



ESCOLA NAVAL

la sainte & bief faire



ASPOF EN-AEL Vicente Kitcheanar Gomes

Sistema Portátil de Carregamento de Equipamentos Eletrônicos

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Ciências Militares Navais, na especialidade de Engenharia
Naval Ramo de Armas e Eletrônica



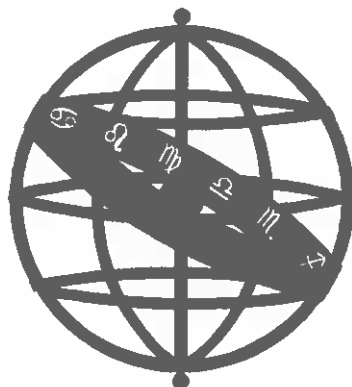
Alfeite

2024



ESCOLA NAVAL

Infante de S. Brás



ASPOF EN-AEL Vicente Kitchecanar Gomes

*Sistema Portátil de Carregamento de Equipamentos
Eletrónicos*

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Ciências Militares Navais, na especialidade de Engenharia Naval Ramo
de Armas e Eletrónica

Orientação de: Vítor Manuel Rodrigues Viegas

Co-orientation of: Bruno Duarte Damas

O Aluno Mestrando,

O Orientador,



Vicente Gomes



Vítor Viegas

Alfeite

2024

"Magnitudo non magna est, magnitudo facit magnos"

Prodígio

Dedico esta dissertação de mestrado aos meus pais e aos meus irmãos.

Agradecimentos

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

Em primeiro lugar, quero agradecer aos meus pais, Gina e Vicente, pela educação, pelo carinho e pelas oportunidades que me deram que permitiram chegar onde estou hoje.

Aos meus irmãos, Heliane e Henrique, que sempre fizeram com que eu desse o melhor de mim e que sempre me apoiaram em todos os momentos.

Aos meus orientadores, Professor Vítor Viegas e Professor Bruno Damas, por me terem dado a mão no momento em que as coisas não estavam bem, por terem aceitado trabalhar comigo e por me terem ajudado no desenvolvimento desta dissertação de mestrado.

Ao meu amigo, Francisco Vicente, que sempre me ajudou a tomar as decisões certas e sempre foi como um irmão para mim.

Aos meus amigos, Pedro Santos e Tiago Figueiredo, que me ajudaram e apoiaram em todo este percurso na Escola Naval.

Aos meus camaradas de classe, Francis Rodrigues, Matilde Vieira, Afonso Lopes e Frederico Gonçalves, pelas longas horas passadas no departamento a estudar.

Aos meus amigos, Manuel Rodrigues, José Rodrigues, Miguel Guerreiro, Joana Abreu, Daniel Balsinha, João Melo, Inês Pereira, Miguel Cordeiro, Ricardo Gomes e Carolina Serra, por todos os bons momentos que tivemos no nosso percurso juntos e por me colocarem um sorriso na cara quando as coisas corriam menos bem.

Aos camaradas, João Martins e Manuel Marcelino, por terem ajudado na elaboração desta dissertação de mestrado.

Aos camaradas, João Gonçalves e Pedro Melo, por terem sido sempre um exemplo a seguir.

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

Por fim quero agradecer à equipa de rugby da Escola Naval, à equipa de rugby do Belas Rugby Clube e à equipa de rugby do CF “Os Belenenses” por serem uma parte muito importante da minha vida.

A todos vós, o meu sincero obrigado!

Resumo

Atualmente existe uma grande dependência de aparelhos eletrônicos nos setores da indústria, da saúde, da economia e até no cidadão comum, como tal, o mundo militar não é exceção. O funcionamento desses equipamentos está dependente das suas baterias, e quanto maior a bateria maior a autonomia. As baterias grandes constituem um problema para as forças militares, diminuindo a sua operacionalidade.

De forma a contrariar este problema desenvolveu-se um sistema portátil de carregamento de equipamentos eletrônicos. O sistema é composto por um módulo fotovoltaico de $0,0025\text{ m}^2$ de área, uma bota com piezoelétricos e uma bobine de indução magnética.

Realizou-se um estudo ao módulo fotovoltaico chegando à conclusão que este era mais eficiente quando conectado em série com uma resistência de $5,2\ \Omega$. Realizou-se um estudo à bobine de indução magnética onde se concluiu que esta produz mais energia quando se encontra ligada em série a uma resistência de $815\ \Omega$. Neste estudo também foi possível concluir que em movimento a bobine de indução magnética produz mais energia quando é colocada no tornozelo.

Por fim realizou-se um estudo em que se verificou que o módulo fotovoltaico, de dimensões muito pequenas, produz energia a uma potência de 74 mW , $2,6\text{ mW}$ e 0 mW para situações de muita, pouca e nenhuma luminosidade, respetivamente. Isto faz com que o sistema portátil tenha 3 valores de potência: $74,58\text{ mW}$, $3,18\text{ mW}$ e $583\ \mu\text{W}$.

Apesar do sistema não se apresentar capaz de alimentar um aparelho eletrónico autonomamente, os estudos revelam que é possível carregar uma pilha AAA em menos de um dia.

Palavras-chave: Piezoelectricidade, bobine de indução magnética, módulo fotovoltaico, sistema de carregamento portátil

Abstract

Today, there is a great dependence on electronic devices in the health industry, the economy and even among ordinary citizens, and the military is no exception. The functioning of this equipment depends on its batteries, and the larger the battery, the greater the autonomy. Large batteries are a problem for military forces, making them less operational.

In order to counter this problem, a portable system for charging electronic equipment has been developed. The system consists of a photovoltaic module with an area of 0.0025 m^2 , a piezoelectric boot and a magnetic induction coil.

A study was carried out on the photovoltaic module, concluding that it was most efficient when connected in series with a resistance of $5.2\ \Omega$. The magnetic induction coil was studied and it was concluded that it produces more energy when connected in series with a resistance of $815\ \Omega$. This study also concluded that when moving, the magnetic induction coil produces more energy when placed on the ankle.

Finally, a study was carried out in which it was found that the photovoltaic module produces energy at a power of 74 mW , 2.6 mW and 0 mW for situations of high, low and no light, respectively. This means that the portable system has 3 power values: 74.58 mW , 3.18 mW and $583\ \mu\text{W}$.

Although the system is not capable of powering an electronic device autonomously, studies show that it is possible to charge an AAA battery in less than a day.

Keywords: Piezoelectricity, magnetic induction coil, photovoltaic module, portable charging system

Índice

1	Introdução	1
1.1	Enquadramento	1
1.2	Motivação	1
1.3	Objetivos	2
1.4	Estrutura do Documento	2
2	Estado da Arte	5
2.1	Energia do meio ambiente	5
2.1.1	Energia solar	5
2.1.2	Energia termoeétrica	8
2.1.3	Energia de Radiofrequência	10
2.2	Energia gerada pelo corpo humano	12
2.2.1	Piezoelectricidade	12
2.2.2	Triboelectricidade	14
2.2.3	Indução magnética	16
2.3	Trabalhos relacionados	17
2.4	Conversão AC/DC e DC/DC	24
3	Desenvolvimento	27
3.1	Painel Fotovoltaico	27
3.1.1	Provas estáticas	27
3.1.2	Provas móveis	33
3.2	Aparelho Piezoelétrico	35
3.3	Aparelho de indução magnética	37
4	Testes realizados e análise de resultados	45
4.1	Testes realizados	45
4.2	Análise de resultados	46
4.2.1	Pista de Atletismo da Escola Naval	46
	Painel Fotovoltaico grande	47

Painel Fotovoltaico pequeno	47
4.2.2 Comparação entre os dois painéis	49
4.2.3 Percurso na mata com painel pequeno	50
Painel Fotovoltaico às 12:00	52
Painel Fotovoltaico às 19:30	52
Comparação entre os dois horários	53
4.2.4 Bota com piezoelétricos	53
4.2.5 Bobine	55
Resistência de carga - Parte 1	55
Resistência de carga - Parte 2	56
Resistência de carga - Parte 3	56
Testes em movimento	57
Bobine ligada ao circuito eletrónico	60
5 Considerações finais	63
5.1 Viabilidade da utilização do protótipo	63
5.2 Trabalhos futuros	64
Bibliografia	67
A Valores das Curvas características	71
B Programa de Labview	75
C Impulsos para cada resistência	77
Anexos	83
I Equipamentos utilizados pelos Fuzileiros Portugueses	83

Lista de Figuras

2.1	Junção PN	6
2.2	Modelo do circuito equivalente de um painel fotovoltaico.	7
2.3	Painel fotovoltaico.	7
2.4	Curva característica de um painel fotovoltaico.	8
2.5	Termoeletrecidade.	10
2.6	Energia de Radiofrequência	12
2.7	Piezoeletricidade	14
2.8	Triboeletrecidade	15
2.9	Indução eletromagnética Fonte: Magnets 2024	19
2.10	Aparelho desenvolvido em Vitorino 2022	19
2.11	Aparelho desenvolvido em Hou et al. 2023	20
2.12	Aparelho desenvolvido em Rome et al. 2005	21
2.13	a) Esquema do aparelho desenvolvido em Xie et al. 2016, b) aparelho desenvolvido em Xie et al. 2016	21
2.14	Aparelho desenvolvido em Shepertycky e Li 2015	22
2.15	Aparelho desenvolvido em Donelan et al. 2008	23
2.16	Circuito retificador de onda completa	24
2.17	Circuito retificador desenvolvido em Magno et al. 2018	25
2.18	Circuito retificador desenvolvido em Vitorino 2022	26
3.1	Módulo fotovoltaico.	28
3.2	Esquema do circuito para efetuar medições.	29
3.3	Curva característica do painel solar em ambiente interior.	29
3.4	Curva característica do painel solar em ambiente exterior.	30
3.5	Curva de potência	31
3.6	Módulo fotovoltaico - 2	31
3.7	Curva característica do painel solar 2 em ambiente interior.	32
3.8	Curva característica do painel solar 2 em ambiente exterior.	32
3.9	Curva de potência do painel solar 2.	33
3.10	Fluxograma	34
3.11	LabView Frontend	35

3.12 a) Esquema do divisor de tensão, b) Divisor de tensão	36
3.13 Forma de onda de um passo.	37
3.14 Imanes	39
3.15 Bobine com 100 espiras	40
3.16 Gráfico individual de cada íman	41
3.17 Gráfico da tensão dos 4 imanes	42
3.18 Gráfico individual de cada íman conectado a uma resistência de $10\text{ k}\Omega$	42
4.1 Posição dos painéis fotovoltaicos. 1 - Costas, 2 - Ombro	46
4.2 Cobertura de nuvens a 06 de Maio.	47
4.3 Percurso na Pista da Escola Naval	48
4.4 Gráfico da potência gerada pelo painel fotovoltaico grande	48
4.5 Gráfico da potência gerada pelo painel fotovoltaico pequeno	49
4.6 Cobertura de nuvens a 10 de Maio.	50
4.7 Percurso na mata da BNL	51
4.8 Gráfico de Potência ao longo do tempo (painel pequeno, 10 de maio, 12:00	52
4.9 Gráfico de Potência ao longo do tempo (painel pequeno, 10 de maio, 19:30	53
4.10 Forma de onda de um impulso da bobine ligada a uma resistência de $815\ \Omega$	59
4.11 Posição da bobine para a realização dos testes. 1- Joelho, 2 - Pulso, 3 - Pé	59
B.1 Programa de LabView	76
C.1 Impulsos 1	78
C.2 Impulsos 2	79
C.3 Impulsos 3	80
C.4 Impulsos 4	81

Lista de Tabelas

2.1	Resumo das formas de gerar energia	18
2.2	Resumo dos aparelhos de interesse	23
3.1	Características dos ímanes. Retiradas de Group 2024	39
3.2	Cálculos efetuados.	40
4.1	Resultados dos ensaios com os painéis solares.	53
4.2	Testes à bota com Piezoelétricos.	54
4.3	Valores de tensão e potência de pico para diferentes resistência - Parte 1	56
4.4	Valores de Tensão e potência de pico para diferentes resistência - Parte 2	57
4.5	Valores de Energia e potência de pico para diferentes resistência	58
4.6	Testes à Bobine.	60
4.7	Testes à bobine ligada ao circuito elétrico.	61
5.1	Duração do carregamento das diferentes pilhas em diferentes situações.	64
A.1	Curva Característica para 98k Lux - Pannel Fotovoltaico 1	71
A.2	Curva Característica para 60k Lux - Pannel Fotovoltaico 1	72
A.3	Curva Característica para: 32k Lux - Pannel Fotovoltaico 1	73
A.4	Curva Característica para: 70k Luz - Pannel Fotovoltaico 2	73
A.5	Curva Característica para: 50k Lux - Pannel Fotovoltaico 2	74
A.6	Curva Característica para: 20k Lux - Pannel Fotovoltaico 2	74
I.1	Informação sobre diferentes os equipamentos usados pelos Fuzileiros Portugueses. - parte 1	83
I.2	Informação sobre diferentes os equipamentos usados pelos Fuzileiros Portugueses. - parte 2	84
I.3	Energia necessária para carregar as pilhas.	84

Capítulo 1

Introdução

1.1 Enquadramento

O avanço tecnológico tem feito com que aparelhos elétricos e eletrónicos estejam cada vez mais presentes no dia-a-dia das pessoas, sobretudo nas áreas da saúde, da economia, do desporto e da indústria militar.

O tempo de utilização destes aparelhos está diretamente dependente das suas baterias e o tamanho das baterias está diretamente ligado à sua autonomia. Nos últimos anos a indústria das baterias não viu desenvolvimento tão grande como o desenvolvimento da indústria dos semicondutores (Magno et al. [2018](#)). As baterias, mesmo que tenham uma autonomia grande, precisam de ser carregadas. E durante este processo os equipamentos encontram-se inoperacionais, a menos que o utilizador tenha na sua posse uma bateria suplente.

Uma alternativa viável às baterias suplentes são os geradores elétricos portáteis. Estes geradores conseguem produzir energia elétrica através de energia solar, energia térmica e energia cinética dissipada pelo corpo humano.

O desenvolvimento de geradores elétricos portáteis torna possível aumentar a autonomia dos equipamentos dos operacionais do terreno. Nas situações em que estes geradores elétricos são mais leves do que as baterias, os militares vêm a sua agilidade e mobilidade aumentar (Vitorino [2022](#)).

1.2 Motivação

Nas operações militares são usados vários equipamentos eletrónicos. O aumento da autonomia destes equipamentos está diretamente ligado à autonomia das suas baterias, o que pode constituir um obstáculo para o sucesso da missão. O facto

de os operacionais terem de carregar várias baterias pode diminuir a sua agilidade e mobilidade (Vitorino [2022](#)).

O aumento da autonomia dos equipamentos e a substituição de baterias por geradores elétricos portáteis constitui a motivação para o desenvolvimento desta dissertação de mestrado.

1.3 Objetivos

Nesta dissertação pretende-se:

- Estudar meios de produção e armazenamento de energia elétrica através do corpo humano e a partir de fontes de energia renováveis;
- Desenvolvimento de um sistema que consiga fornecer os mesmos níveis de energia a um equipamento, mas de dimensões e peso menor em comparação com uma bateria;
- Desenvolvimento de um sistema capaz de resolver o problema do peso das baterias, sem aumentar a taxa de esforço do utilizador.
- Estudo da viabilidade do sistema desenvolvido para o carregamento de equipamentos elétricos.

1.4 Estrutura do Documento

Esta dissertação encontra-se dividida em cinco partes. A primeira parte é o capítulo 1, um capítulo introdutório onde estão descritas a motivação, os objetivos e a estrutura do documento. Neste capítulo também é feito um breve enquadramento do problema que será abordado.

O capítulo 2 será o capítulo relativo ao estado da arte onde serão abordadas as tecnologias estudadas para o desenvolvimento desta dissertação de mestrado. As tecnologias estudadas dividem-se em dois grupos: energia ambiental (energia solar, energia termoelétrica e energia de radiofrequência) e energia dissipada pelo corpo humano (energia piezoelétrica, energia triboelétrica e indução magnética). Após uma breve explicação sobre cada uma destas energias são apresentadas características que um gerador deve apresentar. Para terminar o capítulo 2 existe uma apresentação de aparelhos já desenvolvidos e trabalhos relacionados que são pertinentes para a criação deste sistema.

O capítulo 3 irá contemplar o desenvolvimento do sistema.

O capítulo 4 será relativo aos testes realizados ao sistema. Neste capítulo estão discriminados todos os passos realizados e correções que foram feitas ao sistema de forma que fosse possível obter os melhores resultados possíveis.

O quinto e último capítulo é o capítulo de considerações finais. Este capítulo vai ter as conclusões e análise de resultados relativas a este trabalho. Para terminar terá algumas sugestões de trabalho futuro.

Capítulo 2

Estado da Arte

Para esta dissertação de mestrado vão ser estudadas as formas de produção de energia através do corpo humano e fontes de energia renováveis. Através de fontes de energia renováveis e da energia dissipada pelo corpo humano é possível gerar energia elétrica, acoplando aparelhos ao corpo humano. Relativamente às energias renováveis vão ser estudadas a energia solar, a energia termoelétrica e a energia de radiofrequência. Relativamente à energia dissipada pelo corpo humano vamos considerar a piezoeletrecidade, a indução magnética e a triboeletrecidade.

2.1 Energia do meio ambiente

2.1.1 Energia solar

Nas últimas décadas já se tem usado energia solar para alimentar pequenos equipamentos. Estes equipamentos têm usado células fotovoltaicas como fornecedores de energia. As células fotovoltaicas são constituídas por junções PN. Uma junção PN são duas regiões semicondutoras, uma região positiva (P) e uma região negativa (N). A região P é a região que contem espaços livres que serão preenchidos pelos eletrões excedentes da região N. Os eletrões em excesso da região N são impurezas dos átomos que constituem esta zona. Os átomos que constituem a zona P são átomos com défice de eletrões deixando os espaços livres mencionados anteriormente. Os eletrões da região N irão migrar de forma a preencher os espaços livres da região P, como é possível perceber na figura [2.1](#). A zona de contacto entre as duas regiões é denominada de região de depleção. A região de depleção é a região da junção PN em que não existem eletrões em excesso nem espaços vazios. Nas células fotovoltaicas a radiação faz com que exista a migração dos eletrões referida anteriormente, a este efeito chama-se efeito fotovoltaico. O efeito fotovoltaico vai gerar corrente elétrica no circuito e por consequência energia elétrica. A radiação solar é toda a energia

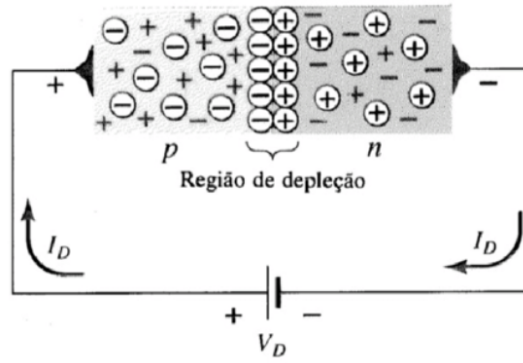


FIGURA 2.1: Junção PN

 Fonte: Zimmermann [2017](#)

emitida pelo sol e a luz solar é apenas a parte visível do espectro eletromagnético da radiação solar.

O semicondutor mais comum na composição de um painel solar é o silício, que pode ser amorfo, monocristalino ou policristalino. O silício amorfo pode ser produzido para encaixar em superfícies maleáveis. Apesar de ter uma baixa eficiência (cerca de 10 %), é usado para aparelhos usados dentro de edifícios, visto que tem uma maior sensibilidade a baixos níveis de luz, enquanto que o silício policristalino ou monocristalino, normalmente, é aplicado no exterior devido à sua maior eficiência (entre 15 e 20 %) a grandes quantidades de luz.

A figura [2.2](#) é o modelo de um circuito elétrico equivalente de um painel solar (Camacho [2010](#)). Este circuito consiste numa fonte de corrente, num díodo e em resistências, uma em série e outra em paralelo. A resistência em série (R_s) representa as perdas por condução e/ou contacto. A resistência em paralelo (R_{sh}) representa as perdas nas junções PN. No modelo a fonte de corrente é representada por I_o , este valor é diretamente proporcional à radiação incidente no painel solar (Pindado, Cubas e Manuel [2014](#)). I_{pan} e V_{pan} representam, respetivamente, a corrente e a tensão aos terminais do painel solar. A equação 2.1 representa o cálculo da corrente produzida pelo painel solar. I_o representa a corrente gerada pela incidência da radiação solar e I_{sh} é a corrente perdidas nas junções (*Equivalent Circuit of Solar Cell* [2024](#)).

$$I_{pan} = I_o - I_{sh}$$

(2.1)

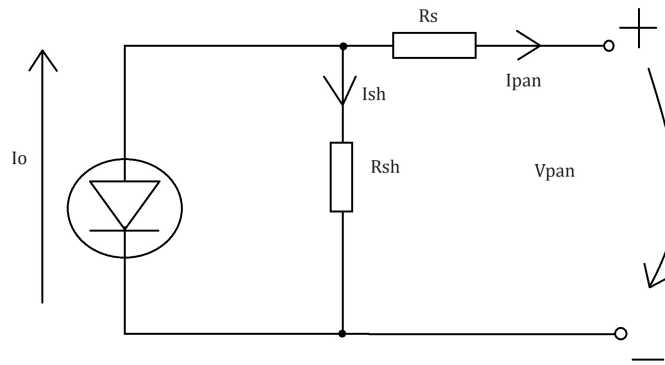


FIGURA 2.2: Modelo do circuito equivalente de um painel fotovoltaico.



FIGURA 2.3: Painel fotovoltaico.

Fonte: Martins [2024](#)

Todos os painéis solares têm uma curva característica ou curva IV, representa a relação entre a tensão (V) e a corrente (I). O mesmo painel pode ter várias curvas, sendo que cada curva é para uma intensidade de luz diferente. O gráfico da figura [2.4](#) foi retirado de Camacho [2010](#) e representa a curva característica de um painel solar. Cada curva do gráfico corresponde a uma intensidade de luz diferente e a intensidade está medida em W/m^2 . No gráfico existem dois pontos que são importantes para o estudo de um painel fotovoltaico. Os dois pontos são a corrente em curto-circuito e a tensão em circuito aberto. A corrente em curto-circuito é quando o gráfico interceta o eixo vertical (eixo relativo à corrente), a tensão é igual a zero (em situações ideais) e a resistência do circuito é zero. A tensão em circuito aberto é quando o gráfico interceta o eixo horizontal (eixo relativo à tensão), a corrente é igual a zero (em situações ideais) e a resistência do circuito em situações ideais é infinita. Para a construção da curva mede-se os valores de tensão e corrente para diferentes valores de resistência de carga.

A quantidade de energia gerada está dependente das condições em que o

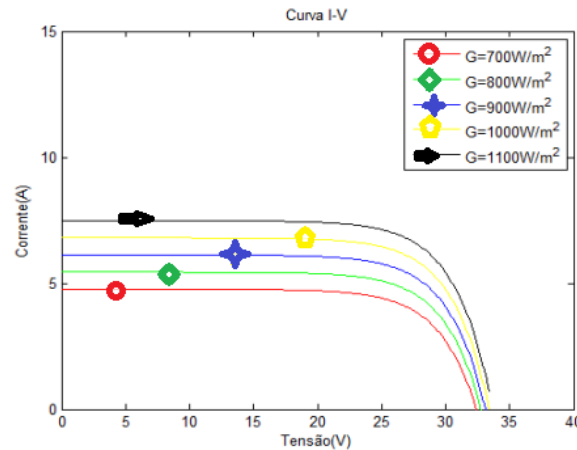


FIGURA 2.4: Curva característica de um painel fotovoltaico.
Adaptado de: Baptista et al. [2011](#)

painel se encontra, estas condições podem ser a quantidade de horas de luz, a quantidade de luz que incide no painel, o ângulo de incidência da luz no painel e/ou partes do painel em sombras. Um painel solar tem a sua eficiência máxima se a luz incidir perpendicularmente no painel solar, ou seja, quanto maior o ângulo de incidência menor a eficiência na produção de energia. Outros fatores que reduzem a eficiência de um módulo fotovoltaico são a diminuição de horas da exposição solar, o aumento da temperatura e o envelhecimento do equipamento. A quantidade de energia produzida também é diretamente proporcional ao seu tamanho.

Em resumo, as células fotovoltaicas, normalmente são compostas por semicondutores como o silício, que desempenha um papel importante na produção de energia elétrica. A radiação solar provoca o efeito fotovoltaico, onde elétrons migram de uma região N para uma P através de junções PN, gerando energia elétrica. A quantidade de energia gerada depende de fatores como intensidade de luz, ângulo de incidência, tamanho do painel e condições ambientais. No entanto, fatores como horas de exposição solar, temperatura e envelhecimento do equipamento podem reduzir a eficiência da geração de energia solar.

2.1.2 Energia termoelétrica

A energia termoelétrica é uma forma de gerar energia elétrica que aproveita a diferença de temperatura entre dois pontos para produzir energia elétrica, essa diferença de temperatura é conhecida como gradiente térmico. Este processo é baseado no efeito Seebeck, que descreve a formação de um potencial elétrico num material condutor quando existe uma diferença de temperatura entre as suas extremidades

(Dresselhaus et al. [2007](#)). O efeito Seebeck foi descoberto por Thomas Johann Seebeck em 1821. O efeito de Seebeck apenas ocorre em materiais que apresentam um coeficiente de Seebeck ou coeficiente termoelétrico. Este coeficiente descreve a capacidade de um material criar tensão elétrica em resposta a um gradiente térmico. Este coeficiente é medido em $\mu V/K$ (microvolts por kelvin).

Os dispositivos que utilizam o princípio da energia termoelétrica são os geradores termoelétricos (TEGs). Estes dispositivos são compostos por termopares ligados em série num circuito fechado. Quando uma das extremidades é exposta a uma temperatura superior à temperatura da outra extremidade o gradiente térmico é aplicado a esses materiais, gerando uma corrente elétrica devido à migração dos elétrons da extremidade mais quente para a extremidade mais fria, permitindo a conversão de calor em eletricidade (Snyder e Toberer [2008](#)). Normalmente os elementos químicos presentes nos termopares são o bismuto (Bi), telúrio (Te), antimônio (Sb) ou selênio (Se). Estes materiais têm propriedades termoelétricas particularmente boas que os tornam adequados para a conversão de energia térmica em energia elétrica. As propriedades destes elementos são:

- **Elevado coeficiente de Seebeck** - geram altos valores de tensão para uma certa diferença de temperatura;
- **Baixa condutividade térmica** - permite maximizar o gradiente térmico;
- **Alta condutividade elétrica** - permite aproveitar ao máximo o fluxo de elétrons ao longo do TEG;
- **Elevada disponibilidade e baixo custo** - são elementos relativamente abundantes na crosta terrestre e o seu custo de obtenção não é muito alto.

Uma aplicação interessante da energia termoelétrica é o seu uso em dispositivos portáteis, como o relógio de pulso desenvolvido pela empresa japonesa Seiko em 1999 (Turner e Kobayashi [1999](#)). Este relógio utiliza a temperatura corporal do utilizador como fonte de calor para gerar eletricidade. A diferença de temperatura entre o corpo humano, que normalmente varia entre 35°C e 37°C, e o ambiente circundante é aproveitada pelo relógio para alimentar o seu funcionamento.

Uma das vantagens destes dispositivos é a capacidade de gerar eletricidade de forma contínua e autónoma, sem a necessidade de baterias ou carregamento externo. Isso torna o relógio termoelétrico uma opção sustentável e económica para o consumidor, além de oferecer uma fonte de energia confiável para dispositivos portáteis.

Além do relógio de pulso, a energia termoelétrica também está a ser explorada noutras aplicações portáteis, como carregadores de dispositivos móveis e sensores de biomédicos. Estes dispositivos podem beneficiar da capacidade dos TEGs de gerar eletricidade a partir de pequenas diferenças de temperatura, o que os torna ideais para uso em ambientes onde o acesso a fontes de energia convencionais é limitado.

Em resumo, a energia termoelétrica aproveita a diferença de temperatura entre dois pontos para gerar eletricidade, baseando-se no efeito Seebeck. Os geradores termoelétricos são dispositivos fundamentais nesse processo, que convertem calor em eletricidade quando expostos a um gradiente térmico. Além dos relógios de pulso, a energia termoelétrica continua a ser explorada noutras aplicações portáteis, como carregadores de dispositivos móveis e sensores de saúde, devido à capacidade dos TEGs de gerar eletricidade a partir de pequenas diferenças de temperatura, tornando-os ideais para uso em ambientes onde o acesso a fontes de energia convencionais é limitado.

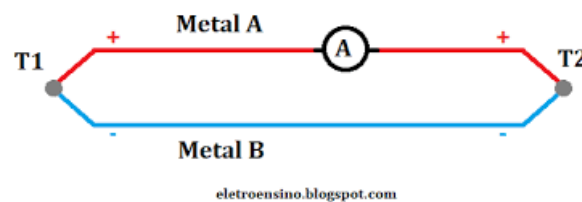


FIGURA 2.5: Termoeletrecidade.

Fonte: Renato 2020

2.1.3 Energia de Radiofrequência

A energia de radiofrequência (RF) também pode ser transformada em energia elétrica. A tecnologia usada torna a energia RF numa fonte de energia sustentável e renovável para várias aplicações, desde o fornecimento de energia para pequenos dispositivos eletrônicos até à alimentação de redes de sensores sem fios.

A produção de energia através de RF opera com base no princípio da indução eletromagnética, onde a energia das ondas de rádio é capturada usando antenas especializadas e depois é convertida em energia elétrica por meio de circuitos de retificação e regulação de tensão. Esse processo permite a extração de energia de sistemas de comunicação sem fios, como Wi-Fi, redes móveis, bluetooth, entre outros.

Um dos componentes-chave dos sistemas de RF é a antena, que é projetada para uma captura eficiente de energia RF numa largura de banda grande. Essas

antenas podem ser integradas em componentes de infraestrutura como semáforos e sinais de trânsito e em vários dispositivos (Abubakar e Yasin [2022](#)), incluindo geradores elétricos portáteis e sensores IoT (Internet of Things). O conceito IoT refere-se à conexão digital existente entre objetos do dia a dia com a internet. A IoT permite que os objetos comuniquem entre si e realizem tarefas de forma autónoma (Tripathy e Anuradha [2017](#)).

A tensão gerada na antena é processada por circuitos retificadores, que convertem o sinal de corrente alternada (AC) em corrente contínua (DC). Circuitos de regulação de tensão garantem que a energia gerada se encontra estável e compatível para o armazenamento ou carregamento de dispositivos eletrónicos.

A energia de RF oferece algumas vantagens em relação aos métodos tradicionais de gerar energia. Ao contrário da energia solar ou eólica, a energia de RF está disponível em ambientes indoor e urbanos, o que a torna ideal para alimentar dispositivos em locais onde outras fontes de energia renovável podem ser limitadas. Além disso, a colheita de RF não requer exposição direta à luz solar ou ao vento, tornando-a adequada para uma ampla gama de aplicações, incluindo dispositivos IoT, infraestrutura inteligente e geradores portáteis.

Apesar das vantagens apresentadas, a produção de energia RF também apresenta desvantagens. Uma das desvantagens é a baixa eficiência de conversão, que se deve às perdas nos componentes eletrónicos (diodos, condensadores, etc). Outra desvantagem é a dependência de fontes RF (torres de rede móvel, routers de Wi-Fi e outras fontes de emissão de rádio), em zonas pouco urbanizadas a quantidade de sinais RF pode não ser suficiente para a produção de energia (RF Wireless World [2023](#)). Mais uma desvantagem é o alcance limitado, uma vez que a eficiência diminui significativamente com o aumento da distância à fonte RF (Tran, Cha e Park [2017](#)).

Resumindo, a energia de radiofrequência (RF) é uma tecnologia que visa converter a energia das ondas de rádio em energia elétrica, oferecendo uma fonte sustentável e renovável para diversas aplicações, incluindo o fornecimento de energia para pequenos dispositivos eletrónicos. Essa produção de energia opera com base no princípio da indução eletromagnética, onde a energia RF é capturada por antenas especializadas e convertida em energia elétrica por meio de circuitos de retificação e regulação de tensão. A energia RF pode ser colhida em ambientes internos e urbanos, tornando-a ideal para locais onde outras fontes de energia renovável podem ser limitadas, o que a torna adequada para uma variedade de aplicações.

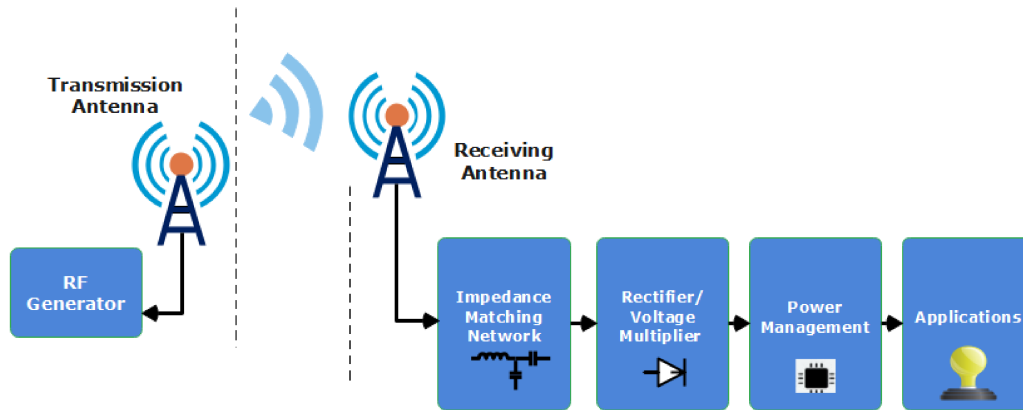


FIGURA 2.6: Energia de Radiofrequência

Fonte: Ibrahim et al. 2022

2.2 Energia gerada pelo corpo humano

A produção de energia elétrica a partir de energia gerada pelo corpo humano apresenta inúmeras vantagens em relação à produção de energia elétrica através de energia ambiental.

- **Disponibilidade constante:** A energia gerada pelo corpo humano está sempre presente, uma vez que, é resultante das atividades do ser humano. Não está dependente das condições climáticas ou do horário do dia;
- **Baixo impacto ambiental:** Comparativamente com combustíveis fósseis ou energia nuclear, a produção de energia a partir do corpo humano não produz emissões de gases de estufa, poluição atmosférica ou resíduos nucleares;
- **Aplicações de baixa potência:** Não é suficiente para alimentar grandes aparelhos eletrônicos, mas pode ser bastante útil para alimentar dispositivos de baixa potência;
- **Integração em tecnologias vestíveis:** Integração em peças de roupa e acessórios, tais como relógios, roupas inteligentes e aparelhos biomédicos.

2.2.1 Piezoelectricidade

A piezoelectricidade é um fenómeno explorado em várias áreas da ciência e da engenharia. Com origem no termo grego "piezein", que significa pressionar ou apertar, a piezoelectricidade refere-se à capacidade de certos materiais, como o quartzo, de gerarem uma carga elétrica quando submetidos a pressão mecânica.

Desde a sua descoberta, têm-se realizado várias pesquisas devido às suas aplicações práticas, que vão desde dispositivos eletrônicos até aparelhos biomédicos.

A piezoelectricidade foi descoberta pelos irmãos Pierre e Jacques Curie, que observaram o fenómeno em 1880, enquanto estudavam cristais de quartzo. Eles perceberam que certos cristais produzem uma carga elétrica quando estes eram submetidos a pressão mecânica, o fenómeno ficou conhecido como efeito piezoelétrico. Essa descoberta lançou as bases para uma compreensão mais profunda dos materiais piezoelétricos e sua aplicação em diversas áreas.

O princípio por trás da piezoelectricidade reside na estrutura cristalina assimétrica de certos materiais, como o quartzo, o tourmaline e o titanato de bário. Quando esses materiais são submetidos a uma força mecânica, como compressão ou flexão, em suas estruturas cristalinas são deformadas, o que gera um desequilíbrio de carga elétrica. Isso resulta na acumulação de cargas positivas e negativas em diferentes regiões do material, criando um campo elétrico.

A piezoelectricidade tem uma ampla gama de aplicações em diversas áreas, desde eletrônica até medicina passando pela energia. Uma das aplicações mais comuns é na produção de sensores de pressão e acelerômetros. Os sensores piezoelétricos são utilizados numa grande variedade de dispositivos, incluindo telemóveis, airbags para carros e equipamentos industriais, para medir forças e detetar movimentos.

Além disso, a piezoelectricidade é amplamente usada na indústria de ultrassons, sendo também utilizado em sonares. Transdutores piezoelétricos convertem sinais elétricos em ondas sonoras de alta frequência, que são então utilizadas para criar imagens de alta resolução de tecidos e órgãos internos no campo da medicina. Esses dispositivos são essenciais em procedimentos de ultrassonografia, permitindo diagnósticos precisos e não invasivos. Outra aplicação importante da piezoelectricidade é na produção de energia. Os materiais piezoelétricos podem ser utilizados para converter energia mecânica, como vibrações e movimentos, em energia elétrica. Essa tecnologia é explorada em dispositivos como geradores piezoelétricos, que podem aproveitar a energia de passos humanos ou vibrações ambientais para alimentar dispositivos eletrônicos de baixa potência.

Um gerador piezoelétrico é um gerador que usa a piezoelectricidade para gerar energia elétrica. Os geradores piezoelétricos já revelaram ser bastante eficientes a altas frequências (40 kHz), mas não apresentam os mesmos níveis de eficiência

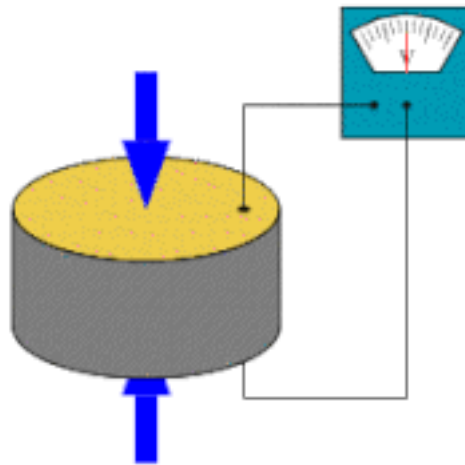


FIGURA 2.7: Piezoeletricidade

Fonte: Martendal [2016](#)

quando estamos em baixas frequências (frequências do corpo humano, 1 Hz) (Choi, Lee e Jeon [2017](#)).

Além das aplicações mencionadas, a piezoelectricidade também é utilizada em dispositivos de ignição de cigarros eletrônicos, sistemas de cancelamento de ruído em auscultadores, sistemas de injeção de combustível em motores de automóveis e até mesmo em alguns sistemas de produção de energia em estradas movimentadas.

Em resumo, a piezoelectricidade é um fenómeno que desempenha um papel crucial numa variedade de aplicações práticas, desde sensores e transdutores até à produção de energia. A sua descoberta e desenvolvimento ao longo dos anos abriram novas possibilidades em campos tão diversos como a eletrónica, a medicina e a energia.

2.2.2 Triboeletricidade

A triboeletricidade, vulgarmente conhecida como eletricidade estática, é a energia gerada pelo atrito entre duas superfícies que depois é transformada em energia elétrica. A tecnologia utilizada nesta transformação possui um grande potencial para fornecer uma fonte de energia sustentável e renovável para inúmeras aplicações, como por exemplo o fornecimento de energia para dispositivos portáteis.

A triboeletricidade funciona com base no princípio da eletrificação por atrito, onde a fricção entre dois materiais diferentes cria cargas elétricas opostas

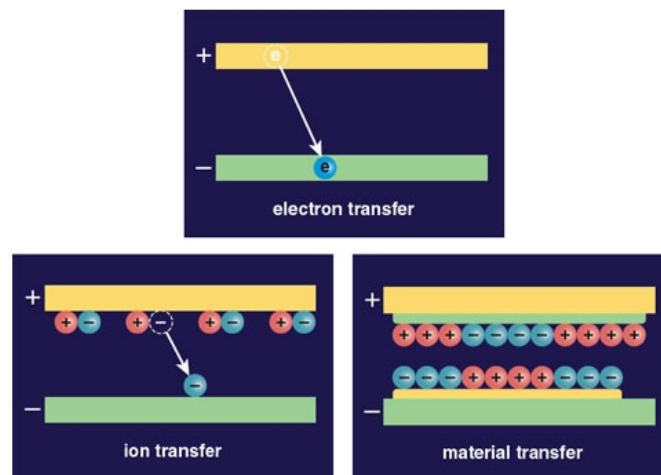


FIGURA 2.8: Triboeletrecidade

que podem ser armazenadas para produzir eletricidade. Essa técnica permite a formação de energia a partir de movimentos naturais, como a caminhada, ou o atrito entre materiais sintéticos.

Um dos princípios dos sistemas triboelétricos são os materiais triboelétricos, que são escolhidos com base na sua capacidade de gerar e armazenar eletricidade durante o atrito. A escolha dos materiais triboelétricos depende das suas propriedades mecânicas, elétricas e a capacidade de reter cargas elétricas durante o processo de fricção. Os materiais que mais se destacam são os polímeros triboelétricos, óxidos metálicos e polímeros de baixa densidade, destacando-se o polietileno tereftalato (PET) e o politetrafluoretileno (PTFE). Estes materiais são conhecidos pela sua capacidade de gerar cargas elétricas quando em contato com outros materiais e, simultaneamente, manter essas cargas armazenadas temporariamente (Niu e Wang [2015](#)). Os materiais podem ser integrados em dispositivos portáteis, tecidos inteligentes e superfícies de contato para capturar a energia gerada pelo atrito e convertê-la em energia elétrica.

Durante a fricção, os elétrons são transferidos de um material para o outro, resultando numa separação de cargas elétricas. Um material pode ganhar elétrons, ficando negativamente carregado, enquanto o outro material perde elétrons, ficando positivamente carregado. Essa separação de cargas cria um campo elétrico entre os materiais, que pode ser aproveitado para gerar corrente elétrica quando os materiais são conectados a um circuito externo. A compreensão dos mecanismos subjacentes à transferência de elétrons durante o atrito é essencial para o projeto e otimização de sistemas triboelétricos (Zhu et al. [2015](#)).

A energia triboelétrica capturada é então processada por circuitos de retificação e armazenada em dispositivos de armazenamento de energia, como baterias ou supercondensadores, para alimentar dispositivos eletrônicos ou carregar dispositivos portáteis.

A triboeletricidade é especialmente adequada para aplicações portáteis, pois pode aproveitar o movimento humano ou a fricção natural para gerar energia sem a necessidade de fontes de energia externas. Além disso, a triboeletricidade é uma fonte de energia limpa e renovável que pode ser integrada numa variedade de materiais e dispositivos para fornecer energia de forma autónoma e sustentável.

Em suma, a triboeletricidade é uma tecnologia que visa converter a energia gerada pelo atrito entre duas superfícies em energia elétrica. Esse processo baseia-se no princípio da eletrificação por atrito, onde a fricção entre materiais diferentes cria cargas elétricas opostas. A tecnologia utiliza materiais triboelétricos em dispositivos portáteis e superfícies de contato para capturar a energia gerada pelo atrito e convertê-la em energia elétrica. A triboeletricidade oferece vantagens significativas, como a capacidade de aproveitar o movimento humano ou a fricção natural para gerar energia, tornando-a uma fonte de energia limpa, renovável e autónoma para uma variedade de aplicações.

2.2.3 Indução magnética

A produção de energia a partir do fenómeno da indução magnética tem como objetivo aproveitar os campos magnéticos presentes no ambiente para gerar energia elétrica. Este método baseia-se no princípio da indução eletromagnética, uma descoberta feita por Michael Faraday no século XIX. Segundo a lei de Faraday, quando um circuito elétrico é exposto a uma variação no seu campo magnético, ocorre uma indução de corrente elétrica nesse circuito. Essa variação no campo magnético pode ser alcançada por meio de ímanes e/ou bobines de indução. Através dos ímanes é possível alterar o campo magnético movimentando o íman em relação à bobine, porque segundo a lei de Faraday o fluxo magnético através da bobine é alterado, induzindo uma tensão elétrica na bobine. Através das bobines de indução é possível alterar o campo magnético alterando a corrente elétrica que passa através da bobina ou então variando a orientação da bobina em relação a outros campos magnéticos.

As bobines de indução são componentes essenciais dos geradores portáteis de indução magnética. São enrolamentos de fios condutores projetados para capturar o

fluxo magnético e converter essa energia em corrente elétrica. Essas bobinas podem ser integradas em vários dispositivos e infraestruturas para gerar energia elétrica.

Uma das principais vantagens da criação de energia por indução magnética é sua aplicabilidade em ambientes onde o movimento mecânico é abundante. Isso inclui veículos em movimento, máquinas industriais e equipamentos rotativos. Além disso, essa tecnologia é limpa e renovável, não requerendo partes móveis mecânicas, o que a torna adequada para aplicações de baixa manutenção e alta confiabilidade.

Durante a conversão de energia magnética em energia elétrica, a criação de energia por indução magnética oferece uma fonte de energia sustentável para uma variedade de aplicações. Desde dispositivos eletrônicos portáteis até sistemas de energia autônomos, esta tecnologia tem o potencial de fornecer energia limpa e renovável para alimentar o mundo moderno.

Além disso, a criação de energia através de indução magnética não está sujeita às limitações associadas a outras formas de energia renovável, como a dependência da luz solar ou do vento. Ela pode operar de forma consistente e eficiente numa variedade de condições ambientais, tornando-se uma opção viável para uma ampla gama de aplicações.

Em resumo, a produção de energia por indução magnética é uma tecnologia que aproveita os campos magnéticos presentes no ambiente para gerar eletricidade, baseada no princípio da indução eletromagnética descoberto por Michael Faraday. Essa abordagem utiliza bobinas de indução para capturar o fluxo magnético e convertê-lo em corrente elétrica, sendo aplicável numa variedade de dispositivos e infraestruturas. As suas principais vantagens incluem a aplicabilidade em ambientes com movimento mecânico abundante e baixa manutenção. Essa tecnologia oferece uma fonte de energia limpa, sustentável e confiável para uma ampla gama de aplicações, representando uma contribuição significativa para o campo da energia renovável.

2.3 Trabalhos relacionados

Em Vitorino [2022](#) foi desenvolvido o gerador da figura [2.10](#), que usava o efeito piezoelétrico para gerar energia elétrica. Nesse trabalho o autor estudou o transdutor piezoelétrico do modelo 7BB-20-6LO da empresa “Murata”. Efetuado este estudo, o autor desenvolveu o seu protótipo em duas fases. A primeira fase consistiu na otimização duma estrutura PLA (ácido polilático) que permitia a maior

TABELA 2.1: Resumo das formas de gerar energia

Forma de Gerar Energia	Princípio de Funcionamento	Exemplos de Aplicações	Vantagens
Energia Solar	Efeito fotovoltaico: Conversão da luz solar em eletricidade através de células fotovoltaicas.	Painéis solares para alimentar equipamentos dentro e fora de edifícios.	Disponibilidade de luz solar, sustentável, baixa manutenção.
Energia Termoeleétrica	Efeito Seebeck: Conversão de diferenças de temperatura em eletricidade através de semicondutores.	Relógios termoeletricos, geradores termoeletricos.	Utilização de diferenças de temperatura existentes, autonomia energética.
Energia de Radiofrequência	Indução eletromagnética: Conversão de energia de radiofrequência em eletricidade através de antenas e circuitos de retificação.	Carregadores sem fio, sensores IoT.	Disponibilidade em ambientes internos e urbanos, não requer exposição direta ao sol ou vento.
Piezoletrecidade	Conversão de pressão mecânica em eletricidade através de materiais piezoelétricos.	Sensores de pressão, dispositivos médicos.	Utilização de movimentos mecânicos existentes, baixa manutenção.
Triboeletrecidade	Conversão de atrito entre materiais em eletricidade através de materiais triboelétricos.	Dispositivos portáteis, tecidos inteligentes.	Utilização de movimentos naturais, fonte de energia limpa e renovável.
Indução Magnética	Indução eletromagnética: Conversão de variação no campo magnético em eletricidade através de bobinas de indução.	Geradores portáteis, sistemas de energia autônomos.	Aplicabilidade em ambientes com movimento mecânico, fonte de energia limpa e sustentável.

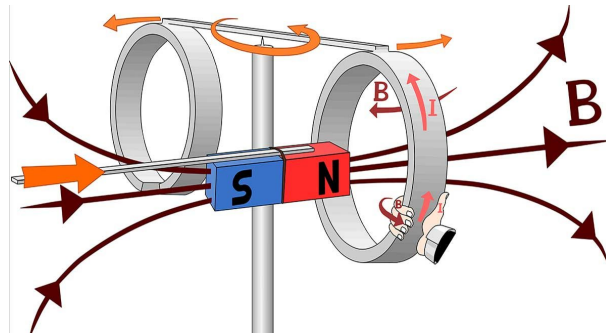
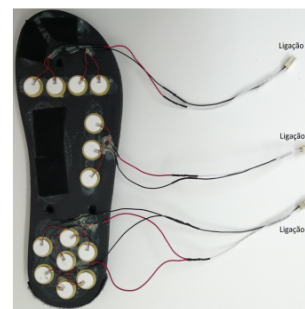


FIGURA 2.9: Indução eletromagnética

Fonte: Magnets [2024](#)



(a) Vista frontal.



(b) Transdutores e ligações.



(c) Vista lateral exterior.



(d) Vista lateral interior.

FIGURA 2.10: Aparelho desenvolvido em Vitorino [2022](#)

deformação do material piezoelétrico, no estudo das propriedades do material piezoelétrico integrado em calçado e no ensaio do circuito eletrónico de condicionamento de sinal. O circuito eletrónico usado foi o “Energy Harvester Breakout - LTC3588” da Sparkfun e que permite realizar uma retificação de onda completa e uma conversão DC/DC. A segunda fase consistiu na incorporação do material piezoelétrico numa bota, no ensaio das ligações elétricas, no fabrico de uma placa de circuito impresso para incorporação de todos os componentes e por fim no ensaio do protótipo. No ensaio do protótipo o autor concluiu que é possível gerar $800 \mu J$ de potência a cada passo.

Em Hou et al. [2023](#) foi desenvolvido um aparelho que seria colocado dentro do sapato de forma a gerar energia elétrica através da energia dissipada no momento em que existe contacto do pé com o chão. Este aparelho é constituído por um

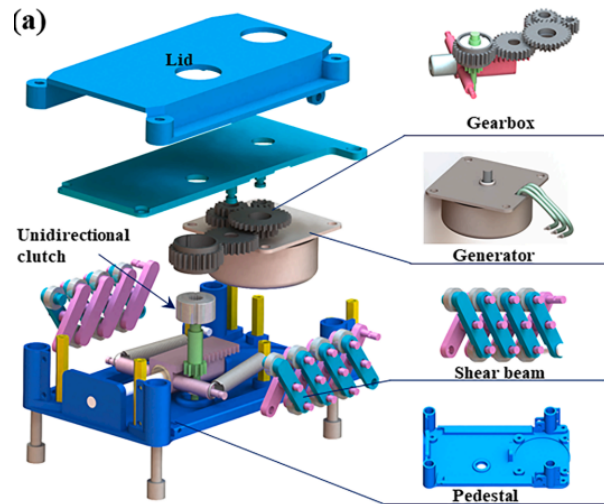


FIGURA 2.11: Aparelho desenvolvido em Hou et al. 2023

gerador, um conjunto de rodas dentadas e dois conjuntos de eixos como mostrado na Figura 2.11. A compressão dos eixos faz ativar o gerador que irá produzir energia. As rodas dentadas aumentam a eficiência do gerador. Após o aparelho ser testado, os valores de potência atingidos com o utilizador a caminhar varia de $0,2\text{ W}$ a 1 W , a correr os valores de potência atingidos variam de $0,95\text{ W}$ a $2,03\text{ W}$.

Em Rome et al. 2005 foi desenvolvido o aparelho da figura 2.12, que aproveita a energia dissipada no movimento vertical do tronco para produzir energia elétrica. Neste artigo é apresentada a mochila de carga suspensa, que extrai energia mecânica do movimento vertical da carga e a converte em eletricidade para dispositivos portáteis. Esta tecnologia resolve o desafio de capturar energia mecânica durante a locomoção terrestre. Testes práticos mostraram que o dispositivo pode gerar até $5,6\text{ W}$ de potência elétrica, com uma eficiência de conversão de energia mecânica para elétrica em cerca de 30 a 40 %. Além disso, o aumento no consumo metabólico é menor do que o previsto, reduzindo a necessidade de alimentação adicional para gerar eletricidade. A mochila de carga suspensa apresenta potencial para beneficiar utilizadores em áreas remotas ou durante caminhadas longas, oferecendo uma solução ergonómica e sustentável para as necessidades de energia elétrica.

Em Xie et al. 2016 foi desenvolvido um 'power bank' que era carregado através da energia dissipada pelo corpo humano. Os autores começaram por estudar a biomecânica do corpo humano e a oscilação do seu centro de massa, dos membros superiores e dos membros inferiores. No estudo dos membros foi possível perceber que a oscilação é maior na extremidade dos membros. O autor idealizou um aparelho para produzir energia elétrica através desta oscilação, composto por molas, um circuito integrado, um micro gerador, um sistema de engrenagens e as

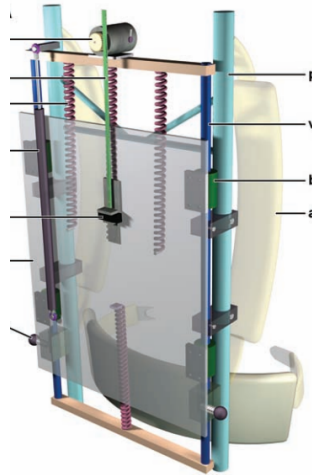


FIGURA 2.12: Aparelho desenvolvido em Rome et al. 2005

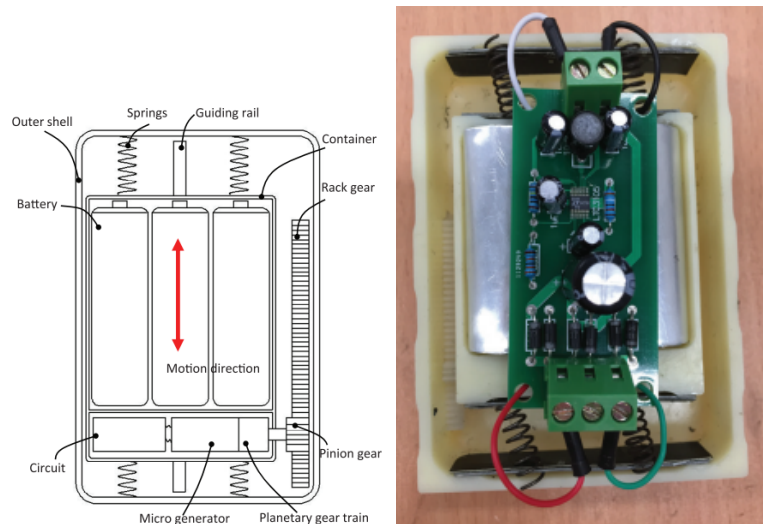


FIGURA 2.13: a) Esquema do aparelho desenvolvido em Xie et al. 2016, b) aparelho desenvolvido em Xie et al. 2016

baterias. Na figura 2.13 a) é possível ver o esquema deste aparelho, na figura 2.13 b) é possível ver o aparelho. Após a construção do aparelho foram realizados testes. Estes testes consistiram em medir a energia produzida pelo aparelho a diferentes velocidades e em diferentes localizações do corpo humano, a anca, o pulso e o tornozelo. Na realização dos testes foi possível atingir $0,35\text{ W}$, $0,16\text{ W}$ e 10 mW de potência com o aparelho no tornozelo, no pulso e na anca, respectivamente. Após a realização dos testes foi possível concluir que é produzida mais energia a maiores velocidades e se o aparelho estiver nos membros, nomeadamente os inferiores.

Em Shepertycky e Li 2015 foi desenvolvido um aparelho para ser colocado no fundo das costas do utilizador. O aparelho tem dois cabos que estão ligados aos tornozelos do utilizador e quando este se encontrar em movimento o aparelho

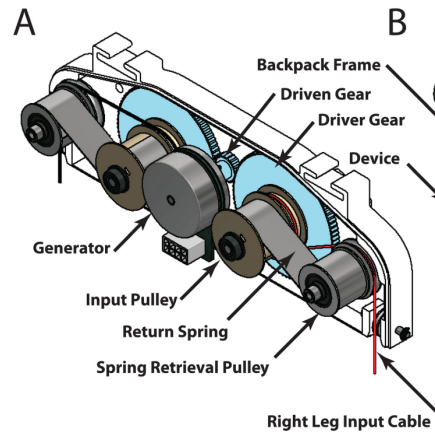


FIGURA 2.14: Aparelho desenvolvido em Shepertycky e Li [2015](#)

irá produzir energia elétrica. O aparelho é constituído por um gerador, polias de entrada, duas molas de retorno e dois cabos, um para cada membro. Na Figura [2.14](#) é possível observar o esquema deste aparelho. Para a realização de testes foram chamadas várias pessoas. Os indivíduos tiveram de andar, mais do que uma vez, em cima de uma passarela por um período de tempo de forma a que fosse possível registar os níveis de potência atingidos, em cada ensaio foi usado uma resistência diferente. A resistência que atingiu maiores níveis de potência foi a resistência de $2,5 \Omega$, correspondente a um nível de potência de $9 W$.

Em Donelan et al. [2008](#) foi desenvolvido um aparelho que pode ser resposta ao desafio que é produzir eletricidade a partir da caminhada, com a maioria das pesquisas se concentrando na produção de eletricidade a partir da compressão da sola do sapato. Na figura [2.15](#) é proposta uma alternativa, que envolve acoplar um gerador ao movimento da perna para gerar eletricidade ao longo de cada ciclo de caminhada. Isso resulta numa taxa metabólica mais baixa do que a produção convencional de energia, uma vez que não requer energia metabólica adicional. Um protótipo de produção de energia foi desenvolvido para testar esse conceito. Este método tem potencial para alimentar dispositivos eletrónicos e até mesmo dispositivos médicos implantáveis, oferecendo uma fonte de energia sustentável e eficiente. Durante os testes deste protótipo foram atingidos dois valores de potência, $7 W$ e $4,8 W$. O primeiro valor foi medido no avanço da perna e o segundo valor foi medido no momento em que a perna recua durante a caminhada.



FIGURA 2.15: Aparelho desenvolvido em Donelan et al. 2008

TABELA 2.2: Resumo dos aparelhos de interesse

Autor	Ano	Refrência bibliográfica	Principais Resultados
Vitorino	2022	Vitorino 2022	$800 \mu J$ e $747 \mu W$ por passo
Hou	2023	Hou et al. 2023	$0,2 W$ a $1 W$ durante a caminhada e $0,95 W$ a $2,03 W$ durante a corrida
Rome	2005	Rome et al. 2005	$5,6 W$
Xie	2016	Xie et al. 2016	$0,35 W$ no tornozelo, $0,16 W$ no pulso e $10 mW$ na anca
Shepertycky	2015	Shepertycky e Li 2015	$9 W$
Donelan	2008	Donelan et al. 2008	$7 W$ e $4,8 W$

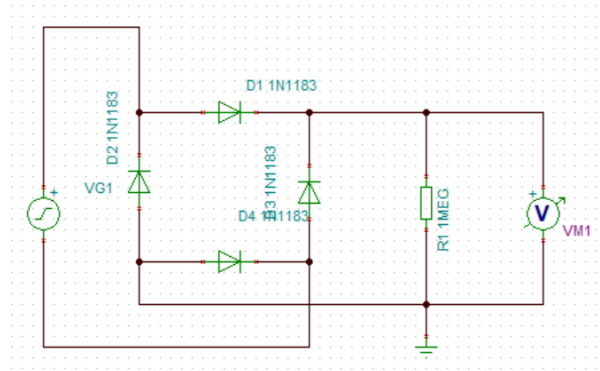


FIGURA 2.16: Circuito retificador de onda completa

2.4 Conversão AC/DC e DC/DC

Após o estudo de alguns aparelhos de interesse para o desenvolvimento desta dissertação de mestrado há um fator comum entre eles, as formas de onda da tensão gerada por estes equipamentos. As formas de onda são compostas por uma parte positiva e uma parte negativa. Para efetuar o armazenamento de energia e o carregamento de baterias é necessário utilizar retificadores de onda. Um dos circuitos retificadores mais comuns é o circuito retificador de meia onda, que retifica apenas uma metade de cada ciclo da onda, fazendo com que o resultado final seja a parte positiva ou a parte negativa da onda. Outro dos circuitos mais comuns é o circuito retificador de onda completa (figura 2.16), que consiste em dois retificadores de meia onda e no final soma as duas ondas.

Estes circuitos são apenas os mais básicos, existindo vários circuitos mais complexos que são projetados com o objetivo de atender às especificações definidas pelo utilizador.

Em Magno et al. 2018 é apresentado um sistema de produção de energia cinética através de energia dos movimentos do corpo humano. Primeiro, é feita uma caracterização do microgerador Kinetron MSG 26.4. O microgerador é um gerador de energia eletromagnética, que funciona através da rotação de um peso. Em seguida, é projetado um novo circuito de energia cinética, utilizando um conversor de corrente negativo (NVC) para a parte AC-DC e circuito integrado BQ 25570 da marca 'Texas Instruments' para as partes DC-DC e gestão de bateria. O sistema de produção de energia atinge até 84 % de eficiência. Testes de laboratório mostraram que os circuitos propostos conseguem 27 % mais energia do que o está escrito na folha de dados da Kinetron. Avaliações experimentais no campo, com diferentes posições e atividades, demonstraram que podem ser alcançados valores de até 0,649

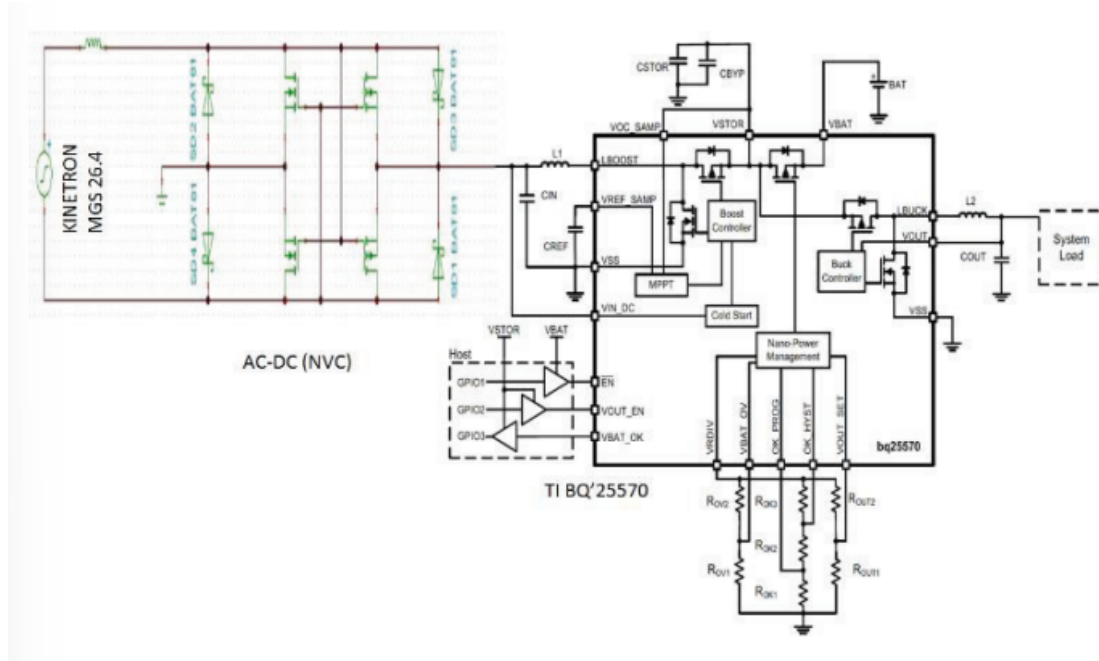


FIGURA 2.17: Circuito retificador desenvolvido em Magno et al. 2018

mW durante a corrida e até 0,123 mW durante a caminhada com a solução proposta. A figura 2.17 contém o circuito desenvolvido.

Em Vitorino 2022 foi utilizado o circuito integrado LTC3588-1 da Linear Technology, projetado para aproveitar energia de fontes com impedâncias elevadas, como geradores piezoelétricos. O circuito inclui um retificador de onda completa e um conversor DC/DC, e foi utilizado um protótipo da Sparkfun que incorpora o LTC3588-1. O ensaio do circuito consistiu em conectar um transdutor aos pinos PZ1 e PZ2, um condensador de 10 μ F aos pinos VIN e GND, e uma resistência de carga de 1 M Ω aos pinos VCC e GND. Foram realizados três ensaios para gerar uma tensão de saída de 3.3 V, registrando as tensões nos pinos VIN, EN e VCC. Durante os ensaios, foram observadas várias características do circuito, incluindo o ritmo médio de caminhada, o número de passos para ativar a linha EN pela primeira vez, e o comportamento das tensões ao longo do tempo. Verificou-se que a tensão de EN aumentou quando a tensão de VCC atingiu 3.4 V e diminuiu quando a tensão de VCC caiu para 3 V, demonstrando o funcionamento correto do comparador PGOOD. A figura 2.18 contém o circuito desenvolvido.

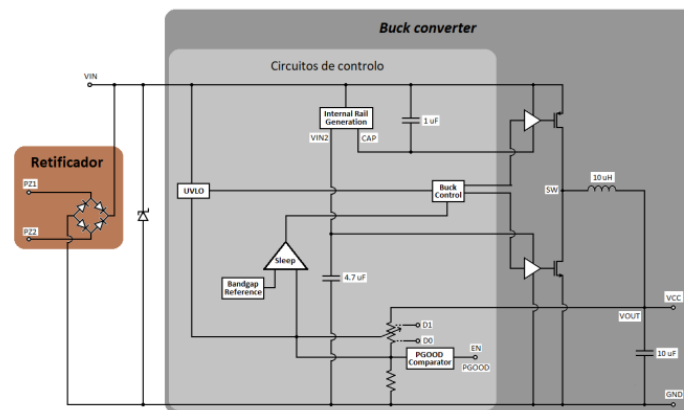


FIGURA 2.18: Circuito retificador desenvolvido em Vitorino 2022

Capítulo 3

Desenvolvimento

Após o estudo apresentado no capítulo 2 desenvolveu-se um protótipo para produção de energia e carregamento de aparelhos eletrônicos através de energia gerada pelo corpo humano. O primeiro passo foi o estudo de dois módulos fotovoltaicos. Em seguida estudou-se um aparelho piezoelétrico que já tinha sido desenvolvido anteriormente. E por fim desenvolvi um aparelho de indução eletromagnética. O estudo e desenvolvimento do aparelho piezoelétrico e do aparelho de indução magnética surgiu da necessidade de continuar a produzir energia quando não é possível produzir energia elétrica através de energia solar.

3.1 Painei Fotovoltaico

O estudo sobre o painei fotovoltaico vai estar dividido em duas partes, uma parte de provas estáticas e outra parte de provas móveis. As provas estáticas vão consistir na construção da curva característica do módulo fotovoltaico em ambiente interior e em ambiente exterior. Através da curva característica em ambiente exterior vai ser definido o valor da resistência de carga ótima. Nas provas móveis vai ser avaliado o desempenho do painei solar, usando a resistência de carga definida anteriormente.

3.1.1 Provas estáticas

Para o desenvolvimento desta dissertação de mestrado foi disponibilizado um módulo fotovoltaico da marca Volt Polska (figura 3.1). O painei fotovoltaico tem uma tensão em circuito aberto (V_{oc}) de 22,46 V, a corrente em curto-circuito (I_{sc}) é de 2,31 A e a potência nominal (P_n) é de 40 W, esta informação é retirada do *datasheet* do módulo fotovoltaico.

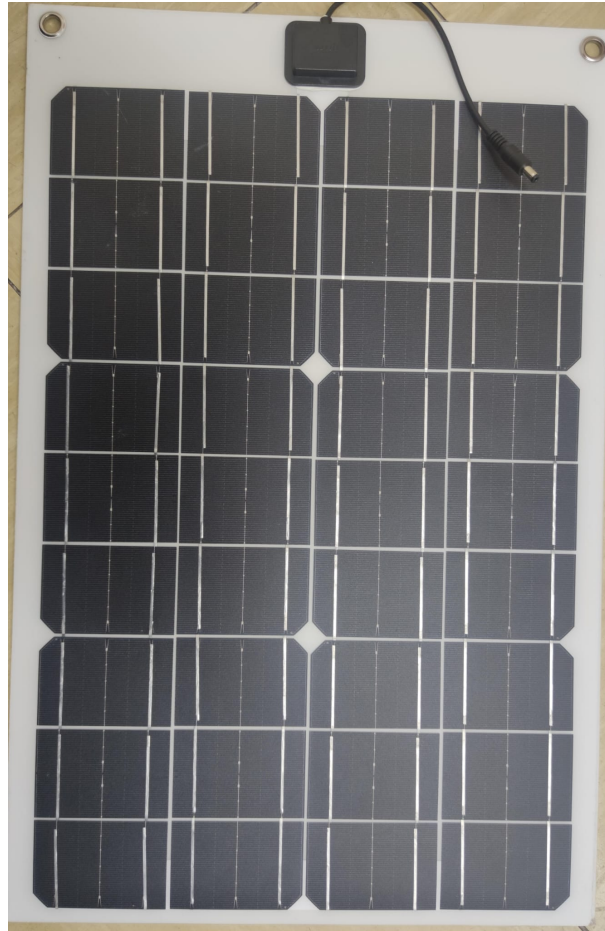


FIGURA 3.1: Módulo fotovoltaico.

Para definir a sua curva característica usou-se uma década de resistência, dois multímetros e um luxímetro. O luxímetro é um aparelho que mede os níveis de intensidade da luz, e este aparelho vai permitir que seja construída uma curva para cada intensidade de luz, a unidade de medida da intensidade da luz é o Lux. Para realizar as medições foi montado o circuito representado na figura 3.2 com o objetivo de obter valores de tensão e corrente. Na figura, VG1 representa o painel fotovoltaico, AM1 representa o amperímetro, VM1 representa o voltímetro e R1 representa a década de resistência. Após serem feitas medições para diferentes intensidades de luz e valores de resistência é possível contruir os gráficos das figuras 3.3, 3.4 que representam a curva característica do painel fotovoltaico.

O gráfico da figura 3.3 e o gráfico da figura 3.4 apresentam os valores de tensão e corrente medidos para condições de luz em espaços interiores e exteriores, respetivamente. Nestas medições é usada a convenção passiva, com a corrente a entrar no painel pelo terminal positivo, o que resulta nas correntes negativas que se podem observar nos gráficos. A década de resistência usada em espaços exteriores

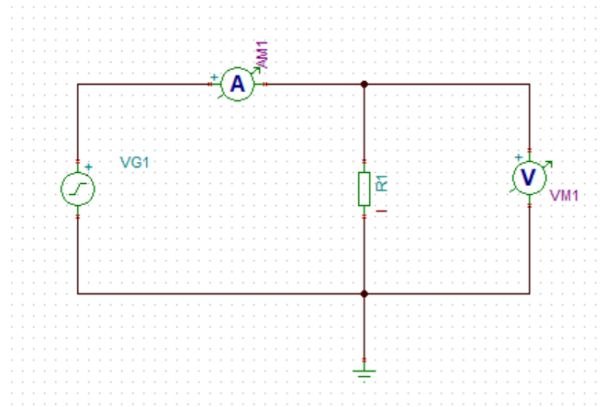


FIGURA 3.2: Esquema do circuito para efetuar medições.

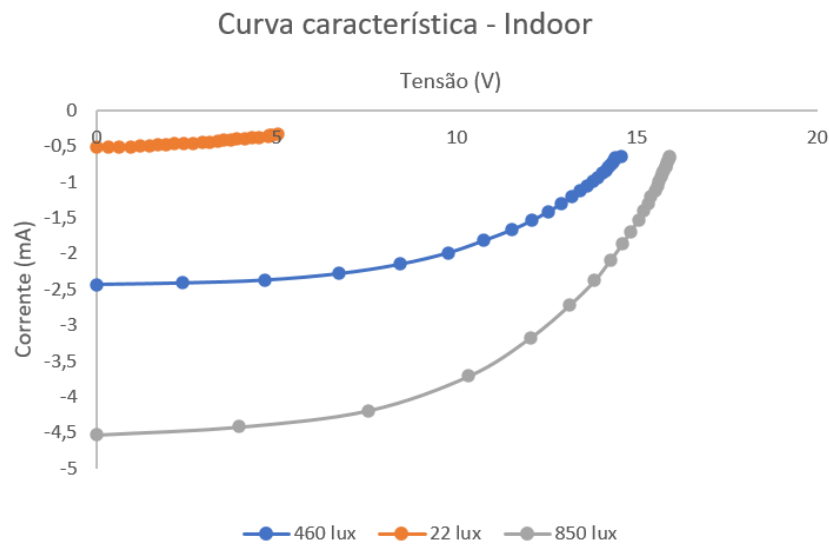


FIGURA 3.3: Curva característica do painel solar em ambiente interior.

fornece resistência na ordem de grandeza das dezenas e centenas de Ohms, enquanto a década de resistência usada em espaços interiores fornece resistências na ordem de grandeza dos milhares de Ohms.

Analisando os dois gráficos podemos concluir que a principal diferença entre os dois ambientes estudados é o valor da corrente medida. Em espaços interiores a corrente medida é da ordem dos miliamperes (mA), enquanto em espaços exteriores os valores se situa na ordem dos amperes (A). A conclusão que podemos retirar é que o valor da corrente aumenta com o aumento do valor da intensidade da luz.

Relativamente ao segundo gráfico podemos observar os níveis de corrente e

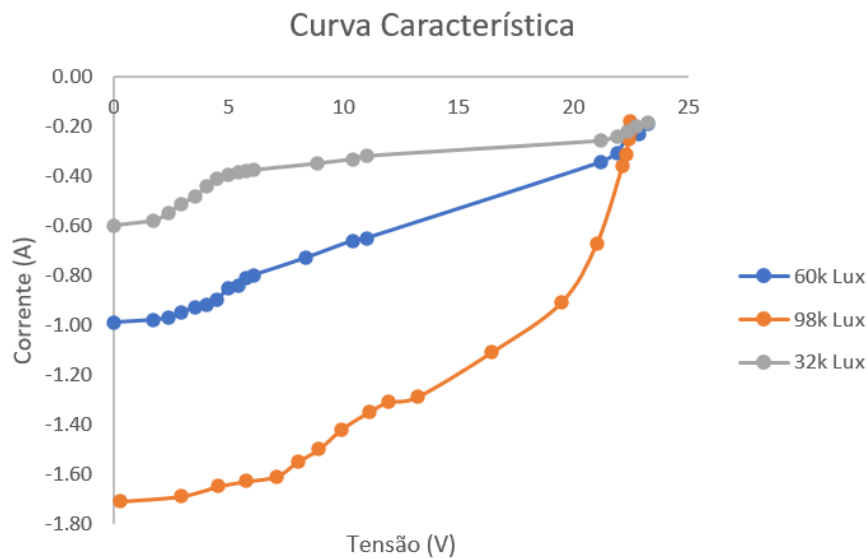


FIGURA 3.4: Curva característica do painel solar em ambiente exterior.

tensão obtidos para valores exteriores. Através dos valores de tensão, corrente, potência e resistência podemos chegar ao valor da resistência de carga que irá permitir produzir os melhores valores de energia. Os valores estão apresentados no apêndice [A](#).

Com os valores tabelados podemos construir o gráfico da figura [3.5](#) e podemos encontrar o valor da resistência de carga adaptada ao gerador. Os valores de potência são negativos porque nestes ensaios é usada a convenção passiva. Também por análise do gráfico podemos perceber que o valor da resistência de carga ótima varia para cada intensidade de luz, diminuindo conforme o valor da intensidade de luz aumenta. Para o estudo realizado foram disponibilizadas resistências de potência devido aos elevados valores de corrente envolvidos. As resistências de potência são resistências que são construídas de forma a aguentar altas correntes elétricas sem falhar. Analisando o gráfico da figura [3.5](#) é possível perceber que, para grandes valores de intensidade de luz, a resistência ótima ronda os $20\ \Omega$, mas para valores mais baixos a resistência ótima já ronda os $60\ \Omega$. Quando avançarmos para as provas móveis o valor de resistência a utilizar será de $47\ \Omega$. A escolha desta resistência prende-se com o facto de o valor da intensidade de luz solar não ser sempre o máximo, porque esse valor só é possível quando o módulo fotovoltaico se encontra virado para o sol. Isto não se verifica sempre, visto que o utilizador estará em movimento e não se desloca sempre em linha reta.

Passou-se em seguida ao estudo do módulo fotovoltaico da figura [3.6](#), de

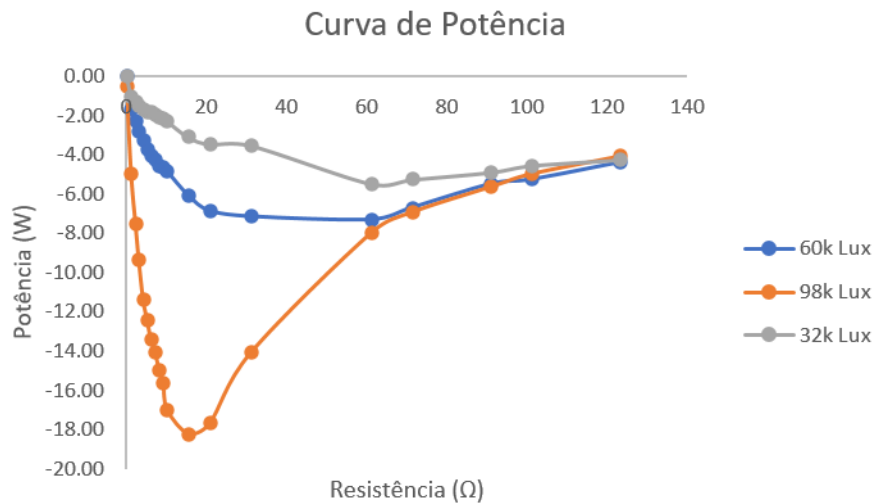


FIGURA 3.5: Curva de potência

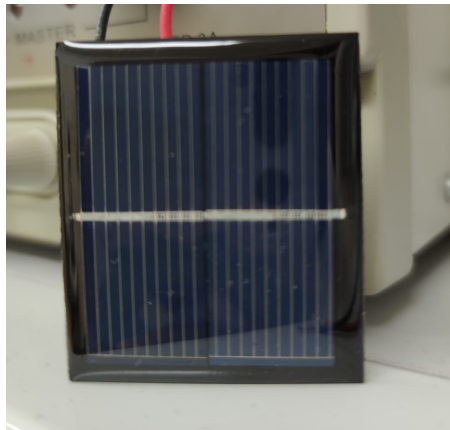


FIGURA 3.6: Módulo fotovoltaico - 2

forma que fosse efetuado o mesmo estudo. Este módulo fotovoltaico da marca Vellemen Sol3n apresenta menores dimensões que o módulo fotovoltaico anterior, e por isso é mais fácil integrar no vestuário ou no equipamento. De acordo com as suas especificações técnicas, este painel fotovoltaico tem uma tensão em circuito aberto (V_{oc}) de 1,2 V, a corrente em curto-circuito (I_{sc}) é de 0,22 A e a potência nominal (P_n) é de 0,2 W. Estas pequenas dimensões representam um passo em direção a um dos objetivos desta dissertação de mestrado, a substituição do peso das baterias por equipamentos mais leves e que consigam fornecer níveis de energia suficientes para alimentar alguns equipamentos de baixo consumo.

As menores dimensões deste módulo fotovoltaico justificam os valores de tensão e corrente mais pequenos. No segundo módulo fotovoltaico os valores de tensão obtidos variam entre zero e 1,2 V e os valores de corrente variam ente 50

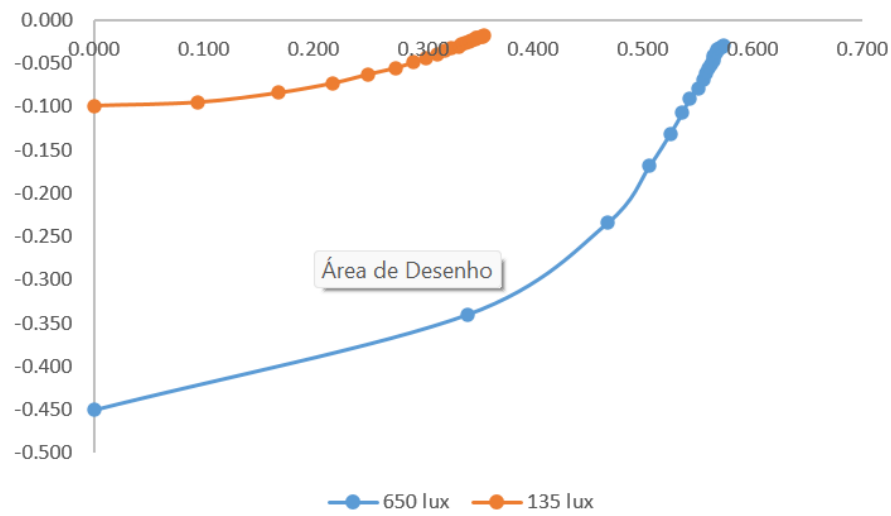


FIGURA 3.7: Curva característica do painel solar 2 em ambiente interior.

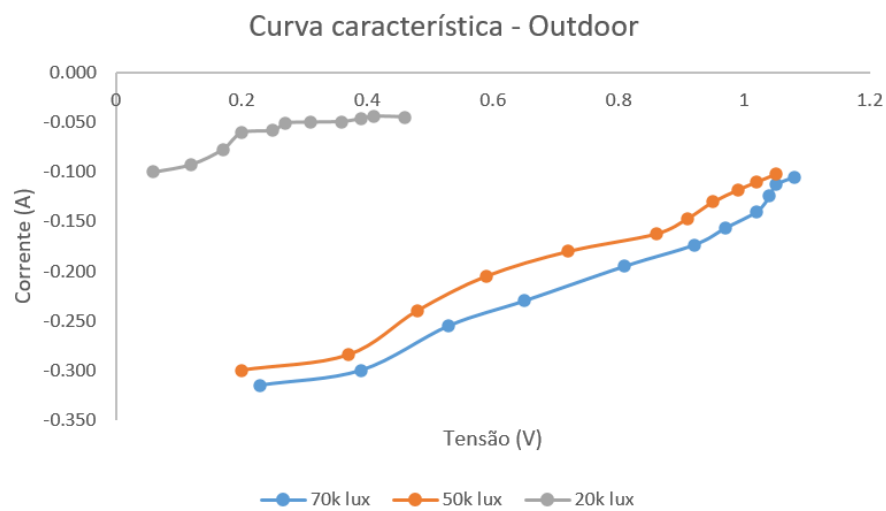


FIGURA 3.8: Curva característica do painel solar 2 em ambiente exterior.

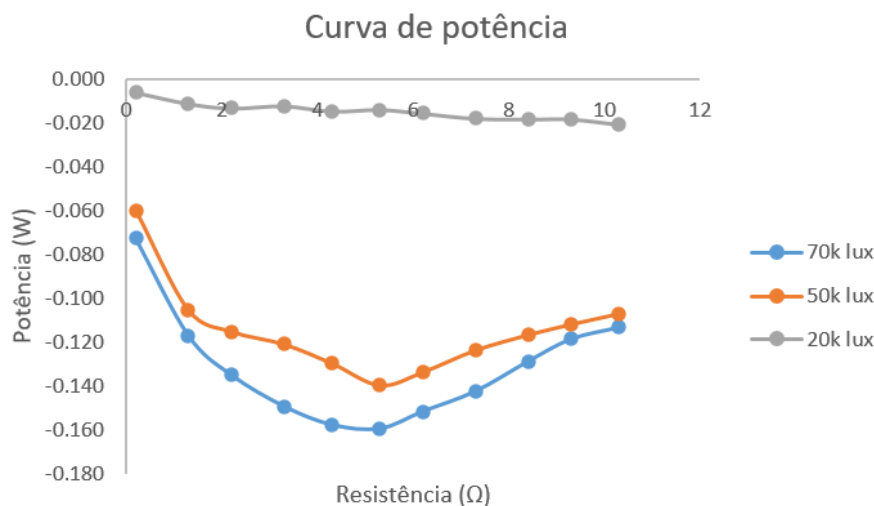


FIGURA 3.9: Curva de potência do painel solar 2.

e 300 mA, como é possível observar no gráfico da figura 3.8. Após este estudo foi construída a tabela do apêndice A com o objetivo de ser construída uma curva de potência com o objetivo de encontrar a resistência de carga ótima. O procedimento utilizado foi o mesmo que foi usado para encontrar a resistência de carga ótima do primeiro módulo fotovoltaico. Após ter sido construído o gráfico da figura 3.9, conclui-se que a resistência de carga ótima para este painel solar é uma resistência de 5.2 Ω. Para manter os moldes dos testes para os dois módulos solares a resistência usada será uma resistência de potência. A resistência usada será de 5,6 Ω.

3.1.2 Provas móveis

Após o estudo das características dos módulos fotovoltaicos apresentado no subcapítulo 3.1.1 realizou-se um estudo mais próximo da realidade em que este protótipo pode ser inserido. Desse estudo são retirados dois valores de resistência que confira a maior capacidade de produção de energia.

Com a ajuda do Software LabView e de uma placa de aquisição de dados da marca *Measerument Computing*, foi possível recolher dados durante o desenvolvimento do protótipo.

O software do Labview foi dividido em duas partes, uma parte para fazer a aquisição de dados e uma segunda parte para fazer o tratamento de dados.

O programa é composto por quatro funções que serão utilizados para a aquisição de dados. A primeira função cria um canal físico que vai permitir medir a tensão aos terminais de cada equipamento. O número de vezes que esta função

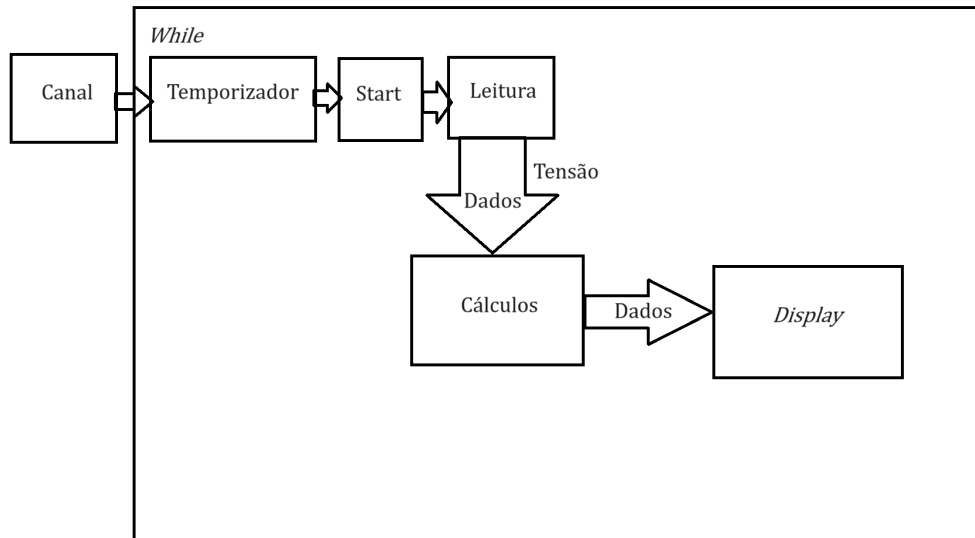


FIGURA 3.10: Fluxograma

aparece é igual ao número de equipamentos. A segunda função representa um *clock* que irá definir o numero de amostras que devem ser registadas e a cadência a que estas devem ser retiradas. A terceira função faz com que a placa inicie as medições. A quarta é a função que vai permitir o utilizador analisar os dados retirados. Em seguida adicionou-se um ciclo *while* com um período de amostragem de 1 segundo, com o objetivo de ir medir o valor da tensão do painel solar a cada segundo. Obtido o valor da tensão são efetuados cálculos para obter valores de corrente, de potência e de energia produzida ao longo do tempo (apêndice B). O ciclo *while* é interrompido quando o utilizador carrega no botão de stop. Nesse momento, o programa irá guardar os dados num ficheiro CSV (*coma separated value*), após autorização do utilizador. A figura 3.10 é um fluxograma relativo ao programa. Durante a execução do programa a informação relativa à energia, à corrente, à tensão e à potência encontram-se atualizadas na janela da figura 3.11, nessa mesma janela também existe um gráfico relativo à variação da tensão.

O hardware para a realização das provas móveis dos módulos fotovoltaicos é composto por uma placa de aquisição cujo modelo é USB-1208FS-Plus da marca *Measurement Computing* do, pelos módulos fotovoltaicos apresentados no subcapítulo 3.1.1 e por um divisor de tensão. Existe a necessidade de usar um divisor de tensão porque um dos módulos fotovoltaicos utilizados atinge tensões na casa das duas dezenas de volts, valor superior à tensão máxima suportada pela placa (10 V). Na constituição do divisor de tensão são usadas duas resistências que estão várias ordens de grandeza acima da resistência de carga ótima. A resistência R1 é

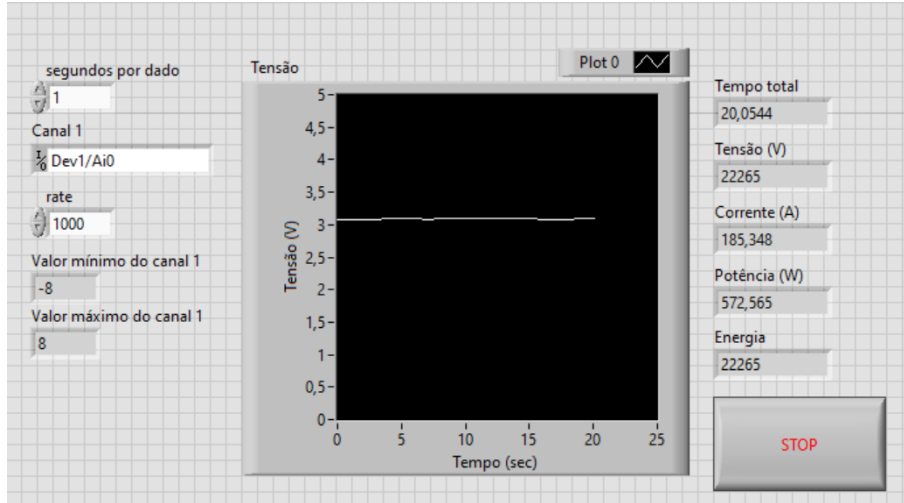


FIGURA 3.11: LabView Frontend

de $11.9 \text{ k}\Omega$ e a resistência R_2 é de $2,2 \text{ k}\Omega$, o valor destas duas resistências permite reduzir a tensão gerada pelo painel solar em aproximadamente 6,4 vezes.

$$V_{\text{saida}} = V_{\text{entrada}} \times \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$V_{\text{saida}} = V_{\text{entrada}} \times \frac{2,2 \text{ k}\Omega}{11.9 \text{ k}\Omega + 2.2 \text{ k}\Omega} = 0,156 V_{\text{entrada}}$$

Esta redução fará com que a tensão lida pela placa não ultrapasse o seu limite. A figura 3.12 contém o circuito do divisor de tensão montado com o seu respetivo esquema. No esquema da figura 3.12 VG1 representa o painel fotovoltaico, R3 representa a resistência definida no subcapítulo 3.1.1, R1 e R2 representam as resistências do divisor de tensão e VM1 é um voltímetro que representa a placa de aquisição de dados.

3.2 Aparelho Piezoelétrico

O objetivo do aparelho piezoelétrico é manter a produção de energia elétrica quando não é possível produzir através de energia solar.

Para o desenvolvimento desta dissertação de mestrado foi usado o aparelho desenvolvido em Vitorino [2022]. Como este aparelho foi desenvolvido no mesmo estabelecimento de ensino em que esta dissertação de mestrado está a ser desenvolvida, tivemos acesso ao aparelho desenvolvido pelo autor e foi possível realizar os mesmos testes que foram feitos inicialmente, bem como outros testes de interesse.

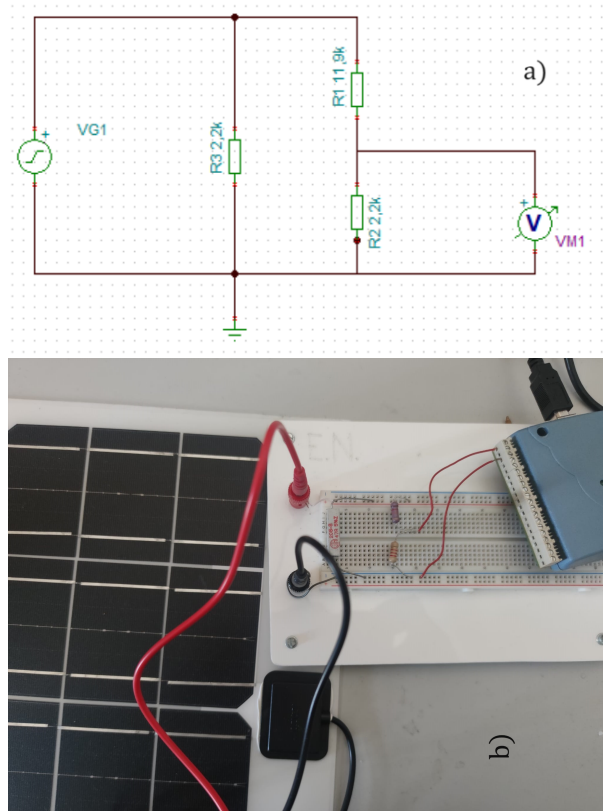


FIGURA 3.12: a) Esquema do divisor de tensão, b) Divisor de tensão

Os aparelhos piezoelétricos são caracterizados por picos de tensão a cada passo. Como podemos analisar na figura [3.13](#), a forma de onda está dividida em duas partes. Na primeira parte temos um pico de tensão positivo que coincide com o momento em que o pé entra em contacto com o solo e existe a compressão do material piezoelétrico. A segunda parte da onda corresponde a um pico de tensão negativo é o momento em que o pé levanta do solo e existe uma descompressão do material. Na figura [3.13](#) temos a forma de onda de um passo. Em Vitorino [2022](#) um passo gerou $703,36 \mu J$ de energia e uma potência média de $400,66 \mu W$. Nos novos ensaios realizados nesta dissertação foram gerados $811,93 \mu J$ de energia e uma potência de $405,96 \mu W$, verificando-se um aumento de 15 % na energia e um aumento de 1,3 % na potência. Este aumento deve-se à diferença de peso entre os utilizadores usados nos dois trabalhos.

A forma de onda da figura [3.13](#) foi obtida através de uma função de Matlab, que recebe um ficheiro CSV e faz a conversão para gráfico.

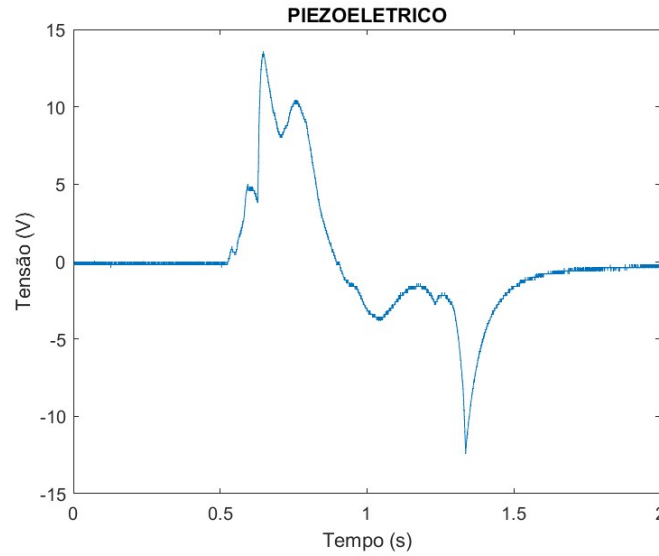


FIGURA 3.13: Forma de onda de um passo.

3.3 Aparelho de indução magnética

O aparelho de indução magnética vem ajudar na produção de energia elétrica para situações em que não é possível produzir energia elétrica através do sol. Estas situações são períodos noturnos e alturas de céu nublado.

Para o projeto do aparelho de indução, estudei a constituição de um aparelho eletromagnético. Este aparelho consiste num íman e numa bobine com núcleo de ar.

A equação 3.1 permite encontrar a indutância da bobine. Nesta equação L representa a indutância da bobine em henries (H), N é o número de espiras da bobine, μ representa a permeabilidade magnética do meio em henries por metro (H/m), A representa a área da secção transversal da bobine em metros quadrados (m^2)

$$L = \frac{N^2 * \mu * A}{l} \quad (3.1)$$

A equação 3.2 permite calcular a força eletromotriz (tensão) da bobine. Na equação E representa a força eletromotriz em volts (V), N é o número de espiras, Φ representa o fluxo magnético em webers (Wb) e t o tempo em segundos (s).

$$E = -N * \frac{d\Phi}{dt} \quad (3.2)$$

A equação 3.3 permite calcular a corrente. Na equação E representa a tensão obtida na equação 2 e R representa o valor da resistência da carga ligada

aos terminais da bobine, o valor desta resistência vem em Ω . A tensão induzida na bobine alimenta a resistência de carga (R).

$$I = E * R \quad (3.3)$$

A equação utilizada para o cálculo da energia é a equação (3.4). Nesta equação W representa a energia produzida em joules (J), L representa a indutância da bobine em henries (H) e I representa a corrente em amperes (A).

$$W = \frac{1}{2} * LI^2 \quad (3.4)$$

Através da análise das quatro equações apresentadas anteriormente podemos perceber que a energia produzida está relacionada à indutância e à corrente. Também é possível perceber que o número de espiras aumenta a indutância e a força eletromotriz e por consequência a energia produzida. A área da secção transversal do íman e o tempo são inversamente proporcionais à indutância e à força eletromotriz, respetivamente, e por consequência diminuem a produção de energia se estas duas variáveis aumentarem. Outro fator que é tido em conta é o fluxo magnético do material do íman escolhido.

O fluxo magnético é a medida de campo magnético que passa por uma dada superfície. O fluxo magnético é um dos parâmetros usados para o estudo de indução magnética, o estudo da lei de Faraday e o estudo do comportamento magnético de diversos materiais. Os imanes ferromagnéticos são os imanes que, normalmente, apresentam maior fluxo magnético. Os elementos presentes em imanes ferromagnéticos são: Ferro (Fe), Níquel (Ni), Cobalto (Co), entre outros.

Os imanes de Neodímio Ferro Boro (NdFeB) são imanes compostos por ferro, boro e neodímio. Estes imanes são compostos por terras raras e são conhecidos pelo seu alto fluxo magnético, fazendo com que sejam um dos imanes mais fortes, disponíveis no mercado. Um dos parâmetros que caracteriza um íman é a sua magnetização. Este parâmetro é composto por uma letra e um número. Os imanes adquiridos são todos classificados pela letra "N", isto quer dizer que podemos trabalhar com os imanes a temperaturas até 80 °C. O número corresponde à máxima energia do íman em MGOe (*Mega Gauss Oersted*). Em teoria quanto maior o número maior a energia do íman. Os imanes N52 apresentam uma energia máxima 20% superior à dos imanes N42, mas o seu preço de aquisição no mercado

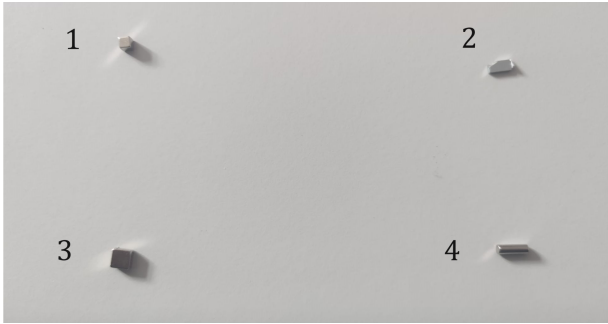


FIGURA 3.14: Imanes

acaba por ser duas vezes superior. Por este motivo não se justifica a aquisição de imanes de magnetização N52.

Após este estudo, o projeto do aparelho de indução magnética passará por um grande número de espiras e um íman de NdFeB. Foram adquiridos os quatro imanes da figura 3.14. Foram adquiridos três imanes de magnetização N42 e um de N45. A tabela 3.1 contem as informações relativas a cada íman incluindo as suas dimensões.

TABELA 3.1: Características dos ímanes. Retiradas de Group 2024

Íman	Forma	Tamanho	Magnetização	Força aproximada	Peso
1	Cubo	5*5*5 mm	N42	1,1 kg	0,95 g
2	Prisma retangular	5 mm	N42	0,9 kg	0,73 g
3	Prisma retangular	8*8*4 mm	N45	1,5 kg	1,9 g
4	Cilindro	diâmetro: 4 mm altura: 12,5 mm	N42	0,6 kg	1,2 g

Para calcularmos o fluxo magnético de cada íman iremos usar a equação 5. Na equação 5, Φ representa o fluxo magnético em webers (Wb), B representa a densidade do fluxo magnético em teslas (T) e A representa a área perpendicular ao campo magnético em metros quadrados (m^2). Os ímanes de NdFeB apresentam uma densidade de fluxo magnético de aproximadamente 1,2T (Tan, Brewer e Guise 2012).

$$\Phi = B * A * \cos \theta \tag{3.5}$$



FIGURA 3.15: Bobine com 100 espiras

Através da equação 3.2 e 3.5 obtemos a equação 3.6, através dessa equação iremos calcular o pico de tensão para cada um dos ímanes. θ vai ser igual a $\frac{\pi}{2}$, este valor fará com que o valor obtido na tensão seja o pico de tensão.

$$E = N * B * A * \sin \theta \quad (3.6)$$

Após o cálculo do fluxo magnético para cada íman foi construída uma bobine com 100 espiras, as espiras foram enroladas num tubo de plástico, os ímanes iram passar por dentro do tubo produzindo tensão. As espiras foram presas ao tubo com fita cola isolante (Figura 3.15). Assumindo que o tempo é de 1 segundo para todos os ímanes é possível calcular a força eletromotriz, ou tensão. Em seguida foi medida a tensão em circuito aberto de forma a confirmar os cálculos efetuados.

TABELA 3.2: Cálculos efetuados.

Íman	Área (m^2)	Fluxo magnético (μWb)	Tensão de pico (mV) (100 espiras)	Tensão de pico (mV) (400 espiras)
1	$25 * 10^{-6}$	30	3	12
2	$9,5 * 10^{-6}$	11,4	1,14	4,56
3	$32 * 10^{-6}$	38,4	3,84	15,36
4	$12,56 * 10^{-6}$	15,07	1,51	6,04

É possível prever que o íman 3 seja o íman que apresenta um pico tensão maior.

Através da análise do gráfico da figura 3.16 é possível concluir que existe uma discrepância entre os cálculos efetuados no início deste subcapítulo e os valores

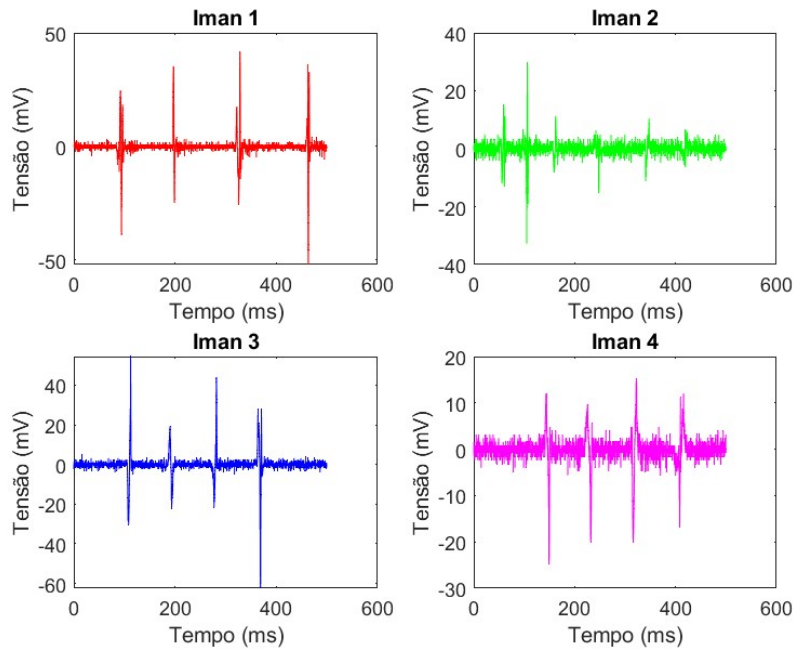


FIGURA 3.16: Gráfico individual de cada íman

medidos através do osciloscópio. Os picos de tensão dos gráficos são aproximadamente vinte vezes maiores que os valores calculados. Esta discrepância de valores deve-se ao facto de ao efetuar os cálculos assumiu-se que os ímanes demorariam um segundo a atravessar o tubo, quando na realidade o tempo é muito inferior.

Na figura 3.17 são os quatro gráficos da figura 3.16 sobrepostos. Através da análise da figura 3.17 é possível concluir que o íman 3 é o que apresenta o maior pico de tensão, quase 60 mV. Após esta análise vai ser usado o íman 3 para o desenvolvimento deste protótipo. Apesar do íman 1 apresentar picos de tensão maior que os ímanes 2 e 4, o valor dos picos de tensão não justificam a sua utilização no desenvolvimento deste protótipo.

Após o estudo e análise destes resultados aumentou-se o número de espiras na bobine para 400 e repetiu-se os mesmos testes de forma quase semelhante, a principal diferença é que os ímanes só passaram uma vez na bobine, também se realizou uma análise da tensão criada quando a bobine é colocada em série com uma resistência de 10 kΩ, a tensão criada foi medida com uma ponta de prova de osciloscópio com uma atenuação de 10x.

Através da análise dos gráficos da figura 3.18 é possível concluir que os ímanes 1 e 3 continuam a ser os ímanes que criam uma tensão maior. Analisando a diferença de valores entre os cálculos efetuados e os gráficos das figuras 3.17 e 3.18

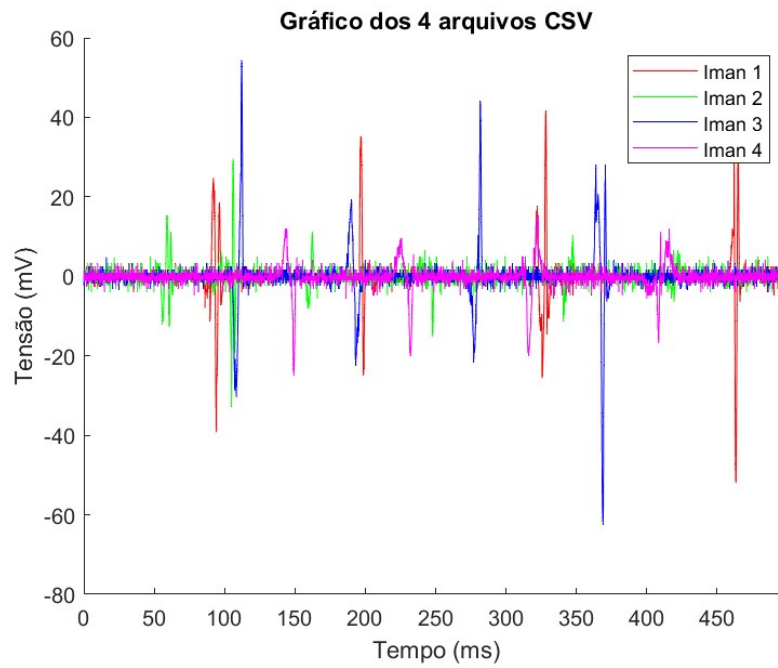


FIGURA 3.17: Gráfico da tensão dos 4 ímanes

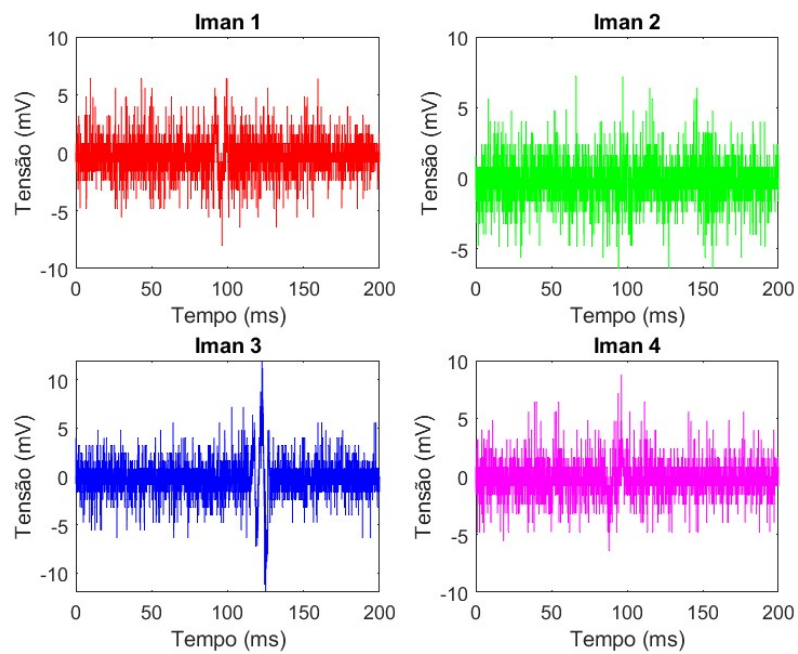


FIGURA 3.18: Gráfico individual de cada íman conectado a uma resistência de $10\text{ k}\Omega$

conclui-se que o aumento do número de espiras faz aumentar o valor do pico de tensão. A diferença entre o circuito aberto e o circuito com uma resistência de $10\text{ k}\Omega$ faz com que os valores medidos pelo osciloscópio sejam mais aproximados dos valores calculados.

Após esta análise vai ser usado o íman 3 para o desenvolvimento deste protótipo. O íman 3 apresenta maiores picos de tensão que os restantes ímanes, o íman 1 também apresenta picos substancialmente maiores que os picos de tensão dos ímanes 2 e 4, mas não é grande o suficiente para ser utilizado no desenvolvimento desta dissertação de mestrado.

Este estudo tal como o estudo do subcapítulo [3.2](#), demonstram a necessidade de usar um retificador de onda AC/DC e de um conversor DC/DC de forma a ser possível armazenar a energia.

Capítulo 4

Testes realizados e análise de resultados

Este capítulo apresenta os testes realizados e os resultados alcançados. A descrição dos testes realizados será feita como um todo e a análise de resultados será feita separadamente. Neste capítulo também será realizado um estudo do condicionamento da energia produzida.

4.1 Testes realizados

Os testes realizados aos módulos fotovoltaicos consistiram em realizar dois ensaios com os dois módulos fotovoltaicos. Em cada ensaio realizou-se um dos dois percursos com a duração de aproximadamente 10 minutos, sendo um deles na mata de forma a ser mais aproximado da realidade. Os percursos foram gravados através da aplicação Strava. O primeiro percurso consistiu em percorrer a pista de atletismo da Escola Naval (EN) e o segundo percurso foi realizado na mata da Base Naval de Lisboa (BNL). No decorrer da realização dos testes o maior módulo fotovoltaico foi colocado na parte de trás da mochila e o mais pequeno foi colocado por cima do ombro como demonstra a figura [4.1](#).

Para a realização de testes ao aparelho piezoelétrico foi necessário alterar o protótipo existente, passando o protótipo a estar integrado numa bota de combate. No protótipo inicial o gerador piezoelétrico estava integrado numa bota de interno.

O aparelho de indução magnética foi testado posteriormente em três posições diferentes do corpo humano durante a caminhada. O aparelho foi testado no pulso, no tornozelo e no joelho. Desta forma foi possível perceber o local do corpo humano onde a energia produzida é maior. O aparelho foi colado ao corpo e foi medida a tensão criada durante 100 segundos de caminhada numa passadeira.



FIGURA 4.1: Posição dos painéis fotovoltaicos. 1 - Costas, 2 - Ombro

4.2 Análise de resultados

O subcapítulo da análise de resultados vai estar dividido em seis partes. As três primeiras partes são relativas aos testes feitos aos módulos fotovoltaicos. Na primeira parte foi medida a potência ao longo de tempo num percurso realizado na pista de atletismo da Escola Naval e a segunda parte relativa a um percurso realizado na mata da Base Naval de Lisboa (BNL).

4.2.1 Pista de Atletismo da Escola Naval

Nesta secção vão ser descritos os testes realizados a ambos os painéis fotovoltaicos na pista de atletismo, a análise dos resultados obtidos e uma comparação entre os dois painéis.

Os testes aos painéis foram realizados no período da manhã do dia 06 de Maio de 2024. Nesse dia o céu encontrava-se parcialmente encoberto, cerca de 35 %, sem grandes alterações no regime de nuvens (Fig.4.2). O percurso realizado foi o percurso da figura 4.3, que pode ser dividido em quatro partes como demonstra a figura. A figura 4.3 é composta por duas imagens, a imagem da esquerda demonstra a localização da pista dentro da Base Naval de Lisboa e a imagem da direita tem marcado o percurso efetuado na pista de atletismo. Nas duas imagens existe um

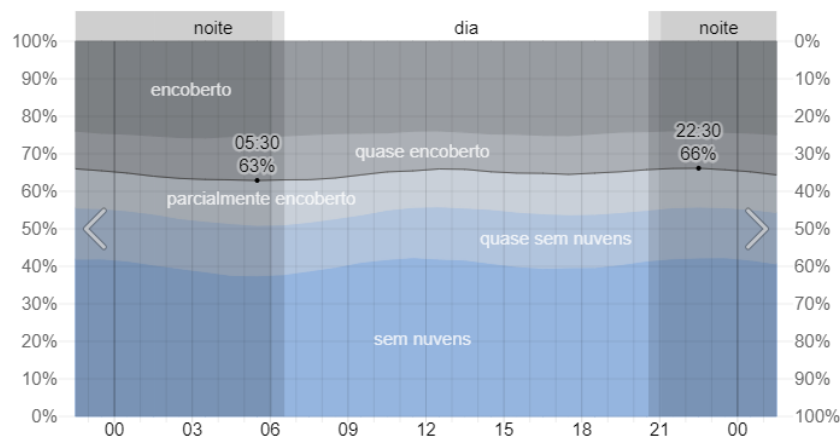


FIGURA 4.2: Cobertura de nuvens a 06 de Maio.

Fonte: Weatherspark [2024](#)

ponto com uma bandeira axadrezada que marca o final do percurso e outro ponto que marca o início do percurso. Durante a realização dos testes o sol estava a incidir da zona D para a zona B. A existência de árvores ao redor do percurso faz com que existam algumas sombras na zona D e na zona A.

Painel Fotovoltaico grande

Após a realização do percurso foi possível contruir o gráfico da figura [4.4](#). O gráfico corresponde à potência gerada em função do tempo. Neste gráfico podemos observar quatro patamares, o patamar em que a potência é mais alta corresponde ao troço da pista onde o painel se encontrava virado para o sol, o troço A. Durante a passagem pelo troço C o painel que se encontrava nas costas do utilizador produz uma potência mínima, bastante próxima de zero. Os patamares intermédios são relativos às zonas B e D do percurso, estas zonas apresentam um valor médio de potência de 1,5W. A zona B apresenta um valor médio de potência maior que a zona D devido à presença de sombras na zona D. No decorrer dos testes a potência média foi de 2,732 W, sendo que a potência máxima atingida foi de 8,355 W. Durante a realização deste teste foram produzidos 1901,708 J (joules) ou 0,528 Wh (Watt-hora) de energia.

Painel Fotovoltaico pequeno

Após a realização do percurso da figura [4.3](#) foi possível contruir o gráfico da figura [4.5](#). O gráfico corresponde à potência gerada em função do tempo. Neste gráfico podemos observar quatro patamares, o patamar em que a potência é mais alta corresponde ao troço da pista onde o painel se encontrava virado para o sol, o

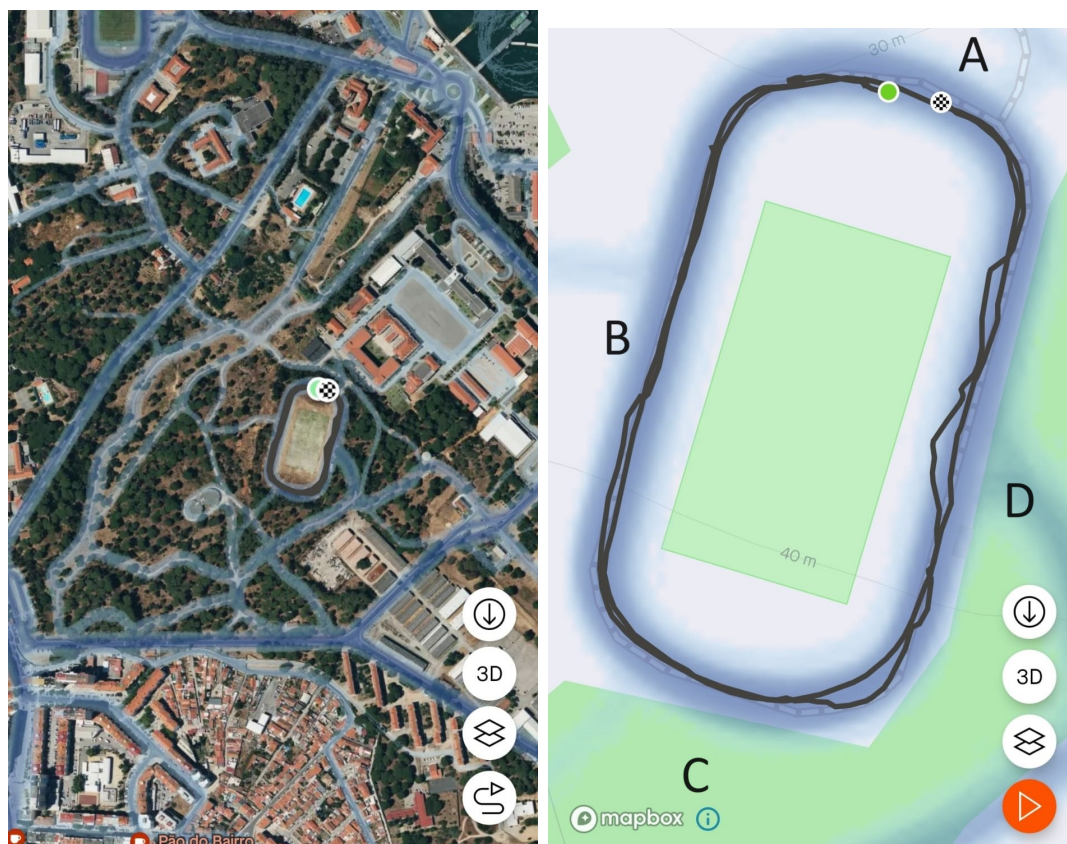


FIGURA 4.3: Percurso na Pista da Escola Naval

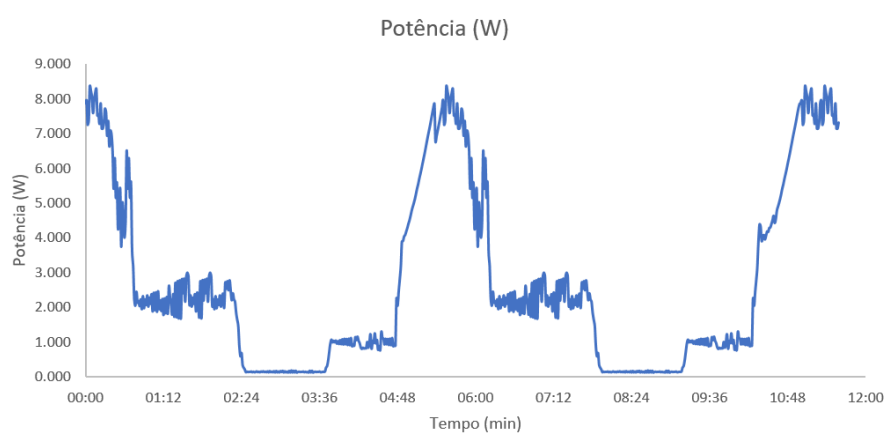


FIGURA 4.4: Gráfico da potência gerada pelo painel fotovoltaico grande



FIGURA 4.5: Gráfico da potência gerada pelo painel fotovoltaico pequeno

troço B. Durante a passagem pelo troço D a potência é menor em relação às restantes zonas, porque o painel se encontra na sombra da cabeça do utilizador. Os patamares intermédios são relativos às zonas A e C do percurso, estas zonas apresentam um valor médio de potência de 35 mW. No decorrer dos testes a potência média foi de 74 mW e a potência máxima atingida foi de 172 mW. Durante a realização deste teste foram produzidos 60,613 J ou 0,017 Wh de energia.

4.2.2 Comparação entre os dois painéis

O painel grande tem uma área de $0,35 \text{ m}^2$, enquanto o painel pequeno tem $0,0025 \text{ m}^2$. A área do painel pequeno representa 0,7 % da área do painel grande. Em teoria o painel pequeno apenas iria produzir 0,7 % da energia produzida pelo painel grande. O estudo do subcapítulo 4.2.1 revela que para as mesmas condições atmosféricas e de horário o painel pequeno produz 3,1 % da energia produzida pelo painel grande. Como foi referido no subcapítulo 2.1.1 o material do painel solar influencia a sua eficiência. Através dos valores apresentados é possível assumir que, muito provavelmente, o material que compõe o módulo fotovoltaico mais pequeno é mais eficiente do que o material do módulo fotovoltaico maior.

O painel pequeno acaba a produzir uma percentagem de energia maior que a esperada devido à diferença de posição em que os painéis se encontravam durante a realização no percurso. A colocação do painel no ombro demonstra um aumento na produção de energia uma vez que foi produzida quase 5 vezes mais energia que a esperada. A colocação de um painel em cada ombro iria fazer com que o valor

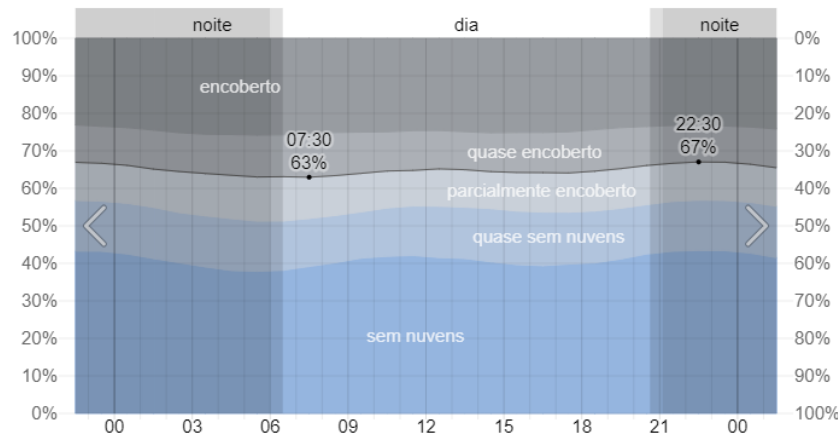


FIGURA 4.6: Cobertura de nuvens a 10 de Maio.

Fonte: Weatherspark [2024](#)

de potência medido fosse sempre o valor obtido na zona B do percurso na pista de atletismo da Escola Naval, porque quando um painel está virado para o sol o outro painel está tapado pela sombra do utilizador. Nas zonas de transição somam-se os valores dos dois painéis obtendo um valor bastante perto dos valores máximos obtidos.

4.2.3 Percurso na mata com painel pequeno

Nesta secção vai estar descrito os testes realizados ao painel fotovoltaico mais pequeno na mata das BNL a diferentes horários. Será feita a análise dos resultados obtidos e uma comparação entre os dois horários.

Os testes ao painel mais pequeno foram realizados no dia 10 de Maio de 2024. Foi realizado um teste às 12:00, a realização do teste a esta hora representa o meio-dia solar, neste horário o sol incide perpendicularmente na superfície da terra o que aumenta a produção de energia de um painel solar. Em seguida foi realizado um teste ao painel no mesmo dia às 19:30, já perto do pôr-do-sol com o objetivo de perceber a energia que podia ser gerada com pouca luz.

Nesse dia o céu encontrava-se parcialmente encoberto, cerca de 35 %, sem grandes alterações no regime de nuvens (Fig. [4.6](#)). O percurso realizado foi o percurso da figura [4.7](#). A figura [4.7](#) é composta por duas imagens a imagem da esquerda é uma imagem satélite onde é possível verificar os locais com mais e menos árvores e a imagem da direita é uma imagem padrão onde é possível ver o caminho com mais exatidão. O caminho está marcado a laranja e preto por predefinição da aplicação utilizada. Este percurso é uma aproximação à realidade das operações terrestres.

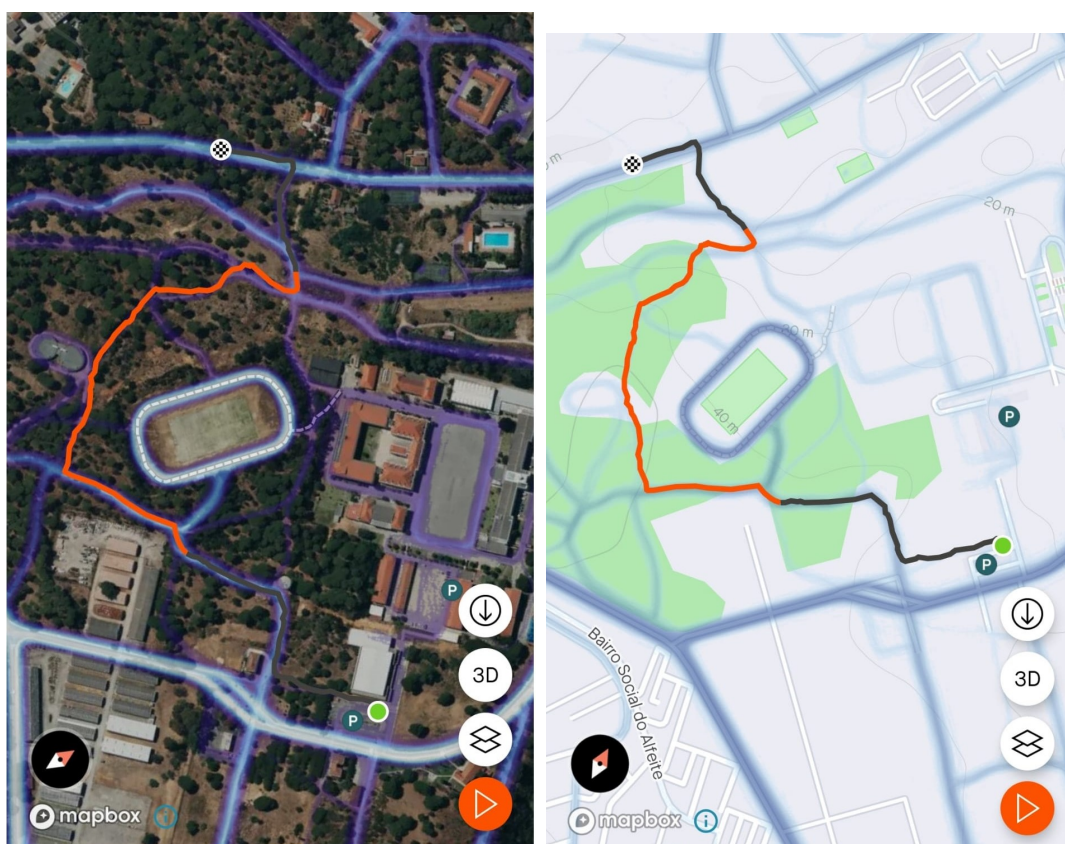


FIGURA 4.7: Percurso na mata da BNL

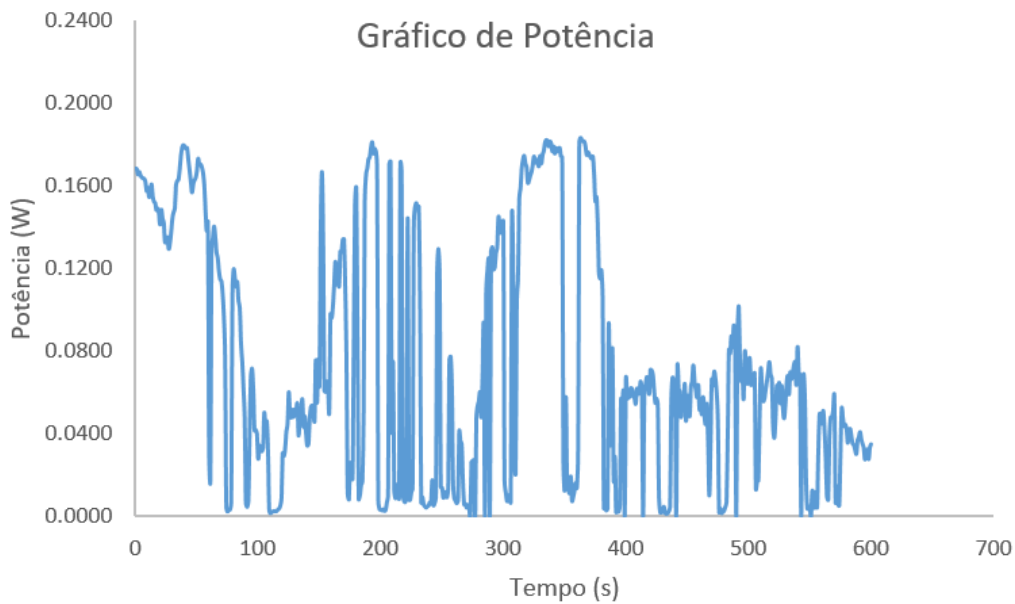


FIGURA 4.8: Gráfico de Potência ao longo do tempo (painel pequeno, 10 de maio, 12:00)

Painel Fotovoltaico às 12:00

Após a realização do percurso foi possível contruir o gráfico da figura [4.8](#), que corresponde à potência gerada em função do tempo. Existem vários momentos em que se dá uma queda na potência, esta queda na potência deve-se à passagem de locais com sombra. Também é possível observar alguns patamares. Cada mudança de patamar representa uma mudança de direção ou a passagem por uma clareira. No decorrer deste teste a potência média foi de 74 mW e a potência máxima atingida foi de 183 mW. Durante a realização deste teste foram produzidos 66,853 J ou 0,019 Wh de energia.

Painel Fotovoltaico às 19:30

Após a realização do percurso foi possível contruir o gráfico da figura [4.9](#) que corresponde à potência gerada em função do tempo. O valor da potência apresenta-se quase sempre constante devido à baixa luminosidade. No entanto existem momentos em que há picos de potência, estes picos de potência deve-se à passagem de locais sem sombra, as quedas de potência representam locais de sombra. No decorrer destes testes a potência média foi de 2,6 mW e a potência máxima atingida foi de 5,7 mW. Durante a realização deste teste foram produzidos 2,642 J ou 0,733 mWh de energia.

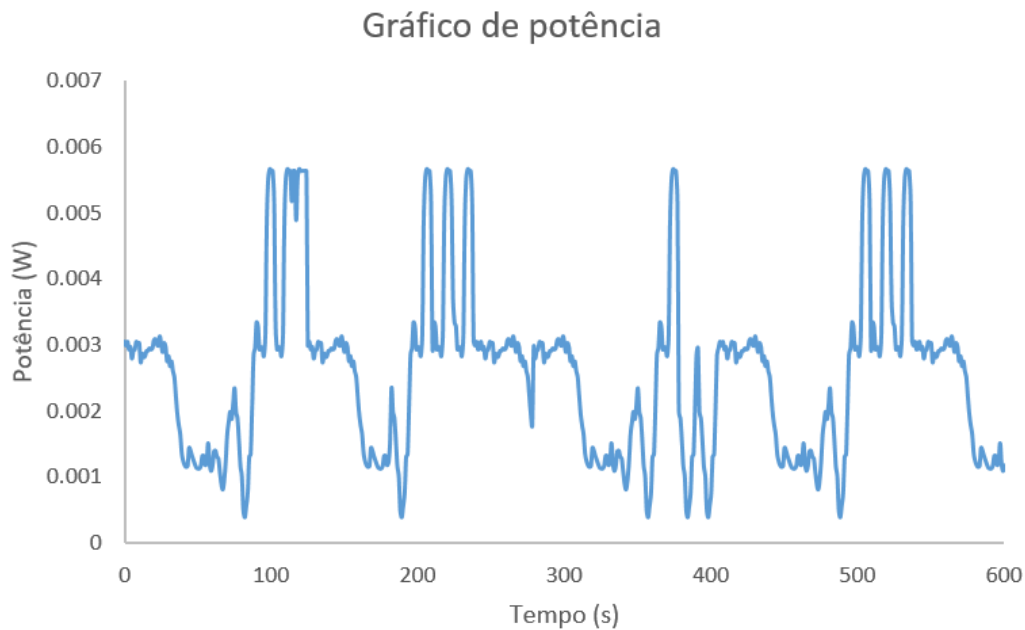


FIGURA 4.9: Gráfico de Potência ao longo do tempo (painel pequeno, 10 de maio, 19:30)

Comparação entre os dois horários

Após estes dois estudos realizados conclui-se que o meio-dia solar é a altura do dia em que é possível produzir mais energia através do painel solar, como esperado. Também é possível concluir que é possível produzir energia solar durante os crepúsculos.

Concluindo, o meio-dia solar é a altura do dia onde é produzida mais energia e no crepúsculo é a altura do dia onde é produzida menos energia.

TABELA 4.1: Resultados dos ensaios com os painéis solares.

Teste	Painel Foto-voltaico	Local	Energia (J)/(Wh)	Potência média (W)
1	Grande	Pista de Atletismo	1901, 708 / 0,528	2,732
2	Pequeno	Pista de Atletismo	60,613 / 0,017	0,074
3	Pequeno	Mata	66,853 / 0,019	0,074
4	Pequeno	Mata	2,642 / 0,733 * 10 ⁻³	0,003

4.2.4 Bota com piezoelétricos

A bota com piezoelétrico desenvolvida em Vitorino [2022](#) também foi alvo de testes nesta dissertação de mestrado.

Foram feitos três ensaios em que a bota foi calçada pelo ASPOF FZ Basílio Martins que caminhou durante 200 segundos na passadeira a uma velocidade de 4 km/h . O desejável era que estes ensaios fossem realizados a uma velocidade de 5 km/h , que é a velocidade média a que um ser humano caminha, mas esta velocidade coloca em risco a integridade do protótipo.

Durante os três ensaios foram medidos três valores no circuito eletrónico de condicionamento de sinal. Os três pinos são Vin, Vcc e EN. O Vin representa a tensão à entrada do circuito. Esta tensão é produzida pelos piezoelétricos e entra no circuito após passar por um circuito retificador de sinal. O Vcc representa a tensão à saída do circuito. E EN serve para indicar se o circuito já se encontra à tensão de saída. No circuito desenvolvido em Vitorino [2022] é possível escolher a tensão à saída do circuito. Para este trabalho a tensão escolhida foi de 3,3 V. Esta escolha deve-se ao facto de este ser o valor mais aproximado à tensão de alimentação dos equipamentos usados pelos Fuzileiros da Marinha Portuguesa. Durante a realização dos testes também esteve ligado um condensador aos terminais Vcc de forma que fosse possível calcular a quantidade de energia produzida que foi possível acumular.

Durante a realização dos ensaios o circuito demorou aproximadamente 20 segundos a atingir a tensão de alimentação, como é possível ver na figura. Durante os ensaios a energia produzida foi de 81,58 mJ e a potência média foi de 407,9 μW .

Em Vitorino [2022] a potência média do protótipo foi de 398,6 μW , nesta dissertação de mestrado foi possível aumentar a potência média para 407,9 μW , o que representa um aumento de 2 %. Este aumento pode ser justificado com o facto do autor não ter testado o protótipo numa plataforma fixa sem nunca ter passado para a caminhada. Outra justificação pode ser o aumento do peso do individuo usado nestes testes.

TABELA 4.2: Testes à bota com Piezoelétricos.

Teste	Energia produzida (mJ)	Potência média (μW)
1	79,50	397,5
2	84,69	423,4
3	80,55	402,8

4.2.5 Bobine

Este subcapítulo está dividido em três partes. As três primeiras partes são relativas à definição de uma resistência de carga que permita criar o máximo de energia possível e que apresenta a maior potência de pico. A terceira parte são os testes realizados à bobine e a análise dos resultados obtidos.

Resistência de carga - Parte 1

Este subcapítulo é relativo à resistência de carga ótima para a produção de energia por parte do gerador eletromagnético.

Inicialmente foram escolhidas 16 no valor de 680 Ω , 985 Ω , 5.58 $k\Omega$, 10 $k\Omega$, 11.9 $k\Omega$, 26.9 $k\Omega$, 27 $k\Omega$, 38 $k\Omega$, 46.5 $k\Omega$, 55.7 $k\Omega$, 67.2 $k\Omega$, 82.1 $k\Omega$, 99 $k\Omega$, 120,8 $k\Omega$, 149 $k\Omega$ e 151 $k\Omega$. Em seguida estas resistências foram colocadas em série com a bobine construída no capítulo 3. Para cada resistência, fez-se passar o íman por dentro da bobine e foi medida a tensão máxima criada e o correspondente valor de potência de pico.

Após a obtenção dos valores máximos criados por cada uma da resistência, calculou-se a potência gerada com cada uma dessas resistências. Para o cálculo da potência foi usada a equação (4.1). Na equação (4.1), P representa a potência em W, U representa a tensão de pico em V e R representa o valor da resistência em Ω .

$$P = \frac{U^2}{R} \quad (4.1)$$

Após o cálculo da potência para cada uma das resistências construiu-se a tabela [4.3](#).

Através da análise da tabela podemos concluir que as resistências de 985 Ω e de 5.58 $k\Omega$ são as resistências que apresentam o maior valor de potência, 52.629 e 50.580 nW respetivamente.

Através dos valores obtidos neste subcapítulo é possível avançar para o subcapítulo seguinte com um intervalo de valores de resistência menor que o inicial. Inicialmente o intervalo de resistências era de 680 Ω a 151 $k\Omega$, no fim deste subcapítulo o intervalo encontra-se reduzido a valores compreendidos entre 815 Ω e 5.57 $k\Omega$

TABELA 4.3: Valores de tensão e potência de pico para diferentes resistência - Parte 1

Resistência ($k\Omega$)	Tensão (V)	Potência (nW)
0.680	0.0024	8.4706
0.985	0.0072	52.629
5.580	0.0168	50.580
10.000	0.0120	14.400
11.900	0.0136	15.543
26.900	0.0136	6.8758
27.000	0.0112	4.6459
38.000	0.0128	4.3116
46.500	0.0200	8.6021
55.700	0.0096	1.6546
67.200	0.0176	4.6095
82.100	0.0072	0.631 43
99.000	0.0128	1.6549
120.800	0.0136	1.5311
149.000	0.0104	0.725 90
151.000	0.0128	1.0850

Resistência de carga - Parte 2

Neste subcapítulo vai ser definida a resistência a ser usada no protótipo. Após ter sido definido um intervalo de valores para a resistência ótima foram recolhidas todas as resistências do paiol de eletrônica do DCT-EN que se encontravam dentro do intervalo estabelecido. As resistências têm os seguintes valores: $815\ k\Omega$, $982\ k\Omega$, $993\ k\Omega$, $1.19\ k\Omega$, $1.51\ k\Omega$, $2.16\ k\Omega$, $2.68\ k\Omega$, $3.27\ k\Omega$, $3.29\ k\Omega$, $3.86\ k\Omega$, $4.66k\Omega$, $5.52\ k\Omega$, $5.57\ k\Omega$.

Seguindo os mesmos procedimentos do subcapítulo anterior foi contruída uma tabela com os valores de potência de pico e tensão para cada resistência.

Analisando o gráfico e a tabela é possível tirar conclusões bastante parecidas com as conclusões do subcapítulo anterior. Concluimos que a resistência ótima é de $815\ \Omega$, pois apresentou um valor de potência igual a $226.94\ nW$. Assim sendo, a resistência de carga a ser usada daqui para a frente será de $815\ \Omega$.

Resistência de carga - Parte 3

Para suportar esta decisão foi calculada a energia produzida por cada impulso. Foram medidos novos impulsos para as mesmas resistências, mas alterou-se a resolução do osciloscópio de $20\ mV/div$ para $5\ mV/div$. Em seguida, calculou-se

TABELA 4.4: Valores de Tensão e potência de pico para diferentes resistência - Parte 2

Resistência (k Ω)	Tensão (V)	Potência (nW)
0.680	0.0024	8.4706
0.815	0.0136	226.94
0.982	0.0120	146.64
0.985	0.0072	52.629
0.993	0.0120	145.01
1.190	0.0096	77.445
1.510	0.0080	42.384
2.160	0.0080	29.630
2.680	0.0128	61.134
3.270	0.0128	50.103
3.290	0.0064	12.450
3.860	0.0176	80.249
4.660	0.0192	79.107
5.520	0.0184	61.333
5.570	0.0168	50.671

a potência para cada instante e integrou-se ao longo do tempo de forma a obter a energia. A tabela [4.5](#) contém a energia e a potência medida para cada uma das resistências. A figura [4.10](#) contém a forma de onda retirada do osciloscópio para a resistência de 815 Ω , as restantes formas de onda estão no apêndice [C](#).

Testes em movimento

Após ter sido estabelecida a resistência de carga a ser utilizada no protótipo, vai ser definida a zona do corpo onde o protótipo deve ser instalado de forma a maximizar a produção de energia.

Para a realização deste teste a bobine vai ser instalada em três locais do corpo, o tornozelo, o pulso e o joelho, como demonstra a figura [4.11](#). Após a instalação do protótipo vais ser medida a tensão, três vezes em cada local ao longo de 100 segundos de caminhada numa passadeira à velocidade de 5 *km/h*. Os dados foram obtidos usando um período de amostragem de 10 milissegundos com a placa de aquisição usada anteriormente. Após a recolha das várias amostras vão ser analisados os resultados obtidos.

Após este estudo é possível concluir que a bobine ao ser colocada no pé é onde é produzida mais energia e onde a potência é maior. No pé a potência média registada é de 15,56 *nW* e a máxima potência atingida é de 16,83 *nW*. Os valores

TABELA 4.5: Valores de Energia e potência de pico para diferentes resistência

Resistência ($k\Omega$)	Energia (nJ)	Potência média (nW)
0.099	5.189	10.378
0.678	1.910	3.82
0.815	6.441	12.882
0.980	4.818	9.636
0.985	3.841	7.682
0.990	4.692	9.384
1.19	1.184	2.368
1.49	0.836	1.672
2.16	0.497	0.994
2.68	1.520	3.040
3.27	0.366	0.732
3.28	0.164	0.328
3.85	0.595	1.190
4.64	0.481	0.962
5.51	0.645	1.290
5.55	0.637	1.274
5.58	0.126	0.252
11.85	0.081	0.162
26.8	1.971	3.942
26.9	0.042	0.084
38.8	0.020	0.040
46.5	0.036	0.072
55.7	0.021	0.041
67.2	0.010	0.020
80.1	0.014	0.028
99.8	0.008	0.016
120.8	0.011	0.022
149	0.005	0.010
151	0.148	0.296

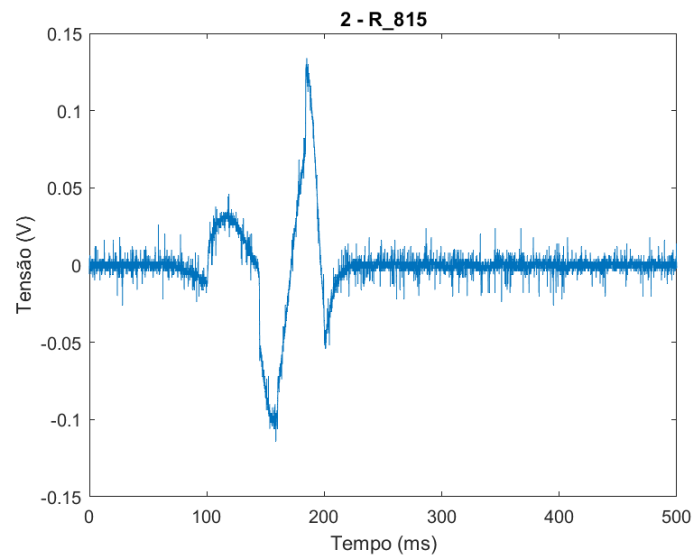


FIGURA 4.10: Forma de onda de um impulso da bobine ligada a uma resistência de 815Ω



FIGURA 4.11: Posição da bobine para a realização dos testes. 1- Joelho, 2 - Pulso, 3 - Pé

TABELA 4.6: Testes à Bobine.

Teste	Local do corpo	Energia produzida (μJ)	Potência média (nW)
1	Pulso	1,102	11,02
2	Pulso	1,208	12,08
3	Pulso	1,154	11,54
4	Pé	1,683	16,83
5	Pé	1,546	15,46
6	Pé	1,350	13,50
7	Joelho	1,104	11,04
8	Joelho	1,103	11,03
9	Joelho	1,276	12,76

de potência obtidos durante estes ensaios, estão bastante próximos dos valores de potência obtidos com apenas um impulso. Nos ensaios realizados com a bobine no pé o valor médio de potência é de 120 % em relação à potência de um impulso.

Bobine ligada ao circuito eletrônico

O circuito eletrônico está preparado para receber 3 entradas. Uma das entradas vai diretamente ao circuito eletrônico, enquanto as outras duas passam por um conversor AC/DC antes de entrar no circuito eletrônico. Para a realização dos ensaios a bobine vai ser ligada a um dos conversores AC/DC e seguirá para o circuito eletrônico. Nestes ensaios foram medidos três valores no circuito eletrônico de condicionamento de sinal. Os três pinos são Vin, Vcc e EN.

Foram feitos três ensaios em que a bobine foi ligada ao circuito eletrônico de condicionamento de sinal do subcapítulo [4.2.4](#). Nestes testes foram realizados 3 ensaios em que foi realizada uma caminhada na passarela a uma velocidade de 5 km/h durante 100 segundos. Nestes ensaios a bobine foi usada por mim.

Durante a realização dos ensaios o circuito demorou aproximadamente 25 segundos a atingir a tensão de alimentação. Durante os ensaios a energia média produzida foi de 0,035 J e a potência média foi de 175 μW .

Após a realização deste estudo é possível prever que se o circuito tivesse três bobines conectadas a produção de energia seria maior, visto que o circuito está preparado para três entradas e não uma.

TABELA 4.7: Testes à bobine ligada ao circuito elétrico.

Teste	Energia produzida (J)	Potência média (μW)
1	0,034	170
2	0,025	125
3	0,046	230

Capítulo 5

Considerações finais

O primeiro passo nesta dissertação de mestrado passou por se estudar várias formas de produção de energia elétrica através de energia desperdiçada pelo corpo humano e de energia do meio ambiente. Também se estudou formas de armazenar essa energia e de a converter de forma que seja possível armazená-la.

Seguidamente foi feita uma revisão teórica dessas formas de energia tendo existido uma revisão mais detalhada na energia solar, na piezoelectricidade e na indução magnética. Após esta revisão foram analisados trabalhos de vários investigadores que seriam pertinentes para o desenvolvimento desta dissertação de mestrado. Através do conhecimento adquirido desenvolveu-se um aparelho de indução magnética que juntamente com módulos fotovoltaicos e o gerador piezoelétrico desenvolvido em Vitorino [2022] formariam um gerador elétrico.

O protótipo ideal teria seis bobinas (três em cada pé), duas botas com piezoelétricos (uma para cada pé) e seis painéis fotovoltaicos (três para cada ombro).

5.1 Viabilidade da utilização do protótipo

Relativamente à viabilidade da utilização do protótipo para o carregamento dos equipamentos eletrónicos utilizados pelos Fuzileiros Portugueses foi retirada uma tabela com as suas especificações técnicas de Vitorino [2022], que está presente no anexo II. No anexo III também está presente uma tabela com a energia necessária para carregar as pilhas usadas pelos equipamentos. Dos equipamentos listados os que têm uma menor potência de utilização são as miras eletro-ópticas, o equipamento supressor de som e o localizador GPS (*global positioning system*), que utilizam pilhas potências médias de utilização são de $18,84 \mu W$, $4,5 mW$ e $35,71 mW$, respetivamente. Para uma bobina, uma bota e um módulo fotovoltaico os valores de potência

média são de 74,58 mW , 3,18 mW e 583 μW , quando existe muita luminosidade, pouca luminosidade e nenhuma luminosidade, respetivamente.

Através dos resultados apresentados percebe-se que o sistema desenvolvido produz uma potência média superior à potência média de utilização da mira eletro-ótica sempre. O sistema só atinge a potência de utilização do supressor de som e do GPS em situações de muita luminosidade.

TABELA 5.1: Duração do carregamento das diferentes pilhas em diferentes situações.

Luminosidade	Potência (mW)	Pilha	Energia (J)	Duração de carregamento (dias)
Muita	74,58	AA	13500	2,1
Muita	74,58	AAA	5400	0,8
Muita	74,58	CR123	16200	2,5
Muita	74,58	CR2032	2376	0,4
Pouca	3,18	AA	13500	49,2
Pouca	3,18	AAA	5400	19,7
Pouca	3,18	CR123	16200	60
Pouca	3,18	CR2032	2376	8,6
Nenhuma	0,583	AA	13500	286
Nenhuma	0,583	AAA	5400	107
Nenhuma	0,583	CR123	16200	321,6
Nenhuma	0,583	CR2032	2376	47,2

Através da análise da tabela 5.1 é possível observar que o tempo de carregamento das pilhas diminui em relação aos tempos apresentados em Vitorino 2022, sendo que a maior diminuição é quando existe muita luminosidade. Também é possível concluir que com mais que um painel fotovoltaico alguns equipamentos podem ser alimentados pelo sistema nos períodos de maior luminosidade.

5.2 Trabalhos futuros

Em seguida está uma lista daquilo que pode ser a continuação desta dissertação de mestrado.

- Estudo de tecnologias e equipamentos de aproveitamento de energias renováveis;
- Otimização do sistema desenvolvido;
- Criação de mais bobines e botas com piezoelétricos e realização de testes;

- Realização de testes em ambientes reais;
- Desenvolvimento de outros protótipos para a produção de energia;
- Desenvolvimento de um sistema que alimente os equipamentos.

Bibliografia

- Abubakar, Adamu Saidu e Mohd Najib Mohd Yasin (2022). «Harvesting Systems for RF Energy: Trends, Challenges, Techniques, and Tradeoffs». Em: *Sensors* 22.2990, pp. 1–26. DOI: [10.3390/s22082990](https://doi.org/10.3390/s22082990).
- Baptista, José, Nuno Pimenta, Manuel Cordeiro e A. Moura (2011). «Modelação de sistemas fotovoltaicos usando Matlab/Simulink». Em: *Proceedings of the 2011 10th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)*, pp. 1–4. DOI: [10.1109/EEEIC.2011.5874704](https://doi.org/10.1109/EEEIC.2011.5874704).
- Camacho, José (set. de 2010). «Uma Proposta de Técnica de Rastreamento de Máxima Potência de um Painel Fotovoltaico.» Em.
- Choi, Young-Man, Moon Gu Lee e Yongho Jeon (2017). «Wearable Biomechanical Energy Harvesting Technologies». Em: *Energies* 10.10. ISSN: 1996-1073. DOI: [10.3390/en10101483](https://doi.org/10.3390/en10101483).
- Donelan, Max, Qingguo Li, V Naing, Joaquin Hoffer, Douglas Weber e A.D. Kuo (mar. de 2008). «Biomechanical Energy Harvesting: Generating Electricity During Walking with Minimal User Effort». Em: *Science (New York, N.Y.)* 319, pp. 807–10. DOI: [10.1126/science.1149860](https://doi.org/10.1126/science.1149860).
- Dresselhaus, M. S., G. Chen, M. Y. Tang, R. G. Yang, H. Lee, D. Z. Wang, Z. F. Ren, J.-P. Fleurial e P. Gogna (2007). «New Directions for Low-Dimensional Thermoelectric Materials». Em: *Advanced Materials* 19.8, pp. 1043–1053. DOI: <https://doi.org/10.1002/adma.200600527>.
- Equivalent Circuit of Solar Cell* (2024). URL: <https://www.ossila.com/pages/equivalent-circuit-of-solar-cell> (acedido em 27/03/2024).
- Group, Mauser (2024). *Product Catalog*. Online: [https://mauser.pt/catalog/product_info.php?products_id\unhbox\voidb@x\bgroup\let\unhbox\voidb@x\setbox\@tempboxa\hbox{0\global\mathchardef\accent@spacefactor\spacefactor}\let\beginngroup\let\typeout\protect\beginngroup\def\MessageBreak{\(Font\)}\let\protect\immediate\write\m@ne{LaTeXFontInfo:\def{}oninputline156.}\endgroup\endgroup\relax\let\ignorespaces\relax\accent90\egroup\spacefactor\accent@spacefactor96-2606](https://mauser.pt/catalog/product_info.php?products_id\unhbox\voidb@x\bgroup\let\unhbox\voidb@x\setbox\@tempboxa\hbox{0\global\mathchardef\accent@spacefactor\spacefactor}\let\beginngroup\let\typeout\protect\beginngroup\def\MessageBreak{(Font)}\let\protect\immediate\write\m@ne{LaTeXFontInfo:\def{}oninputline156.}\endgroup\endgroup\relax\let\ignorespaces\relax\accent90\egroup\spacefactor\accent@spacefactor96-2606), Accessed: 2024-06-14.

- Hou, Jianwei, Shuo Qian, Xiaojuan Hou, Jie Zhang, Hui Wu, Yangyanhao Guo, Shuai Xian, Wenping Geng, Jiliang Mu, Jian He e Xiujuan Chou (2023). «A high-performance mini-generator with average power of 2W for human motion energy harvesting and wearable electronics applications». Em: *Energy Conversion and Management* 277, p. 116612. ISSN: 0196-8904. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.116612>.
- Ibrahim, Husam Hamid, Mandeep Jit Singh, Samir Salem Al-Bawri, Sura Khalil Ibrahim, Mohammad Tariqul Islam, Ahmed Alzamil e Md Shabiul Islam (2022). «Radio Frequency Energy Harvesting Technologies: A Comprehensive Review on Designing, Methodologies, and Potential Applications». Em: *Sensors* 22.11. ISSN: 1424-8220. DOI: [10.3390/s22114144](https://doi.org/10.3390/s22114144).
- Magnets, IMA (2024). *Indução Eletromagnética*. Online: [urlhttps://imamagnets.com/pt-pt/blog/inducacao-eletromagnetica/](https://imamagnets.com/pt-pt/blog/inducacao-eletromagnetica/). Accessed: 2024-06-14. URL: <https://imamagnets.com/pt-pt/blog/inducacao-eletromagnetica/>.
- Magno, Michele, Dario Kneubühler, Philipp Mayer e Luca Benini (2018). «Micro Kinetic Energy Harvesting for Autonomous Wearable Devices». Em: *2018 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM)*, pp. 105–110. DOI: [10.1109/SPEEDAM.2018.8445342](https://doi.org/10.1109/SPEEDAM.2018.8445342).
- Martendal, Caroline (2016). «Cristais piezoelétricos». Em: *Engenheiro de Materiais*. Acessado em: 28 de junho de 2024. URL: <https://engenheirodemateriais.com.br/2016/03/09/cristais-piezoelétricos/>.
- Martins, Tecnomia (2024). *PSM50WFL Paineis Fotovoltaicos Flexíveis Silício Monocristalino 50W 12V*. Online: <https://tecnomartins.pt/energia/energia-solar/painis-solares/16663-psm50wfl-painel-fotovoltaico-flexivel-silicio-monocristalino-50w-12v.html>. Accessed: 2024-06-14.
- Niu, Simiao e Zhong Lin Wang (2015). «Theoretical systems of triboelectric nanogenerators». Em: *Nano Energy* 14. Special issue on the 2nd International Conference on Nanogenerators and Piezotronics (NGPT 2014), pp. 161–192. ISSN: 2211-2855. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2014.11.034>.
- Pindado, Santiago, Javier Cubas e Carlos Manuel (jun. de 2014). «Explicit Expressions for Solar Panel Equivalent Circuit Parameters Based on Analytical Formulation and the Lambert W-Function». Em: *Energies* 7, pp. 4098–4115. DOI: [10.3390/en7074098](https://doi.org/10.3390/en7074098).

- Renato, Professor (2020). *O que é o Efeito Seebeck?* Acessado em: 28 de junho de 2024. URL: <https://eletroensino.blogspot.com/2020/03/o-que-e-o-efeito-seebeck.html?m=1>.
- RF Wireless World (2023). *Advantages and Disadvantages of RF Energy Harvesting*. Accessed: 2024-06-14. URL: <https://www.rfwireless-world.com/Terminology/Advantages-and-Disadvantages-of-RF-Energy-Harvesting.html>.
- Rome, Lawrence C., Louis Flynn, Evan M. Goldman e Taeseung D. Yoo (2005). «Generating Electricity While Walking with Loads». Em: *Science* 309.5741, pp. 1725–1728. DOI: [10.1126/science.1111063](https://doi.org/10.1126/science.1111063).
- Shepertycky, Michael e Qingguo Li (jun. de 2015). «Generating Electricity during Walking with a Lower Limb-Driven Energy Harvester: Targeting a Minimum User Effort». Em: *PLOS ONE* 10.6, pp. 1–16. DOI: [10.1371/journal.pone.0127635](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0127635).
- Snyder, G e Eric Toberer (mar. de 2008). «Complex Thermoelectric Materials». Em: *Nature materials* 7, pp. 105–14. DOI: [10.1038/nmat2090](https://doi.org/10.1038/nmat2090).
- Tan, Joseph, Samuel Brewer e Nicholas Guise (fev. de 2012). «Penning traps with unitary architecture for storage of highly charged ions». Em: *The Review of scientific instruments* 83, p. 023103. DOI: [10.1063/1.3685246](https://doi.org/10.1063/1.3685246).
- Tran, Le-Giang, Hyouk-Kyu Cha e Woo-Tae Park (2017). «RF power harvesting: a review on designing methodologies and applications». Em: *Micro and Nano Systems Letters* 5.1, p. 14. ISSN: 2213-9621. DOI: [10.1186/s40486-017-0051-0](https://doi.org/10.1186/s40486-017-0051-0).
- Tripathy, B.K. e J. Anuradha (out. de 2017). *Internet of Things(IoT): Technologies, Applications, Challenges and Solutions*. ISBN: 9781315269849.
- Turner, Kevin D. e Hiroshi Kobayashi (1999). «Internet firewall and server security system and method». US5889735A.
- Vitorino, João Paulo Amaro (2022). «Gerador elétrico portátil, Estudo da viabilidade de um gerador piezoelétrico para alimentação de equipamentos militares.» Em.
- Weatherspark (2024). *Condições meteorológicas características de Almada, Portugal em maio*. <https://pt.weatherspark.com/d/32050/5/10/Condi%C3%A7%C3%B5es-meteorol%C3%B3gicas-caracter%C3%ADsticas-de-Almada-Portugal-em-10-de-maio#Figures-CloudCover>. Accessed: 2024-06-14.
- Xie, Longhan, Jiehong Li, Siqu Cai e Xiaodong Li (2016). «Design and experiments of a self-charged power bank by harvesting sustainable human motion».

Em: *Advances in Mechanical Engineering* 8.5, p. 1687814016651371. DOI: [10.1177/1687814016651371](https://doi.org/10.1177/1687814016651371).

Zhu, Guang, Bai Peng, Jun Chen, Qingshen Jing e Zhong Lin Wang (2015). «Triboelectric nanogenerators as a new energy technology: From fundamentals, devices, to applications». Em: *Nano Energy* 14. Special issue on the 2nd International Conference on Nanogenerators and Piezotronics (NGPT 2014), pp. 126–138. ISSN: 2211-2855. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2014.11.050>.

Zimmermann, Hans (jan. de 2017). *Desenvolvimento de um piranômetro baseado em componentes semicondutores*. DOI: [10.13140/RG.2.2.19122.81606](https://doi.org/10.13140/RG.2.2.19122.81606).

Apêndice A

Valores das Curvas características

TABELA A.1: Curva Característica para 98k Lux - Painel Fotovoltaico 1

Resistência (Ω)	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência (W)
0.2	0.30	-1.71	-0.51
1.3	2.92	-1.69	-4.93
2.4	4.55	-1.65	-7.51
3.2	5.73	-1.63	-9.34
4.3	7.08	-1.61	-11.40
5.3	8.01	-1.55	-12.42
6.2	8.93	-1.50	-13.40
7.3	9.91	-1.42	-14.07
8.3	11.11	-1.35	-15.00
9.3	11.95	-1.31	-15.65
10.3	13.19	-1.29	-17.02
15.6	16.42	-1.11	-18.23
20.9	19.45	-0.91	-17.70
31.2	21.01	-0.67	-14.08
61.2	22.11	-0.36	-7.96
71.4	22.27	-0.31	-6.90
91.1	22.41	-0.25	-5.60
101.3	22.47	-0.22	-4.94
123.2	22.47	-0.18	-4.04

TABELA A.2: Curva Característica para 60k Lux - Painel Fotovoltaico 1

Resistência (Ω)	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência (W)
0.2	0	-0.99	0.00
1.3	1.73	-0.98	-1.70
2.4	2.35	-0.97	-2.28
3.2	2.92	-0.95	-2.77
4.3	3.54	-0.93	-3.29
5.3	4.06	-0.92	-3.74
6.2	4.48	-0.90	-4.03
7.3	4.98	-0.85	-4.23
8.3	5.41	-0.84	-4.54
9.3	5.75	-0.81	-4.66
10.3	6.06	-0.80	-4.85
15.6	8.34	-0.73	-6.09
20.9	10.41	-0.66	-6.87
31.2	11.01	-0.65	-7.16
61.2	21.17	-0.35	-7.31
71.4	21.89	-0.31	-6.70
91.1	22.35	-0.25	-5.48
101.3	22.82	-0.23	-5.25
123.2	23.21	-0.19	-4.38

TABELA A.3: Curva Característica para: 32k Lux - Painei Fotovol-
taico 1

Resistência (Ω)	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência (W)
0.2	0	-0.60	0.00
1.3	1.73	-0.58	-1.00
2.4	2.35	-0.55	-1.29
3.2	2.92	-0.51	-1.50
4.3	3.54	-0.48	-1.70
5.3	4.06	-0.44	-1.79
6.2	4.48	-0.41	-1.84
7.3	4.98	-0.39	-1.97
8.3	5.41	-0.38	-2.08
9.3	5.75	-0.38	-2.17
10.3	6.06	-0.38	-2.28
15.6	8.85	-0.35	-3.10
20.9	10.41	-0.33	-3.45
31.2	11.01	-0.32	-3.52
61.2	21.17	-0.26	-5.47
71.4	21.89	-0.24	-5.25
91.1	22.35	-0.22	-4.88
101.3	22.72	-0.20	-4.54
123.2	23.21	-0.18	-4.25

TABELA A.4: Curva Característica para: 70k Luz - Painei Fotovol-
taico 2

Resistência (Ω)	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência (W)
0.2	0.23	-0.315	-0.072
1.3	0.39	-0.300	-0.117
2.2	0.53	-0.255	-0.135
3.3	0.65	-0.230	-0.150
4.3	0.81	-0.195	-0.158
5.3	0.92	-0.174	-0.160
6.2	0.97	-0.156	-0.152
7.3	1.02	-0.140	-0.143
8.4	1.04	-0.124	-0.129
9.3	1.05	-0.113	-0.119
10.3	1.08	-0.105	-0.113

TABELA A.5: Curva Característica para: 50k Lux - Painel Fotovoltaico 2

Resistência (Ω)	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência (W)
0.2	0.20	-0.300	-0.060
1.3	0.37	-0.285	-0.105
2.2	0.48	-0.240	-0.115
3.3	0.59	-0.205	-0.121
4.3	0.72	-0.180	-0.130
5.3	0.86	-0.162	-0.140
6.2	0.91	-0.147	-0.134
7.3	0.95	-0.130	-0.124
8.4	0.99	-0.118	-0.117
9.3	1.02	-0.110	-0.112
10.3	1.05	-0.102	-0.107

TABELA A.6: Curva Característica para: 20k Lux - Painel Fotovoltaico 2

Resistência (Ω)	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência (W)
0.2	0.06	-0.100	-0.006
1.3	0.12	-0.092	-0.011
2.2	0.17	-0.077	-0.013
3.3	0.20	-0.061	-0.012
4.3	0.25	-0.058	-0.015
5.3	0.27	-0.051	-0.014
6.2	0.31	-0.050	-0.016
7.3	0.36	-0.049	-0.018
8.4	0.39	-0.046	-0.018
9.3	0.41	-0.044	-0.018
10.3	0.46	-0.045	-0.021

Apêndice B

Programa de Labview

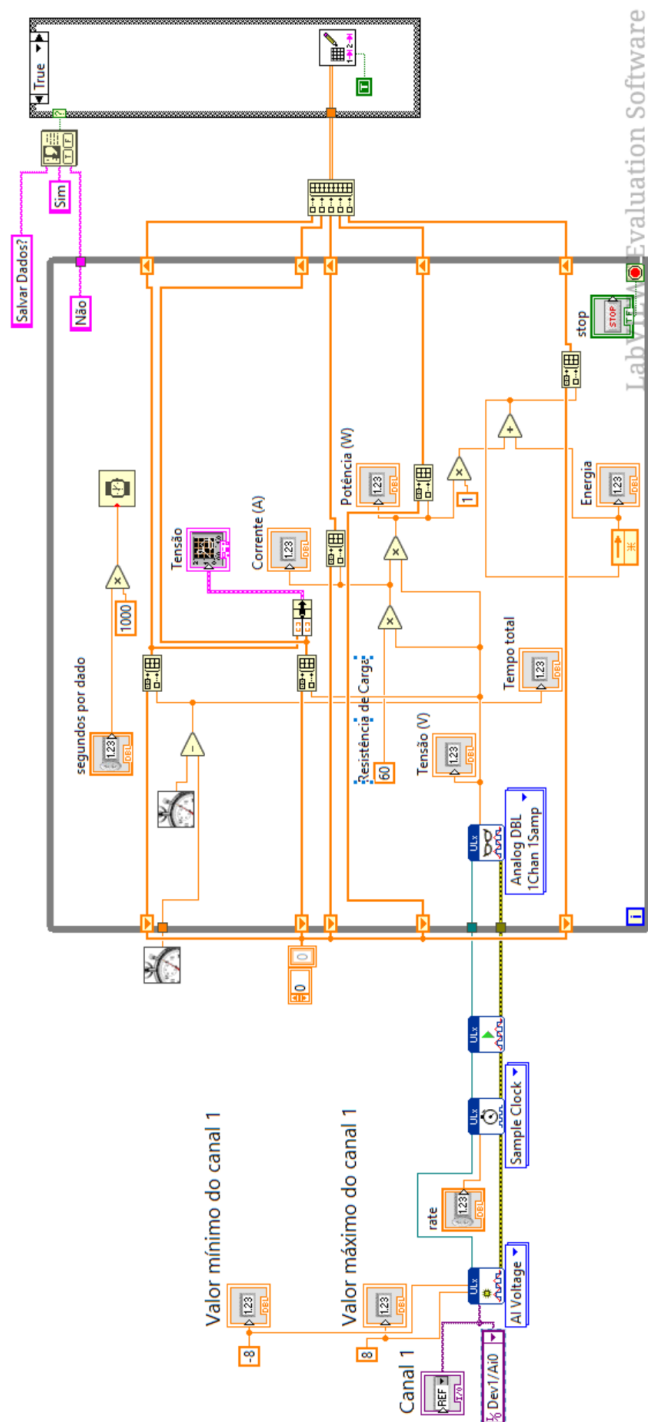


FIGURA B.1: Programa de LabVIEW

Apêndice C

Impulsos para cada resistência

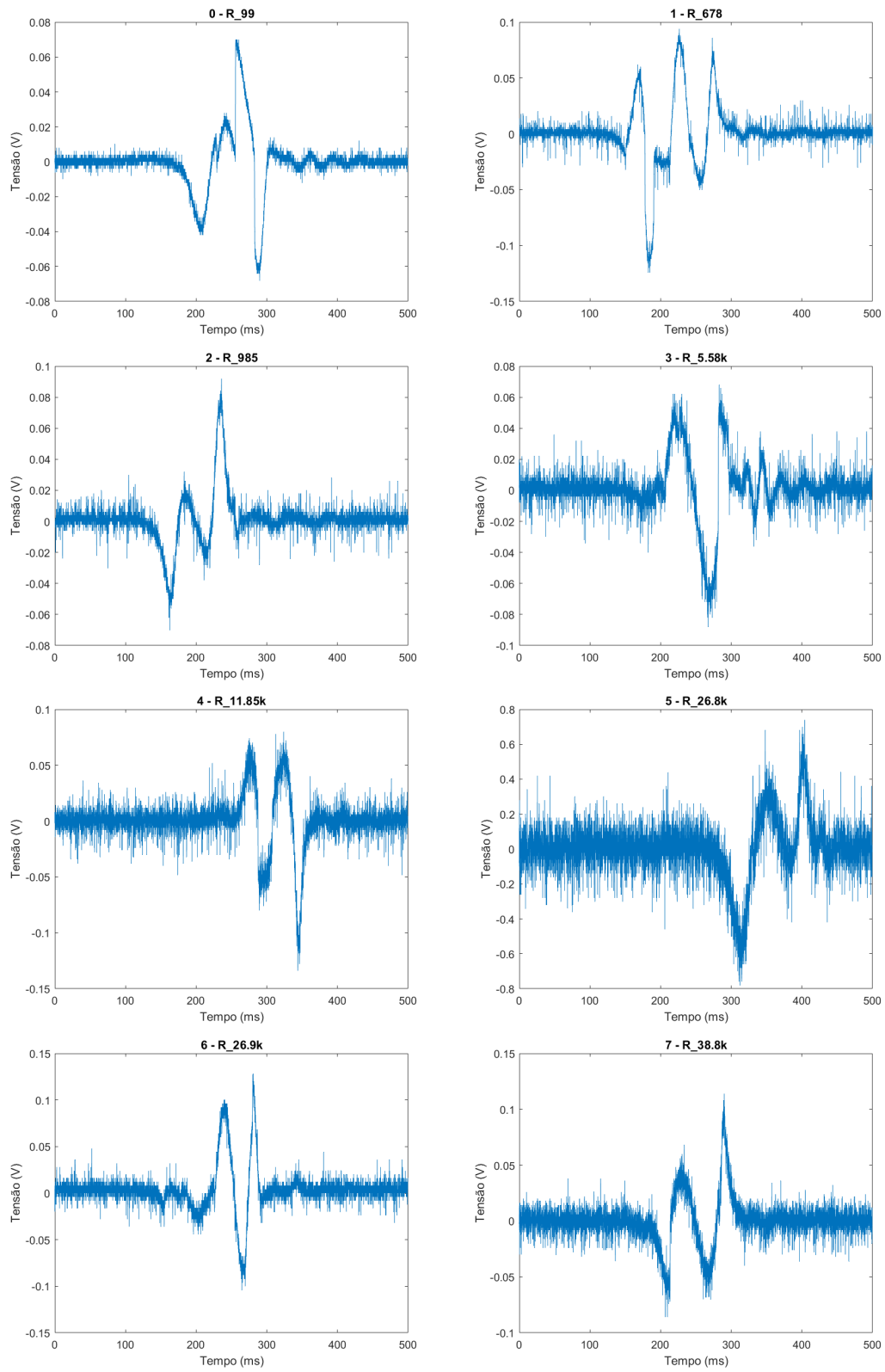


FIGURA C.1: Impulsos 1

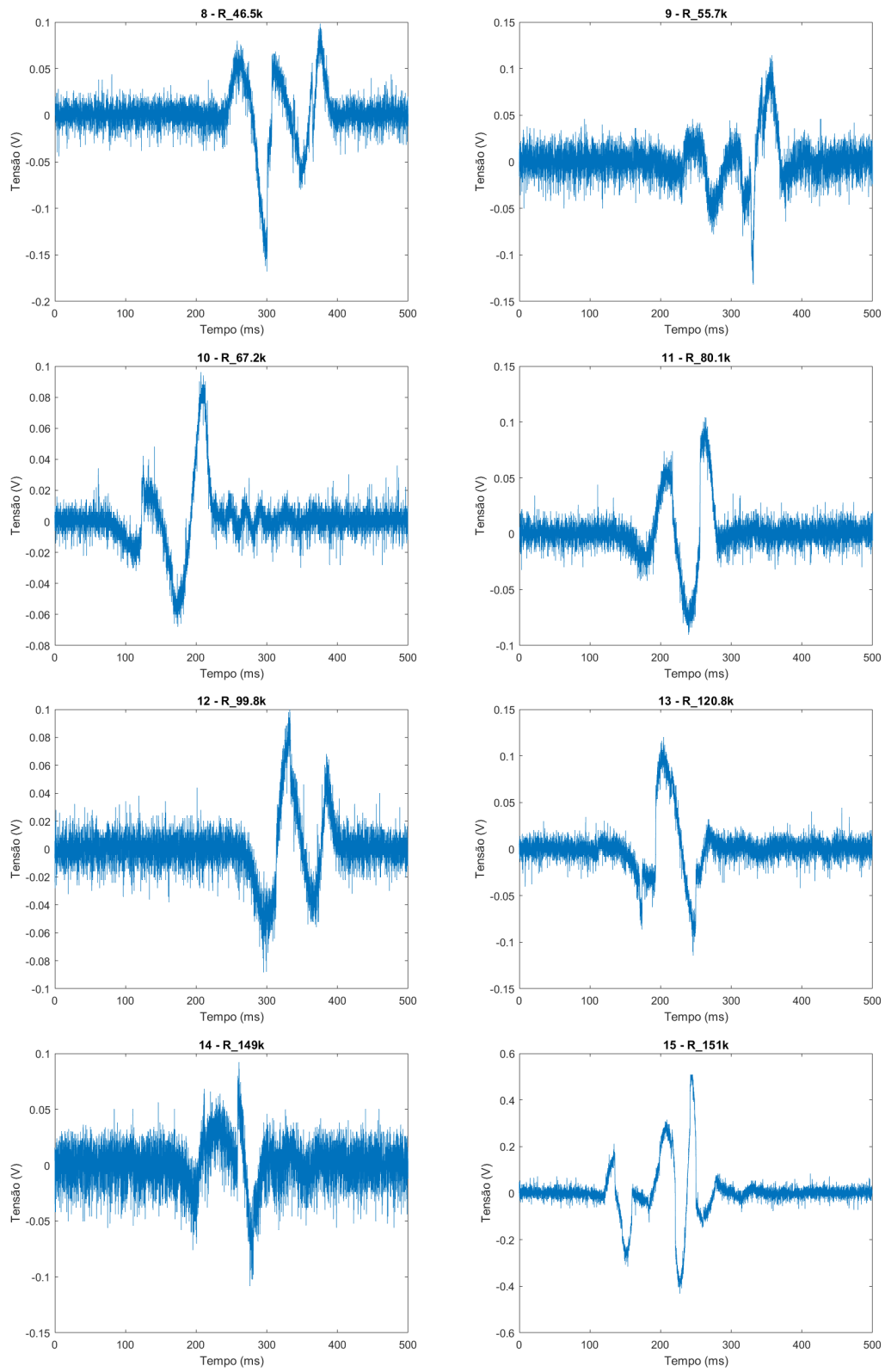


FIGURA C.2: Impulsos 2

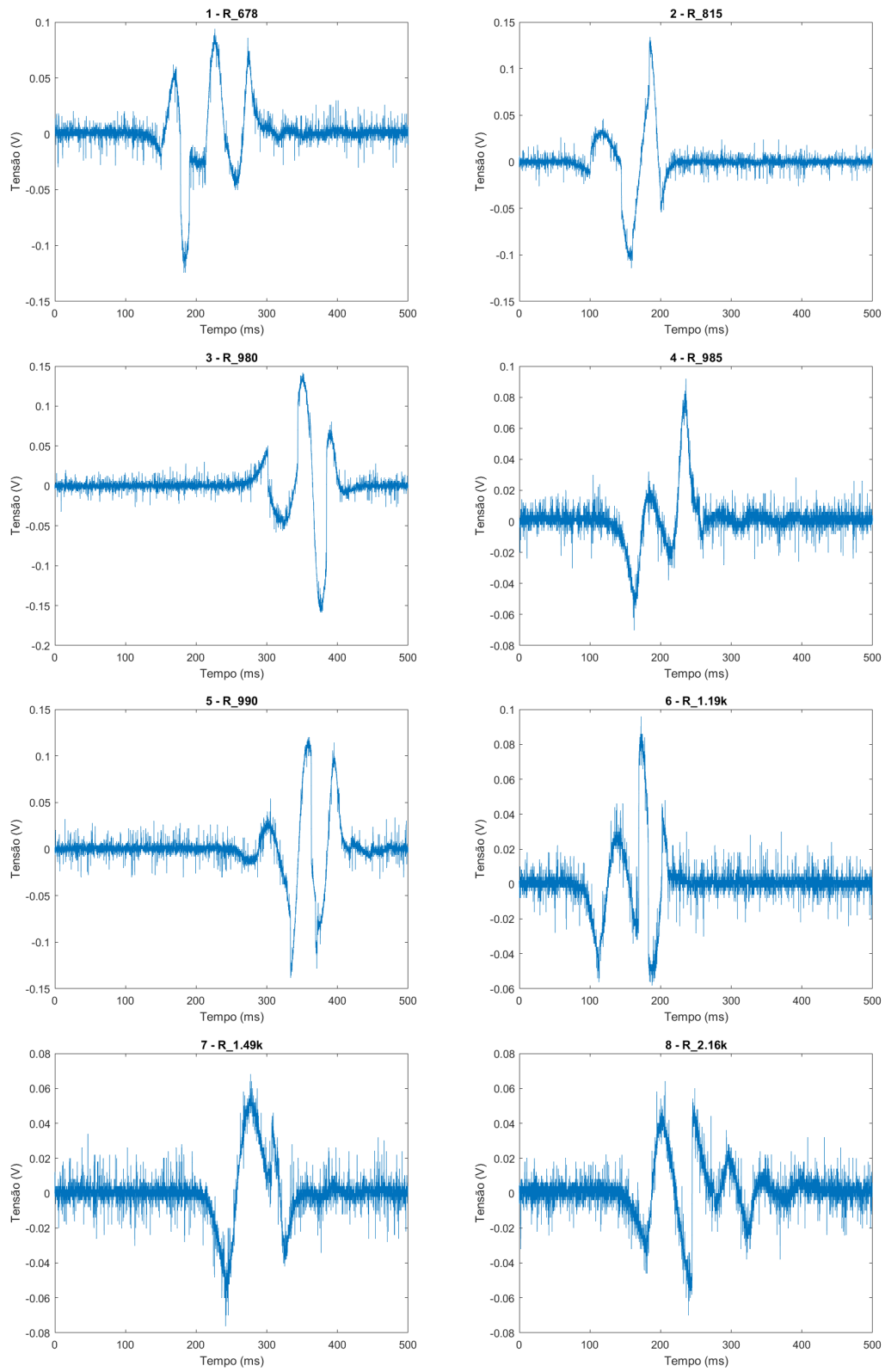


FIGURA C.3: Impulsos 3

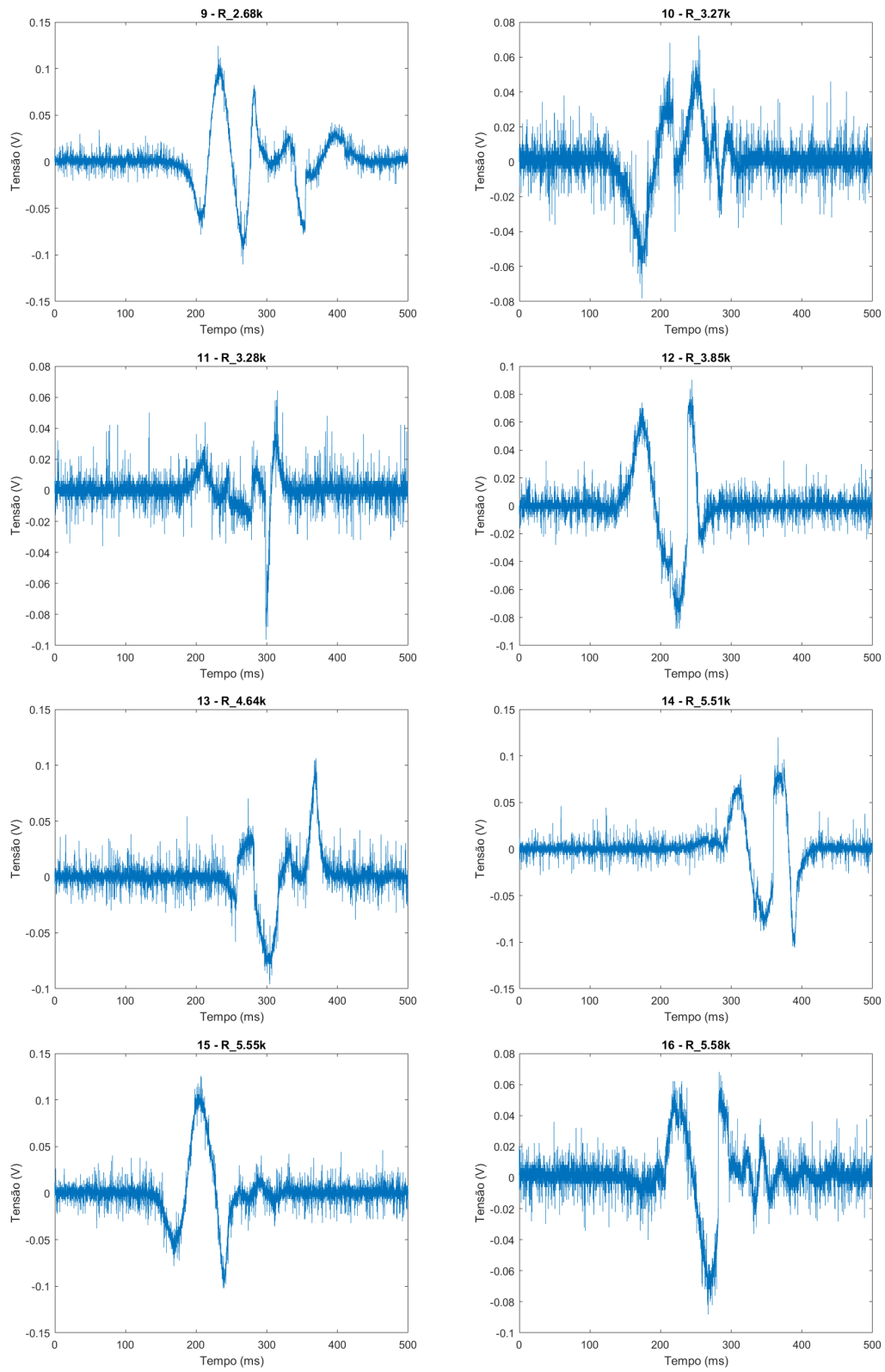


FIGURA C.4: Impulsos 4

Anexo I - Equipamentos utilizados pelos Fuzileiros Portugueses

Tipologia	Fabricante	Modelo	Armazenamento de energia
Beacon	Cejay Engineering	Mercury-9	1 pilha do tipo AA
Câmara de filmar	GoPro	Hero 2	Bateria
Transrecetor de comunicações VHF	Icom	IC-M85E	Bateria
Localizador GPS e calculador balístico	Garmin	Foretrex 701 Ballistic Edition	2 pilhas do tipo AAA
Lanterna	Inforce	WML White - Gen 2	1 pilha do tipo CR123A
Lanterna	Streamlight	TLR-VIR II	1 pilha do tipo CR123A
Mira eletro-ótica	EOTECH	HWS EXPS3	1 pilha do tipo CR123
Mira eletro-ótica	Trijicon	RMR Type Red Dot Sight	1 pilha do tipo CR2032
Equipamento de visão noturna	Exelis	F5050	1 pilha do tipo AA
Designador laser com calculador balístico	Wilcox	RAPTAR S	1 pilha do tipo CR123
Supressor de som	Honeywell	Impact Sport	2 pilhas do tipo AAA
Dispositivo android	Samsung	Galaxy A22	Bateria

TABELA I.1: Informação sobre diferentes os equipamentos usados pelos Fuzileiros Portugueses. - parte 1

Tipologia	Tensão de alimentação	Carga armazenada	Autonomia	Potência média calculada
Beacon	1.5 V	2500 mA.h	Modo Flash Hi: 80 h Modo Contínuo: 8 h	Modo Flash Hi: 46.88 mW Modo Contínuo: 468.75 mW
Câmara de filmar	3.7 V	1100 mA.h	2.5 h	1.63 W
Transrecetor de comunicações VHF	7.2 V	2010 mA.h	14 h (42 min TX, 42 min RX e 756 min STB)	1.03 W
Localizador GPS e calculador balístico	3 V	2 x 1000 mA.h	Modo GPS: 48 h Modo UltraTrac: 168h	Modo GPS: 125 mW Modo UltraTrac: 35.71 mW
Lanterna	3 V	1500 mA.h	Luz visível: 1.5 h Infravermelho: 12 h	Luz visível: 3 W Infravermelho: 37.5 mW
Lanterna	3 V	1500 mA.h	Luz visível: 1.5 h Infravermelho: 12 h	Luz visível: 3 W Infravermelho: 37.5 mW
Mira eletro-ótica	3 V	1500 mA.h	1000 h	4.5 mW
Mira eletro-ótica	3 V	220 mA.h	4 anos	18.84 muW
Equipamento de visão noturna	1.5 V	2500 mA.h	12.5 h	300 mW
Designador laser com calculador balístico	3 V	1500 mA.h	7 h	642.86 mW
Supressor de som	3 V	2 x 1000 mA.h	350 h	17.14 mW
Dispositivo android	4.43 V	5000 mA.h	Mínimo: 24 h Máximo: 97 h	Mínimo: 228.35 mW Máximo: 922.92 mW

TABELA I.2: Informação sobre diferentes os equipamentos usados pelos Fuzileiros Portugueses. - parte 2

Pilha	Energia (J)
AA	13500
AAA	5400
CR123	16200
CR2032	2376

TABELA I.3: Energia necessária para carregar as pilhas.