

Quando a mola acumula certo nível de energia, o percutor supera o atrito estático e é projetado pela mola contra o material piezoelétrico, sendo a energia potencial elástica da mola transformada em energia cinética do percutor. Por sua vez quando o percutor embate no material piezoelétrico, este gera uma diferença de potencial.

As extremidades dos elétrodos encontram-se uma determinada distância tal que a referida diferença de potencial é suficiente para formar um arco elétrico entre si, que ao entrar em contacto com o gás e o oxigénio atmosférico dá origem à combustão do gás.

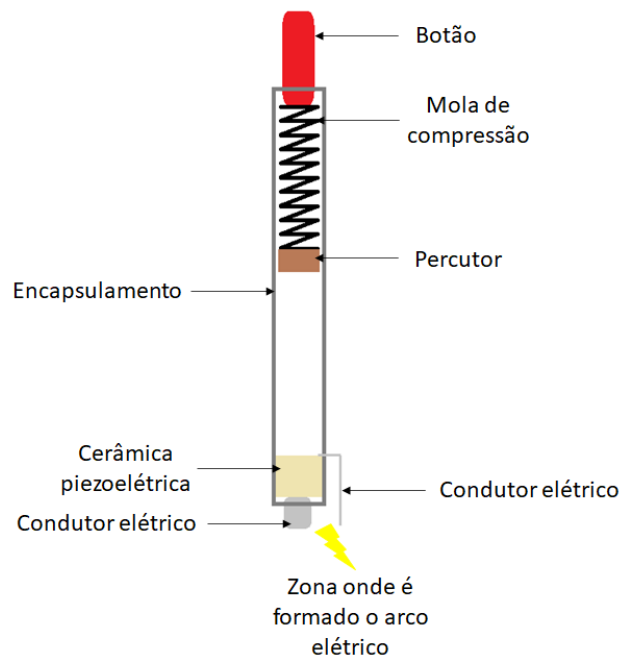


Figura 3.9: Esquema simplificado de um aparelho de ignição piezoelétrico.

Alarmes sonoros

São bastante utilizados alarmes sonoros que consistem num material piezoelétrico submetido a uma tensão elétrica alternada com determinada frequência, o que leva a que o material sofra deformações em sentidos opostos, levando à vibração de outro material. Em certas frequências, a vibração mecânica é suficientemente amplificada de modo a ser audível pelo ouvido humano.

Este princípio também é utilizado nos sistemas de *SONAR* ativos, em que é transmitida uma onda mecânica (acústica) de modo a gerar ecos quando colide em alvos.

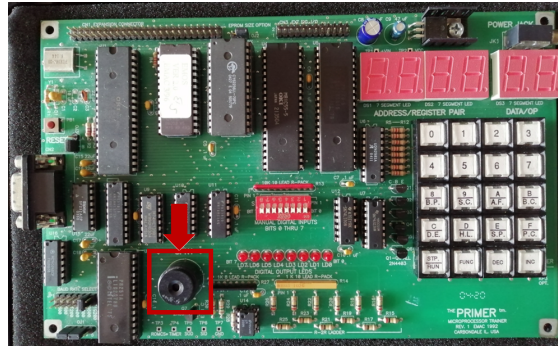


Figura 3.10: Campainha piezoelétrica inserida num *primer* do microprocessador INTEL 8085 da EMAC.

Sensores

Os materiais piezoelétricos são considerados “*smart materials*” (materiais inteligentes) dada a sua capacidade de sofrer alterações em propriedades internas como resposta a estímulos externos (Bhalla et al., 2017). Devido a esta capacidade, os materiais piezoelétricos são bastante aplicados em sensores eletrônicos de medição de grandezas mecânicas (através do efeito piezoelétrico direto).

Um dos primeiros sensores piezoelétricos foi desenvolvido pelos irmãos Curie (por volta de 1889), antes da descoberta da radioatividade, tendo sido bastante utilizado por Pierre e por Marie Curie no estudo da mesma. Trata-se do aparelho piezoelétrico de Curie constituído por um cristal de quartzo (em forma tira), suspenso pela extremidade superior a uma estrutura de suporte, e na extremidade inferior encontra-se suspenso um prato de balança.



Figura 3.11: Aparelho piezoelétrico desenvolvido pelos irmãos Curie (Historical Medical Library, 2021).

Ao colocar massas conhecidas no prato da balança geram-se cargas elétricas nas extremidades do cristal (efeito piezoelétrico). Utilizando um eletrômetro de quadrantes e um cronômetro é possível medir com precisão o tempo que um material radioativo (dentro de uma câmara de ionização) gera a quantidade de cargas elétricas igual às geradas pela massa no aparelho piezoelétrico. Deste modo é possível estudar com bastante precisão a radioatividade dos materiais (relacionada com o tempo de produção das cargas elétricas), através de correntes elétricas muito reduzidas (na ordem do micro Ampère ou inferior).

Atualmente, para medir vibrações e movimento são frequentemente utilizados acelerômetros piezoelétricos. Estes são constituídos por um material piezoelétrico em contacto com dois condutores elétricos nas suas faces e com uma massa m , envolvidos por um encapsulamento.

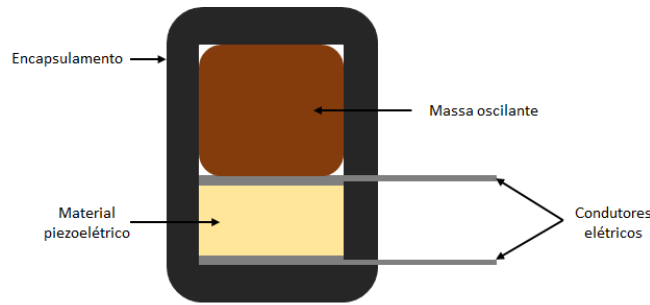


Figura 3.12: Esquema simplificado de um acelerômetro piezoelétrico.

Quando o acelerômetro sofre uma aceleração a , a massa m exerce uma força F sobre a área do material piezoelétrico A , segundo a lei fundamental da dinâmica (equação 3.35).

$$F = ma \quad (3.35)$$

Essa força exerce uma tensão mecânica T sobre o material piezoelétrico, dada pela expressão 3.36.

$$T = \frac{F}{A} \quad (3.36)$$

Através da equação 3.10, é possível relacionar a tensão mecânica com o campo elétrico gerado pelo material e daí calcular a aceleração que o equipamento sofreu.

Os materiais piezoelétricos são também utilizados em sensores na área da medicina, como em equipamentos de ecografia; na área marítima são utilizados em sistemas de *SONAR*, como em sondas de batimetria, sistemas de localização de cardumes; na área militar em equipamentos de ASW (*anti-submarine warfare*); são também bastante utilizados em microfones.

Atuadores e motores

São utilizados atuadores piezoelétricos, que através do efeito piezoelétrico inverso sofrem uma deformação mecânica quando sujeitos a um campo elétrico externo. Esta deformação é controlada com elevado grau de precisão, pelo que, uma das suas aplicações é no controlo de posicionamento de micro-espelhos em sistemas óticos (Gao et al., 2019). Através da combinação de várias cerâmicas num só objeto é possível obter diferentes tipos de deformações mecânicas, tal como gerar uma curvatura.

Existem também motores piezoelétricos, que baseiam o seu funcionamento no efeito piezoelétrico inverso, no atrito e na inércia do movimento. No caso dos motores piezoelétricos rotativos, o estator consiste numa circunferência formada por elementos piezoelétricos que são sujeitos a um campo elétrico sinusoidalmente variável no tempo, resultando numa onda mecânica que se propaga pela circunferência. Em cima dessa circunferência é colocado o rotor (de material não condutor), cuja superfície apresenta um coeficiente de atrito suficiente para tomar o movimento rotativo gerado pela onda mecânica.

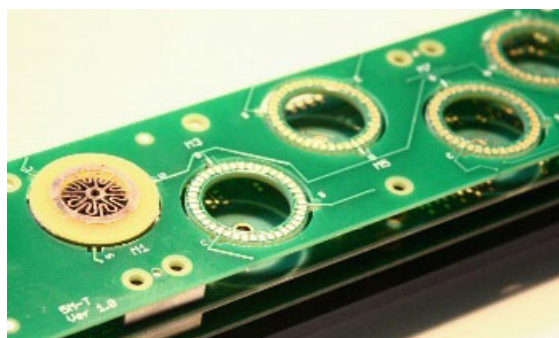


Figura 3.13: Cinco estatores de motores piezoelétricos rotativos inseridos numa placa de circuito impresso, em que o mais à esquerda apresenta um rotor (PCBMotor, 2012).

Osciladores de cristal

Os materiais piezoelétricos, nomeadamente os cristais de quartzo, apresentam propriedades capacitivas, indutivas e resistivas bastante estáveis com o tempo e com a temperatura.

O cristal de quartzo é muito utilizado em osciladores elétricos, nomeadamente em osciladores LC cujo funcionamento depende de elementos indutivos e capacitivos. Estes circuitos são responsáveis por gerar o sinal elétrico que garante o sincronismo dos componentes de equipamentos eletrónicos (sinal de *clock*). Nestes osciladores, para ser satisfeito o critério de Barkhausen, o cristal deve apresentar uma reactância positiva, comportamento que se verifica numa estreita banda de frequências, conferindo ao oscilador uma elevada precisão.

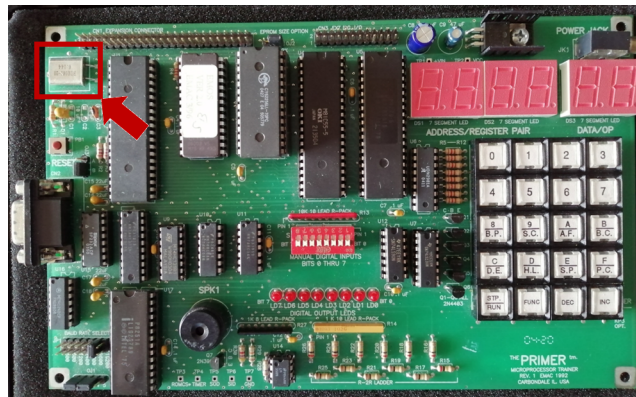


Figura 3.14: Cristal FOX061 inserido num *primer* do microprocessador INTEL 8085 da EMAC.

Sistemas eletromecânicos

Em sistemas mecânicos onde é necessária a dissipação de energia de modo a evitar sobre-oscilações são frequentemente utilizados amortecedores hidráulicos, que transformam energia cinética em calor.

Podem ser utilizados amortecedores piezoelétricos, que consistem num material piezoelétrico unido ao sistema mecânico oscilante, que se encontra ligado a um circuito elétrico com uma determinada resistência elétrica de carga. Deste modo, a energia cinética é convertida em calor através do efeito de Joule, por meio do circuito elétrico, atenuando as oscilações mecânicas.

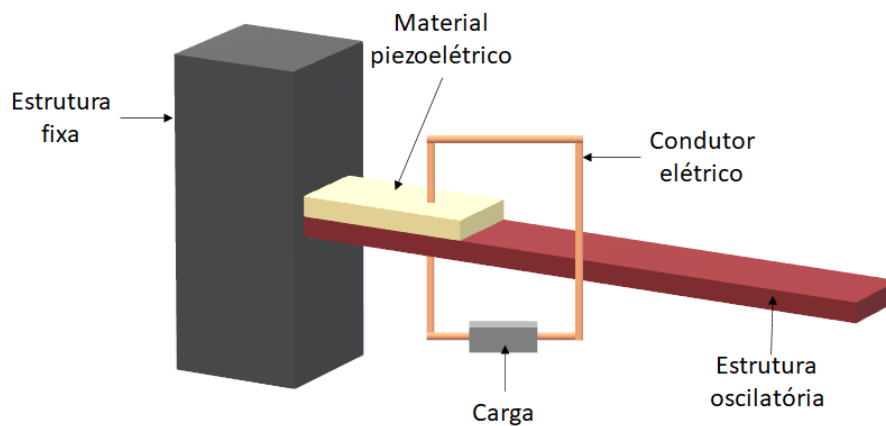


Figura 3.15: Esquema simplificado de um amortecedor piezoelétrico.

Aproveitamento de energia

No capítulo 2 foi referida a possibilidade de aproveitar energia através da piezoelectricidade. Este processo é realizado através de vários métodos.

Um dos métodos é baseado no princípio dos amortecedores piezoelétricos, em que o circuito elétrico se trata de um circuito de captação de energia. A energia cinética aproveitada é proveniente, por exemplo, de vibrações indesejadas de um motor rotativo.

Existem vários métodos de aproveitamento de energia em grande escala, com recurso a materiais piezoelétricos, tais como sistemas que aproveitam a energia do trânsito rodoviário, através da pressão que os automóveis exercem sobre o solo, ou em lombas; através do aproveitamento das vibrações de pontes; sistemas que aproveitam energia de fenómenos naturais, tais a ondulação marítima e o vento (Sezer e Koç, 2021).

Têm vindo a ser desenvolvidos sistemas de aproveitamento de energia associada ao movimento humano, possibilitando a alimentação elétrica de equipamentos eletrónicos portáteis.

Para este fim podem ser utilizados materiais piezoelétricos flexíveis integrados no vestuário, num sistema esquematizado na figura 3.16.

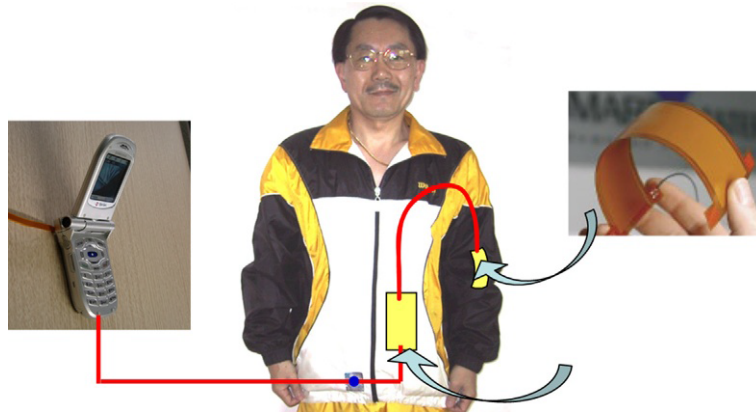


Figura 3.16: Esquema de um sistema de aproveitamento de energia motriz humana para produção de energia elétrica, com recurso a materiais piezoelétricos (Uchino, 2017).

Foram também desenvolvidos sistemas piezoelétricos de aproveitamento de energia integrados em calçado, por forma a aproveitar a energia dissipada na locomoção humana. Estes sistemas são abordados no capítulo 4.

4. Estado da arte

Os sistemas de aproveitamento de energia com recurso a materiais piezoelétricos têm vindo a ser objeto de estudo de vários investigadores a nível global, tendo o número de trabalhos publicados sobre o tema aumentado substancialmente desde o início do século (Sezer e Koç, 2021).

Estes sistemas podem ser aplicados em sistemas mecânicos, onde há quantidade significativa de energia mecânica dissipada, possibilitando a produção de energia elétrica com potências na ordem do Watt; por outro lado, podem ser aplicados para aproveitamento de menores quantidades de potência (na ordem de grandeza do mW ou do μ W), em equipamentos utilizados por humanos, tal como calçado, vestuário (figura 3.16), mochilas, entre outros.

No caso das forças militares terrestres, os geradores piezoelétricos podem ser aplicados em vários equipamentos, como no calçado, aproveitando a energia dissipada na locomoção, no vestuário, aproveitando a energia dos movimento voluntários e involuntários do corpo, em pontos de suspensão de material, como nas alças de mochilas ou coletes, em que para além de ser aproveitada energia, também contribui para a diminuição do movimento dos mesmos em relação ao corpo.

Visando a sua utilização por forças militares terrestres, relativamente a outras fontes de energia abordadas no capítulo 2, os geradores piezoelétricos apresentam as vantagens de serem facilmente instalados em material individual (como vestuário, ou calçado), sendo bastante discretos e de não estarem dependentes na disponibilidade de fontes de energia externas (como é o caso da energia solar por exemplo). Constituem desvantagens o facto de só ser produzida energia quando o militar se movimenta e a potência elétrica gerada não é significativa em relação a outros geradores com as mesmas dimensões (Swanner et al., 2017).

4.1 Geradores piezoelétricos

Aproveitamento de vibrações mecânicas

Kim et al. (2005) realizaram ensaios de aproveitamento de energia utilizando cerâmicas de PZT, entre dois címbalos de aço, pré-tensionados através de uma prensa

hidráulica que sofrem uma vibração gerada por uma fonte de vibração (figura 4.1). Nas experiências foram utilizadas várias cerâmicas de PZT com 29 mm de diâmetro, de diferentes espessuras, pré-tensionadas a uma força de 67 N, sujeitas a uma força oscilatória de 70 N a uma frequência de 100 Hz (Kim et al., 2005). Foi registrada uma potência elétrica de 52 mW fornecida a uma resistência de 400 k Ω .

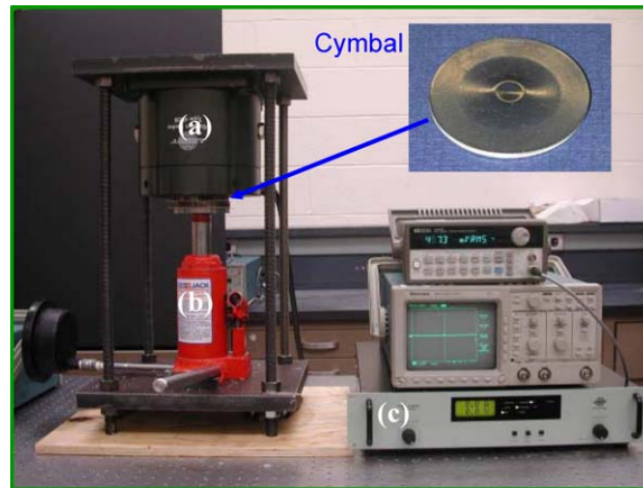


Figura 4.1: Experiência de aproveitamento de energia de movimento oscilatório, utilizando uma fonte de vibração (a), uma prensa hidráulica (b) e um amplificador de potência (c) (Kim et al., 2005).

Este modelo de aproveitamento de energia pode ser implementado, por exemplo, nos apoios da estrutura de suporte de um motor rotativo, em que existe um pré-tensionamento das cerâmicas por parte do peso da estrutura e variação da tensão gerada pelo movimento rotativo do motor.

Aproveitamento de energia de locomoção humana

Hwang et al. (2015) desenvolveram um “mosaico piezoelétrico”, estrutura que produz energia elétrica quando é pisada. A estrutura é constituída por uma placa que serve de base, uma placa superior a qual estabelece contacto com o pé humano, à qual se encontra conectada a plataforma que contém o material piezoelétrico. Toda a estrutura superior encontra-se suspensa em quatro molas de compressão instaladas nos cantos das placas (figura 4.2).

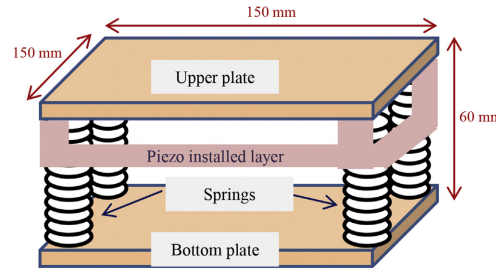


Figura 4.2: “Mosaico piezoelétrico” desenvolvido por Hwang et al. (2015).

Na plataforma intermédia existem quatro chapas de aço inoxidável encastradas em cada um dos lados, de modo idêntico à figura 3.15, com 62 mm de comprimento, 37 mm de largura e 0.2 mm de altura. Sobre cada chapa assenta uma película de PZT-PZNM (compósito polimérico formado por PZT, niobato de chumbo e magnésio, abreviado por PMN, e niobato chumbo e zinco, abreviado por PZN) com 47 mm de comprimento, 32 mm de largura e 0.2 mm de altura (figura 4.3).

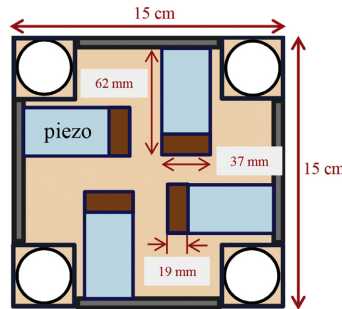


Figura 4.3: Plataforma intermédia que contém o material piezoelétrico (Hwang et al., 2015).

Quando o mosaico é pisado, as placas superior e intermédia sofrem um deslocamento para baixo, e a aceleração do sistema leva à vibração das chapas de aço. Quando a plataforma deixa de ser pisada, as molas restituem a posição inicial das plataformas, levando a uma nova vibração das chapas de aço. Realizaram-se vários ensaios para determinar a frequência natural do sistema oscilatório, nos quais se variou a massa da extremidade livre das chapas metálicas (colocando massas de 10 g, 30 g e 50 g). As medições foram feitas através de quedas livres de várias esferas de aço com massas diferentes, da altura de 1 m. Para carga foram utilizadas várias resistências no intervalo de 3 k Ω até 100 k Ω e realizados vários ensaios com apenas uma película e com as quatro películas ligadas em paralelo.

O valor ótimo teórico da impedância da carga utilizada foi calculado através do teorema da máxima transferência de potência. Para a carga estar adaptada, a sua resistência deve ser igual à resistência elétrica do material piezoelétrico e reactância da carga deve ser positiva e igual ao inverso da reactância do material piezoelétrico, o que na prática se trata de uma bobine de grandes dimensões. Uma vez que o uso de uma bobine de tais dimensões se torna impraticável, utilizou-se uma carga puramente resistiva cujo valor é igual ao valor do módulo da impedância do material piezoelétrico. O módulo da impedância de cada película piezoelétrica, Z_{piezo} é calculado através do circuito elétrico apresentado na figura 3.8 (expressão 4.1).

$$Z_{piezo} = \frac{1}{\sqrt{(\omega C_p)^2 + \left(\frac{1}{R_s}\right)^2}} \quad (4.1)$$

Na expressão 4.1 o termo que contém R_s é menor do que o termo que contém C_p , daí o módulo da impedância da película piezoelétrica é simplificado e igual apenas ao módulo da impedância de C_p . Por sua vez o módulo da impedância de C_p é dado pela expressão 4.2. O valor de C_p é calculado através das expressões 3.12 e 3.15.

$$Z_{piezo} = Z_{C_p} = \frac{1}{\omega C_p} \quad (4.2)$$

Nos ensaios realizados os investigadores observaram que com a massa de 10 g na extremidade livre da chapa de aço obtém-se uma maior tensão eficaz aos terminais do gerador, apresentando o sistema uma frequência natural de 22.5 Hz. Para a frequência de 20 Hz, segundo a equação 4.2, sabendo que o valor do módulo da impedância em paralelo é 25% do valor do módulo da impedância de uma película isolada, concluíram que a carga resistiva adaptada é de aproximadamente 15 kΩ.

Utilizando uma esfera de aço de 80 g, massas de 10 g nas extremidades das chapas de aço e uma resistência de carga de 15 kΩ, foi registada uma potência média de 770 μW e uma potência de pico de 55 mW. Nas mesmas condições, quando um indivíduo pisou o a estrutura, foram registadas uma potência média de 120 μW e uma potência de pico de 53.1 mW.

4.2 Geradores piezoelétricos em calçado

Os geradores piezoelétricos implementados em calçado utilizam diversos materiais piezoelétricos dispostos de várias formas, as quais se podem classificar em três tipos (Xin et al., 2016): tipo placa (*flat plate type*), tipo arco (*arch type*) e tipo vara encastrada (*cantilever type*).

Nas estruturas tipo placa o material piezoelétrico apresenta-se na forma plana, podendo ser composto por uma ou mais películas de PVDF ou compósitos poliméricos, por exemplo, e a energia elétrica obtida é proveniente da deformação perpendicular à base das placas.

As estruturas tipo arco são concebidas de modo a induzir uma maior deformação do material piezoelétrico do que o tipo placa. São habitualmente utilizadas a estrutura em címbalo e a estrutura dimórfica. A estrutura em címbalo caracteriza-se por uma placa circular de um material piezoelétrico com um material em forma de címbalo colado em todo o seu perímetro. Quando o címbalo é pressionado transversalmente, a placa piezoelétrica é esticada no seu todo, na direção radial. A estrutura dimórfica é uma estrutura que possui dois materiais piezoelétricos ligados a um mesmo condutor elétrico (material não piezoelétrico).

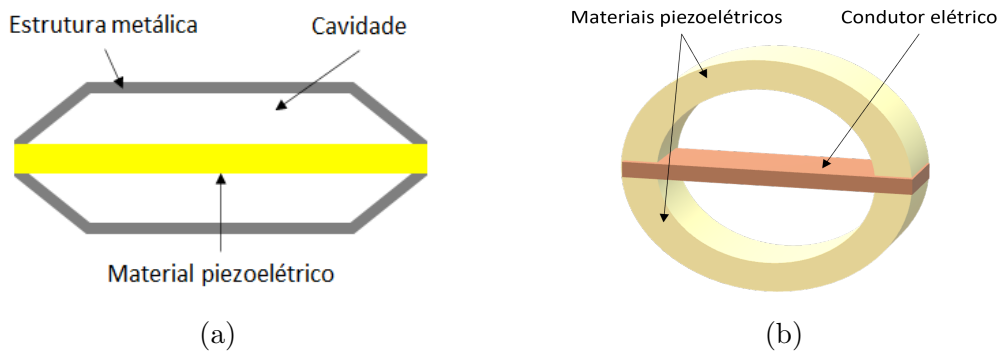


Figura 4.4: Exemplos de uma estrutura em címbalo (4.4a) vista de perfil e uma estrutura dimórfica (4.4b).

As estruturas tipo vara encastrada baseiam-se no princípio do amortecedor piezoelétrico equipado com um circuito de captação de energia (figura 3.15 em que a carga é substituída por um circuito de aproveitamento de energia elétrica). A vara é construída de modo a ter maior massa na extremidade oscilante, podendo apresentar uma forma irregular ou serem adicionadas massas nessa extremidade.

Trabalho de Rocha et al. (2010)

Rocha et al. (2010) desenvolveram um sistema de aproveitamento de energia colocado debaixo da sola de uma sapatilha, composto por um gerador piezoelétrico do tipo placa e um gerador eletroestático.

O gerador piezoelétrico é constituído por um polímero de PVDF na fase β , obtido por um processo de polarização (que engloba aquecimento, extensão mecânica do material e sujeição do mesmo a um campo elétrico externo) patenteado pelos autores. As películas de PVDF obtidas por este processo apresentam uma espessura que varia entre 20 μm e 60 μm . São adicionados elétrodos de prata ou alumínio à película recorrendo a um processo de deposição térmica.

As películas de PVDF foram colocadas na sola, na região do calcanhar e na região da articulação entre os metatarsos e as falanges. Na figura 4.5 encontra-se o registo da tensão aos terminais de uma película de PVDF instalada na sola de uma sapatilha, após um salto do utilizador.

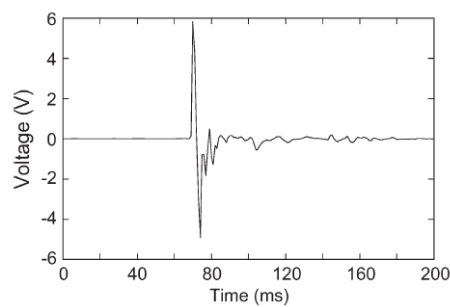


Figura 4.5: Tensão nos elétrodos de uma película de PVDF instalada na sola de uma sapatilha, após um salto do utilizador (Rocha et al., 2010).

Os elétrodos das películas de PVDF foram ligados a um retificador de onda completa (ponte retificadora), composto por quatros díodos de Schottky (díodo de junção unipolar que apresenta uma barreira de potencial de 0.33 V, sensivelmente metade de um díodo de junção PN). A carga ou bateria são ligadas ao par de terminais de saída da ponte retificadora, sendo alimentados por uma corrente que apresenta sempre a mesma polaridade.

Foi integrado um gerador eletroestático em paralelo com os terminais de saída da ponte retificadora, cujo pico de tensão de saída se dá quando este deixa de ser pressionado, ou seja, quando indivíduo levanta o pé. Este gerador é conectado à carga através de um retificador de meia onda (um díodo entre um terminal do

gerador e um da carga). Deste modo, quando o indivíduo pisa o pavimento o gerador piezoelétrico fornece energia à carga e quando o indivíduo levanta o pé, o gerador eletrostático fornece energia à carga. O retificador de meia onda previne que quando se está a carregar uma bateria, a corrente flua no sentido contrário, descarregando a bateria para o gerador eletrostático.

Os investigadores concluíram que o sistema deve facilitar a extensão das películas de PVDF, conseguindo aproveitar em simultâneo a deformação mecânica que ocorre em várias direções. Para tal os autores sugerem a estrutura tipo arco dimórfica. Por outro lado, verificaram que quando sobrepuseram duas películas a tensão registada duplicou. Finalmente, na figura 4.6 encontra-se o registo da energia produzida pelo sistema (com ambos os geradores), durante uma hora, por um indivíduo a correr, ao ritmo de quatro passos por segundo e com cargas puramente resistivas.

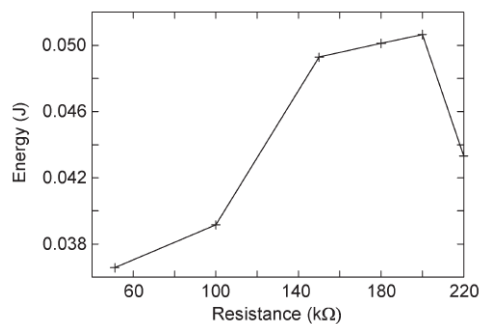


Figura 4.6: Energia produzida numa hora por um indivíduo a correr a um ritmo de quatro passos por segundo, para diferentes cargas (Rocha et al., 2010).

No gráfico da figura 4.6 observa-se que foi obtida uma maior quantidade de energia, cerca de 55 mJ, quando foi utilizada a resistência de 200 kΩ, o que se traduz numa potência média de aproximadamente 15.3 μ W e numa corrente média de 8.7 μ A.

Trabalho de Zhao e You (2014)

Zhao e You (2014) desenvolveram um gerador piezoelétrico integrado em calçado, cujo material utilizado foi o PVDF, sob a forma de películas sobrepostas. O seu trabalho consistiu no fabrico de duas plataformas com entalhes que permite a deformação mecânica do material em várias direções. As plataformas desenvolvidas pelos investigadores consistem numa placa de base, com entalhes curvos transversais, sobre a qual são fixas nas suas extremidades longitudinais, várias películas de

PVDF sobrepostas e ligadas em paralelo. Sobre as películas encontra-se uma placa móvel com entalhes complementares aos da base (figura 4.7).

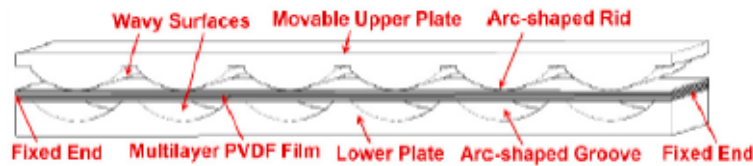
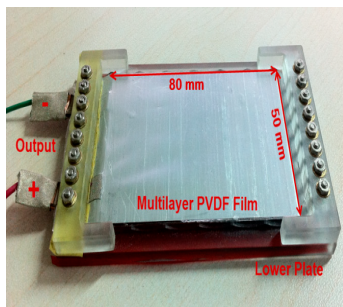
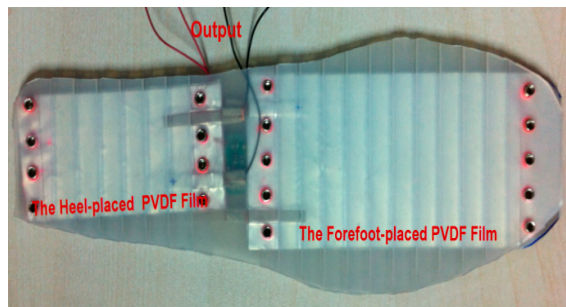


Figura 4.7: Esquema das plataformas desenvolvidas por Zhao e You (2014).

O protótipo 1 é constituído por duas bases de plástico rígido, visando uma maior deformação mecânica do PVDF e destina-se a ser aplicado apenas na zona do calcanhar. O protótipo 2 tem a forma de uma palmilha e é constituído por duas plataformas, uma na zona do calcanhar (protótipo 2 H) e outra na parte posterior do pé (protótipo 2 F), existindo um hiato entre as duas na zona do arco do pé. As placas das plataformas do protótipo 2 são feitas de borracha, visando o conforto da utilização do gerador.



(a) Protótipo 1.



(b) Protótipo 2.

Figura 4.8: Protótipos desenvolvidos por Zhao e You (2014).

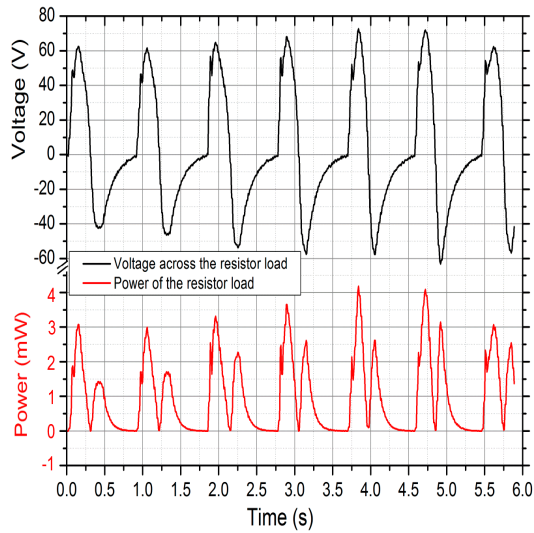
Como o gerador apresenta uma impedância alta e pretende-se que a energia aproveitada possa ser armazenada, os investigadores recorreram a um circuito integrado de aproveitamento de energia proveniente de fontes de alta impedância, o LTC3588-1, que será analisado mais à frente. No protótipo 2, como pode existir um desfasamento entre as correntes geradas por cada uma das placas, estas não são ligadas diretamente em paralelo. Cada placa é ligada a uma ponte retificadora e as saídas destas ligadas em paralelo. O circuito integrado permite a utilização de pilhas em simultâneo que fornecem energia ao circuito quando o gerador piezoelétrico não o consegue fazer. O circuito foi ajustado para gerar uma tensão de saída de 3.6 V.

4.2. Geradores piezoelétricos em calçado

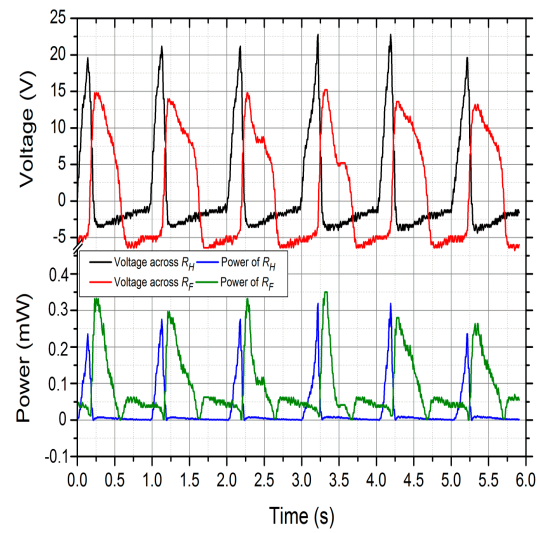
Os investigadores realizaram quatro ensaios. No primeiro ensaio o gerador foi diretamente ligado a uma resistência adaptada. O cálculo da carga teórica foi feito com base na equação 4.2, sendo que as capacitâncias dos conjuntos de películas (para a frequência de 1 Hz) de PVDF e as respetivas cargas adaptadas teóricas e utilizadas se encontram na tabela 4.1.

Tabela 4.1: Capacitância dos protótipos e respetiva carga resistiva adaptada.

Protótipo	Capacitância	Carga teórica	Carga utilizada
Protótipo 1	126 nF	1.263 M Ω	1.268 M Ω
Protótipo 2 H	110 nF	1.447 M Ω	1.682 M Ω
Protótipo 2 F	250 nF	637 k Ω	660 k Ω



(a) Protótipo 1.



(b) Protótipo 2.

Figura 4.9: Resultados do primeiro ensaio (Zhao e You, 2014). Na figura 4.9a as linhas preta e vermelha referem-se à tensão e potência, respetivamente, registadas com o protótipo 1. Na figura 4.9b as linhas preta e azul referem-se à tensão e potência, respetivamente, registadas com o protótipo 2 H e as linhas vermelha e verde referem-se à tensão e potência, respetivamente, registadas com o protótipo 2 F.

Na figura 4.9 encontram-se as medições efetuadas no primeiro ensaio de cada protótipo e verifica-se que:

- com o protótipo 1 registou-se uma tensão pico a pico de 136 V e uma potência média de 1 mW;

- existe o desfasamento previsto na tensão gerada entre o protótipo 2 H e o protótipo 2 F, justificando o uso de pontes retificadoras separadas;
- com o protótipo 2 H registou-se uma tensão pico a pico de 30 V e uma potência média de 30 μ W;
- com o protótipo 2 F registou-se uma tensão pico a pico de 22 V e uma potência média de 90 μ W;
- a diferença entre a elasticidade dos materiais nas bases se traduz numa menor deformação mecânica das películas, resultando em menores potências elétricas.

No segundo ensaio os protótipos foram ligados a uma ponte retificadora, cujos terminais de saída foram ligados a um condensador de 25 μ F por forma a medir a carga elétrica gerada por um passo. A carga elétrica por passo medida foi de:

- 30 μ C com o protótipo 1;
- 5 μ C com o protótipo 2 H;
- 11 μ C com o protótipo 2 F.

O terceiro ensaio consistiu em ligar os protótipos ao circuito de aproveitamento de energia, sem carga, e medir a quantidade de passos necessários, a uma frequência de 1 Hz, para que a tensão de saída do circuito integrado fosse a pretendida, de 3.6 V. Os resultados foram:

- 13 passos para o protótipo 1;
- 25 passos com o protótipo 2.

No quarto ensaio simulou-se a conexão de um transmissor sem fios à saída do circuito integrado através de uma resistência de 180 Ω e de um “interruptor eletrónico” controlado por um sinal de onda quadrada com a frequência de 1 Hz e um *duty-cycle* de 0.5%. Quando a onda quadrada se encontra no valor máximo e o gerador apresenta a tensão de 3.6 V nos seus terminais de saída, o “interruptor eletrónico” encontra-se fechado, sendo a resistência de carga de 180 Ω ; quando uma das duas condições anteriores não se verifica, o “interruptor eletrónico” encontra-se aberto, e a resistência não é atravessada por corrente elétrica. Neste ensaio, com passos à frequência de 2 Hz, verificou-se que:

- com o protótipo 1 a carga simulada foi ativada uma vez em cada dois ou três passos;
- com o protótipo 2 a carga simulada foi ativada uma vez em cada seis a oito passos.

Resumo

Dos trabalhos analisados verifica-se que:

- o PZT e o PVDF são materiais bastante utilizados nesta área, podendo ser combinados com outros materiais;
- utilizando PVDF, a estrutura em arco de Zhao e You (2014) mostrou-se mais eficiente que a estrutura tipo placa de Rocha et al. (2010);
- por estarem envolvidas maiores tensões mecânicas, os sistemas mecânicos, como o de Kim et al. (2005), geram potências elétricas superiores do que os sistemas de aproveitamento de energia humana;
- dos sistemas de aproveitamento de energia humana, registou-se uma potência média de $120\mu\text{W}$ para um sistema fixo de varas encastradas de Hwang et al. (2015) e 1mW de potência média para a plataforma em arco rígida com películas de PVDF móvel de Zhao e You (2014).

4.3 Circuito de aproveitamento de energia

Os geradores piezoelétricos são compostos por duas partes: o material piezoelétrico e o circuito eletrónico que condiciona a energia elétrica para uma carga. O material piezoelétrico foi abordado anteriormente e a carga trata-se do componente ou equipamento que é alimentado pelo gerador. O circuito eletrónico utilizado tem como objetivos a maximização do aproveitamento de energia e o condicionamento da corrente para ser utilizada pela carga. Na figura 4.10 pode observar-se o diagrama de blocos de um gerador piezoelétrico.

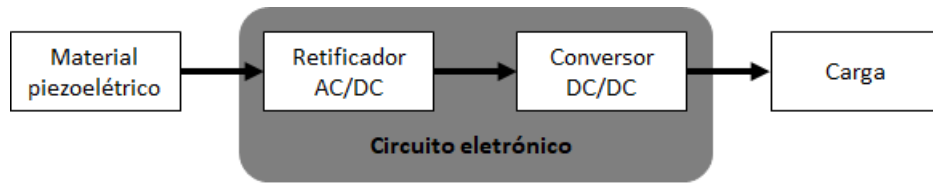


Figura 4.10: Diagrama de blocos de um gerador piezoelétrico.

Retificador

A maioria dos equipamentos eletrônicos utilizam corrente contínua, designada por corrente DC (*direct current*). Como os materiais piezoelétricos geram corrente alternada designada por corrente AC (*alternated current*), devido à sua deformação mecânica seguida da restituição (como foi abordado no capítulo 3), é geralmente utilizado um retificador de corrente. Em termos matemáticos, o retificador realiza a função módulo, em que a tensão de saída é o valor absoluto da tensão de entrada.

Os retificadores são geralmente compostos por uma ponte retificadora e podem incorporar um condensador ligado aos terminais de saída para evitar variações bruscas da corrente, permitindo uma corrente de saída mais estável (Yasser e Basrour, 2007).

Os díodos apresentam uma barreira de potencial na sua junção, daí a tensão máxima medida nos terminais de saída da ponte retificadora ser igual ao módulo da tensão de entrada subtraída do dobro da tensão da barreira de potencial de cada diodo utilizado.

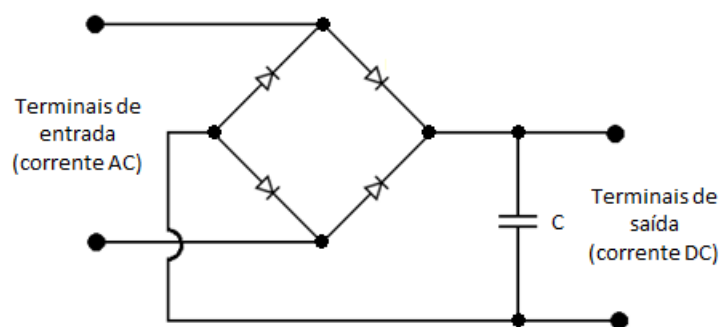
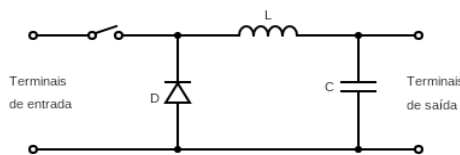


Figura 4.11: Esquema de um retificador de onda completa.

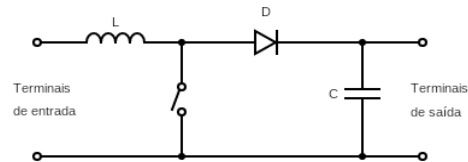
Conversor DC/DC

Nos terminais de saída do retificador obtém-se uma tensão quase contínua de valor próximo ao máximo do módulo da tensão gerada pelo material piezoelétrico, logo, essa tensão não apresenta um valor fixo. De modo a possibilitar a alimentação elétrica de equipamentos eletrônicos, é necessário regular a tensão de saída, através de um conversor DC/DC.

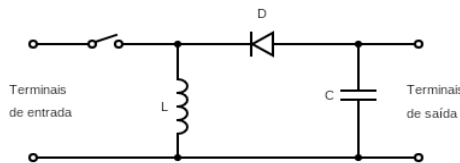
Existem vários tipos de conversores DC/DC, que se podem dividir em conversores não isolados galvanicamente e conversores isolados galvanicamente. São conversores não isolados o *buck converter*, o *boost converter* e o *buck-boost converter*. O *flyback converter* e o *forward converter* são conversores isolados (Arrow, 2017).



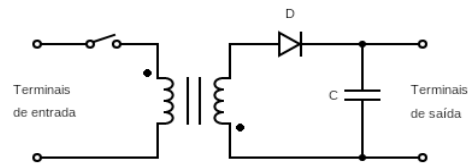
(a) *Buck converter*.



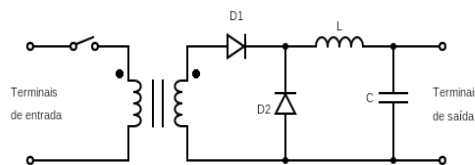
(b) *Boost converter*.



(c) *Buck-boost converter*.



(d) *Flyback converter*.



(e) *Forward converter*.

Figura 4.12: Esquemas elétricos de conversores DC/DC básicos.

Quanto à sua função, o *buck converter* serve para diminuir tensões, o *boost converter* serve para aumentar tensões e os restantes são capazes de realizar as duas tarefas. No caso dos geradores piezoelétricos, por norma pretende-se diminuir as tensões geradas pelos materiais, então é comum recorrer-se a um *buck converter*.

Circuito elétrico do *buck converter*

Os conversores DC/DC podem funcionar com um sinal de controlo, que se trata de uma onda quadrada de determinada frequência f (ou período T_{cycle}) e *duty-cycle* D_{cycle} , responsável por fechar e abrir periodicamente o interruptor (representado na figura 4.12a) do circuito. Liga-se agora uma fonte de tensão contínua nos terminais de entrada e uma carga puramente resistiva nos terminais de saída do *buck converter*. Pode-se então estudar o circuito como um ciclo de duas fases.

Na primeira fase, a fase *on*, o interruptor é fechado inicialmente. O díodo não conduz corrente elétrica pois encontra-se inversamente polarizado, obrigando a corrente a atravessar a bobine e o condensador, carregando-os e simultaneamente dissipando energia na carga. O esquema elétrico equivalente da primeira fase encontra-se na figura 4.13.

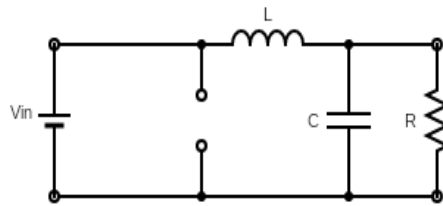


Figura 4.13: Fase *on* do ciclo do *buck converter*.

Analisando o circuito elétrico da figura 4.13 conclui-se que a tensão de saída V_o pode ser dada pela expressão 4.3.

$$V_o = V_{in} - L \frac{di_{L_{on}}(t)}{dt} \quad (4.3)$$

Da expressão 4.3 pode-se assumir que para um determinado intervalo de tempo, a corrente i_L que atravessa a bobine sofre uma determinada variação. Se o intervalo de tempo considerado for o tempo em que o interruptor se encontra fechado, isto é o período da fase *on*, de duração $T_{cycle}D_{cycle}$, a variação de corrente $\Delta i_{L_{on}}$ é calculada através da expressão 4.4.

$$V_o = V_{in} - \frac{L}{T_{cycle}D_{cycle}} \Delta i_{L_{on}} \quad (4.4)$$

4.3. Circuito de aproveitamento de energia

Na segunda fase, a fase *off*, o interruptor é aberto. A bobine e o condensador encontram-se parcial ou totalmente carregados. O condensador mantém a sua polaridade, tendo uma função idêntica ao condensador presente no retificador de corrente. A bobine, que possui energia armazenada sob a forma de campo magnético, mantém o sentido da corrente no circuito, funcionando como fonte de energia. Uma vez que nesta situação o diódo fica diretamente polarizado (se a tensão aos seus terminais for superior à tensão da sua barreira de potencial), este conduz corrente elétrica, fechando o circuito. O esquema elétrico equivalente da segunda fase encontra-se na figura 4.14 (não se considerou a resistência interna nem a barreira de potencial do diódo).

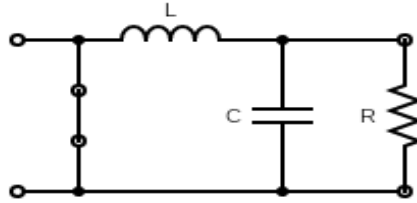


Figura 4.14: Fase *off* do ciclo do *buck converter*.

Analogamente à fase *on*, obtém-se a expressão 4.5.

$$V_o = -\frac{L}{T_{cycle}(1 - D_{cycle})}\Delta i_{L_{off}} \quad (4.5)$$

Assume-se que a corrente que atravessa a bobine é periódica (expressão 4.6). Segundo este pressuposto, a soma entre as variações de corrente tem que ser nula (expressão 4.7). Destes pressupostos pode-se deduzir a expressão geral do *buck converter* (expressão 4.8).

$$i_L(t + T_{cycle}) = i_L(t) \quad (4.6)$$

$$\Delta i_{L_{on}} + \Delta i_{L_{off}} = 0 \quad (4.7)$$

$$V_o = D_{cycle}V_{in} \quad (4.8)$$

Controlo do *buck converter*

Como foi demonstrado, a peça fundamental para o funcionamento do *buck converter* é o interruptor. A implementação do interruptor é geralmente feita através de um transistor. O diódo presente no *buck converter* na prática funciona como um “interruptor automático”, que se encontra no estado contrário ao interruptor de controlo, pelo que o circuito elétrico do *buck converter* pode ser redesenhado utilizando dois MOSFET (*metal oxide semiconductor field effect transistor*) um NMOS (MOSFET de canal N), um PMOS (MOSFET de canal P) e um gerador do sinal “*switch*”, tornando-se um *buck converter* síncrono (com o diódo denomina-se assíncrono). Na figura 4.15 encontra-se o circuito elétrico de um *buck converter* utilizando MOSFET, em que o interruptor de controlo (o PMOS) é fechado com uma tensão negativa e aberto com uma tensão positiva.

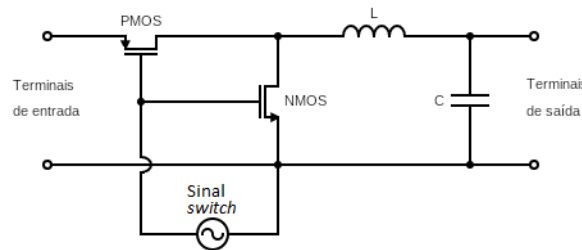


Figura 4.15: *Buck converter* utilizando MOSFET.

O *buck converter* pode funcionar de forma não controlada, isto é, sem monitorização da tensão de saída, em que o sinal “*switch*” é gerado por um gerador de onda quadrada e a tensão de saída é dada pela expressão 4.8. Por outro lado, pode ser adicionado um sistema de controlo ao *buck converter* em que o funcionamento dos MOSFET não depende diretamente de um sinal externo.

Existem três modos de controlo de *buck converter*: controlo de tensão, controlo de corrente e controlo com histerese. Os modos de controlo de tensão e de corrente utilizam um gerador de sinal externo, ou seja, é gasta energia a gerar um sinal enquanto que o modo de controlo com histerese não necessita de nenhuma fonte externa.

O controlador com histerese pode ser implementado simplesmente através de um *Schmitt trigger*. O *Schmitt trigger* trata-se de um amplificador operacional (AMPOP) alimentado pelas tensões V_{AMP+} e V_{AMP-} , e duas resistências. Num *Schmitt trigger* não inversor, a entrada inversora do AMPOP é ligada à massa

4.3. Circuito de aproveitamento de energia

do conversor e à entrada não inversora liga-se uma resistência R_1 que se encontra também ligada à saída do conversor (V_o) e uma resistência R_2 que se liga também à saída do AMPOP $V_{control}$ (figura 4.16a).

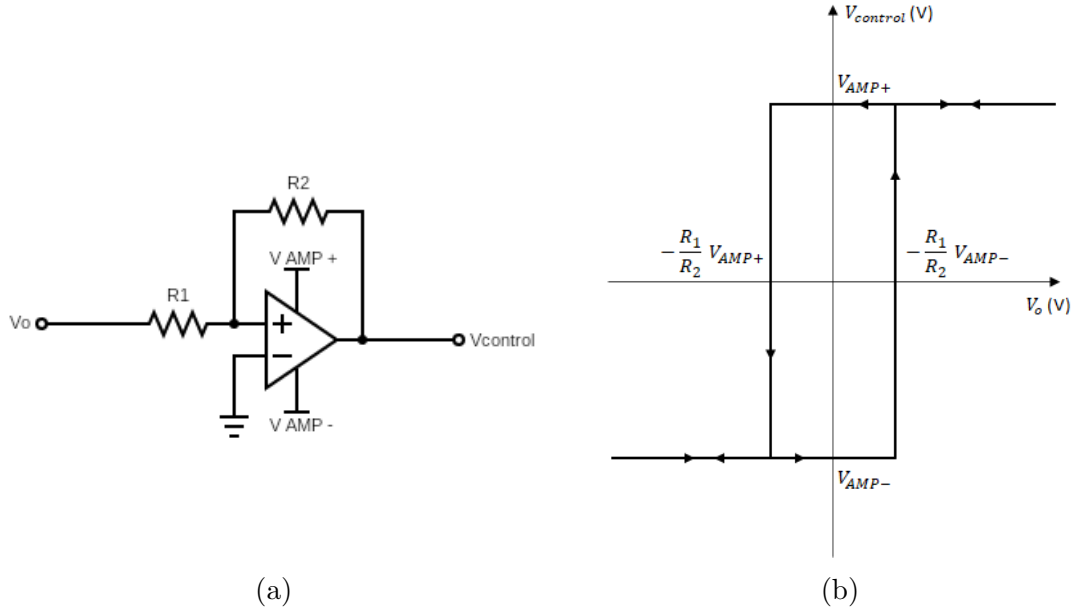


Figura 4.16: Circuito elétrico do *Schmitt trigger* não inversor (4.16a) e respetivo gráfico de funcionamento (4.16b).

As resistências R_1 e R_2 servem para ajustar as “tensões de disparo” do *Schmitt trigger* como se pode observar na figura 4.16b. Analisando o circuito elétrico da figura 4.17, quando a tensão de controlo $V_{control}$ é igual ao seu valor mínimo V_{AMP-} , o PMOS encontra-se saturado e o NMOS encontra-se ao corte, estando o *buck converter* na fase *on*. Nesta fase, a tensão de saída do conversor V_o aumenta até atingir a “tensão de disparo” superior, o que faz com a tensão de controlo $V_{control}$ tome o valor de V_{AMP+} . Consequentemente o PMOS passa a estar ao corte e o NMOS saturado, encontrando-se o conversor na fase *off*. Nesta altura a tensão V_o começa a diminuir e quando atinge a “tensão de disparo” inferior o ciclo repete-se. Deste modo a tensão de saída do *buck converter* encontra-se sempre entre os valores de “disparo” do *Schmitt trigger*.

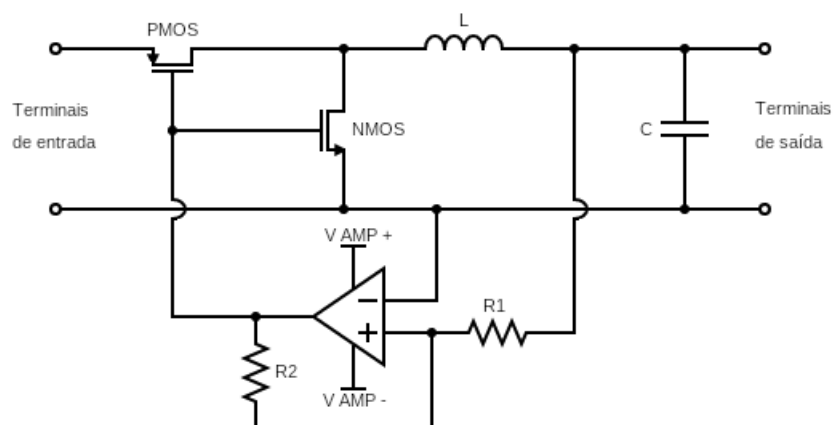


Figura 4.17: *Buck converter* controlado por histerese.

5. Desenvolvimento de um protótipo

A abordagem teórica e análise de trabalhos desenvolvidos conduzida nos capítulos anteriores serviram para o desenvolvimento de um protótipo de uma bota com um gerador piezoelétrico incorporado. O protótipo foi desenvolvido em duas fases:

1. primeira fase:

- desenvolvimento de uma plataforma fixa;
- otimização da estrutura do material piezoelétrico;
- estudo das propriedades do material piezoelétrico integrado em calçado;
- ensaio do circuito eletrónico;

2. segunda fase:

- incorporação do material piezoelétrico numa bota;
- ensaio das ligações elétricas;
- fabrico de uma placa de circuito impresso para incorporação de todos os componentes;
- ensaio do protótipo.

Os hardwares e os softwares utilizados em todo o processo encontram-se listados na tabela 5.1.

Tabela 5.1: Hardwares e softwares utilizados no desenvolvimento do protótipo.

Hardware	Software
Osciloscópio Tektronix 1002B	Matlab
Impressora 3D Creality Ender-3 pro	Ultimaker Cura
	SolidWorks
	Microsoft Office Excel

O osciloscópio Tektronix 1002B apresenta a funcionalidade de gravar um ficheiro de valores separados por vírgulas (com a extensão “.csv”), com os valores

das medições efetuadas numa *USB flash drive*. Os ficheiros gerados foram analisados através de rotinas elaboradas em Matlab presentes no apêndice A, efetuando o cálculo da energia, da potência média e da corrente média geradas.

5.1 Material piezoelétrico

No protótipo foram utilizados transdutores piezoelétricos do modelo 7BB-20-6LO da empresa muRata (figura 5.1). Estes transdutores foram desenvolvidos para funcionarem como alarmes sonoros que se aplicam em relógios, equipamentos médicos, brinquedos e pequenos equipamentos eletrónicos como o PDA (*personal digital assistant*).

Os transdutores são constituídos por uma cerâmica piezoelétrica (desenvolvida pela empresa) em forma de disco, à qual estão ligados dois elétrodos de prata. A um elétrodo está colada uma chapa de latão e a esta chapa assim como ao outro elétrodo estão soldados fios de cobre com 0.032 mm^2 de secção transversal. No anexo A encontra-se um extrato da ficha técnica dos transdutores utilizados.

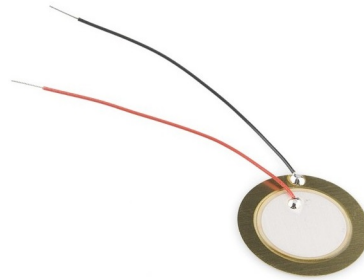


Figura 5.1: Transdutor 7BB-20-6LO (botnroll.com, 2022).

5.2 Circuito eletrónico

O circuito integrado LTC3588-1 da Linear Technology foi desenvolvido para aproveitamento de energia de fontes com impedâncias elevadas, tais como os geradores piezoelétricos. O circuito foi utilizado nas experiências de Zhao e You (2014), e integra em si os componentes abordados (o retificador de onda completa e o conversor DC/DC). No protótipo desenvolvido nesta dissertação foi utilizado o circuito integrado “*Energy Harvester Breakout - LTC3588*” da Sparkfun, que contém o circuito integrado LTC3588-1. No anexo B encontra-se a ficha técnica do circuito integrado

LTC3588-1 e no anexo C encontram-se esquemas do circuito da Sparkfun. Na figura 5.2 encontra-se o esquema elétrico do circuito da Sparkfun.

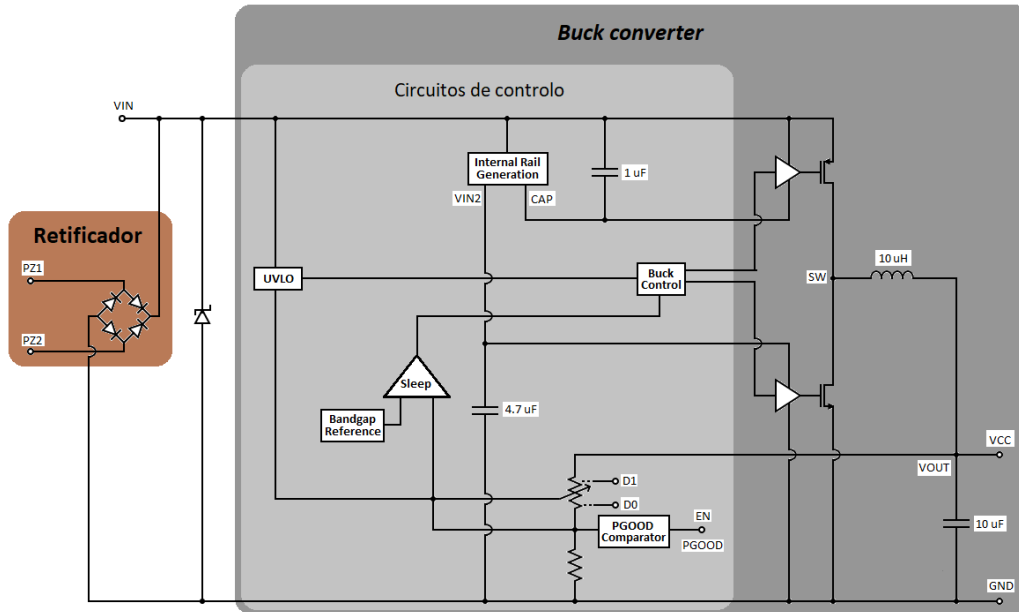


Figura 5.2: Esquema elétrico do “Energy Harvester Breakout - LTC3588” da Sparkfun.

Os elétrodos do material piezoelétrico são conectados às entradas PZ1 e PZ2, que correspondem aos terminais de entrada do retificador de onda completa. Por sua vez, os terminais de saída da ponte retificadora encontram-se ligados a um diodo de Zener com tensão de Zener de 20 V.

Em paralelo encontra-se ligado um *buck converter*. O circuito elétrico é idêntico ao circuito abordado no capítulo 4, contendo uma bobine, um condensador e dois MOSFET: um PMOS controlado por um *buffer* alimentado pelas linhas V_{IN} e CAP que apresentam uma diferença de tensão máxima de 4.8 V (página 8 do anexo B); um NMOS controlado por um *buffer* alimentado pela linha V_{IN2} que apresenta uma tensão máxima de 4.8 V (página 8 do anexo B).

O controlo do *buck converter* é feito através das seguintes estruturas:

- **internal rail generation:** responsável por gerar os sinais V_{IN2} e CAP que servem de alimentação dos *buffers*;
- **undervoltage lockout (UVLO):** ativa e desativa o *buck converter* mediante a tensão de V_{IN} , conforme os valores da tabela da página 3 do anexo B;

- **buck control**: responsável pelo controlo dos MOSFET, que por sua vez é controlado pelo comparador *sleep* e pelo UVLO;
- **bandgap reference**: gera um sinal exato e preciso, independente da temperatura;
- **sleep**: comparador que funciona como o comparador por histerese abordado no capítulo 4;
- **Pgood comparator**: gera a saída digital EN (igual ao sinal de Pgood do circuito LTC3588-1) que toma o valor alto (igual à tensão de V_{CC}) quando a tensão de V_{CC} é igual ou superior a 92% da tensão de saída pretendida, e o valor baixo (de 0 V) no caso contrário;
- a tensão de saída V_{CC} é seleccionada através de duas entradas digitais D0 e D1, segundo a tabela 1 do anexo B. O circuito encontra-se pré-definido para gerar uma tensão de V_{CC} de 3.3 V.

5.3 Primeira fase

5.3.1 Desenvolvimento de uma plataforma fixa

Para a realização dos primeiros ensaios foi desenvolvida uma plataforma fixa, constituída por duas pranchas de madeira, dois chinelos, seis cantos metálicos, doze parafusos e borrachas anti-derrapantes. As pranchas de madeira servem como base e como superfície que é pisada. Na parte inferior da prancha de base foram colocadas borrachas anti-derrapantes e na parte superior foram aparafusados os seis cantos metálicos que garantem o alinhamento de ambas as pranchas quando sobrepostas. Em cada prancha foi colado um chinelo, que se revelou uma forma simples e eficaz de simular a forma da sola de uma bota (em termos de dimensões), utilizando cola de contacto universal da Pattex. Para facilitar a utilização da plataforma foi marcada a área ocupada pelo chinelo com uma tinta de cor verde.

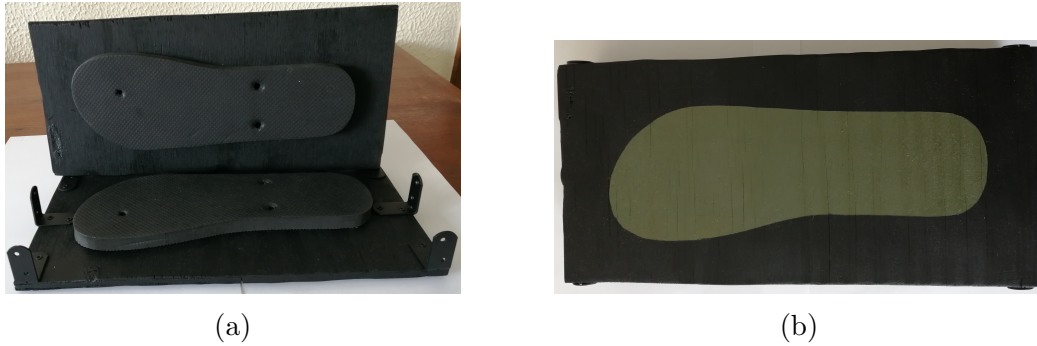


Figura 5.3: Plataforma fixa aberta (5.3a) e vista de topo (5.3b).

Foram consideradas quatro zonas do pé, de acordo com a figura 5.4 e todos os ensaios de ambas as fases foram realizados pelo mestrando, cuja massa corporal é de 90 kg.

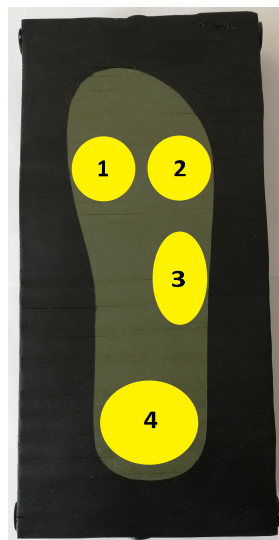


Figura 5.4: Quatro zonas do pé consideradas.

5.3.2 Otimização da estrutura do material piezoelétrico

No primeiro ensaio foi colocado um transdutor na zona 4 do pé e os seus terminais foram ligados a uma resistência de $1\text{ M}\Omega$. Verificou-se que as tensões medidas pelo osciloscópio eram relativamente baixas, assim como a energia, a potência média e a corrente média geradas por um passo.

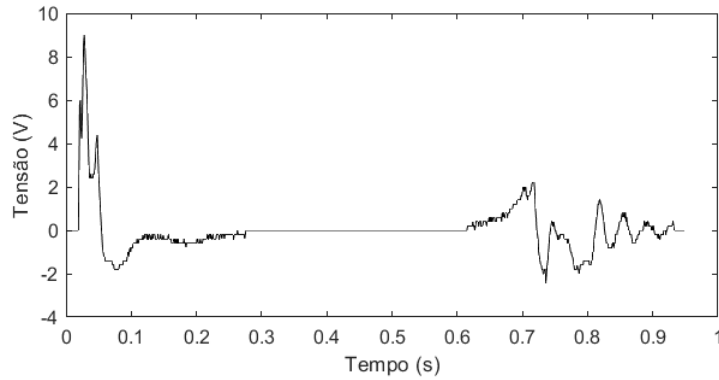


Figura 5.5: Gráfico das tensões geradas por um transdutor.

Formulou-se a hipótese de que o transdutor, por estar alojado entre duas superfícies planas, não sofre uma deformação mecânica considerável, apresentando um baixo desempenho. Para testar essa hipótese, colocou-se um fragmento de cola quente solidificada sem formato específico no topo do transdutor e observaram-se as tensões medidas pelo osciloscópio. As tensões medidas foram muito superiores às anteriores, confirmando a hipótese formulada.

Procedeu-se então ao desenho e produção de seis estruturas de ácido polilático (PLA) recorrendo à impressora 3D, para gerar maior deformação mecânica do material. Os esquemas das estruturas desenvolvidas encontram-se no apêndice B. Cada estrutura foi colada ao topo de um transdutor, com cola universal UHU, o qual foi colocado na zona 4, conectado a uma resistência de $1\text{ M}\Omega$ e foram registadas as tensões medidas nos terminais da resistência durante um passo, de aproximadamente 1 s. Este procedimento foi realizado dez vezes para cada estrutura. Na figura 5.6 encontram-se os valores médios da potência média medida para cada estrutura.

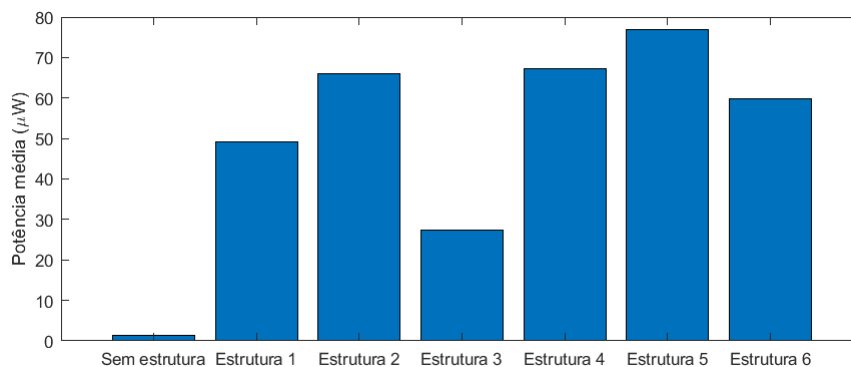


Figura 5.6: Valores médios da potência média medida com cada estrutura de PLA.

Na figura 5.6 pode-se observar que a estrutura 5 mostrou o melhor desempenho, pelo que foi produzida e colada em todos os transdutores utilizados em todos os ensaios posteriores assim como no protótipo. No apêndice C encontra-se o esquema detalhado da estrutura 5. Na figura 5.7 encontram-se os gráficos das tensões geradas por um transdutor colocado na zona 4, com e sem estrutura de PLA, conectado a uma resistência de $1\text{ M}\Omega$, durante um passo.

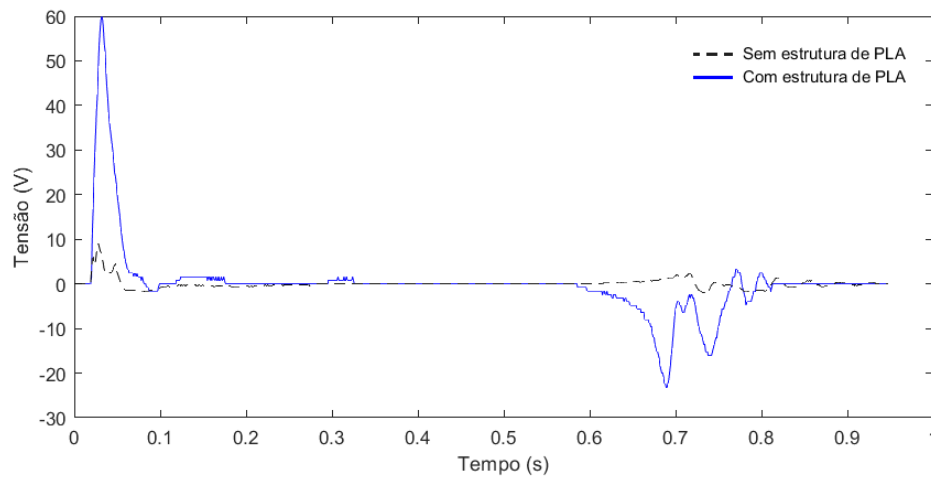


Figura 5.7: Gráficos das tensões medidas numa resistência de $1\text{ M}\Omega$ geradas por um passo, através de um transdutor colocado na zona 4, com e sem estrutura de PLA.

5.3.3 Estudo das propriedades do material piezoelétrico integrado em calçado

Transdutor isolado

Os transdutores foram testados em cada uma das quatro zonas do pé, conectados a várias resistências de carga. Em cada zona, para cada resistência foram registradas dez medições das tensões nos terminais da resistência para análise estatística.

Nos ensaios foram utilizadas as resistências de carga de $10\text{ k}\Omega$, $100\text{ k}\Omega$, $560\text{ k}\Omega$, $820\text{ k}\Omega$, $1\text{ M}\Omega$, $1.2\text{ M}\Omega$, $1.5\text{ M}\Omega$, $1.8\text{ M}\Omega$, $2.2\text{ M}\Omega$, $3.3\text{ M}\Omega$, $4.7\text{ M}\Omega$, $8.2\text{ M}\Omega$ e $10\text{ M}\Omega$. Os valores médios obtidos para cada resistência, em cada zona, da energia, da potência média e da corrente média medidos por passo (de aproximadamente 1 s) encontram-se na figura 5.8.

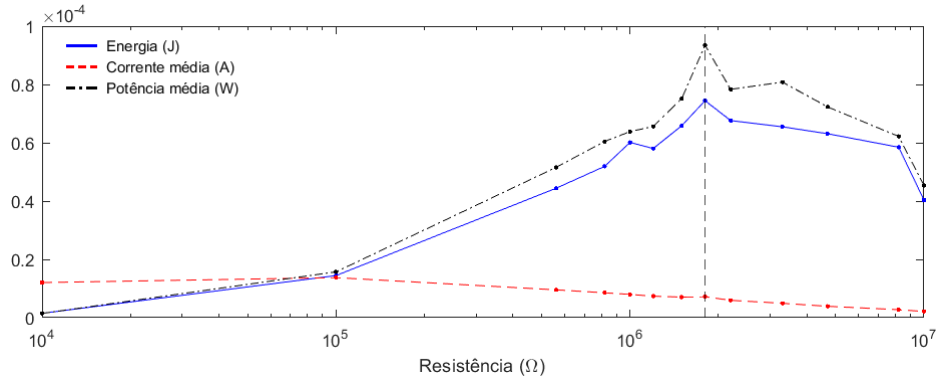


Figura 5.8: Valores médios de energia, corrente média e potência média geradas por um transdutor.

Da figura 5.8 pode-se observar que:

- quanto maior é a resistência, menor é a corrente média;
- apesar de o passo ter uma suposta duração de 1 s, as curvas de energia e de potência média não se sobrepõem;
- a energia e a potência média máximas registadas, ocorreram com uma resistência de 1.8 MΩ (marcada com uma reta vertical tracejada), sendo os respectivos valores de 74.441 μJ e de 93.451 μW, com um valor de corrente média de 7.196 μA.

Após analisar as medições registadas no osciloscópio verificou-se que a duração do passo não era sempre de exatamente 1 s, mas poderia oscilar entre 0.3 s acima ou abaixo, justificando a dissemelhança entre as curvas da energia e da potência média.

Do mesmo modo que Hwang et al. (2015), pelo teorema da máxima transferência de potência (utilizando uma carga puramente resistiva), foi calculada a capacitância paralelo C_p de um transdutor através da expressão 4.2. Inferiu-se que o valor de C_p de um transdutor é de aproximadamente 88.419 nF.

Na figura 5.9 encontram-se os gráficos das potências médias medidas para cada resistência ligada a um transdutor, em cada zona, durante um passo de aproximadamente 1 s.

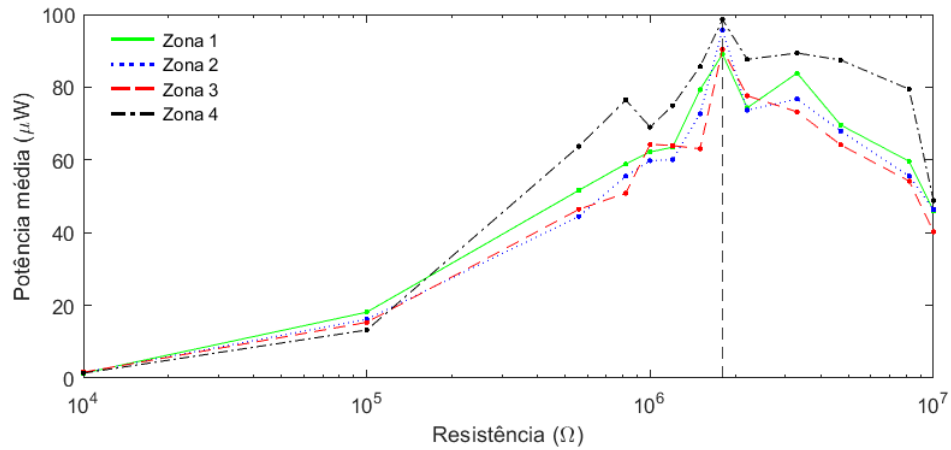


Figura 5.9: Potência média gerada por um transdutor em cada zona em função da resistência.

Dois transdutores ligados em paralelo

Ligaram-se dois transdutores em paralelo a uma resistência de 1.8 MΩ e foram colocados em cada uma das posições realizando ensaios idênticos aos anteriores. Na figura 5.10 encontram-se os valores médios de energia, potência média e corrente medidos (em todas as zonas) durante um passo de duração aproximada de 1 s.

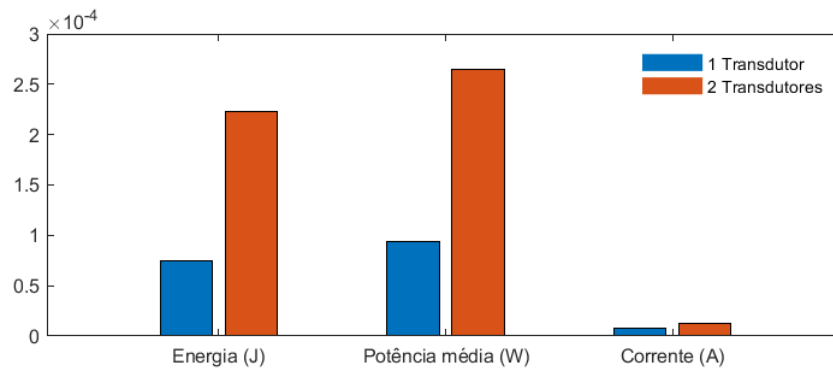


Figura 5.10: Parâmetros medidos numa resistência de 1.8 MΩ utilizando um transdutor isolado e dois transdutores ligados em paralelo.

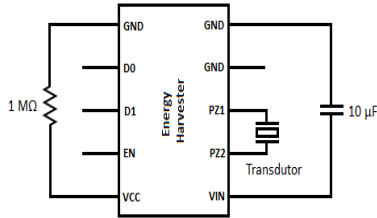
Das medições efetuadas verificou-se que:

- o valor da energia com dois transdutores é aproximadamente 223.21 μJ, o triplo do valor registado utilizando um transdutor;
- o valor da potência média com dois transdutores é aproximadamente 264.87 μW, 2.8 vezes o valor registado com um transdutor;

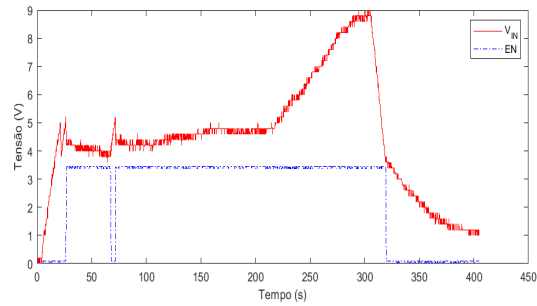
- o valor da corrente medida com dois transdutores é aproximadamente $12.11 \mu\text{A}$, 1.7 vezes o valor registado com um transdutor.

5.3.4 Ensaio do circuito eletrónico

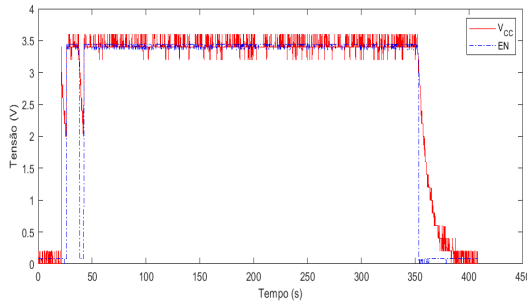
O primeiro ensaio do circuito eletrónico da Sparkfun foi realizado com um transdutor ligado aos pinos PZ1 e PZ2, um condensador de $10 \mu\text{F}$ que suporta uma tensão máxima de 25 V ligado aos pinos V_{IN} e GND, e uma resistência de carga de $1 \text{ M}\Omega$ conectada aos pinos V_{CC} e GND. Foram realizados três ensaios, com o circuito regulado para gerar uma tensão pré-definida de 3.3 V , registrando as tensões medidas nos pinos V_{IN} , EN e V_{CC} .



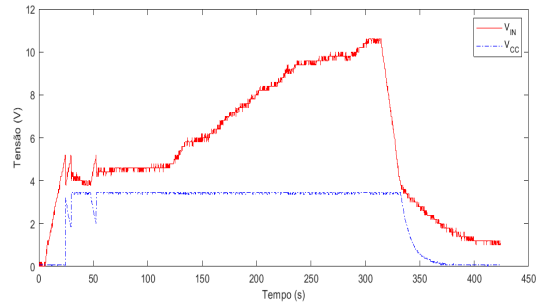
(a) Esquema do circuito eletrónico.



(b) V_{IN} e EN .



(c) V_{CC} e EN .



(d) V_{IN} e V_{CC} .

Figura 5.11: Esquema do circuito eletrónico testado com um transdutor e registos das medições efetuadas.

O procedimento dos três ensaios foi idêntico, consistindo no descarregamento completo dos condensadores, seguido de 800 passos (dos quais 400 foram na plataforma fixa), a um ritmo pretendido de um passo por segundo, e por fim foram feitas medições com o circuito em repouso (a descarregar a energia acumulada).

Dos ensaios verificou-se que:

- o ritmo de caminhada médio registado foi de aproximadamente 0.4 passos por segundo;
- o número de passos necessários para ativar a linha EN pela primeira vez variou entre 22 e 26 passos na plataforma;
- as medições registadas apresentam semelhanças às curvas apresentadas na página 1 do anexo B, sendo visíveis várias quedas da tensão de EN nos primeiros 100 segundos, tal como é descrito no parágrafo do *Power Good Comparator*, na página 9 do anexo B;
- na figura 5.11c verifica-se que a tensão de EN subiu aos 42.4 s, quando a tensão de V_{CC} tomou o valor de 3.4 V e aos 353.4 s a tensão de EN desceu, quando a tensão de V_{CC} diminuiu para 3 V no (instante 353.6 s) evidenciando o funcionamento correto do Pgood comparator;
- na figura 5.11d verifica-se o correto funcionamento do UVLO, notando-se que a tensão de V_{CC} começou a aumentar a primeira vez quando a tensão de V_{IN} era de 5.2 V, e no final começou a diminuir quando a tensão de V_{IN} era de 3.8 V, estando de acordo com o intervalo de valores previsto na tabela da página 3 do anexo B;
- o valor da tensão de V_{IN} foi aumentando, quase estabilizando num certo nível, em que a tensão de V_{CC} estabilizou na tensão pretendida e depois a tensão de V_{IN} continuou a aumentar, evidenciando que a potência elétrica gerada era superior à potência elétrica dissipada na resistência;
- quando se deixou de pisar a plataforma a tensão V_{IN} começou a descer, primeiramente mais a pique e depois mais lentamente quando o UVLO desativou o *buck converter*.

Segundo a ficha técnica do circuito integrado LTC3588-1, a tensão de EN deve-se alterar quando a tensão de V_{CC} é de 3.036 V. Na figura 5.11c não foi possível observar com rigor o funcionamento do Pgood comparator pois o osciloscópio realizou medições com um período de amostragem de 0.2 s e com níveis de quantização de 0.2 V. Apesar destas limitações técnicas, assume-se o correto funcionamento do Pgood comparator.

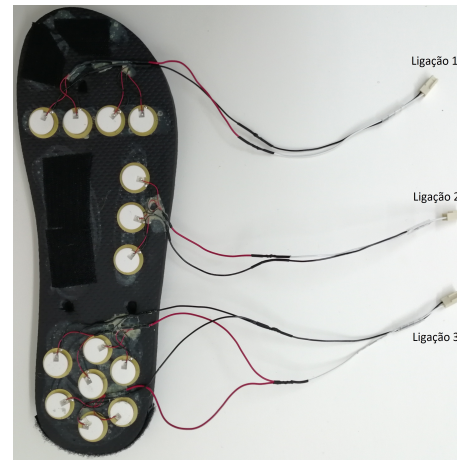
5.4 Segunda fase

5.4.1 Incorporação do material piezoelétrico numa bota

Foi utilizada uma bota preta do tipo previsto no artigo 14º do Regulamento de uniformes dos militares da Marinha (RUMM) para desenvolver o protótipo presente na figura 5.12.



(a) Vista frontal.



(b) Transdutores e ligações.



(c) Vista lateral exterior.



(d) Vista lateral interior.

Figura 5.12: Protótipo desenvolvido de um gerador piezoelétrico integrado numa bota.

Da bota foram destacados o tacão e a sola de borracha e no seu lugar foi colado um chinelo idêntico aos utilizados na primeira fase, com cola de contacto universal da Pattex. Noutro chinelo, que é fixado no protótipo através de fita de velcro, foram colados e ligados catorze transdutores da seguinte forma:

- ligação 1: encontram-se ligados em paralelo dois transdutores colocados na zona 1 e dois transdutores colocados na zona 2;
- ligação 2: encontram-se ligados em paralelo três transdutores colocados na zona 3;
- ligação 3: encontram-se ligados em paralelo sete transdutores colocados na zona 4.

5.4.2 Ensaio das ligações elétricas

No trabalho de Zhao e You (2014) foram utilizados dois retificadores de onda completa. No protótipo desenvolvido decidiu-se utilizar três, um para cada ligação. Esta decisão baseou-se na falta de dados experimentais em relação à zona 3, isto é: da análise do trabalho de Zhao e You (2014) assumiu-se que seriam necessários um retificador para a ligação 1 e outro para a ligação 3, mas não foram analisados dados que permitissem tomar uma decisão em relação à ligação 2.

Foram então realizados dois tipos de ensaios:

- cada ligação foi conectada a uma resistência de $1\text{ M}\Omega$ e foram registadas as tensões nos terminais das mesmas (através do circuito esquematizado na figura 5.13a);
- várias ligações foram ligadas em paralelo a uma resistência de $1\text{ M}\Omega$ e foram registadas as tensões nos terminais da mesma (através do circuito esquematizado na figura 5.13b).

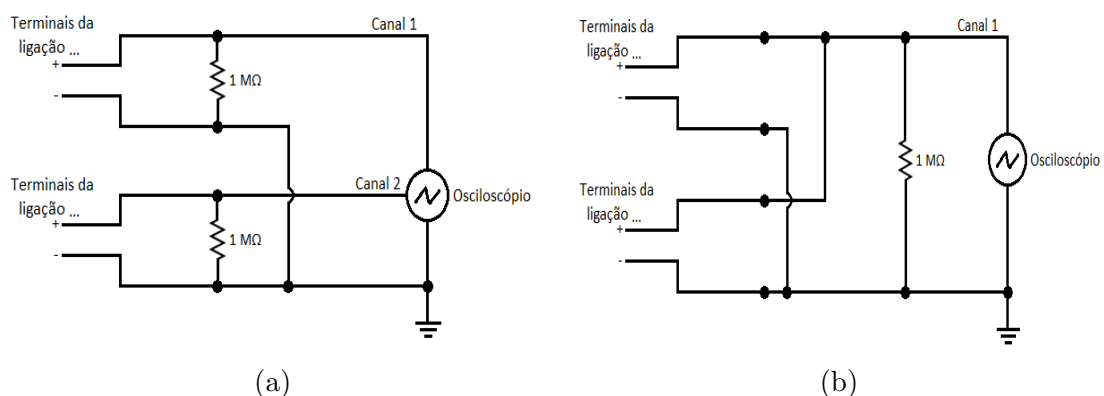


Figura 5.13: Esquemas dos circuitos de ensaio das ligações.

Para cada caso foram efetuadas dez medições para um passo, e calculados os valores médios de energia e potência média. Nas figuras 5.14a, 5.15a e 5.16a encontram-se registros das medições das tensões de cada ligação conectada a uma resistência de $1\text{ M}\Omega$, e nas figuras 5.14b, 5.15b e 5.16b encontram-se registros das mesmas ligações ligadas em paralelo a uma única resistência de $1\text{ M}\Omega$. Na figura 5.17 encontra-se o registro da medição das tensões das três ligações ligadas em paralelo a uma única resistência de $1\text{ M}\Omega$. Os valores médios de energia e potência média obtidos encontram-se na tabela 5.2.

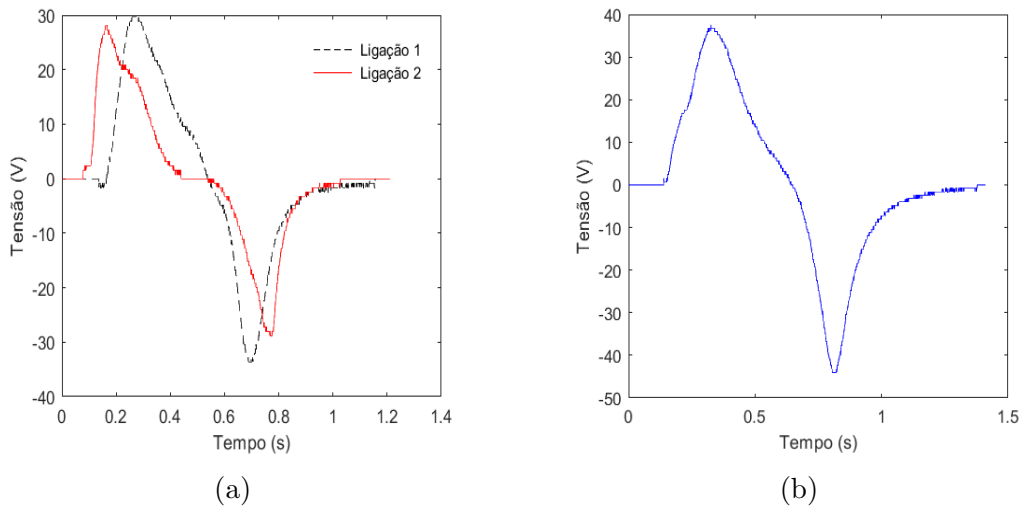


Figura 5.14: Ligações 1 e 2 conectadas a resistências de $1\text{ M}\Omega$ separadas (5.14a) e em paralelo a uma resistência única de $1\text{ M}\Omega$ (5.14b).

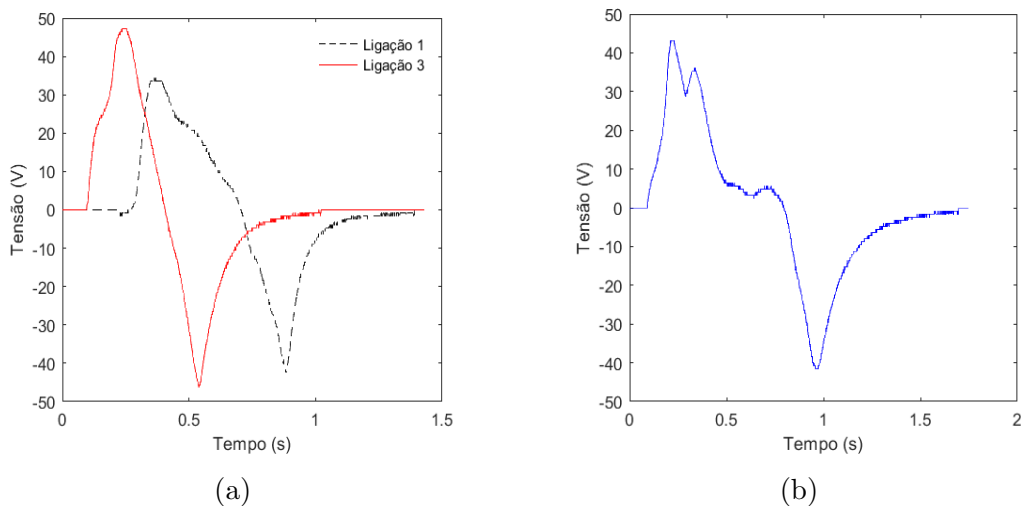


Figura 5.15: Ligações 1 e 3 conectadas a resistências de $1\text{ M}\Omega$ separadas (5.15a) e em paralelo a uma resistência única de $1\text{ M}\Omega$ (5.15b).

5.4. Segunda fase

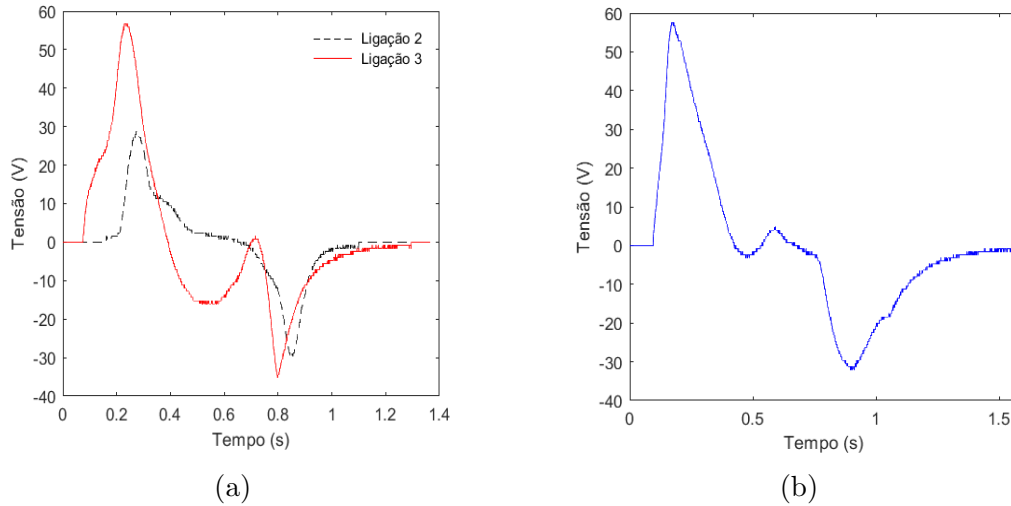


Figura 5.16: Ligações 2 e 3 conectadas a resistências de $1\text{ M}\Omega$ separadas (5.16a) e em paralelo a uma resistência única de $1\text{ M}\Omega$ (5.16b).

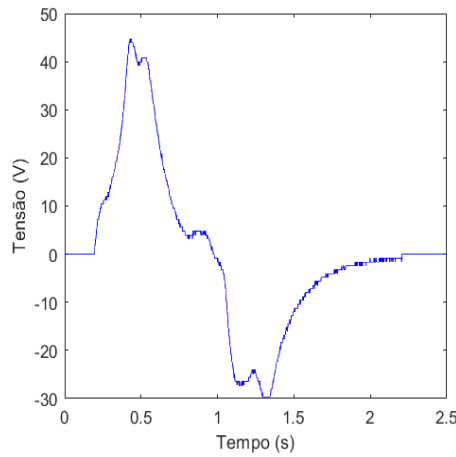


Figura 5.17: Ligações 1, 2 e 3 conectadas em paralelo a uma resistência única de $1\text{ M}\Omega$.

Na figura 5.15a verifica-se um desfasamento temporal entre as tensões medidas nas ligações 1 e 3, tal como previsto. As tensões na ligação 2 apresentam um ligeiro desfasamento em relação às tensões medidas na ligação 1 (figura 5.14a). O mesmo se verifica entre as ligações 2 e 3 (figura 5.16a), apesar das formas de onda registadas não serem tão semelhantes.

Observou-se que quando as ligações foram ligadas em paralelo, as formas de onda registadas tiveram maior duração. Nota-se um tempo de descarga maior, evidenciando a maior capacitância do material piezoelétrico, por haver mais transdutores ligados em paralelo.

Tabela 5.2: Resultados dos ensaios das ligações.

Ligações	Modo	Energia	Potência média
1 e 2	Separadas	378.43 μ J	354.35 μ W
	Em paralelo	475.12 μ J	373.97 μ W
1 e 3	Separadas	644.23 μ J	588.42 μ W
	Em paralelo	516.37 μ J	313.03 μ W
2 e 3	Separadas	577.43 μ J	523.28 μ W
	Em paralelo	548.33 μ J	369.05 μ W
1, 2 e 3	Em paralelo	703.36 μ J	400.66 μ W

Na tabela 5.2 pode-se observar que:

- foram gerados mais 25.55% de energia e mais 5.54% de potência média quando a ligação 2 foi ligada em paralelo com a ligação 1, do que separadamente;
- foram gerados mais 5.31% de energia e mais 41.79% de potência média com a ligação 2 desconectada da ligação 3, do que quando ligadas em paralelo;
- foram gerados mais 24.76% energia e mais 87.98% potência média quando a ligação 1 foi desconectada da ligação 3, do que em paralelo, justificando a utilização de dois retificadores, um para cada ligação;
- verifica-se por fim que a energia e a potência média geradas quando as três ligações foram ligadas em paralelo é menor do que quando existem ligações separadas.

Nestes ensaios verificou-se o protótipo é capaz de gerar 800.90 μ J de energia elétrica e 747.45 μ W de potência média, num passo, com cada ligação conectada separadamente a uma resistência de 1 M Ω . Com as ligações 1 e 2 ligadas em paralelo, separadas da ligação 3, o protótipo gerou 897.59 μ J de energia e 767.07 μ W de potência média, gerando mais 12.07% de energia e 2.62% de potência média.

Para complementar os primeiros ensaios foram realizados mais dois tipos de ensaios recorrendo a retificadores de onda completa DB107 (cuja ficha técnica se encontra no anexo D):

- cada ligação foi conectada aos terminais de entrada de um retificador de onda completa cujos terminais de saída se encontravam ligados em paralelo, e aos

5.4. Segunda fase

quais foi conectada uma resistência de $1\text{ M}\Omega$ (através do circuito esquematizado na figura 5.18a);

- várias ligações foram conectadas em paralelo aos terminais de entrada de um retificador de onda completa cujos terminais de saída se encontravam ligados a uma resistência de $1\text{ M}\Omega$ (através do circuito esquematizado na figura 5.18b).

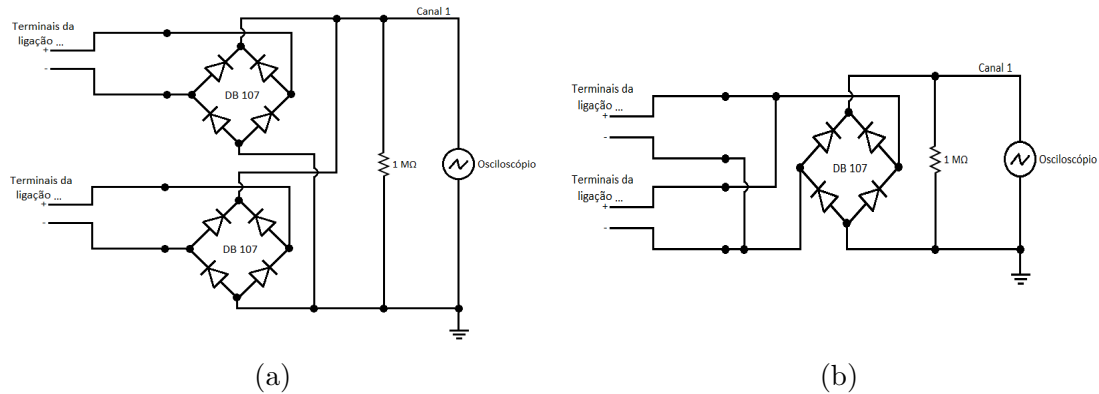
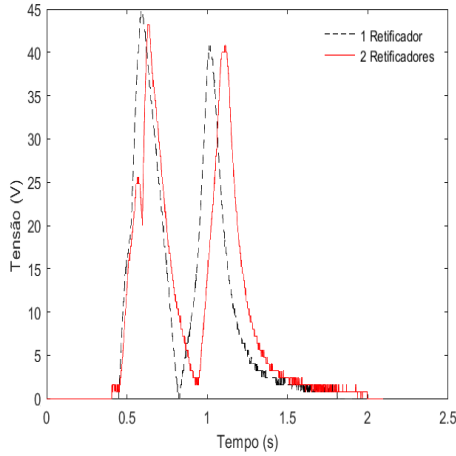


Figura 5.18: Esquemas dos circuitos de ensaio das ligações com retificadores.

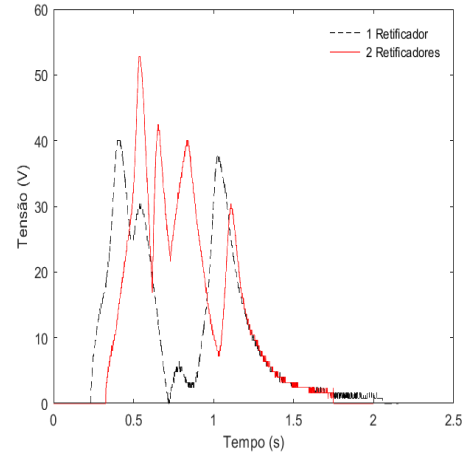
O procedimento seguido nestes ensaios foi idêntico aos anteriores, encontrando-se os registos da medições na figura 5.19 e na tabela 5.3.

Tabela 5.3: Resultados dos ensaios das ligações utilizando retificadores.

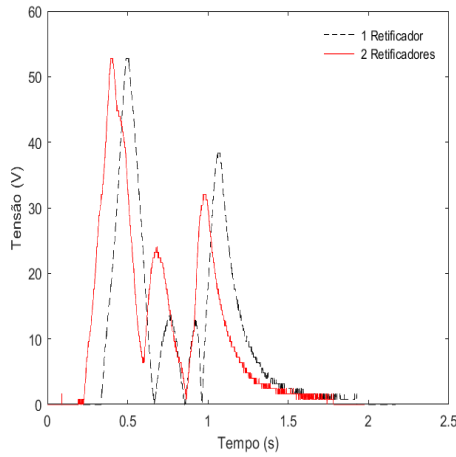
Ligações	N.º Retificadores	Energia	Potência média
1 e 2	2	446.02 μJ	293.42 μW
	1	462.27 μJ	312.04 μW
1 e 3	2	736.75 μJ	453.08 μW
	1	500.97 μJ	280.87 μW
2 e 3	2	567.75 μJ	396.77 μW
	1	515.60 μJ	328.72 μW
1, 2 e 3	1	661.19 μJ	375.89 μW



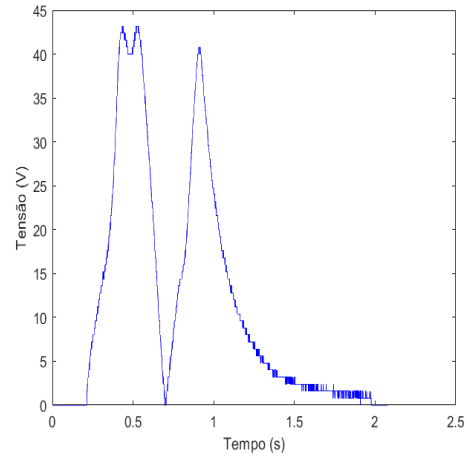
(a) Ligaçãoes 1 e 2.



(b) Ligaçãoes 1 e 3.



(c) Ligaçãoes 2 e 3.



(d) Ligaçãoes 1, 2 e 3 com um retificador.

Figura 5.19: Ensaio das ligaçãoes utilizando um e dois retificadores de onda completa DB107 e uma resistência de $1\text{ M}\Omega$.

Analisando os resultados dos ensaios em que foram utilizados retificadores de onda completa verificou-se que:

- as ligaçãoes 1 e 2 ligadas em paralelo geraram mais 3.64% de energia e mais 6.35% de potência média por passo do que separadamente;
- as ligaçãoes 2 e 3 desconectadas geraram mais 10.11% de energia e mais 20.70% de potência média por passo do que ligadas em paralelo;

Dos ensaios realizados concluiu-se que o protótipo apresente maior eficiência quando o par de ligaçãoes 1 e 3 e o par de ligaçãoes 2 e 3 não são conectados em

paralelo. Quanto ao par de ligações 1 e 2 verificou-se que quando separados, estes geravam valores de energia e potência média ligeiramente menores, que se assumiu não justificarem a sua união. Posto isto, decidiu-se utilizar as ligações 1, 2 e 3 separadamente, tal como projetado inicialmente.

5.4.3 Fabrico de uma placa de circuito impresso para incorporação de todos os componentes

Foi desenvolvida uma placa de circuito impresso (apêndice D) para incorporar todos os componentes do circuito eletrónico visando a sua integração no protótipo. Fabricou-se uma estrutura de PLA (apêndice E) para servir de suporte à placa, a qual foi aparafusada numa das faces e na outra face foi colada fita de velcro para possibilitar a sua integração no protótipo. Na figura 5.20 encontra-se o esquema do circuito eletrónico da placa.

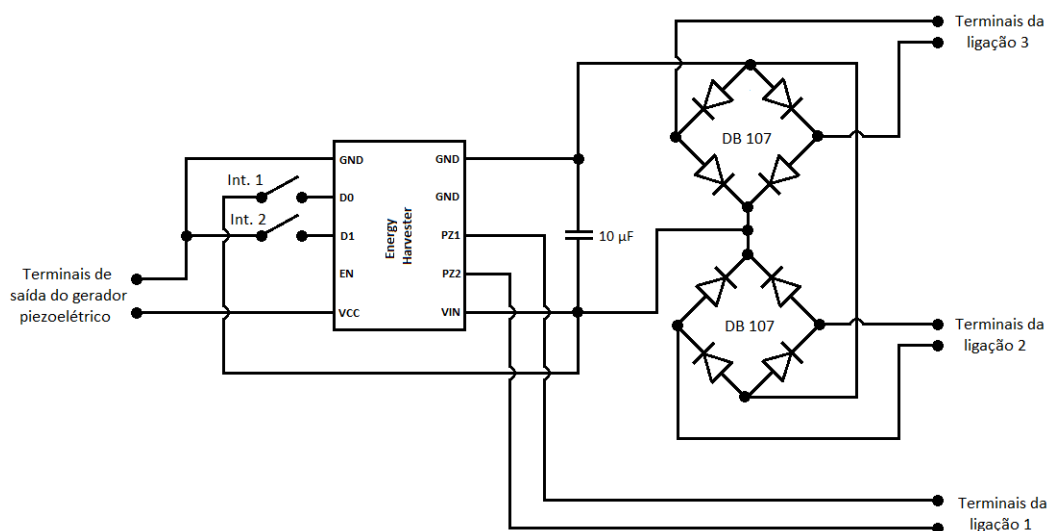


Figura 5.20: Esquema do circuito eletrónico da placa de circuito impresso.

O circuito eletrónico compreende:

- o circuito integrado da Sparkfun;
- o condensador de $10\ \mu\text{F}$, que serve de condensador de entrada;
- dois retificadores de onda completa DB 107, que em conjunto com o retificador do circuito integrado LTC3588-1, retificam individualmente a corrente de cada ligação;

- os interruptores 1 e 2, que servem para selecionar a tensão de saída do gerador piezoelétrico, segundo a tabela 5.4;
- três pares de terminais para as ligações dos transdutores e um par de terminais de saída do gerador piezoelétrico.

Tabela 5.4: Regulação da tensão de saída do gerador piezoelétrico.

Interruptor 1	Interruptor 2	Tensão de saída
<i>Off</i>	<i>On</i>	1.8 V
<i>On</i>	<i>On</i>	2.5 V
<i>Off</i>	<i>Off</i>	3.3 V
<i>On</i>	<i>Off</i>	3.6 V

5.4.4 Ensaio do protótipo

Por fim, todas as partes do protótipo foram instaladas e este foi testado. Foi realizado um ensaio, no qual foi colocada uma resistência de $1\text{ M}\Omega$ nos terminais de saída do gerador, registadas as tensões medidas aos terminais de saída do gerador e as tensões no pino V_{IN} (figura 5.21).

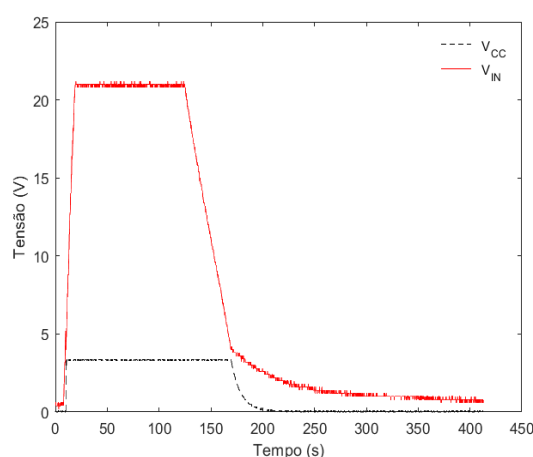


Figura 5.21: Resultados do ensaio do protótipo.

No ensaio foram dados 100 passos com o protótipo (200 passos com ambos os pés), e foi selecionada a tensão de saída de 3.3 V. Verificou-se que a tensão de V_{CC} atingiu a tensão pretendida após 2 passos.

6. Conclusão

Nesta dissertação começou-se por abordar várias fontes e formas de armazenamento de energia elétrica passíveis de serem utilizadas na alimentação elétrica de equipamentos elétricos e eletrónicos utilizados por militares apeados.

Seguidamente, foi feita uma revisão teórica da piezoelectricidade, e verificou-se que os materiais piezoelétricos apresentam uma vasta gama de aplicações, de entre as quais se destaca o aproveitamento de energia mecânica através de geradores piezoelétricos. Foram analisados trabalhos de vários investigadores sobre este tipo de gerador, a partir dos quais se identificaram e exploraram os constituintes de um gerador piezoelétrico.

Através do conhecimento adquirido foi desenvolvido um protótipo de um gerador piezoelétrico incorporado numa bota para o estudo da viabilidade da utilização de um equipamento que utilize este conceito para o fornecimento de energia elétrica a equipamentos elétricos e eletrónicos militares.

6.1 Análise dos resultados

Na primeira fase do desenvolvimento do protótipo verificou-se que a estrutura tipo placa dos transdutores não é a mais eficiente para a produção de energia elétrica. A estrutura de PLA desenvolvida, do tipo arco, causa maior deformação mecânica do material piezoelétrico, aumentando a potência elétrica gerada pelos transdutores.

Nos ensaios realizados verificou-se que a duração de cada passo era variável, devido ao facto dos passos terem sido dados por um indivíduo e não por uma estrutura mecânica controlada com exatidão. Ainda assim, através do método do cálculo do valor médio de dez medições, verificou-se precisão nos resultados, nomeadamente no ensaio e otimização das ligações elétricas do protótipo.

O protótipo desenvolvido é capaz de gerar 800 μJ de energia e 747 μW de potência média por passo, com cada ligação conectada separadamente a uma resistência de 1 $\text{M}\Omega$, sem retificadores de onda completa nem conversor DC/DC. Nos ensaios conduzidos apenas se utilizou um protótipo, no entanto é possível utilizar dois equipamentos deste género em simultâneo, produzindo o dobro da energia e da potência.

Durante os ensaios das ligações do protótipo verificou-se uma ligeira perda de

energia e de potência ao conectar as ligações 1 e 2 separadamente ao circuito, recorrendo a dois retificadores de onda completa. Assumiu-se que a ligeira perda não justificava a alteração da configuração do protótipo idealizada inicialmente e as três ligações foram conectadas separadamente ao circuito eletrónico. Na primeira fase foi gerado o gráfico da potência média gerada por um transdutor em cada zona em função da resistência (figura 5.9), no qual se pode verificar que a curva da zona 3 não se assemelha totalmente nem à curva da zona 1, nem à curva da zona 2. Desta dissemelhança, deduz-se que a otimização do protótipo poderá passar por refazer a ligação 1, separando os dois transdutores que se encontram na zona 1 e os dois transdutores que se encontram na zona 2.

Nos ensaios finais, já utilizando o circuito eletrónico completo, foi obtida a tensão pretendida de 3.3 V nos terminais de saída do gerador com apenas dois passos, menos vinte passos do que com apenas um transdutor.

6.2 Viabilidade de utilização do protótipo

Para estudar a viabilidade de utilização do protótipo para alimentação elétrica de equipamentos elétricos e eletrónicos de forças militares terrestres foi feito o levantamento de equipamentos utilizados pelos Fuzileiros Portugueses, assim como das suas especificações técnicas, que constam na tabela do apêndice F. Neste estudo apenas são consideradas as características elétricas do protótipo, pois não foram testadas outras características como o conforto, a estanqueidade do gerador nem a resistência do mesmo contra objetos cortantes ou deformações mecânicas muito elevadas.

Dos equipamentos listados verificou-se que aqueles apresentam menor potência média de funcionamento são as duas miras eletro-ópticas, o equipamento supressor de som e o localizador GPS (*global positioning system*), cujas potências médias de utilização são de 18.84 μ W, 4.5 mW, 17.14 mW e 35.71 mW, respetivamente, e todos utilizam pilhas.

Para utilizar o protótipo para alimentar um equipamento, por exemplo a mira eletro-ótica da EOTECH, seriam necessárias duas pilhas do tipo CR123, de modo a estar uma pilha a ser utilizada pelo equipamento e outra a ser carregada pelo protótipo. Na tabela 6.1 encontram-se os valores de energia armazenada em cada tipo de pilha assim como o número de passos necessários efetuar com o protótipo para as carregar e os respetivos tempos de carregamento, assumindo um ritmo de

um passo por segundo, sem pausas.

Tabela 6.1: Tempo de carregamento de cada pilha com o protótipo.

Pilha	Energia	N. ° de passos	Tempo
AA	13 500 J	16 856 037	390 dias
AAA	5 400 J	6 742 415	156 dias
CR123	16 200 J	20 227 245	468 dias
CR2032	2 376 J	2 966 663	69 dias

Conclui-se que a potência gerada pelo protótipo é muito reduzida em relação à potência necessária para carregar as pilhas em tempo útil, o que é evidenciado pelo tempo de carregamento das pilhas tomar valores de dezenas ou centenas de dias, enquanto que a maioria dos equipamentos gasta essa energia numa questão de horas. Para implementar este método, poder-se-ia reduzir a capacidade das pilhas, implicando uma troca de pilhas mais regular, que pode ser mais inconveniente do que transportar um par de pilhas descartáveis. Foram apenas abordados equipamentos que apresentam uma potência média de utilização menor, mais aproximada à potência gerada pelo protótipo, não se verificando a viabilidade da hipótese sugerida, razão pela qual não serão abordados os demais equipamentos.

Na dissertação de mestrado de Cruz (2019) foi desenvolvido um sistema de deteção de Homem ao Mar e duas das principais preocupações foram a sua miniaturização e a sua autonomia, garantindo o funcionamento permanente do sistema. Ao conjugar o sistema e o protótipo desenvolvido poderá ser garantida a permanente utilização do sistema por parte dos militares e aumentar a autonomia do sistema, conseguindo igualar a vida útil do sistema de deteção com a vida útil da bota, evitando manutenção intermédia.

6.3 Trabalhos futuros

Na continuidade do trabalho desenvolvido nesta dissertação, sugerem-se como trabalhos futuros:

- o estudo mais detalhado das outras fontes de energia abordadas;
- o desenvolvimento e experimentação de outros materiais piezoelétricos;

- a integração de vários geradores de energia elétrica num sistema de aproveitamento de vários tipos de energia;
- a otimização do protótipo desenvolvido;
- a miniaturização e otimização do acondicionamento de todos os componentes do protótipo;
- integração do protótipo desenvolvido num sistema de deteção de Homem ao Mar.

Bibliografia

- Arrow (2017), "Types of Switching DC to DC Converters", em <https://www.arrow.com/en/research-and-events/articles/types-of-switching-dc-dc-converters>.
- Bera, B. e Sarkar, M. (2017), "Piezoelectricity in pvdf and pvdf based piezoelectric nanogenerator: A concept", *IOSR Journal of Applied Physics*, volume 9, 2017, Índia, pp. 95 a 99.
- Bhalla, S. et al. (2017), *Piezoelectric materials: applications in SHM, Energy Harvesting and Bio-mechanics*, John Wiley & Sons e Athena Academic, 2017.
- botnroll.com (2022), "Sensor piezoelétrico 2cm", em <https://www.botnroll.com/pt/outros/391-sensor-piezo-electrico.html>.
- Carrette, L., Friedrich, K. A. e Stimming, U. (2001), "Fuel cells - fundamentals and applications", *FUEL CELLS*, volume 1, no. 1, 2001, pp. 5 a 39.
- City Labs (2022), "Tritium battery with decade-long betavoltaic battery power", em <https://citylabs.net/products/>.
- Covaci, C. e Gontean, A. (2020), "Piezoelectric energy harvesting solutions: A Review", *Sensors*, volume 20, 2020, Suíça, pp. 1 a 37.
- Cruz, D. (2019), Sistema de detecção de Homem ao Mar, Tese de Mestrado apresentada na Escola Naval, Alfeite, 2019.
- Decathlon (2022), "Painel Solar USB - 15W - SLR900", em https://www.decathlon.pt/p/painel-solar-usb-15w-slr900/_/R-p-324491?mc=8581513.
- EDP (2018), "Parques Eólicos", em <https://www.edp.com/pt-pt/parques-eolicos>.
- EDP (2020), "Como funciona um painel solar fotovoltaico?", em <https://www.edp.pt/particulares/content-hub/como-funciona-um-painel-fotovoltaico/>.
- EDP (2022), "Visita virtual 360: Barragem do Alqueva", em <https://www.edp.com/pt-pt/historias-edp/visita-virtual-barragem-do-alqueva1>.

- Gao, X. et al. (2019), “Piezoelectric actuators and motors: materials, designs, and applications”, *Advanced Materials Technologies*, volume 5, no. 1, 2019, Weinheim.
- Geology.com (2022), “Herkimer Diamonds”, em <https://geology.com/articles/herkimer-diamonds.shtml>.
- Guo, H. e Lal, A. (2003), “Nanopower betavoltaic microbatteries”, *Sensor*, volume 1, 2003, pp. 36 a 39.
- Harper, J. (2015), “The Army Wants to Power Up Dismounted Soldiers”, *National Defense*, volume 100, no. 743, 2015, pp. 42 a 45, em <https://www.jstor.org/stable/10.2307/27021024>.
- Heywang, W., Lubitz, K. e Wersing, W. (2008), *Piezoelectricity: Evolution and future of a technology*, Springer, 2008.
- Historical Medical Library (2021), “Quartz Piezo Electrometer”, em <https://www.cppdigitallibrary.org/items/show/2593?search=curie>.
- Hwang, S. et al. (2015), “Designing and manufacturing a piezoelectric tile for harvesting energy from footsteps”, *Current Applied Physics*, volume 15, no. 6, 2015, pp. 669 a 674, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1567173915000474>, acedido em Fevereiro de 2021.
- Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE standard on piezoelectricity, ANSI/IEEE Std 176-1987.
- Jabbar, H. et al. (2017), “Sustainable micro-power circuit for piezoelectric energy harvesting tile”, *Integrated Ferroelectrics*, volume 183, no. 1, 2017, pp. 193–209.
- Jaffe, B., Cook, W. e Jaffe, H. (1971), *Piezoelectric ceramics*, Academic Press, 1971.
- Kim, H. et al. (2005), “Piezoelectric energy harvesting under high pre-stressed cyclic vibrations”, *Journal of Electroceramics*, volume 15, 2005, pp. 27 a 34.
- Li, J. (2021), *Lead-free piezoelectric materials*, 1^a ed., WILEY-VCH GmbH, 2021.
- Luque, A. e Hegedus, S. (2003), *Handbook of photovoltaic science and engineering*, John Wiley & Sons, 2003.

- PCBMotor (2012), “Introducing piezo motor technology”, em <https://pcbmotor.com/introducing-piezo-motor-technology/>.
- Ramadass, Y. e Chandrakasan, A. (2010), “An efficient piezoelectric energy harvesting interface circuit using a bias-flip rectifier and shared inductor”, *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, volume 45, no.1, 2010, pp. 189 a 204.
- República Portuguesa, Ministério da Defesa Nacional, Portaria no. 1445-A/95, Regulamento de Uniformes dos Militares da Marinha, Diário da República, I série B no. 277, 30 de Novembro de 1995, pp. 7508(1) a 7508(162).
- Rocha, J. et al. (2010), “Energy harvesting from piezoelectric materials fully integrated in footwear”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, volume 57, no. 3, 2010, pp. 813-819.
- Sezer, N., e Koç, M. (2021), “A comprehensive review on the state-of-the-art of piezoelectric energy harvesting”, *Nano Energy*, volume 80, 2021, em <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211285520311411>.
- Swanner, J. et al. (2017), “Integrating multiple energy harvesting systems for department of defense applications”, *EESAT Conference Proceedings*, 2017.
- Tawil, S. e Zainal, M. (2018), “Energy harvesting using TEG and PV cell for low power application”, *AIP Conference Proceedings*, volume 1930, 2018.
- Uchino, K. (2017), *Advanced piezoelectric materials: Science and technology*, 2^a ed., Woodhead Publishing, 2017.
- WaterLily (2022), “WindLily Bundle”, em <https://shop.waterlilyturbine.com/products/windlily-bundle>.
- Xin, Y. et al. (2016), “Shoes-equipped piezoelectric transducer for energy harvesting: A brief review”, *Ferroelectrics*, volume 493, 2016, pp. 12 a 24.
- Yasser, A. e Basrour, S. (2007), “Non linear techniques for increasing harvesting energy from piezoelectric and electromagnetic micro-power-generators”, *DTIP 2006*, Stresa, Lago Maggiore, Itália.
- Zhao, J. e You, Z. (2014), “A shoe-embedded piezoelectric energy harvester for wearable sensors”, *Sensors*, volume 14, 2014, Suíça, pp. 12497 a 12510.

- Zhou, C. et al. (2021), “Review—betavoltaic cell: The past, present, and future”, *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, volume 10 , 2021.
- Zhu, J. et al. (2020), “Progress in teng technology—a journey from energy harvesting to nanoenergy and nanosystem”, *EcoMat*, volume 2.
- Zungeru, A. et al. (2012). “Radio frequency energy harvesting and management for wireless sensor networks”, *Green mobile devices and networks: Energy optimization and scavenging techniques*, 2012, Boca Raton, pp. 341-367.

Apêndice A - Código desenvolvido em Matlab

Sub-rotina para leitura e pré-processamento de dados

```
function [waveform,step_waveform,Ts]=data_reader(folder,FileName)
% Criacao da table atraves dos dados do ficheiro .CSV
filename=fullfile(folder, FileName);
table=readtable(filename);

% Criacao da matriz waveform em que a primeira coluna contem o
%tempo da amostra e a segunda coluna contem o valor de tensao
%lido
waveform=table{:,4:5};
Ts=table{2,2};

% Codigo para eliminar dados pre experiencia nao desejaveis
% Retirar fim de experiencia do inicio
num_rows=size(waveform,1);
value_end=waveform(num_rows,2);

for i=1:size(waveform,1)
    if waveform(i,2)~=value_end
        offset=i;
        break
    end
end

waveform(1:offset,:)=[];
num_rows=size(waveform,1);

tolerance=100;
sample_size=50;
num_count=0;
experiment_end=0;

sample_begin=waveform(1:sample_size,2);
max_begin=max(abs(sample_begin));

%Anular todos os valores ate ao inicio da medicao
for i=1:num_rows
```



```

    if abs(waveform(i,2)) ≤ max_begin
        waveform(i,2)=0;
    else
        step_begin_index=i-1;
        break
    end
end

%Retirar o ruído no meio da medicação
for k=i:num_rows
    if num_count==tolerance
        waveform((k-tolerance+1):k,2)=0;
        num_count=0;
    end

    if abs(waveform(k,2)) ≤ max_begin
        num_count=num_count+1;
    else
        num_count=0;
    end

    if waveform(k,2)==value_end && experiment_end==0
        waveform(k-tolerance:k-1,2)=0;
        experiment_end=1;
        experiment_end_index=k;
    end
end

waveform(experiment_end_index:num_rows,:)=[];

% Mostrar apenas o passo
for i=size(waveform,1):-1:1
    if waveform(i,2) ≠ 0
        step_end_index=i+1;
        break
    end
end

% Criar a waveform que contém apenas o passo
step_waveform=waveform(step_begin_index:step_end_index,:);
step_waveform(:,1)=step_waveform(:,1)-step_waveform(1,1);
end

```

Sub-rotina para processamento de dados

```
function [Vpeak,energy,Paverage,currentaverage]= ...
    data_analyser(step_waveform,resistor,Ts)
step_time=step_waveform(size(step_waveform,1),1);

% Tensao de pico
Vpeak_pos=max(step_waveform(:,2));
Vpeak_neg=min(step_waveform(:,2));

if Vpeak_pos>=Vpeak_neg
    Vpeak=Vpeak_pos;
else
    Vpeak=Vpeak_neg;
end

% Energia: integral da potencia v2/r
step_waveform_squared=step_waveform;
for i=1:size(step_waveform,1)
    step_waveform_squared(i,2)=(step_waveform(i,2))^2;
end

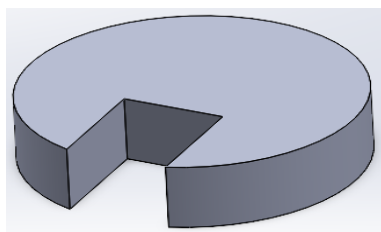
energy=trapz(step_waveform_squared(:,1),step_waveform_squared(:,2))/
resistor;

% Potencia de pico e media
Ppeak=max(step_waveform_squared(:,2))/resistor;
Paverage=energy/step_time;

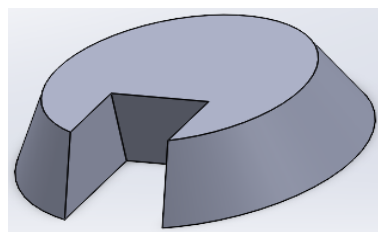
%Corrente
currentaverage=sqrt(Paverage*resistor)/resistor;

end
```

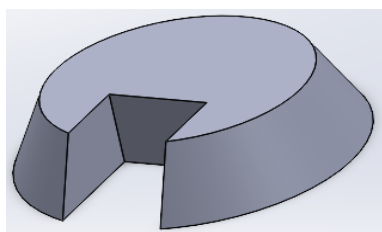

Apêndice B - Estruturas de PLA testadas



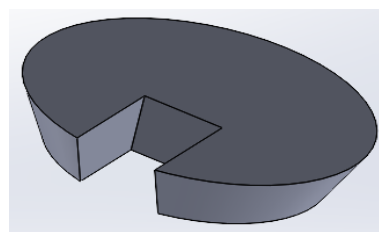
Estrutura 1.



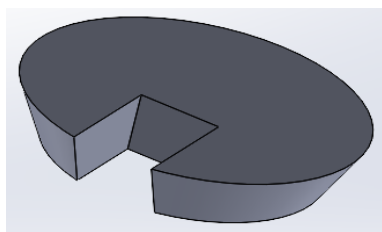
Estrutura 2.



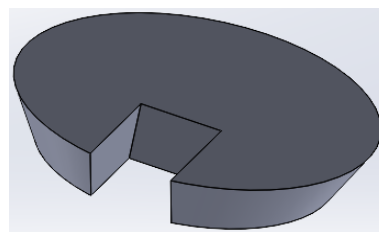
Estrutura 3.



Estrutura 4.



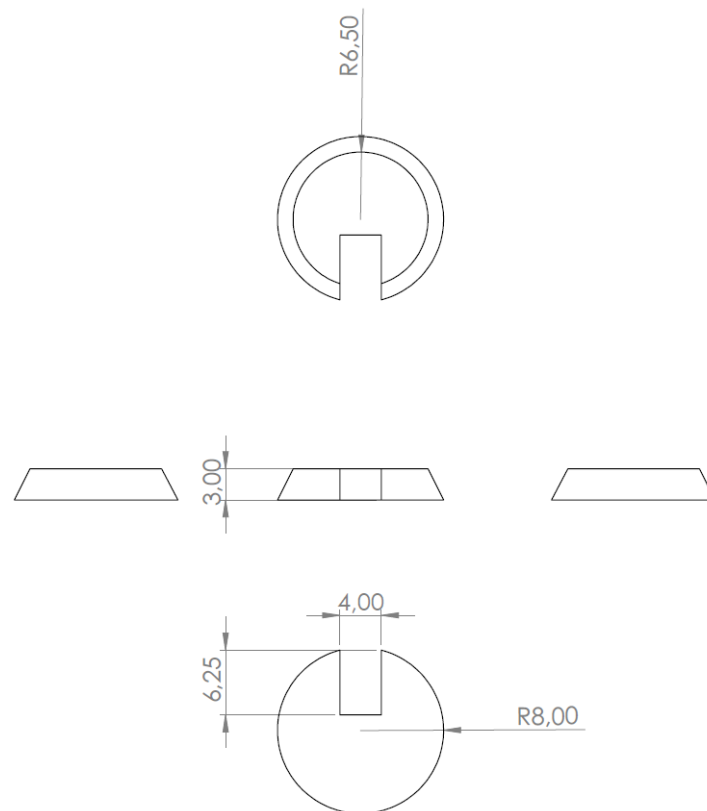
Estrutura 5.



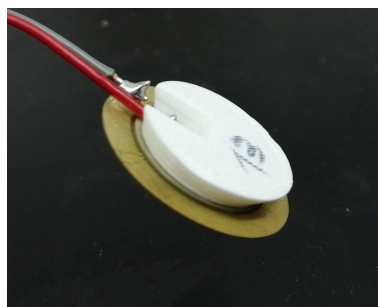
Estrutura 6.

Estrutura	Diâm. base	Diâm. topo	Altura	Infill
Estrutura 1	13 mm	13 mm	3 mm	40%
Estrutura 2	13 mm	10 mm	3 mm	40%
Estrutura 3	13 mm	10 mm	3 mm	100%
Estrutura 4	13 mm	16 mm	3 mm	40%
Estrutura 5	13 mm	16 mm	3 mm	100%
Estrutura 6	14 mm	17 mm	3 mm	100%

Apêndice C - Estrutura de PLA incorporada nos transdutores

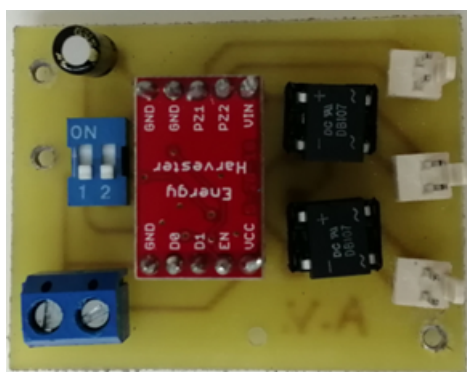


Especificações da estrutura da PLA.

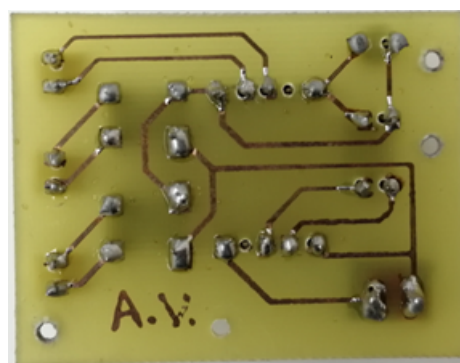


Estrutura de PLA colada num transdutor.

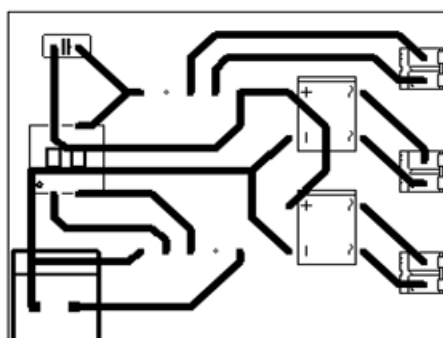
Apêndice D - Placa de circuito impresso desenvolvida



Parte superior.

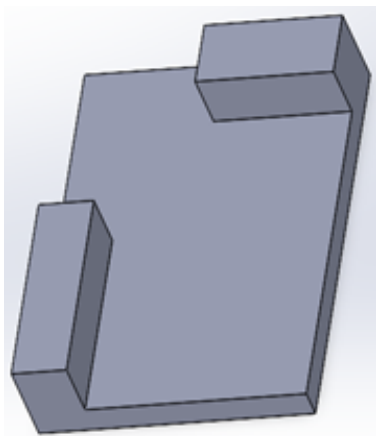


Parte inferior.



Esquema do circuito eletrônico.

Apêndice E - Suporte para a placa de circuito impresso desenvolvido



Modelo CAD.



Suporte instalado no protótipo.



Vista frontal.



Vista traseira.

Apêndice F - Equipamentos utilizados pelos Fuzi- leiros Portugueses

Tipologia	Fabricante	Modelo	Armazenamento de energia	Tensão de alimentação	Carga armazenada	Autonomia	Potência média calculada
Beacon	Cejay Engineering	Mercury - 9 [™]	1 pilha do tipo AA	1.5 V	2500 mA.h	Modo flash Hi: 80 h Modo contínuo Hi: 8 h	Modo flash Hi: 46.88 mW Modo contínuo Hi: 468.75 mW
Câmara de filmar	GoPro	Hero 2	Bateria	3.7 V	1100 mA.h	2.5 h	1.63 W
Transreceptor de comunicações VHF	Icom	IC-M85E	Bateria	7.2 V	2010 mA.h	14h (42 min TX, 42 min RX e 756 min STB)	1.03 W
Localizador GPS e calculador balístico	Garmin	Foretrex® 701 Ballistic Edition	2 pilhas do tipo AAA	3 V	2 x 1000 mA.h	Modo GPS: 48 h Modo UltraTrac™: 168 h	Modo GPS: 125 mW Modo UltraTrac™: 35.71 mW
Lanterna	Inforce	WML White - Gen 2	1 pilha do tipo CR123A	3 V	1500 mA.h	1.5 h	3 W
Lanterna	Streamlight	TLR-VIR® II	1 pilha do tipo CR123A	3 V	1500 mA.h	Luz visível: 1.5 h Infravermelho: 12 h	Luz visível: 3 W Infravermelho: 37.5 mW
Mira eletro-ótica	EOTECH	HWS EXP53™	1 pilha do tipo CR123	3 V	1500 mA.h	1000 h	4.5 mW
Mira eletro-ótica	Trijicon	RMR® Type 2 Red Dot Sight	1 pilha do tipo CR2032	3 V	220 mA.h	4 anos	18.84 µW
Equipamento de visão noturna	Exelis	F5050	1 pilha do tipo AA	1.5 V	2500 mA.h	12.5 h	300 mW
Designador laser com calculador balístico	Willcox®	RAPTAR S	1 pilha do tipo CR123	3 V	1500 mA.h	7 h	642.86 mW
Supressor de som	Honeywell	Impact® Sport	2 pilhas do tipo AAA	3 V	2 x 1000 mA.h	350 h	17.14 mW
Dispositivo <i>android</i>	Samsung	Galaxy A22	Bateria	4.43 V	5000 mA.h	Mínimo: 24 h Máximo: 97 h	Mínimo: 228.35 mW Máximo: 922.92 mW

Anexo A - Extrato da ficha técnica dos transdutores 7BB-20-6LO da muRata

P37E.pdf
Feb. 1, 2022

muRata
INNOVATOR IN ELECTRONICS

Piezoelectric Sound Components



Pin Type Piezoelectric Sounders (PKHPS Series)

(Part Number)

PK	HPS	0013	E	40	**	-A2
1	2	3	4	5	6	7

① Product ID

Product ID	
PK	Piezoelectric Sound Components

② Product

Code	Product
HPS	Pin Type Sounder

③ Dimensions

Code	Outer Dimensions
0013	ø12.6mm

④ Drive

Code	Drive
E	External Drive

⑤ Oscillating Frequency Type

Expressed resonant frequency by two-digit alphanumerics. The unit is in 100 hertz (Hz.) 4kHz (4000Hz) is denoted as "40."

⑥ Individual Specification Code

Code	Individual Specification Code
**	Two digits express specific specification in characteristics.

⑦ Packaging

Code	Packaging
-A2	Radial Taping

Piezoelectric Diaphragms

(Part Number)

7	N	B	-****	-1RS	L	10
1	2	3	4	5	6	7

① Product ID

Product ID	
7	Ceramic Material

② Metal Plate Material

Code	Metal Plate Material
B	Brass
N	Nickel Alloy

③ Product

Code	Product
B	Piezoelectric Diaphragms

④ Metal Plate Diameter

Code	Metal Plate Diameter
-****	A hyphen (-) plus from two to four-digit alphanumerics express metal plate outer dimensions. A decimal point is expressed by the capital letter "R."

⑤ Resonant Frequency Type

A hyphen (-) and three-digit alphanumerics express resonant frequency. A decimal point is expressed by the capital letter "R." If there is no decimal point, the decimal point code is omitted.

⑥ Product Specification

Code	Product Specification
L	With lead (available for RoHS)
—	No lead (omitted)

⑦ Individual Specification Code

These digits express a lead length, lead number, and the presence/absence of a connector. If the product has no individual specification, the corresponding code is omitted.

Piezoelectric Sound Components

Piezoelectric Diaphragms



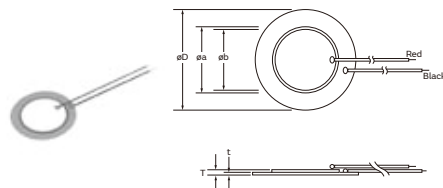
Features

1. Clear sound
2. Ultra thin and lightweight
3. No contacts; therefore, noiseless and highly reliable
4. Low power consumption for voltage type

Applications

Clocks/Calculators/Digital camera/Various alarms
(Burglar alarms, etc.)

* Murata's piezoelectric diaphragms for sound generation are specialized for functions that generate confirmation tones and other sounds. They cannot be used for other functions.



External Drive Type

Part Number	Resonant Frequency (kHz)	Resonant Impedance (Ω)	Capacitance (nF)	Plate Size øD (mm)	Element Size øa (mm)	Electrode Size øb (mm)	Thickness T (mm)	Plate Thickness t (mm)	Plate Material
7BB-12-9	9.0 ±1.0kHz	1000 max.	8.0 ±30% [1kHz]	12.0	9.0	8.0	0.22	0.10	Brass
7BB-15-6	6.0 ±1.0kHz	800 max.	10.0 ±30% [1kHz]	15.0	10.0	9.0	0.22	0.10	Brass
7BB-20-3	3.6 ±0.6kHz	500 max.	20.0 ±30% [1kHz]	20.0	14.0	12.8	0.22	0.10	Brass
7BB-20-6	6.3 ±0.6kHz	350 max.	10.0 ±30% [1kHz]	20.0	14.0	12.8	0.42	0.20	Brass
7BB-20-6LO	6.3 ±0.6kHz	1000 max.	10.0 ±30% [1kHz]	20.0	14.0	12.8	0.42	0.20	Brass (with Lead Wire: AWG32 Length 50mm)
7BB-27-4	4.6 ±0.5kHz	200 max.	20.0 ±30% [1kHz]	27.0	19.7	18.2	0.54	0.30	Brass
7BB-27-4LO	4.6 ±0.5kHz	300 max.	20.0 ±30% [1kHz]	27.0	19.7	18.2	0.54	0.30	Brass (with Lead Wire: AWG32 Length 50mm)
7BB-35-3	2.8 ±0.5kHz	200 max.	30.0 ±30% [1kHz]	35.0	25.0	23.0	0.53	0.30	Brass
7BB-35-3LO	2.8 ±0.5kHz	200 max.	30.0 ±30% [1kHz]	35.0	25.0	23.0	0.53	0.30	Brass (with Lead Wire: AWG32 Length 50mm)
7BB-41-2	2.2 ±0.3kHz	250 max.	30.0 ±30% [1kHz]	41.0	25.0	23.0	0.63	0.40	Brass
7BB-41-2LO	2.2 ±0.3kHz	300 max.	30.0 ±30% [1kHz]	41.0	25.0	23.0	0.63	0.40	Brass (with Lead Wire: AWG32 Length 50mm)
7NB-31R2-1	1.3 ±0.5kHz	300 max.	40.0 ±30% [120Hz]	31.2	19.7	18.2	0.22	0.10	Nickel Alloy

△Caution · Notice

△Caution (Rating)

Do not use the product beyond the rated temperature range. If using it beyond this range, characteristics might degrade.

The rated voltage range is not specified; depending on the driving condition or the mounting method, the rated voltage range is different. In your evaluation, please use actual operating voltage.

3

Notice (Storage and Operating Condition)

1. Product Storage Condition

Please store the products in a room where the temperature/humidity is stable and avoid places where there are large temperature changes. Please store the products under the following conditions.

Temperature: -10 to +40°C

Humidity: 15 to 85%R.H.

2. Expiration Date on Storage

Expiration date (shelf life) of the products is six months after delivery under the condition of a sealed and unopened package. Please use the products within six months after delivery. If you store the products for a long time (more than six months), use carefully because the products may be degraded in solderability due to storage under poor conditions.

Please confirm solderability and characteristics for the products regularly.

3. Notice on Product Storage

(1) Please do not store the products in a chemical atmosphere (Acids, Alkali, Bases, Organic gas, Sulfides and so on), because the characteristics may be reduced in quality, may be degraded in solderability due to storage in a chemical atmosphere.

(2) Please do not store the products directly on the floor without anything under them to avoid damp places and/or dusty places.

(3) Please do not store the product in places such as in a damp heated place or any place exposed to direct sunlight or excessive vibration.

(4) Please use the products immediately after the package is opened, because the characteristics may be reduced in quality, and/or be degraded in solderability due to storage under poor conditions.

(5) Please be sure to consult with our sales representative or engineer whenever the products are to be used in conditions not listed above.

4. Operating Environment

This product is designed for application in an ordinary environment (normal room temperature, humidity and atmospheric pressure).

Do not use the products in a chemical atmosphere such as chlorine gas, acid or sulfide gas.

Characteristics might degrade by a chemical reaction with the material used in products.

Notice (Soldering and Mounting)

1. Mounting

When mounting the product on your set, pressing force should be applied to only the supporting part. When force is applied to the non-supporting part, cracks might occur, causing unstable sounds.

2. Soldering

(1) Please consult with a Murata representative if you need to solder the lead wires to the product. We can deliver the products with soldered lead wires. When soldering, it is recommended to solder by heating the product (from 60 to 80°C, more than 10 sec). Including the presence or absence of heating, please use after a thorough evaluation about soldering. Soldering condition is as follows.

· Metal Plate

Temperature of soldering iron: from 410 to 450°C
 Soldering Time: within 3 sec.

· Ag electrode

Temperature of soldering iron: from 320 to 350°C
 Soldering Time: within 0.5 sec.

· Solder: Sn-Ag-Cu (Flux-cored solder)

(2) Soldering condition of the lead wire to printed circuit board by using soldering iron.

· Temperature: 350±5°C

· Time: within 3.0±0.5 sec.

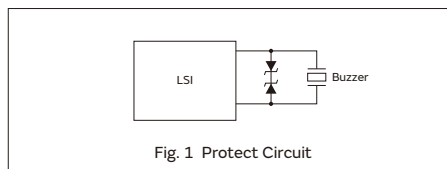
Continued on the following page. ↗

⚠Caution · Notice

Continued from the preceding page. ↩

Notice (Handling)

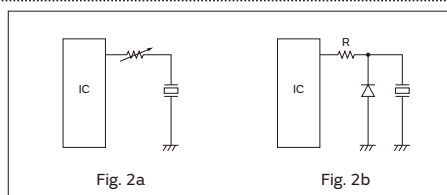
1. Piezoelectric ceramic is used in this product. Please use care in handling, because the ceramic is broken when excessive force is applied.
2. To avoid rusting, please do not touch the products with bare hands.
3. Please do not pull the lead wire of the product. Pulling may cause the lead wire to disconnect or to peel off the solder point.
4. When attaching a connector to the lead wires, please do not apply force to the soldering part. After attaching a connector, we recommend checking the connecting status.
5. Please do not bend the product or apply any force to it. Also, please do not press it with sharp objects. Applying force could cause cracks to occur in the piezoelectric ceramic, resulting in unstable sounds.
6. Please do not drop the product or apply shock or temperature change to it. If so, the LSI might be destroyed by the charge (surge voltage) generated. Fig.1 shows an example driving circuit using zener diode.



3

Notice (Driving)

1. Ag migration might occur if DC voltage is applied to the product under a high humidity environment. Please avoid using it under high humidity and design the circuit not to apply DC voltage.
2. When driving the product by IC, please insert the resistance of 1k to 2kΩ in series. The purpose is to protect the IC and to obtain stable sound. (Please see Fig. 2a). Inserting a diode in parallel to the product has the same effect. (Please see Fig. 2b).



Oscillating System

Basically, the sound source of a piezoelectric sound component is a piezoelectric diaphragm. A piezoelectric diaphragm consists of a piezoelectric ceramic plate that has electrodes on both sides and a metal plate (brass or stainless steel, etc.).

A piezoelectric ceramic plate is attached to a metal plate with adhesives. Fig. 2 shows the oscillating system of a piezoelectric diaphragm.

Applying DC voltage between electrodes of a piezoelectric diaphragm causes mechanical distortion due to the piezoelectric effect. For a misshapen piezoelectric element, the distortion of the piezoelectric element expands in a radial direction, and the piezoelectric diaphragm bends toward the direction shown in Fig. 2 (a). The metal plate bonded to the piezoelectric element does not expand. Conversely, when the piezoelectric element shrinks, the piezoelectric diaphragm bends in the direction shown in Fig. 2 (b). Thus, when AC voltage is applied across electrodes, the bending shown in Fig. 2 (a) and Fig. 2 (b) is repeated as shown in Fig. 2 (c), producing sound waves in the air.

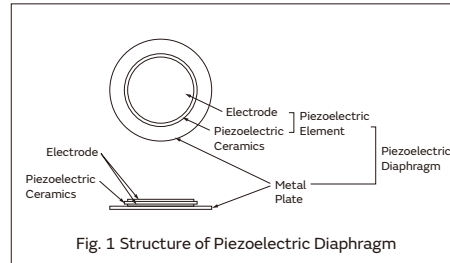


Fig. 1 Structure of Piezoelectric Diaphragm

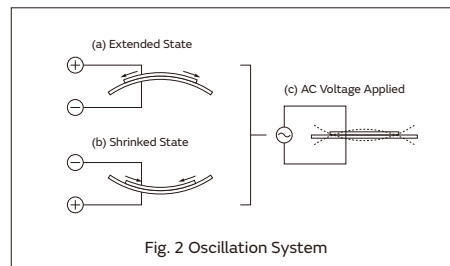


Fig. 2 Oscillation System

Anexo B - Ficha técnica do circuito integrado LTC3588-1



LTC3588-1

Nanopower Energy Harvesting Power Supply

FEATURES

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

APPLICATIONS

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

DESCRIPTION

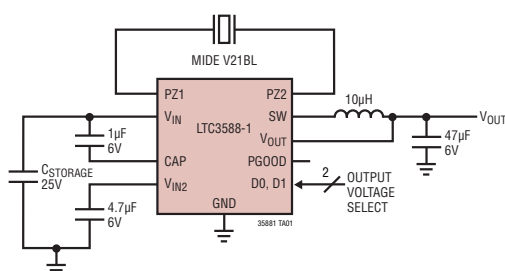
The LTC3588-1 integrates a low-loss full-wave bridge rectifier with a high efficiency buck converter to form a complete energy harvesting solution optimized for high output impedance energy sources such as piezoelectric, solar, or magnetic transducers. An ultralow quiescent current undervoltage lockout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

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

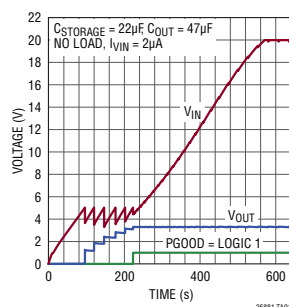
LT, LT, LTC, LTM, Linear Technology, the Linear logo and Burst Mode are registered trademarks of Linear Technology Corporation. All other trademarks are the property of their respective owners.

TYPICAL APPLICATION

100mA Piezoelectric Energy Harvesting Power Supply



LTC3588-1 3.3V Regulator Start-Up Profile



For more information www.linear.com/LTC3588-1

1

LTC3588-1

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS (Note 1)

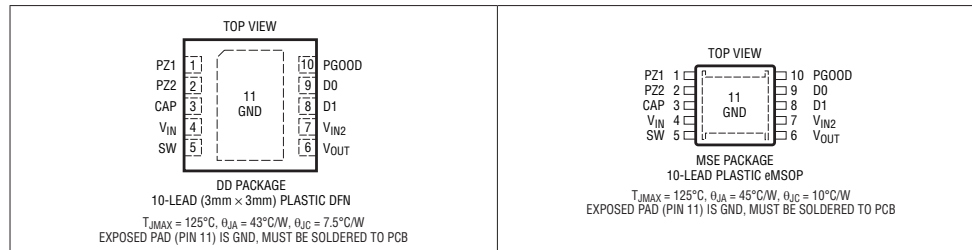
V_{IN}	Low Impedance Source	–0.3V to 18V*
	Current Fed, $I_{SW} = 0A$	25mA†
PZ1, PZ2		0V to V_{IN}
D0, D1		–0.3V to [Lesser of ($V_{IN2} + 0.3V$) or 6V]
CAP		[Higher of –0.3V or ($V_{IN} - 6V$)] to V_{IN}
V_{IN2}		–0.3V to [Lesser of ($V_{IN} + 0.3V$) or 6V]

* V_{IN} has an internal 20V clamp

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

V_{OUT}	–0.3V to Lesser of ($V_{IN2} + 0.3V$) or 6V
PGOOD	–0.3V to Lesser of ($V_{OUT} + 0.3V$) or 6V
I_{PZ1}, I_{PZ2}	$\pm 50mA$
I_{SW}	350mA
Operating Junction Temperature Range	(Notes 2, 3) –40 to 125°C
Storage Temperature Range	–65 to 150°C
Lead Temperature (Soldering, 10 sec)	MSE Only 300°C

PIN CONFIGURATION



ORDER INFORMATION

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

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

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

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

35881fc

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

The ● denotes the specifications which apply over the full operating junction temperature range, otherwise specifications are for $T_A = 25^\circ\text{C}$. (Note 2) $V_{IN} = 5.5\text{V}$ unless otherwise specified.

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
V_{IN}	Input Voltage Range	Low Impedance Source on V_{IN}	●		18.0	V
I_{VIN}	V_{IN} Quiescent Current UVLO Buck Enabled, Sleeping Buck Enabled, Sleeping Buck Enabled, Not Sleeping	$V_{IN} = 2.5\text{V}$, Not PGOOD $V_{IN} = 4.5\text{V}$ $V_{IN} = 18\text{V}$ $I_{SW} = 0\text{A}$ (Note 4)		450 950 1.7 150	700 1500 2.5 250	nA nA μA μA
V_{UVLO}	V_{IN} Undervoltage Lockout Threshold	V_{IN} Rising 1.8V Output Selected; D1 = 0, D0 = 0 2.5V Output Selected; D1 = 0, D0 = 1 3.3V Output Selected; D1 = 1, D0 = 0 3.6V Output Selected; D1 = 1, D0 = 1 V_{IN} Falling 1.8V Output Selected; D1 = 0, D0 = 0 2.5V Output Selected; D1 = 0, D0 = 1 3.3V Output Selected; D1 = 1, D0 = 0 3.6V Output Selected; D1 = 1, D0 = 1	● ● ● ● ● ● ● ● ● ●	3.77 3.77 4.73 4.73 2.66 2.66 3.42 3.75	4.04 4.04 5.05 5.05 2.87 2.87 3.67 4.02	4.30 4.30 5.37 5.37 3.08 3.08 3.91 4.28 V V V V V V V V
V_{SHUNT}	V_{IN} Shunt Regulator Voltage	$I_{VIN} = 1\text{mA}$		19.0	20.0	21.0 V
I_{SHUNT}	Maximum Protective Shunt Current	1ms Duration		25		mA
	Internal Bridge Rectifier Loss ($ V_{PZ1} - V_{PZ2} - V_{IN}$)	$I_{BRIDGE} = 10\mu\text{A}$		350	400	450 mV
	Internal Bridge Rectifier Reverse Leakage Current	$V_{REVERSE} = 18\text{V}$			20	nA
	Internal Bridge Rectifier Reverse Breakdown Voltage	$I_{REVERSE} = 1\mu\text{A}$		V_{SHUNT}	30	V
V_{OUT}	Regulated Output Voltage	1.8V Output Selected Sleep Threshold Wake-Up Threshold 2.5V Output Selected Sleep Threshold Wake-Up Threshold 3.3V Output Selected Sleep Threshold Wake-Up Threshold 3.6V Output Selected Sleep Threshold Wake-Up Threshold	● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ●	1.710 2.425 3.201 3.492	1.812 1.788 2.512 2.488 3.312 3.288 3.612 3.588	1.890 V V 2.575 V 3.399 V 3.708 V V
	PGOOD Falling Threshold	As a Percentage of the Selected V_{OUT}		83	92	%
I_{VOUT}	Output Quiescent Current	$V_{OUT} = 3.6\text{V}$		89	150	nA
I_{PEAK}	Buck Peak Switch Current			200	260	350 mA
I_{BUCK}	Available Buck Output Current			100		mA
R_P	Buck PMOS Switch On-Resistance			1.1		Ω
R_N	Buck NMOS Switch On-Resistance			1.3		Ω
	Max Buck Duty Cycle		●	100		%
$V_{IH}(D0, D1)$	D0/D1 Input High Voltage		●	1.2		V
$V_{IL}(D0, D1)$	D0/D1 Input Low Voltage		●		0.4	V
$I_{IH}(D0, D1)$	D0/D1 Input High Current				10	nA
$I_{IL}(D0, D1)$	D0/D1 Input Low Current				10	nA

35881fc

For more information www.linear.com/LTC3588-1

LTC3588-1

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

Note 1: Stresses beyond those listed under Absolute Maximum Ratings may cause permanent damage to the device. Exposure to any Absolute Maximum Rating condition for extended periods may affect device reliability and lifetime.

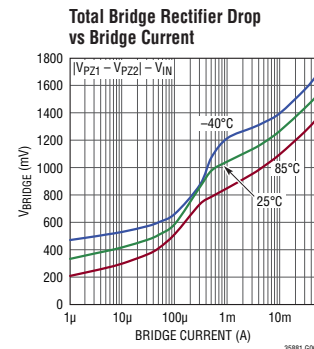
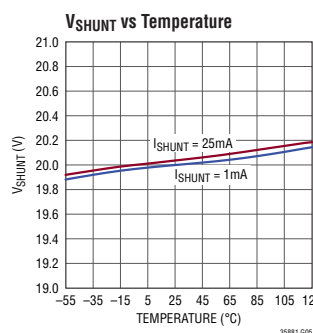
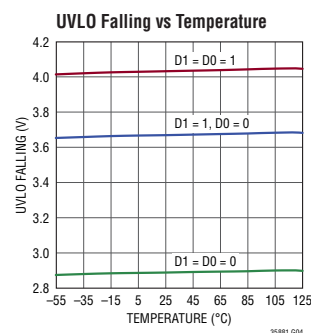
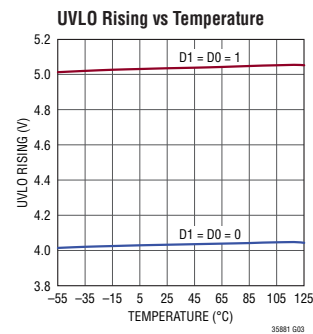
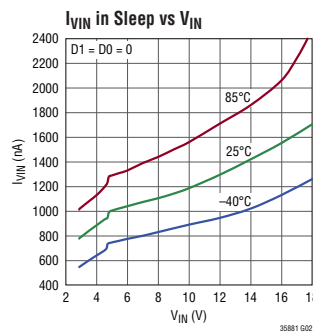
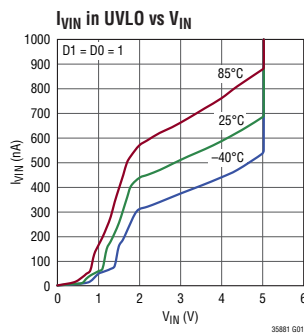
Note 2: The LTC3588-1 is tested under pulsed load conditions such that $T_J \approx T_A$. The LTC3588E-1 is guaranteed to meet specifications from 0°C to 85°C junction temperature. Specifications over the -40°C to 125°C operating junction temperature range are assured by design, characterization, and correlation with statistical process controls. The LTC3588-1 is guaranteed over the full -40°C to 125°C operating

junction temperature range. Note that the maximum ambient temperature consistent with these specifications is determined by specific operating conditions in conjunction with board layout, the rated package thermal impedance and other environmental factors.

Note 3: The junction temperature (T_J , in °C) is calculated from the ambient temperature (T_A , in °C) and power dissipation (P_D , in Watts) according to the formula: $T_J = T_A + (P_D \cdot \theta_{JA})$, where θ_{JA} (in °C/W) is the package thermal impedance.

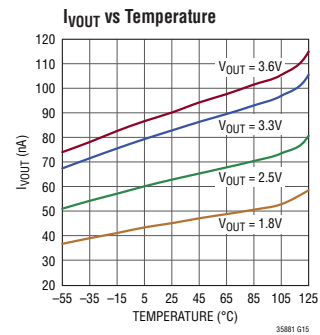
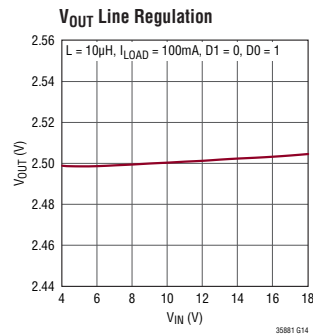
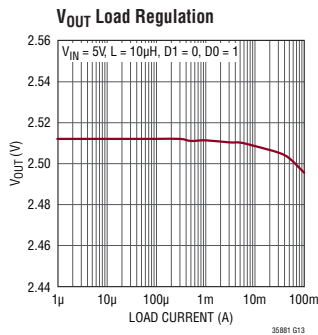
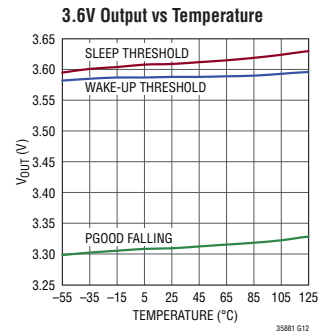
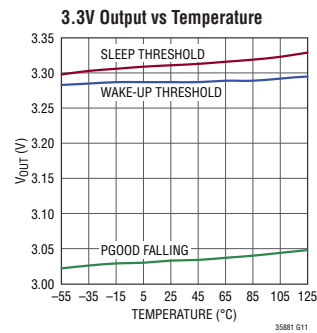
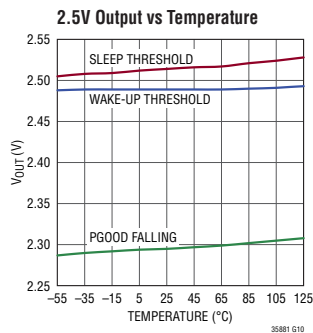
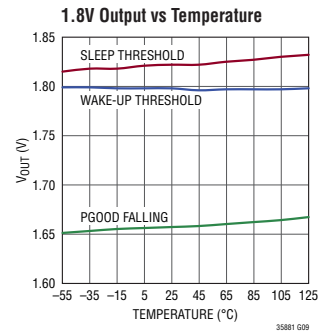
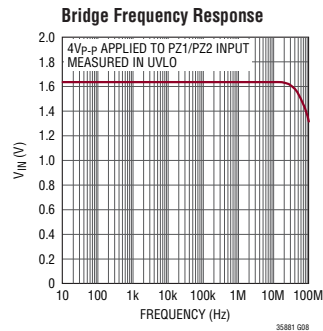
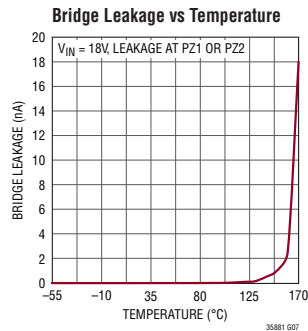
Note 4: Dynamic supply current is higher due to gate charge being delivered at the switching frequency.

TYPICAL PERFORMANCE CHARACTERISTICS



35881fc

TYPICAL PERFORMANCE CHARACTERISTICS

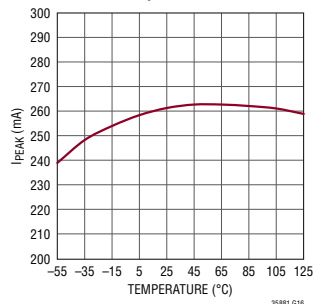


35881fc

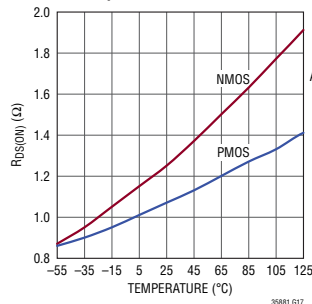
LTC3588-1

TYPICAL PERFORMANCE CHARACTERISTICS

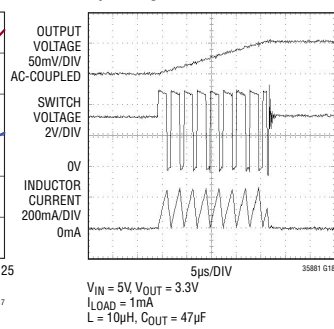
I_{PEAK} vs Temperature



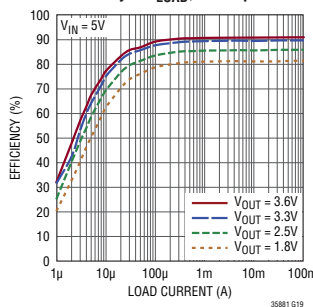
$R_{DS(ON)}$ of PMOS/NMOS vs Temperature



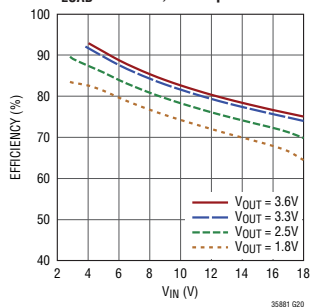
Operating Waveforms



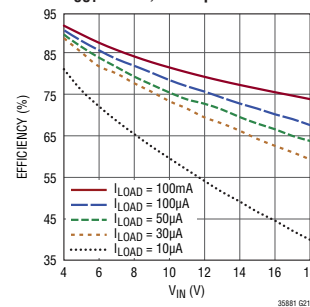
Efficiency vs I_{LOAD} , $L = 10\mu H$



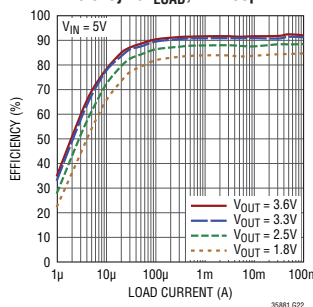
Efficiency vs V_{IN} for $I_{LOAD} = 100mA$, $L = 10\mu H$



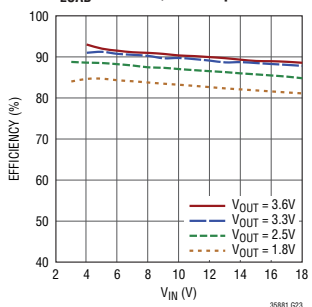
Efficiency vs V_{IN} for $V_{OUT} = 3.3V$, $L = 10\mu H$



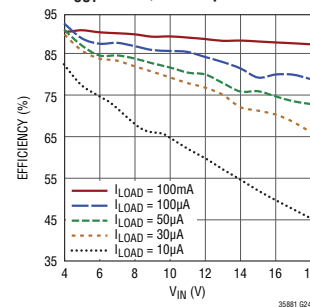
Efficiency vs I_{LOAD} , $L = 100\mu H$



Efficiency vs V_{IN} for $I_{LOAD} = 100mA$, $L = 100\mu H$



Efficiency vs V_{IN} for $V_{OUT} = 3.3V$, $L = 100\mu H$



35881fc

PIN FUNCTIONS

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

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

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

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

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

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

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

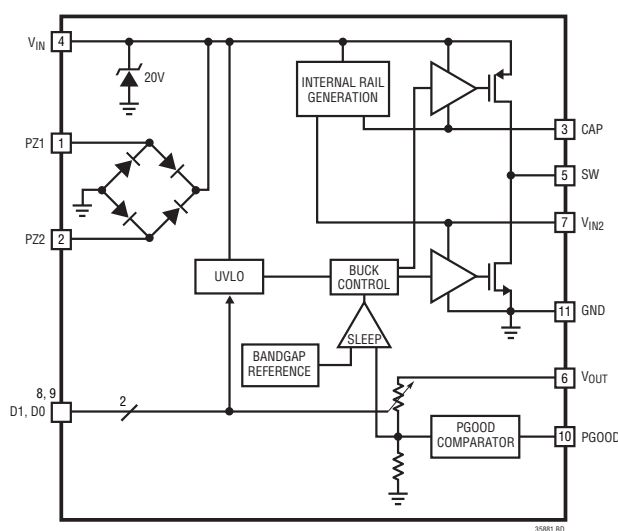
D1 (Pin 8): Output Voltage Select Bit. D1 should be tied high to V_{IN2} or low to GND to select desired V_{OUT} (see Table 1).

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

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

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

BLOCK DIAGRAM



358811c

OPERATION

The LTC3588-1 is an ultralow quiescent current power supply designed specifically for energy harvesting and/or low current step-down applications. The part is designed to interface directly to a piezoelectric or alternative A/C power source, rectify a voltage waveform and store harvested energy on an external capacitor, bleed off any excess power via an internal shunt regulator, and maintain a regulated output voltage by means of a nanopower high efficiency synchronous buck regulator.

Internal Bridge Rectifier

The LTC3588-1 has an internal full-wave bridge rectifier accessible via the differential PZ1 and PZ2 inputs that rectifies AC inputs such as those from a piezoelectric element. The rectified output is stored on a capacitor at the V_{IN} pin and can be used as an energy reservoir for the buck converter. The low-loss bridge rectifier has a total drop of about 400mV with typical piezo generated currents (~10 μ A). The bridge is capable of carrying up to 50mA. One side of the bridge can be operated as a single-ended DC input. PZ1 and PZ2 should never be shorted together when the bridge is in use.

Undervoltage Lockout (UVLO)

When the voltage on V_{IN} rises above the UVLO rising threshold the buck converter is enabled and charge is transferred from the input capacitor to the output capacitor. A wide (~1V) UVLO hysteresis window is employed with a lower threshold approximately 300mV above the selected regulated output voltage to prevent short cycling during buck power-up. When the input capacitor voltage is depleted below the UVLO falling threshold the buck converter is disabled. Extremely low quiescent current (450nA typical) in UVLO allows energy to accumulate on the input capacitor in situations where energy must be harvested from low power sources.

Internal Rail Generation

Two internal rails, CAP and V_{IN2} , are generated from V_{IN} and are used to drive the high side PMOS and low side NMOS of the buck converter, respectively. Additionally the V_{IN2} rail serves as logic high for output voltage select bits D0 and D1. The V_{IN2} rail is regulated at 4.8V above GND while the CAP rail is regulated at 4.8V below V_{IN} . These are not intended to be used as external rails. Bypass capacitors are connected to the CAP and V_{IN2} pins to serve as energy reservoirs for driving the buck switches. When V_{IN} is below 4.8V, V_{IN2} is equal to V_{IN} and CAP is held at GND. Figure 1 shows the ideal V_{IN} , V_{IN2} and CAP relationship.

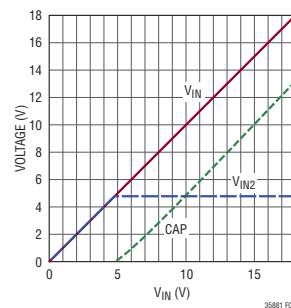


Figure 1. Ideal V_{IN} , V_{IN2} and CAP Relationship

Buck Operation

The buck regulator uses a hysteretic voltage algorithm to control the output through internal feedback from the V_{OUT} sense pin. The buck converter charges an output capacitor through an inductor to a value slightly higher than the regulation point. It does this by ramping the inductor current up to 260mA through an internal PMOS switch and then ramping it down to 0mA through an internal NMOS switch. This efficiently delivers energy to the output capacitor. The ramp rate is determined by V_{IN} , V_{OUT} , and the inductor value. If the input voltage falls below the UVLO falling threshold

OPERATION

before the output voltage reaches regulation, the buck converter will shut off and will not be turned on until the input voltage again rises above the UVLO rising threshold. During this time the output voltage will be loaded by less than 100nA. When the buck brings the output voltage into regulation the converter enters a low quiescent current sleep state that monitors the output voltage with a sleep comparator. During this operating mode load current is provided by the buck output capacitor. When the output voltage falls below the regulation point the buck regulator wakes up and the cycle repeats. This hysteretic method of providing a regulated output reduces losses associated with FET switching and maintains an output at light loads. The buck delivers a minimum of 100mA of average load current when it is switching.

When the sleep comparator signals that the output has reached the sleep threshold the buck converter may be in the middle of a cycle with current still flowing through the inductor. Normally both synchronous switches would turn off and the current in the inductor would freewheel to zero through the NMOS body diode. The LTC3588-1 keeps the NMOS switch on during this time to prevent the conduction loss that would occur in the diode if the NMOS were off. If the PMOS is on when the sleep comparator trips the NMOS will turn on immediately in order to ramp down the current. If the NMOS is on it will be kept on until the current reaches zero.

Though the quiescent current when the buck is switching is much greater than the sleep quiescent current, it is still a small percentage of the average inductor current which results in high efficiency over most load conditions. The buck operates only when sufficient energy has been accumulated in the input capacitor and the length of time the converter needs to transfer energy to the output is much less than the time it takes to accumulate energy. Thus, the buck operating quiescent current is averaged over a long period of time so that the total average quiescent current is low. This feature accommodates sources that harvest small amounts of ambient energy.

Four selectable voltages are available by tying the output select bits, D0 and D1, to GND or V_{IN2} . Table 1 shows the four D0/D1 codes and their corresponding output voltages.

Table 1. Output Voltage Selection

D1	D0	V _{OUT}	V _{OUT} QUIESCENT CURRENT (I _{QOUT})
0	0	1.8V	44nA
0	1	2.5V	62nA
1	0	3.3V	81nA
1	1	3.6V	89nA

The internal feedback network draws a small amount of current from V_{OUT} as listed in Table 1.

Power Good Comparator

A power good comparator produces a logic high referenced to V_{OUT} on the PGOOD pin the first time the converter reaches the sleep threshold of the programmed V_{OUT}, signaling that the output is in regulation. The PGOOD pin will remain high until V_{OUT} falls to 92% of the desired regulation voltage. Several sleep cycles may occur during this time. Additionally, if PGOOD is high and V_{IN} falls below the UVLO falling threshold, PGOOD will remain high until V_{OUT} falls to 92% of the desired regulation point. This allows output energy to be used even if the input is lost. Figure 2 shows the behavior for V_{OUT} = 3.6V and no load. At t = 75s V_{IN} becomes high impedance and is discharged by the quiescent current of the LTC3588-1 and through servicing V_{OUT} which is discharged by its own leakage current. V_{IN} crosses UVLO falling but PGOOD remains high until V_{OUT} decreases to 92% of the desired regulation point. The PGOOD pin is designed to drive a microprocessor or other chip I/O and is not intended to drive higher current loads such as an LED.

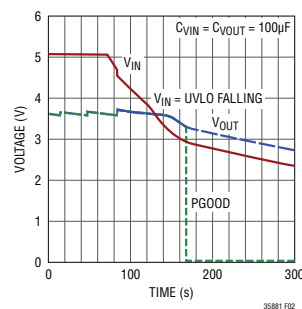


Figure 2. PGOOD Operation During Transition to UVLO

35881fc

OPERATION

The D0/D1 inputs can be switched while in regulation as shown in Figure 3. If V_{OUT} is programmed to a voltage with a PGOOD falling threshold above the old V_{OUT} , PGOOD will transition low until the new regulation point is reached. When V_{OUT} is programmed to a lower voltage, PGOOD will remain high through the transition.

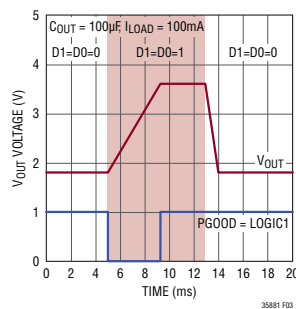


Figure 3. PGOOD Operation During D0/D1 Transition

Energy Storage

Harvested energy can be stored on the input capacitor or the output capacitor. The wide input range takes advantage of the fact that energy storage on a capacitor is proportional to the square of the capacitor voltage. After the output voltage is brought into regulation any excess energy is stored on the input capacitor and its voltage increases. When a load exists at the output the buck can efficiently transfer energy stored at a high voltage to the regulated output. While energy storage at the input utilizes the high voltage at the input, the load current is limited to what the buck converter can supply. If larger loads need to be serviced the output capacitor can be sized to support a larger current for some duration. For example, a current burst could begin when PGOOD goes high and would continuously deplete the output capacitor until PGOOD went low.

APPLICATIONS INFORMATION

Introduction

The LTC3588-1 harvests ambient vibrational energy through a piezoelectric element in its primary application. Common piezoelectric elements are PZT (lead zirconate titanate) ceramics, PVDF (polyvinylidene fluoride) polymers, or other composites. Ceramic piezoelectric elements exhibit a piezoelectric effect when the crystal structure of the ceramic is compressed and internal dipole movement produces a voltage. Polymer elements comprised of long-chain molecules produce a voltage when flexed as molecules repel each other. Ceramics are often used under direct pressure while a polymer can be flexed more readily. A wide range of piezoelectric elements are available and produce a variety of open-circuit voltages and short-circuit currents. Typically the open-circuit voltage and short-circuit currents increase with available vibrational energy as shown in Figure 4. Piezoelectric elements can be placed in series or in parallel to achieve desired open-circuit voltages.

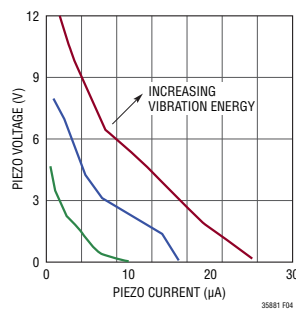


Figure 4. Typical Piezoelectric Load Lines for Piezo Systems T220-A4-503X

The LTC3588-1 is well-suited to a piezoelectric energy harvesting application. The 20V input protective shunt can accommodate a variety of piezoelectric elements. The low quiescent current of the LTC3588-1 enables efficient energy accumulation from piezoelectric elements which can have short-circuit currents on the order of tens of microamps. Piezoelectric elements can be obtained from manufacturers listed in Table 2.

Table 2. Piezoelectric Element Manufacturers

Advanced Cerametrics	www.advancedcerametrics.com
Piezo Systems	www.piezo.com
Measurement Specialties	www.meas-spec.com
PI (Physik Instrumente)	www.pi-usa.us
MIDE Technology Corporation	www.mide.com
Morgan Technical Ceramics	www.morganelectroceramics.com

The LTC3588-1 will gather energy and convert it to a useable output voltage to power microprocessors, wireless sensors, and wireless transmission components. Such a wireless sensor application may require much more peak power than a piezoelectric element can produce. However, the LTC3588-1 accumulates energy over a long period of time to enable efficient use for short power bursts. For continuous operation, these bursts must occur with a low duty cycle such that the total output energy during the burst does not exceed the average source power integrated over an energy accumulation cycle. For piezoelectric inputs the time between cycles could be minutes, hours, or longer depending on the selected capacitor values and the nature of the vibration source.



The PGOOD signal can be used to enable a sleeping microprocessor or other circuitry when V_{OUT} reaches regulation, as shown in Figure 5. Typically V_{IN} will be somewhere between the UVLO thresholds at this time and a load could only be supported by the output capacitor. Alternatively, waiting a period of time after PGOOD goes high would let the input capacitor accumulate more energy allowing load current to be maintained longer as the buck efficiently transfers that energy to the output. While active, a microprocessor may draw a small load when operating sensors, and then draw a large load to transmit data. Figure 5 shows the LTC3588-1 responding smoothly to such a load step.

The input and output capacitors should be selected based on the energy needs and load requirements of the application. In every case the V_{IN} capacitor should be rated to withstand the highest voltage ever present at V_{IN} . For 100mA or smaller loads, storing energy at the input takes advantage of the high voltage input since the buck can deliver 100mA average load current efficiently to the output. The input capacitor should then be sized to store enough energy to provide output power for the length of time required. This may involve using a large capacitor, letting V_{IN} charge to a high voltage, or both. Enough energy

$$V_{UVLO\text{FALLING}} \leq V_{IN} \leq V_{SHUNT}$$

The above equation can be used to size the input capacitor to meet the power requirements of the output for the desired duration. Here η is the average efficiency of the buck converter over the input range and V_{IN} is the input voltage when the buck begins to switch. This equation may overestimate the input capacitor necessary since load current can deplete the output capacitor all the way to the lower PGOOD threshold. It also assumes that the input source charging has a negligible effect during this time.

The duration for which the regulator sleeps depends on the load current and the size of the output capacitor. The sleep time decreases as the load current increases and/or as the output capacitor decreases. The DC sleep hysteresis window is $\pm 12\text{mV}$ around the programmed output voltage. Ideally this means that the sleep time is determined by the following equation:

$$t_{\text{SLEEP}} = C_{\text{OUT}} \frac{24\text{mV}}{I_{\text{LOAD}}}$$

APPLICATIONS INFORMATION

This is true for output capacitors on the order of 100μF or larger, but as the output capacitor decreases towards 10μF delays in the internal sleep comparator along with the load current may result in the V_{OUT} voltage slewing past the $\pm 12\text{mV}$ thresholds. This will lengthen the sleep time and increase V_{OUT} ripple. A capacitor less than 10μF is not recommended as V_{OUT} ripple could increase to an undesirable level.

If transient load currents above 100mA are required then a larger capacitor can be used at the output. This capacitor will be continuously discharged during a load condition and the capacitor can be sized for an acceptable drop in V_{OUT} :

$$C_{OUT} = (I_{LOAD} - I_{BUCK}) \frac{t_{LOAD}}{V_{OUT+} - V_{OUT-}}$$

Here V_{OUT+} is the value of V_{OUT} when PGOOD goes high and V_{OUT-} is the desired lower limit of V_{OUT} . I_{BUCK} is the average current being delivered from the buck converter, typically $I_{PEAK}/2$.

A standard surface mount ceramic capacitor can be used for C_{OUT} , though some applications may be better suited to a low leakage aluminum electrolytic capacitor or a supercapacitor. These capacitors can be obtained from manufacturers such as Vishay, Illinois Capacitor, AVX, or CAP-XX.

Inductor

The buck is optimized to work with an inductor in the range of 10μH to 22μH, although inductor values outside this range may yield benefits in some applications. For typical applications, a value of 10μH is recommended. A larger inductor will benefit high voltage applications by increasing the on-time of the PMOS switch and improving efficiency by reducing gate charge loss. Choose an inductor with a DC current rating greater than 350mA. The DCR of the inductor can have an impact on efficiency as it is a source of loss. Trade-offs between price, size, and

DCR should be evaluated. Table 3 lists several inductors that work well with the LTC3588-1.

Table 3. Recommended Inductors for LTC3588-1

INDUCTOR TYPE	L (μH)	MAX I_{DC} (mA)	MAX DCR (Ω)	SIZE in mm (L × W × H)	MANUFACTURER
CDRH2D18/LDNP	10	430	0.180	3 × 3 × 2	Sumida
107AS-100M	10	650	0.145	2.8 × 3 × 1.8	Toko
EPL3015-103ML	10	350	0.301	2.8 × 3 × 1.5	Coilcraft
MLP3225s100L	10	1000	0.130	3.2 × 2.5 × 1.0	TDK
XLP2010-163ML	10	490	0.611	2.0 × 1.9 × 1.0	Coilcraft
SLF7045T	100	500	0.250	7.0 × 7.0 × 4.5	TDK

V_{IN2} and CAP Capacitors

A 1μF capacitor should be connected between V_{IN} and CAP and a 4.7μF capacitor should be connected between V_{IN2} and GND. These capacitors hold up the internal rails during buck switching and compensate the internal rail generation circuits. In applications where the input source is limited to less than 6V, the CAP pin can be tied to GND and the V_{IN2} pin can be tied to V_{IN} as shown in Figure 6. An optional 5.6V Zener diode can be connected to V_{IN} to clamp V_{IN} in this scenario. The leakage of the Zener diode below its Zener voltage should be considered as it may be comparable to the quiescent current of the LTC3588-1. This circuit does not require the capacitors on V_{IN2} and CAP, saving components and allowing a lower voltage rating for the single V_{IN} capacitor.

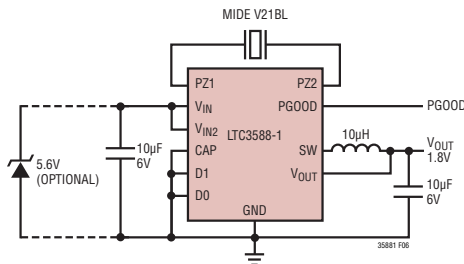


Figure 6. Smallest Solution Size 1.8V Low Voltage Input Piezoelectric Power Supply

APPLICATIONS INFORMATION

Additional Applications with Piezo Inputs

The versatile LTC3588-1 can be used in a variety of configurations. Figure 7 shows a single piezo source powering two LTC3588-1s simultaneously, providing capability for multiple rail systems. This setup features automatic supply sequencing as the LTC3588-1 with the lower voltage output (i.e. lower UVLO rising threshold) will come up first. As the piezo provides input power both V_{IN} rails will initially come up together, but when one output starts drawing power, only its corresponding V_{IN} will fall as the bridges of each LTC3588-1 provide isolation. Input piezo energy will then be directed to this lower voltage capacitor until both V_{IN} rails are again equal. This configuration is expandable to any number of LTC3588-1s powered by a single piezo as long as the piezo can support the sum total of the quiescent currents from each LTC3588-1.

A piezo powered LTC3588-1 can also be used in concert with a battery connected to V_{IN} to supplement the system if ambient vibrational energy ceases as shown in Figure 8. A blocking diode placed in series with the battery to V_{IN} prevents reverse current in the battery if the piezo source charges V_{IN} past the battery voltage. A 9V battery is shown, but any stack of batteries of a given chemistry can be used as long as the battery stack voltage does not exceed 18V. In this setup the presence of the piezo energy harvester can greatly increase the life of the battery. If the piezo source is removed the LTC3588-1 can serve as a standalone nanopower buck converter. In this case the bridge is unused and the blocking diode is unnecessary.

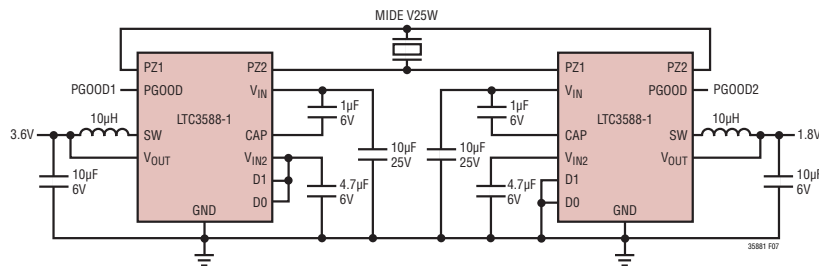


Figure 7. Dual Rail Power Supply with Single Piezo and Automatic Supply Sequencing

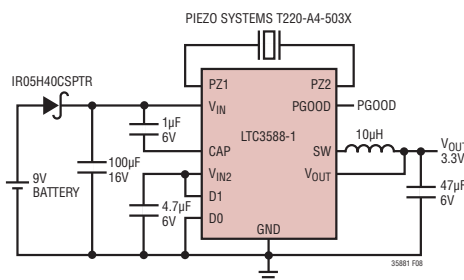


Figure 8. Piezo Energy Harvester with Battery Backup

35881fc

APPLICATIONS INFORMATION

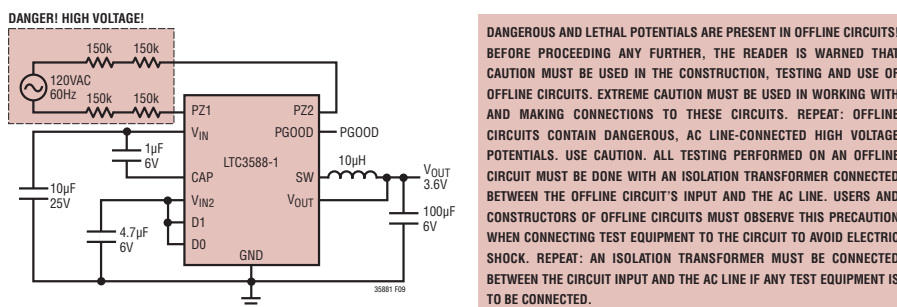


Figure 9. AC Line Powered 3.6V Buck Regulator with Large Output Capacitor to Support Heavy Loads

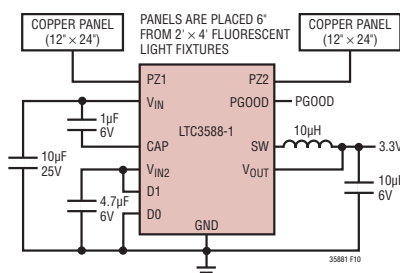


Figure 10. Electric Field Energy Harvester

Alternate Power Sources

The LTC3588-1 is not limited to use with piezoelectric elements but can accommodate a wide variety of input sources depending on the type of ambient energy available. Figure 9 shows the LTC3588-1 internal bridge rectifier connected to the AC line in series with four 150k current limiting resistors. This is a high voltage application and minimum spacing between the line, neutral, and any high voltage components should be maintained per the applicable UL specification. For general off-line applications refer to UL regulation 1012.

Figure 10 shows an application where copper panels are placed near a standard fluorescent room light to capacitively

harvest energy from the electric field around the light. The frequency of the emission will be 120Hz for magnetic ballasts but could be higher if the light uses electronic ballast. The LTC3588-1 bridge rectifier can handle a wide range of input frequencies.

The LTC3588-1 can also be configured for use with DC sources such as a solar panel or thermal couple as shown in Figures 11 and 12 by connecting them to one of the PZ1/PZ2 inputs. Connecting the two sources in this way prevents reverse current from flowing in each element. Current limiting resistors should be used to protect the PZ1 or PZ2 pins. This can be combined with a battery backup connected to V_{IN} with a blocking diode.

LTC3588-1

APPLICATIONS INFORMATION

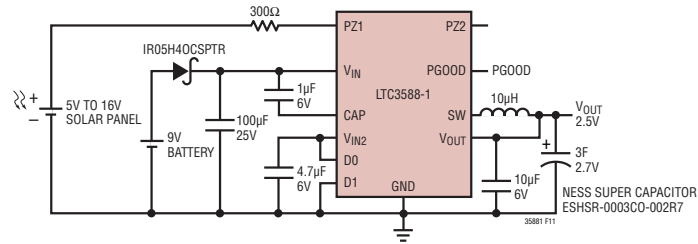


Figure 11. 5V to 16V Solar-Powered 2.5V Supply with Supercapacitor for Increased Output Energy Storage and Battery Backup

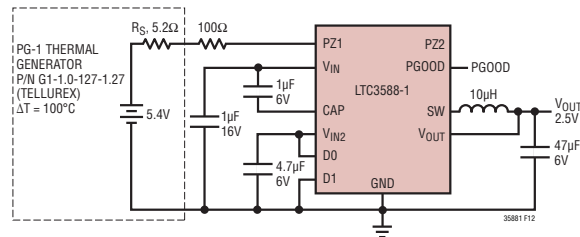
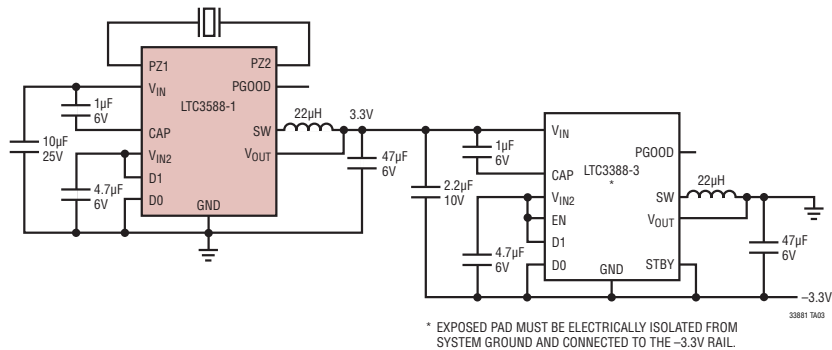


Figure 12. Thermoelectric Energy Harvester



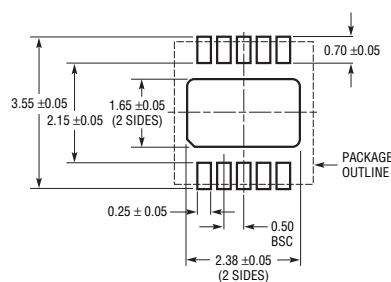
* EXPOSED PAD MUST BE ELECTRICALLY ISOLATED FROM SYSTEM GROUND AND CONNECTED TO THE -3.3V RAIL.

Figure 13. Piezoelectric Energy Harvester with ±3.3V Outputs

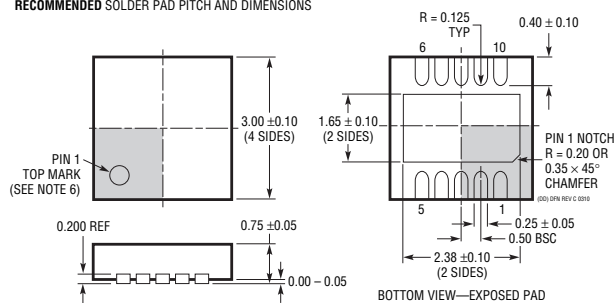
PACKAGE DESCRIPTION

Please refer to <http://www.linear.com/designtools/packaging/> for the most recent package drawings.

DD Package
10-Lead Plastic DFN (3mm x 3mm)
(Reference LTC DWG # 05-08-1699 Rev C)



RECOMMENDED SOLDER PAD PITCH AND DIMENSIONS



NOTE:

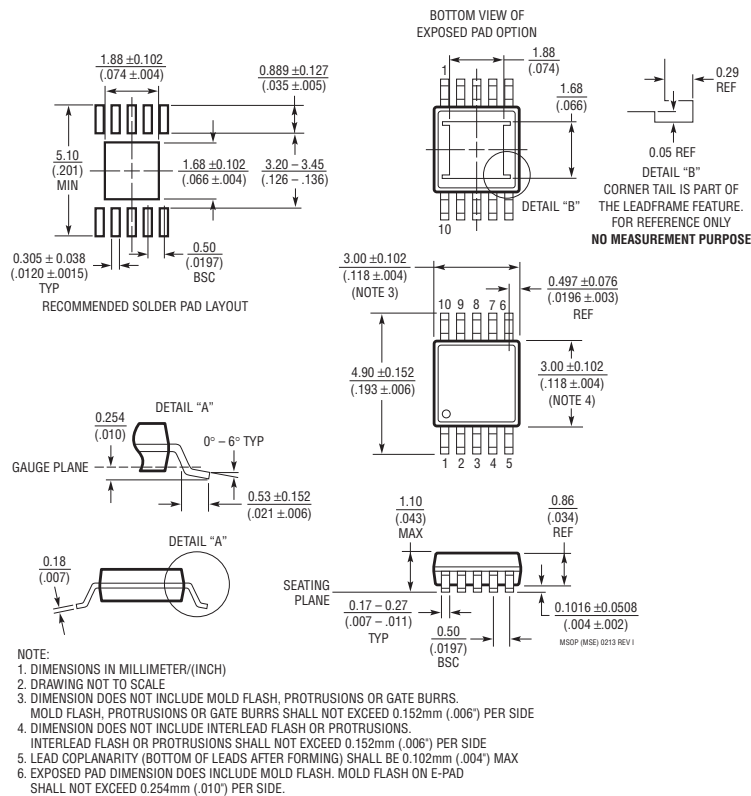
1. DRAWING TO BE MADE A JEDEC PACKAGE OUTLINE MO-229 VARIATION OF (WEED-2).
 2. CHECK THE LTC WEBSITE DATA SHEET FOR CURRENT STATUS OF VARIATION ASSIGNMENT
 3. DRAWING NOT TO SCALE
 4. ALL DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
 5. DIMENSIONS OF EXPOSED PAD ON BOTTOM OF PACKAGE DO NOT INCLUDE
 MOLD FLASH, MOLD FLASH, IF PRESENT, SHALL NOT EXCEED 0.15mm ON ANY SIDE
 6. SOLDER PAD SHALL BE SOLDER PLATED
 7. SHADED AREA IS ONLY A REFERENCE FOR PIN 1 LOCATION ON THE
 TOP AND BOTTOM OF PACKAGE

LTC3588-1

PACKAGE DESCRIPTION

Please refer to <http://www.linear.com/designtools/packaging/> for the most recent package drawings.

MSE Package 10-Lead Plastic MSOP, Exposed Die Pad (Reference LTC DWG # 05-08-1664 Rev I)



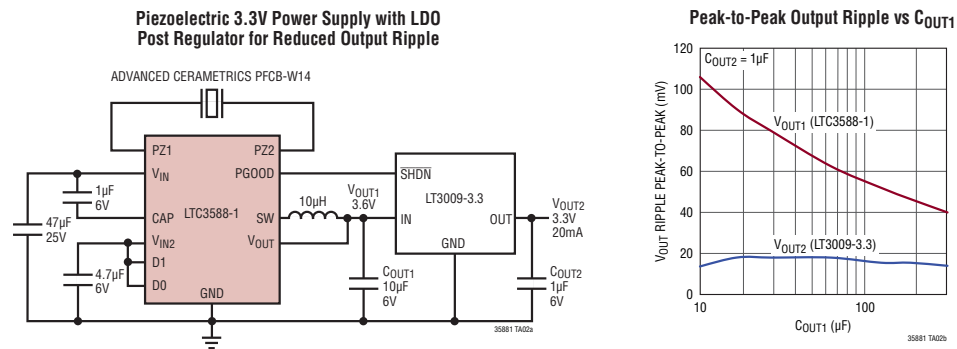
358811c

REVISION HISTORY

REV	DATE	DESCRIPTION	PAGE NUMBER
A	9/10	Updated/added part number on the Piezoelectric Transducer on the front and back page applications, and Figures 5, 6 and 7	1, 12, 13, 14, 20
		Updated Temperature Range in Order Information	2
		Changed $T_J = 25^\circ\text{C}$ to $T_A = 25^\circ\text{C}$ and I_{LQAD} to I_{BUCK} in Electrical Characteristics	3
		Updated Notes 2, 3 and 4	4
		Updated G21 in Typical Performance Characteristics	6
		Added Figure 13	16
		Updated Related Parts	20
B	7/14	Clarified title and Description	1
		Clarified x-axis label on Figure 1	8
		Clarified Figure 8	14
		Clarified Related Parts list	20
C	8/15	Modified C_{OUT} Equation	13

LTC3588-1

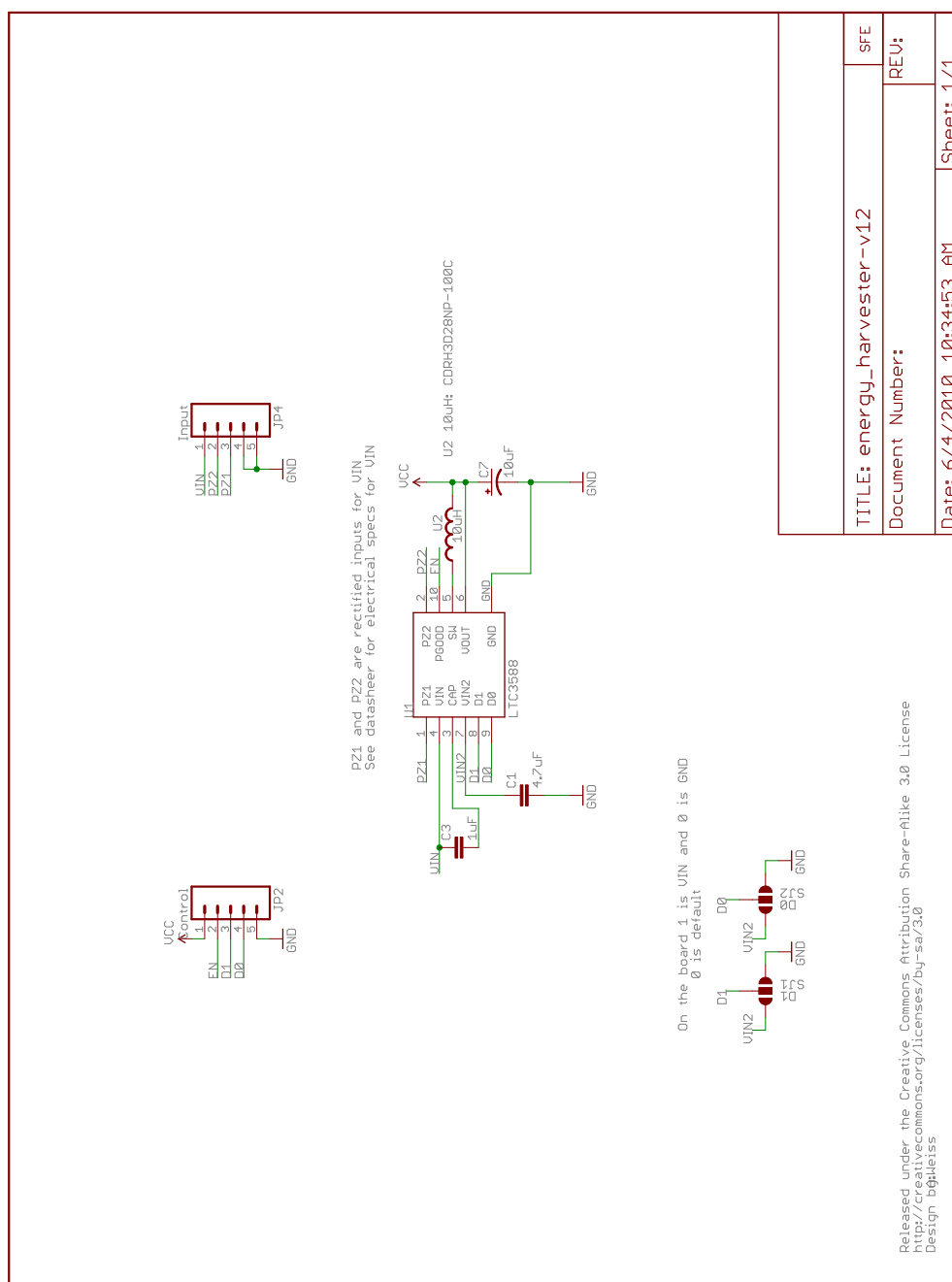
TYPICAL APPLICATION



RELATED PARTS

PART NUMBER	DESCRIPTION	COMMENTS
LT1389	Nanopower Precision Shunt Voltage Reference	800nA Operating Current, 1.25V/2.5V/4.096V
LTC1540	Nanopower Comparator with Reference	0.3µA I_Q , Drives 0.01µF, Adjustable Hysteresis, 2V to 11V Input Range
LT3009	3µA I_Q , 20mA Low Dropout Linear Regulator	Low 3µA I_Q , 1.6V to 20V Range, 20mA Output Current
LTC3388-1/ LTC3388-3	20V High Efficiency Nanopower Step-Down Regulator	860nA I_Q in Sleep, 2.7V to 20V Input, V_{OUT} : 1.2V to 5.0V, Enable and Standby Pins
LTC3588-2	Nanopower Energy Harvesting Power Supply	<1µA I_Q in Regulation, UVLO Rising = 16V, UVLO Falling = 14V, V_{OUT} = 3.45V, 4.1V, 4.5V 5.0V
LT3652	Power Tracking 2A Battery Charger for Solar Power	MPPT for Solar, 4.95V to 32V, Up to 2A Charge Current
LT3970	40V, 350mA Step-Down Regulator with 2.5µA I_Q	Integrated Boost and Catch Diodes, 4.2V to 40V Operating Range
LT3971	38V, 1.2A, 2MHz Step-Down Regulator with 2.8µA I_Q	4.3V to 38V Operating Range, Low Ripple Burst Mode® Operation
LT3991	55V, 1.2A 2MHz Step-Down Regulator with 2.8µA I_Q	4.3V to 55V Operating Range, Low Ripple Burst Mode Operation
LTC3631	45V, 100mA, Synchronous Step-Down Regulator with 12µA I_Q	4.5V to 45V Operating Range, Overvoltage Lockout Up to 60V
LTC3642	45V, 50mA, Synchronous Step-Down Regulator with 12µA I_Q	4.5V to 45V Operating Range, Overvoltage Lockout Up to 60V
LTC3330	Nanopower Buck-Boost DC/DC with Energy Harvesting Battery Life Extender	V_{IN} : 2.7V to 20V, BAT: 1.8V to 5.5V, 750nA I_Q , 5mm × 5mm QFN-32 Package
LTC3331	Nanopower Buck-Boost DC/DC with Energy Harvesting Battery Charger	V_{IN} : 2.7V to 20V, BAT: Up to 4.2V, Shunt Charger, Low Battery Disconnect, 950nA I_Q , 5mm × 5mm QFN-32 Package

Anexo C - Esquemas do circuito integrado *Energy Harvester Breakout* - LTC3588



Anexo D - Ficha técnica do retificador de onda completa DB107



DC COMPONENTS CO., LTD.
RECTIFIER SPECIALISTS

**DB101
THRU
DB107**

TECHNICAL SPECIFICATIONS OF SINGLE-PHASE SILICON BRIDGE RECTIFIER
VOLTAGE RANGE - 50 to 1000 Volts *CURRENT - 1.0 Ampere*

FEATURES

- * Good for automation insertion
- * Surge overload rating - 50 Amperes peak
- * Ideal for printed circuit board
- * Reliable low cost construction
- * Glass passivated junction

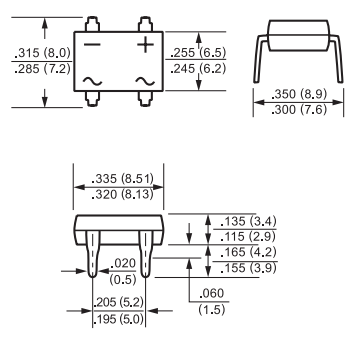
MECHANICAL DATA

- * Case: Molded plastic
- * Epoxy: UL 94V-0 rate flame retardant
- * Lead: MIL-STD-202E, Method 208 guaranteed
- * Polarity: Symbols molded or marked on body
- * Mounting position: Any
- * Weight: 0.4 gram

MAXIMUM RATINGS AND ELECTRICAL CHARACTERISTICS
 Ratings at 25 °C ambient temperature unless otherwise specified.
 Single phase, half wave, 60 Hz, resistive or inductive load.
 For capacitive load, derate current by 20%.



DB-1



Dimensions in inches and (millimeters)

	SYMBOL	DB101	DB102	DB103	DB104	DB105	DB106	DB107	UNITS
Maximum Recurrent Peak Reverse Voltage	V _{RRM}	50	100	200	400	600	800	1000	Volts
Maximum RMS Bridge Input Voltage	V _{RMS}	35	70	140	280	420	560	700	Volts
Maximum DC Blocking Voltage	V _{DC}	50	100	200	400	600	800	1000	Volts
Maximum Average Forward Output Current at T _A = 40°C	I _O	1.0							Amps
Peak Forward Surge Current 8.3 ms single half sine-wave superimposed on rated load (JEDEC Method)	I _{FSM}	50							Amps
Maximum Forward Voltage Drop per element at 1.0A DC	V _F	1.1							Volts
Maximum DC Reverse Current at Rated	I _R	10							uAmps
DC Blocking Voltage per element									
		500							
I ² t Rating for Fusing (t<8.3ms)	I ² t	10							A ² Sec
Typical Junction Capacitance (Note1)	C _J	25							pF
Typical Thermal Resistance (Note 2)	RθJA	40							°C/W
Operating and Storage Temperature Range	T _{J,TSTG}	-65 to + 150							°C

NOTES : 1. Measured at 1 MHz and applied reverse voltage of 4.0 volts
 2. Thermal Resistance from Junction to Ambient and from junction to lead mounted on P.C.B. with 0.5 x 0.5" (13x13mm) copper pads.

RATING AND CHARACTERISTIC CURVES (DB101 THRU DB107)

FIG. 1 - MAXIMUM NON-REPETITIVE FORWARD SURGE CURRENT

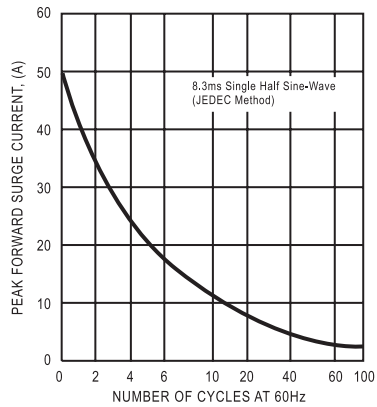


FIG. 2 - TYPICAL FORWARD CURRENT DERATING CURVE

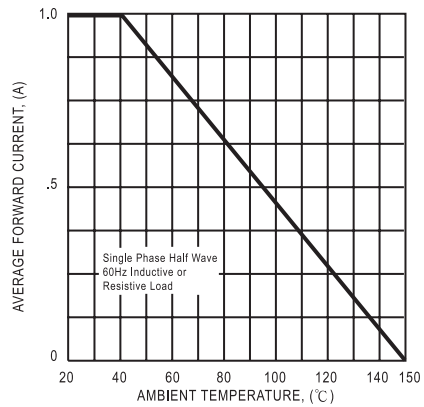


FIG. 3 - TYPICAL INSTANTANEOUS FORWARD CHARACTERISTICS

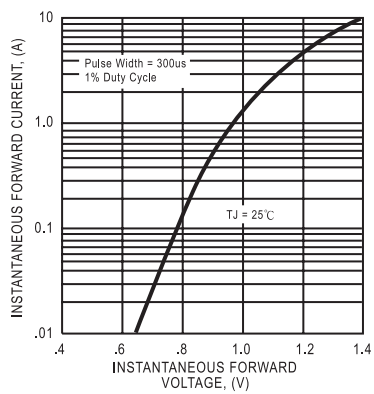


FIG. 4 - TYPICAL REVERSE CHARACTERISTICS

