

UMin Carlos Alberto Jorge Leite Faria Energy Harvesting para alimentação de sensores de monitorização submersos no oceano



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Carlos Alberto Jorge Leite Faria

Energy Harvesting para alimentação de sensores de
monitorização submersos no oceano

setembro de 2023



Universidade do Minho

Escola de Engenharia

Carlos Alberto Jorge Leite Faria

**Energy Harvesting para alimentação de sensores
de monitorização submersos no oceano**

Tese de Doutoramento

Programa Doutoral em Engenharia Eletrónica e de
Computadores

Trabalho realizado sob a orientação de:

Professor Doutor Luís Miguel Valente Gonçalves

Professor Doutor Rui Alberto Madeira Macedo Lima

Professor Doutor João Mário Rodrigues Miranda

setembro de 2023

DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos.

Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada. Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do Repositório da Universidade do Minho.

Licença concedida aos utilizadores deste trabalho



Atribuição-Não Comercial-Sem Derivações CC BY-NC-ND

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Universidade do Minho, 27/09/2023

Assinatura: _____

Agradecimentos

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer ao meu orientador, Professor Luís Miguel Valente Gonçalves, por todo o apoio, incentivo e orientação. Obrigado por todo o conhecimento compartilhado, ensinamentos, entusiasmo e dedicação ao longo destes anos. O meu agradecimento também, pela ajuda na realização dos testes no mar e no rio. Aos meus coorientadores, Professor Rui Alberto M.M de Lima e Professor João Mário Rodrigues Miranda, por todo o apoio. Obrigado por estarem disponíveis para me ajudar e esclarecer dúvidas que surgiram ao longo deste percurso. Também um agradecimento ao Professor Marcos S. Martins, por estar sempre disponível e facilitar o material para realização dos testes no mar e no laboratório. Aos meus colegas Tiago Matos e João Rocha, o meu agradecimento pela ajuda na realização dos circuitos eletrónicos e enorme ajuda na realização dos testes no mar e no rio. Gostaria de expressar minha sincera gratidão à minha esposa Lúcia pelo seu apoio incondicional.

Gostaria de agradecer o apoio dos Projetos NORTE-01- 0145-FEDER-000032 – NextSea, PlastiSensor, PTDC/EAM-OCE/6797/2020 e SONDA, PTDC/EME-SIS/1960/2020.

Finalmente, gostaria de agradecer a Fundação para a Ciência e a Tecnologia pela minha bolsa de doutoramento SFRH/BD/137121/2018.

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho académico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração.

Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

Universidade do Minho, 27 /09 /2023

Carlos Alberto Jorge Leite Faria

RESUMO

Energy Harvesting para alimentação de sensores de monitorização no oceano.

Com a redução das necessidades energéticas dos dispositivos de monitorização, tornou-se viável a utilização de sistemas de Energy Harvesting para fornecer energia, a fim de aumentar a autonomia das baterias ou, em alguns casos, tornar o sistema de monitorização completamente autónomo. A diminuição da dependência de substituições frequentes de baterias no ambiente oceânico ou a transição para um sistema de monitorização autónomo tornam-se ainda mais importantes em contextos ambientais agressivos, onde nem sempre é possível realizar as substituições e os custos logísticos são elevados. Além disso, se o dispositivo for submerso, haverá a vantagem adicional de não ser suscetível aos impactos das embarcações, bem como não representar um risco para a navegação, mesmo que este seja de pequenas dimensões. O objetivo desta tese de doutoramento é investigar e produzir um gerador linear eletromagnético de baixo custo que possa ser instalado em ambientes submersos, tais como nos oceanos ou rios. Devido à escassez de informações disponíveis sobre geradores lineares eletromagnéticos submersos, a linha de investigação foi direcionada para a adaptação e modificação de configurações de geradores lineares eletromagnéticos aplicados em ambientes controlados.

Esta tese possibilitou a investigação, desenvolvimento, otimização e produção do protótipo de um gerador linear eletromagnético, com dimensões 260x210x112 mm³ que pode ser instalado submerso no oceano ou rio para fornecer energia a uma rede de sensores ou a um único sensor. O protótipo foi fabricado e testado no oceano e no rio, produzindo diferentes níveis de potência de acordo com as condições ambientais (como o tipo de maré) e a área de estudo (mar ou estuário). Foi observado que o gerador linear eletromagnético tem a capacidade (na situação mais favorável dos testes) de produzir 4,8 mW e de alimentar 8 sensores de baixo consumo. Nos mais adversos cenários de testes, o gerador demonstrou a capacidade de restituir entre 43% e 90% da energia consumida em sensores com potências inferiores a 1 mW, contribuindo, deste modo, para um incremento na respetiva autonomia. Adicionalmente, foi possível produzir um protótipo por um preço inferior a 100 €, permitindo a instalação de vários geradores na área de monitorização, o que possibilita o fornecimento de energia para múltiplos sensores em estudos de monitorização de alta resolução espacial.

A estratégia adotada para alcançar estes objetivos incluiu a pesquisa e seleção da configuração mais adequada para o sistema de produção de energia, identificando as arquiteturas do mecanismo de conversão energética, a escolha e otimização dos materiais em função dos valores obtidos nas simulações numéricas e sua adaptação para o ambiente marítimo. A seleção da geometria do corpo externo do sistema de conversão, foi estudada e validada por meio de simulações numéricas por OpenFoam.

Palavras-Chave: *Energy Harvesting*, Gerador linear eletromagnético, Gerador submerso oceânico, LEG, Produção de energia.

ABSTRACT

Energy Harvesting para alimentação de sensores de monitorização no oceano

With the reduction of the energy requirements for monitoring devices, the utilization of Energy Harvesting systems to supply energy to increase battery autonomy or even make the monitoring system fully autonomous has become viable. This approach has the potential to significantly reduce the need for frequent battery replacements, which, in turn, can have relevant environmental benefits. The decrease in dependence on frequent battery replacements in the oceanic environment or the transition to an autonomous monitoring system becomes even more important in aggressive environmental contexts, where it is not always possible to carry out replacements and where logistic costs are high. Furthermore, if the device is submerged, there is the additional advantage of it not being susceptible to vessel impacts and not posing a risk to navigation, even if it is of small dimensions. The purpose of this PhD thesis is to investigate and produce a low-cost linear electromagnetic generator that can be installed in submerged environments such as the ocean or river. due to the lack of available information on submerged linear electromagnetic generators, the research direction was directed towards adapting and modifying configurations of linear electromagnetic generators applied in controlled environments.

This thesis enabled the investigation, development, optimization, and production of a prototype of a linear electromagnetic generator, with dimensions $260 \times 210 \times 112 \text{ mm}^3$, that can be installed underwater in the ocean or river to provide energy to a network of sensors or a single sensor. The prototype was manufactured and tested in the ocean and river, producing different levels of power according to environmental conditions (such as the type of tide) and the study area (ocean or estuary). It was observed that the linear electromagnetic generator has the capacity (in the most favourable test situation) to produce 4.8 mW and supply 8 low-power sensors. In the most adverse test scenarios, the generator has demonstrated the ability to restore between 43% and 90% of the energy consumed by sensors with power levels below 1 mW, thus contributing to an increase in their respective autonomy. Additionally, it was possible to produce the prototype for less than €100, allowing for the installation of multiple generators in the monitoring area, enabling the supply of energy to multiple sensors in studies of high spatial resolution monitoring.

The strategy adopted to achieve these objectives included researching and selecting the most suitable configuration for the energy production system, identifying the architectures of the energy conversion mechanism, choosing and optimizing materials based on the values obtained in numerical simulation and adapting them to the marine environment. The choice of the external body geometry of the conversion system was studied and validated through numerical simulations performed with OpenFoam.

Keyword: Energy Harvesting, Electromagnetic Linear Generator, Ocean Submersible Generator, LEG, Power Generation.

Índice

DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS	ii
Agradecimentos	iii
RESUMO	v
ABSTRACT	vi
Lista de abreviaturas, unidades e símbolos.....	x
Figuras	xii
Tabelas.....	xx
Capítulo 1 Introdução.....	22
1.1 Motivação	23
1.2 Objetivos	24
1.3 Estrutura da tese	25
Capítulo 2 Estado da Arte	28
2.1 Energy Harvesting.....	29
2.2 Sistemas piezoelétricos	31
2.2.1 Aplicações não marítimas.....	31
2.2.2 Aplicações marítimas	33
2.3 Sistemas triboelétricos	39
2.3.1 Aplicações não marítimas.....	39
2.3.2 Aplicações marítimas	41
2.4 Sistemas eletromagnéticos	45
2.4.1 Aplicações não marítimas.....	45
2.4.2 Aplicações oceânicas	47
2.5 Comparativo dos sistemas e arquiteturas LEG	49
2.5.1 Comparativo entre sistemas de produção de energia	50
2.5.2 Arquiteturas de Geradores lineares eletromagnéticos cilíndricos de escala reduzida	51
2.6 Resumo	62
Capítulo 3 Seleção da arquitetura e componentes LEG.....	63
3.1 Mecanismo de produção de energia	64
3.1.1 Piezoelétrico	64
3.1.2 Triboelétricos	64
3.1.3 Eletromagnéticos	65
3.2 Seleção do mecanismo Eletromagnético	65
3.2.1 Princípio de funcionamento eletromagnético.....	65

3.2.2 Mecânica do sistema.....	66
3.3 Requisitos do dispositivo.....	70
3.4 Análise e seleção dos componentes.....	71
3.4.1 Magneto e Tubo	71
3.4.2 Bobina.....	80
3.5 Análise do circuito elétrico do gerador linear eletromagnético	87
3.6 Altura do magneto cilíndrico.....	88
3.7 Número de bobinas	90
3.8 Resumo	92
Capítulo 4 Validação e otimização experimental da arquitetura do LEG.....	93
4.1 Parâmetros do gerador eletromagnético linear.....	94
4.2 Setup de testes e metodologias	94
4.3 Otimização da distância entre magnetos.....	96
4.4 Otimização da distância entre bobinas.....	98
4.5 Resumo	100
Capítulo 5 Caracterização do LEG em ambiente controlado	101
5.1 Metodologia e setup de testes.....	104
5.1.1 Testes de queda livre	104
5.1.2 Testes em movimentos periódicos	105
5.2 Ligação entre as duas bobinas	107
5.2.1 Tensão em circuito aberto	107
5.2.2 Bobinas em Série Seguidas de Retificação	109
5.2.3 Bobinas em Série Após Retificação.....	109
5.2.4 Bobinas em Paralelo Seguidas de Retificação	110
5.2.5 Bobinas em Paralelo após Retificação.....	111
5.2.6 Comparação de resultados	112
5.3 Análise de potência de saída.....	113
5.3.1 Influência da carga na potência de Saída	113
5.3.2 Influência da frequência do movimento na potência de saída.....	116
5.4 Armazenamento de energia e alimentação de sensores.....	117
5.5 Resumo	121
Capítulo 6 Projeto da geometria do corpo exterior	123
6.1 Validação do solver OpenFoam	124
6.2 Parâmetros das simulações numéricas do protótipo selecionado.....	128
6.2.1 Condições fronteira	130
6.2.2 Malha.....	131

6.3	Simulações	134
6.4	Cálculo da massa	144
6.5	Resumo	148
Capítulo 7 Fabrico do protótipo		149
7.1	Fabrico do LEG	150
7.2	Fabrico do dispositivo externo do LEG	154
7.3	Estrutura de ancoragem e fixação do dispositivo de produção de energia.	156
7.4	Datalogger	156
7.5	Resumo	158
Capítulo 8 Caracterização e aplicação em ambientes reais		159
8.1	Locais e Metodologia de teste	160
8.1.1	Localizações geográficas	161
8.1.2	Metodologia	163
8.2	Caracterização do gerador sem armazenamento de energia	164
8.2.1	Testes no oceano sem retificação da tensão com 130 Ω	164
8.2.2	Testes no oceano com retificação de tensão	166
8.3	Aplicação do gerador com armazenamento de energia e com carga	169
8.3.1	Aplicação no oceano	169
8.3.2	Aplicação em rio	171
8.4	Resumo	174
Capítulo 9 Conclusões e trabalho futuro		176
9.1	Conclusões	177
9.2	Trabalhos futuros	180
Referências		181
ANEXO I Cover page, Sensors, Volume 22, Issue 4		186
ANEXO II - Valores do fluxo magnético		186
ANEXO IIA Tabela de cálculo da tensão da bobina		188
ANEXO III Parâmetros simulações		190
ANEXO IV Programa Arduino Nano		213
ANEXO V Testes no Mar		219
A -	Teste 07 out. 2022, 10h30.	219
B -	Teste em 14 de outubro de 2022, às 10h30	222
C -	Teste no oceano em 15 de novembro de 2022, às 15h30	224
D -	Teste em rio em 05 de janeiro de 2023, às 10h30	225

Lista de abreviaturas, unidades e símbolos

<i>ABS</i>	Acrilonitrilo butadieno estireno
<i>AC</i>	Acrílico
<i>B</i>	Densidade do fluxo magnético
<i>bHc</i>	Campo coercivo
<i>Bob1</i>	Bobina 1
<i>Bob2</i>	Bobina 2
<i>Br</i>	Fluxo magnético remanescente
<i>C_D</i>	Coefficiente de arrasto
<i>C_L</i>	Coefficiente de sustentação
<i>dc</i>	Distância entre as bobinas
<i>dm</i>	Distância entre magneto
<i>Fa</i>	Força de atrito
<i>F_f</i>	Força Aplicada
<i>Felem</i>	Força eletromagnética
<i>fem</i>	Força eletromotriz
<i>G</i>	Gauss
<i>Hz</i>	Hertz
<i>J</i>	Joule
<i>LBob</i>	Indutância da bobina
<i>LEG</i>	Gerador linear eletromagnético
<i>m</i>	Dipolo magnético
<i>N</i>	Número de espiras
<i>PLA</i>	Ácido Polilático
<i>PTFE</i>	Politetrafluoretileno
<i>PTOT</i>	Potência
<i>RBob</i>	Resistência da bobina
<i>Ra</i>	Rugosidade média
<i>Rc</i>	Resistência de carga
<i>Re</i>	Número de Reynolds
<i>T</i>	Tesla
<i>VBob</i>	Volume da bobina
<i>Vm</i>	Volume do magneto

Símbolos

$\alpha (r)$	Fator de acoplamento eletromagnético
μ_0	Constante da permeabilidade magnética no vácuo
Φ	Fluxo Magnético
ω	Velocidade angular
ρ	Massa volúmica
φ	Ângulos nos eixos

Figuras

Capítulo 2

Figura 2.1. Piezoelétrico com proteção/encapsulamento sujeito a um movimento. Fixação num dos lados, para permitir a deformação do piezoelétrico.....	31
Figura 2.2. Sistema de recolha de energia implementada na via rodoviária. A) Método de montagem, B) Um módulo fabricado, [4].....	32
Figura 2.3. A) O PVDF encapsulado em PDMS, B) Zona de teste do dispositivo de colheita de energia, [5].....	33
Figura 2.4. Testes do FPED no oceano, [6].	33
Figura 2.5. A) Estrutura do modelo a ser estudado, B) Protótipo, C) Testes no rio Detroit, [7].	34
Figura 2.6. A) Esquema do funcionamento, posição 1, 2 e 3, B) Vista em perspetiva.	35
Figura 2.7. A) Desenho do modelo, B) Protótipo em testes, [9].....	35
Figura 2. 8. Esquema de funcionamento do dispositivo.	36
Figura 2.9. a) Dispositivo de produção de energia, (b) Barra de montagem dos piezoelétricos, [11].....	37
Figura 2.10. a) Aplicação da colheita de energia, b) Modelo de inspiração, c) Montagem do dispositivo d) Protótipo, [12].	37
Figura 2.11. a) Rêmora, bio inspiração para o sistema de fixação, b) Localização TAG e dispositivo de produção de energia, [13].	38
Figura 2.12. a) Vista frontal e topo do sistema proposto, com uma ventosa inspirada na rêmora para fixação no animal marítimo, b-c) Piezoelétrico MFC montado na viga, d) 1º estado estável de movimento, e) 2º estado estável de movimento, [13].	38
Figura 2.13. O sistema flutua submerso, [14].	39
Figura 2.14. a) Vista transversal do gerador triboelétrico no interior do tubo com especificação do material usado, b) Vista tridimensional dos componentes, [15].....	40
Figura 2.15. a) Esquema do gerador tribológico baseado numa folha de planta viva, b) Fotografia da planta e gerador, [16].....	41
Figura 2.16. a) Forma esférica do TENG, b) Componentes, c) Posição de cada esfera numa matriz composta por 4 esferas, d) Materiais e forma de funcionamento, sendo utilizado um filme de Etileno Propileno Fluorado (FEP), e) Diâmetro das esferas utilizadas nos testes, f) Matriz de quatro esferas fabricadas e utilizados no tanque de água, g) Forma de	

funcionamento nas ondas, [17].	41
Figura 2.17. Circuito de excitação de carga (CEC), $C1=C2=10\mu\text{F}$, $CE=1\text{ mF}$, [17].	42
Figura 2.18. a) Desenho to TENG, figura de cima é conjunto, figura abaixo é um corte da seção com os materiais que constituem o gerador, b) Na figura superior, ensaio de um TEG para simular as ondas, com correspondente visualização do deslocamento das partículas, figura inferior, ensaio com 5 TENG em paralelo, (c) Forma de deslocação das partículas, (d) Ligação em paralelo dos 5 TENG, com tratamento da onda de corrente alterna (AC), [18].	42
Figura 2.19. Testes realizados nas ondas de um lago, figura adaptada [18].	43
Figura 2.20. a) Corpo principal, com os dois rolos que irão produzir energia com os movimentos das ondas, b) Vista em profundidade, c) Movimento para esquerda, (d) e (e) Recuperação do movimento para o centro, (f) Movimento para a direita, , (g) Ensaios no tanque de água, [19].	43
Figura 2.21. Dispositivo submerso, [20].	44
Figura 2.22. Visão geral do TENG, a) Visão do fluxo energético, b) Borboleta como fonte de inspiração para o corpo do TENG, c) Componentes do TENG, pás superiores e inferiores com ângulo de 36° entre elas, unidade de produção de energia constituído por cobre e esferas de PTFE com 9 mm de raio, d-f) Modelo construído, g) Bancada de ensaios para simular as ondas, h) Esquema de como as esferas vão movimentar-se, i) Esquema do ensaio num tanque com altura de 45 cm, [21].	45
Figura 2.23. a) Desenho geral do micro gerador eletromagnético, b) Padrão de fabrico para as bobinas, c) Fabrico das bobinas, d) Dispositivo para ensaios, [26].	46
Figura 2.24. Desenho do dispositivo, que foi testado com um comprimento do tubo 140 e 200 mm, com diâmetro interno de 20.5 mm, [27].	46
Figura 2.25. Forma do funcionamento do sistema, [28]	47
Figura 2.26. a) Local da realização dos testes, b) Sistema completo com eletrónica para registo dos dados (DAQ), bateria e módulo de produção de energia (WEH), c) Colocação das boias no oceano, d) Navio de pesquisa, e) Componentes do WEH, f) Montagem final do WEH, 10x10x6 cm, [29].	48
Figura 2.27. a) Dispositivo proposto, plataforma de fixação subaquática (UMP) sujeito a corrente com velocidade (u), b) Desenho do sistema de colheita, [30].	49
Figura 2.28. Forma de implementação do estudo numérico, com as cotas de deslocamento da mola ($z1$) e do dispositivo ($z2$), ft força exercida pela onda, [31].	49
Figura 2.29. I-Bobina e magneto, II-Bobina e magnetos com separador.....	52

Figura 2.30. As bobinas estão fixas e os magnetos movem-se no seu interior. As bobinas superiores e inferiores têm o mesmo sentido de enrolamento das espiras, enquanto a bobina intermédia tem sentido de enrolamento contrário, [44].	52
Figura 2.31. Dimensões proposta para o gerador, [44].	53
Figura 2.32. Dispositivo proposto, que respeita a arquitetura I, [45].	55
Figura 2.33. Representação da altura ZC .	56
Figura 2.34. a) Esquema do dispositivo, b) Um dos protótipos usados, c) Protótipos utilizados nos testes, com posições diferentes para bobina, [52].	57
Figura 2.35. a) Protótipo, b) Modelo baseado na arquitetura I, sendo $y(t)$ base de excitação, (h) altura do magneto, db e dt distâncias relativamente à base dos magnetos dos respetivos polos N e S, [53].	58
Figura 2.36. a) Modelo mecânico, b) Modelo elétrico, [53].	59
Figura 2.37. a) Gerador linear eletromagnético, b) Princípio de funcionamento, sendo $N1$ e $N2$ as dimensões da bobina, v a velocidade do magneto, [55].	60
Figura 2.38. a) Configuração do sistema de conversão de energia, b) Sistema simplificado, com altura da bobina h_{coil} , altura dos magnetos h_{mag} , diâmetro da esfera d_{ball} , comprimento do tubo l_{EH} , diâmetro da mola, d_{spring} , diâmetro do magneto d_{mag} , diâmetro da bobina d_{coil} e d_{EH} diâmetro do tubo, c) Modelos equivalentes, mecânico e elétrico, [56].	61

Capítulo 3

Figura 3.1. Linhas de campo magnético no condutor.	65
Figura 3.2. a) Magneto dentro do tubo, b) Diagrama de forças do movimento descendente do magneto, com um ângulo γ . F_a é a força de atrito, F_{em} é a força eletromagnética e P_m é o peso do magneto.	67
Figura 3.3. Diagrama de forças aplicadas, sendo o F_t uma força aplicada ao corpo.	68
Figura 3.4. Critério de seleção, forma, magnetismo residual ou densidade de fluxo magnético remanescente(B_r) em Tesla(T) ou Gauss (G) e peso.	71
Figura 3.5. Forma do corpo e bobina para magnetos cúbicos ou discos quadrados (verde polo Norte, vermelho polo Sul).	72
Figura 3.6. Magneto em forma de anel e corpo exterior.	72
Figura 3.7. Vermelho da esfera é polo Norte e verde polo Sul.	72
Figura 3.8. Magneto de disco ou cilíndrico e forma exterior.	73

Figura 3.9. Magneto com geometria de bloco, figura do catálogo do fabricante (https://www.supermagnete.de).....	74
Figura 3.10. Magneto com geometria de anel, figura do catálogo do fabricante (https://www.supermagnete.de).....	75
Figura 3.11. Magneto esférico, figura do catálogo do fabricante (https://www.supermagnete.de).....	75
Figura 3.12. Magneto com geometria de disco ou cilindro, figura do catálogo do fabricante (https://www.supermagnete.de).....	75
Figura 3.13. Comparação entre as diferentes geometrias para uma espessura de 10 mm, a) Dimensão máxima de 30 mm, b) Dimensão máxima de 20 mm, c) Dimensão máxima de 10 mm, d) Comparação entre o bloco e disco com dimensão máxima de 30 mm	76
Figura 3.14. Placas produzidos e de compra, a) Placas de PLA e ABS, com 60x40x 5 mm, b) Representação das camadas de fabrico por FDM, c) Placa de acrílico do lado esquerdo e placa de PTFE do lado direito.	77
Figura 3.15. Medidor de rugosidade.	78
Figura 3.16. Máquina de tribologia UMT3 CETR.	79
Figura 3.17. Dimensões do suporte da bobina.	80
Figura 3.18. a) O dispositivo , b) Desenho de corte do dispositivo para fixação das cotas utilizadas nos cálculos teóricos. H cota relativa.	81
Figura 3.19. Tensões teóricas obtidas com tempo de queda total 0.128 segundos.	82
Figura 3.20. Valor experimental e valores teórico.	83
Figura 3.21. Magneto a mover-se no interior das espiras, m dipolo magnético ,re raio das espiras, r distância da face do magneto ao plano que contém a espiras, B_z e B_a , densidade do fluxo magnético nas respetivas direções, a , b e c são os vetores unitários e v velocidade devido ao deslocamento em r	84
Figura 3.22. $R1$ e $R2$, Raio interno e externo da bobina, Z altura ao centro do magneto, r distância de progressão do movimento do magneto, $Z2$ e $Z3$, cota inferior e superior da bobina.....	85
Figura 3.23. Valor experimental e valor teórico do modelo considerado.	87
Figura 3.24. Representação do circuito do gerador eletromagnético.	88
Figura 3.25. a) Tipo de configuração , b) Configuração do campo magnético, figura adaptada [56].	90
Figura 3.26. Alteração do fluxo magnético em função da combinação dos magnetos e	

espaçamento entre estes, figura adaptada [56].	90
Figura 3.27. Bob 1 e Bob2, são as bobinas 1 e 2, a) Movimento esquerda para direita, b) Movimento direita para esquerda.	91

Capítulo 4

Figura 4.1. Projeto do dispositivo de testes ao LEG.O gerador é constituído pelas duas bobinas e o elemento magneto (dois magnetos e espaçador). A distância entre as bobinas é d_c e d_m é a altura do espaçador entre os magnetos.	94
Figura 4.2. A imagem do dispositivo de teste e respetivo equipamento.	95
Figura 4.3. Potência instantânea observada, com a modificação do valor do espaçador (d_m)entre o núcleo magnético, de 4-30 mm. O espaçamento entre as bobinas , $d_c=0$ mm.	97
Figura 4.4. Potência média em função da distância entre os dois magnetos (d_m), para os ângulos de $15^\circ, 20^\circ$ e 30°	97
Figura 4.5. Potência instantânea para $d_m=6$ mm, com modificação da distância entre as bobinas(d_c) e do ângulo.	98
Figura 4.6. Potência média em função distância entre bobinas para o espaçamento entre magnetos de 6 mm.	99
Figura 4.7. LEG com as dimensões otimizadas.	99

Capítulo 5

Figura 5.1. Um possível diagrama das ligações elétricas das duas bobinas, o sistema de armazenamento de energia e a carga.	103
Figura 5.2. Dispositivo para simulação das frequências de movimento.	105
Figura 5.3. Bancada para ensaios de frequência.	106
Figura 5.4. Tensão de saída de cada bobina (A e B) no teste de queda livre, quando os magnetos se movem na direção A-B e direção B-A (B-A).....	108
Figura 5.5. a) Combinação série antes da ponte retificadora, (b) Combinação série depois da ponte da retificadora, (c) Combinação paralelo antes da ponte retificadora, (d) Combinação em paralelo após a passagem de cada bobina pela ponte retificadora.	108
Figura 5.6. Tensões de saída calculada e obtida experimentalmente, em queda livre nas direções da Bobina A-B (gráfico esquerdo) e da Bobina B-A. Aa bobinas A e B estão ligadas em série e posteriormente são medidos após a ponte retificadora.	109
Figura 5.7. Tensões de saída calculada e obtida experimentalmente, em queda livre nas	

direções da Bobina A-B (gráfico esquerdo) e da Bobina B-A. As bobinas A e B estão ligadas em série após a tensão de cada bobina passar pela ponte retificadora.	110
Figura 5.8. Tensão de saída calculada e valor da tensão experimental em queda livre, com movimento da Bobina A para Bobina B (gráfico esquerdo) e da Bobina B para a Bobina A (gráfico direito). As bobinas são ligadas primeiro em paralelo seguido depois da ponte retificadora.	111
Figura 5.9. Tensão saída calculada e valor da tensão experimental em queda livre, com movimento da Bobina A para Bobina B (gráfico esquerdo) e da Bobina B para a Bobina A (gráfico direito). As bobinas são ligadas em paralelo depois das pontes retificadoras..	112
Figura 5.10. Tensões de saída em queda livre para duas resistências.	114
Figura 5.11. Potência média em função da carga resistiva. Os pontos representam os valores médios de 6 testes, as barras o desvio padrão. A linha representa a potência gerada quando utilizada para carregar uma bateria de lítio de 3,2 V.	115
Figura 5.12. Potência média obtida para três valores de resistências de carga, com frequências de movimento de 0,1-0,4 Hz. Os pontos, representam os valores médios e as barras o desvio padrão em 6 testes.	117
Figura 5.13. Carregamento do condensador durante 900 s, em função da frequência..	118
Figura 5.14. Energia armazenada no condensador em 900 s.	118
Figura 5.15. Carregamento do condensador a 0,2 Hz, com carga de 3 sensores.....	119

Capítulo 6

Figura 6.1. Gráfico de C_d em função número do Reynolds, de Kraaiennest – baseado na figura 5.12 e equações da tabela de R. Clift, J. R. Grace e M. E. Weber (1978).....	124
Figura 6.2. Fluxo da simulação.....	125
Figura 6.3. Modelação da esfera em fusion 360 e exportação do ficheiro stl, com pré-malha.	127
Figura 6.4. Imagem esquerda, corte da malha do volume do fluído com esfera no centro. A malha é mais refinada na zona adjacente entre a esfera e o fluído. Na imagem direita, está apresentado a malha da esfera e as camadas mais refinadas junto à esfera.	127
Figura 6.5. Marcação dos valores de C_D obtidos nas simulações.....	128
Figura 6.6. Modelo selecionado após as simulações. a) Vista em perspetiva, b) Vista lateral, c) Vista frontal, d) Vista traseira.	129
Figura 6.7. Dimensões em milímetros, do protótipo utilizado nas simulações.	129
Figura 6.8. a) Dimensões usadas para a simulação da interação fluido/protótipo, b)	

Protótipo , c) Vista superior.....	130
Figura 6.9. a) Posicionamento do protótipo, b) Malha fina do volume do fluido, c) Malha fina do dispositivo, d) Visualização do detalhe da aresta, e) Malha grosseira/média do volume do fluido, f) Malha grosseira/média do dispositivo, g) Visualização da aresta .	132
Figura 6.10. Vista em corte do volume do fluido com o dispositivo, a)Transição suave nas células da malha na proximidade do dispositivo (com mais células), b) Transição suave na malha (com menos células) para o dispositivo, mas com maior número de camadas de refinamento.....	132
Figura 6.11. Posicionamento do protótipo para as simulações..	133
Figura 6.12. Identificação dos componentes do protótipo para referência das visualizações.....	134
Figura 6.13. Velocidade para as pás P1, P2 e B1 para 1 s, para os ângulos 0° a 15°.....	135
Figura 6.14. Velocidade para as pás P1, P2 e B1 para 1 s, para os ângulos 20° e 30°.....	136
Figura 6.15. Linhas de fluxo do fluído, para o ângulo 0°,15° e 20°.....	137
Figura 6.16. Linhas de fluxo do fluído para o ângulo 30°.....	138
Figura 6.17. Linhas do fluxo que atravessa o protótipo, para 30° e 0.3 ms ⁻¹	138
Figura 6.18. Valores de F_L e F_D	139
Figura 6.19. Valores de F_D e F_L para 0.3 ms ⁻¹ para os ângulos 0°, 15°, 20° e 30°.....	140
Figura 6.20. Velocidades constantes de 0,1, 0,2, 0,25 e 0,5 ms ⁻¹ ,com ângulos diferentes.....	140
Figura 6.21. Valores de F_D e F_L para 0.3 ms ⁻¹ para os ângulos -15°, -20° e -30°.....	141
Figura 6.22. Velocidades constantes com alteração do ângulo negativo.....	142
Figura 6.23. Valores de C_L para os ângulos de 0°, 15°, 20° e 30°.....	143
Figura 6.24. Valores de C_L para os ângulos de -15°, -20° e -30°. Velocidade de simulação de 0,3 ms ⁻¹	144

Capítulo 7

Figura 7.1. Desenho construção do LEG e os seus componentes.....	150
Figura 7.2. a) Desenho de fabrico, b) Ficheiro STL para fabrico, c) Fabrico topos em silicone.....	151
Figura 7.3. Diagrama de ligação das pontes retificadores, uma para cada bobina. D1, D2, D3, D4, D5 e D6, são os díodos, B1AC1 e B1AC2 entrada da tensão da bobina 1, B2AC1 e B2AC2 entrada da tensão da bobina 2, B1- e B1+, saída retificada da Bobina 1, B2- e B2+, saída retificada da bobina2. a) Desenho em ferramenta CAD eletrónico, b) Esquema do	

circuito.	151
Figura 7.4. a) Ligações das duas pontes retificadores, b) Montagem do LEG com as pontes retificadores, tubo de circulação do ar , tampos de silicone nos topos , magnetos no seu interior com o espaçador e isolamento com fita isoladora.....	152
Figura 7.5. a) Molde em PLA para colocação do LEG, b) Material de encapsulamento do LEG, c) Montagem final com a fixação dos topos com o mesmo material de revestimento.	153
Figura 7.6. Dispositivo externo do LEG com as dimensões das simulações.....	154
Figura 7.7. Estrutura de fixação do protótipo. Existência de dois cabos de ligação do protótipo à estrutura e um cabo limitador de ângulo.....	156
Figura 7.8. Diagrama das ligações do datalogger.	157
Figura 7. 9. Montagem do datalogger. a) Conjunto do sistema, b) pormenor da montagem do Arduíno® e baterias no corpo de PVC.....	158

Capítulo 8

Figura 8.1. Vista frontal na imagem esquerda e vista lateral, na imagem direita. Componentes de montagem e suporte utilizados para os testes.	160
Figura 8.2. Base da estrutura com algas marinhas.	161
Figura 8.3. Localização dos testes e orientação da estrutura.	161
Figura 8.4. Movimento do protótipo. As posições "a" e "b" indicam movimento da direita para a esquerda. O movimento da esquerda para a direita é representado nas posições "d" e "c". As posições "e" e "f" mostram uma sequência do movimento de "d" e "c". As posições "e" e "f" mostram uma sequência do movimento de "d" para "c" com amplitude reduzida, iniciando a partir do centro da estrutura e progredindo em direção à direita.	162
Figura 8.5. Zona estuarina do rio Cávado onde foram efetuados os testes.	163
Figura 8.6. a) Representação do protótipo com as direções e sentido das acelerações. Gráfico da tensão obtida numa amostragem de 300 s, sem retificação da onda e sem condensador, b) Tensão de saída numa amostragem com dois ciclos completos.....	164
Figura 8.7. Sinal de tensão típico versus aceleração.	165
Figura 8.8. Tensão numa amostra de 300 s, com as acelerações A_{xx} , A_{yy} e A_{zz}	167
Figura 8.9. a) Amostragem de 100 segundos da produção tensão em função mudança do ângulo em x , b) Amostragem de um período completo	167
Figura 8.10. Caracterização do gerador no oceano. Potência produzida vs. frequência das oscilações durante 4 testes.....	168

Figura 8.11. a) Tensão em função da aceleração, b) Tensão em função da alteração do ângulo, c) Detalhe da alteração do ângulo e incremento da tensão.	170
Figura 8.12. Aplicação no rio, a) Variação da aceleração e tensão no condensador, b) Variação do ângulo e da mesma tensão.	172
Figura 8.13. Variação da energia no condensador E_c e E_t é o valor teórico do descarregamento do condensador sem o gerado.....	172

Tabelas

Capítulo 2

Tabela 2.1. Comparação das potências obtidas em PEH com sistema de viga fixa num lado, tabela retirada de [1].....	32
Tabela 2.2. Vantagens e desvantagens sistemas de produção energia.	50
Tabela 2.3. Tensões e potências dispositivos eletromagnéticos.	51

Capítulo 3

Tabela 3.1. Material do magneto, com capacidade de trabalhar até 80°C.	73
Tabela 3.2. Valores de Ra (μm).	78
Tabela 3.3. Valores de Ra (μm).	78
Tabela 3.4. Coeficiente de atrito estático.	79
Tabela 3.5. Tensões Teóricas da queda livre.	81

Capítulo 5

Tabela 5.1 Energia consumida por cada sensor.....	107
Tabela 5.2. Tensões máximas das combinações.	112
Tabela 5.3. Tempo total da tensão acima dos 4,0 V, em função do tipo de configuração.	113
Tabela 5.4. Potência média em função das resistências de carga.	114
Tabela 5.5. Energia armazenada em 900 s e correspondente potência média.....	120
Tabela 5.6. Número de sensores que será possível alimentar , com base em 900 s.....	120

Capítulo 6

Tabela 6.1. Valores C_D em função número de Re	128
Tabela 6.2. Valores das forças obtidas na simulação numérica.	145

Capítulo 7

Tabela 7.1. Materiais utilizados no protótipo.	154
Tabela 7.2. Volume dos componentes.....	155

Capítulo 8

Tabela 8.1. Potência produzida e respetivas condições oceânicas.....	168
Tabela 8.2. Energia e balanço de potência. Produzido, consumido pelo sensor e armazenado no condensador no teste realizado no mar.	171
Tabela 8.3. Resumo dos testes de carregamento do condensador no oceano.	171
Tabela 8.4. Variáveis e valores utilizados para calcular a energia armazenada no condensador.....	173
Tabela 8.5. Energia e balanço de potência: Produzido, consumido pelo sensor e armazenado no condensador, num teste de rio.....	173
Tabela 8.6. Resumo dos testes no rio.	174

Capítulo 1

Introdução

Neste capítulo da tese de doutoramento, será apresentado o objetivo geral do estudo, bem como a motivação e os objetivos específicos subjacentes ao seu desenvolvimento. A sua estrutura será detalhada também.

1.1 Motivação

No âmbito do projeto de investigação NEXT-SEA coordenado pela Universidade do Minho, foi possível adquirir conhecimentos na área de *Energy Harvesting*. O objetivo desta investigação foi estabelecer as bases para a próxima geração de gestão de sistemas marítimos, baseada no conhecimento e na inovação, suportada pelas áreas de eletrónica, materiais, taxonomia, ecologia e conservação, utilizando o Noroeste de Portugal como caso de estudo. Foram desenvolvidos sensores subaquáticos para monitorização do pH, temperatura, sedimentos, concentração de clorofila, salinidade, concentração de oxigénio e um modem acústico para envio dos dados para a superfície. A energia para alimentar os sensores que apresentavam baixo consumo energético, foi fornecida por baterias LiPo, sendo que a sua duração dependia da eficiência da gestão da frequência de amostragem e da capacidade da bateria. Antes de as baterias ficarem sem carga, era necessário realizar deslocações de barco para proceder à sua substituição.

Em um ambiente marinho imprevisível e hostil, nem sempre é possível substituir as baterias dos dispositivos no momento necessário, levando à perda de dados após a descarga das mesmas. Para superar este problema, tornou-se necessário investigar e desenvolver um dispositivo que pudesse aproveitar o ambiente subaquático para gerar energia, aumentar a autonomia e prolongar o intervalo entre as substituições das baterias, reduzindo assim o impacto ambiental e, eventualmente, tornando o sistema energeticamente autónomo. Além disso, o dispositivo deveria ser capaz de funcionar em profundidades entre 3 e 10 metros, produzir tensões superiores a 3 V e não ser afetado pelo *biofouling* (bioincrustação). Estes desafios acrescentaram um elevado nível de motivação, considerando a escassa informação disponível sobre sistemas de *Energy Harvesting* subaquáticos utilizados no oceano.

Existem alguns sistemas de *Energy Harvesting* que podem ser se adaptadas para aplicações no oceano, à superfície ou submersos. Alguns destes sistemas são complexos e para a aplicação que se pretende, a solução tem de ser fiável, não exigir uma manutenção frequente e não utilizar materiais que sejam nocivos ao ambiente aquático onde esteja inserido (por exemplo, não usar revestimentos *anti-biofouling*). O facto do nosso dispositivo poder estar adequado ao *biofouling* (bioincrustação e acumulação de microorganismos) sem utilizar agentes químicos, irá direcionar a nossa investigação para sistemas que não tenham partes móveis. Esta restrição, promove soluções em que o dispositivo não tenha partes rotativas e o conjunto seja apenas uma peça única. Não havendo partes rotativas, também implica que não será usado geradores eletromagnéticos rotativos, rotações de partes do dispositivo e haverá limitações no seu movimento.

Dentro de todos estes condicionantes, outras não menos importantes, como por exemplo

ser de dimensões reduzidas (para não afetar a flora marítima), funcionar submerso de forma a não necessitar de licenças de instalação e não constituir um problema à navegação de pequenas embarcações, construção simples com o uso de ferramentas ou dispositivos de fabrico de fácil acesso que permita reproduzir em um curto espaço de tempo e de baixo custo, tendo como meta um preço abaixo de 100,00€.

Para se cumprir estes requisitos, a investigação foi direcionada para geradores eletromagnéticos lineares (LEG). Não havendo partes móveis na parte exterior do dispositivo, significa que os seus movimentos deverão ser efetuados pela corrente da água e pelas oscilações das ondas à superfície. O dispositivo será inserido no oceano, pelo que terá de funcionar com frequências inferiores a 1 Hz. Durante o levantamento do estado de arte, foram analisados diversos sistemas e verificou-se que não cumpriam as especificações selecionadas, nomeadamente na gama de frequências necessária para se produzir a energia pretendida. Tendo estes objetivos em mente, a investigação foi direcionada utilizando alguns dos princípios encontrados no estado de arte de forma a inovar a configuração e otimização através de resultados experimentais. Para atingir os objetivos propostos, testes laboratoriais foram realizados com o LEG, simulação numérica foi utilizada para obter a forma exterior do LEG e foram efetuados testes em condições reais, no mar a Noroeste (NO) da costa portuguesa, na zona da Apúlia. Para validar também a utilização do dispositivo na monitorização dos rios, foram realizados testes na zona estuarina do rio Cávado.

A principal motivação deste trabalho, por um lado, é se esta abordagem iria contribuir para o aumento da autonomia de funcionamento dos sensores aplicados no oceano ou rios, para aquisição de informação de tomada de decisões e diminuindo frequentes substituições das baterias, contribuindo assim para uma redução da poluição ambiental. Por outro lado, seria eventualmente possível tornar o sistema LEG/sensores autónomos em zonas de estudo que possuam condições favoráveis à produção e armazenamento de energia. Por último, uma melhor compreensão deste tipo de dispositivo de produção de energia devido à sua versatilidade e apresentação de um nova abordagem e projeto para a sua aplicação em ambiente submerso.

1.2 Objetivos

Como anteriormente foi mencionado, o principal objetivo desta tese de doutoramento, foi de investigar, desenvolver, inovar e fabricar um dispositivo de Energy Harvesting, que pudesse funcionar submerso no oceano, de forma a produzir energia para aumentar a autonomia dos sensores de monitorização (aplicados no mar ou rio) ou que pudesse transformar o sistema numa unidade energeticamente autónoma.

Para atingir estas metas deveriam ser cumpridos os seguintes objetivos:

- Desenvolver um gerador de dimensões reduzidas que funcione no oceano até 10 metros de profundidade, com produção de tensões contínuas entre 3-5 V e uma potência que permita alimentar sensores subaquáticos, com consumos inferiores a 1mW.
- Realizar ensaios experimentais que permitam a validação dos modelos e protótipos desenvolvidos.

Alguns objetivos específicos foram estabelecidos, para assegurar que os dois objetivos principais fossem atingidos:

- Seleção do magneto ou magnetos por via experimental e pelas especificações do fabricante, que se enquadrem no objetivo proposto, nomeadamente o valor da densidade de fluxo magnético.
- Determinar o número de espiras necessárias a ser implementadas na bobina de acordo com o fundamento teórico da indução magnética, em função do magneto selecionado.
- Investigar qual o material mais adequado para ser aplicado no LEG, na geração de energia (tubo que contém o magneto).
- Determinar por via experimental se as tensões obtidas teoricamente se aproximam dos valores experimentais tendo em conta o fator de acoplamento eletromagnético e dipolo magnético.
- Selecionar os materiais que pudessem ser aplicados de forma a suportarem a pressão da água.
- Determinar a forma geométrica do corpo onde será inserido o LEG, com o auxílio do *software* OpenFoam.
- Fabrico dos protótipos.
- Testes no mar e na zona estuarina, para validação dos resultados.

1.3 Estrutura da tese

Esta tese de doutoramento está organizada da seguinte forma:

- Capítulo 1, apresenta a motivação e objetivos para o desenvolvimento do trabalho de investigação de um dispositivo de *energy harvesting* para aplicação no oceano ou rio.
- Capítulo 2, este capítulo apresenta uma revisão bibliográfica dos dispositivos de *energy harvesting* existentes, com ênfase em dispositivos de dimensão reduzida. Os

mecanismos de conversão de energia piezoelétricos, triboelétricos e eletromagnéticos foram analisados e comparados. É dada especial atenção ao mecanismo de conversão de energia eletromagnético, incluindo configurações e arquiteturas já implementadas em ambiente marítimo, seja à superfície ou submerso. A utilização de geradores eletromagnéticos lineares apresenta a vantagem de permitir a construção de geradores de baixo custo e facilmente escaláveis. A revisão bibliográfica também permitiu identificar as principais limitações e desafios enfrentados por estes dispositivos.

- Capítulo 3, neste capítulo é realizado a seleção dos componentes e escolha da arquitetura a adotar para o dispositivo que se pretende desenvolver. Para este efeito, é proposto um modelo numérico simples para determinação prévia do número de espiras da bobina em função da tensão que se pretende obter. Em seguida, é utilizada um modelo mais complexo que permite obter a tensão próxima do valor experimental.

A escolha dos componentes e a arquitetura do gerador são determinantes para o seu desempenho e eficiência.

- Capítulo 4, descreve a otimização do gerador eletromagnético linear por via experimental, nomeadamente distâncias entre magnetos e das bobinas. Este capítulo é baseado no artigo de conferência "*Optimization of an Electromagnetic Generator for Underwater Energy Harvester,*" OCEANS 2019 - Marseille, France, 2019, pp.1-6, doi: 10.1109/OCEANSE.2019.8867185".
- Capítulo 5, descreve o procedimento experimental da configuração das ligações das bobinas. Este capítulo é baseado no artigo publicado na revista Sensors, "Underwater Energy Harvesting to Extend Operation Time of Submersible sensors." Sensors 2022, 22, 1341. <https://doi.org/10.3390/s22041341> (artigo selecionado como "COVER ISSUE" do volume 22 da revista SENSORS).

Foram utilizadas diversas configurações de ligações das bobinas, de modo obter-se a maior potência. Foram realizados vários testes em laboratório, utilizando uma plataforma oscilante, de forma a avaliar a resposta do sistema a diferentes frequências de movimento. Os resultados obtidos foram analisados e comparados entre si, com o intuito de se selecionar a melhor configuração de ligações das bobinas para o dispositivo em questão.

- Capítulo 6, descreve a simulação numérica utilizando OpenFoam, software livre, para investigar qual a forma geométrica mais adequada, que induza movimento.

Através do mesmo programa, é obtido as forças de arrasto e coeficiente de sustentação, que irão permitir selecionar as massas volúmicas do material a serem utilizadas no fabrico protótipo, de forma a poder-se controlar a flutuabilidade do dispositivo. Foram utilizados diferentes posicionamentos angulares e velocidades, sendo avaliados os resultados de cada um deles. A simulação numérica permitiu também avaliar a influência da forma geométrica do dispositivo nas suas características dinâmicas, nomeadamente no seu comportamento oscilante. Os resultados obtidos foram analisados e comparados entre si.

- Capítulo 7, descrição do fabrico do protótipo e estrutura de ancoragem no leito oceânico. Neste capítulo, é descrito o processo de fabrico do protótipo do dispositivo de *energy harvesting* submerso, bem como a estrutura de ancoragem utilizada. São apresentados os materiais utilizados e os procedimentos adotados para a fabricação dos moldes, bem como a montagem final do protótipo. É apresentado o diagrama das ligações do *datalogger* e das pontes retificadoras, que permitiram a aquisição e conversão dos dados obtidos nos testes realizados.

O processo de fabrico foi realizado com base nos requisitos e especificações definidos nos capítulos anteriores. Foram adotadas técnicas de fabricação que permitiram garantir a qualidade do protótipo e a sua adequação às necessidades do projeto.

- Capítulo 8, apresenta os resultados dos testes do gerador no mar, zona da Apúlia e no rio Cávado. Este capítulo é baseado no artigo submetido na revista *Renewable Energy*, da Elsevier, "Experimental Characterization of a Low-Cost Linear Electromagnetic Generator in Submerged Nearshore Shallow Waters"

Neste capítulo, são apresentados os resultados dos testes realizados com o dispositivo de *energy harvesting* submerso no mar, na zona da Apúlia, e no rio Cávado. Os testes foram realizados de acordo com os procedimentos previamente definidos, utilizando as configurações de ligações das bobinas selecionadas e a forma geométrica do dispositivo definida na simulação numérica.

- Capítulo 9, é apresentado as conclusões e trabalho futuro.

Após a implementação do protótipo em questão, verificou-se que este foi capaz de cumprir os requisitos iniciais estabelecidos. Contudo, é importante destacar que ainda há margem para otimização, sobretudo no que diz respeito ao corpo externo do dispositivo. Neste sentido, sugere-se que sejam realizados estudos adicionais com vista a melhorar o desempenho do protótipo em ambientes fluviais.

Capítulo 2

Estado da Arte

No presente capítulo, é apresentado a revisão da literatura dos tópicos mais importantes e relacionados com esta tese doutoramento. Este capítulo apresenta uma visão geral sobre *energy harvesting* de dimensões reduzidas usadas no oceano. As diversas configurações e materiais utilizados, são apresentados nos subcapítulos seguintes. Por último, é dado uma especial atenção aos geradores lineares eletromagnéticos utilizados no mar ou em outros contextos e as suas possíveis configurações e arquitetura.

2.1 Energy Harvesting

Pode-se afirmar que *energy harvesting*, produção de energia ou conversão de energia é um processo que permite transformar a energia ambiente disponível, em energia elétrica. O princípio é idêntico à energia renovável que se obtém em escala maior, por exemplo através da energia eólica, solar ou hidráulica, mas numa escala muito reduzida. Enquanto o objetivo da produção em larga escala é na ordem dos MW de potência, a colheita de energia ou *energy harvesting* refere-se geralmente a micro ou mW de potência, ou seja, uma produção de energia a uma escala muito reduzida. A *energy harvesting* tem motivado o estudo e desenvolvimento de vários sistemas, com o objetivo de fornecer energia a dispositivos eletrónicos de baixo consumo, como por exemplo os sensores de monitorização, em que normalmente a fonte de alimentação são baterias. Estas baterias têm um limite de energia e terão de ser substituídas ou recarregadas novamente, sendo uma desvantagem nas zonas de difícil acesso onde os sensores tenham sido colocados ou obrigando que no sistema dos sensores, exista acesso fácil às baterias, que poderá comprometer o desempenho ou mesmo não ser possível, como por exemplo nos sensores revestidos com materiais que garantem a estanquicidade.

Os objetivos dos sistemas de *energy harvesting* é a de substituir as baterias ou aumentar a sua autonomia, podendo esse fornecer energia no tempo de vida útil dos sensores e ser embutido ou adaptado onde possa ter melhor desempenho.

Um dos aspetos importantes a considerar, é de que o dispositivo de produção de energia não acaba no sistema em si, será necessário converter a energia por forma que possa ser utilizado pelos sensores ou outros dispositivos eletrónicos. Este condicionamento de energia tem por vezes um impacto sobre o desempenho do gerador e, portanto, os sistemas de produção de energia devem ser considerados numa visão holística considerando todos os parâmetros essenciais como um todo.

A captação de energia do ambiente, com particular ênfase no meio marítimo, com vista à sua aplicação em dispositivos de reduzidas dimensões, pode ser concretizada por intermédio de diversas fontes de energia. Entre estas, destacam-se a energia cinética, que converte o movimento ou vibrações em energia elétrica, as fontes térmicas, que se baseiam na variação dos gradientes térmicos, a energia solar, que pode ser convertida em energia elétrica através da tecnologia fotovoltaica, e a radiação eletromagnética.

O dispositivo utilizado deve capturar a energia que de outra forma seria desperdiçada no ambiente. A tese irá incidir na conversão da energia cinética em elétrica, pelo que iremos abordar mais detalhadamente estes sistemas.

Existem três mecanismos básicos para converter a energia cinética em elétrica: piezoelétrico, eletrostático e eletromagnética.

A produção de energia por piezoelectricidade é um processo de conversão de energia mecânica em energia elétrica, que ocorre quando um material piezoelétrico é submetido a uma deformação mecânica. Um material piezoelétrico é capaz de gerar uma carga elétrica quando é deformado, torcido ou comprimido. Essa carga elétrica pode ser armazenada e usada de acordo com a finalidade que se pretende.

A recolha de energia por piezoelectricidade é amplamente utilizada em aplicações onde existem vibrações ou movimentos, como em estruturas de pontes, turbinas eólicas, movimento de fluidos, veículos e edifícios. O movimento ou a vibração dessas estruturas, ao ser convertido em energia elétrica, pode ser utilizado para alimentar sensores de monitorização, dispositivos sem fio e outros equipamentos eletrónicos. É importante destacar que, por vezes, os mecanismos básicos podem ser combinados para criar sistemas híbridos de *energy harvesting*.

A geração eletrostática consiste em dois condutores separados por um dielétrico (ou seja, um condensador), que se movem um em relação ao outro. À medida que os condutores se movem, a energia armazenada no condensador modifica-se, proporcionando assim o mecanismo de conversão de energia mecânica em elétrica. Para este tipo de mecanismo, iremos referir os dispositivos triboelétricos, uma vez que a recolha de energia triboelétrica é um processo de conversão de energia mecânica em energia elétrica, que ocorre quando materiais de diferentes propriedades eletrostáticas entram em contato e depois são separados. Durante o contato, os eletrões são transferidos de um material para outro, criando uma diferença de potencial elétrico entre os materiais. Quando os materiais são separados, essa diferença de potencial gera uma corrente elétrica, que pode ser recolhida e usada para alimentar dispositivos eletrónicos.

A recolha de energia por eletromagnetismo é um processo de conversão de energia que utiliza campos eletromagnéticos para gerar corrente elétrica num circuito elétrico. Esse processo é baseado na lei indução eletromagnética de Faraday, que estabelece que uma variação do fluxo magnético num circuito elétrico produz uma tensão elétrica induzida. Por exemplo, ao colocar uma bobina de fio condutor próximo de uma fonte de campo magnético variável, é possível gerar uma tensão elétrica que pode ser armazenada num condensador ou bateria e usada para alimentar dispositivos eletrónicos. Essa técnica é utilizada em diversas aplicações, como em sensores de baixo consumo, dispositivos portáteis, redes de sensores sem fio, sistemas de monitorização remota. A produção de energia por eletromagnetismo é uma forma sustentável de obter energia elétrica a partir de fontes ambientais.

O foco da tese, é direcionada para sistemas *energy harvesting* aplicadas no oceano, sendo o

estado da arte mais aprofundado nos sistemas piezoelétricos, eletromagnéticos, misto e triboelétricos.

2.2 Sistemas piezoelétricos

2.2.1 Aplicações não marítimas

O fenómeno dos materiais piezoelétricos foi encontrado pelos irmãos Pierre e Jacques Currie em 1880. Verificaram que se fosse aplicado uma pressão a um cristal quartzo, este gerava uma carga elétrica. Esta propriedade, designada por piezoelectricidade é devido à ausência de centro de simetria no cristal. Não havendo centro de simetria, o ião positivo e negativo movimenta-se um em relação ao outro, produzindo assim a polarização. Significa que quando é aplicada uma pressão, esta polarização irá gerar um campo elétrico, devido à deformação associada no cristal. Aplicando esta propriedade do material num dispositivo de produção de energia, podemos afirmar que se irá dar a transformação da energia absorvida pelo transdutor piezoelétrico do ambiente para tensão elétrica, podendo esta ser usada para carregar baterias ou alimentar um dispositivo eletrónico [1], a figura 2.1, representa uma das formas de utilização do material piezoelétrico.

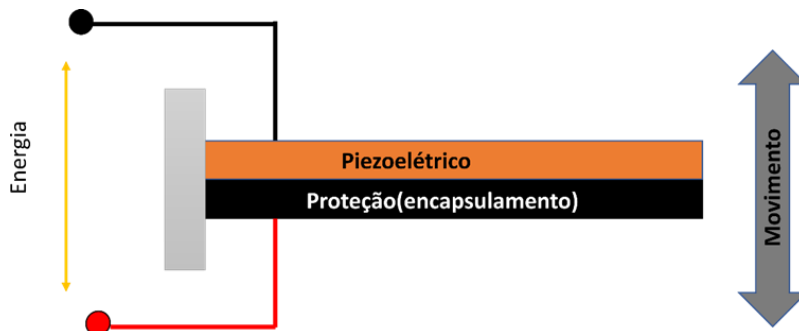


Figura 2.1. Piezoelétrico com proteção/encapsulamento sujeito a um movimento. Fixação num dos lados, para permitir a deformação do piezoelétrico.

Nas últimas décadas, produzir energia através do movimento humano [2] e de animais [3], tem merecido atenção de muitos investigadores assim como também a sua aplicação em outras áreas. Existem alguns materiais que podem ser aplicados, tais como *Piezoelectric Zirconate Titanate* (PZT) e *Piezoelectric Polymer Polyvinylidene Fluoride* (PVDF), para fabrico dos dispositivos de produção de energia piezoelétricos (PEH).

A produção da energia por PEH, necessita frequências elevadas de acordo com tabela 2.1.

Tabela 2.1. Comparação das potências obtidas em PEH com sistema de viga fixa num lado, tabela retirada de [1], com permissão Creative Commons CC License BY-NC-ND 4.0.

Mecanismo/Sistema	Frequência (Hz)	Carga Elétrica (kΩ)	Potência (mW)
Bi-stable composite PZT plate for broadband energy harvesting	38	—	36,2
PZT energy harvester for pavements	10, 15	20-10	0,88, 11,67
Simply supported plate type PZT layered harvester	≈3000-20000	0,1-20	≈0,00088 -0,125
Multi-layered harvester with PZT, carbon/epoxy and glass/epoxy layers	212-310	23	0,22-0,28
Micropower harvester for gloves	≈60	≈1000	0,011
PZT nanofibers for nanogenerator in soft polymers	≈35	6000	0,00003

Nas figuras abaixo, estão representados alguns exemplos que foram testados com esta opção tecnológica.

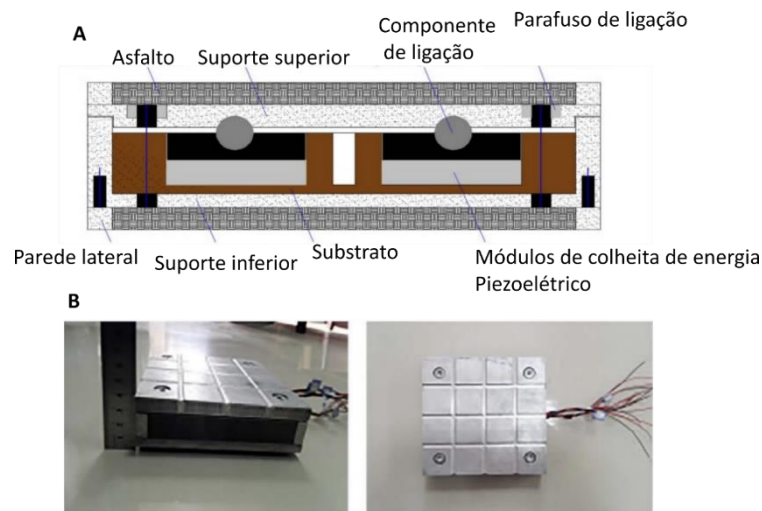


Figura 2.2. Sistema de recolha de energia implementada na via rodoviária. A) Método de montagem, B) Um módulo fabricado. Adaptado de [4], Copyright © 2023, com permissão da Elsevier.

O sistema representado na figura 2.2, produziu 11,67 mW com uma frequência de 15 Hz. Um dispositivo de produção de energia com aplicação de PVDF e uma estrutura de dimetil polissiloxano (PDMS), foi fabricado e testado com capacidade de fornecer 0,0064 μ W a 2 Hz [5], figura 2.3.

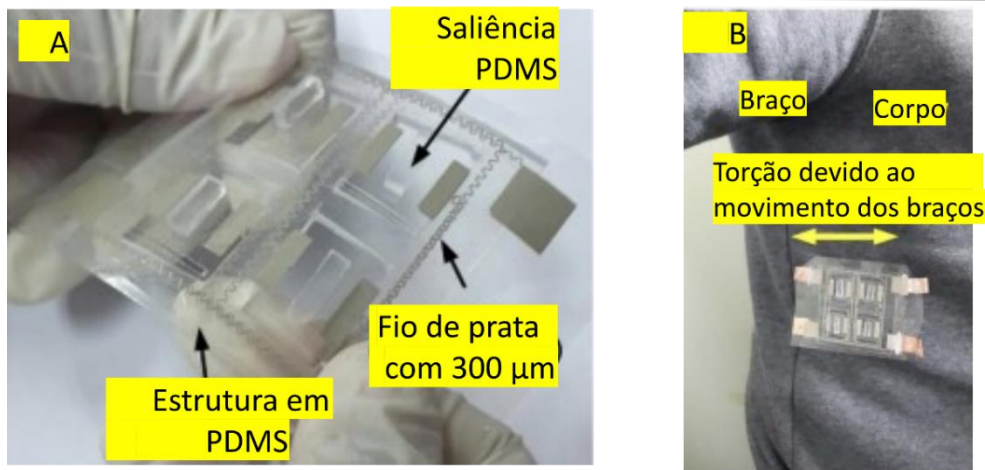


Figura 2.3. A) O PVDF encapsulado em PDMS, B) Zona de teste do dispositivo de colheita de energia. Adaptado de [5], Copyright © 2023, com permissão da IOP.

2.2.2 Aplicações marítimas

No âmbito das aplicações marítimas, existem várias soluções que foram implementadas.

Houve investigadores que optaram por aplicar PEH à superfície do oceano, enquanto outros optaram por aplicar submersos.

2.2.2.1 Produção de energia à superfície do oceano

Uma das áreas que tem sido investigado é aplicação do PEH à superfície, aproveitando as ondas para produção de energia. O investigador Hidemi Mutsuda et al. [6], em 2017 investigou o uso de um piezoelétrico flexível para produzir energia no oceano. O dispositivo fabricado, com dimensões de 500 mm de comprimento, 100 mm de largura e 10 mm de espessura (com a proteção), foi testado em dois locais diferentes, em oceano aberto, numa boia e numa zona costeira, perto da praia.

O princípio de funcionamento, é a produção da energia através da vibração causada pelas ondas, que neste caso o autor designou como piezoelétrico flexível (FPED), figura 2.4, o dispositivo criado.

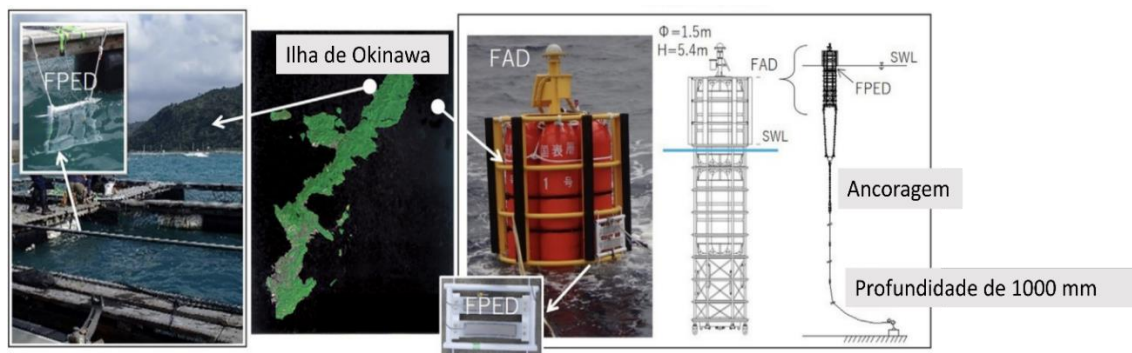


Figura 2.4 . Testes do FPED no oceano. Adaptada de [6], Copyright © 2023, com permissão da Elsevier.

Dos testes efetuados, os autores concluíram que perto da costa, os valores de potência foram significativamente mais baixos do que no alto mar. Obtiveram valores máximos de $0,6 \mu\text{W}/\text{cm}^3$ perto da costa e no alto mar $2,6 \mu\text{W}/\text{cm}^3$, produzindo assim uma potência máxima 500 mW com uma resistência de carga de $1 \text{ M}\Omega$. Dois parâmetros são importantes no sistemas de produção de energia, a tensão máxima obtida porque irão haver quedas de tensão devido à necessidade da retificação da tensão alternada para a tensão contínua e a frequência com que o sistema trabalha para obter essa tensão. Neste sistema, a tensão de pico máxima foi de 6 V e com o sistema a trabalhar entre 0,5 e 2,0 Hz.

Um dispositivo apresentado por Wenzheng Cai et al. [7], produziu em testes no rio, uma potência máxima de 5 mW a uma frequência 0,8 Hz com uma resistência de carga de $750 \text{ k}\Omega$. No artigo não é mencionado as tensões obtidas, na figura 2.5, o dispositivo que foi fabricado e estudado.

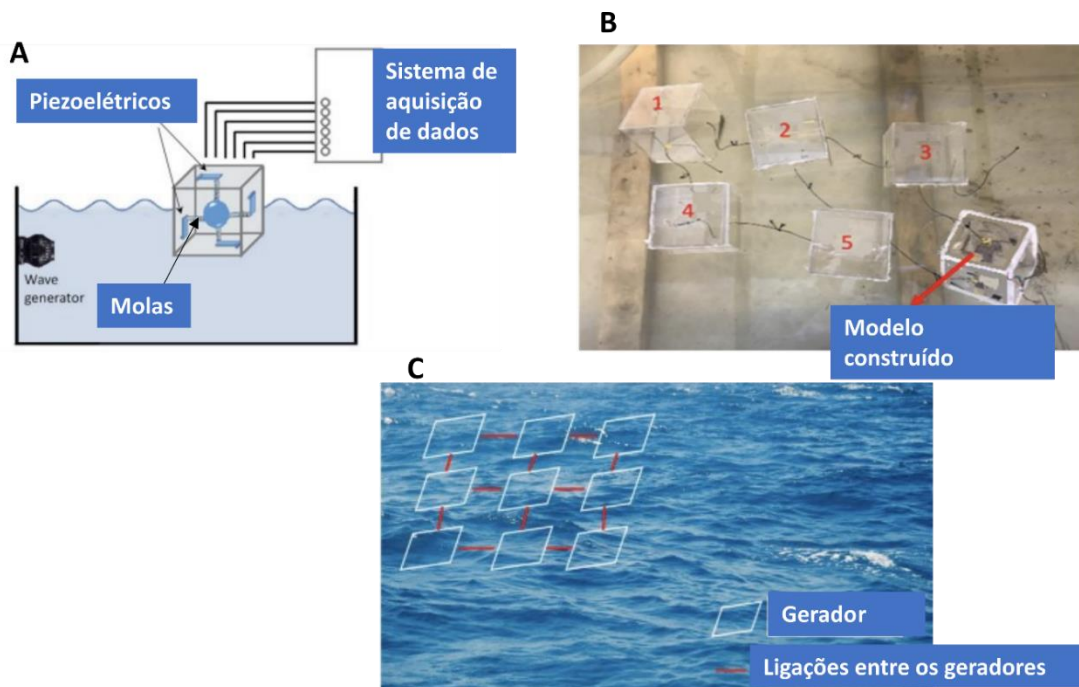


Figura 2.5. A) Estrutura do modelo a ser estudado, B) Protótipo, C) Testes no rio Detroit. Adaptado de [7], Copyright © 2023, com permissão da Elsevier.

De acordo com os mesmos autores, os estudos foram efetuados até 2 Hz, uma vez que a maior parte das ondas estão concentradas nas baixas frequência.

De acordo com Viñolo et al. [8], foi desenvolvido e produzido um gerador que converte a energia das ondas, utilizando discos piezoelétricos. Na figura 2.6, está representado o princípio do funcionamento do dispositivo, duas massas esféricas ligadas por um veio e centradas num eixo sem atrito. A posição 1, da figura é a posição central. O movimento das ondas, irá promover o movimento idêntico ao de um pendulo e os discos piezoelétricos irão sofrer os impactos das massas esféricas representados pela posição 2 e 3. O movimento será efetuado no sentido contrário ao impacto das

ondas.

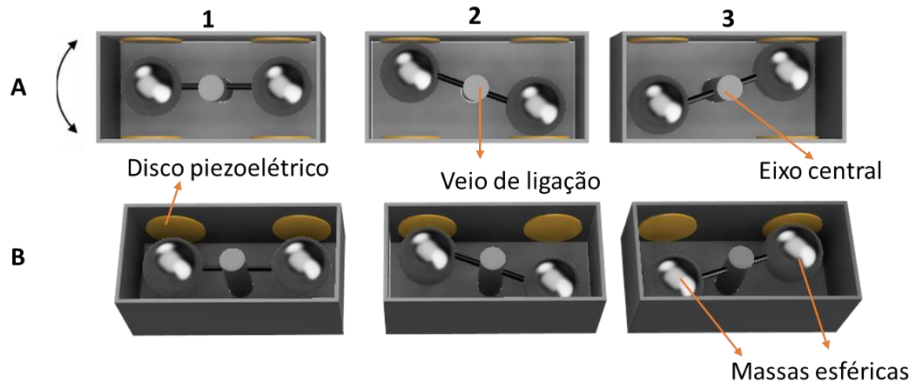


Figura 2.6. A) Esquema do funcionamento, posição 1, 2 e 3, B) Vista em perspectiva.

Com o este protótipo, a trabalhar a uma frequência entre 1-2 Hz, foi possível atingir picos de potências de 2,99-15,98 mW, associado a uma resistência de carga de 100 Ω . Estes valores foram obtidos em testes experimentais no laboratório. O protótipo quando foi testado no mar, alcançou uma potência de 9 mW, num dia de mar em estado de serenidade.

Segundo os autores Arbie et al. [9], usando 90 discos piezoelétricos, num dispositivo com as dimensões de 200 cm de altura, 110 cm de largura e 110 cm de comprimento, obtiveram uma tensão média de 29,85 V e uma potência máxima de 59,92 mW, figura 2.7.

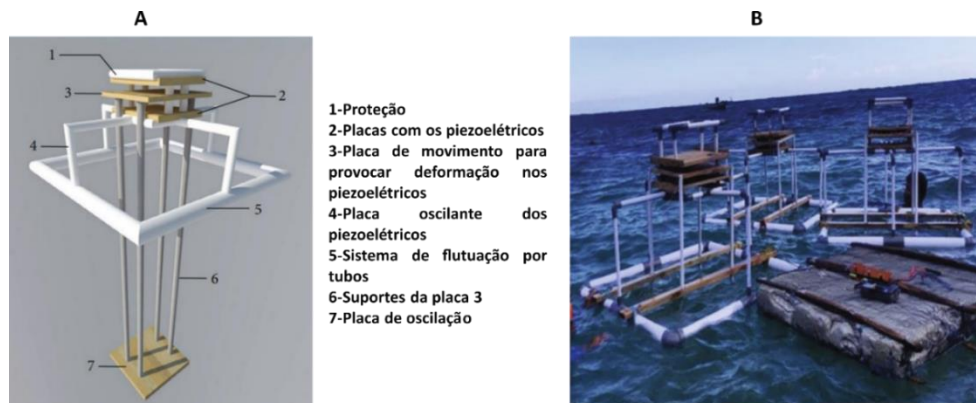


Figura 2.7. A) Desenho do modelo, B) Protótipo em testes. Adaptada de [9], com permissão Creative Commons CC License BY-NC-ND 4.0.

A placa de oscilação movimenta-se no sentido vertical, assim como também a placa oscilante dos piezoelétricos, permitindo a deformação e consequente produção de energia.

Como último exemplo desta tecnologia, Yeong-min Na et al. [10], apresentou um pequeno dispositivo de produção de energia através da oscilação das ondas do mar, com produção média de 0,33 mW e uma tensão média 2,61 V. Realizaram testes com um condensador e ao fim de 30 minutos de funcionamento, este atingiu uma tensão de 3,39 V, figura 2. 8, o esquema do dispositivo e forma de funcionamento.

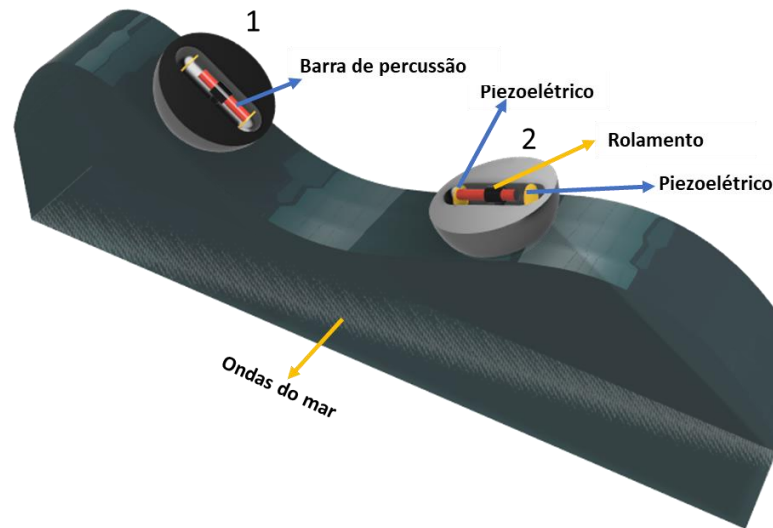


Figura 2.8. Esquema de funcionamento do dispositivo, posição 1 impacto da barra no disco piezoelétrico direito, posição 2 impacto no disco piezoelétrico esquerdo.

Foi utilizado uma impressora 3D para o fabrico da proteção do corpo em biopolímero ácido poliláctico (PLA) e o leme em acrilonitrila butadieno estireno (ABS). A barra de percussão foi fabricada em aço inox SUS304 e foram utilizados piezoelétricos (PTZ), neste caso o PTZ-4.

2.2.2.2 Produção de energia em ambiente submerso

Outros dispositivos, com a mesma tecnologia foram estudados para serem aplicados submersos no oceano.

Foi desenvolvido um modelo matemático por X.D. Xie et al. [11] para um dispositivo submerso a 2 metros com a possibilidade de fornecer uma potência média de 30 W, utilizando piezoelétricos montados numa viga de 1,7 m de comprimento. Para produzir a potência mencionada, existiam algumas restrições:

- Comprimento da onda deverá ter 21,2 m;
- Altura da onda 4 m;
- O dispositivo deverá estar localizado a 2 m da superfície;
- Comprimento de cada barra (l) que contém os piezoelétricos deve ser de 1,2 m;
- O comprimento total dos piezoelétricos montados deverá atingir $\frac{2}{3} l$ e a sua largura deverá ser de 1 m;
- A largura do piezoelétrico terá de ser 0,05 m.

Na figura 2.9, o dispositivo proposto.

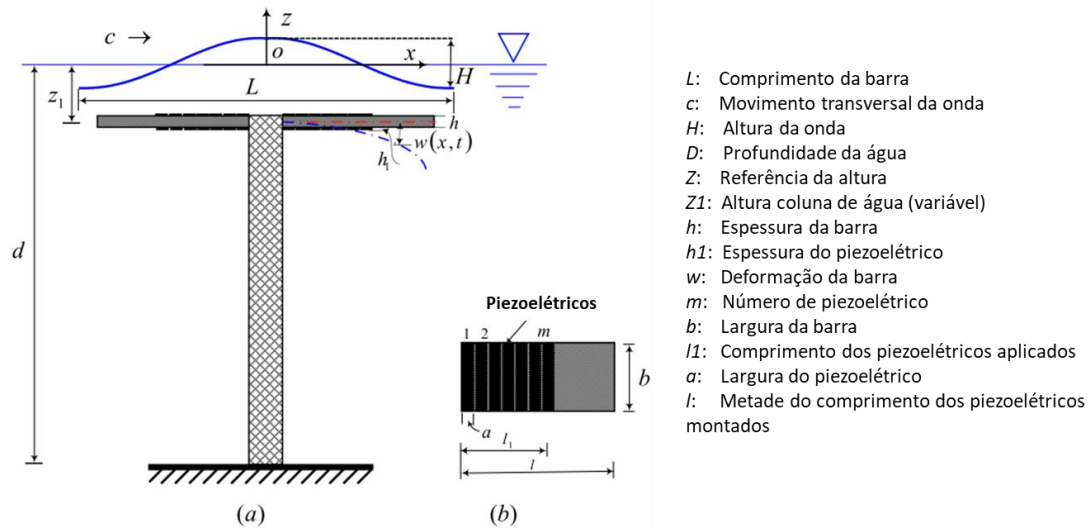


Figura 2.9. a) Dispositivo de produção de energia, b) Barra de montagem dos piezoelétricos, adaptado de [11], Copyright © 2023, com permissão da Elsevier.

Para outras configurações, obtiveram-se valores mais baixos de potência, desde 2,5 mW. Após uma análise das dimensões deste dispositivo, pode-se afirmar que as dimensões são consideráveis, assim como a necessidade de ondas de altura significativa para atingir a potência máxima.

Inspirado pela cauda do peixe, Guangwei Shi et al. [12] propôs um dispositivo que funcionava com a corrente da água através da indução da variação do fluxo, criando vórtices.

Na figura 2.10, o sistema que foi proposto.

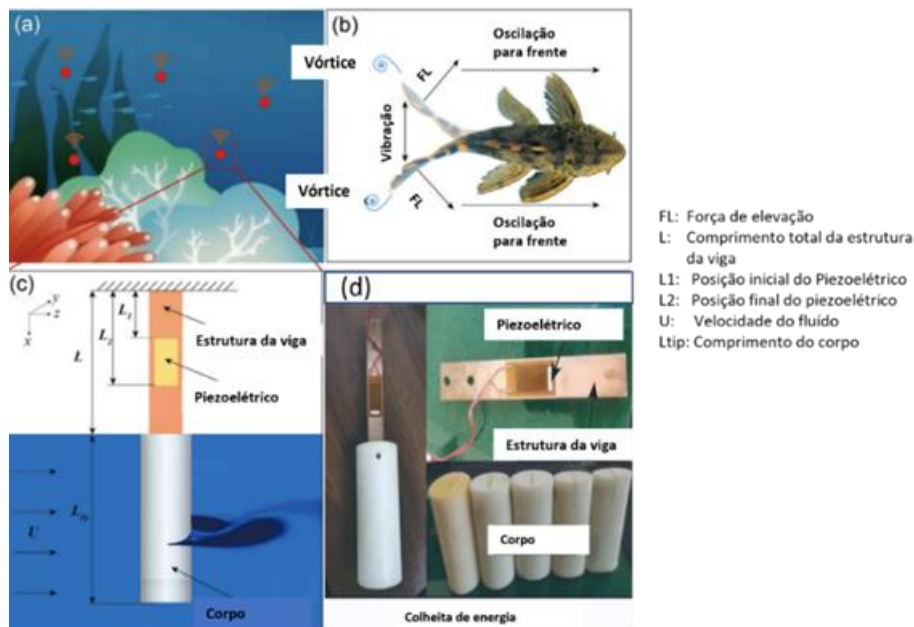


Figura 2.10. a) Aplicação da colheita de energia, b) Modelo de inspiração, c) Montagem do dispositivo, d) Protótipo. Adaptada de [12], Copyright © 2023, com permissão da Elsevier.

De acordo com autor, a uma velocidade da água a $0,6 \text{ ms}^{-1}$ e uma resistência de carga de

$3 \times 10^5 \Omega$, obteve-se uma potência máxima 3,6 mW. A mínima potência obtida foi de 0,6 mW a uma velocidade da água de $0,4 \text{ ms}^{-1}$ com uma resistência de carga de $1,4 \times 10^5 \Omega$. A variação da massa do corpo, assim como o do seu diâmetro, irá produzir valores diferentes de potência. Neste protótipo, o comprimento da viga utilizado foi de 100 mm, a do corpo é de 100 mm e o seu comprimento total 200 mm.

Também com inspiração na natureza, Feng Qian et al. [13], apresentou um dispositivo de produção de energia para alimentar a telemetria dos animais marítimos, tendo como inspiração o peixe rêmora, que nada sempre junto ao tubarão. A produção da energia é obtida através da oscilação do animal marítimo, sendo o dispositivo de produção instalado por exemplo na barbatana de um tubarão. Efetuaram testes num tanque de água, com velocidades de água entre $0,20\text{-}0,95 \text{ ms}^{-1}$. A máxima potência média obtida foi 1,5 mW a uma frequência de oscilação de 1,6 Hz. Para a produção de energia foi aplicado um piezoelétrico composto de macro fibra (MFC), sendo este muito flexível. Na figura 2.11, está identificado a posição onde foi colocado o dispositivo de produção de energia, na barbatana em conjunto com o TAG (etiqueta de identificação).

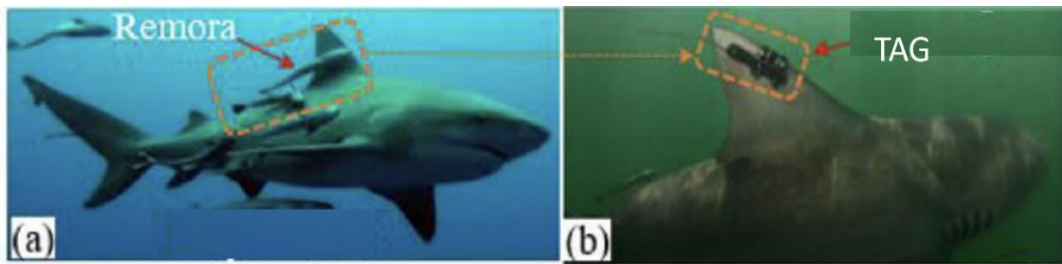


Figura 2.11. a) Rêmora, bio inspiração para o sistema de fixação, b) Localização TAG e dispositivo de produção de energia. Adaptado de [13], Copyright © 2023, com permissão da Elsevier.

Na figura 2.12, sistema proposto para produção de energia.

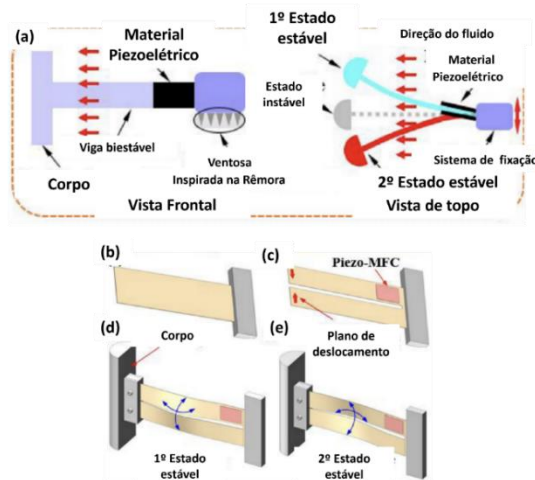


Figura 2.12. a) Vista frontal e topo do sistema proposto, com uma ventosa inspirada na rêmora para fixação no animal marítimo, b-c) Piezoelétrico MFC montado na viga, d) 1º estado estável de movimento, e) 2º estado estável de movimento. Adaptada de [13], Copyright © 2023, com permissão da Elsevier.

Com a utilização de discos PTZ, os autores Daniel M. Toma et al. [14], propuseram um dispositivo para funcionar submerso. Efetuaram testes num tanque para determinar a potência produzida, figura 2.13.

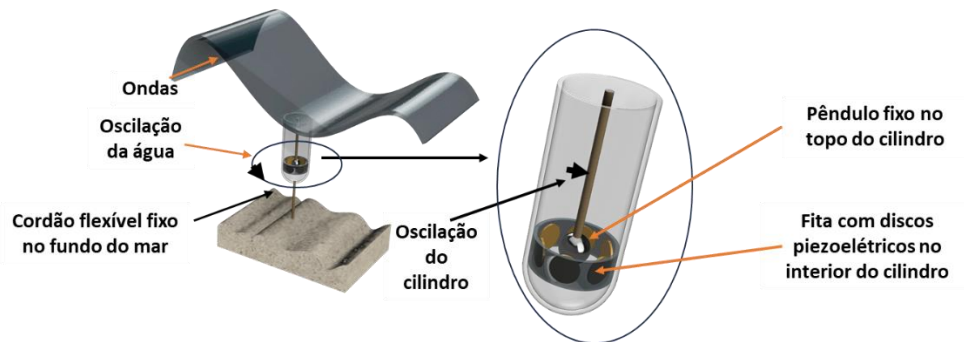


Figura 2.13. O sistema flutua submerso. Dentro do cilindro existe um pêndulo que se movimenta.

As oscilações originadas pelas ondas, assim como fluxo da água, causam o movimento da massa do pêndulo e o seu impacto nos discos dos piezoelétricos, produzem assim energia. Este sistema, produz picos de tensões de 169 V e uma potência média de 2,2 μW , com uma resistência de carga de 1 M Ω .

2.3 Sistemas triboelétricos

É uma área de investigação emergente, dado haver muitos estudos e aplicações para utilização geral e aplicações marítimas.

A produção de energia por dispositivos triboelétricos tem sido explorada como uma fonte de energia alternativa para alimentar dispositivos eletrónicos de baixa potência, sensores, e outros dispositivos que possam ser alimentados por energia produzida a partir do movimento humano, vento ou outras fontes ambientais. Além disso, esta tecnologia é de baixo custo e pode ser facilmente integrada em dispositivos existentes. Alguns exemplos desta tecnologia serão descritos, nas seções seguintes.

2.3.1 Aplicações não marítimas

Relativamente a esta tecnologia, existem várias aplicações mencionadas na literatura. Os autores Rubaiyet Lftekharul Haque et al. [15], apresentaram um dispositivo aplicado no interior de um tubo de gás, constituído por dois módulos triboelétricos, que produziu uma potência média 1,64 mW com uma resistência de carga de 16,7 M Ω e com uma velocidade do fluido de $9,8 \pm 0,2 \text{ ms}^{-1}$, figura 2.14.

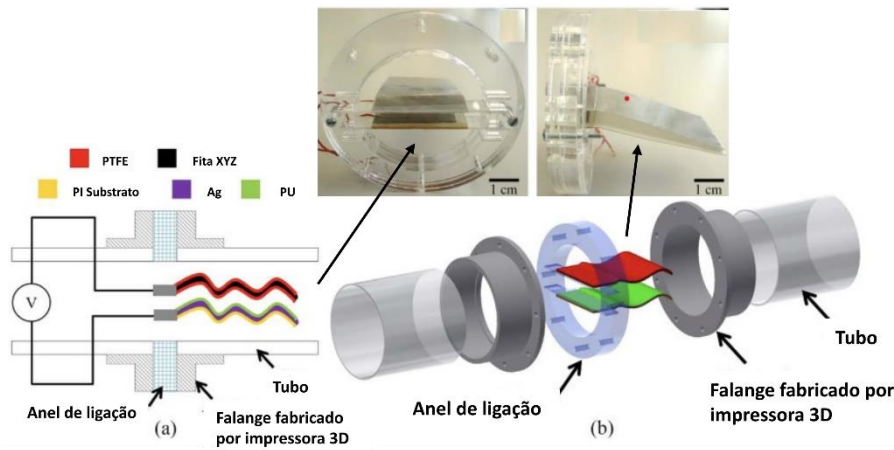


Figura 2.14. a) Vista transversal do gerador triboelétrico no interior do tubo com especificação do material aplicado, b) Vista tridimensional dos componentes. Adaptada de [15], Copyright © 2023, com permissão da IOP.

Este gerador triboelétrico consiste em duas camadas triboelétricas com diferentes afinidades de carga, montadas uma de frente para a outra. Os elétrodos correspondentes são coletores de carga. O politetrafluoretileno (PTFE) foi selecionado como camada triboelétrica negativa devido à sua forte afinidade de carga negativa. A camada condutora de fita adesiva de dupla face de eixo XYZ com redes 3D de fibras eletricamente condutoras, foram usadas como elétrodo para a camada de PTFE. A fita XYZ tem uma forte adesão com a superfície de PTFE permitindo suportar a vibração de alta frequência sem delaminação. Como a fita XYZ é macia e muito flexível, não endurece com a estrutura do PTFE após a integração.

Como um triboelétrico positivo, a camada tem dois materiais flexíveis, a saber, poliuretano (PU) devido à sua alta afinidade de carga positiva, e um filme prata (Ag) condutor e flexível.

Empregando outro material como triboelétrico negativo, Polyvinylidene Fluoride (PVDF) e como triboelétrico positivo, uma fita de cobre com pasta prata, Yang Fenge et al. [16], fabricaram um gerador triboelétrico em forma de folha, que em condições reais, produziu uma tensão de 6,2 V e 0,71 μA de corrente, fornecendo uma potência 4,4 μW . Nos testes laboratoriais, obtiveram tensões de 150 V e 70 μA de corrente, com uma velocidade do ar de 7 ms^{-1} . Com algumas alterações na configuração, obtiveram 1000 V de tensão e 60 μA de corrente. Figura 2.15, o dispositivo de produção de energia.

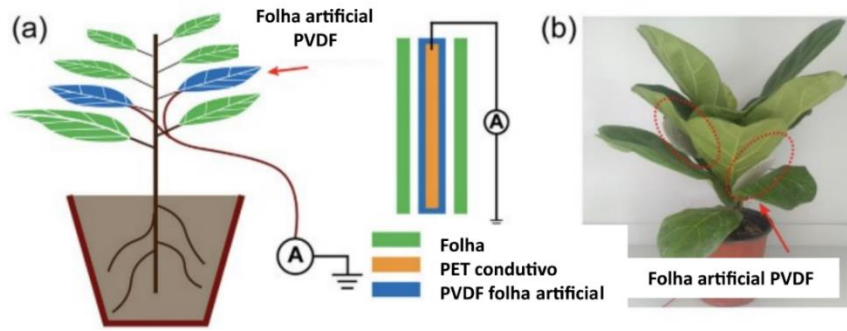


Figura 2.15. a) Esquema do gerador tribológico baseado numa folha de planta viva, b) Fotografia da planta e gerador. Adaptada de [16], Copyright © 2023, com permissão da Elsevier.

2.3.2 Aplicações marítimas

No âmbito das aplicações marítimas, os triboelétricos nanogeradores (TENG) também podem ser aplicados quer à superfície ou submersos no oceano, como os PEH.

2.3.2.1 Produção de energia à superfície do oceano

Xi Liang et al. [17], apresentou um dispositivo esférico que produz energia através das ondas do mar. Foram realizados testes num tanque de ondas com frequências entre 0,6-1,25 Hz e uma amplitude de onda 10 cm. Um dos problemas que autor reportou é de que os TEG, se funcionarem com frequências muito baixas irá gerar uma potência residual, pelo que é necessária amplificar essa frequência através de molas para armazenar o potencial elástico e construir estruturas semelhantes aos pêndulos capazes de oscilação contínua, conforme mencionado na figura 2.13. A figura 2.16, está representado o gerador TENG testado.

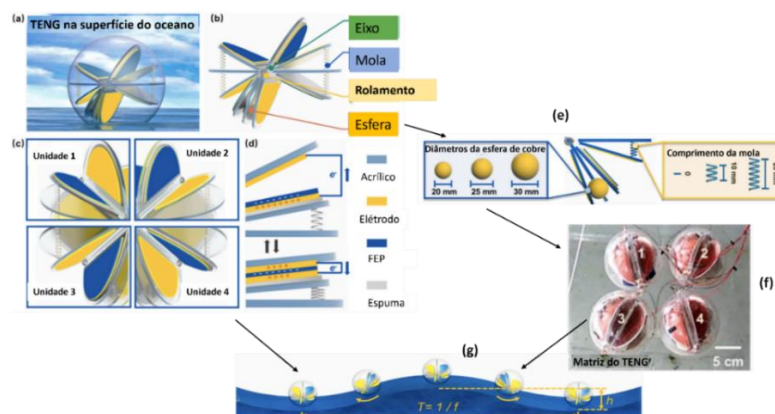


Figura 2.16. a) Forma esférica do TENG, b) Componentes, c) Posição de cada esfera numa matriz composta por 4 esferas, d) Materiais e forma de funcionamento, sendo utilizado um filme de Etileno Propileno Fluorado (FEP), e) Diâmetro das esferas utilizadas nos testes, f) Matriz de quatro esferas fabricadas e utilizados no tanque de água, g) Forma de funcionamento nas ondas. Adaptada de [17], Copyright © 2023, com permissão da Elsevier.

Foi mencionado pelos autores, que a produção com tensões altas e correntes muito baixas, torna difícil a utilização do TENG. Para solucionar esta limitação, foi aplicado um circuito de excitação de carga (CEC), que permitiu obter potências de pico mais elevadas, cerca de 16,6 mW, com 23,3 mA a 1 Hz, com uma resistência de carga de 10 M Ω , figura 2.17.

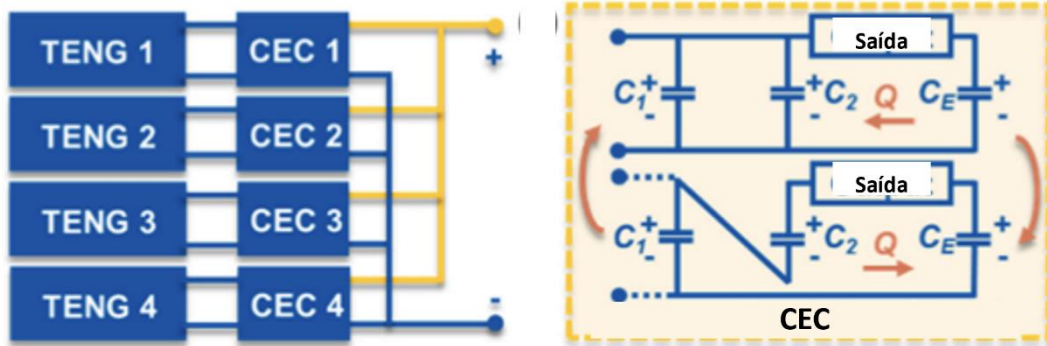


Figura 2.17. Circuito de excitação de carga (CEC), $C_1=C_2=10\mu\text{F}$, $C_E=1\text{ mF}$. Adaptada de [17], Copyright © 2023, com permissão da Elsevier.

No entanto a utilização deste circuito tem algumas restrições, que se não forem cumpridas o irá danificar, sendo uma delas, de ser pré-carregado durante 35 minutos pelos TENG ou por carregamento externo.

Os autores, Ri Ouyang et al. [18], desenvolveram um dispositivo TEG, baseado na utilização de partículas de cobre. Efetuaram testes com 5 unidades ligadas em paralelo, figura 2.18.

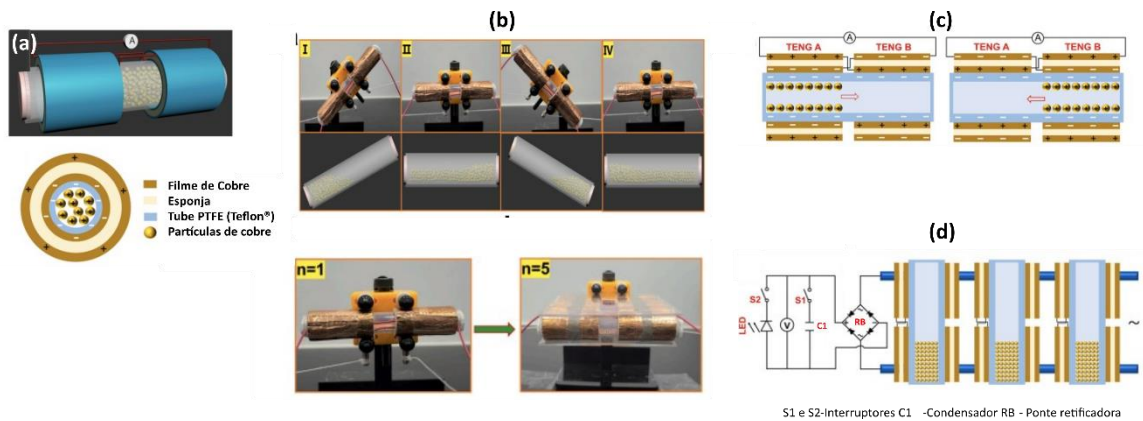


Figura 2.18. a) Desenho do TENG, figura de cima é o conjunto, figura abaixo é um corte da secção com os materiais que constituem o gerador, b) Na figura superior, ensaio de um TEG para simular as ondas, com correspondente visualização do deslocamento das partículas, figura inferior, ensaio com 5 TENG em paralelo, c) Forma de deslocação das partículas, d) Ligação em paralelo dos 5 TENG, com tratamento da onda de corrente alterna (AC). Adaptado de [18], Copyright © 2023, com permissão da Elsevier.

Nos testes laboratoriais, um único dispositivo de produção de energia TENG, obteve uma tensão de 125V, 0,96 μA de corrente e uma carga de 46 nC. Uma corrente de pico 7,73 μA foi obtida experimental com 10 TENG, atingindo uma carga de 388 nC, permitindo alimentar 210 LEDs em paralelo. Estes valores foram obtidos com uma frequência 0,5 Hz e com uma resistência de carga

de 10 k Ω . Efetuaram também testes nas ondas de um lago com a mesma configuração, figura 2.19, e conseguiram alimentar 100 LEDs.

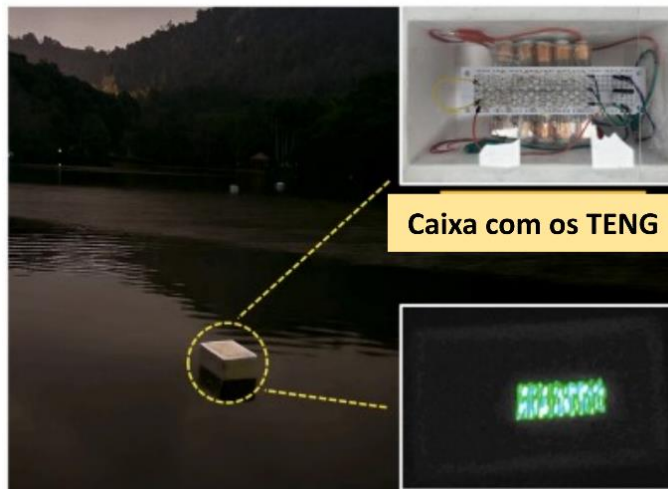


Figura 2.19. Testes realizados nas ondas de um lago. Adaptada de [18], Copyright © 2023, com permissão da Elsevier.

Outra configuração para produção de energia com TENG, foi proposta por Inkyum Ki et al. [19].

O corpo do dispositivo com um volume de 108,2 cm³, foi fabricado através de uma impressora 3D, figura 2.20.

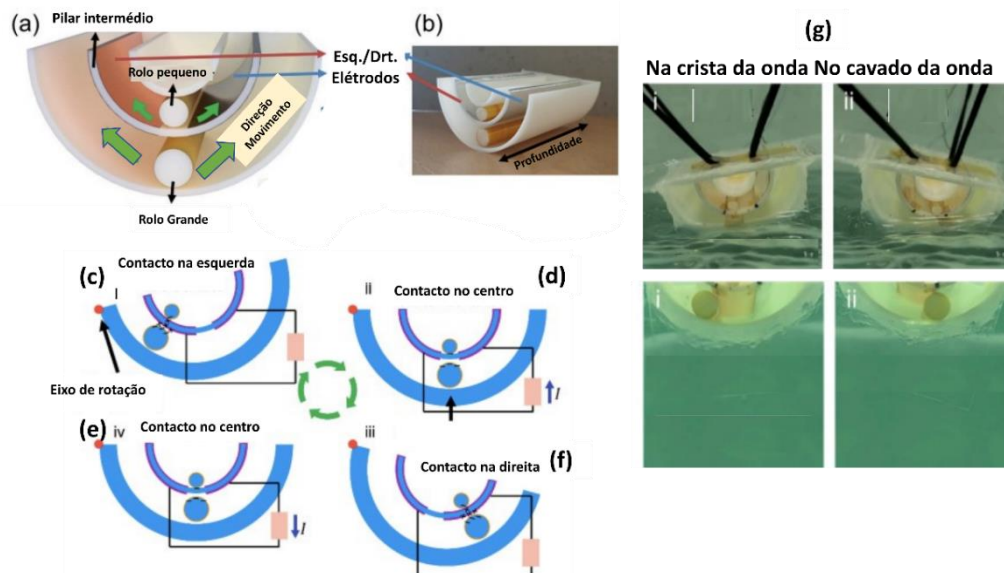


Figura 2.20. a) Corpo principal, com os dois rolos que irão produzir energia com os movimentos das ondas, b) Vista em profundidade, c) Movimento para esquerda, d) e e) Recuperação do movimento para o centro, f) Movimento para a direita, g) Ensaio no tanque de água. Adaptada de [19], com permissão Creative Commons CC License BY-NC-ND 4.0.

O dispositivo foi testado num tanque de água com frequência de ondas de 1-1,25 Hz e com uma resistência de carga de 200 M Ω , alcançando uma tensão de 27,6 V e uma corrente de 102,5 nA.

Segundo os autores foi produzido uma densidade de potência de $69,34 \mu\text{W m}^{-2}$.

2.3.2.2 Produção de energia em ambiente submerso

De acordo com Yan Wang et al. [20], muitas pesquisas têm se concentrado na captação de energia através das ondas e não da mesma forma, sobre a captação de energia das correntes oceânicas ou submersas, que na sua opinião não tem sido sistematicamente conduzido. A maioria das TENGs de produção de energia relatadas incidem a sua utilização na superfície da água [17–20].

O autor, baseado nos trabalhos publicados por Zhao et al. [21] e Wang Y. et al. [22] sobre a utilização do TEG para converter a energia eólica em elétrica (variando consoante a velocidade, sendo também as variações da corrente da água comum nos oceanos), apresentou um dispositivo para ser aplicado submerso e aproveitar as correntes oceânicas, figura 2.21.

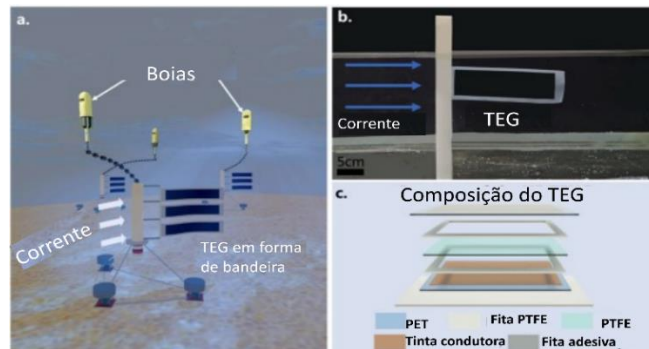


Figura 2.21. a) Dispositivo submerso, b) Ensaio no tanque de água, c) Composição do TEG com material Tereftalato de polietileno (PET) e material PTFE. Adaptada de [20], Copyright © 2023, com permissão da Elsevier.

Com os ensaios efetuados em laboratório, os autores obtiveram um pico de potência de $52,3 \mu\text{W}$ a uma velocidade de $0,461 \text{ ms}^{-1}$, com seis unidades TEGs ligados a pontes retificadoras individuais, e posteriormente ligados em paralelo com uma resistência de $10 \text{ M}\Omega$. Foi possível carregar um condensador de $100 \mu\text{F}$ até 3 V em 100 s .

Áreas ocupadas na superfície para produção de energia, podem afetar ou restringir a navegação de navios assim como afetar algumas espécies marítimas, segundo Xinxian Wang et al. [23]. Tendo em conta este impacto no meio ambiente, a estratégia foi investigar e fabricar um dispositivo que trabalhe em zonas subaquáticas, que é uma área a não ser ignorada. No entanto, a energia subaquática tem as características de baixa frequência e movimentos irregulares. Em mente com esta restrição, os autores afirmaram que os TENGs têm vantagens exclusivas na produção de energia de baixa frequência com o potencial de se tornar uma opção tecnológica para captação de energia subaquática. Propuseram um dispositivo inspirado nas asas de uma borboleta para produção de energia de forma multidirecional, no qual é composto por uma camada com

lâminas biônicas e unidades geradoras. Obtiveram tensões na ordem dos 400 V, uma corrente de 2,9 μA e uma carga 0,31 μC a uma frequência de 1,25 Hz. O dispositivo esteve imerso na água por um período de 45 dias sem ser afetado as capacidades de produção de energia, sendo um bom indicador para o seu desempenho no ambiente submerso, figura 2.22.

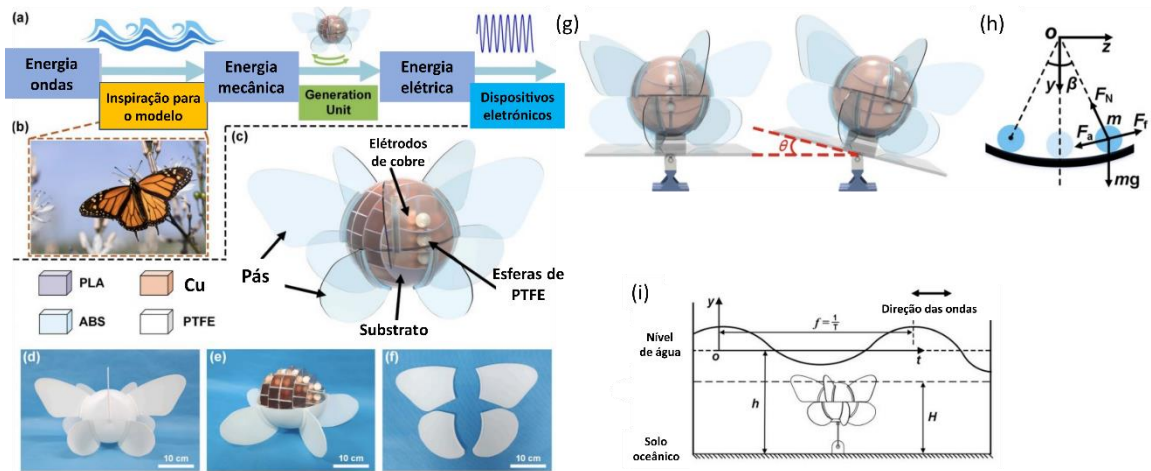


Figura 2.22. Visão geral do TENG, a) Visão do fluxo energético, b) Borboleta como fonte de inspiração para o corpo do TENG, c) Componentes do TENG, pás superiores e inferiores com ângulo de 36° entre elas, unidade de produção de energia constituído por cobre e esferas de PTFE com 9 mm de raio, d-f) Modelo construído, g) Bancada de ensaios para simular as ondas, h) Esquema de como as esferas vão movimentar-se, i) Esquema do ensaio num tanque com altura de 45 cm. Adaptada de [23], Copyright © 2023, com permissão da Elsevier.

Nos testes efetuados, obtiveram um pico de potência de 0,69 mW com uma resistência de carga de 200 M Ω a 1 Hz de frequência. Com um circuito de gestão de potência, foi possível acionar 240 LEDs e um termómetro digital comercial.

Convém salientar que aplicações com TENGs submersos, existem poucas e algumas são variantes do trabalho realizado por Liang X et al. [17], mas aplicados submersos.

2.4 Sistemas eletromagnéticos

2.4.1 Aplicações não marítimas

A conversão da energia cinética em elétrica, pode ser efetuada por dispositivos eletromagnéticos com uso de geradores lineares eletromagnéticos ou geradores rotativos eletromagnéticos, fabricados de acordo com a ambiente onde serão aplicados.

As utilizações de geradores rotativos no oceano, para captação do vento ou correntes, conseguem potências na ordem dos kW a MW [24,25]. No entanto no âmbito desta tese, pretendemos escalas na ordem W a mW, isto é reduzir a escala da tecnologia e mesmo assim poder alimentar dispositivos de baixo consumo, como é o caso dos sensores. Dois exemplos serão

apresentados para uma escala reduzida.

Num artigo de Mehdi Niroomand et al. [26], foi proposto um micro gerador eletromagnético rotativo, que converte o movimento humano em energia elétrica. O dispositivo com diâmetro de 50 mm, um volume de 25 cm³ e utilizando 32 magnetos de 5 mm de diâmetro, associado a uma resistência de carga de 10 Ω , obtiveram uma potência média de 0,416 mW, que segundo os autores é suficiente para muitas aplicações, figura 2.23.

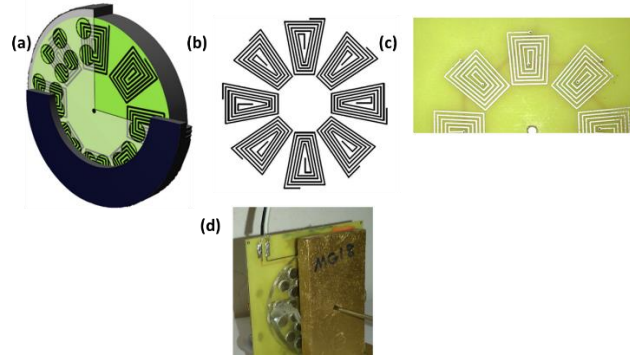


Figura 2.23. a) Desenho geral do micro gerador eletromagnético, b) Padrão de fabrico para as bobinas, c) Fabrico das bobinas, d) Dispositivo para ensaios. Adaptada de [26], com permissão Creative Commons CC License BY-NC-ND 4.0.

A tensão máxima obtida pelo dispositivo foi de 0,292 V.

Um dispositivo eletromagnético linear foi proposto por Wei Wang et al. [27], que também produzia energia elétrica através do movimento do corpo humano. Nos testes realizados, obtiveram potências diferentes de acordo com o movimento efetuado e orientação do dispositivo.

Os valores obtidos de tensão média e potência média foram respetivamente 0,3559 V e 2,1 mW, com a utilização de 3 magnetos e uma resistência de carga de 5 Ω .

Realizaram também testes com diferentes configurações, e ao incrementarem o número de magnetos de 3 para 6 no interior do tubo, obtiveram 0,68 V e uma potência de 4,50 mW, figura 2.24.

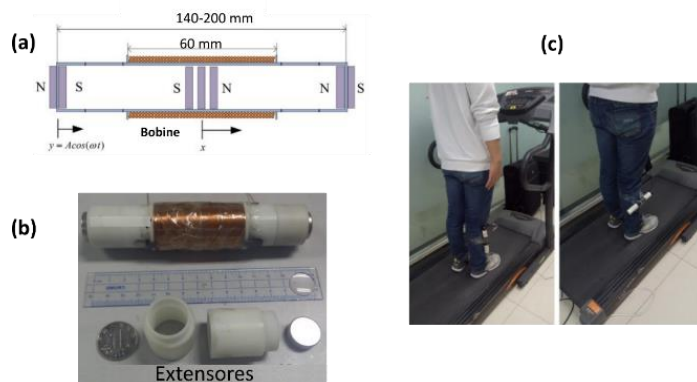


Figura 2.24. a) Desenho do dispositivo que foi testado com comprimento do tubo de 140 e 200 mm, com diâmetro interno de 20,5 mm. b) Dispositivo, com os extensores para aumentar ou diminuir o comprimento do tubo e diâmetro do magneto 20mm com 4 mm de altura c) Testes efetuados com duas posições diferentes. Adaptada de [27], Copyright © 2023, com permissão da Elsevier.

Destas duas aplicações, podemos realçar que os dispositivos eletromagnéticos em macro escala são complexos (como exemplo, turbinas eólicas e turbinas de corrente) e têm exigências que são diferentes da microescala, tornando estes simples, conforme os dois exemplos apresentados, mas podendo, no entanto, serem complexos, de acordo com eventuais restrições de funcionamento que se pretenda.

Para aplicações no mar, na minha opinião, será mais eficiente se for mais simples porque podem ser mais eficazes na obtenção da potência que se pretende.

2.4.2 Aplicações oceânicas

2.4.2.1 Produção de energia à superfície do oceano

Baseado no conceito de gerador linear eletromagnético, Omar Farrok et al. [28], propôs um dispositivo que funciona com as oscilações das ondas do mar. Efetuaram testes com diversos valores de resistência de carga, entre 4-20 Ω , obtendo tensões superiores a 30 V e uma potência média de 242 W, com uma frequência de 25 Hz.

O dispositivo apresentado funciona com as bobinas fixas e os magnetos movem-se no seu interior, tendo o dispositivo um comprimento de 3 metros, figura 2.25.

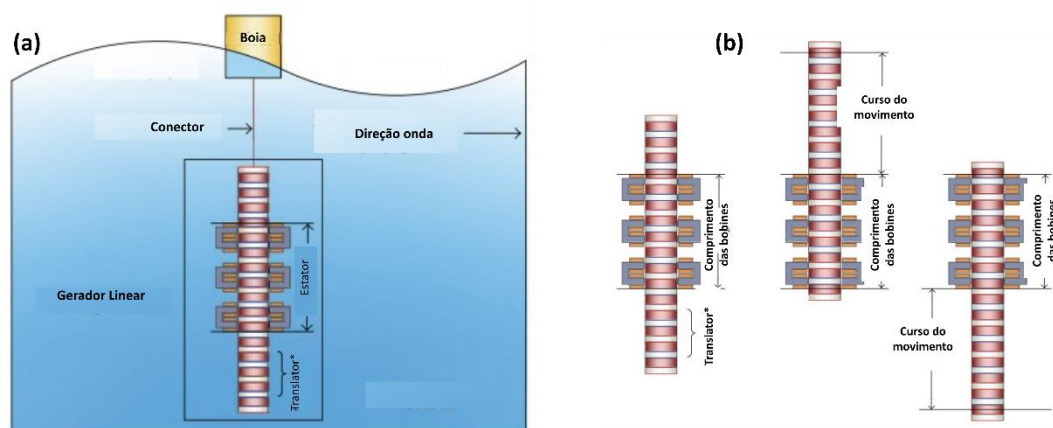


Figura 2.25. a) Esquema de funcionamento do sistema, b) Esquema do movimento, da figura esquerda para a direita, central, posição superior e posição inferior. Adaptada de [28], com permissão Creative Commons CC License BY-NC-ND 4.0.

Com outro tipo de abordagem, Yunfei Li et al. [29], inseriu o gerador eletromagnético no interior de uma boia, aproveitando assim as oscilações das ondas.

O sistema proposto por estes investigadores, é a conversão dos movimentos de oscilação em movimento rotativo, e produzindo assim a energia elétrica através de um gerador eletromagnético rotativo. Realizaram testes no oceano, e considerando a irregularidade do período

das ondas, obtiveram uma potência média de 130 mW.

Através de um outro teste no oceano, verificaram que foi necessário 1600 s para carregarem uma bateria de LiPo de 50 mAh, desde 2,8 V a 4,1 V. Na figura 2.26, está ilustrado o dispositivo.

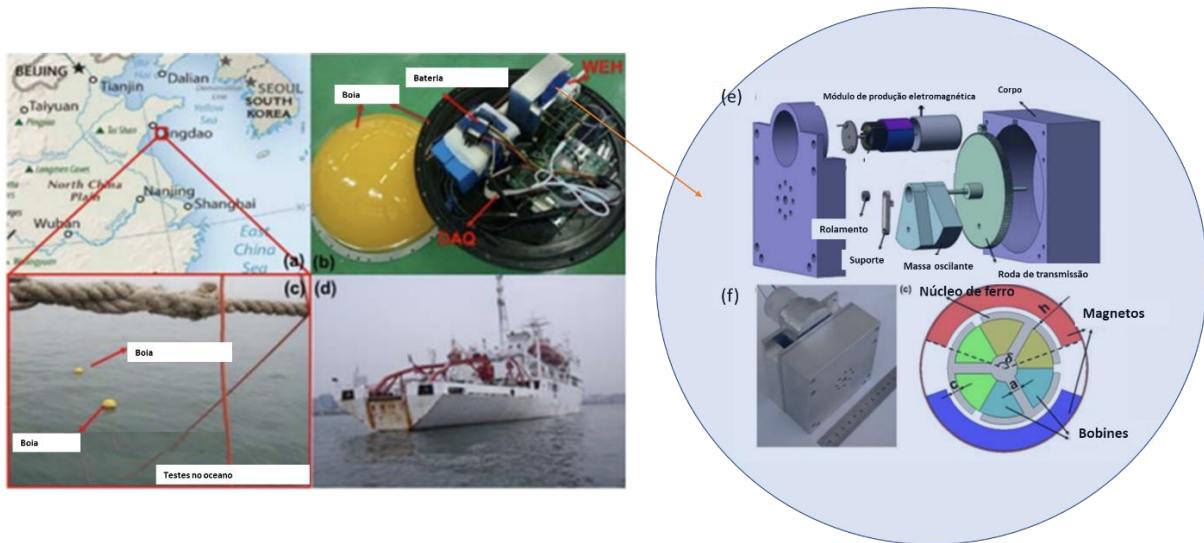


Figura 2.26. a) Local da realização dos testes, b) Sistema completo com eletrônica para registo dos dados (DAQ), bateria e módulo de produção de energia (WEH), c) Colocação das boias no oceano, d) Navio de pesquisa, e) Componentes do WEH, f) Montagem final do WEH, 10x10x6 cm. Adaptada de [29], com permissão Creative Commons CC License BY-NC-ND 4.0.

2.4.2.2 Produção de energia em ambiente submerso

Existem poucas aplicações inseridas no ambiente oceânico submerso.

Utilizando as correntes do oceano para produzir energia, Wenjun Ding et al. [30], propôs um sistema oscilante em que a rotação da massa acionava um gerador eletromagnético rotativo. Realizaram testes com frequências 0,2, 0,25 e 0,3 Hz, com resistências de cargas de 30 e 40 Ω , obtendo assim uma potência elétrica 300 mW. De forma a aumentar a velocidade no gerador rotativo, foi introduzido uma relação 1:103, através de uma caixa de engrenagens. As dimensões não são especificadas no artigo, mas como referência, o braço do pendulo tem 195 mm. A figura 2.27 representa o dispositivo de produção de energia.

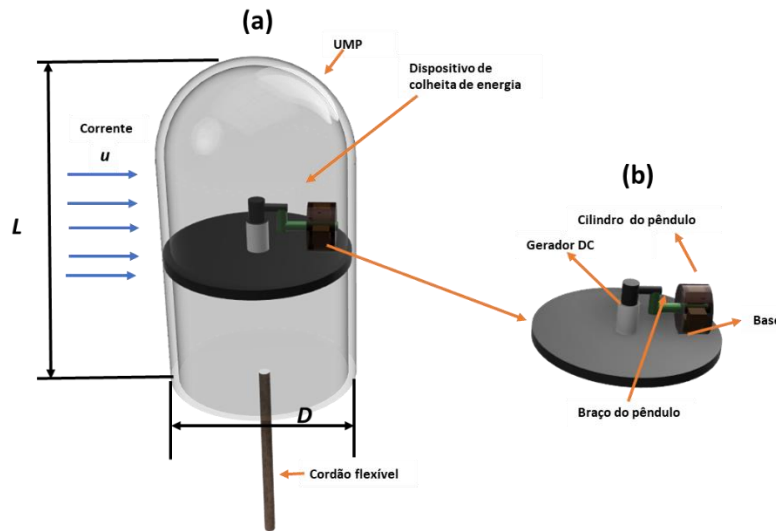


Figura 2.27. a) Dispositivo proposto, plataforma de fixação subaquática (UMP) sujeito à corrente com velocidade (u), b) Desenho do sistema de produção [30].

Um estudo numérico para um dispositivo de produção submerso, foi apresentado por Min-Chie Chiu et al. [31]. Segundo as simulações efetuadas, se o dispositivo estiver a 50 metros de profundidade, elevado do solo (y) a 5 metros, com uma velocidade de corrente à superfície (U_{ow}) 3 m s^{-1} , com uma altura da onda (H) 0,5 m e 3 m de comprimento (λ), associado a uma resistência de carga de 300Ω e com um peso total do dispositivo de energia de 0,1 Kg, este poderá produzir uma potência média de 5,8 mW, figura 2.28. Existem várias restrições para se obter a potência enunciada.

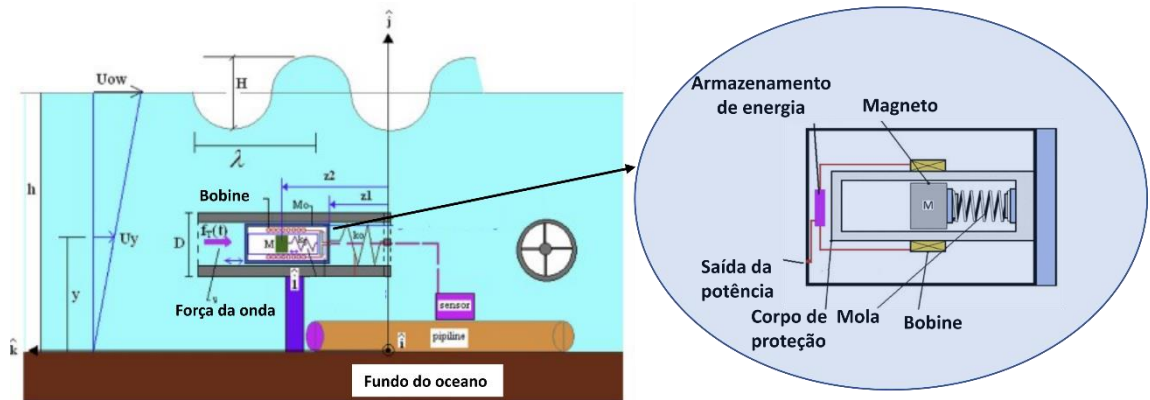


Figura 2.28. Forma de implementação do estudo numérico, com as cotas de deslocamento da mola ($z1$) e do dispositivo ($z2$), e a força exercida pela onda. Adaptada de [31], Copyright © 2023, com permissão da Elsevier.

2.5 Comparativo dos sistemas e arquiteturas LEG

Para micro geração de energia no oceano, existem diversas abordagens conforme alguns exemplos apresentados. Várias tecnologias utilizadas num contexto mais abrangente, podem ser adaptadas no oceano, quer à superfície quer submerso, de acordo com a forma de energia que se pretende converter a partir do meio ambiente envolvente. Neste subcapítulo será apresentado as

vantagens e desvantagens de cada uma das tecnologias, de trabalhos que foram efetuados com os respetivos valores tensão, potência, densidade energética e material utilizado.

2.5.1 Comparativo entre sistemas de produção de energia

Na tabela 2.2, são apresentadas as vantagens e desvantagens dos 3 sistemas de produção de energia.

Tabela 2.2. Vantagens e desvantagens sistemas de produção energia.

Sistemas Piezoelétricos	
Vantagens	Desvantagens
-Tamanho compacto [32] -Tensões de saída altas [32] -Densidade de potência elevada [32] -Micro e nano fabricação é possível [32,33] -Estrutura simples em escala reduzida [33]	-Elevada impedância e baixa corrente de saída [32,34,35] -Baixa eficiência a frequências baixas [32] -Alguns materiais são tóxicos [32] -Relativamente caro [32] -Poucas opções na arquitetura do dispositivo [34] -No caso dos PTZ, o impacto entre a massa e piezoelétrico pode reduzir o tempo útil de funcionamento [36,37] -Baixo limite de deformação [33]
Sistemas eletromagnéticos	
-Corrente de saída alta [32,34,35,38] -Densidade de potência elevada [32] -Implementação simples de um MPPT [32] -Robusto [32,38] -Processos compatíveis com MEMS disponíveis para fabricação de bobina planar e mola plana [34] -Uma série de opções para a arquitetura do dispositivo [34,35] -Pode ser utilizado para níveis de vibração g baixos, médios ou altos [34] -Baixa impedância [34,35,38] -Fácil de escalar [33]	-A eficiência decresce com a miniaturização [32] -Difícil integração em MEMS [32] -Tensões baixas [32] -Complicado fabricar em microescala [38] -Pode ser afetado por campos eletromagnéticos [33] -Mais pesado [33]
Sistemas tribológicos	
-Densidade de potência elevada [32] -Flexível [32] -Material de fabrico fácil [32] -Fácil reprodução [32] -Custo-benefício elevado [32] -Grande variedade de materiais disponível [32] -Independente da frequência [32] -Compatível em microescala [32] -Baixa densidade [39] -Tensões de saída altas [33] -Estrutura simples em escala reduzida [33]	-Precisa de isolamento devido às tensões elevadas [32] -Processos de fabrico complexos [32] -Elevada erosão dos materiais [32] -Tempo limitado de vida [32,33] -Elevada impedância de saída [32] -Circuitos de interface complexo [32]

De acordo com a revisão do estado de arte, de forma reduzida a tabela 2.2, até à data, menciona as vantagens e desvantagens, considerando apenas algumas referências que incluíam a

sua quase totalidade, embora sejam do âmbito geral, também são aplicadas quando os sistemas são utilizados no oceano.

O foco da tese é uma aplicação no oceano com sistemas eletromagnéticos submersos, sem partes móveis expostas ao fluido, pelo que na tabela 2.3, são apresentados as potências, tensões e aplicações dos dispositivos que foram encontrados durante o levantamento do estado de arte e atualizados até à data.

Tabela 2.3. Tensões e potências dispositivos eletromagnéticos.

Potência média (mW)	Tipo de gerador	Tensões/resistências de carga	Frequência (Hz)	Referência	Tipo de teste/validação	Aplicação
300	Rotativo	ND* 40-50Ω	0,2-0,3	Wenjun Ding et al. [30]	Laboratório	Submerso, ondas e correntes
5,8	Linear	Tensões de pico superiores a 1,5 V 300Ω	0,1	Min-Chie Chiu et al. [40]	Simulação numérica	Submerso
100-170	Rotativo	ND 15 Ω	ND	Nicholas Townsend [41]	Teste no oceano	Submerso
10 180	Rotativo	Tensões de pico 4 V 2 Ω	1,4	Hai Li et al. [42]	Simulação numérica e Testes no oceano	Submerso
150	Rotativo	Tensões de pico 37 V ND	0,8	Wenjun Ding et al. [43]	Testes laboratório	Submerso

*ND- Não disponível

Existe uma diversidade de aplicações de geradores lineares aplicados à superfície do oceano, no entanto, geradores lineares de dimensões reduzidas submersos são muito poucos.

2.5.2 Arquiteturas de Geradores lineares eletromagnéticos cilíndricos de escala reduzida

Existem várias arquiteturas possíveis para a implementação de um gerador eletromagnético, no entanto para os cilíndricos irão ser referidas duas, figura 2.29.

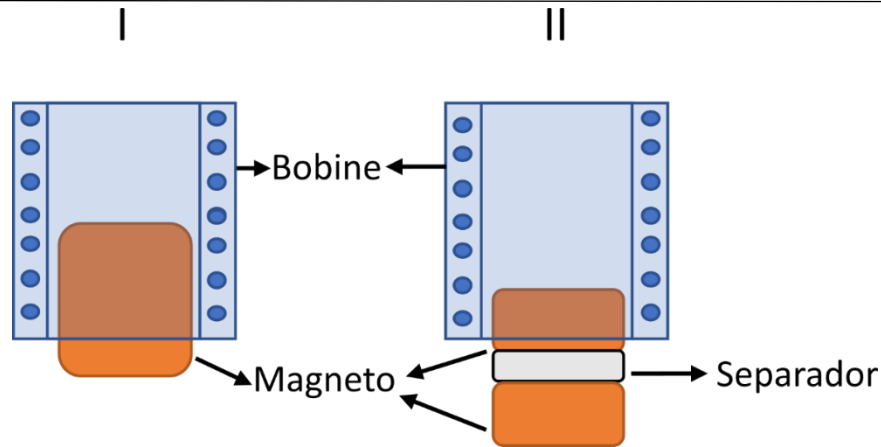


Figura 2.29. I-Bobina e magneto, II-Bobina e magnetos com separador.

A partir destas arquiteturas base, pode-se desenvolver outras configurações, com diferente número de bobinas, com maior número de magnetos, com separador ou sem separador. No caso da arquitetura II, os magnetos podem ser colocados juntos com a mesma polaridade SN-NS (estão em repulsão) ou SN-SN (estão em atração), onde S é sul e N é o norte. Analisemos as várias configurações que foram publicadas.

Os autores Thomas von Buren et al. [44], em 2006 utilizaram a arquitetura II para desenhar e otimizar um micro gerador eletromagnético linear aplicado e adaptado ao movimento do corpo humano. Na configuração apresentada, figura 2.30, utilizaram 3 bobinas e 3 magnetos separados entre si, por um espaçador.

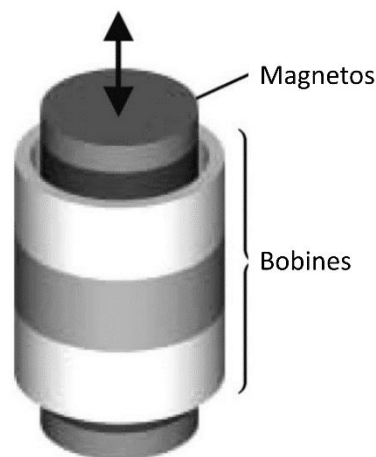


Figura 2.30. As bobinas estão fixas e os magnetos movem-se no seu interior. As bobinas superiores e inferiores têm o mesmo sentido de enrolamento das espiras, enquanto a bobina intermédia tem sentido de enrolamento contrário. Adaptada de [44], Copyright © 2023, com permissão da Elsevier.

Para arquitetura proposta, baseada nas especificações da figura 2.31, os autores formularam um conjunto de equações com o intuito de otimizar a potência produzida.

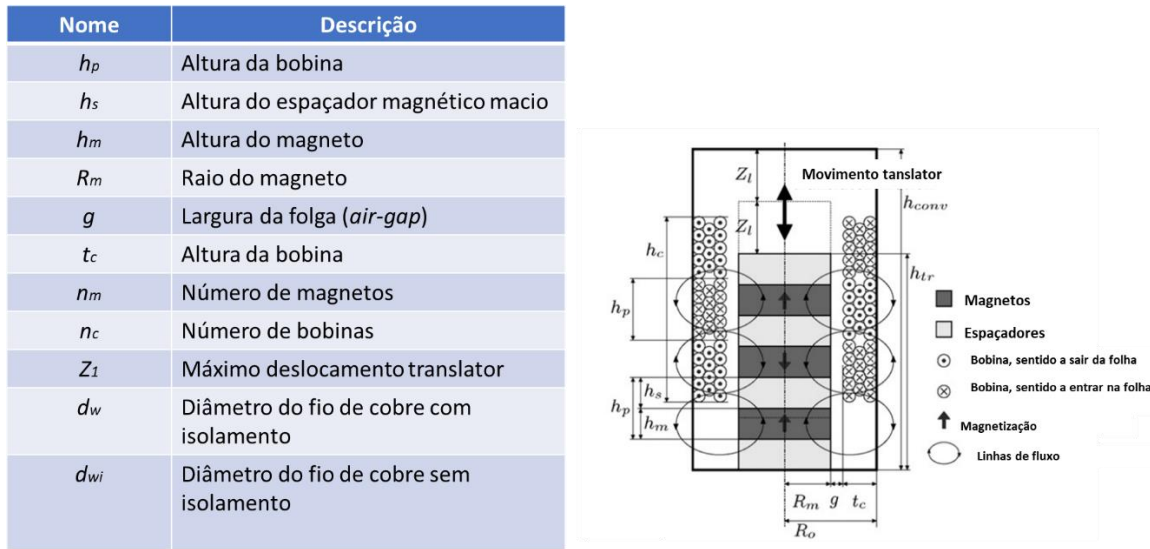


Figura 2.31. Dimensões proposta para o gerador, figura e tabela adaptada de [44], Copyright © 2023, com permissão da Elsevier.

Os autores, para o cálculo da força, não consideraram a auto-indutância da bobina do estator e as perdas mecânicas dos rolamentos.

Na expressão 1 a soma da potência elétrica dissipada e potência mecânica extraída deve ser zero de acordo com princípio da conservação de energia:

$$fv + \frac{u_{ind}^2}{R_c} = 0 \quad (1)$$

Onde a força de amortecimento e velocidade do translator são representados por f e v , a tensão induzida por u_{ind} e a resistência da bobina por R_c .

Para calcular a força de amortecimento e a relação força/velocidade $d(Z)$, é utilizado a lei de indução eletromagnética de Faraday:

$$fv = -\frac{u_{ind}^2}{R_c} = -\left(\frac{d\phi}{dz}\right)u^2 \quad (2)$$

$$D(Z) = -\left(\frac{d\phi}{dz}\right)^2 \frac{1}{R_c} \quad (3)$$

O $\phi(z)$ é o fluxo através da bobina do estator para uma dada posição.

A posição de Z , será entre $-Z_l$ e Z_l , de acordo com a figura 2.31. Na otimização segundo os autores, deverá também entrar o volume (V_{conv}) adequado à maximização da potência, onde é considera o volume ocupado pela bobina e os magnetos, isto é:

$$V_{conv} = \pi R_0^2 h_{conv} \quad (4)$$

A potência média, considerando os limites do deslocamento do translator, será definida por:

$$P_{av} = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{(u_{R1})^2}{R_1} \quad (5)$$

Sendo R_1 , a resistência de carga aplicada durante o tempo T .

De acordo com os autores, a configuração adaptada para o fabrico do micro gerador tem as

seguintes vantagens:

- Pelo facto de usarem magneto móvel e não um gerador de bobina móvel, evita ligações elétricas nas partes móveis.
- O estator não contém nenhum material magnético macio para evitar correntes parasitas adicionais e perdas por histerese magnética, no entanto, tem a desvantagem de o núcleo sem ferro proporcionar um campo magnético mais fraco e menor concentração do fluxo do que com um núcleo de ferro.

O gerador fabricado com um volume ativo (V_{conv}) de $0,25 \text{ cm}^3$, produziu entre $2\text{-}25 \text{ }\mu\text{W}$ que depende da posição de montagem no corpo, com uma resistência de carga de $10 \text{ K}\Omega$. As frequências de funcionamento utilizadas no gerador foram superiores a 5 Hz .

Em 2007, B.P. Mann et al. [45], apresentaram a mesma arquitetura que anterior com uma configuração diferente, para a produção de energia tendo em atenção sistemas não lineares. De acordo com os autores, uma questão importante a ser respondida, é se a não linearidade pode melhorar o sistema de produção. São da opinião que sistemas de produção de energia desenhadas para coincidirem com a frequência de ressonância coloca limitações ao dispositivo a ser construído, uma vez que nos sistemas lineares, irão ter uma performance inferior se a frequência de excitação não coincidir com a frequência de ressonância e consequentemente num meio onde exista múltiplas frequências, o dispositivo adaptado a sistemas lineares poderá não conseguir captar todas as frequências para produzir energia.

Uma das formas para captar uma gama de frequência maiores num sistema linear, implicaria uma complexidade na sua configuração [46,47].

O projeto proposto é um novo dispositivo de produção de energia que usa as forças magnéticas para levitar um magneto central que oscila. Um dos objetivos específico é usar as forças de restituição não lineares para permitir o ajuste da ressonância linear do sistema, evitando-se assim a necessidade de fabricar um dispositivo complexo, figura 2.32.

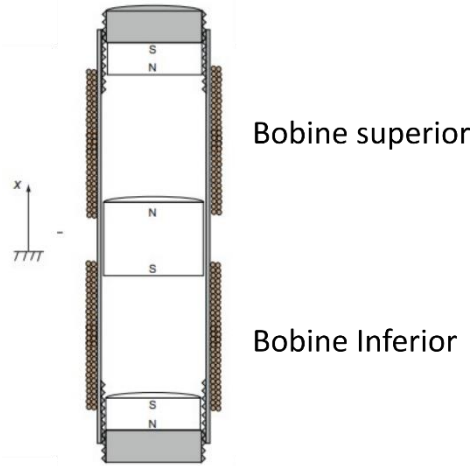


Figura 2.32. Dispositivo proposto, que respeita a arquitetura I. Adaptado de [45], Copyright © 2023, com permissão da Elsevier.

Este dispositivo usa dois ímãs fixos mecanicamente através de suportes roscados no topo de um tubo de teflon. Estes suportes roscados permitem alterar o espaçamento entre os ímãs. O ímã central é colocado entre os outros dois e os polos magnéticos estão orientados de forma a repelir o ímã central, promovendo a sua levitação através de uma força de restituição não linear.

Esta não linearidade permitirá calibrar a ressonância linear, através do ajuste do espaçamento entre os ímãs.

Após ser determinado o K (constante de rigidez) e as constantes α pelo método de mínimos quadrados dos resultados experimentais, é obtido a potência média pela expressão:

$$P_{av} = \left(\frac{\alpha a \Omega}{R_c + R_{int}} \right)^2 R_c \quad (6)$$

Sendo amplitude de frequência de excitação Ω , coeficiente de acoplamento eletromagnético α , resistência de carga R_c , amplitude a e resistência interna das bobinas R_{int} .

N. Fondevilla et al. [48], utilizou a mesma arquitetura I, com um ímã esférico. Afirmou que a bobina ideal para produção de energia, deverá ter o comprimento igual ao diâmetro do ímã e uma otimização que deverá ser feita, é reduzir a espessura do diâmetro do fio das espiras, permitindo assim aumento do número de espiras, mas o aumento de espiras irá reduzir o fluxo nas zonas mais afastadas do ímã além de que maior número de espiras irá aumentar a resistência da bobina. Tendo em conta estas limitações, os autores afirmaram que existe uma distância crítica (Z_c), que deverá ser utilizado para otimizar a bobina, figura 2.33.

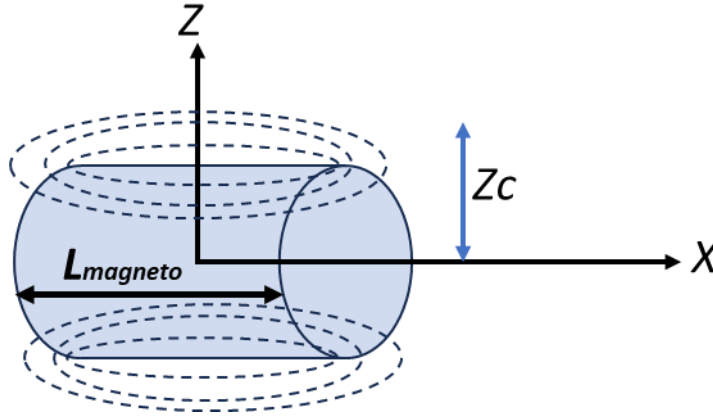


Figura 2.33. Representação da altura Z_c , comprimento do magneto é $L_{magneto}$.

Para um diâmetro de fio de cobre d_1 , irá haver um número de espiras $n_1=(n_{x1}) (n_{z1})$, sendo n_{x1} e n_{z1} , o número de voltas no eixo do x e z respetivamente. Desta forma se passarmos para um diâmetro de fio de cobre d_2 , a sua relação com d_1 , será $d_2=kd_1$, com o este fator k , igual a:

$$n_{x2} = \frac{n_{x1}}{k}; n_{z2} = \frac{n_{z1}}{k} \Rightarrow n_2 = \frac{n_1}{k^2} \quad (7)$$

De acordo com o determinado pela equação 7, o comprimento total do cabo será reduzido pelo fator k^2 e a sua seção será k^2 maior. A relação das suas resistências (R_1 e R_2) e tensões (V_{o2} e V_{o1}) serão dadas por:

$$R_2 = \frac{R_1}{k^4} \quad V_{o2} = \frac{V_{o1}}{k^2} \quad (8)$$

A relação das suas potências será dada pela expressão:

$$P_{o2} = \frac{v_{o2}}{R_2} = \frac{v_{o1}}{k^4} \frac{k^4}{R_1} = P_{o1} \quad (9)$$

Concluíram os autores do estudo, que a potência não depende da distribuição das espiras. A forma de distribuição pelo volume critico da bobina não influencia o valor da tensão obtida uma vez que esta depende da seção do fio do cobre e o número de espiras utilizado. Sendo o volume critico determinado pelas dimensões do magneto.

Outros investigadores [49–51], realçam a importância de ser introduzido na arquitetura I, o fator de enchimento da bobina (volume preenchido), dipolo magnético e fator de acoplamento eletromagnético, para otimização, uma vez que têm influência direta nas tensões e potências obtidas. O desenvolvimento matemático destas abordagens poderá ser consultado nestes artigos.

Um trabalho experimental para otimizar um sistema de produção de energia com arquitetura I, foi realizado por Hasan Uluşan et al. [52], figura 2.34.

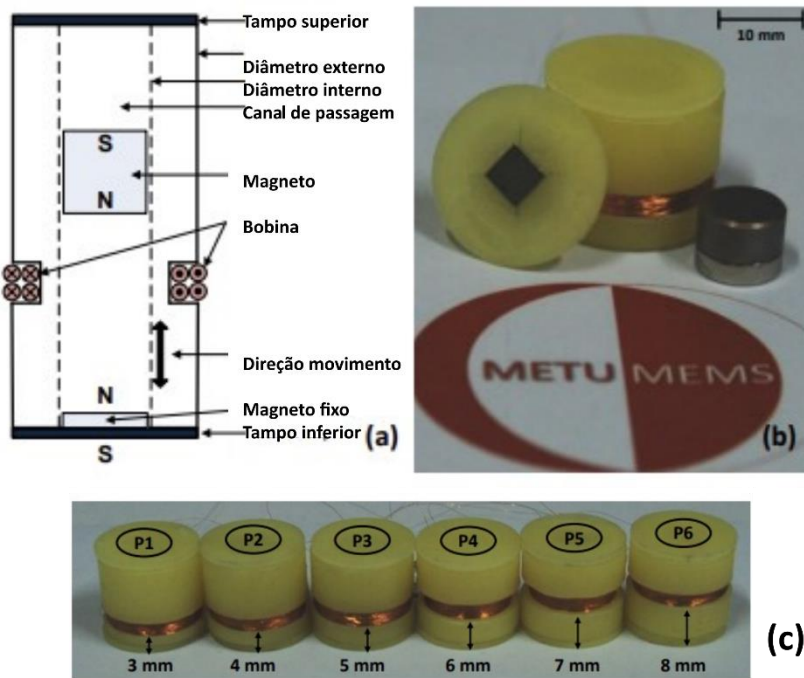


Figura 2.34. a) Esquema do dispositivo, b) Um dos protótipos usados, c) Protótipos utilizados nos testes, com posições diferentes para bobina. Adaptada de [52], com permissão Creative Commons CC License BY-NC-ND 4.0.

Através dos resultados experimentais, e tendo em conta que foi utilizado um magneto colado a uma massa não magnética (com o objetivo de alterar a frequência de ressonância), verificaram que o posicionamento da bobina influencia as tensões máximas obtidas. Nestes testes, a tensão máxima de pico foi atingida para amostra P3 (5mm), sendo de 1,61 V e uma potência média de 0,11 mW, para uma frequência de ensaio de 15 Hz e uma aceleração de 0,7 g.

Daqui pode-se inferir que um estudo experimental da posição da bobina, é importante de forma a verificar se são obtidas as tensões necessárias que o sistema de produção deve providenciar ao sistema onde está inserido.

Utilizando a mesma arquitetura I, com uma configuração diferente foi apresentado no trabalho de investigação de Krzysztof Kecik et al. [53].

Segundo os autores, a ideia é baseada no movimento do magneto permanente no cilindro que atravessa o interior da bobina, tendo em conta uma nova definição do coeficiente de acoplamento (coeficiente indutivo) que relaciona a parte mecânica com a parte elétrica. Os testes experimentais estáticos e dinâmicos realizados pelos autores, demonstraram que este coeficiente é uma função não linear e dependente da coordenada do magneto relativamente à bobina. Na figura 2.35, o modelo e protótipo.

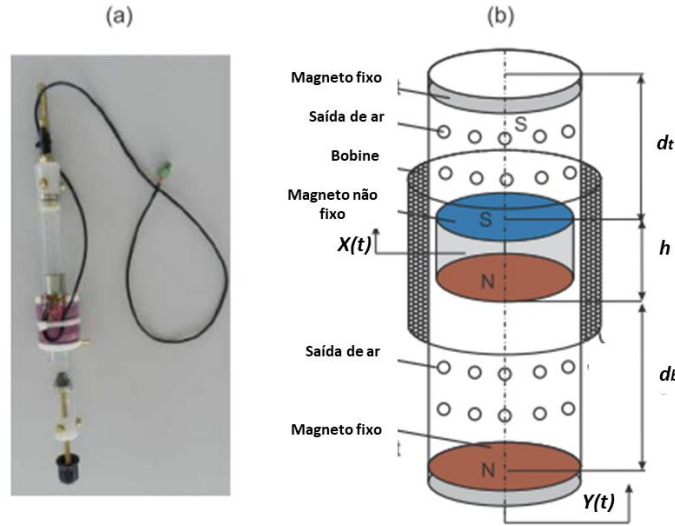


Figura 2.35. a) Protótipo, b) Modelo baseado na arquitetura I, sendo $y(t)$ base de excitação, (h) altura do magneto, d_b e d_t distâncias relativamente à base dos magnetos dos respetivos polos N e S. Adaptada de [53], Copyright © 2023, com permissão da Elsevier.

Baseando o desenvolvimento matemático no modelo rígido mono estável de Duffing, isto é, quando o modelo é mono estável, tem apenas um ponto de equilíbrio estável, o rígido tem uma força de restauração altamente não linear que se torna cada vez mais rígida à medida que o deslocamento da posição de equilíbrio aumenta, pelo que, as constantes matemáticas k e k_1 foram obtidas experimentalmente para o modelo proposto e aplicadas no modelo matemático característico de Duffing para um sistema rígido mono estável ,

$$kx + k_1x^3 \quad (10)$$

sendo x , as coordenadas do movimento do magneto.

A figura 2.36, apresenta modelo eletromecânico proposto para o dispositivo de produção de energia. A força restauradora da levitação, é representada pela mola, com a constante de rigidez K e K_1 , a massa do magneto é m , o amortecimento viscoso mecânico c , a posição do equilíbrio para medição do afastamento do magneto é $x(t)$ e a base de excitação $y(t)$, que é assumido harmónico $y(t) = t A \sin(\omega t)$, com amplitude A e frequência ω , no instante t .

O circuito elétrico do sistema de conversão de energia, consiste numa bobina de indutância L_c e uma resistência R_c . A resistência R_c é ligada a uma resistência de carga R_l que irá de 0-10 kΩ. A soma de R_c e R_l é a resistência total, R_t . Durante as oscilações do magneto, será induzido uma corrente e tensão. Se considerarmos que o movimento relativo é obtido por $z(t) = x(t) - y(t)$, teremos então as equações de movimento dados por:

$$m\ddot{z} + c\dot{z} + kz + k_1z^3 + \alpha(z)i + mg = -m\ddot{y} \quad (11)$$

$$L_c\ddot{i} + R_ti = \alpha(z)\dot{z} \quad (12)$$

O $\alpha(z)$, é o coeficiente de acoplamento.

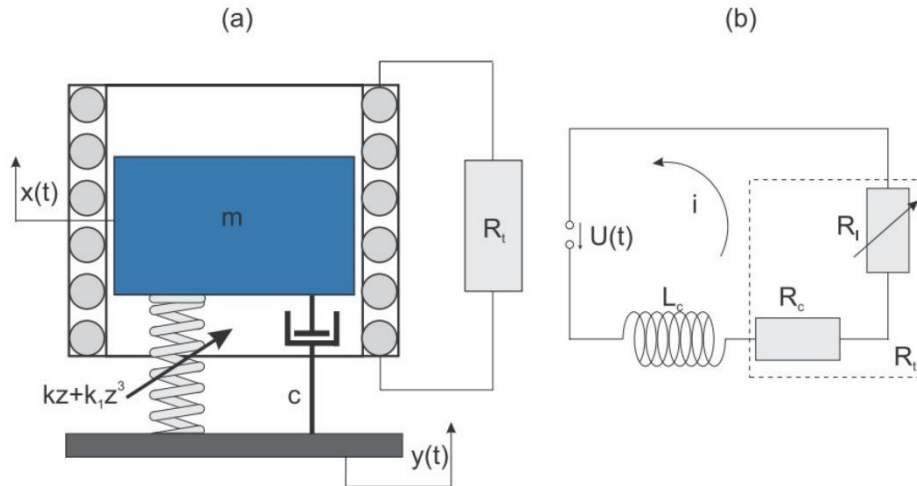


Figura 2.36. a) Modelo mecânico, b) Modelo elétrico. Adaptada de [53], Copyright © 2023, com permissão da Elsevier.

Em modelos com pequena amplitude provocada pela vibração, a constante k_1 da não linearidade é desprezada e o α será considerado uma constante e o modelo matemático é tratado como linear.

O coeficiente de acoplamento, é um dos termos mais crucias no desenvolvimento teórico do modelo. Este coeficiente é que relaciona tensão induzida com a velocidade do magneto. Existem múltiplas abordagens na literatura para cálculo deste coeficiente, que é muito importante nos sistemas eletromagnéticos lineares. Uma das abordagens mais comuns é considerar a densidade do fluxo magnético constante ao longo da bobina durante o movimento do magneto, o que simplifica análise. Outro método utilizado, é abordagem experimental, que é frequente em sistemas muito complexos [54]. No método experimental é utilizado a expressão 12, tendo em atenção que $\dot{i}$, é numericamente a primeira derivada de i . É importante ter em atenção que o L_c também é incluído, embora o seu valor seja em regra 1600 vezes inferior ao R_t . As unidades de α é (Vsm^{-1}).

Os resultados obtidos experimentalmente mostram que o valor fixo do coeficiente de acoplamento pode ser aceite, desde que devidamente escolhido.

Um valor impróprio deste parâmetro pode levar a soluções artificiais, incluindo movimento caótico que não existe no sistema real.

Em julho de 2018, os autores Xingqiang Zhao et al. [55], apresentaram um modelo de produção de energia, utilizando a arquitetura I, e com uma frequência de 5 Hz fornecia uma potência média de 63,9 mW e 4,2 mW a uma frequência de 1 Hz. Pela análise destes valores, não se pode afirmar que existe um fator de escala entre potência e frequência. Na figura 2.37, sistema de produção testado pelos autores.

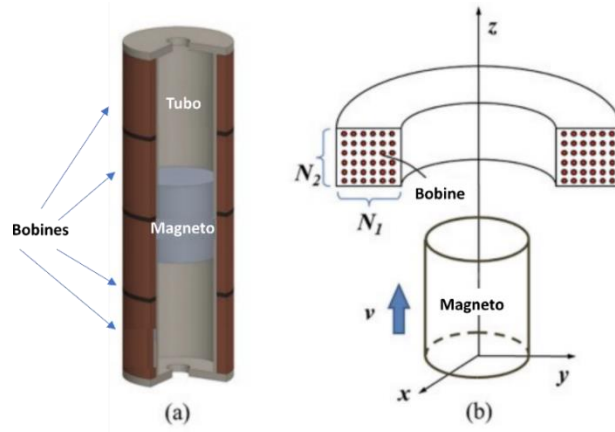


Figura 2.37. a) Gerador linear eletromagnético, b) Princípio de funcionamento, sendo N_1 e N_2 as dimensões da bobina, v a velocidade do magneto. Adaptada de [55], Copyright © 2023, com permissão da IOP.

Os autores do estudo, desenvolveram esta configuração para evitar a suspensão do magneto por mola adotada em outros trabalhos, porque pode impedir o movimento do magneto e diminuir a sua velocidade e amplitude.

Para otimizar o sistema, considera-se este como uma fonte AC, em série com uma bobina de resistência R_c e indutância L_c . Ao colocar-se uma resistência de carga R_l aos terminais da bobina, obtém-se:

$$L_c \frac{dI}{dt} + (R_c + R_l)I = \varepsilon \quad (13)$$

Onde I é a corrente e ε é a fem, calculado por:

$$\varepsilon = K_t \dot{z} \quad (14)$$

$$K_t = - \sum_i^{N_1} \sum_j^{N_2} \int_{A_{ij}} \frac{dB_z}{dz} dA \quad (15)$$

K_t , é designado pelos autores de fator de transdução, N_1 e N_2 , são respetivamente o número de espiras na horizontal e vertical, pelo que $N_1.N_2$ será o número total das espiras, $\dot{z}$ é a velocidade do magneto, B_z é densidade do fluxo magnético na direção z e a área da bobina é A .

Desta forma a potência elétrica dissipada pela resistência externa será:

$$P_e = \frac{V_R^2}{R_l} \quad (16)$$

O valor da tensão obtida na resistência externa, é calculada por:

$$V_R = \frac{\varepsilon R_l}{j\omega L_c + R_c + R_l} \quad (17)$$

Onde, j é parte imaginária. Se for considerado baixas frequências (ω) o termo da impedância $j\omega L_c$ poderá ser desprezado uma vez que o seu valor é muito pequeno comparado com R_c e R_l . A potência máxima será quando $R_c = R_l$.

Os autores Miah A. Halim et al. [56], publicaram um artigo com uma configuração diferente das anteriores, tendo em atenção a importância da direção do fluxo magnético. Verificaram que a

direção e espaçamento entre magnetos influencia também a fem, pelo que propuseram uma configuração diferente, figura 2.38.

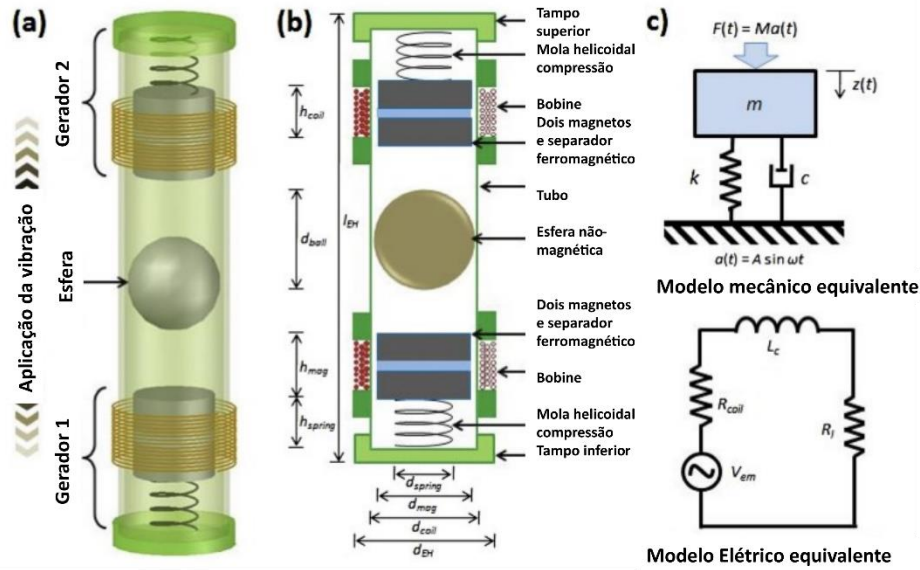


Figura 2.38. a) Configuração do sistema de conversão de energia, b) Sistema simplificado, com altura da bobina h_{coil} , altura dos magnetos h_{mag} , diâmetro da esfera d_{ball} , comprimento do tubo l_{EH} , diâmetro da mola, d_{spring} , diâmetro do magneto d_{mag} , diâmetro da bobina d_{coil} e d_{EH} diâmetro do tubo, c) Modelos equivalentes, mecânico e elétrico. Adaptado de [56], Copyright © 2023, com permissão da Elsevier.

Da mesma forma, a fem é obtido por:

$$|V_{fem}| = N \frac{d(\varphi B)}{dt} = NBl \dot{z}(t) \quad (18)$$

Onde V_{fem} é tensão produzida, N é número de espiras, φB fluxo magnético, l comprimento da bobina atravessado pelas linhas do fluxo, B densidade do fluxo magnético e $\dot{z}(t)$ é a velocidade relativa entre o magneto e a bobina. A potência produzida no dispositivo com resistência R_c ligado a uma resistência de carga R_l é proporcional a:

$$P_{out} \propto \left[\frac{NBl \dot{z}(t)}{R_c + R_l} \right]^2 R_l \quad (19)$$

Da expressão 19, pode-se verificar que é possível aumentar a potência melhorando os dois primeiros parâmetros do quociente, N e B . No caso do B , poderá ser melhorado por magnetos de maior diâmetro ou combinações de vários magnetos. O N , aumentando o número ou alterando a seção do fio, de acordo com o que se pretende.

De acordo com alguns exemplos anteriores, e do artigo de revisão de Pedro Carneiro et al. [57], o sistema de produção de energia deve ser analisado de acordo com as equações da mecânica (dinâmica), equações do campo magnético, da força magnética repulsiva (no caso de configurações com levitação magnética), fem induzidas, coeficiente de acoplamento eletromecânico, coeficientes de amortecimento e equações das forças envolvidas (atrito, arrasto etc).

2.6 Resumo

Dispositivos capazes de converter energia num ambiente aquático já se encontram disponíveis. Observou-se que a estrutura desses dispositivos é influenciada pela fonte de onde provém a energia captada.

Vários exemplos foram apresentados para aplicação no oceano, com diferentes configurações, materiais e diferentes arquiteturas, nomeadamente no caso do LEG, baseado no sistema de fabrico do dispositivo.

Pode-se afirmar também, no caso do LEG que uma determinada arquitetura pode ser excelente em um determinado ambiente, mas não em outro completamente diferente. Embora os princípios aplicados sejam os mesmos, será necessário realizar adaptações e desenvolvimentos adequados ao meio pelo qual se pretende extrair a energia através do dispositivo a utilizar. Além disso, é importante considerar a longevidade do dispositivo que será fabricado, exigindo uma escolha criteriosa dos materiais a serem aplicados. Durante o processo de revisão bibliográfica do estado atual de dispositivos de produção de energia de dimensões reduzidas, constata-se que são escassos os dispositivos testados na superfície do mar e ainda menos os que foram avaliados em ambiente subaquático. É possível que esta situação se deva às características do ambiente em si, que se apresenta como um meio agressivo e de comportamento imprevisível.

Um fator determinante para a produção de energia, é a frequência com que o dispositivo irá funcionar no mar. A maior parte dos dispositivos referidos funciona em frequências superiores a 2 Hz. No ambiente oceânico, as frequências das ondas são inferiores a 2 Hz [58,59]. Contudo, na costa atlântica portuguesa, é típico observar valores de períodos das ondas situados entre 5 e 10 segundos [69], correspondendo a frequências de 0,2 e 0,1 Hz. Neste contexto, torna-se imperativo investigar e desenvolver dispositivos de produção de energia capazes de operar de forma eficaz nessa faixa de frequências, o que constitui um desafio de relevância significativa no âmbito da geração de energia em ambientes subaquáticos. Foram apresentadas duas arquiteturas distintas de dispositivos geradores lineares eletromagnéticos (LEGs), cada uma com sua própria configuração. Embora as formulações matemáticas subjacentes a essas configurações sejam semelhantes em termos das fórmulas fundamentais, as adaptações específicas diferem entre as diversas implementações do sistema pelos autores. Nas configurações apresentadas, ainda há espaço para aperfeiçoamento e inovações de novas soluções, alinhadas aos princípios matemáticos desenvolvidos por outros estudos efetuados nesta área. Essas arquiteturas estão em maior consonância com os objetivos da presente tese.

Capítulo 3

Seleção da arquitetura e componentes do LEG

No atual capítulo, é exposto o mecanismo de produção de energia escolhido, bem como a base teórica subjacente ao cálculo da força eletromotriz. Os componentes empregues no dispositivo de produção foram identificados mediante a consideração das suas características e os requisitos pretendidos. Além disso, realizou-se a escolha do tipo de arquitetura e configuração, que foram empregados no ambiente submerso, conforme descrito na secção 2.1.5.2 do capítulo 2.

3.1 Mecanismo de produção de energia

3.1.1 Piezoelétrico

O presente mecanismo de produção de energia requer a aplicação de compressão, tração ou impacto de massas, especialmente no caso dos materiais piezoelétricos PTZ, a fim de gerar energia. Contudo, é importante destacar que tal processo pode reduzir significativamente a vida útil do dispositivo em questão. Por outro lado, nas tabelas de comparação apresentadas no capítulo 2, é possível verificar que esse mecanismo é capaz de gerar tensões elevadas, impedâncias elevadas e correntes da ordem dos μA ou nA .

Considerando-se os valores de corrente mencionados anteriormente, é necessário que esse mecanismo seja composto por dispositivos com uma área elevada, conforme exemplificado no capítulo 2, para que possa produzir potência suficiente para alimentar sensores. No caso de aplicação em ambiente oceânico, é imprescindível a utilização de um sistema de proteção que impeça a influência do ambiente na performance do material piezoelétrico. Contudo, é importante ressaltar que esse encapsulamento pode afetar negativamente as propriedades de produção de energia do mecanismo. É de salientar também que a natureza do mecanismo de produção em questão limita as configurações de fabricação do sistema e além de que necessita de funcionar a frequências superiores a 2 Hz.

3.1.2 Triboelétricos

Recentemente, este mecanismo tem recebido uma considerável atenção como um possível candidato preferencial para sistemas de produção de energia, especialmente em ambientes não marítimos. Uma das principais razões para tal é a ampla diversidade de materiais disponíveis para a fabricação do dispositivo, no entanto para ser utilizado no oceano, deverá ser aplicado um isolamento eficaz de forma a não deteriorar alguns dos materiais.

Embora possa apresentar dimensões reduzidas, é importante notar que, de acordo com o estado da arte realizado, o mecanismo em questão tem uma complexidade significativa na fabricação de sua estrutura. Isso ocorre porque o seu princípio de funcionamento é eletrostático, o que implica contato direto entre diferentes materiais. Este contacto direto pode levar eventualmente ao desgaste prematuro do material, conforme mencionado na tabela 2.2 do capítulo 2. Convém salientar que a maioria dos materiais empregados nesse mecanismo produz tensões e impedâncias elevadas, o que exige a implementação de circuitos de interface complexos para se alcançar as tensões pretendidas de funcionamento. Tal como anterior mecanismo, também necessita de frequências superiores a 2 Hz.

3.1.3 Eletromagnéticos

Este mecanismo apresenta baixa impedância e corrente de saída mais elevada do que os mecanismos anteriores, além de tensões baixas, o que permite a utilização de circuitos de interface simples. Pode ser empregado numa ampla faixa de frequências e acelerações g baixa, média ou alta. Adicionalmente, existem diversas arquiteturas e configurações disponíveis, dependendo das tensões de saída pretendidas. As suas principais desvantagens são o peso e a dificuldade na fabricação em microescala, devido à presença do magneto e bobina. No entanto, há aplicações em sistemas micro eletromecânicos (MEMS) para este mecanismo, apesar da eficiência diminuir com a miniaturização.

3.2 Seleção do mecanismo Eletromagnético

Devido à versatilidade, faixa de frequências de trabalho, vantagens anteriormente mencionadas e de construção simples, o dispositivo de produção de energia, será baseado no mecanismo eletromagnético.

3.2.1 Princípio de funcionamento eletromagnético

Quando um fluxo magnético atravessa um condutor ou o condutor atravessa o fluxo magnético, figura 3.1, existe indução de uma corrente elétrica denominada força eletromotriz (fem).

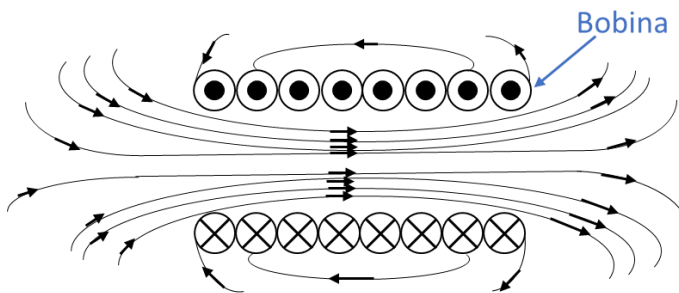


Figura 3.1. Linhas de campo magnético no condutor.

Significa isto que, se um magneto se mover no interior de uma bobina, ao longo do eixo da bobina, será desenvolvido um campo elétrico nesta que se opõem ao movimento do magneto. Pela equação de Faraday, pode ser representado por:

$$\nabla \times E = - \frac{\partial B}{\partial t} \quad (20)$$

Onde, $\nabla \times$ é operador nabla, E o campo elétrico, B densidade do campo magnético e t , o tempo. No entanto pode-se exprimir a *fem*, por:

$$fem = -\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{d(\iint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A})}{dt} \quad (21)$$

O dl (em metro) é um elemento do comprimento ao longo do circuito, B densidade do campo magnético (em teslas) e dA (em m^2) é o elemento da área perpendicular à direção do campo magnético. O integral duplo sobre a área é a superfície que é atravessada pelo campo magnético e o integral fechado é ao longo do circuito onde a fem é induzida. Para N espiras da bobina, é necessário multiplicar a expressão pelo seu número total.

De uma forma simplificada, não considerando perdas (forças de atrito, força eletromagnética de arrasto, entre outras), ε que representa fem poderá ser dada por:

$$\varepsilon \cong -N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad (22)$$

Sendo N , número de espiras. E de acordo com a expressão 21, de uma forma também simplista, numa primeira aproximação dos cálculos, podemos considerar que:

$$\Phi = B \cdot A \quad (23)$$

Conforme mencionado anteriormente, B é a densidade do fluxo magnético e A é área que é atravessada pelo fluxo magnético.

Não considerando o atrito que possa existir na interação magneto e o tubo, pode-se afirmar que:

$$\varepsilon = \alpha(r)\dot{r} \quad (24)$$

Onde $\alpha(r)$, é designado por fator de acoplamento eletromagnético, que permite determinar a densidade do fluxo magnético em função da posição r , número de espiras ou influência do dipolo magnético e o efeito das forças magnéticas no corpo. Para que haja variação de fluxo é necessário haver uma velocidade associada, que é $\dot{r}$.

3.2.2 Mecânica do sistema

Para descrição e análise do modelo de produção de energia que se implementou, foi importante numa primeira fase analisar os movimentos associados.

3.2.2.1 Equação do movimento

O magneto irá estar no interior de um tubo, em que o deslocamento angular irá proporcionar que o magneto se mova devido à ação da gravidade, figura 3.2.

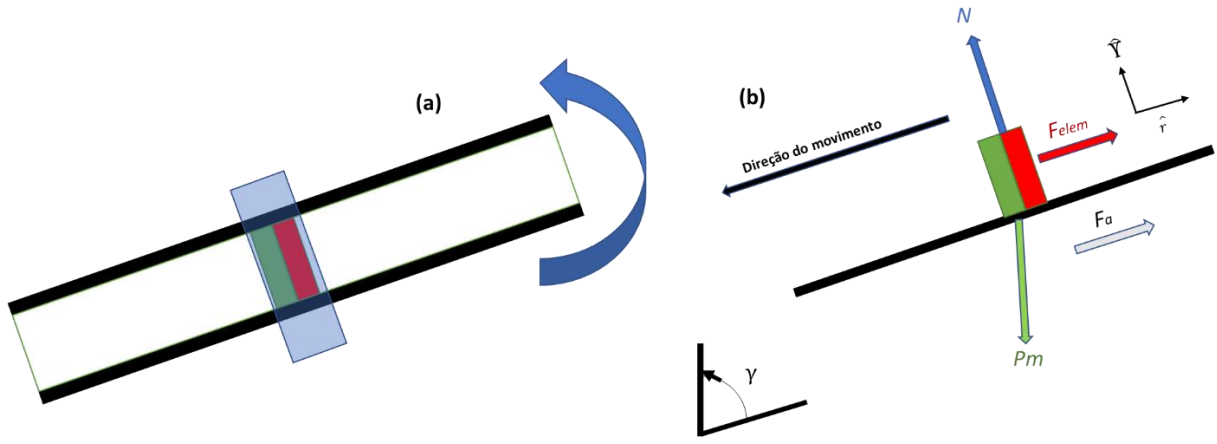


Figura 3.2. a) Magneto dentro do tubo, (b) Diagrama de forças do movimento descendente do magneto, com um ângulo Y . F_a é a força de atrito, F_{elem} é a força eletromagnética, P_m é o peso do magneto e N a força normal ao corpo.

A primeira etapa para descrever o modelo, é descrever o movimento do magneto, através da equação da segunda lei de Newton, tendo em atenção o atrito e os topos do tubo, que estarão fechados, limitando assim o curso do movimento.

O sistema irá ser inserido no interior de um corpo (no caso em estudo, terá de ser estanque), que se irá movimentar em função da oscilação das ondas e corrente.

Supondo que o tubo parte da posição horizontal e atinge um ângulo Y , entre o tubo e a vertical que permita o movimento descendente do magneto, então existirá duas forças opostas ao movimento, a F_a e F_{elem} . Considera-se que vetor unitário $\hat{r}$ é a direção positiva de r , $\hat{Y}$ é o vetor unitário da direção positiva do ângulo e P_m é o peso do magneto. A parede do tubo, irá provocar uma força normal (N) perpendicular ao lado do magneto e F_a irá provocar uma força contrária ao movimento. A F_{elem} , é força de arrasto eletromagnético que ocorre devido à interação entre a bobina e o magneto, isto é, entre campo magnético do magneto em movimento e o campo magnético da corrente produzida na bobina. Aplicando ao diagrama da figura 3.2, a segunda equação do movimento de Newton, considerando o movimento circular, mas não uniforme, na direção de r , a força resultante obtida é:

$$\sum F_r = m(\ddot{r} + r\omega^2) \quad (25)$$

O m é a massa do magneto, $\ddot{r}$ é componente tangencial da aceleração em r , a componente centrípeta é $r\omega^2$, sendo ω a velocidade angular em rads^{-1} e r a distância.

Expressando os termos de F_r do diagrama das forças, obtém-se:

$$F_a + F_{elem} - mg \cdot \cos(\gamma) = m(\ddot{r} + r\omega^2) \quad (26)$$

A força eletromagnética de arrasto (F_{elem}) está relacionada com a corrente e o fator de acoplamento eletromagnético que dependerá de vários fatores conforme será discutido

posteriormente, na seção 3.3.3. Pode-se então afirmar que:

$$F_{elem} = \alpha(r)I \quad (27)$$

Onde $\alpha(r)$, é fator de acoplamento eletromagnético que depende da posição do magneto na posição r e sendo I a corrente.

Substituindo a expressão de F_{elem} na expressão 26, a forma final da equação do movimento é:

$$F_a + \alpha(r)I - mg\cos(\gamma) = m(\ddot{r} + r\omega^2) \quad (28)$$

3.2.2.2 Atrito

É importante fazer referência ao atrito, uma vez que irá influenciar a escolha do material a ser utilizado. Este valor será encontrado experimentalmente através da análise de vários materiais, conforme irá ser descrito na seção 4.3.2.2.

No dispositivo proposto, a força a que estará sujeito o magneto é devida à aceleração da gravidade pelo deslizamento livre do corpo ou por uma aceleração provocada externamente ao corpo, devido ao seu movimento oscilatório não uniforme. Consideremos a figura 3.3 para análise das forças que são diretamente influenciadas pelo atrito.

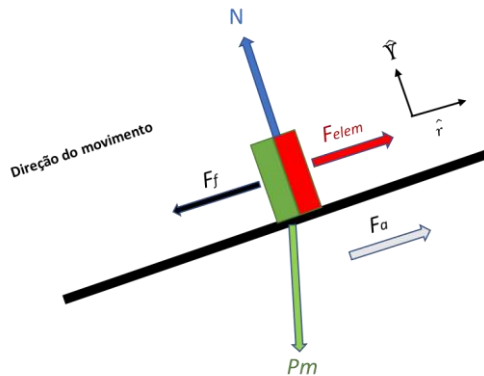


Figura 3.3. Diagrama de forças aplicadas, sendo o F_f uma força aplicada ao corpo.

A importância de se saber a influência do atrito, é a de permitir obter a expressão de N , a força normal aplicada ao magneto.

A existência de atrito entre o magneto e o tubo, e considerando o sistema em repouso, haverá então um ângulo γ mínimo em que o corpo pode movimentar-se livremente. Este ângulo pode ser determinado experimentalmente após a seleção do material do tubo.

Relativamente ao atrito, deve-se ter atenção algumas condicionantes.

Se $F_a \geq F_f$, o magneto não se irá movimentar, por outro lado se $F_f \geq F_a$, então o magneto irá movimentar-se e três situações possíveis passarão ocorrer:

-O tubo atingiu o ângulo mínimo necessário para permitir que o magneto deslize

livremente;

-Existe uma força devido à aceleração do sistema que proporcionou o seu deslizamento, enquanto o magneto estava em repouso;

-O tubo atingiu um ângulo superior ao mínimo, devido a uma aceleração aplicada ao sistema e que permitiu o movimento do magneto;

Considerando que $F_a = \mu_s N$, onde μ_s é o coeficiente de atrito estático, N a força normal e $F_a \geq F_f$, então o magneto estará em repouso, a velocidade $\dot{r} = 0$, assim como também a sua aceleração $\ddot{r} = 0$. Nesta situação pode afirmar-se que F_a é igual ao somatório da força resultante, e substituindo aceleração pelo valor zero e $F_f = F_a$ resulta a seguinte expressão:

$$F_f + \alpha(r)I - mg\cos(\gamma) = m(r\omega^2) \quad (29)$$

Obtendo-se o valor de F_f :

$$F_f = m(r\omega^2) - \alpha(r)I + mg\cos(\gamma) \quad (30)$$

Quando o magneto sai da situação de repouso descrito na expressão anterior, então:

$$F_a = (\mu_k N) \text{sgn}(\dot{r}) \quad \text{sendo } \text{sgn}(\dot{r}) = \begin{cases} 1 & \text{se } \dot{r} > 0 \\ 0 & \text{se } \dot{r} = 0 \\ -1 & \text{se } \dot{r} < 0 \end{cases} \quad (31)$$

Em que μ_k é o coeficiente de atrito cinético. O uso da função $\text{sgn}(\dot{r})$, é de forma assegurar que força de atrito é sempre oposta ao movimento do magneto.

Aplicando a segunda equação do movimento de Newton, na direção do ângulo γ , obtém-se a expressão:

$$\sum F_\gamma = N - mg\sin(\gamma) \quad (32)$$

Substituindo a força resultante pelos valores da massa e aceleração tangencial e centrífuga em função da velocidade angular vem então:

$$m(r\dot{\omega} - 2\dot{r}\omega) = N - mg\sin(\gamma) \quad (33)$$

Das expressões anteriores, pode-se calcular o N , F_a , F_f e considerando os incrementos das distâncias percorridas ou da variação angular em função do tempo, será igualmente constatado que:

$$\omega = \frac{\Delta\gamma}{\Delta t} \quad (34)$$

Desta expressão retirar-se a velocidade angular em função da variação dos incrementos do ângulo final e ângulo inicial, no tempo t . Da mesma forma, pode-se retirar o deslocamento do magneto Δr pela expressão:

$$\dot{r} = \frac{\Delta r}{\Delta t} \quad (35)$$

Substituído na expressão 26, o F_t obtido na expressão 30 obtém-se:

$$\ddot{r} = \frac{1}{m}(F_f - F_a) \quad (36)$$

Da mesma forma que foi representado na expressão 35, calcula-se as velocidades para qualquer instante através de:

$$\Delta \dot{r} = \frac{1}{m}(F_f - F_a)\Delta t \quad (37)$$

Com estas expressões determina-se a posição e velocidade em função da velocidade angular do dispositivo, no entanto o elemento mais crítico na fórmula é $\alpha(r)$.

As expressões 25 a 33, foram adaptadas do trabalho realizado por Joyce B. [60], mas, no entanto, são uma aproximação para descrição do dispositivo proposto, uma vez que estas expressões são ideais para movimento circular uniforme. Por exemplo podem ser aplicadas em dispositivos de produção de energia inseridas numa pá de uma turbina eólica. Nas expressões do dispositivo aqui proposto, será importante determinar o fator de acoplamento eletromagnético e serão feitas simplificações nas expressões, não considerando o movimento circular uniforme, pois iremos ter um movimento não uniforme e irregular no ambiente de onde se pretende extrair e converter a energia.

3.3 Requisitos do dispositivo

De acordo com o projeto NEXT_SEA alguns requisitos teriam de ser cumpridos para o sistema que se pretendia implementar:

- Produção de tensões baixas, que possam facilmente ser convertidas entre 3-5 V;
- Trabalhar em ambiente marítimo submerso, atingindo tensões e potências pretendidas, mesmo estando o sistema encapsulado devido ao ambiente marítimo;
- Fácil integração com outros sistemas;
- Possa produzir energia com frequências baixas, inferiores a 1 Hz;
- Fácil de replicar e de construção simples;
- Baixo custo de manutenção e de materiais;
- Capacidade de alimentar pelo menos um sensor de baixo consumo (até 1mW);
- Não possua partes móveis em contacto com a água, que possam ser afetados pelo biofouling [61];
- Possa ser integrado num corpo de dimensões reduzidas, inferior a 300x300x300 (Comprimento x Largura x Altura) mm, pelo que o sistema de produção de energia não deveria ultrapassar o comprimento de 100 mm.

Selecionado o tipo de mecanismo, seção 3.2, procedeu-se à seleção dos componentes, tipo de arquitetura e desenho.

3.4 Análise e seleção dos componentes

Considerando a necessidade de desenvolver um sistema de produção de energia de dimensões reduzidas, com a capacidade de ser incorporado num corpo de dimensões igualmente reduzidas, foi estabelecido um limite máximo de comprimento de 100 mm. Com esta limitação, foram selecionados os componentes que mais se adequam ao sistema. Nesse sentido, foi necessário realizar uma primeira seleção de possíveis magnetos que pudessem ser utilizados, definir o material para o tubo que irá conter o magneto e estabelecer o número de espiras da bobina.

Posteriormente, foi necessário realizar testes para avaliar qual o magneto a ser selecionado e o tipo de arquitetura mais adequada para o sistema a ser desenvolvido.

3.4.1 Magneto e Tubo

O magneto, é um dos componentes do sistema de produção que irá condicionar a geometria do tubo do dispositivo. O magneto foi selecionado de acordo com o tipo de material (N38, N42, N45 ou N54), a sua forma geométrica, o valor do seu magnetismo residual (Br) e o peso.

Foi aplicado o critério de seleção representado na figura 3.4.

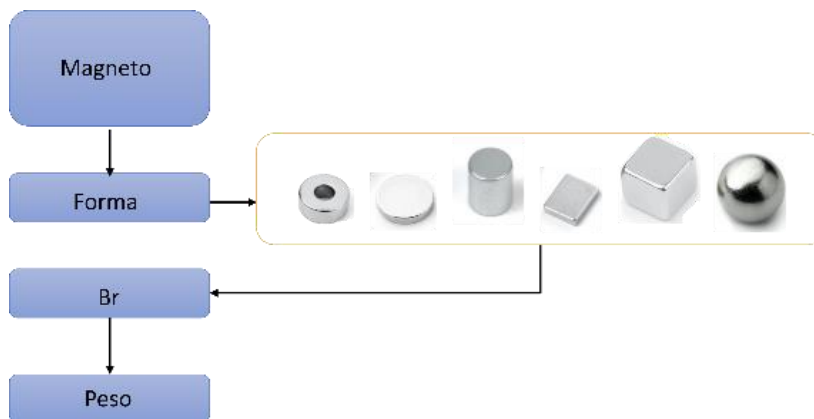


Figura 3.4. Critério de seleção, forma, magnetismo residual ou densidade de fluxo magnético remanescente (Br) em Tesla (T) ou Gauss (G) e peso.

3.4.1.1 Geometria do tubo

O magneto de disco quadrado ou mesmo o cúbico, não será aplicado devido apresentar maior área de contacto entre o magneto e corpo (maior atrito), do que os outros magnetos, considerando as mesmas dimensões e o mesmo espaço entre o magneto e o corpo/tubo que o irá

alojar. Em termos da sua geometria, figura 3.5, não seria complexo a sua realização.

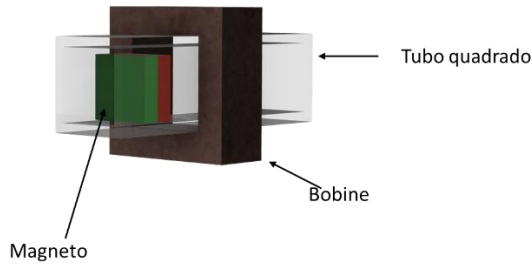


Figura 3.5. Forma do corpo e bobina para magnetos cúbicos ou discos quadrados (verde polo Norte, vermelho polo Sul).

O ímã de tipo anel (com orifício no meio), é mais apropriado quando se pretende montar num veio, embora possa também ser utilizado sem veio, desde que a sua espessura seja suficiente, de forma que não entre em rotação no interior do tubo. É uma hipótese a considerar em função do valor do B_r , figura 3.6.

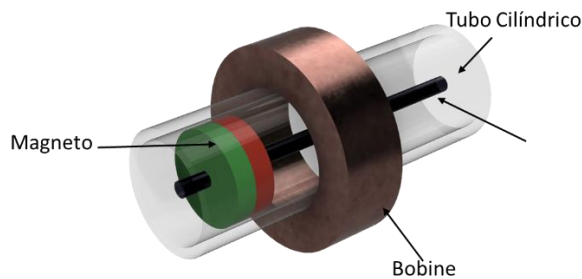


Figura 3.6. Ímã em forma de anel e corpo exterior (Verde, polo Norte, vermelho Polo Sul).

O ímã esférico, a sua posição magnética norte-sul, modifica-se durante o seu movimento de rotação e não permitindo assim um controlo da direção do fluxo magnético na bobina, Joos et al [62], figura 3.7.

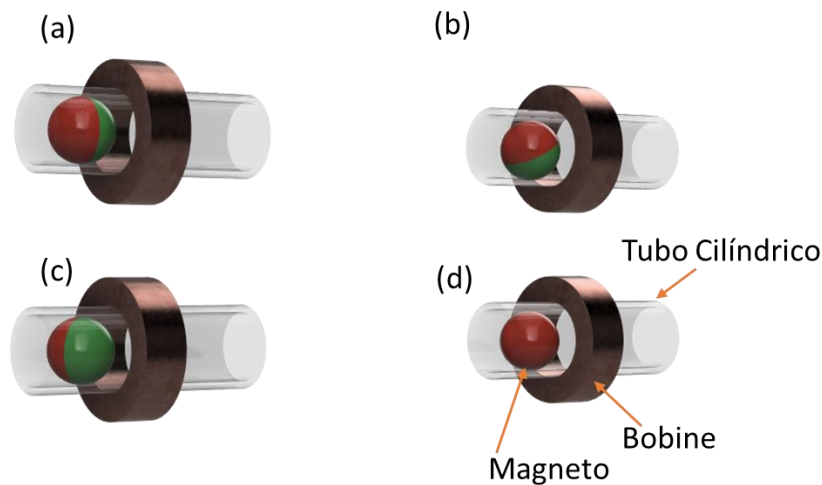


Figura 3.7. Vermelho da esfera é polo Norte e verde polo Sul, (a-d), algumas das posições que a esfera pode assumir. A forma exterior pode ser em tubo cilíndrico ou quadrado, alterando a forma da bobina.

O magneto de disco ou cilíndrico, devido à sua forma (idêntica ao do anel, mas este com uma massa inferior), poderá ser uma opção devido à sua facilidade de integração no dispositivo. No caso do disco terá de ter uma espessura que não permita a sua rotação no tubo. No caso do cilindro, não haverá esse problema, desde que a sua espessura não o permita, figura 3.8

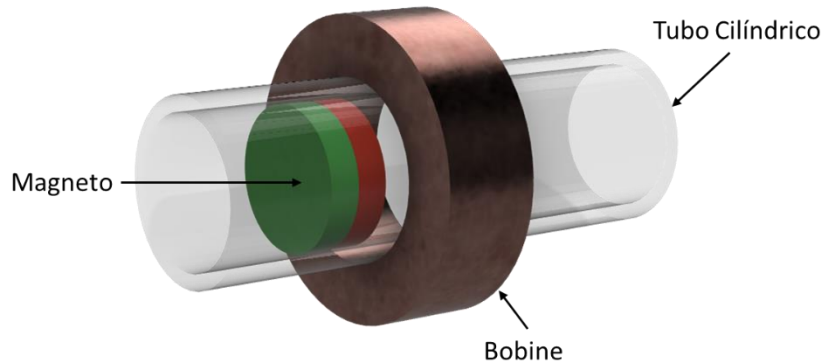


Figura 3.8. Magneto de disco ou cilíndrico (verde, polo Norte e vermelho polo Sul).

Antes de se proceder à seleção do material do magneto mais adequado, entre os magnetos NdFeB (neodímio), deve-se de ter em atenção ao valor de Br , $(B \times H)_{\max}$ que é a energia magnética armazenada no magneto e bH_c , o campo coercivo que é resistência de um material em manter sua magnetização quando submetido a um campo magnético externo.

Consultando os valores das especificações do fabricante, retirado do site (<https://www.supermagnete.pt/supermagnete-strong-neodymium-magnets>), existem várias opções em termos da especificação para o magneto, tabela 3.1.

Tabela 3. 1. Material do magneto, com capacidade de trabalhar até 80°C.

NdFeB	Br (T)	$(B \times H)_{\max}$ (KJ/m ³)	bH_c (KA/m)
N42	1,29-1,32	318-334	860-955
N45	1,32-1,37	342-358	860-995
N48	1,37-1,42	358-382	860-995
N52	1,42-1,47	380-422	860-995

Em relação ao valor bH_c , verifica-se que a mesma apresenta um valor homogêneo para todos os materiais em estudo. Contudo, é importante realçar que a tensão induzida na bobina é diretamente proporcional ao valor do campo magnético remanescente (Br), sendo este fator crucial na avaliação da capacidade do magneto em gerar um campo magnético forte para um determinado tamanho ou volume, e consequentemente, no cálculo do valor máximo do produto de energia

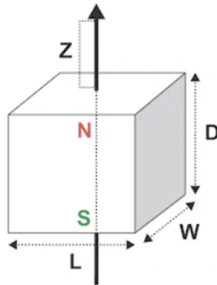
$(B \times H)_{\max}$.

Este parâmetro é de especial relevância em aplicações que requerem magnetos de dimensões reduzidas. De acordo com os dados apresentados na tabela 3.1, os magnetos N42 são os menos indicados, enquanto os N52 e N48 são os mais recomendados, no entanto apresentam uma menor diversidade de dimensões no fabricante. Por outro lado, o magneto N45 oferece um leque mais abrangente de opções dimensionais, o que pode implicar a utilização de dimensões que não se encontram disponíveis nos N48 e N52 e que vão ao encontro do que se pretende, isto é usar materiais disponíveis e de fácil acesso.

Com base no critério anterior, para as dimensões pretendidas optou-se pelo material N45, que poderá ser posteriormente substituída pelo N48 ou N52, caso estas dimensões estejam disponíveis, de forma a maximizar o campo magnético produzido pelo magneto.

Atendendo que o valor da fem é diretamente influenciado pelo valor da densidade do fluxo magnético, então, por forma a selecionar qual das geometrias anteriores é mais adequada, deve-se calcular os valores da densidade do fluxo em função da sua distância, para os magnetos com as dimensões idênticas [63,64].

Para a geometria em bloco ou cúbica, figura 3.5 foi utilizado para o cálculo da densidade de fluxo magnético, a expressão 38, geometria de bloco na figura 3.9.



- B_r : Densidade de fluxo magnético remanescente, independente da geometria do magneto
- z : Distância da face do polo no eixo de simetria
- L : Comprimento
- W : Largura
- D : Espessura ou altura

Figura 3.9. Magneto com geometria de bloco, figura do catálogo do fabricante (<https://www.supermagnete.de>).

$$B = \frac{B_r}{\pi} \left[\arctan \left(\frac{LW}{2z\sqrt{4z^2 + L^2 + W^2}} \right) - \arctan \left(\frac{LW}{2(D+z)\sqrt{4(D+z)^2 + L^2 + W^2}} \right) \right] \quad (38)$$

Obtenção do valor da densidade do fluxo magnético para a geometria de anel, é dada pela expressão 39, geometria na figura 3.10.

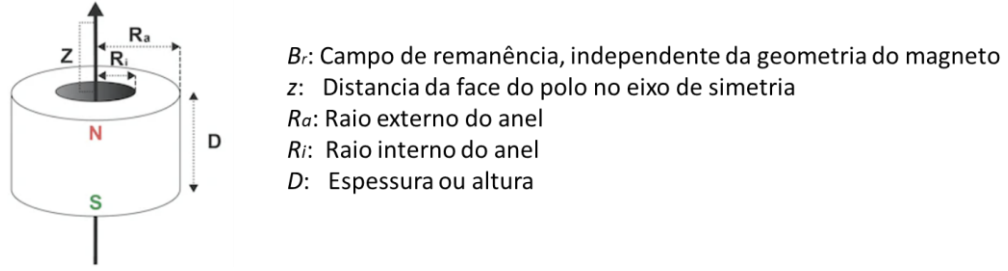


Figura 3.10. Magneto com geometria de anel, figura do catálogo do fabricante (<https://www.supermagnete.de>).

$$B = \frac{B_r}{2} \left[\frac{D+z}{\sqrt{R_a^2 + (D+z)^2}} - \frac{z}{\sqrt{R_a^2 + z^2}} - \left(\frac{D+z}{\sqrt{R_i^2 + (D+z)^2}} - \frac{z}{\sqrt{R_i^2 + z^2}} \right) \right] \quad (39)$$

A densidade do fluxo magnético para a geometria de uma esfera, figura 3.11, foi calculada pela expressão 40.

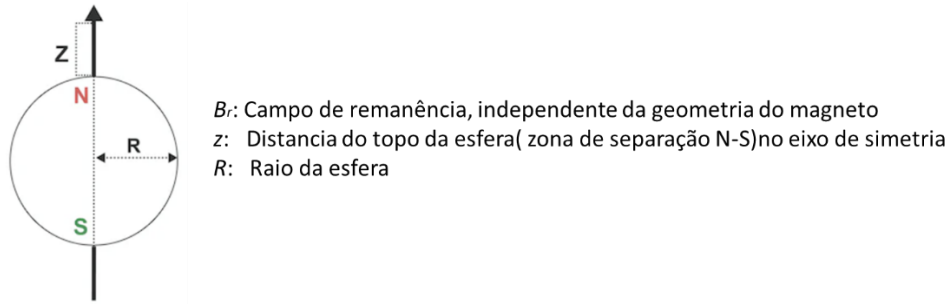


Figura 3.11. Magneto esférico, figura do catálogo do fabricante <https://www.supermagnete.de>.

$$B = B_r \frac{2}{3} \frac{R^3}{(R+z)^3} \quad (40)$$

Para o cálculo da densidade de fluxo magnético de um disco cilíndrico ou cilindro, figura 3.12, foi utilizada a expressão 41.

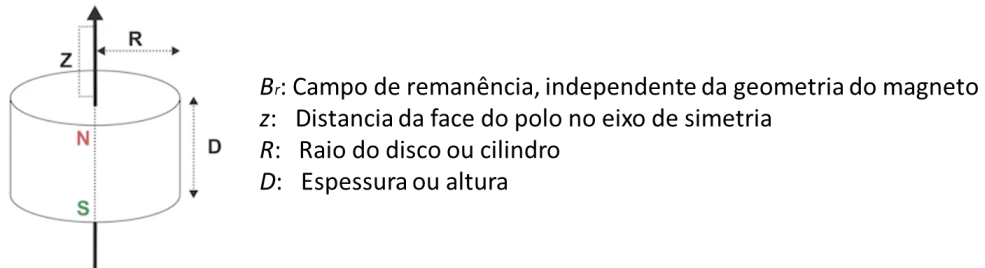


Figura 3. 12. Magneto com geometria de disco ou cilindro, figura do catálogo do fabricante (<https://www.supermagnete.de>).

$$B = \frac{B_r}{2} \left(\frac{D+z}{\sqrt{R^2 + (D+z)^2}} - \frac{z}{\sqrt{R^2 + z^2}} \right) \quad (41)$$

O fluxo magnético é influenciado pela geometria do magneto. Considerando que o z das figuras anteriores é a distância do magneto à bobina e com base nas expressões 22,23 e 24, quanto maior B , para uma mesma área da bobina, maior será o valor de Φ e consequentemente fem também

terá maior valor. Para seleção da geometria e dimensão do magneto aplicado no sistema de produção pretendido, foram aplicadas as expressões 38 a 41 e os valores obtidos para magnetos N45, estão representados nos gráficos da figura 3.13.

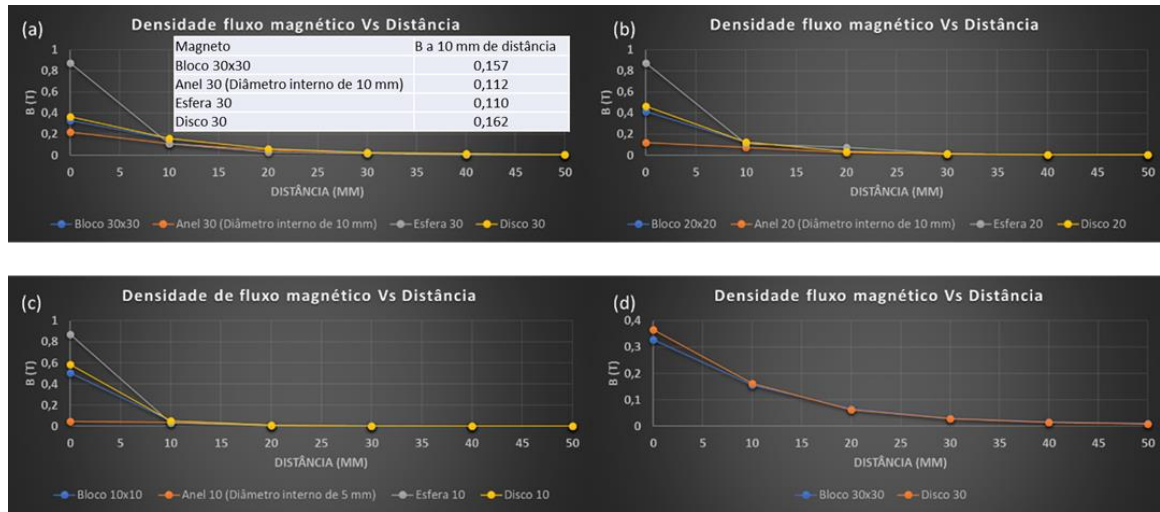


Figura 3. 13. Comparação entre as diferentes geometrias para uma espessura de 10 mm, a) Dimensão máxima de 30 mm, b) Dimensão máxima de 20 mm, c) Dimensão máxima de 10 mm, d) Comparação entre o bloco e disco com dimensão máxima de 30 mm.

A esfera para qualquer umas das dimensões, para distâncias inferiores a 10 mm seria a melhor escolha, uma vez que apresenta maior valor de densidade de fluxo magnético. No entanto, a partir de 10 mm, o disco apresenta melhores valores de B (anexo II, tabela com os valores calculados). A geometria do anel, para qualquer uma das dimensões, é a que apresenta menores valores de B . A geometria do bloco e disco, para as mesmas dimensões são os que apresentam valores próximos, sendo os valores de B para o bloco ligeiramente superiores (anexo II), no entanto as diferenças não são significativas, pelo que foi selecionado a geometria em disco pela simplicidade de construção e área de contacto entre o disco e o tubo ser menor, conforme já mencionado anteriormente.

3.4.1.2 Material do tubo cilíndrico

A seleção do material para o fabrico do tubo requer uma avaliação criteriosa, tendo em vista o compromisso entre o coeficiente de atrito e o nível de inclinação necessário, que permita o movimento de translação do magneto. É importante salientar que um coeficiente de atrito elevado implicaria um ângulo maior para iniciar o movimento, o que não seria desejável num ambiente marítimo, uma vez que pode ocorrer uma mudança abrupta na direção e no sentido do movimento

do tubo, não permitindo tempo suficiente para que o magneto possa passar pela bobina. Por outro lado, um coeficiente de atrito muito baixo permitiria que o magneto se movimente com mínima oscilação, mesmo em pequenos ângulos, contudo, a velocidade de deslocamento será reduzida, resultando em tensões mais baixas. Desse modo, foi imprescindível realizar testes de coeficiente de atrito estático e cinético em diferentes materiais comumente utilizados, tais como ácido polilático (PLA), acrilonitrilo butadieno estireno (ABS), Teflon ou politetrafluoretileno (PTFE), Acrílico e Nylon, a fim de se determinar a opção mais adequada para a finalidade proposta.

Utilizando a técnica de fabricação aditiva denominada deposição de material fundido (*Fused Deposition Modeling*, FDM), foram produzidas diversas placas a partir dos materiais PLA e ABS, enquanto os materiais PTFE e acrílico foram adquiridos já prontos a serem utilizados nos testes. É importante ressaltar que a escolha pela utilização de placas em detrimento dos tubos para análises de atrito e rugosidade se deve às limitações impostas pelas máquinas empregadas nos ensaios. Com o intuito de se obterem resultados representativos e fidedignos, foram produzidas várias placas de cada material, variando-se a altura das camadas em 0,1 mm, 0,2 mm e 0,3 mm, como ilustrado na figura 3.14.

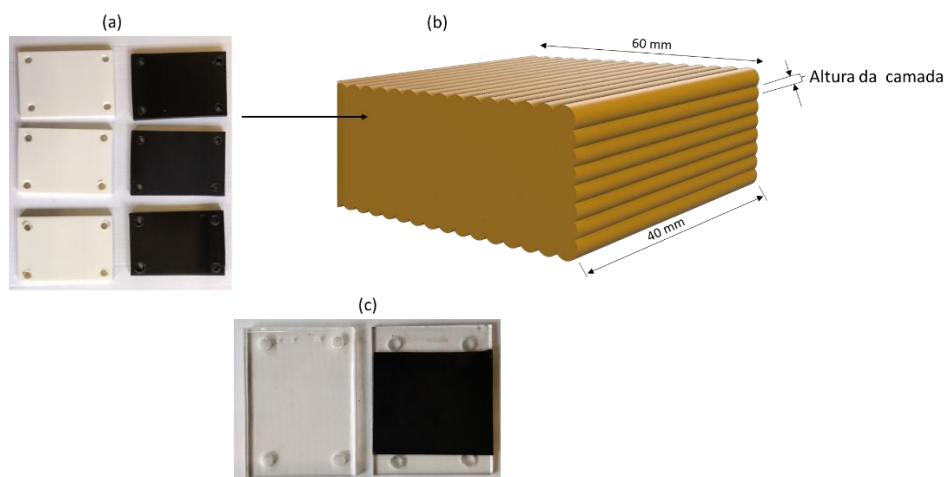


Figura 3.14. Placas produzidos e de compra, a) Placas de PLA e ABS, com 60x40x5 mm, b) Representação das camadas de fabrico por FDM, c) Placa de acrílico do lado esquerdo e placa de PTFE do lado direito.

3.4.1.2.1 Determinação da rugosidade média (R_a)

Os ensaios foram realizados no equipamento de medição de rugosidade, HandySurf + 35, figura 3.15.

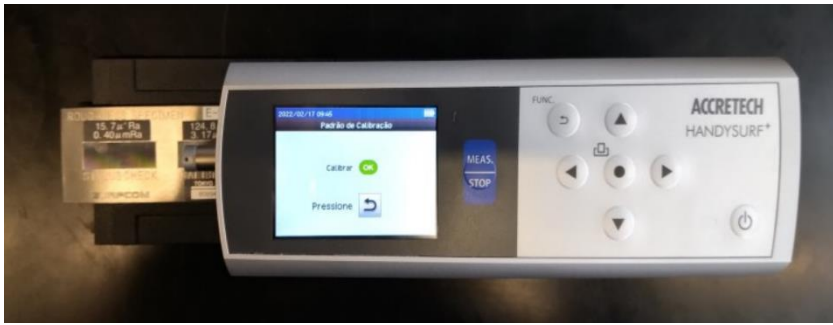


Figura 3.15. Medidor de rugosidade.

Foram efetuados 3 ensaios por cada placa, na orientação da maior dimensão, obtendo-se os valores de rugosidade média indicados nas tabelas 3.2.

Tabela 3. 2. Valores de R_a (μm).

Espessura (mm)	ABS1	ABS2	ABS3	PLA1	PLA2	PLA3
0,1	2,17	2,152	2,15	2,104	2,153	2,202
0,2	1,711	1,707	1,702	1,485	1,495	1,503
0,3	1,363	1,351	1,349	1,209	1,223	1,232

As amostras de ABS, são designadas por ABS1, ABS2 e ABS3, e a mesma numeração para os restantes materiais.

Na tabela 3.3, temos os valores de R_a para acrílico (AC1, AC2, AC3) e teflon (PTFE1, PTFE2, PTFE3).

Tabela 3. 3. Valores de R_a (μm).

AC1	AC2	AC3	PTFE1	PTFE2	PTFE3
1,705	1,722	1,751	0,007	0,007	0,007

Pela análise dos valores das tabelas, verifica-se que os valores de rugosidade de acrílico são próximos do ABS para a camada de impressão de 0,2 mm. O PTFE, pode-se considerar uma superfície muito lisa, portanto, com bom polimento, o que não será um material mais adequado para o fabrico do nosso tubo, devido às restrições anteriormente mencionadas.

Além do valor de rugosidade, para selecionar o material, foi necessário determinar o coeficiente de atrito estático.

3.4.1.2.2 Determinação dos coeficientes de atrito

Os ensaios foram conduzidos utilizando o equipamento denominado UMT3 CETR com o

propósito de determinar os coeficientes de atrito estático entre diferentes materiais e um material com características similares às dos magnetos. A metodologia adotada empregou a teoria de contato de Hertz, a qual considera a área de contato entre o material em questão e o magneto. Utilizou-se uma esfera não magnetizada de 10 mm de diâmetro, com propriedades similares às do magneto, uma vez que tanto o equipamento quanto a bancada de ensaio são constituídos de aço. Conforme ilustrado na figura 3.16.



Figura 3.16. Máquina de tribologia UMT3 CETR.

Mediante a utilização das equações da teoria de contato de Hertz, e tendo em consideração a área de contato, foi determinada a força de 1 N a ser aplicada durante os ensaios. Os resultados dos ensaios de atrito estático, obtidos por meio da realização de três ensaios para cada material em análise, encontram-se apresentados na tabela 3.4.

Tabela 3. 4. Coeficiente de atrito estático.

Espessura (mm)	ABS	PLA	AC	PTFE
0,1	0,138	0,227	0,163	0,103
0,2	0,179	0,169		
0,3	0,211	0,210		

3.4.1.2.3 Seleção do material para o tubo cilíndrico

Em consonância com os critérios anteriormente mencionados, constatou-se que o material mais adequado para aplicação é o acrílico, uma vez que este apresentou valores de rugosidade e

coeficiente de atrito estático intermédios em relação aos outros materiais em análise. Não obstante, ainda que os valores do coeficiente de atrito estático do acrílico sejam similares aos do PLA e ABS, em relação à espessura da camada de 0,2 mm, há dois fatores que devem ser considerados. Primeiro, os materiais PLA e ABS são mais dúcteis em comparação ao acrílico, tornando-os suscetíveis a maior desgaste por fricção com o magneto. Segundo, esses materiais podem sofrer deformação caso sejam encapsulados em materiais como resinas epóxis ou poliuretanos, os quais apresentam reações exotérmicas com temperaturas próximas a 90°C.

3.4.2 Bobina

Inicialmente, considerando um sistema ideal, sem perdas, é possível aplicar as expressões 22, 23 e 41 para determinar o número de espiras necessário em função da tensão requerida. O fio de cobre utilizado tem um diâmetro de 0,2 mm e uma resistência elétrica de 0,427 Ω /m (obtida experimentalmente). Para esta etapa inicial, a altura da bobina considerada foi de 6 mm com uma largura útil de 10 mm. Foram considerados um magneto de disco com diâmetro de 30 mm, um tubo cilíndrico de acrílico com diâmetro interno de 32 mm e diâmetro externo de 34 mm. Considerou-se que o suporte da bobina tem um diâmetro interno de 36 mm e um diâmetro externo de 48 mm. A dimensão útil da bobina foi de 36 mm de diâmetro interno e 48 mm de diâmetro externo, figura 3.17.

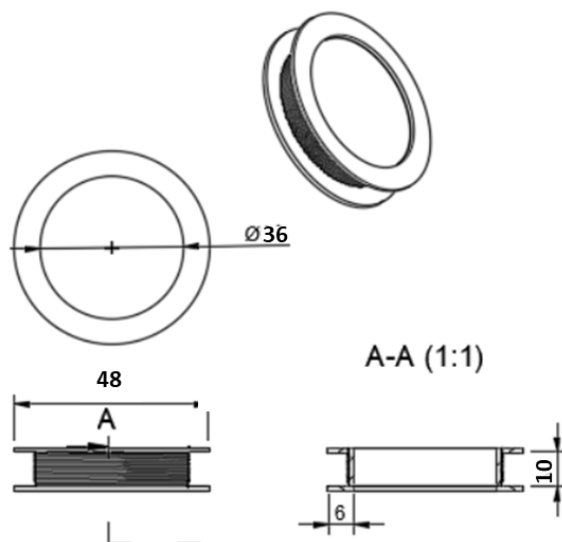


Figura 3.17. Dimensões do suporte da bobina, unidades em mm.

Conforme os requisitos estabelecidos, era necessário que o sistema alcance tensões iguais ou superiores a 3 V para permitir o carregamento de uma bateria ou condensador. Como ocorrem perdas no sistema (queda de tensão, força de atrito) e que não estão contempladas nas expressões

previamente mencionadas, é conveniente que a tensão de saída seja superior a 5V. Considerando o preenchimento total da bobina com fio de cobre de diâmetro 0,2 mm, pode-se incluir 1500 espiras no suporte da bobina. Realizando um cálculo inicial teórico, utilizando os valores de Br da tabela do fabricante do magneto e considerando a queda livre do magneto, de acordo com o esquema da figura 3.18, é possível obter, através da expressão 41, os valores teóricos da tensão. Para a determinação da velocidade e do tempo, devem ser utilizadas as equações da queda livre, obtendo-se assim os valores de B a partir das expressões do fabricante. Importante salientar que este cálculo considera um sistema ideal, sem perdas.

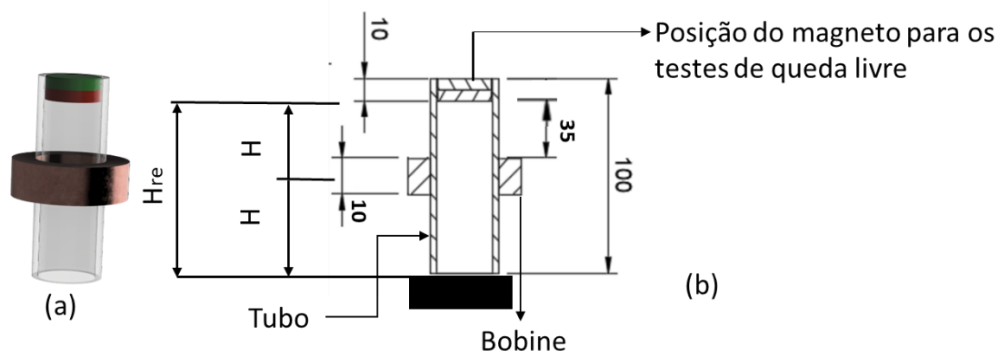


Figura 3.18. a) O dispositivo, b) Desenho de corte do dispositivo para fixação das cotas utilizadas nos cálculos teóricos, unidades em mm. H cota relativa.

Na tabela 3.5, estão os valores obtidos da tensão teórica de acordo com as considerações efetuadas, e na figura 3.19, a representação das tensões teóricas.

Tabela 3. 5. Tensões teóricas da queda livre.

<i>H</i> re(mm)	<i>H</i> (mm)	Velocidade (m/s)	Tempo (s)	<i>B</i> (T)	Tensão (V)
0,0	37,5	0,000	0,000	0,017	0,000
2,5	35,0	0,221	0,023	0,019	0,997
12,5	25,0	0,495	0,050	0,041	1,925
17,5	20,0	0,586	0,060	0,062	2,460
22,5	15,0	0,664	0,068	0,099	3,464
27,5	10,0	0,735	0,075	0,162	5,128
32,5	5,0	0,799	0,081	0,258	7,512
37,5	0,0	0,858	0,087	0,366	9,920
40,0	40,0	0,000	0,090	0,000	0,000
42,5	0,0	0,913	0,093	-0,366	-9,319
45,0	2,5	0,940	0,096	-0,258	-6,384
55,0	12,5	1,039	0,106	-0,162	-3,626
60,0	17,5	1,085	0,111	-0,099	-2,121
65,0	22,5	1,129	0,115	-0,062	-1,276
70,0	27,5	1,172	0,119	-0,041	-0,813
75,0	32,5	1,213	0,124	-0,019	-0,364
80,0	37,5	1,253	0,128	-0,017	-0,315

Para elaborar a tabela de tensões, foram assumidas algumas considerações que visam garantir a proximidade do número de espiras com o pretendido. Inicialmente, considerou-se o valor de 80 mm para o deslocamento do magneto, em vez dos 100 mm, devido aos 10 mm de espessura do magneto, e a queda inicia-se sempre na cota 10 mm da face do magneto, independentemente de ser a face Norte ou Sul. Além disso, assume-se que os valores da face Norte têm valor negativo.

Na coluna H da tabela 3.5, a cota relativa, foram registadas as distâncias que o magneto se aproxima ou se afasta do centro da bobina. Os primeiros valores de 37,5-0 mm correspondem às distâncias de aproximação ao centro da bobina, enquanto os valores de 0-37,5 mm da coluna H_{re} correspondem às distâncias de afastamento. Verifica-se que os valores da coluna H_{re} de 0-37,5 mm são iguais aos valores na parte inferior da coluna H , após o valor 40, garantindo assim, a geometria para o cálculo da tensão (fem) em função da densidade do fluxo magnético (B).

Assume-se que no centro da bobina, localizado na cota 40 mm, a tensão é nula, coincidindo com o eixo do plano perpendicular da face do magneto e o eixo de simetria da bobina [65]. O fator de acoplamento eletromagnético, incluído na coluna de tensão (fem), foi determinado em função da posição do magneto em relação à bobina.

Por último, assume-se a existência de duas tensões máximas, uma positiva e outra negativa, nas cotas 37,5 mm e 42,5 mm, respetivamente, o que implica maiores valores de densidade de fluxo. Os valores máximos são atingidos a $\frac{1}{4}$ e $\frac{3}{4}$ da largura da bobina [65].

Face às considerações anteriores e aos valores obtidos na tabela 3.5, a figura 3.19 apresenta o resultado das tensões em função da queda livre do magneto.

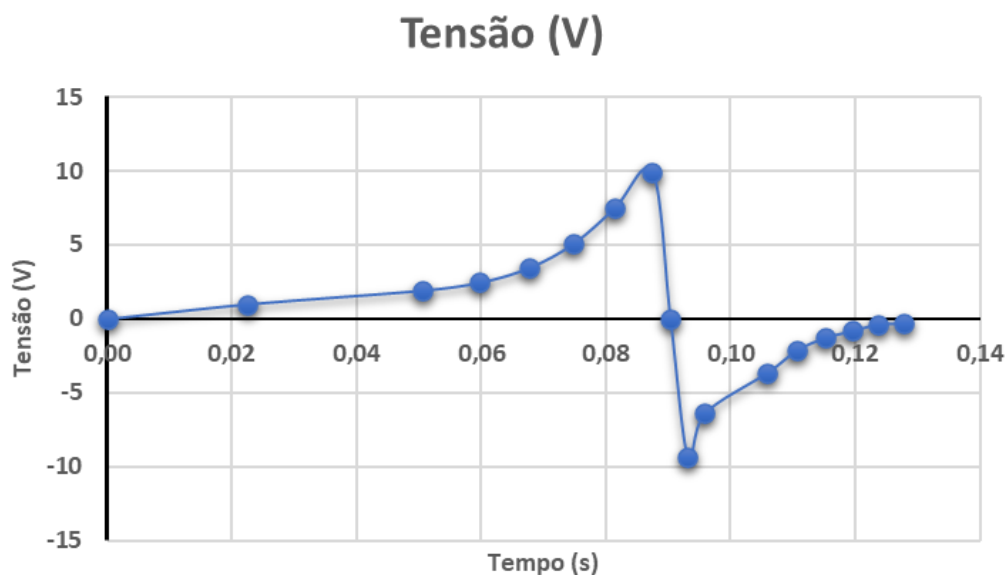


Figura 3.19. Tensões teóricas obtidas com tempo de queda total 0,128 segundos.

Por forma a validar se as considerações efetuadas e o cálculo teórico são próximos dos valores experimentais, foram realizados testes nas mesmas condições dos pressupostos assumidos, usando um osciloscópio PicoScope 2024A com uma taxa de amostragem de 500 Hz.

Na figura 3.20, está representado o gráfico do valor teórico com um dos valores experimentais.

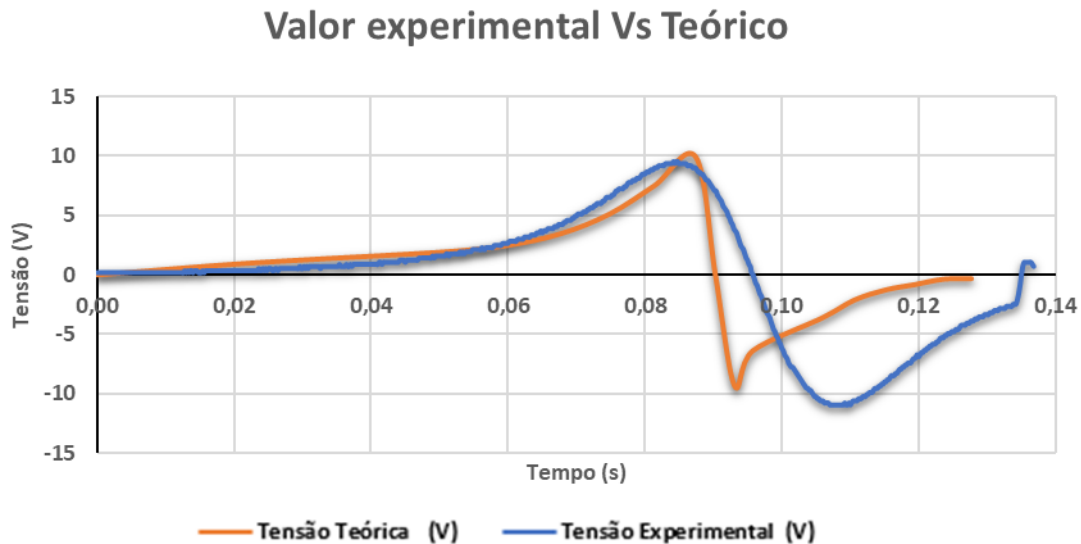


Figura 3.20. Valor experimental e valores teóricos.

Com base na observação do gráfico, pode-se inferir que as tensões apresentam comportamento semelhante, mesmo quando são utilizadas poucas posições para o valor teórico da tensão. O objetivo principal do cálculo é verificar se os valores teóricos estão próximos dos experimentais e se ambos os valores se aproximam dos valores tensão pretendidos.

Os resultados experimentais indicam que, na meia-onda positiva, os valores são mais elevados na aproximação à bobina, embora a tensão máxima seja mais baixa do que a teórica. Na meia-onda negativa, o valor experimental da tensão, em módulo, é superior ao valor teórico. Este comportamento foi observado nos diversos ensaios realizados.

Uma possível razão para esta diferença é que a densidade do campo magnético pode ser maior do que a especificada pelo fabricante, no entanto para obter os valores teóricos foi usado o valor mais baixo, 1,32 T e não 1,37 T. Para analisar esta diferença e otimizar o dispositivo de produção de energia, será necessário medir os valores de B . Outro fator importante a ser considerado é que, durante os testes de queda livre, o movimento do disco nem sempre foi uniforme devido à espessura do disco ser de 10 mm. Por vezes este tinha tendência a oscilar um pouco e não se manter na posição horizontal como pretendido. No entanto os valores dos ensaios onde ocorreu esta situação não foram considerados.

Outro aspeto observado no gráfico é que a meia-onda negativa começa depois do valor teórico, indicando um atraso no movimento. Esse atraso ocorre devido à força eletromagnética de arrasto, que ocorre quando há transferência de energia para as espiras da bobina devido ao movimento do magneto.

Com base na análise realizada, é possível afirmar que o método proposto neste trabalho de investigação permite uma primeira abordagem das tensões produzidas e verificar se o número de espiras e o magneto são adequados ao que se pretende. Como os valores obtidos estão dentro dos parâmetros estabelecidos para o dispositivo de produção, o magneto de disco de 30 mm de diâmetro e 1500 espiras na bobina foram considerados para o fabrico do dispositivo.

Abordagem proposta neste capítulo, é a de permitir obter o número de espiras necessárias, sendo este parâmetro importante para qualquer modelo proposto, mesmo que esse modelo seja baseado na volumetria da bobina, considerando o fator de acoplamento eletromagnético.

Para validar o modelo proposto para obtenção das tensões, os modelos matemáticos propostos por Sneller et al [50] e Donoso et al [65], em que abordagem para o cálculo do fator de acoplamento eletromagnético é diferente, incluindo outras variáveis. A primeira consideração destes autores, é que a densidade do fluxo magnético a considerar deverá estar restrito ao fluxo perpendicular às espiras da bobina, designado por B_a na figura 3.21.

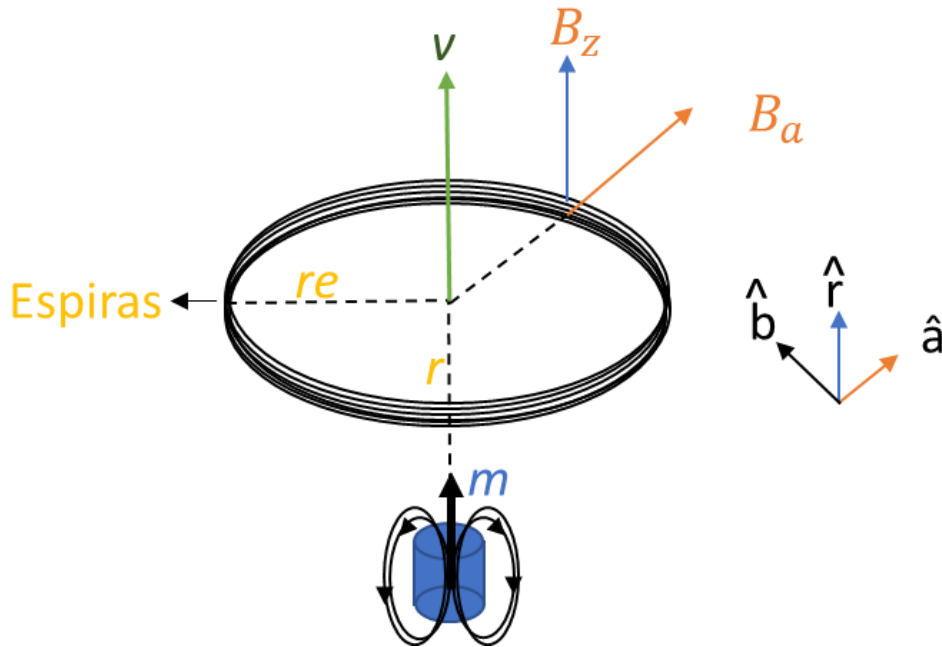


Figura 3.21. Magneto a mover-se no interior das espiras, m dipolo magnético, re raio das espiras, r distância da face do magneto ao plano que contém as espiras, B_z e B_a , densidade do fluxo magnético nas respetivas direções, $\hat{a}$, $\hat{b}$ e $\hat{r}$ são os vetores unitários, m dipolo magnético e v velocidade devido ao deslocamento em r .

Adaptando a expressão 21 à figura 3.21, a f_{em} é dada por:

$$\varepsilon = \dot{r} \oint_{l_c} B_a dl \quad (42)$$

Onde l_c é comprimento da espira, dl é o vetor diferencial do comprimento do fio e $\dot{r}$ velocidade do deslocamento do magneto. Esta expressão fica simplificada na mesma forma que a expressão 24, utilizada para o cálculo do número de espiras, mas os termos do fator de acoplamento eletromagnético serão diferentes, devido a ter sido considerado o B_a .

De forma a descrever as expressões que os investigadores Sneller e Donoso apresentaram, foi considerada a figura 3.22, com aplicação do modelo e dimensões iguais ao que permitiu determinar o número de espiras iniciais a serem utilizadas.

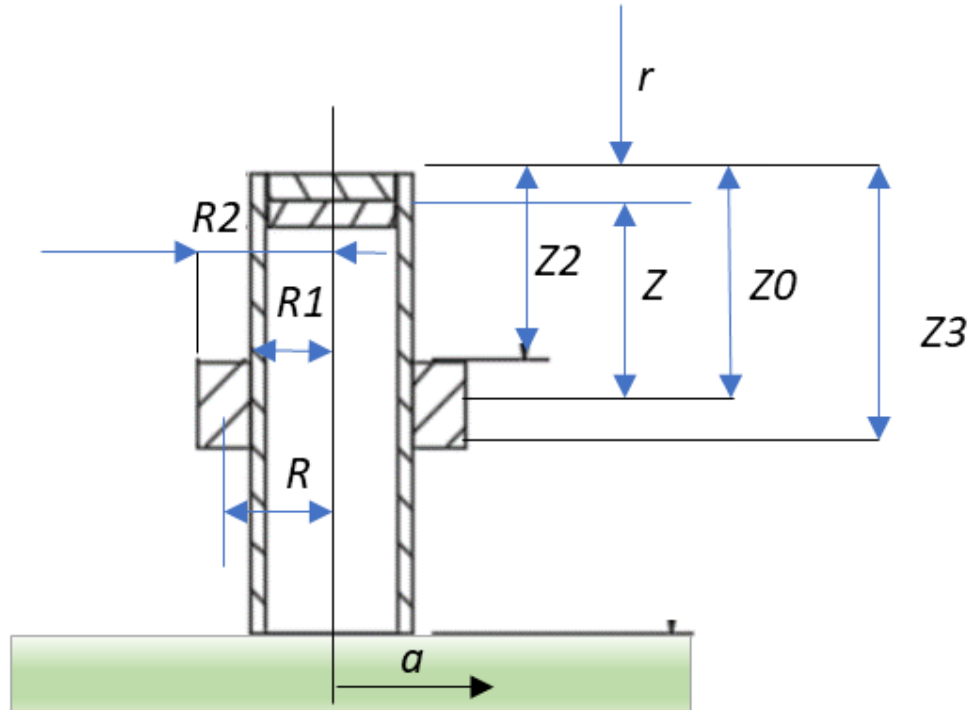


Figura 3.22. $R1$ e $R2$, Raio interno e externo da bobina, Z altura ao centro do magneto, r distância de progressão do movimento do magneto, $Z2$ e $Z3$, cota inferior e superior da bobina.

Nesta abordagem, considerando o dipolo magnético, a componente da densidade do fluxo magnético na direção a (figura 3.22) é dada por:

$$B_a = \frac{3\mu_0}{4\pi} m \frac{RZ}{(R^2 + Z^2)^{\frac{5}{2}}} \quad (43)$$

Sendo que m é o momento dipolo magnético e μ_0 a constante da permeabilidade no espaço livre ($4\pi \times 10^{-7}$ H/m). Como se pretende fazer os incrementos de r , o deslocamento do magneto, é considerado que $Z = Z0 - r$ e por questão de simplicidade substituindo na expressão 43, vem:

$$B_a = \frac{3\mu_0}{4\pi} m \frac{R(Z0 - r)}{(R^2 + (Z0 - r)^2)^{\frac{5}{2}}} \quad (44)$$

Considerando apenas o termo do fator de acoplamento eletromagnético da expressão 42, pode-se definir o $\alpha(r)$ de acordo com a figura 3.22, da seguinte forma:

$$\alpha(r) = \oint_{l_c} B_a dl = \left[\frac{1}{l_c} \oint_{l_c} B_a dl \right] l_c \quad (45)$$

Assumindo que a bobina tem as espiras de forma homogênea e bem apertada, sem espaços entre as espiras, então o B_a será o valor da sua média distribuída pelo volume da bobina, pelo que a expressão 45 em termos de volume é:

$$\alpha(r) = \left[\frac{1}{V_{Bob}} \int_{V_{Bob}} B_a dV \right] l_c \quad (46)$$

Onde, V_{Bob} é o volume da bobina e dV , é o elemento infinitesimal do volume da bobina.

Sabendo que $dV=RdRdZd\varphi$, onde φ será o angulo de revolução da bobina, que é 360° , a expressão do $\alpha(r)$ em termos de volume ocupado, é:

$$\alpha(r) = \int_{\varphi=0}^{2\pi} \int_{Z_2}^{Z_3} \int_{R_1}^{R_2} \frac{3\mu_0}{4\pi} m \frac{R(Z_0-r)}{(R^2+(Z_0-r)^2)^{\frac{5}{2}}} (RdRdZd\varphi) \quad (47)$$

Resolvendo a expressão anterior, obtém-se a expressão do fator de acoplamento, considerando o valor do dipolo magnético (m), comprimento do fio e volume da bobina, expressão 48.

$$\alpha(r) = \frac{0.5\mu_0 m l_c}{V_{Bob}} \left\{ \frac{R}{\sqrt{R^2+(Z_0-r)^2}} - \ln(\sqrt{R^2+(Z_0-r)^2} + r) \right\} l_{Z_0=Z_2}^{Z_3} l_{R=R_1}^{R_2} \quad (48)$$

Multiplicando o valor de $\alpha(r)$ por $\dot{r}$, expressão 24, é obtido a fem . Os valores teóricos das tensões obtidas pela expressão anterior, podem assim ser comparados com as tensões experimentais. Aplicando-se os limites Z_0 e R , obtém-se a relação entre a velocidade do magneto e a fem produzida. No entanto deve ser calculando primeiro o m e V_{Bob} .

O valor de m é dado por:

$$m = \frac{B_R V_m}{\mu_0} \quad (49)$$

O V_m é o volume do magneto. Considerando os valores que foram utilizados para obtenção da tensão teórica do gráfico da figura 3.22, número de espiras, volume da bobina, dimensão do magneto e o valor de m de $7,421 \text{ A}\cdot\text{m}^2$ calculado, é obtido o gráfico do valor teórico através da expressão 24 com o valor de $\alpha(r)$ da expressão 48, figura 3.23.

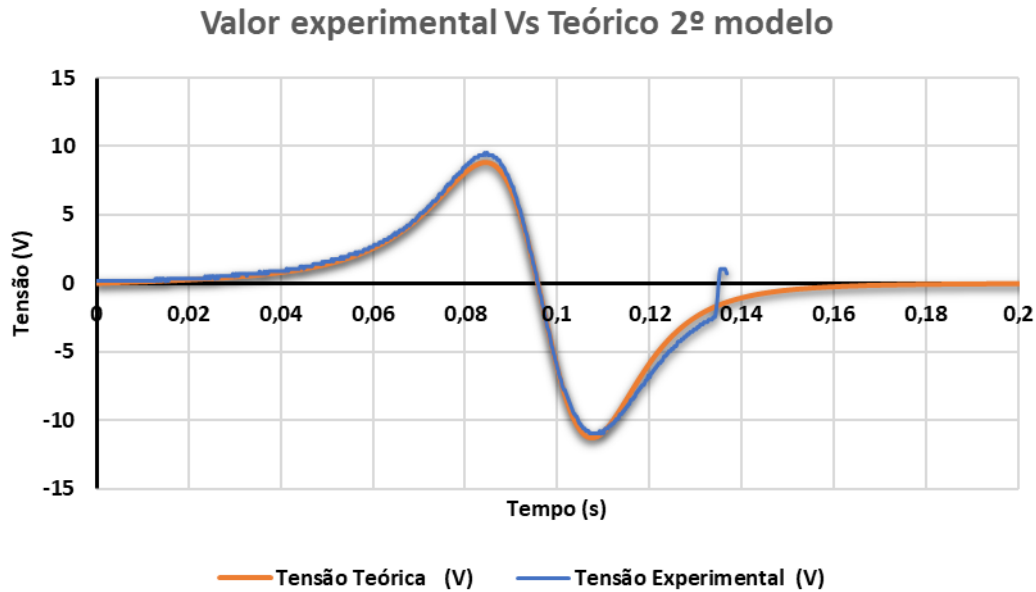


Figura 3.23. Valor experimental e valor teórico do modelo considerado.

Neste modelo matemático existe uma maior aproximação entre os valores experimentais e teóricos (Anexo II A, valores utilizados para o cálculo, com exemplo de alguns valores de tensão). A onda sinusoidal do valor experimental, finaliza antes da onda teórica, porque o tubo deveria ter um comprimento superior ao que tem, daí que se note a queda de tensão abrupta no final, que é o fim do tubo. No entanto, este dispositivo não necessita de ser maior, porque pretende-se tensões superiores a 5 V (devido a eventuais perdas) em distâncias mais curtas.

3.5 Análise do circuito elétrico do gerador linear eletromagnético

Para se representar o circuito elétrico, pode-se simplificar que a bobina está ligada em série, onde irá ser induzido uma *fem* (ε) devido ao movimento do magneto que atravessa a bobina, com uma indutância (L_{Bob}) e uma resistência interna (R_{Bob}). Para completar o circuito, uma resistência de carga (R_C) ligada à bobina. Conforme descrito, o magneto ao atravessar a bobina induzirá uma *fem* e uma corrente (i) irá fluir no circuito, figura 3.24.

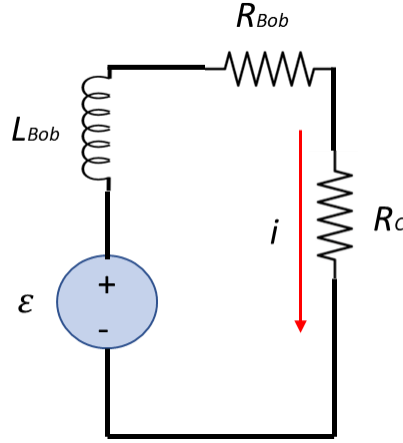


Figura 3.24. Representação do circuito do gerador eletromagnético.

Aplicando a lei das malhas de Kirchhoff no sentido do deslocamento horário, é obtida a expressão:

$$\varepsilon - L_{Bob} \frac{di}{dt} - R_{Bob}i - R_c i = 0 \quad (50)$$

Em consonância com a expressão 24, onde $\varepsilon = \alpha(r)\dot{r}$, dependente da velocidade do magneto, a expressão anterior fica:

$$\alpha(r)\dot{r} = L_{Bob} \frac{di}{dt} + (R_{Bob} + R_c)i \quad (51)$$

Desta forma, a corrente depende da posição e velocidade do magneto.

A tensão que irá atravessar a resistência de carga é:

$$V_c = iR_c \quad (52)$$

A potência produzida no gerador, é a potência dissipada na resistência de carga, e o seu valor é dada por:

$$P_c = i^2 R_c = \frac{V_c^2}{R_c} \quad (53)$$

3.6 Altura do magneto cilíndrico

Antes da seleção da arquitetura, uma consideração prévia é necessária, uma vez que tal decisão pode restringir as opções disponíveis. Conforme descrito no capítulo anterior, foram realizados testes em queda livre para determinar a força eletromotriz (*fem*), em que foi observado que o magneto utilizado apresentou uma inclinação ou rotação de 90 graus.

Este comportamento pode ser atribuído à altura do magneto, que é de 10 mm, e à folga existente entre o magneto e o tubo que permitiu a sua rotação. Tal situação não é adequada para o que se pretendia, tendo em vista a mesma razão pela qual não se considerou o uso de um magneto

em forma esférica, ou seja, devido à constante e imprevisível mudança dos polos magnéticos.

Assim sendo, as opções possíveis são, a junção de dois magnetos de 10 mm, aumentando assim a altura do corpo magnético para 20 mm, podendo ainda ser aumentado mais através de uso um separador intercalado entre os magnetos, ou em alternativa, usar um magneto cilíndrico com uma altura fixa de 20 mm. Para que seja tomada esta decisão, foram consultados artigos que podem fundamentar a seleção da configuração do magneto. No estudo conduzido por Halim M. et al. [56], este realizou uma análise comparativa da densidade do fluxo magnético numa bobina utilizando diferentes configurações de magnetos, incluindo um único magneto, dois magnetos adjacentes sem separador, dois magnetos adjacentes com um separador de ferro macio entre eles, e dois magnetos adjacentes com um separador de ferro macio posicionados em repulsão, isto é, com as faces de polaridade Sul-Sul voltadas uma para a outra. Os resultados evidenciaram que a utilização de um magneto, com a mesma altura que dois magnetos juntos, apresenta menor densidade de fluxo magnético. Assim, optou-se pela utilização de dois magnetos com 10 mm de espessura em detrimento de um único magneto com 20 mm de espessura. No mesmo estudo, a configuração mais eficaz foi a utilização de dois magnetos posicionados em repulsão com o separador de ferro macio entre eles. De acordo com os dados apresentados, destaca-se também que a altura do espaçador entre os magnetos exerce influência significativa sobre a densidade do fluxo magnético. Com base nessas informações, optou-se pela implementação da arquitetura II (mencionada no capítulo II), que envolve a junção de dois magnetos, mas com algumas adaptações para o dispositivo que foi proposto e fabricado.

No estudo, são utilizados magnetos de pequena dimensão com um diâmetro de 7 mm e o que se pretende aplicar são magnetos de 30 mm, com uma força de repulsão entre eles de aproximadamente 196 N, o que obrigaria a ter um suporte de fixação nos magnetos para que estes permanecessem sempre na mesma posição. Seria uma solução que iria comprometer a simplicidade que se pretende manter para o dispositivo proposto. Ao analisar o artigo dos autores anteriormente mencionados, verifica-se que a opção de dois magnetos com um separador entre eles mas com os polos em atração, é a segunda melhor opção em termos de densidade do fluxo magnético, mas no entanto existe uma alteração da configuração dos campos magnéticos, figura 3.25, confirmando-se assim que a melhor opção para a configuração pretendida é os magnetos em atração do que em repulsão, uma vez que a orientação do campo magnético nesta configuração não é o mais adequado para a bobina que se pretende utilizar. Eventualmente seria mais adequada para uma bobina que tivesse maior comprimento do que diâmetro e mais próxima dos magnetos.

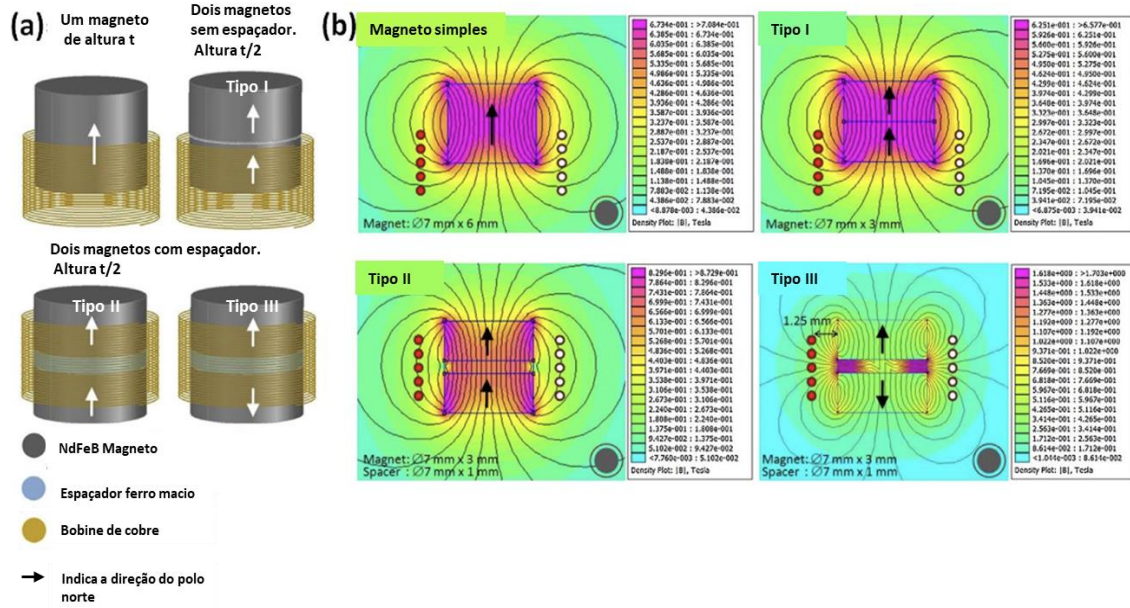


Figura 3.25. a) Tipo de configuração, b) Configuração do campo magnético. Adaptada de [56], Copyright © 2023, com permissão da Elsevier.

Na figura 3.26, pode ser observado o comportamento do fluxo magnético, com a influência do número de magnetos e altura dos espaçadores.

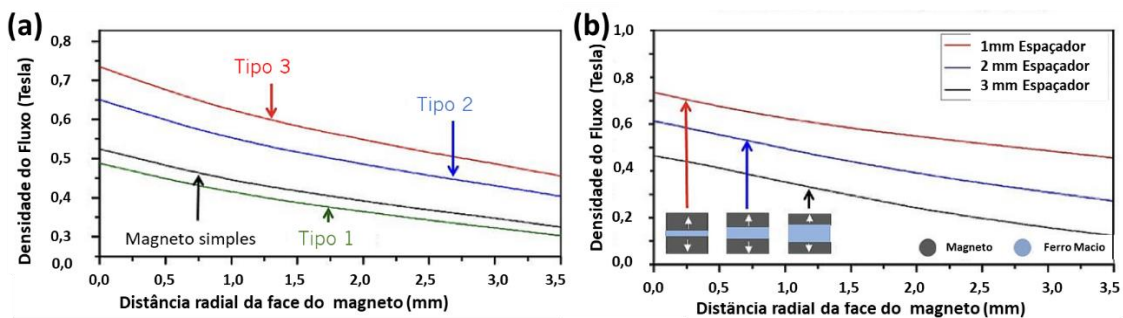


Figura 3.26. a) Alteração do fluxo magnético em função da combinação dos magnetos, b) Espaçamento entre estes. Adaptada de [56], Copyright © 2023, com permissão da Elsevier.

O cálculo da potência é obtido pelas expressões 18 e 19, mencionada no capítulo 2.

Após a análise desta informação, a arquitetura que foi selecionada para o dispositivo de produção de energia foi a II (capítulo 2), com a utilização de um separador de material não magnético, a ser selecionado.

3.7 Número de bobinas

De acordo com os valores experimentais publicados, a altura do espaçador influencia a potência do gerador eletromagnético. Foi considerado e analisado o trabalho Xingqiang Zhao et al.

[55], onde foram realizados vários ensaios experimentais com o objetivo de analisar a relação entre o espaçador e a potência produzida. Para otimizar o desempenho do sistema, foi necessário otimizar dois elementos principais, a bobina e o magneto. A otimização do magneto deve ser realizada em concordância com a altura da bobina. Portanto, a otimização/seleção do magneto foi realizada antes da otimização da distância da bobina ou bobinas. A largura da bobina utilizada é de 10 mm. De acordo com o estudo de Xingqiang Zhao [55], o magneto ideal deve ter cerca de 10 mm de altura para obter maior potência.

No entanto, foi observado que a utilização de um magneto com altura de 10 mm é instável quando utilizado em queda livre. Portanto, dois magnetos com altura de 10 mm cada, perfazendo uma altura total de 20 mm, serão aplicados para que o movimento seja estável. Nesta situação, para obter a potência máxima, seria necessário que a bobina tivesse 20 mm de largura, de acordo com o estudo de Xingqiang Zhao [55].

Foi realizado um estudo experimental para otimizar o desempenho do sistema utilizando dois magnetos e duas bobinas, cada uma com largura de 10 mm e, eventualmente, um espaçador. Essa configuração foi selecionada porque o comprimento do tubo é relativamente pequeno, com apenas 100 mm. Se fosse utilizada apenas uma bobina, localizada no centro do tubo, a força eletromotriz gerada seria unidirecional, ocorrendo apenas em um sentido e, eventualmente, em outro quando o magneto retorna à sua posição inicial.

Ao utilizar duas bobinas com uma distância específica entre elas, será possível obter uma força eletromotriz menor no ponto menos distante entre as bobinas e uma força eletromotriz maior no ponto mais distante. É crucial encontrar a distância adequada entre as bobinas ou entre as bobinas e as extremidades do tubo, de modo a garantir que a força eletromotriz mais baixa seja superior a 5 V. A diminuição da força eletromotriz nessa posição ocorre porque o magneto está muito próximo da primeira bobina no início do movimento, mas mais afastado da segunda bobina. Esse fenómeno mantém-se durante todo o movimento, mas em sentido contrário, como ilustrado na figura 3.27.

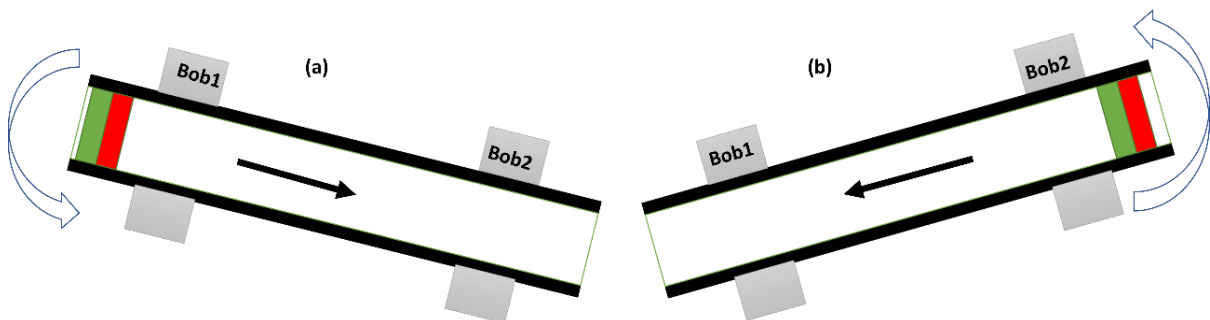


Figura 3.27. Bob 1 e Bob2, são as bobinas 1 e 2, a) Movimento esquerda para direita, b) Movimento direita para esquerda.

A caracterização da magnitude da fem foi conduzida num cenário em que o tubo foi mantido verticalmente alinhado, o que representa o ponto máximo de eficiência do dispositivo de produção de energia, na condição de inexistência de forças externas aplicadas. Não obstante, conforme explicitado anteriormente, a produção de energia ocorre por meio da oscilação do dispositivo, a qual é induzida pelo movimento das ondas num ambiente submerso ou pelo fluxo das correntes subaquáticas. Como resultado, o magneto situado no interior do tubo experimenta uma oscilação (mudança de ângulo), ocasionando uma alteração na magnitude da fem.

3.8 Resumo

Após a realização da seleção do magneto e do tubo, foi necessário proceder à determinação do número de espiras a serem empregues na bobina, a fim de que se possa prosseguir com o estudo da otimização do sistema de produção de energia. A partir da análise de alguns artigos científicos, propõe-se a utilização de um método que, numa primeira aproximação, permite calcular e identificar se o número de espiras e, por conseguinte, o volume, são adequados para obtenção dos valores de força eletromotriz pretendidos. O método da primeira aproximação possibilita a visualização das tensões máximas utilizando um número reduzido de distâncias. Já o segundo método, utilizando o número de espiras obtido, possibilita uma maior concordância dos dados, como se verificou na figura 3.23, permitindo a otimização da volumetria da bobina em situações de restrição espacial imposta pela geometria do dispositivo de produção de energia.

Uma vez selecionados o magneto, o tubo, o material, o número de espiras e o volume da bobina, foi possível a análise e seleção do tipo de arquitetura para o sistema, bem como a sua otimização.

Capítulo 4

Validação e otimização experimental da arquitetura do LEG

No presente capítulo será validada experimentalmente e otimizada a arquitetura. O capítulo é baseado no artigo publicado “C. L. Faria, M. S. Martins, R. A. Lima, L. M. Gonçalves and T. Matos, *“Optimization of an Electromagnetic Generator for Underwater Energy Harvester,”* OCEANS 2019 - Marseille, Marseille, France, 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/OCEANSE.2019.8867185”.

4.1 Parâmetros do gerador eletromagnético linear

Foi desenvolvido um gerador linear de energia (LEG) composto por duas bobinas em torno de um tubo cilíndrico de acrílico e um núcleo magnético que se desloca ao longo deste tubo. As bobinas são constituídas por fio de cobre isolado de 0,2 mm de diâmetro, com 1500 espiras (calculado na secção 3.4.2) e uma resistência de 130 Ω cada. O suporte da bobina tem as dimensões anteriormente mencionadas e o tubo de acrílico tem 100 mm de comprimento, 32 mm de diâmetro interior e 2 mm de espessura. Os magnetos possuem a direção magnética paralela ao eixo do movimento.

Foram empregues dois magnetos separados por um espaçador, cuja distância dm foi estabelecida, tendo sido produzidos por meio de fabrico aditivo 3D utilizando material de ácido poliláctico (PLA), o qual não apresenta propriedades magnéticas.

4.2. Setup de testes e metodologias

Para determinar qual o espaçamento que deve ser utilizado entre os magnetos e bobinas, foi utilizado um dispositivo (fabricado por impressão 3D) que permitiu efetuar um conjunto de testes de forma a caracterizar a melhor configuração, figura 4.1.

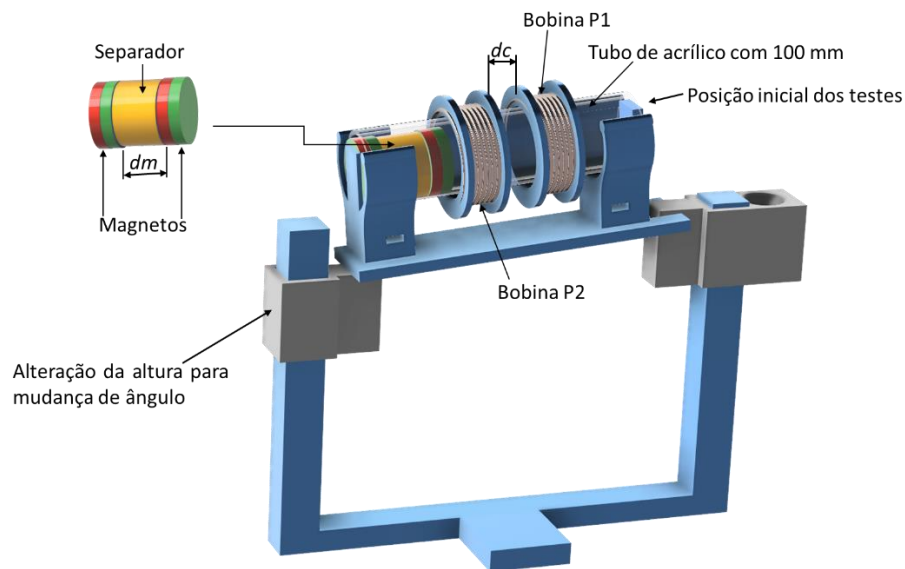


Figura 4.1. Projeto do dispositivo para testes ao LEG. O gerador é constituído pelas duas bobinas e o elemento magnético (dois magnetos e espaçador). A distância entre as bobinas é dc e dm é a altura do espaçador entre os magnetos. A bobina à direita é P1 e a esquerda P2.

Um ângulo de inclinação fixo (15° , 20° e 30°) foi aplicado e o magneto irá mover-se apenas pela força da gravidade. Os ensaios realizaram-se com ângulos a partir de 15° , uma vez que o

coeficiente de atrito, 0,163 corresponde aproximadamente a 10° . Durante cada teste, o núcleo magnético iniciou o seu movimento no canto direito do LEG, com uma velocidade inicial de 0 ms^{-1} , e passou pelas bobinas para produzir a tensão. A primeira bobina a gerar tensão é a P1 (mais próxima do magneto) e a segunda bobina é a P2, mais afastada do magneto. Cada bobina foi ligada a uma resistência externa de 130Ω , o mesmo valor de resistência interna da bobina. Nesta situação, é obtida máxima potência elétrica pelo LEG. Um osciloscópio foi ligado à resistência externa, e a tensão de ambas as bobinas foi registada. A imagem do osciloscópio na figura 4.2 apresenta um dos perfis típicos de tensão de cada bobina quando os magnetos se movem ao longo do tubo.

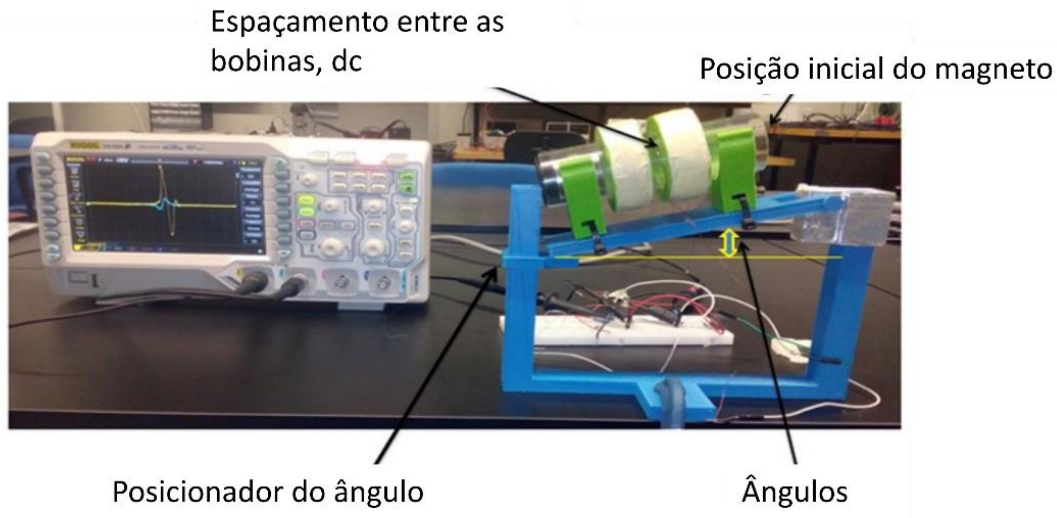


Figura 4.2. A imagem do dispositivo de teste e respetivo equipamento.

Foram efetuados 6 ensaios para cada combinação ângulo-espaçador entre magnetos e distância entre as bobinas.

A partir da forma de onda da tensão de saída, obtida pelo osciloscópio durante 1,2 s e um período de amostragem de 1,0 ms, a potência de saída do LEG, foi calculada pelas expressões:

$$P_{TOT} = P1 + P2 ; \quad P = \frac{V_{RMS}^2}{R_L} ; \quad V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^N V_i^2} \quad (54)$$

P é a potência média de saída durante 1,2 s (total, na bobina 1 e na bobina 2), V_{RMS} é a tensão RMS (*root mean square*), R_L é a resistência de carga, N é o número de amostras, i é o número da amostra, V_i é a tensão instantânea em cada instante discreto i (V). A tensão RMS foi calculada em todos os testes, considerando sempre o tempo total de 1,2 segundos, com período de amostragem de 1 ms, resultando em $N = 1200$ amostras. Foi usada uma resistência de carga $R_L = 130 \Omega$ para maximizar a potência de saída, que ocorre quando o valor da resistência de carga corresponde aproximadamente à resistência interna da bobina. O ângulo mínimo de inclinação a partir do qual

o magneto inicia o seu movimento (limitado pelo atrito estático entre o núcleo magnético e a parede do tubo) foi encontrado experimentalmente, e será utilizado um valor superior, 15° .

Além da seleção do magneto, que já foi efetuado, foram necessários mais dois parâmetros para otimizar o LEG para a máxima potência de saída:

- Distância entre as bobinas, no qual foram considerados os valores;

$$dc = \{0; 10; 20; 27\} \text{ mm};$$

- Distância entre magnetos;

$$dm = \{4; 6; 8; 10; 18; 24; 30\} \text{ mm}.$$

4.3 Otimização da distância entre magnetos

A distância entre os magnetos no núcleo magnético (dm) influencia o valor da potência de saída e sua forma de onda ao longo do tempo. Foram realizados testes nos ângulos de inclinação selecionados (15° , 20° e 30°) e nas distâncias selecionadas entre magnetos (dm na figura 4.1) foram mantidos os valores de 4, 6, 10, 18, 24 e 30 mm, usando um espaçador de PLA fabricado por impressão 3D, entre dois magnetos. A figura 4.3 apresenta a potência instantânea de um dos ensaios, obtida durante o deslocamento do núcleo magnético (dois magnetos) quando um ângulo de inclinação de 30° é imposto e uma distância entre as bobinas de 0 mm foi utilizada. Os vários gráficos da figura 4.3 representam a potência quando a distância dm está no intervalo de 4 mm a 30 mm.

Apesar de se observar uma potência máxima instantânea de cerca de 40-45 mW em todos os gráficos, podem ser notadas diferenças no intervalo de tempo em que a potência é produzida.

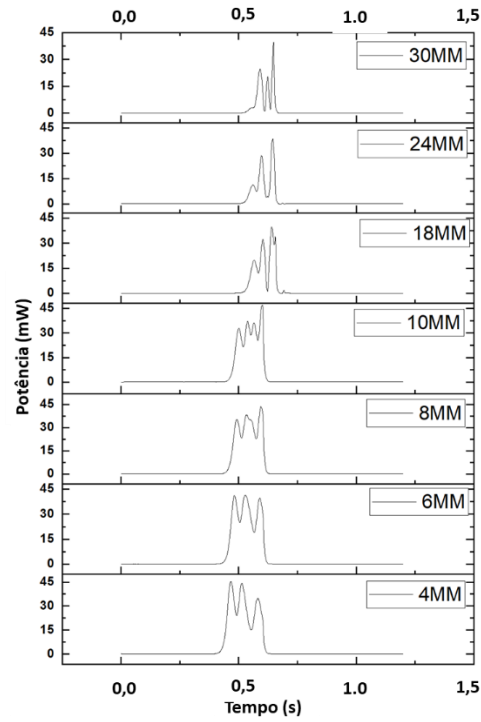


Figura 4.3. Potência instantânea observada, com a modificação do valor do espaçador (dm) entre o núcleo magnético, de 4-30 mm. O espaçamento entre as bobinas, $dc=0$ mm.

Ao calcular a potência média produzida durante um intervalo de 1,2 s (com intervalos de 1 ms) em todos os ensaios, foi construído o gráfico da figura 4.4, em que a potência média é traçada em função da distância dm , para os ângulos de inclinação de 15° , 20° e 30° .

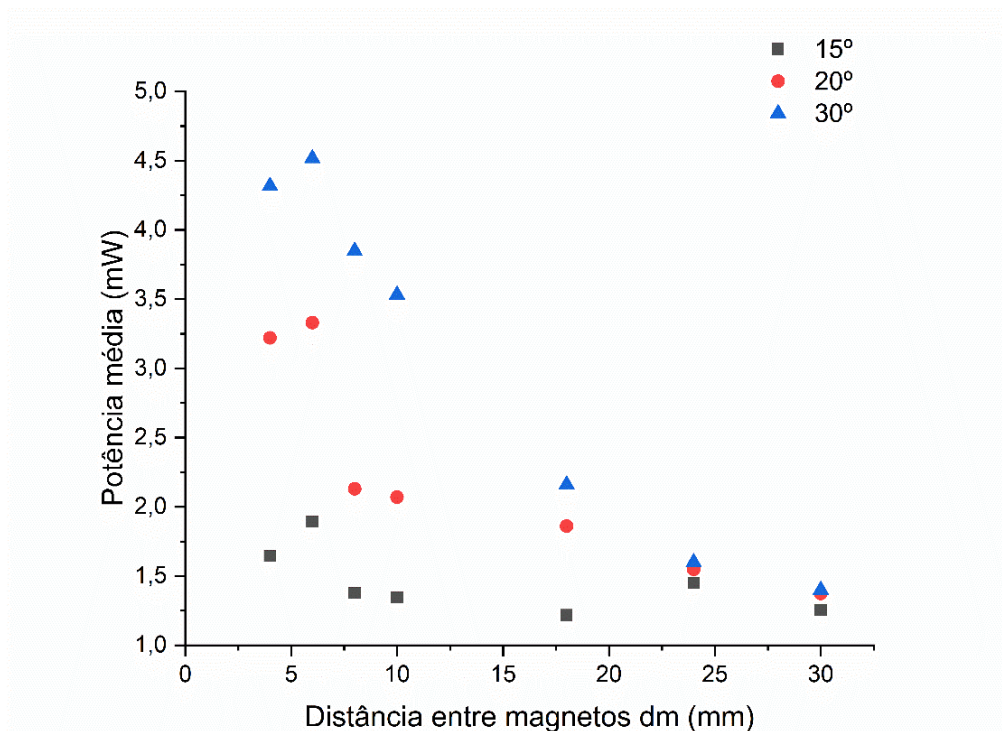


Figura 4.4. Potência média em função da distância entre os dois magnetos (dm), para os ângulos de 15° , 20° e 30° .

A distância $dc = 0$ mm foi mantida nos testes das figuras 4.3 e 4.4, no entanto, outros testes também foram realizados com diferentes distâncias entre as bobinas, de forma a validar o melhor resultado para dm . Os resultados do gráfico da figura 4.4, evidenciam que um espaçamento $dm = 6$ mm entre os magnetos produz uma potência média mais elevada.

4.4 Otimização da distância entre bobinas

A distância entre as bobinas (dc) influencia o valor da potência de saída e a forma do sinal ao longo do tempo. Foram realizados testes com distâncias dc entre 0 mm e 27 mm, tendo sido registada a tensão de saída e calculada a potência instantânea para os ângulos de 15° , 20° e 30° . O espaçamento $dm = 6$ mm entre dois magnetos foi mantido em todos os ensaios, uma vez que anteriormente foi validado como a melhor distância entre os magnetos. Os gráficos das figuras 4.5 apresentam a potência instantânea durante o tempo de teste de 1,2 s para dc igual a 0, 10, 20 e 27 mm em função dos ângulos de inclinação.

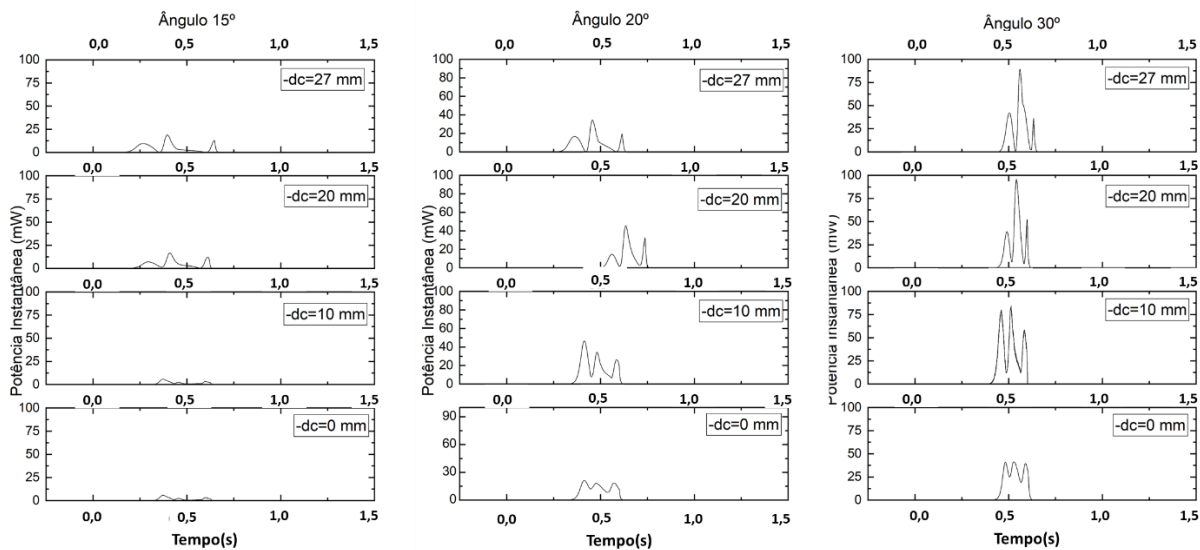


Figura 4.5. Potência instantânea para $dm=6$ mm, com modificação da distância entre as bobinas(dc) e do ângulo.

Como esperado, ao diminuir a distância entre as bobinas, a energia produzida é concentrada num intervalo de tempo menor, sendo este efeito mais notório em ângulos de inclinação menores (intervalo de 200ms-700ms com $dc = 27$ mm e para 300-650ms com $dc = 0$ mm). Esse efeito resulta do encurtamento da distância percorrida pelo núcleo magnético dentro das bobinas. A potência instantânea de todos os testes na figura 4.5 foram calculadas em 1,2 s e intervalos de tempo 1 ms, para os ângulos de inclinação de 15° , 20° e 30° . A partir dos valores

anteriores foi calculado o gráfico comparativo da figura 4.6, para a potência média.

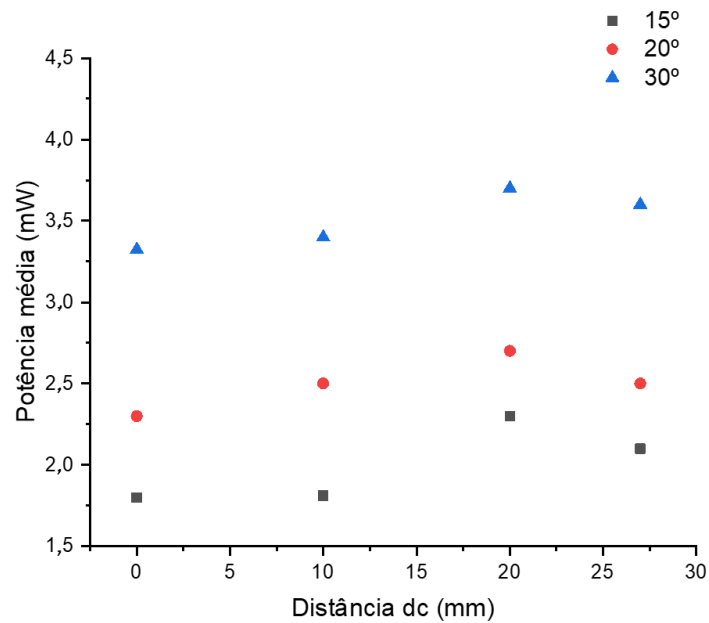


Figura 4.6. Potência média em função distância entre bobinas para o espaçamento entre magnetos de 6 mm.

A configuração final do LEG, está representado na figura 4.7.

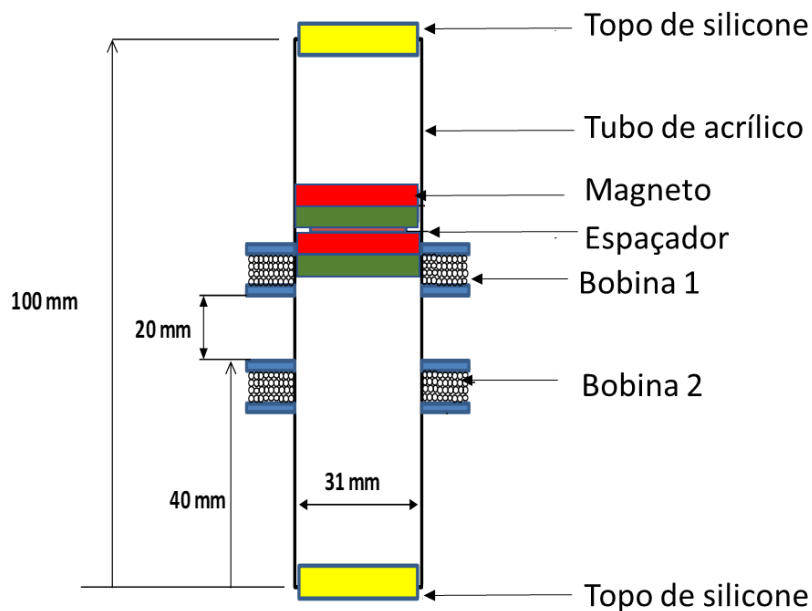


Figura 4.7. LEG com as dimensões otimizadas.

Nas extremidades do LEG, são colocados dois topos em silicone para amortecer o impacto do magneto no final do percurso.

4.5 Resumo

Neste capítulo foi apresentada a otimização experimental do Gerador Eletromagnético Linear (LEG), para um dispositivo de produção de energia completamente submerso, desenvolvido para fornecer energia a longo prazo a sensores oceânicos ancorados. O LEG é composto por um tubo de 100 mm de comprimento e 32 mm de diâmetro, com duas bobinas externas e um núcleo magnético móvel. A otimização das propriedades, dimensões e bobinas dos magnetos foi apresentada para maximizar a potência média de saída. Foi obtida uma potência de pico próximo 100 mW e uma potência média máxima de 4,35 mW com um núcleo magnético composto por dois magnetos de disco ($\phi 30\text{mm}$), espaçados por 6 mm, e duas bobinas, com 1500 espiras e espaçadas por 20 mm, quando o movimento do LEG é repetido a cada 1,2 s. Considerando as condições esperadas no oceano, isso será suficiente para fornecer energia para um grande leque de sensores de monitorização subaquáticos de baixa potência, aumentando assim a sua autonomia.

Não foi apresentada nenhuma comparação com o modelo teórico proposto, uma vez que se tornaria complexo calcular o fator de acoplamento eletromagnético, devido às alterações do núcleo magnético, a distância d_m e espaçamento entre as duas bobinas.

A arquitetura selecionada tem influência direta no peso do dispositivo de produção de energia, conforme foi descrito nas configurações apresentadas no capítulo 2. É importante salientar que um aumento do peso pode requerer a seleção de materiais com características que permitam a modificação da flutuabilidade ou o aumento do volume do dispositivo. Além disso, a escolha da arquitetura deve ser criteriosa e adaptada à potência necessária dos sensores, bem como ao carregamento da bateria ou do condensador, levando em conta os valores de tensão requeridos. Na otimização da configuração, apenas se teve em consideração a otimização da potência de cada bobina, contudo, uma vez que existem duas bobinas e é necessária a retificação da tensão alternada para contínua, torna-se imperativo analisar este requisito, juntamente com o tipo de ligação (paralelo ou série) a ser estabelecida entre as bobinas.

Capítulo 5

Caraterização do LEG em ambiente controlado

No presente capítulo será analisado qual a melhor configuração para a ligação das bobinas, série ou paralelo e forma de ligação da ponte retificadora. O presente capítulo é baseado no artigo, publicado na revista *Sensors* 2022, que foi capa de revista de fevereiro 2020 (Anexo A), Faria, C.L.; Martins, M.S.; Matos, T.; Lima, R.; Miranda, J.M.; Gonçalves, L.M. "Underwater Energy Harvesting to Extend Operation Time of Submersible Sensors." *Sensors* 2022, 22, 1341.<https://doi.org/10.3390/s22041341>.

Nos capítulos precedentes, foram selecionados a arquitetura, magnetos e materiais do LEG, e procedeu-se à sua otimização em termos do núcleo magnético e espaçamento entre as bobinas, com o objetivo de se obter uma produção energética eficiente. Até agora, foram realizados ensaios em queda livre ou deslizamento livre, uma vez que é mais fácil caracterizar o sistema para otimização. No entanto, considerando que o LEG estará sujeito a oscilações quando utilizado no oceano, as frequências envolvidas afetarão a produção de energia. Levando em conta que, no oceano, as frequências das ondas são baixas, inferiores a 1 Hz, esse valor foi adotado como limite, para os ensaios que foram realizados para medir a energia produzida pelo LEG em função da frequência.

A costa portuguesa é frequentemente atingida por ondas formadas em tempestades com o centro no meio do Oceano Atlântico, assim como ondas criadas pelo vento local. O dispositivo proposto é para ser instalado a uma profundidade entre 3 e 10 m, próximo da costa, pelo que foram consideradas as frequências das ondas de maré (são ondas regulares e longas com cristas geradas numa tempestade que viajaram longas distâncias) e as ondas de vento (ondas irregulares e curtas geradas pelo vento local). Os valores dos períodos de onda na costa portuguesa e a interação entre a profundidade e as ondas, apresentam frequências entre 0,1 e 0,4 Hz, que serão utilizadas nos ensaios. Outra razão para considerar essas frequências é que o dispositivo irá trabalhar em regiões com interações entre ondas e correntes. No oceano, o dispositivo estará submetido a oscilações com várias frequências através da água, e a frequência pode eventualmente ser influenciada pela profundidade, pela proximidade da costa, pela morfologia do leito do mar e pelas estruturas artificiais existentes nas proximidades. Com todas estas variáveis em consideração, o objetivo deste trabalho experimental foi o de verificar a possibilidade de aumentar a autonomia dos sensores, ou mesmo torná-los energeticamente autónomos. Alguns autores utilizaram modelos matemáticos para prever os valores da potência elétrica em algumas configurações dos dispositivos, como previamente mencionado. Neste trabalho, as expressões matemáticas foram obtidas tendo em conta os resultados experimentais dos testes individuais das bobinas, a fim de prever as melhores configurações para as ligações. Os resultados foram confirmados experimentalmente com testes de queda livre, testes de carga e testes de frequência para prever a potência elétrica de saída. Após os ensaios, os valores obtidos foram analisados em relação aos valores calculados. Finalmente, o gerador foi testado, alimentando vários sensores de turbidez, simulando uma aplicação real. Não foi utilizada a expressão matemática das equações previamente obtidas para o fator de acoplamento eletromagnético, uma vez que esta não contempla configurações de magnetos com espaçadores. No entanto, pode ser usada para uma estimativa das tensões e forma da onda da tensão formada, não contemplando, contudo, qualquer amortecimento que possa existir nos topos

do tubo.

Ao dispositivo foi adicionado um motor de 60 rpm, com a possibilidade de alterar a rotação pela tensão. A configuração do LEG utilizada nos ensaios é a que anteriormente foi otimizada, figura 4.7, isto é, d_c de 20 mm e d_m de 6 mm, com 1500 espiras, no entanto as novas bobinas fabricadas utilizadas no LEG apresentam uma resistência de 125 Ω .

Tendo em conta os resultados obtidos por Nuno Silva et al [66], em que as bobinas foram testadas em série, com dois díodos para a retificação da onda, foi analisado qual a melhor ligação (série ou paralelo) entre as bobinas e os díodos, para tal foram efetuados ensaios experimentais com frequências entre 0,1 e 0,4 Hz.

Na figura 5.1, a título de exemplo é apresentado o diagrama de uma das possíveis ligações entre as bobinas e díodos, utilizada nos ensaios. Aqui, a tensão de cada bobina é retificada e ligada em paralelo com a outra bobina. No entanto outras formas de ligação foram analisadas.

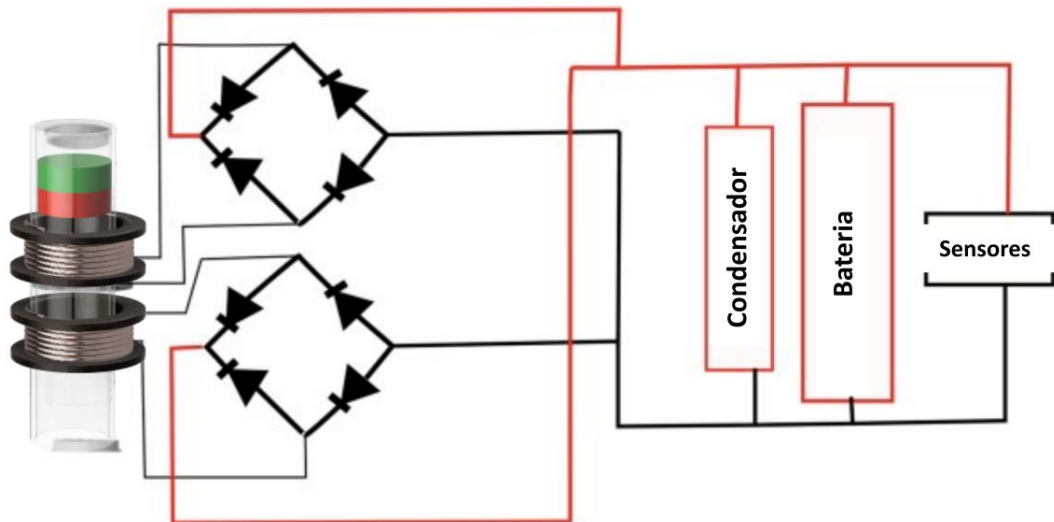


Figura 5.1. Um possível diagrama das ligações elétricas das duas bobinas, o sistema de armazenamento de energia e a carga.

Para possibilitar a ligação do dispositivo LEG aos sensores e ao dispositivo de armazenamento, um retificador de ponte completa foi empregue para converter a energia de corrente alternada (AC) para corrente contínua (DC), conforme ilustrado na figura 5.1. Foram utilizados díodos Schottky (BAT54CL) para o fabrico da ponte retificadora, sendo esperada uma queda de tensão direta 0,15 V em cada díodo.

Numa primeira fase, foram testadas as várias formas de ligação das duas bobinas. Para tal não foi utilizado o condensador ou bateria. Numa segunda fase, foi utilizado um condensador com capacitância de 1F e tensão nominal de 9V, juntamente com uma bateria LiPo de 3,7V/2400 mA, a fim de armazenar a energia necessária para alimentar os sensores. Um sistema de gestão de energia deve ser utilizado, visando maximizar tanto a utilização quanto o armazenamento da energia

produzida, isto é, deverá ser feita a gestão entre a aquisição dos valores por parte dos sensores e o tempo em modo *sleep*.

Cabe ressaltar que, no dispositivo experimental descrito no presente estudo, apenas um condensador é aplicado em vez de uma bateria recarregável. Essa escolha foi motivada pelo objetivo de possibilitar uma melhor visualização e análise da energia armazenada, a partir da observação da tensão carregada no condensador. A elevada capacidade da bateria, relativamente ao condensador, traduzir-se-ia numa variação muito lenta da tensão da bateria, sendo necessário um tempo elevado de teste (vários dias) para visualizar com precisão a evolução da sua tensão. O sistema proposto inclui o dispositivo LEG, o conversor AC/DC, o condensador e diversos sensores que são alimentados pela energia armazenada. Os sensores utilizados são sensores de turbidez [67], desenvolvidos no âmbito de um doutoramento na Universidade do Minho.

Por simplicidade, alguns testes foram realizados em queda livre do magneto. No entanto, para a aplicação pretendida, que visa a produção de energia através da conversão dos movimentos de oscilação, nem sempre o LEG estará na posição vertical. Portanto, foi também necessário adotar uma configuração que permita a produção de energia com movimentos periódicos de frequências baixas, entre 0,1–0,4 Hz, mais representativas de uma situação real no oceano.

5.1 Metodologia e setup de testes

5.1.1 Testes de queda livre

Os ensaios de queda livre foram realizados com o intuito de determinar qual configuração de ligação, em série ou em paralelo das duas bobinas, corresponde à maior potência de saída elétrica. Para tal, a tensão em circuito aberto foi medida, uma vez que esta se correlaciona diretamente com a potência de saída. Ambas as ligações em paralelo ou em série foram testadas, tanto antes como depois da ponte retificadora (FWBR). No teste de queda livre, o magneto foi libertado a partir da sua posição superior, em queda livre e sem atrito, sendo as tensões de saída medidas ao longo do tempo. A tensão foi adquirida utilizando um osciloscópio PicoScope 2205A, com uma taxa de amostragem de 8 kS/s e um intervalo de amostragem de 125 μ s. O teste foi realizado com o magneto em queda livre, primeiro alcançando a Bobina 1 e posteriormente a Bobina 2, e vice-versa, a fim de verificar a simetria esperada do dispositivo. O objetivo dos ensaios consistiu em determinar qual configuração de ligação produz tensões mais elevadas e, portanto, mais potência durante períodos mais longos. Com uma ligação direta gerador-bateria, a bateria pode ser carregada se a tensão produzida estiver acima da tensão da bateria (uma bateria recarregável de lítio sobe de 3,0 V quando descarregada até 4,1 V quando carregada). A tensão

média de 4,0 V é usada como a tensão mínima para obter energia do gerador.

A medição da tensão de saída em circuito aberto pode ser usada para prever a potência, no entanto, a potência de saída é obtida apenas quando existe uma carga ligada ao gerador. O efeito da carga na potência de saída, é medido de forma a encontrar a potência de saída máxima e operacional (quando uma bateria age como uma fonte de tensão constante diretamente ligada ao gerador). Teoricamente, a potência máxima deve ser obtida quando a resistência de carga corresponde ao valor da resistência interna do gerador. No entanto, o efeito das forças de arrasto causadas pela indução do magneto com a corrente gerada no interior das bobinas afeta a velocidade do magneto em movimento e, conseqüentemente, a tensão de saída e provocando assim um atraso no tempo de deslocamento. Para calcular a potência elétrica que o dispositivo pode fornecer, é introduzido nos ensaios um conjunto de resistências como carga, e calcula-se a potência fornecida.

5.1.2 Testes em movimentos periódicos

Para realizar os ensaios das várias frequências de movimentos periódicos, foi fabricado um mecanismo por impressão 3D, figura 5.2, que permite emular um movimento cíclico com frequências até 1 Hz.

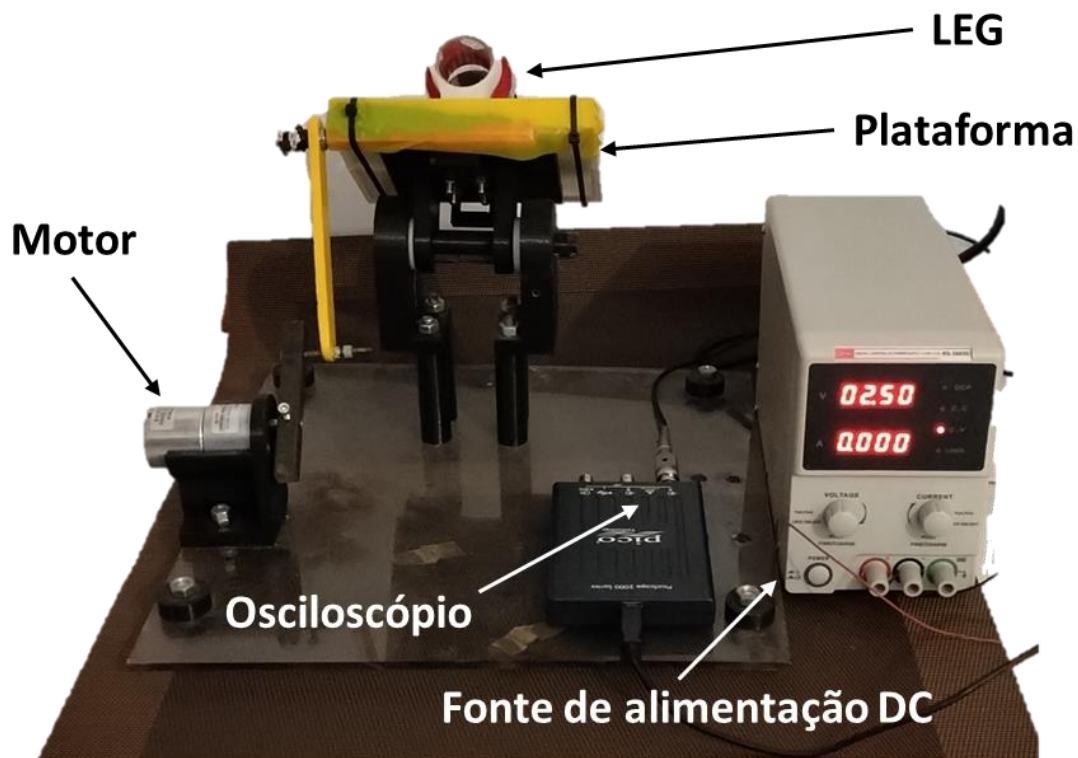


Figura 5.2. Dispositivo para simulação das frequências de movimento.

Ao dispositivo foi adicionado um motor de 60 rpm, com a possibilidade de alterar a velocidade rotação através da alteração da tensão. A configuração do LEG a ser utilizada nos ensaios é a que anteriormente foi otimizada, figura 4.7, isto é, d_c de 20 mm e d_m de 6 mm, com 1500 espiras, no entanto as novas bobinas fabricadas utilizadas no LEG apresentam uma resistência ligeiramente inferior de 125 Ω .

Este dispositivo foi concebido para operar nas pequenas frequências de ondas oceânicas típicas. Por esta razão, o dispositivo foi caracterizado para frequências de movimento entre 0,1-0,4 Hz. Para simular estas frequências, foi implementada e utilizada a bancada de ensaios de frequência com a configuração da figura 5.3.

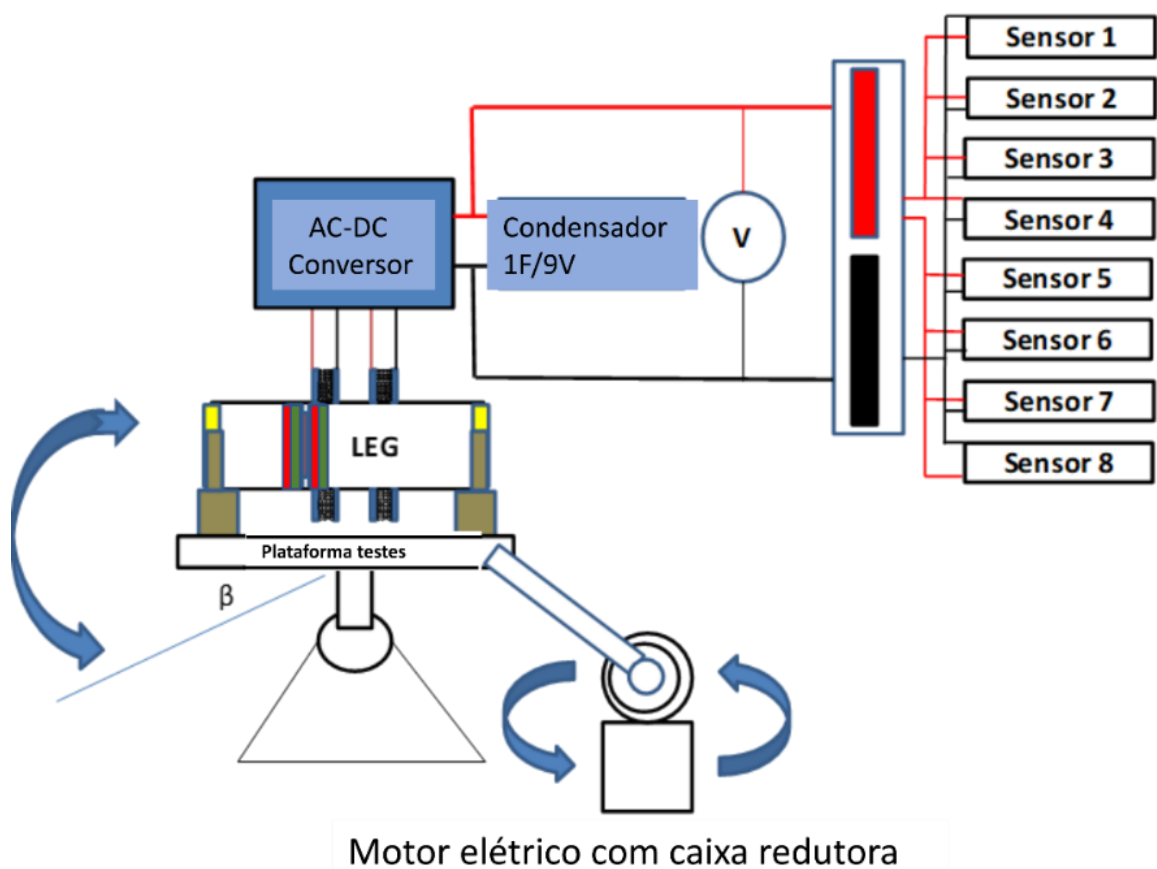


Figura 5.3. Bancada para ensaios de frequência.

O dispositivo de ensaios é composto por um motor elétrico que promove o movimento oscilatório do LEG deitado horizontalmente e fixado à plataforma através de dois encaixes não metálicos. Todos os componentes da plataforma têm propriedades não magnéticas, de forma a não influenciar o movimento do magneto (por atração) ou alteração do fluxo do campo magnético.

As frequências testadas são introduzidas na plataforma de teste pelo motor elétrico, promovendo o movimento oscilatório com um ângulo máximo de descida e ascensão (β) de 45° em

relação à linha horizontal da plataforma. O ângulo de 45° foi selecionado para este teste, porque está acima do ângulo de atrito estático (abaixo dos 15°) de acordo com o material selecionado no capítulo 3.

Utilizando a configuração previamente selecionada, foram realizados ensaios com um conjunto de resistências de carga para se obter a potência e a energia de saída. No caso dos sensores, o seu consumo (potência instantânea durante a leitura, modo de espera dos sensores e consumo de energia em um ciclo completo de 300 s) são apresentadas na tabela 5.1.

Tabela 5. 1 Energia consumida por cada sensor.

Evento	Tempo(s)	Potência (mW)	Energia (mJ)
Modo suspensão	299,99	0,96	287,99
Leitura	0,01	320	3,2
Total	300,00	0,97	291,1

Cada sensor, quando ligado à energia, faz aquisição dos dados a cada 300 s e cada ciclo de leitura dura 10 ms. Todos os sensores entram em modo de suspensão após as leituras durante 299,99 s. Quando vários sensores são ligados à mesma rede, as leituras de cada sensor são atrasadas em 2 s em relação ao sensor anterior.

5.2 Ligação entre as duas bobinas

Pretendeu-se analisar como as duas bobinas devem ser ligadas, de forma a maximizar a potência média do gerador, e assim maximizar também a energia produzida.

5.2.1 Tensão em circuito aberto

É imprescindível destacar que a capacidade de fornecer energia está diretamente ligada à tensão de saída, sendo necessária gerar uma tensão superior a 4,0 V para que seja possível a entrega direta de energia ao sistema de armazenamento, o qual pode ser composto por um condensador ou bateria, por exemplo. Dessa forma, antes de se proceder com a associação série ou paralela das bobinas e pontes retificadoras no LEG, é imprescindível realizar uma análise preliminar das tensões obtidas e da forma de onda por meio de testes em queda livre, de modo a se poder obter uma configuração final otimizada para o referido sistema.

A figura 5.4 apresenta as tensões alcançadas nos testes de queda livre (média da tensão a partir de um conjunto de seis testes), com o magneto a mover-se da Bobina A para a Bobina B (A-B) e no sentido oposto (B-A), para cada bobina (A e B).

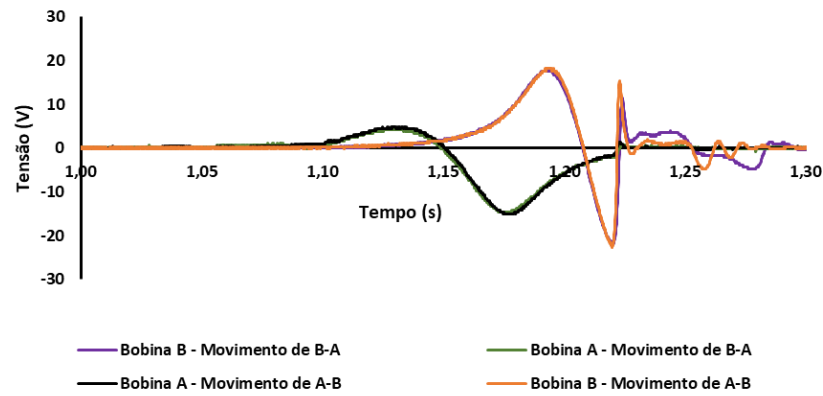


Figura 5.4. Tensão de saída de cada bobina (A e B) no teste de queda livre, quando os magnetos se movem na direção A-B e direção B-A (B-A), os magnetos passam pelas bobinas em menos de 150 ms.

A simetria do dispositivo é verificada. A tensão de saída da Bobina A, quando o magneto se move de A para B, é semelhante à tensão na Bobina B quando o magneto se move de B para A.

Com a tensão de saída experimental de cada bobina ao longo do tempo, é possível prever os valores teóricos de tensão de saída das configurações (por exemplo, em série ou em paralelo das bobinas) que melhor se adaptam ao sistema pretendido. Foram testadas quatro combinações: a retificação das tensões combinadas (em paralelo ou em série) antes de passar pela ponte retificadora e a combinação das tensões retificadas (em paralelo ou em série) após a retificação, ou seja, realizando a combinação das tensões após passar cada uma pela ponte retificadora. Para analisar qual combinação se adapta melhor ao sistema proposto, foram realizadas combinações teóricas antes dos testes e validadas experimentalmente. A figura 5.5 apresenta as quatro combinações que foram testadas.

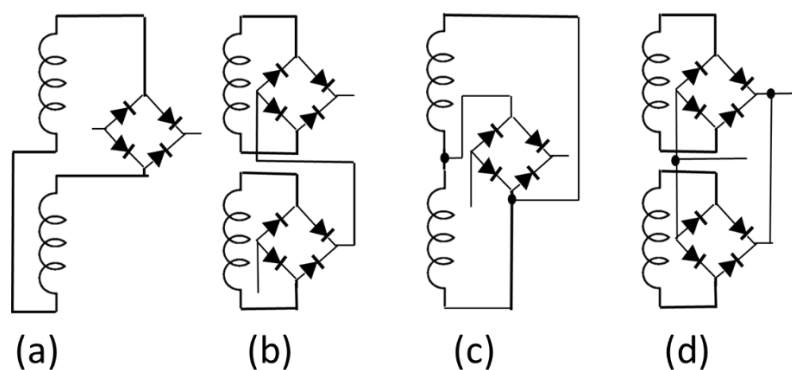


Figura 5.5. a) Combinação série antes da ponte retificadora, b) Combinação série depois da ponte da retificadora, c) Combinação paralelo antes da ponte retificadora, d) Combinação em paralelo após a passagem de cada bobina pela ponte retificadora.

5.2.2 Bobinas em Série Seguidas de Retificação

A saída teórica da tensão quando as bobinas estão ligadas em série, seguidas de retificação (ver figura 5-5 (a)), é obtida pela expressão (55):

$$V_n = \begin{cases} 0, & |V_{BobA} - V_{BobB}| < 0,30 \\ |V_{BobA} - V_{BobB}| - 0,30, & |V_{BobA} - V_{BobB}| \geq 0,30 \end{cases} \quad (55)$$

Onde V_n é a tensão de saída, V_{BobA} tensão da bobina A e V_{BobB} tensão da bobina B, são os valores experimentais de tensão para cada bobina, obtidos no teste de queda livre.

As tensões da bobina A e da bobina B são subtraídas (em vez de somadas) uma vez que possuem sinais opostos (ver figura 5.4). A tensão de 0,3 V subtraída corresponde à queda de tensão dos dois díodos na ponte retificador.

A Figura 5.6 apresenta a tensão calculada (linha preta) e a tensão medida experimentalmente (linha tracejada vermelha) da saída, num movimento de queda livre da bobina A para a bobina B (gráfico da esquerda) e da bobina B para a bobina A (gráfico da direita). Existe uma boa concordância entre a tensão calculada e medida (linhas vermelha e preta). Adicionalmente, existe uma boa simetria entre os movimentos em ambas as direções (gráfico da esquerda e da direita).

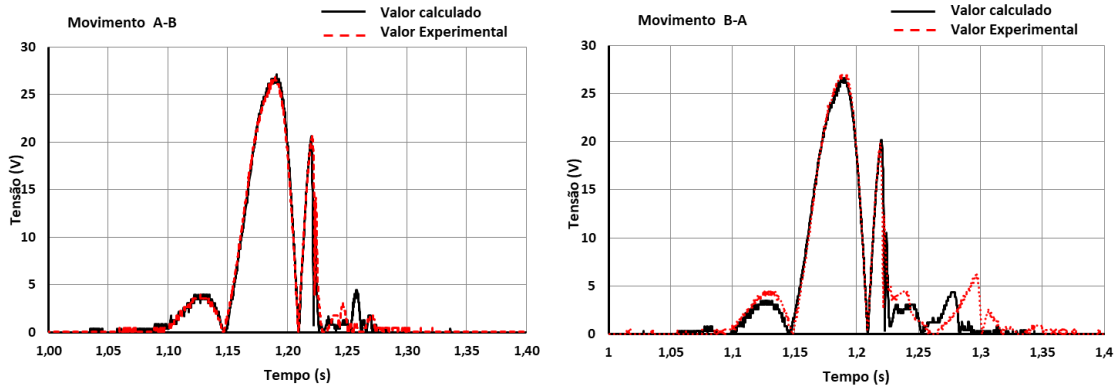


Figura 5.6. Tensões de saída calculada e obtida experimentalmente, em queda livre nas direções da bobina A-B (gráfico esquerdo) e da bobina B-A. As bobinas A e B estão ligadas em série e posteriormente são medidos após a ponte retificadora.

5.2.3 Bobinas em Série Após Retificação

Os valores de tensão obtidos a partir do teste de queda livre, figura 5.4, foram utilizados para calcular a tensão de saída do sistema, em que cada tensão da bobina é retificada e posteriormente ligadas em série, combinação (b) da figura 5.5. A tensão de saída foi calculada com o teste do movimento da bobina A para bobina B e vice-versa, expressões 56-58. V_{an} é a tensão

retificada (valor absoluto da tensão) da bobina A, V_{bn} é a tensão de saída retificada na bobina B. V_n , a tensão de saída, é a soma (série) de ambas as tensões.

Foi considerada uma queda de tensão direta de 0,3 V nos dois díodos do retificador.

$$V_{an} = \begin{cases} 0, & |V_{BobA}| < 0,30 \\ |V_{BobA}| - 0,30, & |V_{BobA}| \geq 0,30 \end{cases} \quad (56)$$

$$V_{bn} = \begin{cases} 0, & |V_{BobB}| < 0,30 \\ |V_{BobB}| - 0,30, & |V_{BobB}| \geq 0,30 \end{cases} \quad (57)$$

$$V_n = V_{an} + V_{bn} \quad (58)$$

A figura 5.7 representa a tensão calculada (linha preta) e a tensão medida experimentalmente (linha vermelha) da saída, do movimento de queda livre de bobina A para bobina B (gráfico à esquerda) e de bobina B para bobina A (gráfico à direita). Pequenas diferenças são notadas nos resultados da figura 5.6 (série antes da retificação) e da figura 5.7 (combinação série depois da retificação), figura 5.5 (b), a serem discutidas mais adiante.

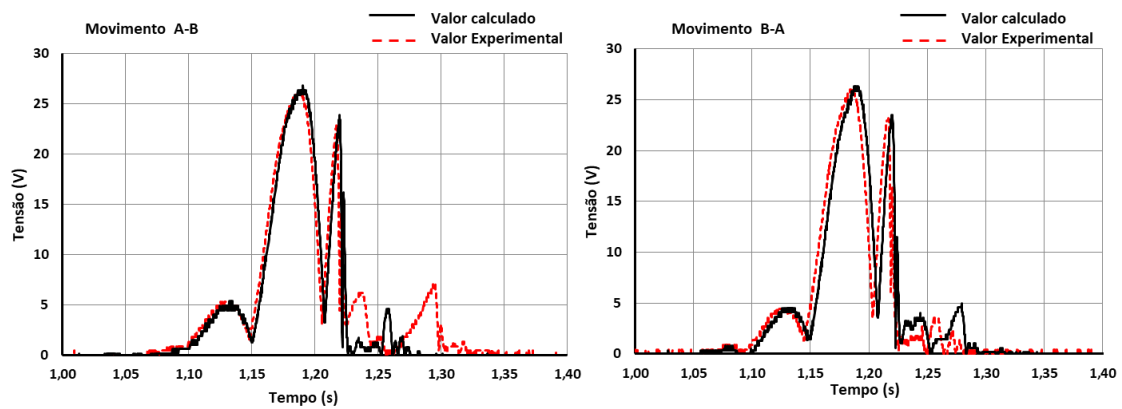


Figura 5.7. Tensões de saída calculada e obtida experimentalmente, em queda livre nas direções da bobina A-B (gráfico esquerdo) e da bobina B-A. As bobinas A e B estão ligadas em série após a tensão de cada bobina passar pela ponte retificadora.

5.2.4 Bobinas em Paralelo Seguidas de Retificação

As duas bobinas foram ligadas em paralelo e a tensão obtida foi retificada pela ponte retificadora, figura 5.5 (c).

A expressão (59) calcula as tensões de saída esperadas. Considerando os resultados da figura 5.4, a polaridade da bobina A foi invertida para obter uma saída de tensão mais elevada

quando ligado em paralelo com a bobina B.

$$V_n = \begin{cases} 0, & \left| \frac{(-V_{BobA} + V_{BobB})}{2} \right| < 0,30 \\ \left| \frac{(-V_{BobA} + V_{BobB})}{2} \right| - 0,30, & \left| \frac{(-V_{BobA} + V_{BobB})}{2} \right| \geq 0,30 \end{cases} \quad (59)$$

V_n é o valor da tensão de saída, V_{BobA} e V_{BobB} são as tensões de saída da bobina A e bobina B, conforme apresentado na figura 5.4, e 0,3 V é a queda de tensão direta do diodo.

Na figura 5.8 estão os resultados teóricos calculados a partir do resultado experimental de cada bobina da figura 5.4, sendo os resultados experimentais a média de seis testes realizados em queda livre para cada uma das bobinas.

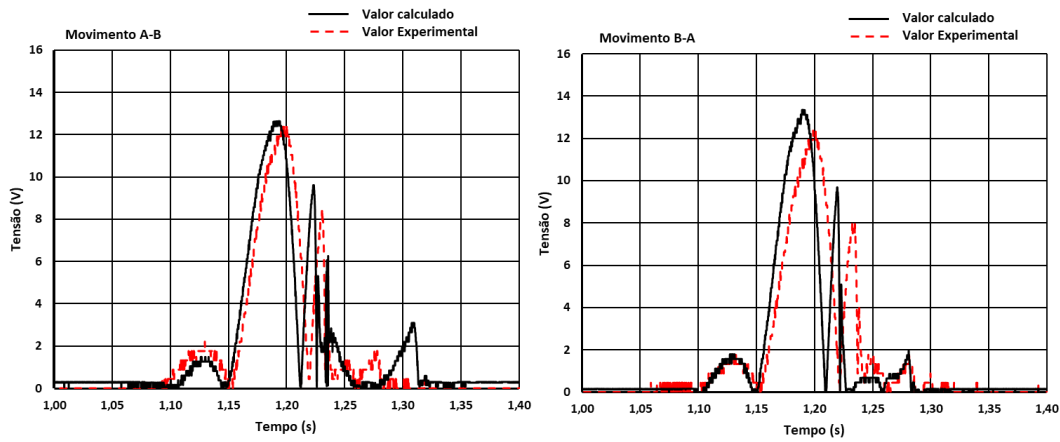


Figura 5.8. Tensão de saída calculada e valor da tensão experimental em queda livre, com movimento da bobina A para bobina B (gráfico esquerdo) e da bobina B para a bobina A (gráfico direito). As bobinas são ligadas primeiro em paralelo seguido depois da ponte retificadora.

5.2.5 Bobinas em Paralelo após Retificação

Cada tensão da bobina é retificada, e a tensão de saída total é obtido ligando ambas as tensões retificadas em paralelo. Os valores de tensão obtidos a partir do teste de queda livre, figura 5.4, foram utilizados para calcular a tensão de saída do sistema. V_{an} é o valor absoluto para a bobina A obtida na expressão 56 e V_{bn} da expressão 57 é o valor absoluto para a bobina B, com queda de tensão direta do diodo de 0,3 V. A ligação em paralelo após a retificação é obtida teoricamente considerando o valor absoluto máximo da bobina A ou da bobina B, na expressão (60):

$$V_n = \text{Max}(V_{an}; V_{bn}) \quad (60)$$

As tensões teóricas e experimentais, estão representadas na figura 5.9.

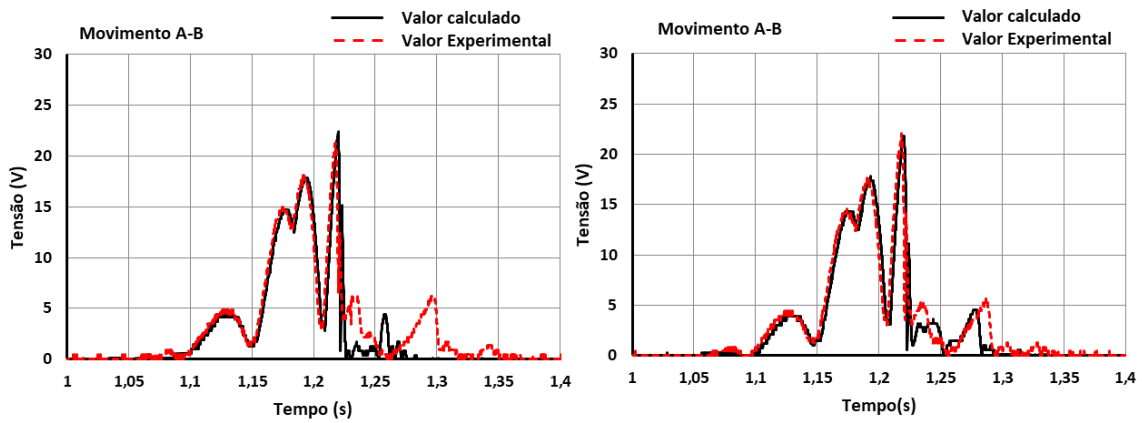


Figura 5.9. Tensão saída calculada e valor da tensão experimental em queda livre, com movimento da bobina A para bobina B (gráfico esquerdo) e da bobina B para a bobina A (gráfico direito). As bobinas são ligadas em paralelo depois das pontes retificadoras.

5.2.6 Comparação de resultados

Ao comparar os gráficos teóricos e experimentais das figuras anteriores, pode ser selecionada a melhor configuração de ligação. A tabela 5.2 apresenta a tensão máxima, medida ou calculada, das quatro configurações apresentadas, em série ou em paralelo, com retificação (PR) antes ou depois de uma combinação de bobinas e com movimentos em ambas as direções (da bobina A para bobina B (A-B) e vice-versa (B-A)).

Tabela 5. 2. Tensões máximas das combinações.

Tipo de configuração	Valores teóricos (V)		Valores experimentais (V)	
	A-B	B-A	A-B	B-A
Série seguido de PR	27,10	26,62	26,19	25,31
Série depois de PR	26,80	26,32	26,06	26,06
Paralelo antes PR	18,13	17,80	22,08	21,64
Paralelo depois de PR	22,39	21,78	21,20	22,80

No entanto, a tensão máxima, conforme apresentado na tabela 5.2, não é suficiente para avaliar a melhor configuração. A bateria carrega somente quando a tensão está acima de 4,0 V. Um LEG deve fornecer tensões acima de 4,0 V por períodos mais longos. O tempo total em que as tensões estão acima de 4,0 V pode ser calculado com a expressão (61).

$$Tot = \sum_{n=4,1}^n ((Bob A_n)A \rightarrow B + (Bob B_n)B \rightarrow A) \quad (61)$$

O Tot é o tempo total em que o LEG pode carregar a bateria dos dois conjuntos de valores de movimento, da bobina A para bobina B ($Bob A_n$) e de bobina B para bobina A ($Bob B_n$). O cálculo do tempo total é apresentado na tabela 5.3.

Tabela 5. 3. Tempo total da tensão acima dos 4,0 V, em função do tipo de configuração.

Tipo configuração	Tempo total (ms)
Série seguido de PR	146,5
Série depois de PR	202,4
Paralelo antes PR	123,3
Paralelo depois de PR	188,3

Da tabela 5.2 verifica-se que as ligações série apresentam maiores tensões que a ligação em paralelo. Verifica-se também na tabela 5.3 que a ligação em série depois da ponta retificadora apresenta um tempo mais longo com tensão superior a 4,0V. Apesar destes resultados serem aproximados e não contemplarem todas as variáveis envolvidas (por exemplo, a resistência interna do gerador ou o efeito de abrandamento devido à carga), esta foi considerada a solução a ser adotada.

5.3 Análise de potência de saída

A ligação em série, após retificação, foi utilizada nos seguintes testes de caracterização, visto que resultados prévios demonstraram que esta configuração maximiza o carregamento da bateria. Nos testes seguintes, uma carga foi aplicada no gerador, como uma carga resistiva, uma bateria ou um condensador. Uma carga permite que o gerador produza corrente e potência elétricas, e consequentemente, energia mecânica é retirada do movimento do magneto. Esta transferência de energia abrandando o movimento do magneto devido à força de arrasto causada pela indução nas bobinas, e o movimento mais lento reduz o valor de tensão de saída até que um equilíbrio seja alcançado. Nos testes da seção anterior, apenas a tensão foi considerada, sem fluxo de corrente, portanto, o seu efeito na tensão de saída não foi considerado. Nos testes de caracterização a seguir, a potência de saída e a energia foram calculadas para diferentes cargas e frequências de movimento.

5.3.1 Influência da carga na potência de Saída

Com um conjunto de vários valores de resistências de carga, um conjunto de seis testes por resistência foram realizados, e os valores médios foram considerados para obter a potência média. Dois exemplos das tensões medidas são apresentados na figura 5.10, num teste de queda livre, usando as resistências de carga de 199 Ω e 510 Ω .

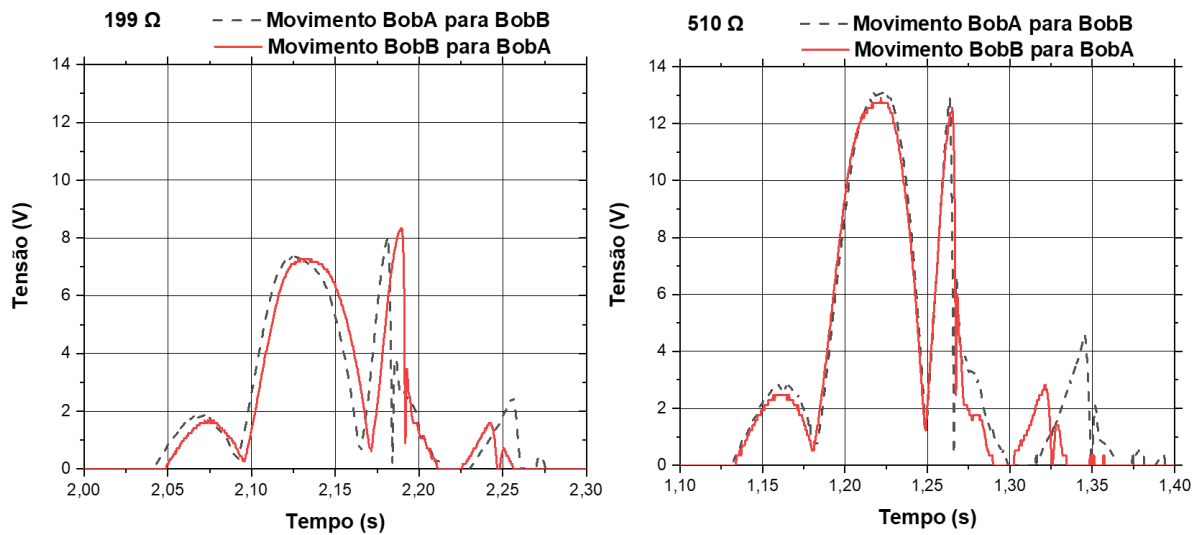


Figura 5.10. Tensões de saída em queda livre para duas resistências, 199 e 510 Ω . São registadas as tensões do movimento do magneto da Bob A para Bob B e sentido inverso.

Com base nos resultados dos gráficos anteriores, a potência média é calculada pela Expressão (54), do capítulo IV.

A tensão RMS foi calculada em todos os testes, sempre considerando o tempo total de 5,0 s (0,2 Hz) e com um período de 313 μ s, resultando em 15 974 amostras. A potência foi calculada separadamente para os testes de queda livre do magneto, da bobina de A para B e de B para A, e os dois valores foram somados para calcular a potência num ciclo completo de 5 s.

A tabela 5.4 apresenta a potência média para diferentes cargas, e a figura 5.11 é o gráfico da potência de saída em função da resistência da carga.

Tabela 5. 4. Potência média em função das resistências de carga e Pt, potência de um ciclo.

Resistência (Ω)	PAB	PBA	Pt um ciclo (A+B) (mW)
	BobA para BobB (mW)	BobB para BobA (mW)	
12,1	0,51	0,31	0,82
24,1	0,86	0,96	1,82
30,2	1,11	1,21	2,32
62,2	1,78	1,66	3,44
123,9	2,44	2,45	4,89
199,0	2,95	3,04	6,00
242,7	3,15	3,06	6,20
510,0	3,23	3,15	6,38
912,0	0,48	0,47	0,95

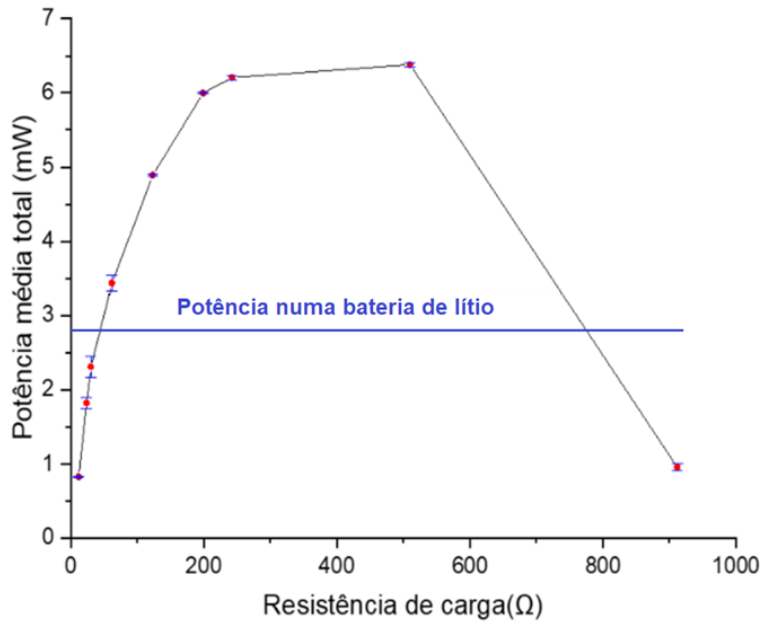


Figura 5.11. Potência média em função da carga resistiva. Os pontos representam os valores médios de 6 testes, as barras o desvio padrão. A linha representa a potência gerada quando utilizada para carregar uma bateria de lítio de 3,2 V.

A potência média máxima é obtida com resistências na gama de 199 Ω a 510 Ω, apesar da resistência interna de 125 Ω em cada bobina e de uma resistência total de 250 Ω numa configuração em série. Uma potência quase constante pode ser obtida com cargas de 199 Ω a 510 Ω. A potência máxima não é obtida com uma resistência de carga equivalente à resistência interna do gerador por várias razões. Em primeiro lugar, a corrente de carga que flui nas bobinas causa uma força magnética de arrasto no magneto (Felem), o que altera o seu movimento. Numa ligação em paralelo após o circuito de retificação, a corrente extraída de cada bobina não é distribuída igualmente, uma vez que depende da tensão de saída de cada bobina. Além disso, numa ligação em série após a retificação, a corrente de saída pode ter uma direção diferente em cada bobina, devido à retificação de onda completa.

Como o gerador destina-se a carregar uma bateria de íões de lítio que apresenta uma tensão quase constante (3,0 V a 4,1 V), então para simular esta carga, um condensador de 1 F, pré-carregado com 3,2 V, foi ligado como carga, e mediu-se a tensão inicial e final do condensador para calcular a energia armazenada e a potência média.

A energia armazenada pode ser calculada com a expressão:

$$P \cdot \Delta t = E = \frac{1}{2} C (V_f^2 - V_i^2) \quad (61)$$

onde P é a potência média no intervalo de tempo Δt , E é a energia, C é o valor capacitância, V_f é a tensão final e V_i é a tensão inicial do condensador. Se o tempo $\Delta t = 5$ s é considerado, num

movimento de 0,2 Hz (como na tabela 5.4), a potência média pode ser calculada.

Num teste de queda livre, a tensão subiu 4,13 mV de 3,216 V, e calculou-se uma potência de 2,8 mW (a tensão foi medida numa série de 10 quedas livres, de BobA para BobB e de BobB para BobA). Este valor é representado por uma linha na figura 5.11. Como esperado, a potência obtida está abaixo da potência máxima com carga ótima. Para operar na potência máxima com carga ótima, é necessário um circuito de rastreamento do ponto da potência máxima (MPPT). Para a potência de trabalho esperada (6,0 mW neste teste), tal circuito apresentaria normalmente uma eficiência inferior a 70% (devido a perdas no conversor e à energia necessária para alimentar o circuito), representando assim que apenas 4,0 mW poderiam ser utilizados para carregar a bateria. A ligação direta do gerador à bateria representa uma enorme simplicidade no circuito, e quase a mesma potência pode ser entregue à bateria.

5.3.2 Influência da frequência do movimento na potência de saída

Foram realizados os seguintes testes para frequências de movimento entre 0,1 e 0,4 Hz, uma vez que o sistema foi projetado para operar nestas baixas frequências. Os testes foram realizados para todas as resistências de carga anteriores, mas apenas as resistências/cargas com a maior potência média são representadas. A potência média foi calculada em todos os testes, sempre considerando o tempo total de 50 s, com um intervalo de amostragem de 3,125 ms, resultando em 16 000 amostras, usando a expressão (54).

A figura 5.12 representa a potência média de saída medida em três valores diferentes de resistência de carga, para as frequências de movimento indicadas (0,1Hz, 0,15Hz, 0,2Hz, 0,3Hz e 0,4Hz).

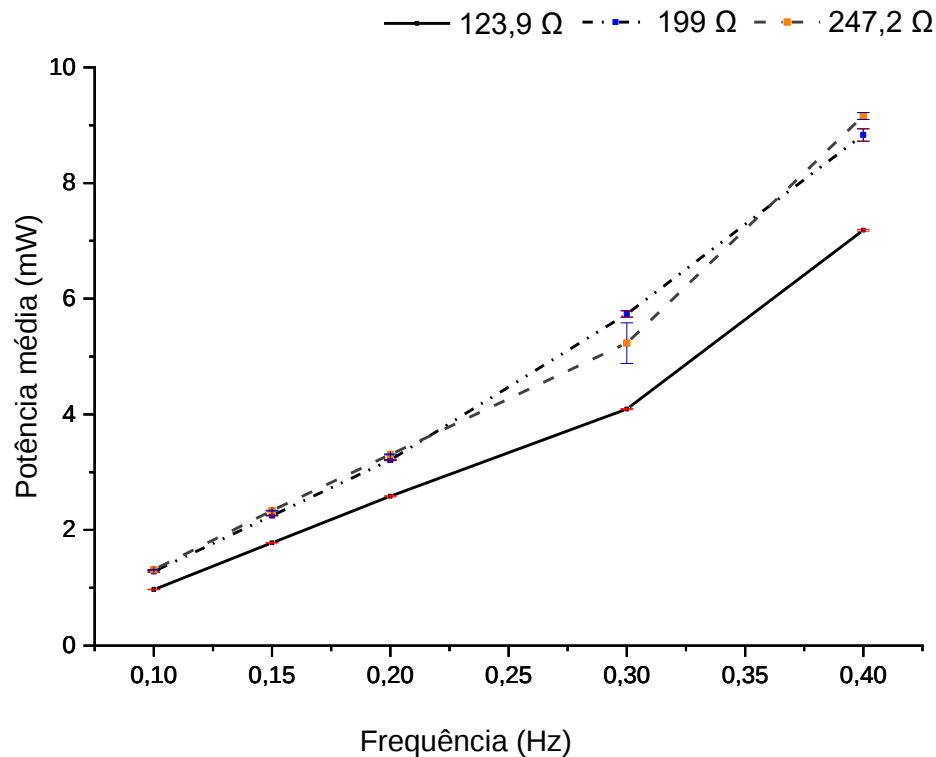


Figura 5.12. Potência média obtida para três valores de resistências de carga, com frequências de movimento de 0,1-0,4 Hz. Os pontos, representam os valores médios e as barras o desvio padrão em 6 testes.

5.4 Armazenamento de energia e alimentação de sensores

Os testes de carga anteriores foram realizados com uma carga resistiva. No entanto, numa aplicação real, espera-se que seja utilizada uma bateria recarregável de lítio (LiPo) ou um supercondensador. Para garantir que o sistema proposto possa fornecer energia nas frequências desejadas, além do teste de carga com as resistências apresentados anteriormente (tabela 5.4), foram realizados testes para carregar um condensador de 1 F para simular uma bateria LiPo. Esta normalmente carrega de 3,0 V (totalmente descarregada) a 4,1 V (totalmente carregada), com um aumento de tensão quase linear. Para estes testes, o valor inicial da tensão do condensador é de 3,7 V, e foram realizados testes para aumentar a tensão do condensador acima de 4,1 V. Os testes foram feitos para frequências de 0,1 Hz a 0,4 Hz, e a tensão final foi medida no tempo total de 900 s. A figura 5.13 mostra a tensão do condensador medida no tempo inicial de 300, 600 e 900 s.

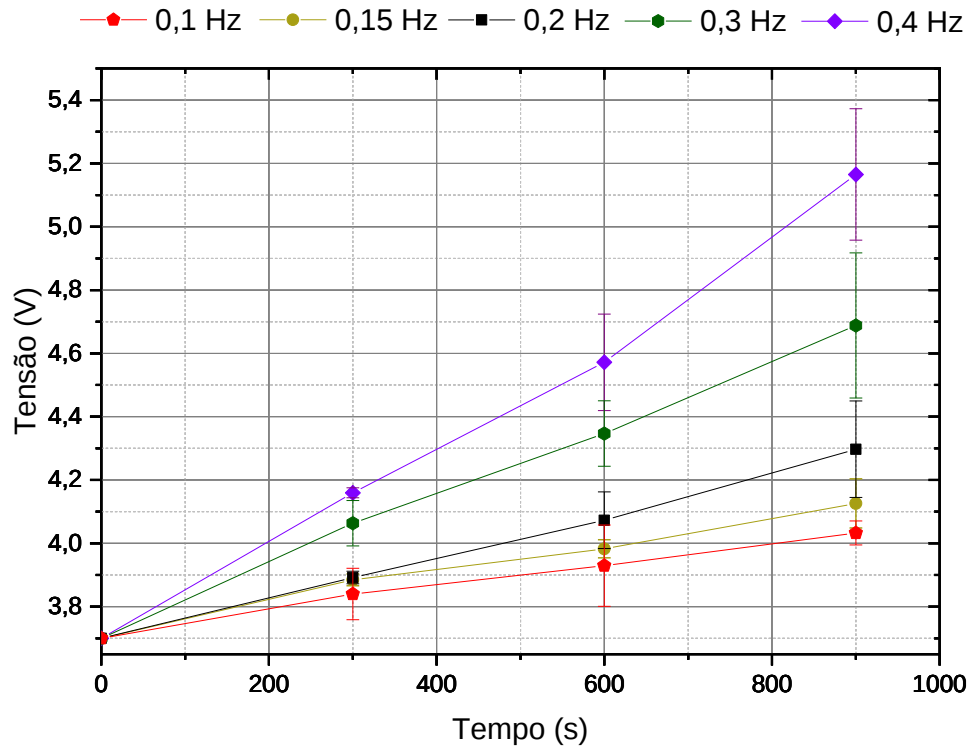


Figura 5.13. Carregamento do condensador durante 900 s, em função da frequência.

Considerando o gráfico tempo-tensão da figura 5.13, a energia armazenada no condensador pode ser calculada pela expressão 61. O gráfico da figura 5.14 apresenta o armazenamento de energia no condensador ao longo de 900 s.

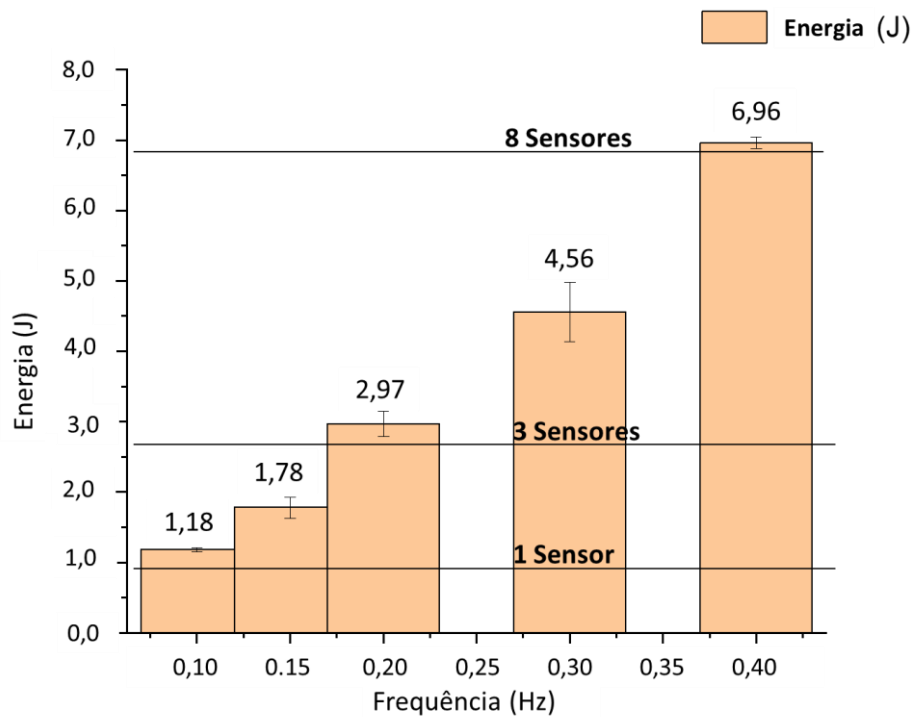


Figura 5.14. Energia armazenada no condensador em 900 s.

O gerador tem por finalidade fornecer energia a sensores submersos. Na configuração

proposta (figura 5.3), foram considerados até oito sensores. Todos os oito sensores foram caracterizados, e uma potência média de 0,945 mW foi medida em cada sensor, usando uma tensão de 3,2 V (a ficha técnica do sensor mostra que cada sensor pode ser alimentado com uma tensão de entrada entre 3,0 e 5,0 V).

Por exemplo, considerando que a potência média consumida por um sensor é de 0,945 mW, então em 900 s, cada sensor consome 851,43 mJ. Neste caso, para fornecer energia a pelo menos três sensores em 900 s, é necessária uma energia de 2,55 J. Na figura 5.14, é possível confirmar que o sistema pode fornecer energia a três sensores a uma frequência de 0,2 Hz e após subtrair 2,55 J do consumo dos três sensores, ainda restam 0,42 J para carregar um dispositivo de armazenamento de energia. Com uma frequência de 0,4 Hz, oito sensores podem ser alimentados. É importante salientar, que o valor das frequências é constante.

Para confirmar estes valores teóricos, foram realizados testes com esses sensores ligados ao LEG. Foi introduzido uma oscilação de 0,2 Hz na plataforma com o LEG montado, e o mesmo condensador de 1 F foi ligado em paralelo com a carga dos três sensores. A figura 5.15 representa a evolução da tensão ao carregar o condensador a 0,2 Hz, sem carga e com a carga dos três sensores. O condensador foi usado para armazenar a energia, mas também como um meio simples de medir a energia armazenada, conforme representado na expressão 61.

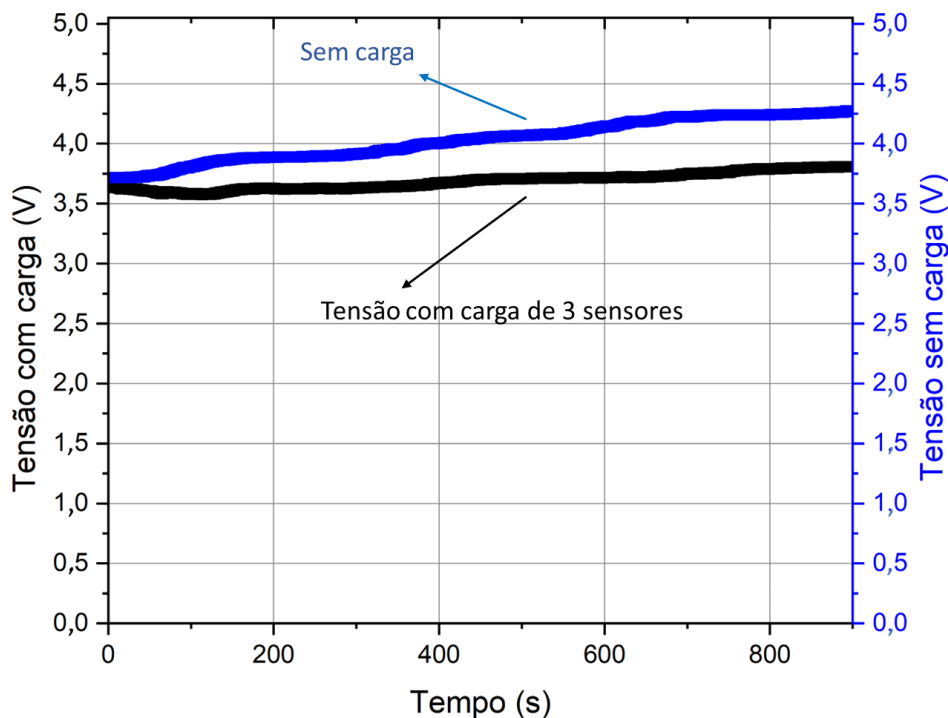


Figura 5.15. Carregamento do condensador a 0,2 Hz, com carga de 3 sensores e sem carga.

O procedimento de carga representado no gráfico foi repetido seis vezes, e os resultados médios obtidos estão registados na tabela 5.5. A tensão inicial do condensador (V_i) é sempre de 3,7

V_i , e a tensão final (V_f) foi sempre medida no tempo total de 900 s. A energia de armazenamento (E) foi calculada com a expressão 61 e a potência média fornecida ao condensador foi também calculada.

Tabela 5. 5. Energia armazenada em 900 s e correspondente potência média.

	V_i (V)	V_f (V)	Energia (J)	Potência (mW)
Sem carga	3,71	4,44	2,97	3,3
Com carga de 3 sensores	3,71	3,85	0,52	0,6

Tabela 5.5 apresenta, na primeira linha (sem carga), a energia acumulada em 900 s, a uma frequência de 0,2 Hz, sem sensores ligados (conforme apresentado na figura 5.13). A segunda linha (com carga de três sensores) é a energia armazenada no condensador durante 900 s, com a carga dos três sensores. Os valores experimentais mostram que, em 900 s, é possível fornecer energia a três sensores e carregar uma bateria com um excedente de energia de 0,52 J, correspondendo a uma potência média de 0,6 mW. Os resultados da tabela 5.6 validam os resultados experimentais da figura 5.13. Os resultados teóricos indicam que existe um excesso de 0,42 J para carregar a bateria, em comparação com 0,52 J medidos experimentalmente, ao alimentar três sensores e usar a energia restante para carregar o condensador.

Cada sensor consome uma potência média de 0,945 mW, representando 0,85 J durante 900 s. O perfil de consumo do sensor é descrito na tabela 5.1. Considerando a energia produzida (figura 5.13) e a validação experimental da tabela 5.5, é possível prever quantos sensores podem ser alimentados para várias frequências de movimento, conforme apresentado na tabela 5.6.

Na tabela 5.6, são apresentados, da coluna da esquerda para a direita, a frequência de movimento, a energia total produzida pelo LEG (num teste de 900 s), potência respetiva, o número de sensores que podem ser alimentados, a energia utilizada para alimentar os sensores, o excedente de energia que pode ser armazenado e a potência de excedente.

Tabela 5. 6. Número de sensores que será possível alimentar, com base em 900 s.

Frequência (Hz)	Energia total produzida (J)	Potência total P_{TOT} (mW)	Máximo nº de sensores N	Energia consumida pelos sensores (J)	Energia excedente e armazenada (J)	Potência excedente (mW)
0,1	1,18	1,31	1	0,85	0,33	0,37
0,15	1,78	1,98	2	1,7	0,08	0,09
0,2	2,97	3,3	3	2,55	0,42	0,47
0,3	4,56	5,07	5	4,25	0,31	0,34
0,4	6,96	7,73	8	6,8	0,16	0,18

De acordo com os resultados obtidos na tabela 5.6, é viável fornecer e carregar uma bateria com esta configuração de LEG, dependendo da frequência. É importante notar que, a 0,4 Hz, o sistema pode fornecer energia para oito sensores e ainda carregar uma bateria com energia excedente. Deve-se notar que os resultados experimentais foram obtidos com sensores que consomem em média 0,28 J (em 300 s), pois esse sensor requer uma corrente de 300 μ A. Atualmente, esses sensores já estão otimizados para usar uma corrente de 50 μ A no modo de suspensão, o que corresponde ao consumo médio de energia de 0,048 J em 300 s nas condições apresentadas na tabela 5.1. Com essa energia consumida, é possível fornecer energia a 48 sensores em vez de oito, caso contrário, o excedente de energia é armazenado na bateria.

5.5 Resumo

Existem vários dispositivos de produção de energia com diferentes tecnologias que podem ser usados no oceano. Para a aplicação pretendida, decidiu-se estudar e implementar um dispositivo de produção de energia eletromagnética, principalmente devido ao baixo custo dos mecanismos elétricos/mecânicos. O dispositivo proposto não requer componentes elétricos especiais, como geradores triboelétricos ou geradores piezoelétricos. Os geradores triboelétricos produzem alta tensão e baixa corrente, enquanto o gerador eletromagnético produz baixa tensão e é fácil de converter a tensão para ser usado nos sensores. Os geradores triboelétricos precisam de frequências superiores a 1 Hz para produzir tensão suficiente, e para esta aplicação, o LEG tem de fornecer energia com frequências abaixo de 0,4 Hz. Outro ponto importante é a baixa resistência de carga dos geradores triboelétricos, que está na ordem dos M Ω . Existem aplicações onde é preferível aplicar geradores triboelétricos com diferentes componentes elétricos, e em outras aplicações, é necessário aplicar uma combinação de tecnologias eletromagnética, piezoelétrica, eletrostática e triboelétrica. Não existe uma solução universal. Foi fabricado um gerador eletromagnético linear (LEG), usando um núcleo magnético que se move ao longo de duas bobinas, de acordo com as oscilações da corrente e da água. Este gerador não pode ter partes móveis externas e destina-se a funcionar totalmente submerso. O LEG foi totalmente caracterizado em várias condições, incluindo a fornecer energia a sensores de turbidez oceanográficos. Realizando testes de queda livre individuais em cada bobina, é possível prever as ligações das bobinas para maximizar o carregamento de uma bateria. As tensões das bobinas foram retificadas num retificador de ponte completa e ligadas em série, para maximizar o tempo de carregamento. O rendimento de saída do gerador foi avaliado com diferentes valores de carga resistiva e uma carga capacitiva para avaliar o efeito da carga na saída de potência. Foi obtida uma potência quase constante (acima de 6 mW) com

uma resistência de carga de 199 a 510 Ω . Uma vez que o gerador é usado diretamente ligado a uma bateria, sem um circuito de rastreamento do ponto de potência máxima (MPPT), esta potência constante garante a otimização da potência transferida para a bateria. O comportamento constante foi atribuído a forças de arrasto causadas pelas correntes de carga. O uso de uma carga de tensão quase constante (carga capacitiva) permitiu verificar que o circuito ainda opera num ponto de potência útil (2,8 mW) quando ligado a uma bateria, e um circuito de rastreamento do ponto de potência máxima não foi necessário.

Resultados experimentais, tanto com cargas resistivas como com um supercondensador (simulando uma bateria de lítio), foram validados teoricamente, com movimentos oscilatórios com frequências de 0,1 a 0,4 Hz, como esperado em ondas típicas do oceano Atlântico. A potência produzida aumenta com a frequência, de 1,31 mW a 0,1 Hz para 7,73 mW a 0,4 Hz.

O gerador foi utilizado para alimentar vários sensores de turbidez, sendo possível fornecer energia para até oito sensores e ainda carregar a bateria com energia excedente, com um movimento de 0,4 Hz. O movimento de 0,1 Hz também foi suficiente para alimentar um sensor.

Outra observação a ter em conta, é de que as frequências utilizadas nos testes, foram efetuados numa bancada de ensaios, em que a oscilação é constante e não existe alguma força aplicada no LEG, que permita alterar a velocidade do movimento do magneto. No mar ou num rio, com as correntes e oscilações das ondas, haverá eventualmente forças de impacto no sistema, que poderão beneficiar a produção de energia.

Capítulo 6

Projeto da geometria do corpo exterior

Após a conclusão da otimização do LEG, foi realizado uma análise da geometria do corpo que o irá alojar, de forma a suportar as condições ambientais a que será submetido e que possua também uma geometria que favoreça a oscilação devido à corrente marítima. Neste capítulo a geometria foi submetida a uma avaliação por meio da utilização do software *OpenFoam* de código aberto.

6.1 Validação do solver OpenFoam

O objetivo das simulações foi determinar o valor do coeficiente de arrasto (C_D), para calcular a força de arrasto (F_D) que permita o movimento e oscilação do protótipo em função da geometria selecionada. Com base nesta força, foi possível determinar a força de impulsão (F_{in}) necessária para que esta contribua para movimento da oscilação do protótipo, uma vez que o volume da geometria está condicionado pelo volume do LEG. A seleção do material a ser utilizado para o fabrico, de acordo com sua massa volúmica, também foi determinante na obtenção da força de impulsão. Um outro aspeto relevante que se pretendia avaliar na simulação é a oscilação do valor do coeficiente de sustentação (C_L), visto que esta oscilação é um indicador da presença ou ausência de movimento. Foram examinadas diversas formas geométricas com o intuito de encontrar aquela que seria, teoricamente, a mais apropriada para a aplicação do gerador linear eletromagnético (LEG). Independentemente da forma escolhida, é imprescindível que o dispositivo possa comportar o LEG e os instrumentos necessários para avaliar a produção de energia em condições reais, tanto no mar como em rio.

Para se realizar as simulações numéricas do dispositivo, com o objetivo de obter o valor das forças que interagem, foi necessário proceder à validação do solver. A validação foi efetuada por comparação dos valores de C_D , figura 6.1, para uma esfera lisa em função do número de Reynolds, obtidos experimentalmente em laboratório. A linha azul é a parametrização de Clift, Grace & Weber (1978). A linha verde é o coeficiente de arrasto de acordo com a lei de Stokes, válido para números de Reynolds muito baixos.

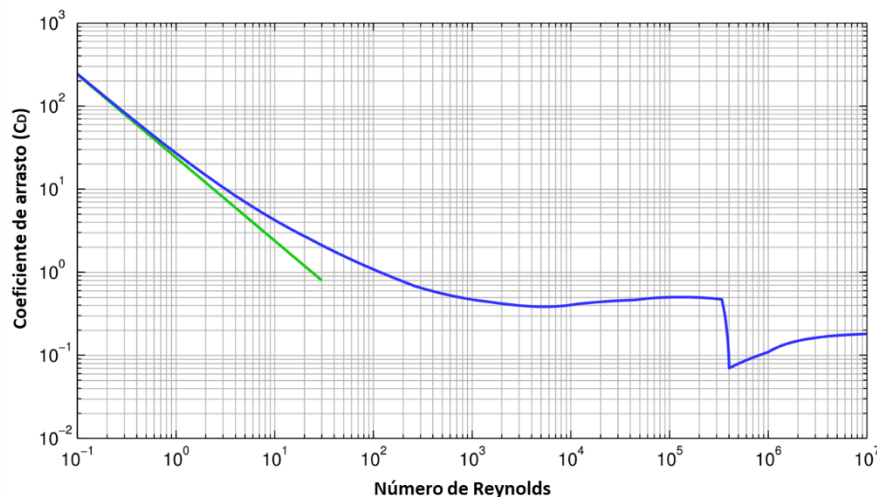


Figura 6.1. Gráfico de C_D em função número do Reynolds, de Kraaiennest – baseado na figura 5.12 e equações da tabela de R. Clift, J. R. Grace e M. E. Weber (1978) “Bubbles, drops, and particles”, Academic Press, ISBN 0-12-176950-X., permissão do uso da imagem por CC BY-SA 3.0.

O solver poderia ser validado experimentalmente num túnel de vento ou numericamente.

Conforme anteriormente mencionado, foi validado pela segunda via.

Para realizar a simulação, seguiu-se o fluxo de tarefas da figura 6.2.

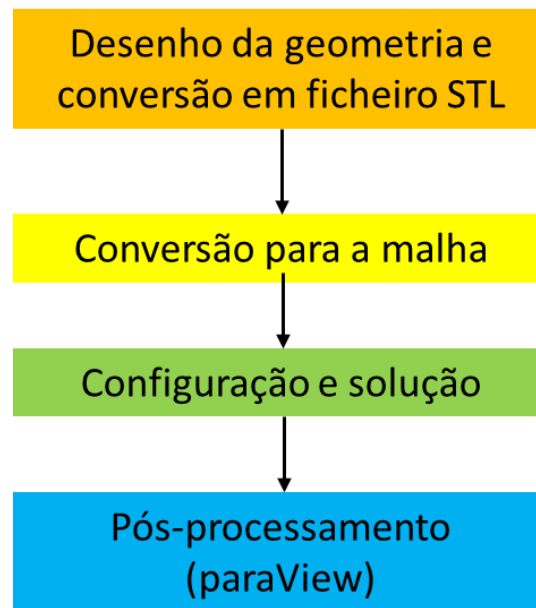


Figura 6.2. Fluxo da simulação.

Tudo se inicia com a geometria. É necessária uma geometria bem definida e preenchida, sem lacunas, para que se possa obter uma boa malha e com valores baixos para:

- Simetria(skewness);
- Ortogonalidade (orthogonality);
- Razão de aspeto (aspect ratio);
- Taxa de crescimento (growth rate);

No entanto, devido ao tempo de computação poder ser muito elevado, verificou-se se uma boa malha grosseira, poderá contribuir para uma solução fiável e convergente, evitando assim uma malha muito fina, que iria exigir tempos de computação elevados. Quanto mais fina for a malha, maior é o número de células que entra para o cálculo dos valores da simulação.

No caso em estudo, para validação do solver, foi usado como referência o valor de 8 para a simetria e 80 para não-ortogonalidade, valores utilizados na indústria de acordo com a empresa wolfdynamics (Wolf Dynamics - Customer-driven flow solutions) [68].

A validação do solver, foi efetuado utilizando os mesmos valores dos números de Reynolds do gráfico da figura 6.1.

O número de Reynolds é dado pela expressão:

$$Re = \frac{Vd}{\nu} \quad (62)$$

Onde Re é número de Reynolds, V velocidade do fluido, d o comprimento linear característico e ν a viscosidade cinemática do fluido, considerando o ar com valor de $1,5 \times 10^{-5} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$.

1. As variáveis utilizadas para simulação são dadas pelas expressões:

$$I_t = \frac{\left(\frac{1}{3}\right)(u^2 + v^2 + z^2)^{\frac{1}{2}}}{U} \quad (63)$$

$$k = \frac{3}{2}(UI_t)^2 \quad (64)$$

$$\epsilon = c_\mu \frac{k^{\frac{3}{2}}}{L_t} \quad (65)$$

$$\omega = \frac{\sqrt{k}}{L_t} \quad (66)$$

Onde a intensidade de turbulência é I_t , u , v , z , as velocidades do fluido nas direções x , y , z em ms^{-1} , U é a magnitude da velocidade em ms^{-1} , k é a energia cinética turbulenta em m^2s^{-2} , ϵ é a dissipação turbulenta em m^2s^{-3} , ω é taxa de dissipação turbulenta em s^{-1} e L_t é o comprimento de escala em metros. Nas simulações este valor foi de 22% da espessura da camada limite da malha. O solver utilizado, simpleFoam, tem um valor da constante c_μ de 0,09 e foi usado o modelo turbulento RANS (*Reynolds-Averaged Navier-Stokes equations*) nas simulações, por necessitar de menos tempo de computação e por ser o mais usado na indústria. O modelo turbulento RAS a ser aplicado nas simulações será SST k-omega (Shear Stress Transport).

Para a simulação foi utilizada uma esfera com diâmetro de 0,21 m. As dimensões para volume da simulação que contém a esfera será de 2,8 m de comprimento, 2,20m de largura e 2,20 m de altura.

Para comparar os resultados do solver selecionado e o modelo turbulento considerado, com os valores do gráfico da figura 6.1, foram efetuadas simulações para o número de Reynolds, 10^3 , 10^4 e 10^5 . De acordo com o diagrama de fluxo da simulação, figura 6.2, a primeira etapa foi modelar a esfera, figura 6.3 e exportar no formato stl para o *OpenFoam*.

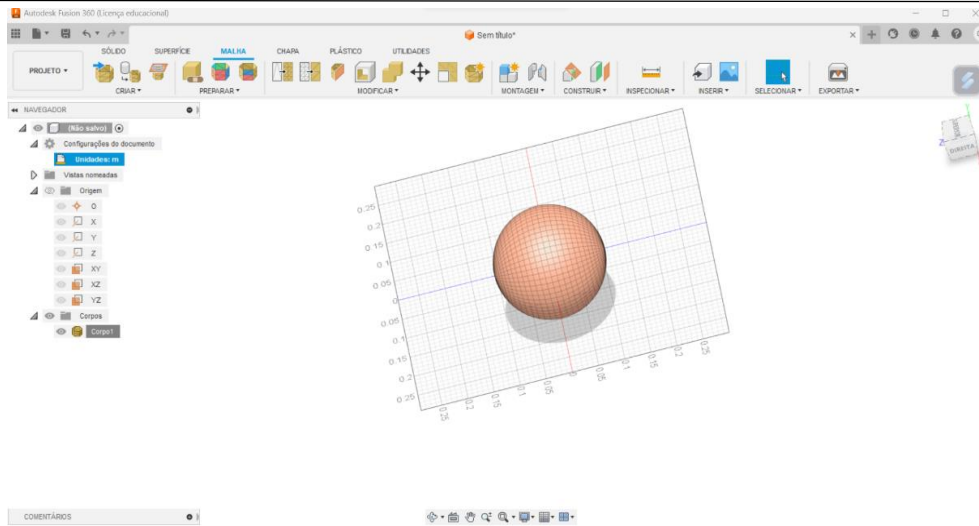


Figura 6.3. Modelação da esfera em *Fusion 360* e exportação do ficheiro stl, com pré-malha.

Os parâmetros da malha e da simulação estão incluídos no anexo II, para a simulação do número de Reynolds de 10^3 .

Foi utilizado o programa *CFmesh* e a função *surfaceGenerateBoundingBox* para as dimensões do volume que contém a esfera, e obteve-se uma malha com 95 600 células, uma simetria de 0,885 e uma não-ortogonalidade máxima de 58,12. Estes valores estavam dentro dos parâmetros pretendidos (obtidos pelo relatório da malha e do comando *checkMesh*) para submeter-se a malha à simulação. Na figura 6.4, pode-se visualizar o pormenor da malha.

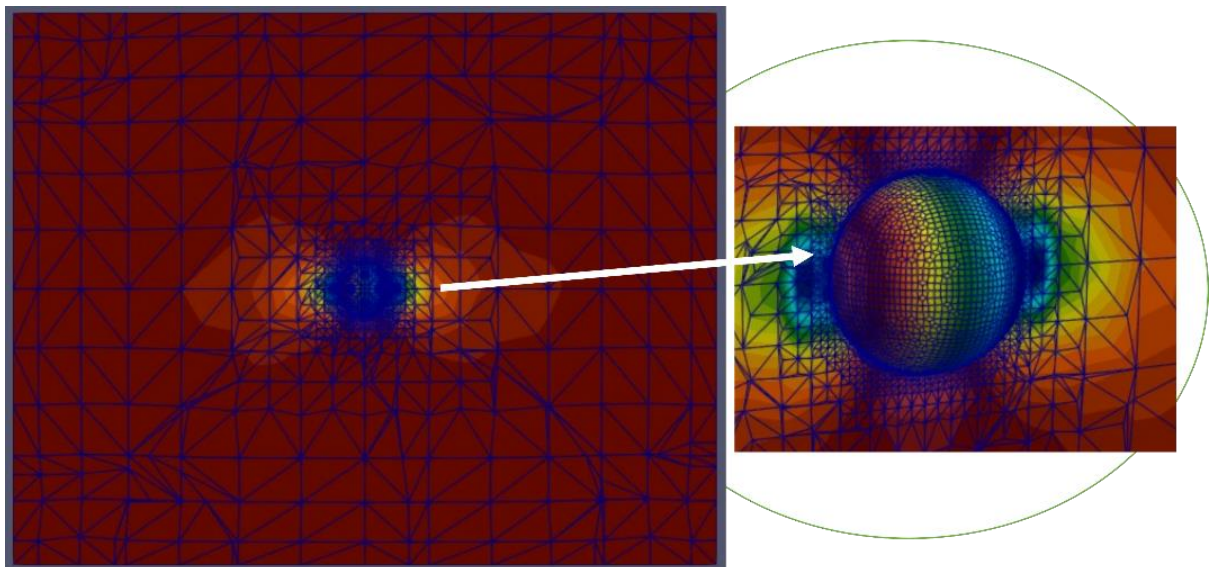


Figura 6.4. Imagem esquerda, corte da malha do volume do fluído com esfera no centro. A malha é mais refinada na zona adjacente entre a esfera e o fluído. Na imagem direita, é apresentado a malha da esfera e as camadas mais refinadas junto à esfera.

Realizaram-se as simulações em 32 horas com o solver e modelo previamente selecionado, com o recurso a 3 processadores intel® core i3 e obtiveram-se os valores de C_D para os três números de Re , tabela 6.1.

Tabela 6. 1. Valores C_D em função número de Re .

Re	Velocidade (ms^{-1})	C_D
10^3	0,05	0,51
10^4	0,5	0,525
10^5	5	0,41

Compararam-se os valores do coeficiente de arrasto (C_D) obtidos com os do gráfico da figura 6.1, constatou-se que se encontram na mesma ordem de grandeza. Na figura 6.5, foram registados no gráfico os valores obtidos nas simulações.

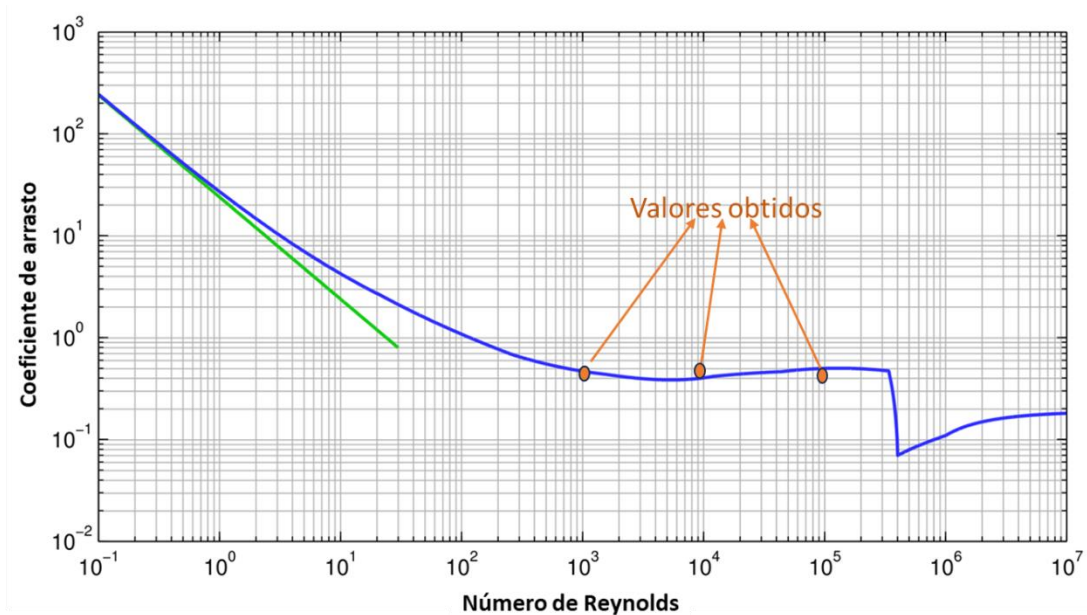


Figura 6.5. Marcação dos valores de C_D obtidos nas simulações.

Devido à proximidade dos valores obtidos, foi possível considerar a utilização do modelo turbulento SST k-omega juntamente com o solver simpleFoam para efetuar as simulações do corpo externo do LEG. Esta escolha permitiu obter resultados coerentes e fiáveis para análises futuras.

6.2 Parâmetros das simulações numéricas do protótipo selecionado

Considerando as diferentes velocidades da água presentes no oceano, procedeu-se à realização de simulações com velocidades de água de 0,1, 0,2, 0,25, 0,3 e 0,50 ms^{-1} , conjuntamente

com as variações do ângulo do dispositivo. Vários modelos foram testados através das simulações, e entre estes, o modelo mais adequado foi selecionado para a aplicação em questão, considerando os valores do coeficiente de arrasto (C_D) e da força de arrasto (F_D), calculadas pela simulação, figura 6.6.

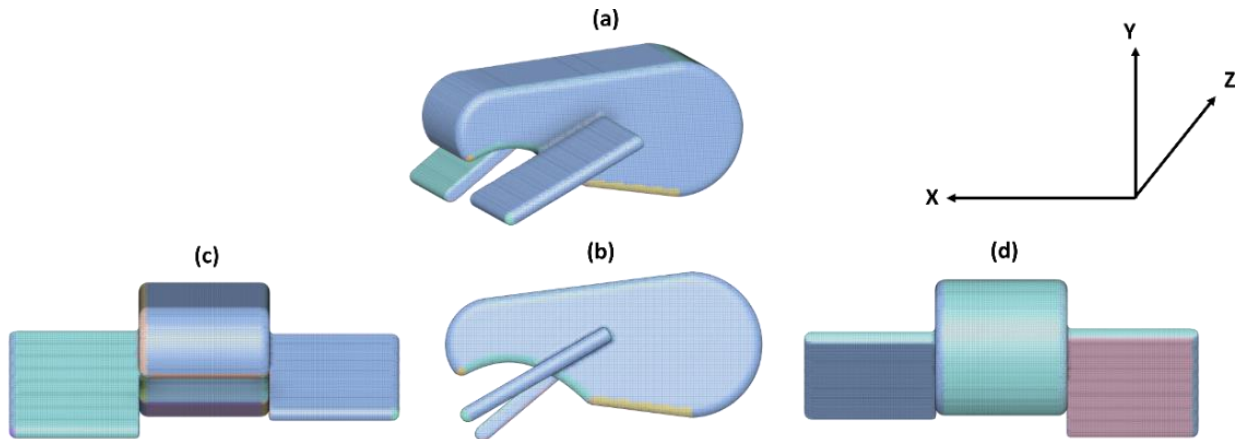


Figura 6.6. Modelo selecionado após as simulações. a) Vista em perspetiva, b) Vista lateral, c) Vista frontal, d) Vista traseira.

O ângulo das pás, tomando como referência a figura 6.6 (c), é de $39,5^\circ$ para a pá esquerda e $30,1^\circ$ para a pá direita, em relação ao eixo x. As dimensões reais foram utilizadas nas simulações, figura 6.7.

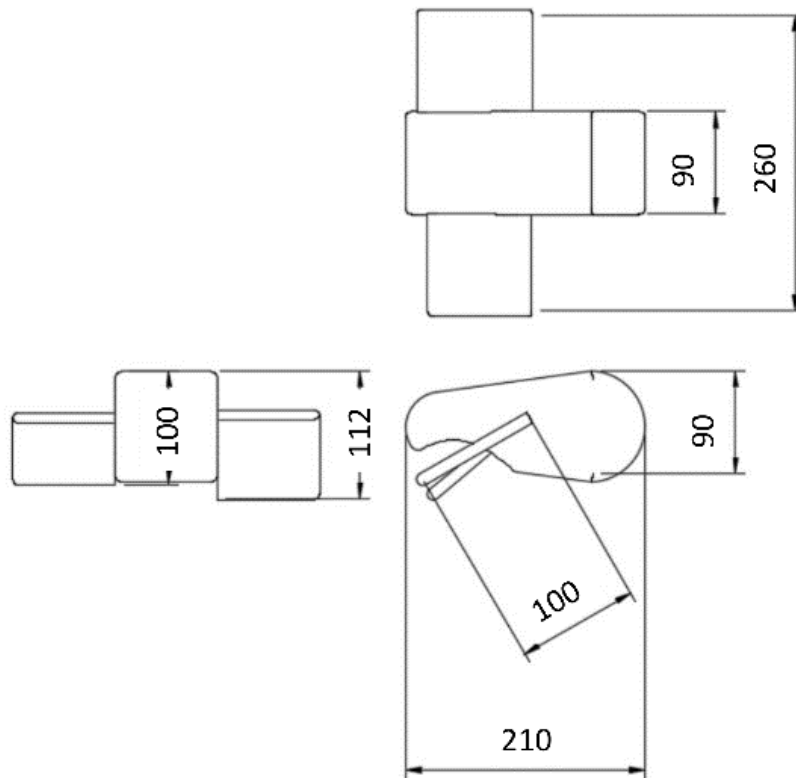


Figura 6.7. Dimensões em milímetros, do protótipo utilizado nas simulações.

Antes de se proceder às simulações, foi definido:

- As condições fronteiras, serão utilizadas as dimensões reais do dispositivo;
- O fluido e as suas propriedades (nestas simulações será usado água do mar, com uma viscosidade cinemática (ν) de $1,017 \times 10^{-6} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$, valor da tabela das propriedades da água do mar de James W. Murray, Universidade de Washinton);
- Tipo de malha a ser utilizada (grosseira, média, fina e extrafina). Este parâmetro não sendo corretamente selecionado, influencia os resultados, ao ponto de não haver convergência nos seus valores ou mesmo apresentar soluções que não são realistas. No entanto, é necessária uma solução de compromisso, uma vez que uma malha mais fina (maior número de células), exigirá maior tempo de computação;
- O solver e o modelo, que é o mesmo que foi utilizado na simulação da esfera;
- Simulações para os ângulos, 0° , 15° , 20° e 30° (no protótipo físico, será colocado um limitador do ângulo, para evitar a rotação de 360°);
- O ângulo de 0° como a posição de início do funcionamento do protótipo.

Para as simulações apresentadas neste capítulo, foi utilizado o modelo à escala real, pelo que as dimensões das condições fronteira teriam de estar de acordo com as dimensões do protótipo. No anexo II, pode-se consultar os parâmetros utilizados.

6.2.1 Condições fronteira

As condições fronteiras, figura 6.8, com as dimensões totais, incluindo o protótipo a partir do qual foi convertido numa malha para a simulação.

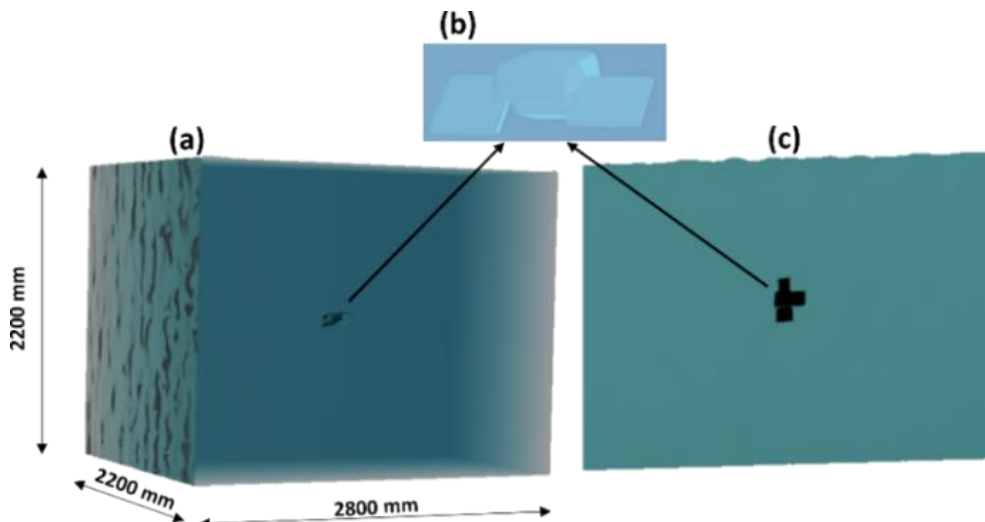


Figura 6.8. a) Dimensões consideradas para a simulação da interação fluido/protótipo, b) Protótipo, c) Vista superior.

É importante destacar que existe uma relação proporcional entre o objeto de estudo, o dispositivo, e a distância entre as condições fronteiras. Essas condições incluem a zona de entrada do fluido (*inlet*), a zona de saída do fluido (*outlet*) e as paredes das condições fronteira (*wall*), que se encontram acima, abaixo, à esquerda e à direita do dispositivo. As distâncias entre o dispositivo e as paredes não podem ser muito próximas, visto que isso poderá afetar os resultados da simulação ou até mesmo tornar inviável a realização da malha.

Nas dimensões representadas nas figuras 6.7 e 6.8, foi estabelecido que as distâncias são, no mínimo, quatro vezes maiores do que a dimensão do dispositivo, e, no máximo, nove vezes maiores do que essa dimensão. Esta proporção é fundamental para garantir a qualidade da malha e, conseqüentemente, a eventual convergência dos resultados.

6.2.2 Malha

Considerando as dimensões do dispositivo e condições fronteiras em análise, foi vantajoso considerar a utilização de uma malha com poucas células, mas que garanta a fiabilidade dos resultados. Quanto mais células a malha incluir, maior será o tempo de computação.

Neste sentido, foi de extrema importância comparar numa primeira fase, a viabilidade da utilização de uma malha com poucas células, em relação a uma malha com muitas células. Para a comparação, foi utilizado os valores do coeficiente de arrasto (C_D).

Foram realizadas duas simulações com o intuito de comparar diferentes definições de malhas, mantendo-se a velocidade para o fluido em ambas as condições, a saber, $0,5 \text{ ms}^{-1}$, e com o protótipo posicionado a -20° em relação à horizontal (terceiro quadrante, com a parte frontal voltada para baixo). Na primeira simulação, utilizou-se uma malha com um total de 5 093 063 células, obteve-se um coeficiente de arrasto (C_D) de 0,7241. Na segunda simulação, empregou-se uma malha com de 82 000 células, e o valor obtido de C_D foi 0,7330.

No que diz respeito ao tempo computacional necessário para realizar essas simulações, foi necessário um total de 26 horas utilizando 5 093 063 células, com aplicação de 4 CPU's Intel® i7 em paralelo. A malha com aproximadamente 82 000 células, necessitou de aproximadamente 6 horas de computação no mesmo computador.

Na figura 6.9 é evidente a diferença entre o número de células utilizadas nas malhas que foram comparadas.

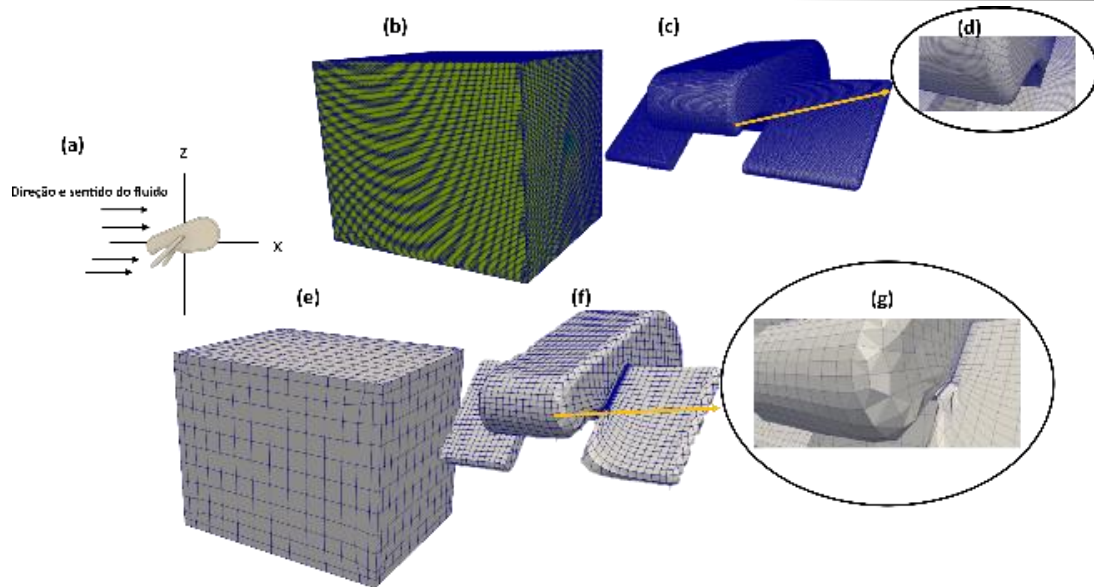


Figura 6.9. a) Posicionamento do protótipo, b) Malha fina do volume do fluido, c) Malha fina do dispositivo, d) Visualização do detalhe da aresta, e) Malha grosseira/média do volume do fluido, f) Malha grosseira/média do dispositivo, g) Visualização da aresta.

Independentemente da malha a ser utilizada, é fundamental que se tenha atenção às transições das células, que devem ser adaptativas e suaves, em vez de bruscas, para garantir a qualidade dos resultados obtidos. Além disso, é importante que haja um refinamento da malha em zonas específicas, onde se pretende analisar com maior detalhe os fenómenos em questão. Para tal, foi necessário diminuir o tamanho das células e aumentar as camadas de refinamento nessas áreas, como ilustrado na figura 6.10.

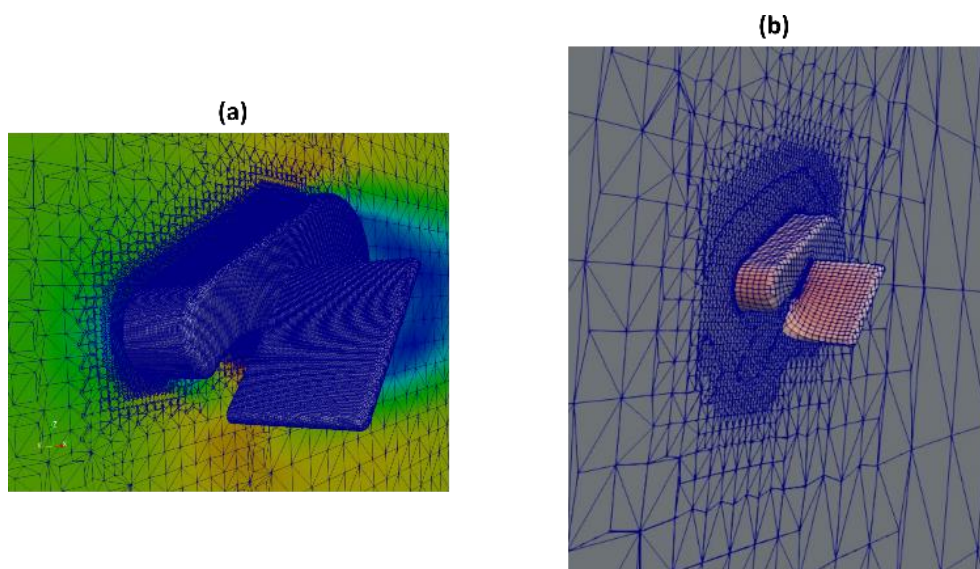


Figura 6.10. Vista em corte do volume do fluido com o dispositivo, a) Transição suave nas células da malha na proximidade do dispositivo (com mais células), b) Transição suave na malha (com menos células) para o dispositivo, mas com maior número de camadas de refinamento.

É importante realçar que, para a malha com menos células, foi adotado um refinamento mais acentuado na região de contato entre o dispositivo e o volume de fluido, visando garantir a confiabilidade dos resultados e reduzir o tempo de computação. Com o solver, o modelo, as condições fronteiras da simulação, as dimensões e o refinamento da malha validados, realizaram-se as simulações.

O objetivo das simulações foi avaliar a capacidade da força de arrasto (F_D) em movimentar o dispositivo, considerando a velocidade do fluido. Nas simulações não foi considerado o peso do dispositivo. Tendo em vista que as velocidades da água do mar podem variar em função da morfologia da região em que o dispositivo é instalado, foram definidos valores específicos de velocidade de água do mar a serem adotados para a realização das simulações, 0,1, 0,2, 0,25, 0,3 e 0,5 ms^{-1} . Foi analisado o comportamento do F_D em função da alteração da velocidade e dos diferentes ângulos de posicionamento do protótipo em relação ao fluido. A figura 6.11 ilustra os ângulos do protótipo utilizados nas simulações.

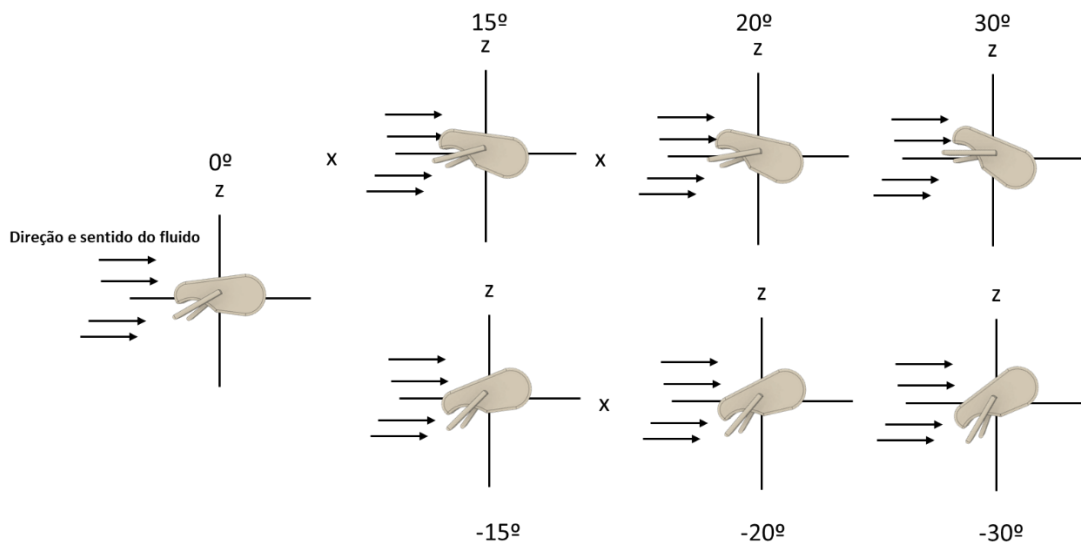


Figura 6.11. Posicionamento do protótipo para as simulações.

Foram considerados ângulos positivos e negativos nas simulações, relativamente à frente do protótipo, uma vez que o fluxo ou oscilações podem alterar a posição do dispositivo no seu deslocamento.

Apesar de terem sido realizadas simulações até um ângulo máximo de 30°, é importante salientar que isso não implica que o protótipo não possa atingir um ângulo superior. A partir do cálculo das forças de arrasto, é possível determinar o ângulo máximo que o protótipo pode alcançar. No entanto, do ponto de vista físico, esse ângulo será limitado a 70°, a fim de evitar a rotação do dispositivo e a eventual fratura dos filamentos do cabo elétrico que possa estar ligado ao dispositivo, garantido assim a segurança e a eficiência da operação do protótipo.

6.3 Simulações

Foram usadas as referências P1 e P2, para as pás esquerda e direita, quando forem apresentados os cortes dos escoamentos. Para o corte do escoamento do corpo foi usada a designação B1, figura 6.12.

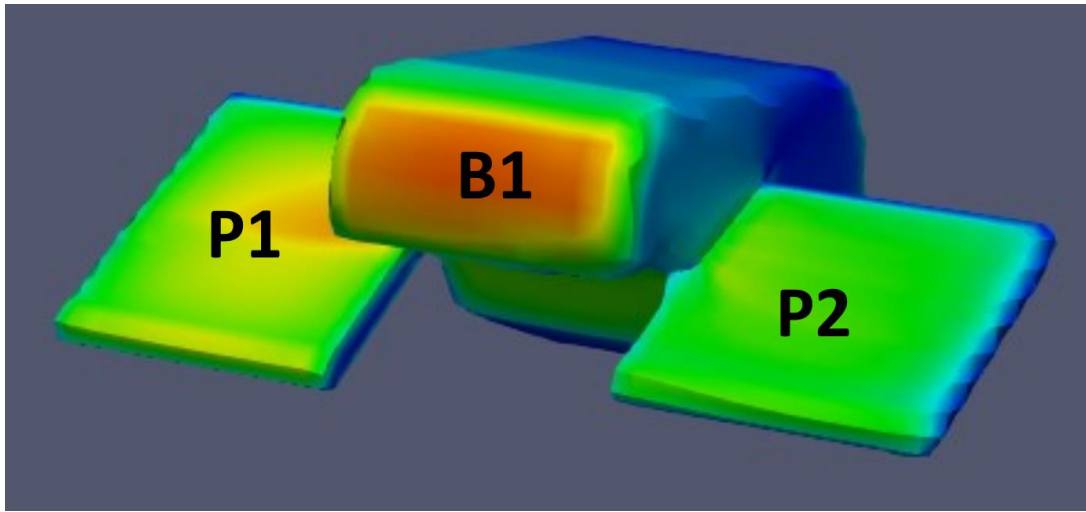


Figura 6.12. Identificação dos componentes do protótipo para referência das visualizações.

As simulações foram efetuadas para as velocidades de 0,1, 0,2, 0,25, 0,3 e 0,5 ms^{-1} .

Os ângulos, conforme anteriormente referido, utilizados nas simulações foram 0° , que é a posição de equilíbrio ou repouso do dispositivo, 15° que é considerado o ângulo a partir da qual o dispositivo produz energia e também foram efetuadas simulações para 20° e 30° .

A inclinação do dispositivo face à direção do fluido para as simulações, são as identificadas na figura 6.11.

Os valores dos parâmetros para efetuar as simulações a partir das expressões 62 a 66, estão incluídas no anexo II, assim como outros parâmetros também necessários, *fvSchemes*, *fvSolutions*, *decomposeParDict* entre outros. Como exemplo, é apresentada parte da simulação no instante do tempo de 1 segundo, para a velocidade de fluido 0,3 ms^{-1} , para os diferentes ângulos, figura 6.13 e 6.14, com direção e sentido do fluido da figura 6.11 e foram consideradas para todas as simulações.

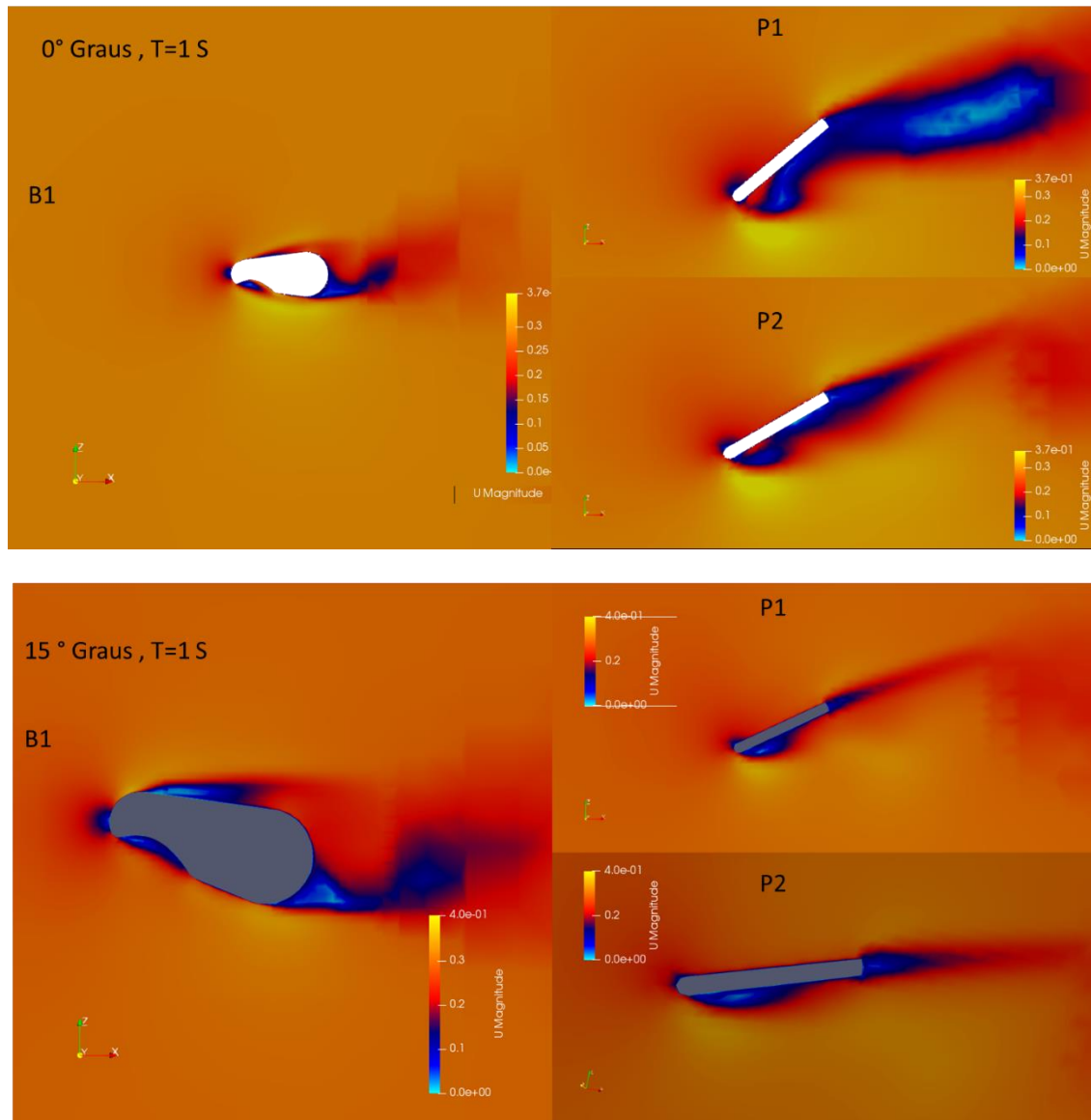


Figura 6.13. Velocidade (ms^{-1}) para as pás P1, P2 e B1 para 1 s, para os ângulos 0° a 15° .

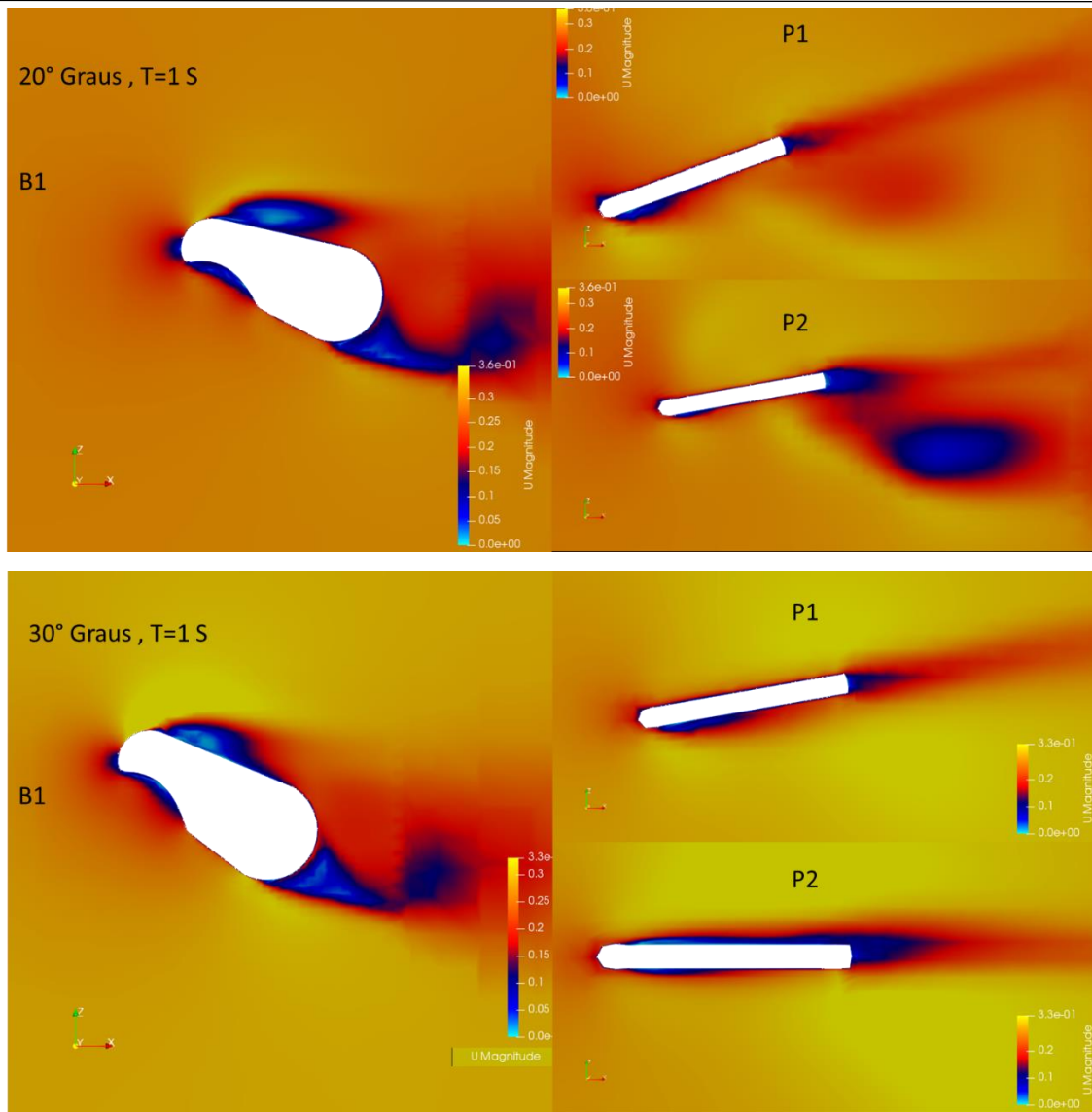


Figura 6.14. Velocidade (ms^{-1}) para as pás P1, P2 e B1 para 1 s, para os ângulos 20° e 30° .

Nas figuras anteriores, verifica-se a diferença do comportamento do fluido nas diferentes seções do protótipo. As zonas azuis são as zonas de menor velocidade e as vermelhas as zonas de maior velocidade.

Deve-se também analisar as linhas de fluxo do fluido no dispositivo, figura 6.15 e 6.16.

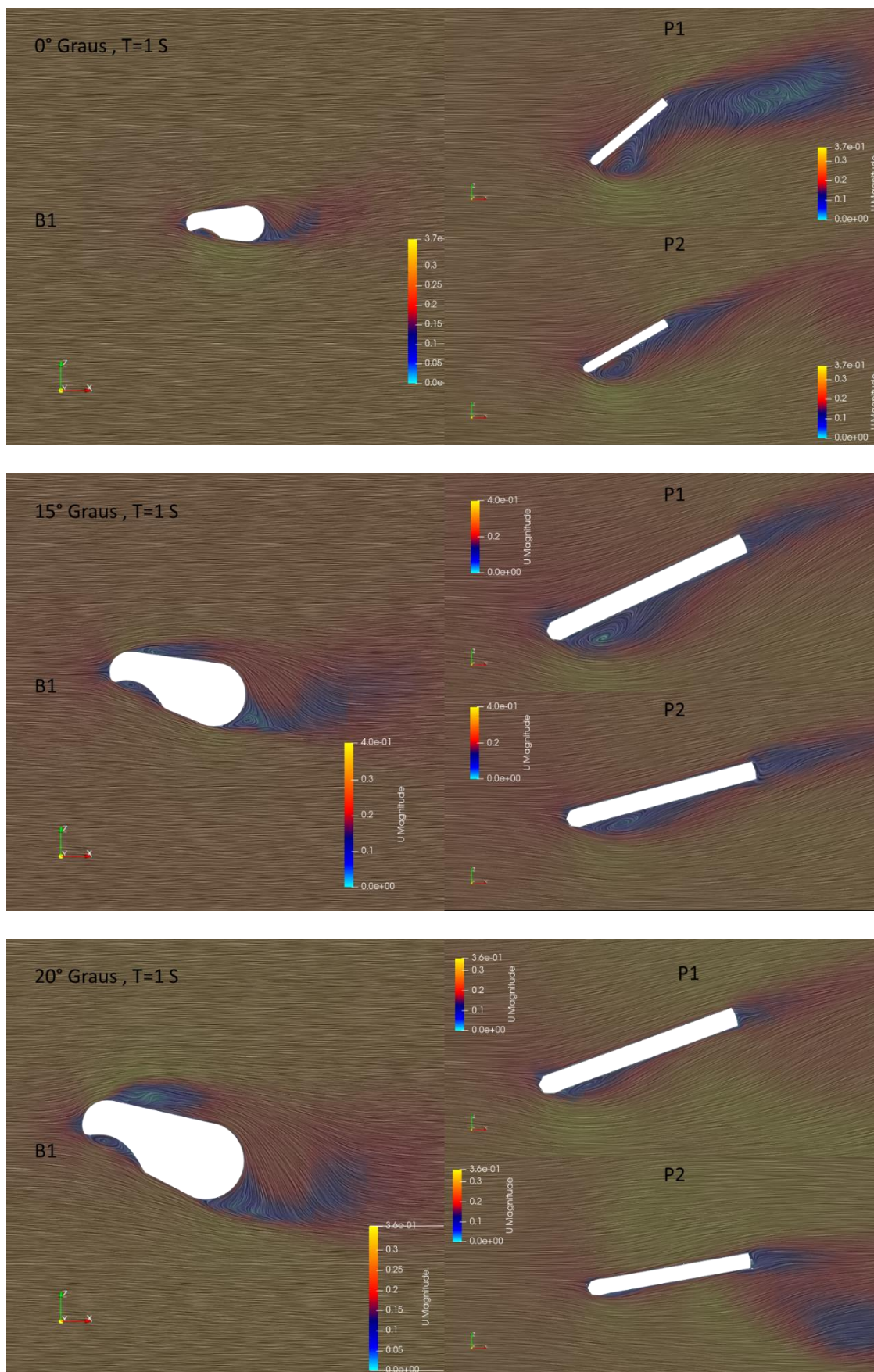


Figura 6.15. Linhas de fluxo do fluido, para o ângulo 0°, 15° e 20°, velocidade em ms^{-1} .

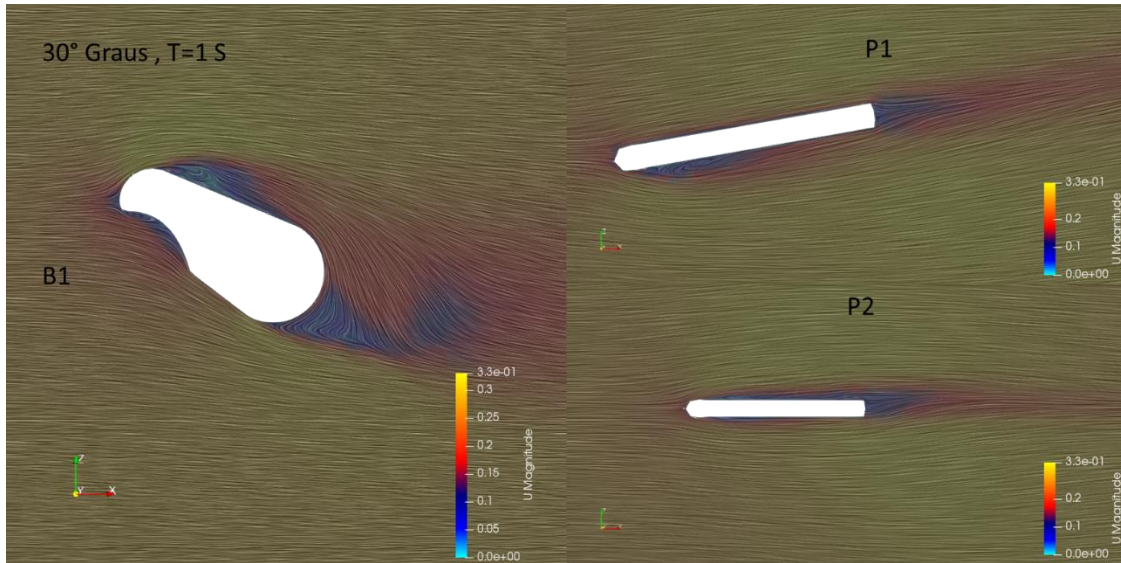


Figura 6.16. Linhas de fluxo do fluído para o ângulo 30°, velocidade em ms^{-1} .

Como exemplo, figura 6.17, passagem do fluxo no protótipo.

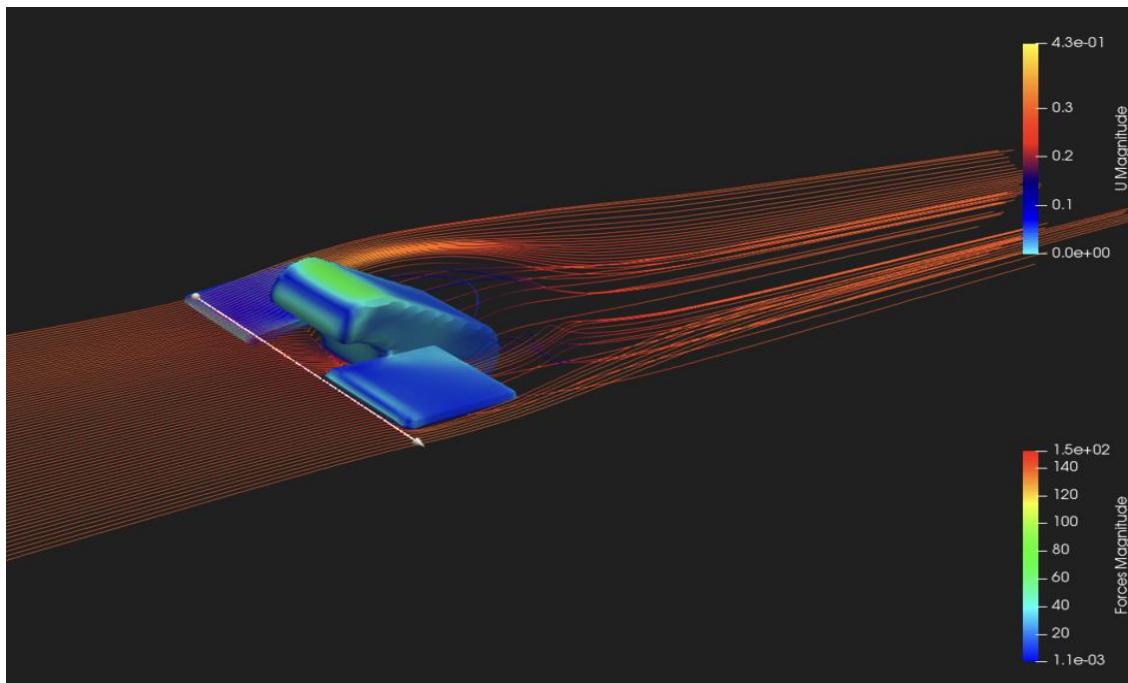


Figura 6.17. Linhas do fluxo que atravessa o protótipo, para 30° e $0,3 \text{ ms}^{-1}$. A visualização dos dados (é utilizado o software paraView), permite identificar as zonas de maior e menor velocidade assim como as zonas de maior e menor pressão do fluído. Na figura 6.17, verifica-se as zonas onde estão concentradas as forças no protótipo, no instante 1 s.

A figura 6.18 apresenta os resultados da força de sustentação (F_L) e F_D para as simulações realizadas em função da alteração do ângulo e da velocidade.

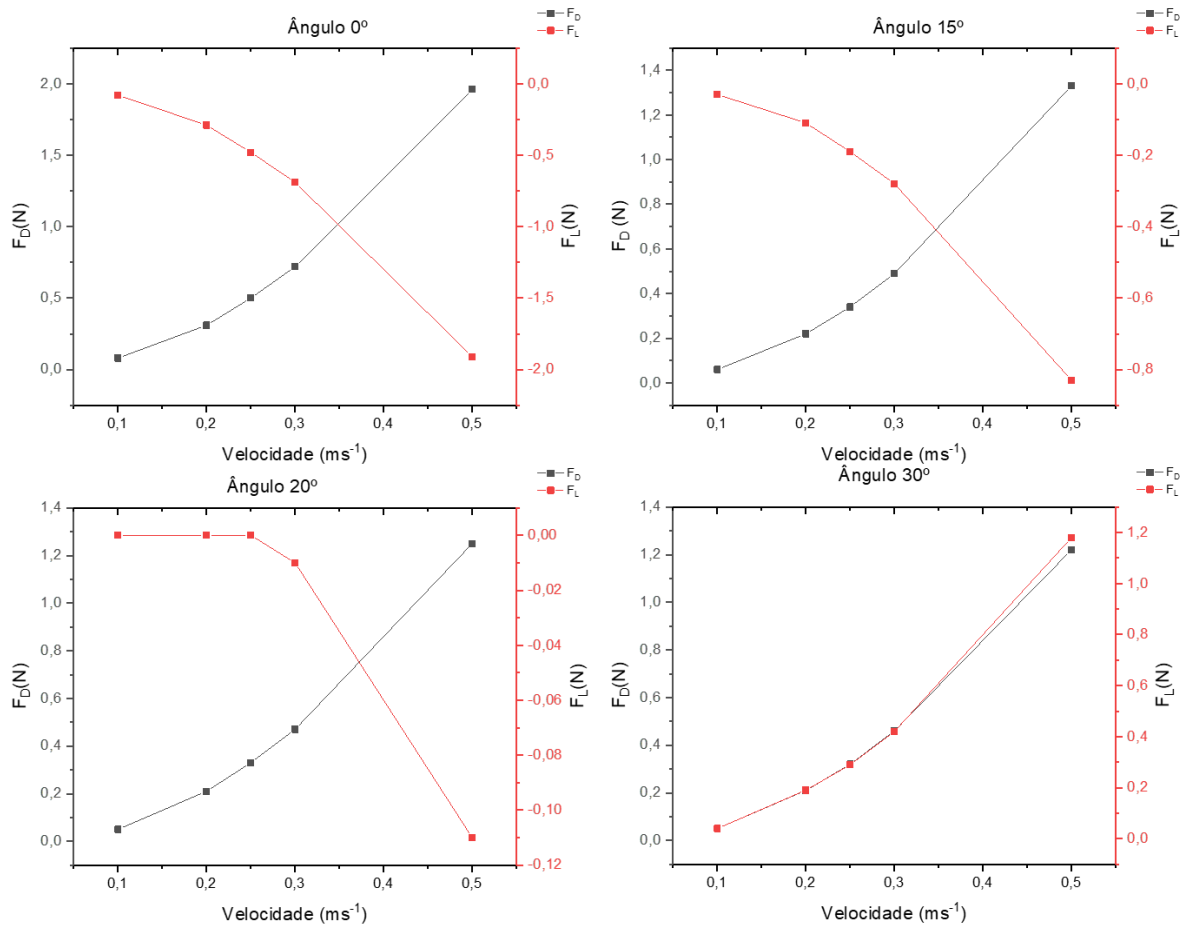


Figura 6.18. Valores de F_L e F_D .

Com base nos gráficos anteriores, pode-se observar que, para ângulos de incidência de 0°, 15° e 20°, a força de sustentação apresenta-se bastante reduzida ou negativa. Essa informação é relevante, uma vez que foi utilizada no cálculo da massa do protótipo. Já no gráfico correspondente a 30°, é possível notar a presença de uma força de sustentação positiva, possivelmente devido à sua proximidade com os ângulos escolhidos para as pás laterais, que são de 30,1° e 39,5°. É de destacar que esse valor positivo terá influência na análise do cálculo da massa.

Com o objetivo de promover o movimento do dispositivo através do F_D , com início na posição de 0°, é esperado que o dispositivo se posicione em ângulos sucessivamente diferentes, mantendo-se a velocidade de simulação. Para analisar esta alteração, analisemos os valores de F_D e F_L para 0,3 ms^{-1} com a variação do ângulo, a partir do gráfico da figura 6.19.

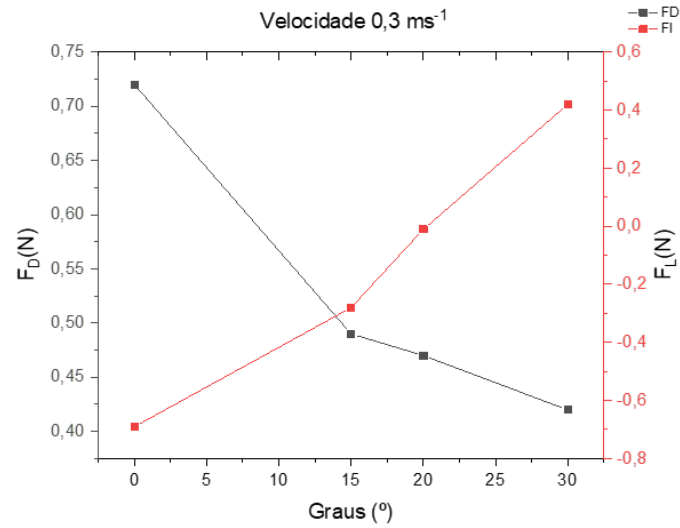


Figura 6.19. Valores de F_D e F_L para $0,3 \text{ ms}^{-1}$ para os ângulos 0° , 15° , 20° e 30° .

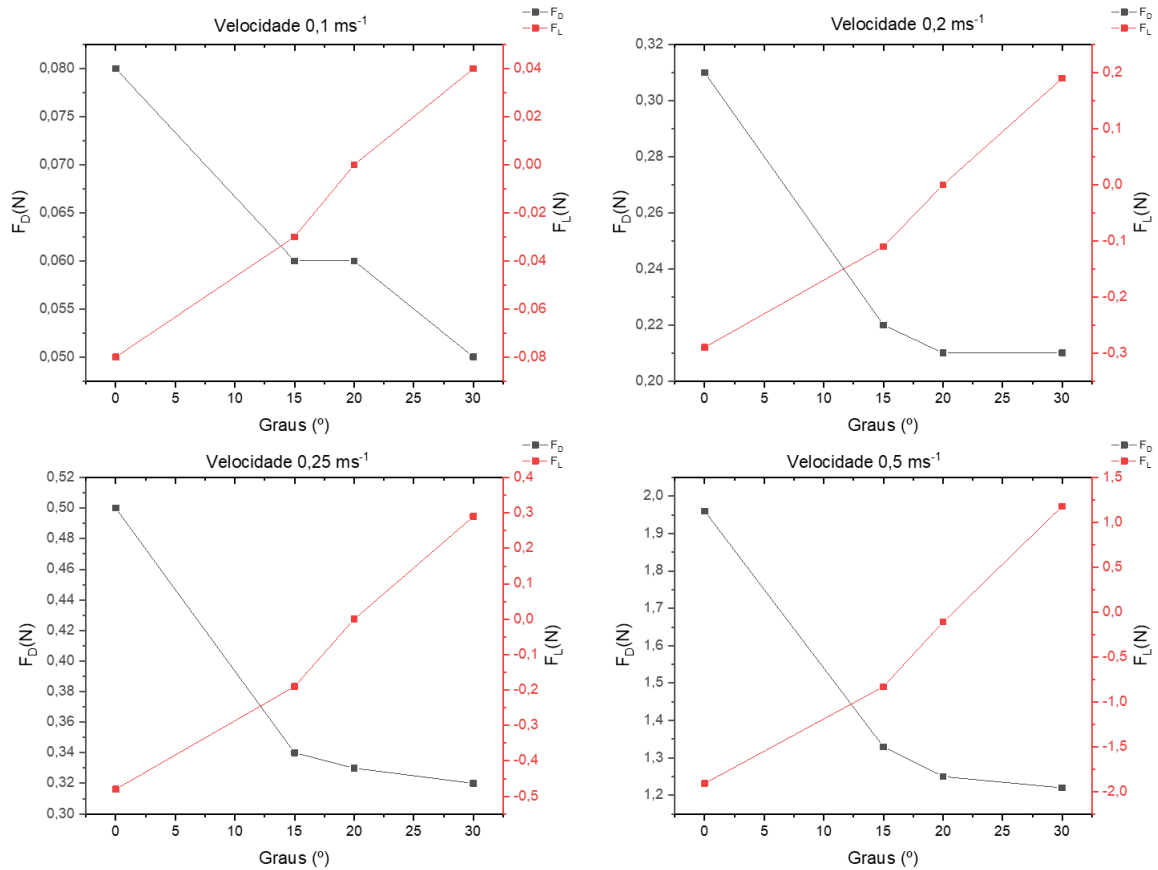


Figura 6.20. Velocidades constantes de $0,1$, $0,2$, $0,25$ e $0,5 \text{ ms}^{-1}$, com ângulos diferentes.

Do gráfico da figura 6.19, o dispositivo na sua posição equilíbrio, está sujeito a uma maior força F_D , início de movimento. Ao atingir as posições de 15° , 20° e 30° as forças de arrasto vão decrescendo. Os valores evidenciam que para o cálculo da massa foi necessário ter em conta a

situação mais desfavorável, que é aos 30° graus, para esta velocidade. Verifica-se que F_D aumenta, pelo que pode significar a necessidade de adicionar uma massa maior ao protótipo, em concordância com F_D . Esta tendência deve ser analisada para as outras velocidades, figura 6.20.

Deve-se analisar os resultados obtidos para os ângulos negativos. Figura 6.21, valores para 0,3 ms⁻¹.

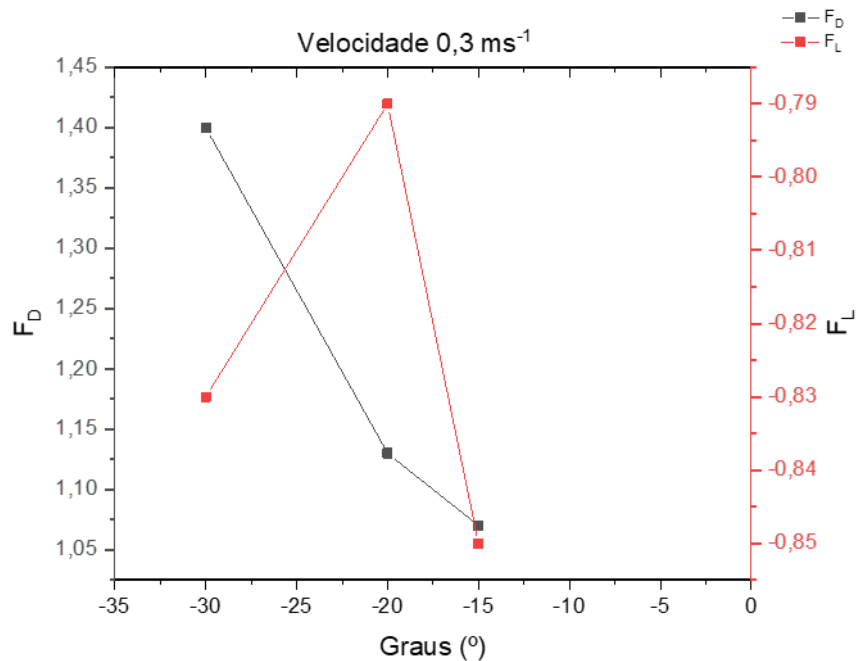


Figura 6.21. Valores de F_D e F_L para 0,3 ms⁻¹ para os ângulos -15°, -20° e -30°.

Na figura 6.22, estão representados os valores de F_D e F_L para os diferentes ângulos negativos em função da velocidade.

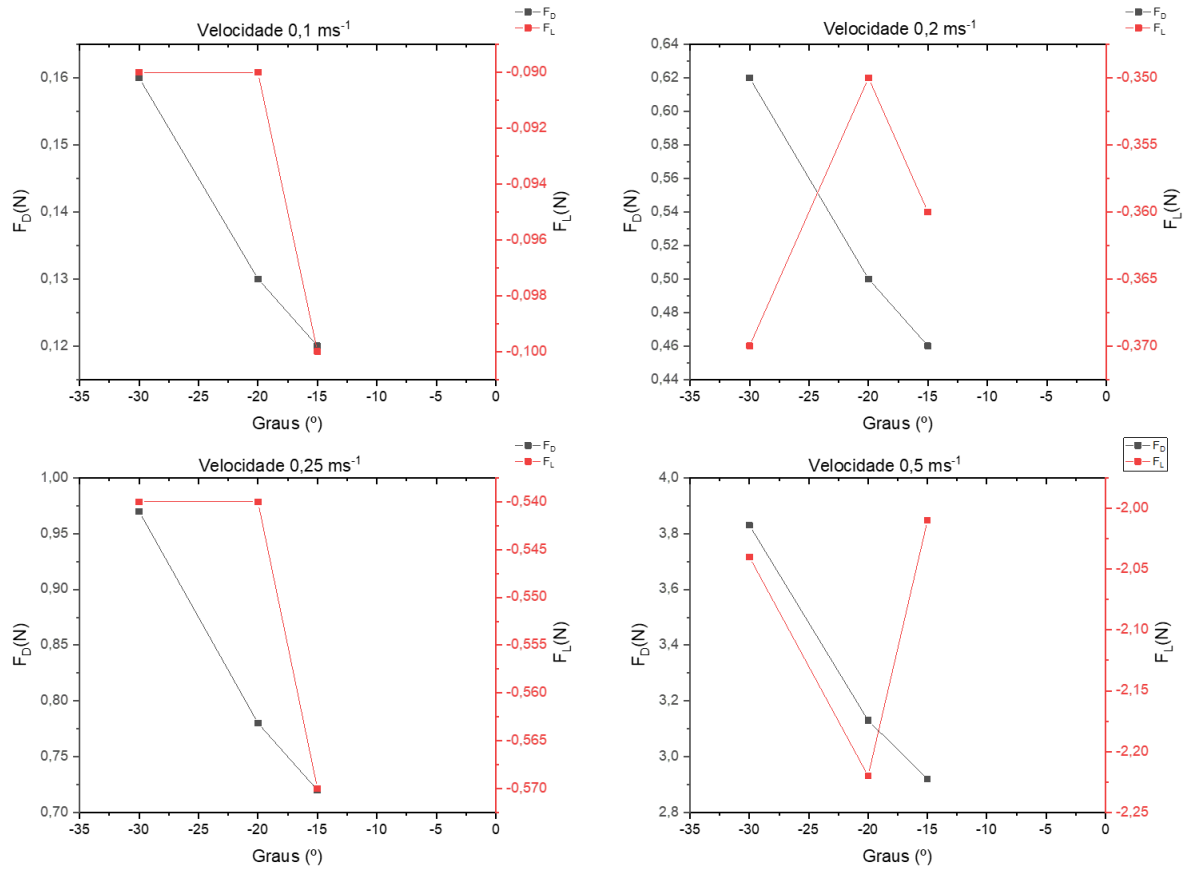


Figura 6.22. Velocidades constantes com alteração do ângulo negativo.

O comportamento do F_L , para os ângulos negativos é diferente dos ângulos positivos.

A partir dos gráficos e valores obtidos, foi possível calcular a massa do dispositivo, porém não se podem obter informações relativas à existência de alguma oscilação no dispositivo.

Para avaliar se no dispositivo é provocada alguma oscilação, foi analisado o comportamento do coeficiente de sustentação, conforme já mencionado anteriormente neste capítulo. Na figura 6.23, é possível observar os valores de C_L obtidos nas simulações anteriores, considerando uma velocidade constante de $0,3 \text{ ms}^{-1}$ e alteração do ângulo.

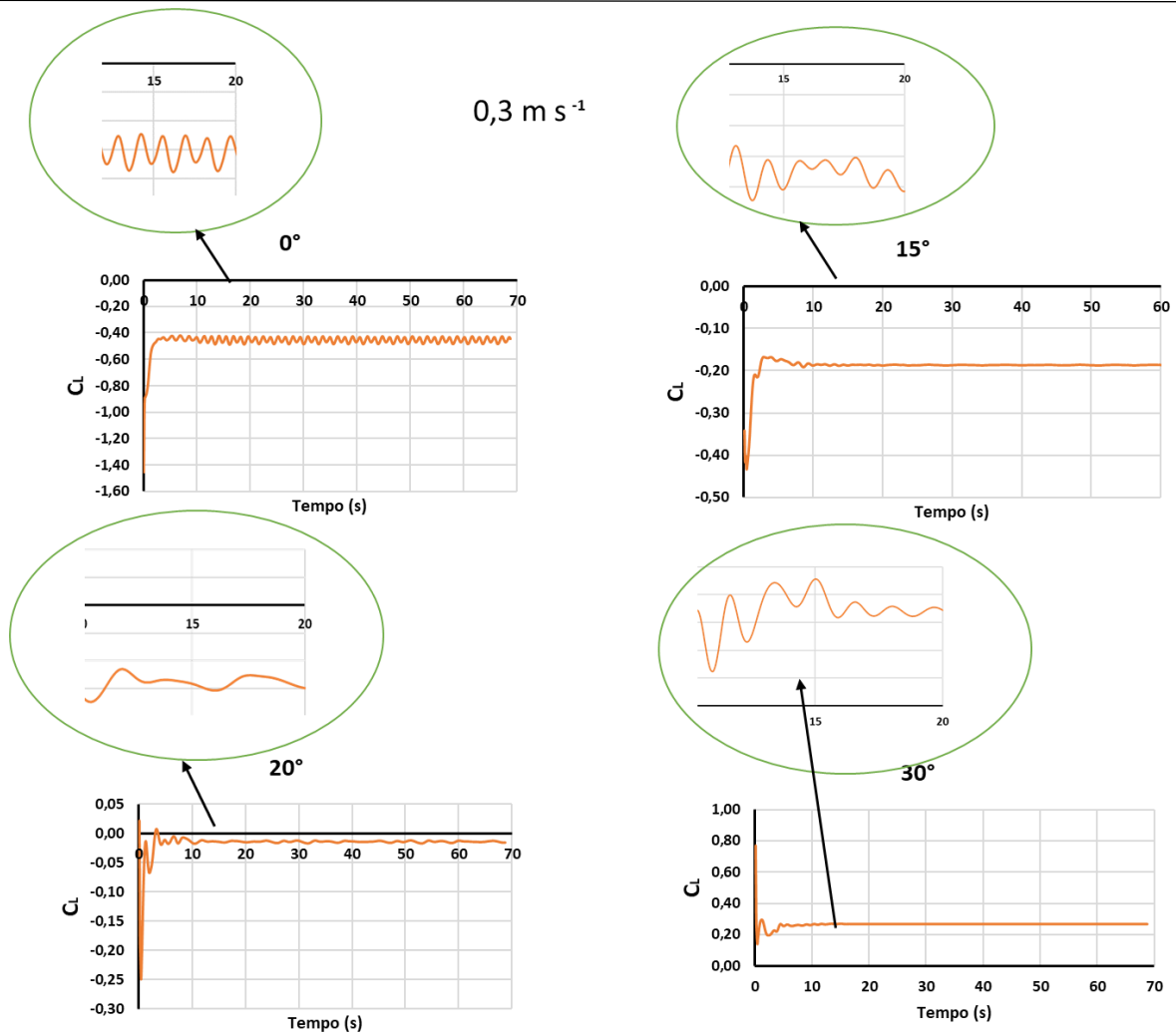


Figura 6.23. Valores de C_L para os ângulos de 0° , 15° , 20° e 30° . Velocidade de simulação de $0,3 \text{ ms}^{-1}$.

Verificou-se a ocorrência de uma pequena oscilação no dispositivo, com maior amplitude nos ângulos de 0° , 15° e 20° , e menor amplitude no ângulo de 30° . Outras simulações foram realizadas com diferentes valores de velocidade, tendo em vista que o coeficiente de sustentação também influencia o cálculo da massa do protótipo.

Da mesma forma foi analisado o C_L para a mesma velocidade de $0,3 \text{ ms}^{-1}$ com ângulos negativos, de forma a identificar estas pequenas oscilações no protótipo, figura 6.24.

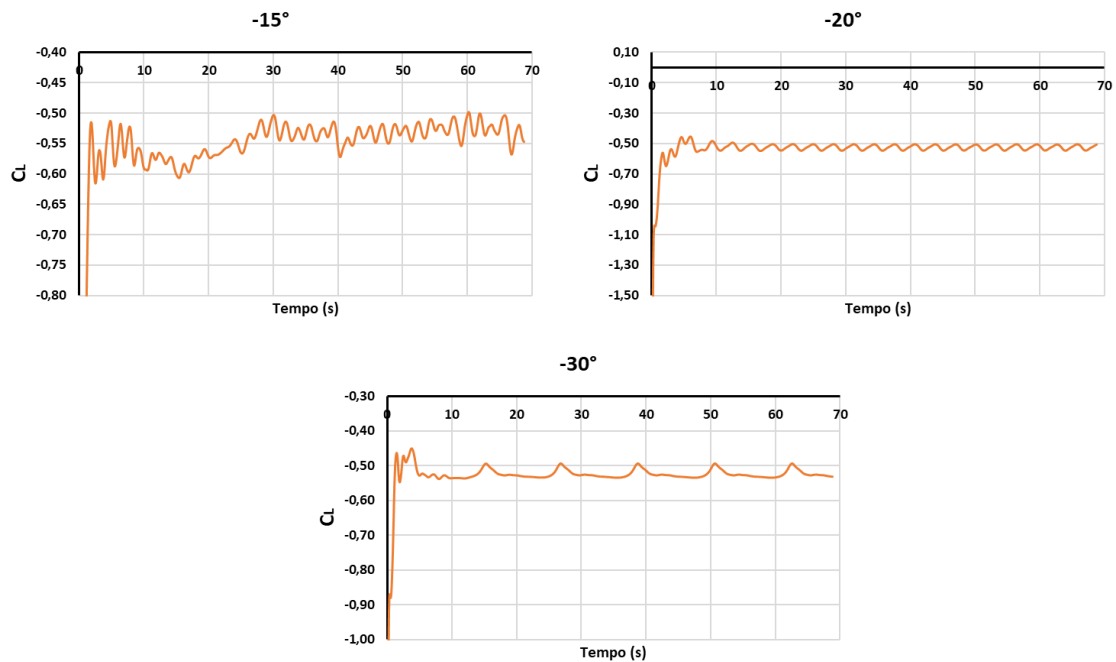


Figura 6.24. Valores de C_L para os ângulos de -15° , -20° e -30° . Velocidade de simulação de $0,3 \text{ ms}^{-1}$.

Dos gráficos anteriores, verificou-se que existem pequenas oscilação. No entanto estas pequenas oscilações irão promover alterações na força F_L . Para ângulos negativos, principalmente para -15° , a oscilação é superior do que para os ângulos positivos. Foram efetuadas simulações para restantes velocidades no intuito de se verificar se também existiam estas pequenas oscilações (gráficos no Anexo III).

É importante evidenciar que há valores de força de sustentação negativos, o que significa que a direção da força é na direção ao solo e não para a superfície do mar. Em velocidades baixas, quando o dispositivo se encontra na sua posição de equilíbrio, o coeficiente de força de arrasto obtido nas simulações é baixo, podendo não ser suficiente para movimentar o protótipo caso ele não esteja próximo da flutuabilidade neutra. Dessa forma, foi necessário analisar os dados para se poder calcular a massa adequada para o dispositivo quando submerso.

6.4 Cálculo da massa

Foi determinado no capítulo 4 o ângulo mínimo para qual existe o deslocamento do magneto para produzir energia, aproximadamente 10° .

Considerando os valores de F_D obtidos para cada um dos ângulos e utilizando o ângulo dos 15° como ângulo mínimo que o protótipo deve atingir, calculou-se os valores de peso que permite o protótipo movimentar-se.

Na tabela 6.2, estão os valores dos gráficos anteriores que permitem relacionar os valores de F_L e F_D com o peso admissível para que haja movimento do protótipo.

Tabela 6. 2. Valores das forças obtidas na simulação numérica.

Ângulo	Força (N)	Velocidade (ms^{-1})					F_L
		0,1	0,2	0,25	0,3	0,5	
-30°	F_D	0,16	0,62	0,97	1,4	3,83	<0
	F_L	-0,09	-0,37	-0,54	-0,83	-2,04	
-20°	F_D	0,13	0,5	0,78	1,13	3,13	<0
	F_L	-0,09	-0,35	-0,54	-0,79	-2,22	
-15°	F_D	0,12	0,46	0,72	1,07	2,92	<0
	F_L	-0,1	-0,36	-0,57	-0,85	-2,01	
0°	F_D	0,08	0,31	0,5	0,72	1,96	<0
	F_L	-0,08	-0,29	-0,48	-0,69	-1,91	
15°	F_D	0,06	0,22	0,34	0,49	1,33	<0
	F_L	-0,03	-0,11	-0,19	-0,28	-0,83	
20°	F_D	0,05	0,21	0,25	0,47	1,25	<0
	F_L	0	0	0	-0,01	-0,11	
30°	F_D	0,05	0,21	0,32	0,46	1,22	>0
	F_L	0,04	0,19	0,29	0,42	1,18	

Verificou-se que todos os ângulos exceto o de 30°, o valor de F_L é negativo. Para efeitos do cálculo da massa, significa que esta força está a impulsionar o protótipo para o solo do oceano. Considerando que se pretende evitar que o protótipo flutue, é possível adicionar ou subtrair essa força no cálculo da massa, dependendo do valor necessário.

No caso do ângulo de 30°, o F_L é positivo, significa que a força de sustentação impulsiona o protótipo para superfície do mar. A esta força será necessário adicionar um peso de forma que se obtenha o valor da massa pretendida.

Para o cálculo desse valor, algumas simplificações são necessárias. O protótipo estará suspenso por meio de um cabo e serão considerados os valores F_D das simulações. O volume do protótipo considerado nas simulações corresponde a $0,001485 \text{ m}^3$, e considerando a massa volúmica média da água do mar de 1025 Kg m^{-3} , a força de impulsão obtida pelo deslocamento do volume de água salgada corresponde a $14,93 \text{ N}$. Esta força é determinada com base na equação $F_{in} = \rho_{h2o} g V_p$, em que ρ_{h2o} é a massa volúmica da água salgada, g corresponde ao valor da aceleração da gravidade ($9,81 \text{ ms}^{-2}$) e V_p representa o volume do protótipo, que é equivalente ao volume de água deslocada.

Caso o peso total do protótipo seja superior a $14,93 \text{ N}$, o corpo não terá capacidade de

flutuar. É crucial destacar que, uma vez que a meta é utilizar uma força reduzida F_D para possibilitar o movimento do protótipo, é essencial que o peso total submerso não ultrapasse significativamente esse valor tendo em atenção os valores de F_L .

Se o protótipo possuir flutuabilidade neutra, ou seja, o peso do volume deslocado ser igual ao peso do protótipo, uma pequena força será capaz de promover seu deslocamento, mas o corpo não irá voltar à sua posição inicial, o que impedirá o movimento necessário para o deslocamento do magneto dentro do tubo de acrílico.

A utilização de um material no corpo do protótipo, que permita que o seu peso seja inferior à força de impulsão, irá permitir que dispositivo flutue e uma tensão será aplicada no cabo de fixação, aumentando proporcionalmente à sua flutuabilidade. Se a flutuabilidade for baixa, o dispositivo poderá ser facilmente arrastado e, eventualmente, não será capaz de recuperar a sua posição de equilíbrio, como ocorre na flutuabilidade neutra. Por outro lado, se a flutuabilidade for alta, a tensão no cabo pode tornar-se excessivamente elevada e o movimento do protótipo pode ser insuficiente para o seu adequado funcionamento.

É fundamental que o protótipo possua peso superior à força de impulsão, contudo sem que este peso seja excessivamente elevado, de forma a evitar a necessidade de uma força considerável para movimentar o dispositivo.

Através da expressão 67, pode ser calculado o valor de F_D utilizando o C_D e as velocidades das simulações, possibilitando assim uma primeira aproximação do valor do peso do protótipo, tendo em atenção à análise dos ângulos.

$$F_D = \frac{1}{2} \rho_{h20s} V^2 A_c C_D \quad (67)$$

Onde, V é velocidade do fluido e A_c é a área frontal em contacto com o fluido. Como nas simulações foi previsto o cálculo de F_D , foram considerados estes valores para o cálculo do peso necessário ao funcionamento eficiente do protótipo.

De acordo com as simplificações mencionadas previamente, obteve-se os valores do peso do corpo, em função da inclinação, F_D e velocidade das simulações. Tratando-se de um corpo inclinado suspenso por um cabo, para ângulos superiores a 0° graus o seu peso foi calculado por:

$$\tan(\vartheta) = \frac{\sum_{i=0}^n p_i n_i S - wallShearStress}{P} \quad (68)$$

Onde P , é o valor do peso que se pretende, ϑ ângulo, p_i pressão, n_i a normal, S a área de contacto da célula individual e as tensões superficiais (*wallShearStress*). O numerador é o F_D obtido nas simulações em função das velocidades, ângulos e C_D .

Pretendeu-se calcular o peso em função de F_D , considerando a situação mais desfavorável. Numa primeira aproximação, admite-se que o peso do protótipo na água salgada é de 1 N, o que

significa que todo o material que for usado no protótipo com diferentes massas volúmicas não deverá ultrapassar uma massa de 0,102 kg.

Não é um peso excessivo e eventualmente recupera a sua posição de equilíbrio permitindo assim um melhor controlo dos vários materiais com massas volúmicas diferentes na construção do protótipo.

Com a expressão 67, e como referência o ângulo que se pretende que o protótipo alcance, 15° , obtém-se um valor de uma força que iremos comparar com os valores de F_D das simulações. O valor obtido para o peso de 1 N e um deslocamento de 15° é de 0,268 N.

Analisando a tabela 6.2, não considerando ainda para esta análise o F_L , confirmou-se que este valor do peso permite o movimento para a maior parte das situações.

O protótipo, após análise da tabela 6.2, também evidencia algumas limitações no que diz respeito à sua funcionalidade em determinadas condições. De facto, constatou-se que a velocidade mínima de funcionamento do dispositivo é de $0,2 \text{ ms}^{-1}$, uma vez que valores de F_D inferiores a 0,268 N dificultam o seu desempenho. Essas limitações foram evidentes para os ângulos de posicionamento do protótipo de 15° , 20° e 30° .

Importa salientar que o valor de F_L assumiu um papel preponderante nesta análise. Em particular, se o valor de F_L for negativo, este valor será adicionado ao peso do dispositivo. Por outro lado, caso o valor de F_L seja positivo, terá de ser considerada uma solução construtiva adequada para garantir que o protótipo não flutue. Neste contexto, considerou-se o maior valor de F_L em módulo para a velocidade de $0,3 \text{ ms}^{-1}$ para a posição -15° (tabela 6.2). Obteve-se assim um valor de 0,85 N que, somado ao peso de 1 N, resulta numa força de 0,48 N. Recorrendo à tabela anterior, constatou-se que o valor de F_D para estes parâmetros é de 1,07 N. O protótipo na posição de 15° pode movimentar-se até uma posição aproximada de 30° , considerando o ângulo constante do protótipo ao longo do movimento ideal.

No que se refere às considerações construtivas, é possível usar materiais de massa volúmica reduzida para o caso em que o valor de F_L negativo seja demasiado elevado, de forma alcançar o peso pretendido para o protótipo.

No que se refere aos valores de F_L positivos, é necessária uma análise mais aprofundada. Caso o valor de F_L seja superior ao peso do protótipo, isso indica que, nas configurações angulares e velocidades em questão, o protótipo irá flutuar. De acordo com a tabela 6.2, este fenómeno ocorreu no protótipo para as velocidades de 0,25, 0,3 e $0,5 \text{ ms}^{-1}$ e para um ângulo de 30° .

Existem duas possibilidades construtivas para evitar essa situação. A primeira opção é aumentar a massa do protótipo, mas implica uma alteração nos valores anteriores e condiciona os ângulos que podem ser atingidos pelo protótipo. Por exemplo, para um F_L de 1,18 N num ângulo de

30°, seria necessário aumentar o peso em 1 N, resultando um peso final de 2,18 N. Além disso, para se deslocar até um ângulo de 15° a $0,5 \text{ ms}^{-1}$ é necessário um F_D de 0,81 N, o que limitaria as opções de funcionamento do protótipo.

A segunda opção consiste em não aumentar a massa do protótipo para evitar a força de impulsão, mas sim considerar o peso já selecionado, 1,0 N. Neste caso, consultando a tabela 6.2, o exemplo mais extremo para F_L é 1,18 N, resultando assim uma força de impulsão de 0,18 N, o que não terá um impacto significativo, mas será uma limitação nesta posição e velocidade.

Do ponto de vista construtivo, é fundamental garantir que o dispositivo não flutue. Para isso, o protótipo foi equipado com um limitador (cabo elástico) que não apenas impede que o dispositivo rode, mas também restringe a sua flutuação quando estiver na posição de 30°.

6.5 Resumo

Foram realizadas e analisadas duas simulações distintas, a primeira com velocidades constantes e a segunda com ângulos constantes. A primeira simulação permitiu analisar o comportamento do protótipo para a mesma velocidade, alterando apenas o ângulo, o que ocorre quando o protótipo se encontra na sua posição de equilíbrio e é impulsionado pelo fluxo, alterando, assim, a sua posição. Já a segunda simulação permitiu analisar o comportamento do protótipo para o mesmo ângulo, alterando a velocidade, o que pode ser observado devido à morfologia do solo oceânico. Através das simulações, foram obtidos os valores de F_D e F_L , que permitiram determinar o valor da massa mais adequado para a construção do protótipo, e assim identificar a necessidade de utilizar materiais com massa volúmica diferentes para regular a flutuabilidade do protótipo. Tais valores obtidos nas simulações foram considerados na construção do protótipo.

Capítulo 7

Fabrico do protótipo

Após a otimização do LEG, realização das simulações para verificar o comportamento do corpo externo do protótipo e determinação do peso que ele deverá ter quando imerso em água, procedeu-se à seleção do material e ao fabrico do protótipo para a produção de energia.

A análise do peso é um parâmetro importante no fabrico do protótipo porque terá um impacto significativo no comportamento deste, devido à sua relação direta com a força de arrasto envolvida. O processo de fabrico para alguns dos componentes, foi realizado por impressão 3D, utilizando como material o filamento de PLA.

O fabrico foi dividido em várias etapas, as quais incluíram:

- Fabrico do LEG;
- Seleção do material com base na massa volúmica;
- Fabrico dos moldes por impressão 3D;
- Revestimento do LEG de modo a garantir impermeabilidade e estanqueidade a profundidades até 10 metros (foi considerado 15 metros por questão segurança);
- Fabrico do corpo externo do protótipo;
- Fabrico do *datalogger* para aquisição de dados relacionados com tensão e aceleração;
- Fabrico da estrutura para montagem do protótipo, contendo um limitador de ângulo;
- Montagem final.

7.1 Fabrico do LEG

O fabrico já foi efetuado de forma a proceder-se aos testes laboratoriais (ver capítulo 4 e capítulo 5). No entanto, como o LEG será revestido num material que garanta a sua proteção à água e resistência até pelo menos a 1,5 bar de pressão, foi necessário adicionar um sistema de circulação do ar de forma a garantir que este não tenha impacto na velocidade do magneto. Este sistema foi colocado na proximidade dos topos do tubo do LEG (ver figura 7.1).

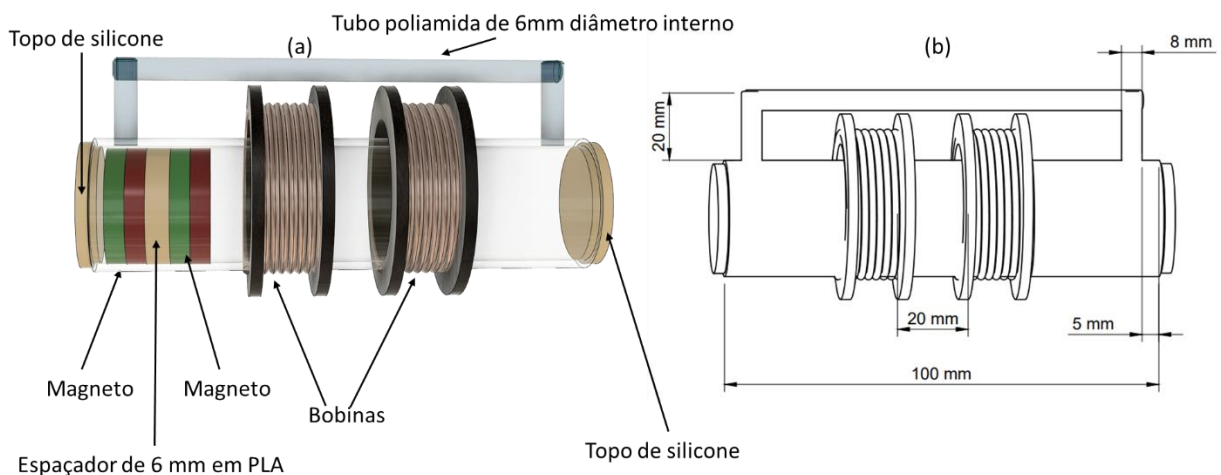


Figura 7.1. Desenho construção do LEG e os seus componentes.

Ao LEG, foram adicionados dois topos de silicone, com o objetivo de amortecer o impacto do magneto e fechar o tubo de acrílico. De salientar, que os moldes dos topos foram fabricados em

PLA numa impressora 3D (ver figura 7.2).

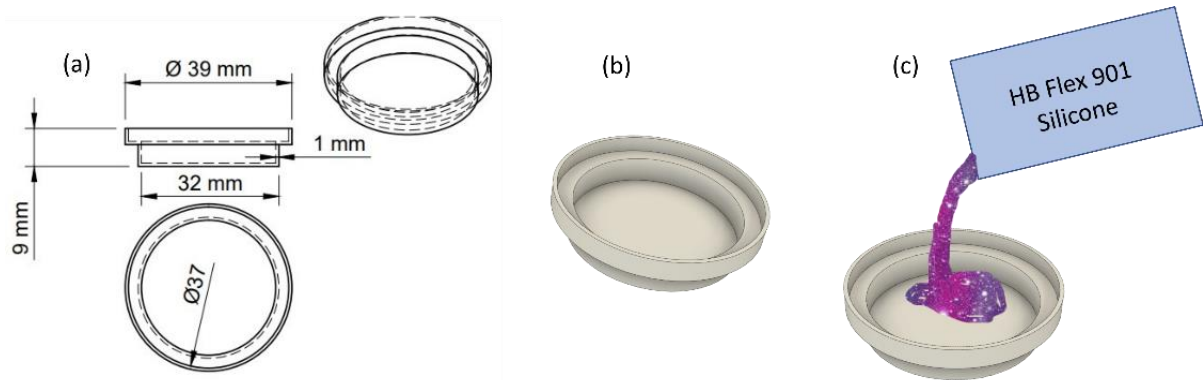


Figura 7.2. a) Desenho de fabrico, b) Ficheiro STL para fabrico, c) Fabrico topos em silicone.

O silicone empregue no fabrico dos tampos foi o HB Flex 901 de dois componentes e o seu tempo para a desmoldagem foi de 24 horas à temperatura ambiente. A altura final dos topos é de 5 mm. Outro componente que foi adicionado ao LEG, antes de se efetuar o seu revestimento são as pontes retificadoras, sendo estas fabricadas com os díodos Schottky (BAT54CL) (ver figura 7.3).

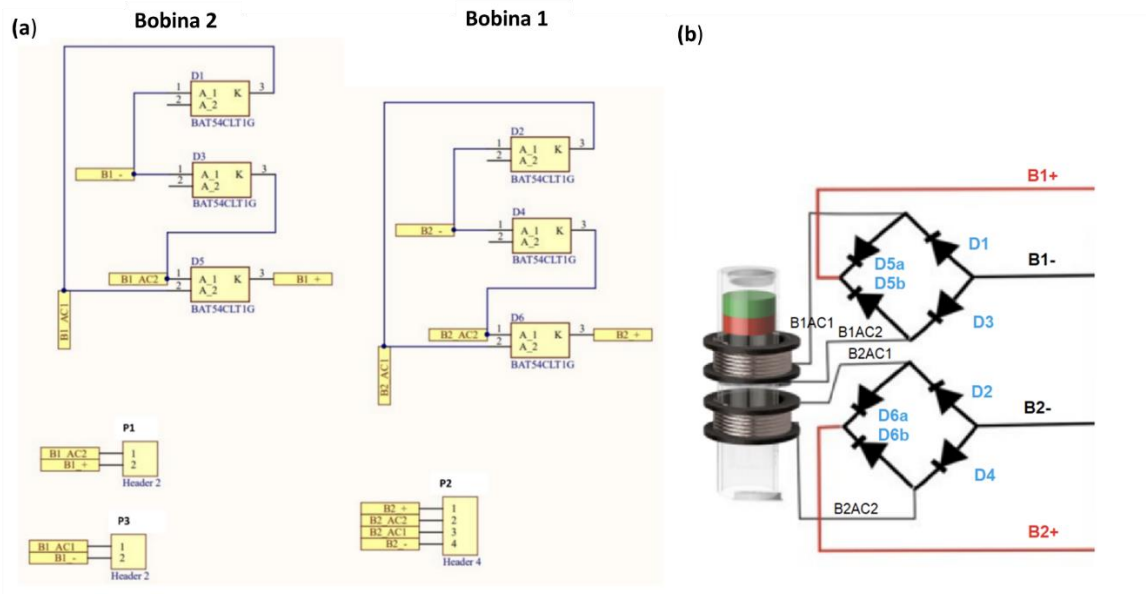


Figura 7.3. Diagrama de ligação das pontes retificadoras, uma para cada bobina. D1, D2, D3, D4, D5 e D6, são os díodos, B1AC1 e B1AC2 entrada da tensão da bobina 1, B2AC1 e B2AC2 entrada da tensão da bobina 2, B1- e B1+, saída retificada da Bobina 1, B2- e B2+, saída retificada da bobina2. a) Desenho em ferramenta CAD eletrónico, b) Esquema do circuito.

Após o fabrico das pontes retificadoras, estas foram integradas no LEG (ver figura 7.4).

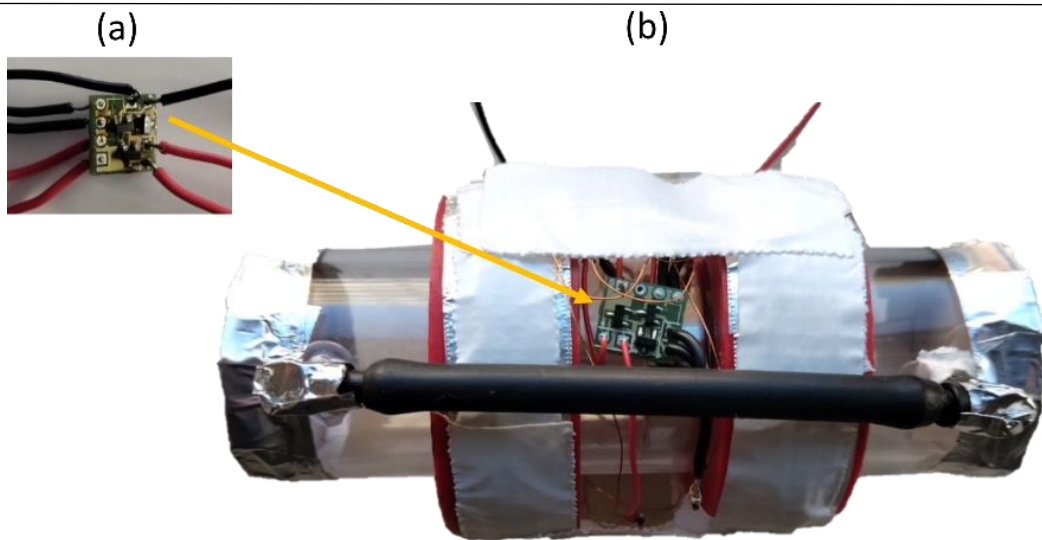


Figura 7.4. a) Ligações das duas pontes retificadoras, b) Montagem do LEG com as pontes retificadoras, tubo de circulação do ar, tampos de silicone nos topos, magnetos no seu interior com o espaçador e isolamento com fita isoladora.

Após a montagem final, foi verificado que o LEG ficou com uma massa de 378 gramas.

De salientar, que o tubo de acrílico utilizado, de acordo com a especificação do fabricante tem uma capacidade de suportar pressões até 3 bar, pelo que está dentro dos parâmetros pretendidos.

Por forma a garantir uma resistência a um eventual impacto, revestiu-se o LEG com 10 mm de poliuretano. Considerando o diâmetro da bobina com 48 mm, o revestimento final ficou com um diâmetro de 68 mm.

O material a ser usado deveria ser tal que, o LEG permanecesse próximo da flutuabilidade neutra. Esta condição permitiria que se eventualmente fosse necessário alterar o valor das massas, fosse feito no corpo externo do LEG e não neste, embora fosse admissível uma pequena diferença de massa, que foi estabelecido como um valor máximo de 50 gramas.

Para revestir o LEG, foi necessário fabricar uma cápsula por impressão 3D com 2 mm de espessura de parede e camadas de 0,3 mm, utilizando o material PLA (ver figura 7.5).

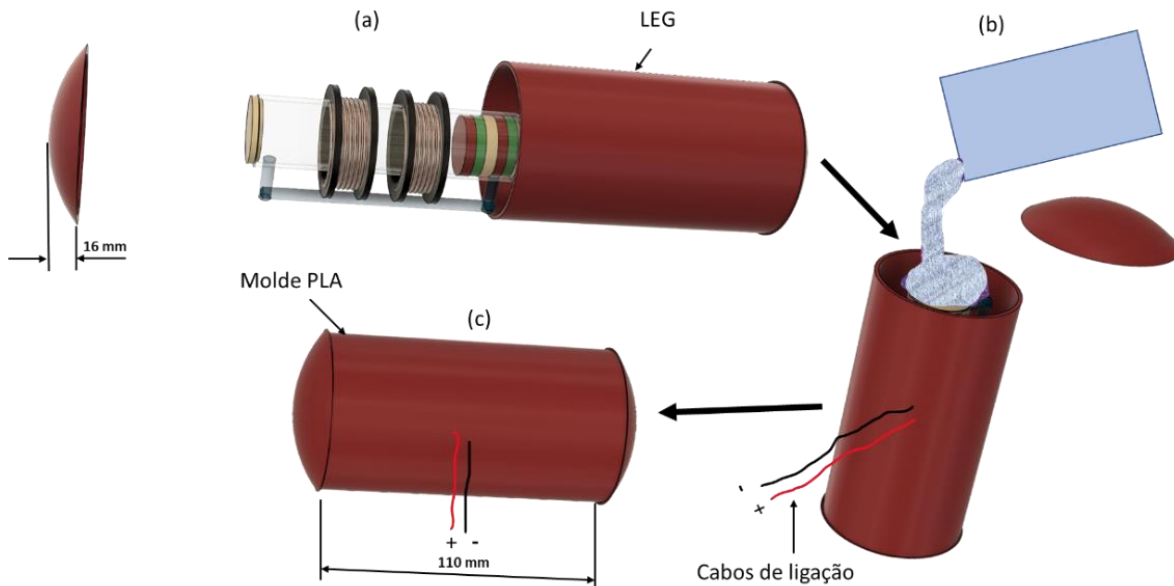


Figura 7.5. a) Cápsula em PLA para colocação do LEG, b) Material de encapsulamento do LEG, c) Montagem final com a fixação dos topos com o mesmo material de revestimento.

Como existiam outros componentes que faziam parte do protótipo, foi selecionado um material que permitisse reduzir o peso do LEG, quando este estivesse na água. O volume do molde do LEG é de 383 cm^3 . Considerando a massa volúmica da água do mar 1025 kgm^{-3} , então, a massa equivalente da água deslocada pelo molde é de 393 gramas. Sem o revestimento, a massa deslocada é superior à massa do LEG e corresponde a uma força de impulsão (formula no capítulo 6) de 0,147 N, ou seja, o volume do molde para o revestimento permitia que o LEG flutuasse.

A seleção do material foi efetuada de forma a garantir estanquicidade, resistência à pressão da água e que pudesse equilibrar os pesos, ou seja, deveria ter um valor de massa volúmica próximo ou inferior ao da água salgada. O material selecionado foi o poliuretano de dois componentes, designado por HB R16-25 A/B, com massa volúmica de 1100 kgm^{-3} , com capacidade de suportar pressões até 200 bar. Como a massa volúmica é superior ao que se pretende, foi efetuada uma mistura de poliuretano e microesferas de vidro de $100 \mu\text{m}$ de diâmetro, de massa volúmica de 310 kgm^{-3} , de borossilicato de cálcio e sódio. Utilizou-se a relação de mistura 1:1 e a massa volúmica final do material foi de $667,5 \text{ kgm}^{-3}$. O volume da mistura vazado no molde foi de 243 cm^3 ou seja, a sua massa é de 162,2 gramas, e proporcionando um peso de 1,59 N. Como existe uma força de impulsão de 0,147 N, na água do mar o peso do LEG com o revestimento é de 1,44 N. Este valor está acima 0,44 N do valor considerado anteriormente para todo o dispositivo, ou seja, 1 N. Não se obteve um valor que permita afirmar que o LEG tem flutuabilidade neutra, mas está dentro do valor da diferença máxima admissível que foi considerado anteriormente. Este valor foi adicionado a toda a estrutura do dispositivo que foi fabricado.

7.2 Fabrico do dispositivo externo do LEG

Após o fabrico e revestimento do LEG, foi fabricado o corpo externo de acordo com a geometria utilizada nas simulações (ver figura 7.6).

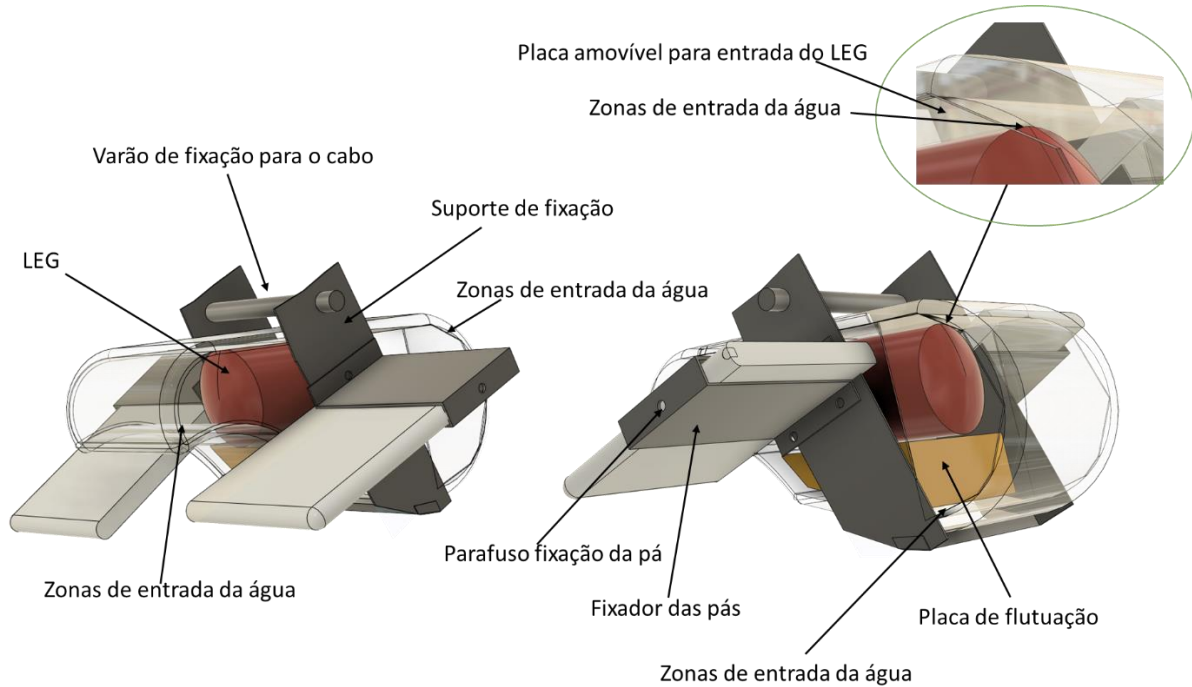


Figura 7.6. Dispositivo externo do LEG com as dimensões das simulações.

Na tabela 7.1, estão identificados as quantidades e os materiais utilizados.

Tabela 7. 1. Materiais utilizados no protótipo.

Componente	Quantidade	Material
Corpo do dispositivo	1	Placa de acrílico de 3 mm
Fixador das pás	2	Chapa de inox 316, de 0,4 mm de espessura
Suporte de fixação	1	Chapa de inox 316, de 0,4 mm de espessura
Varão roscado	1	Inox 316, M6
Parafusos	6	Inox 316, M4
Placa de flutuação	Variável	XPS, massa volúmica 42 kgm^{-3}
Pás	2	Poliuretano HB R16-25 A/B

No fabrico das pás foi utilizado o mesmo método da fabricação do molde para o LEG. Os moldes também foram fabricados em PLA, utilizando uma impressora 3D. Os parâmetros utilizados no fabrico, foram camadas de 0,3 mm e uma espessura de parede de 2 mm. Após o fabrico dos moldes das pás, estes foram preenchidos posteriormente com poliuretano. As pás foram montadas no suporte de fixação por meio de dois fixadores, ligados por três parafusos M4. A ligação entre o

fixador e a pá foi realizada através de um único parafuso M4.

O dispositivo externo do LEG foi fabricado a partir de uma placa de acrílico com uma espessura de 3 mm, sendo moldada na forma pretendida através de um processo de aquecimento com o uso de uma bomba de calor. Visando minimizar o aumento do peso do dispositivo externo, foi decidido utilizar um interior oco, permitindo assim a entrada de água do mar e, se necessário, a adição de material para ajustar a sua flutuabilidade após a inserção do LEG. Foi previsto a montagem de uma placa amovível num dos lados do dispositivo, que possibilita a entrada do LEG e a instalação de sensores para medição de tensões e acelerações. Além disso, são providenciadas aberturas nas paredes laterais do dispositivo para permitir a entrada de água e a saída do ar.

Para o cálculo do peso total do dispositivo externo na água do mar, foi necessário conhecer o volume de cada um dos componentes. Na tabela 7.2 são apresentados volumes calculados do dispositivo externo.

Tabela 7. 2. Volume dos componentes.

Componente	Quantidade	Volume (cm ³)
Corpo do dispositivo	1	202,12
Fixador das pás	2	5,76
Suporte de fixação	1	8,4
Varão roscado	1	3,39
Pás (espessura 12 mm)	2	204,0
		Total 499,3

Após o fabrico e montagem do dispositivo externo sem o LEG, o seu peso fora da água é de 14,22 N e imerso na água salgada, retirando o valor do peso da água deslocada devido ao seu volume, é de 9,32 N. O peso total do dispositivo externo com o LEG, imerso na água é de 10,76 N. Valor este muito acima de 1 N, que é pretendido. Para alterar a sua flutuabilidade foram adicionadas placas de espuma de poliestireno extrudido (XPS), com capacidade de suportar pressões até 2 bar e com uma massa volúmica de 43 kgm⁻³.

O peso da água salgada equivalente ao volume necessário deslocar pelo dispositivo de produção de energia, para que este tenha um peso 1 N é de 9,76 N, ou seja, o volume da placa de XPS a ser instalado, é de 937 cm³. Desta forma poderemos alterar a flutuabilidade do protótipo sem alterar a flutuabilidade do LEG, quer estejamos a produzir energia no mar ou no rio.

7.3 Estrutura de ancoragem e fixação do dispositivo de produção de energia.

Para efeitos de validação do funcionamento do dispositivo foi fabricado uma estrutura em varão de aço com diâmetro de 14 mm e com dimensões 900 mm de comprimento, 600 mm de largura e 800 mm de altura (ver figura 7.7).

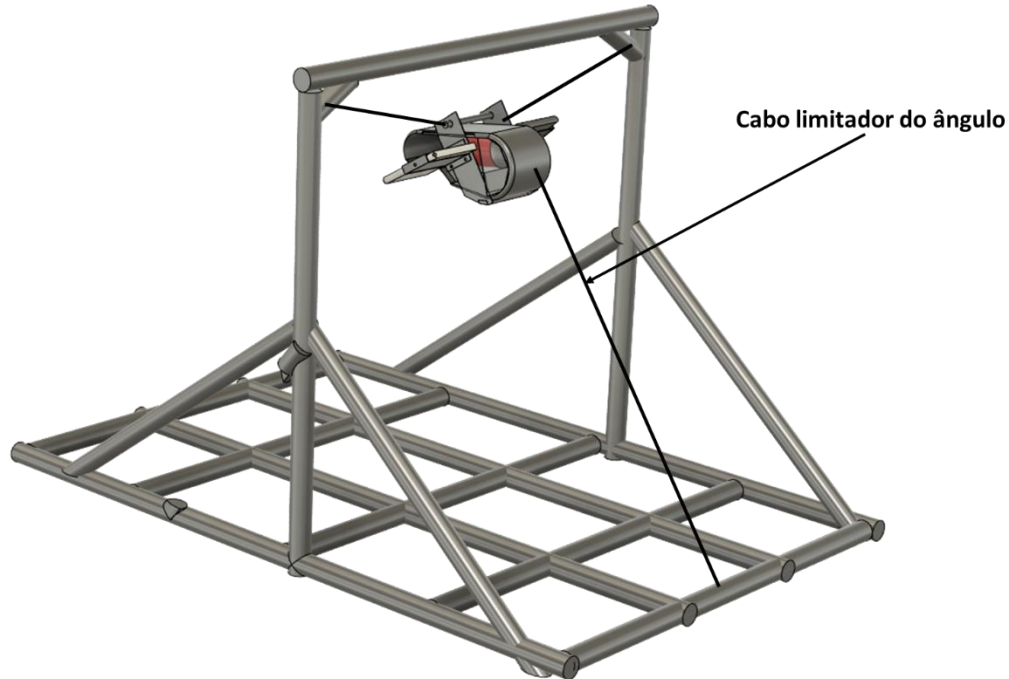


Figura 7.7. Estrutura de fixação do protótipo. Existência de dois cabos de ligação do protótipo à estrutura e um cabo limitador de ângulo.

Conforme previamente referido, foi aplicado uma restrição angular para a movimentação do dispositivo gerador de energia, através da instalação de um cabo fixado na sua parte inferior. Este sistema estrutural, além de limitar o ângulo do dispositivo, atua como mecanismo de ancoragem e permitirá o controle das condições de teste no mar, garantindo a segurança e a monitorização adequada do protótipo.

7.4 Datalogger

Para aquisição da tensão, aceleração e ângulos, foi utilizado um Arduino® Nano associado a um giroscópio IMU 6050. Também foi montado um micro SD para gravar os dados em ficheiros de 60 segundos, com 285 amostragens por segundo.

Na figura 7.8, é apresentado o esquema do sistema de aquisição dos dados.

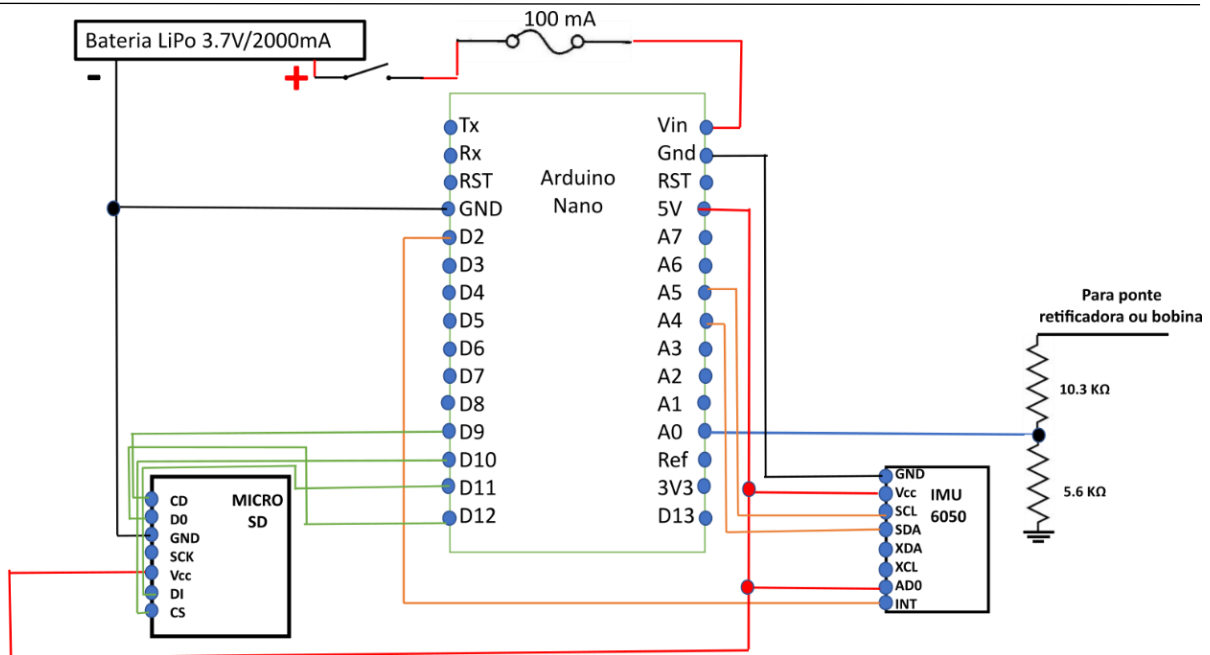


Figura 7.8. Diagrama das ligações do datalogger.

Antes da entrada A0 no Arduino®, foi colocado um divisor de tensão, de forma a garantir que não seja ultrapassado o valor limite da entrada de tensão de 5 V.

Quando é utilizada a resistência de carga, esta foi intercalada entre a ponte retificadora e entrada na porta A0. A montagem do *datalogger* foi feita de forma a garantir a sua impermeabilidade. Como foi necessária uma abertura para retirar os dados do cartão de memória assim como um interruptor, foram utilizados acessórios de PVC com vedantes. Para o *datalogger* foi utilizado um acessório roscado de 2 ¼" e de 1 ¼" para o interruptor e o conjunto diodo/condensador. Este conjunto, onde foi utilizado um diodo de 5V, foi colocado em funcionamento quando se pretendeu carregar o supercondensador de 5V/1F, garantindo assim que não fosse ultrapassado os 5 V. A existência de um interruptor no sistema, permitiu que durante as deslocções e no final dos testes, este fosse desligado. Na figura 7.9, montagem e proteção dos componentes.

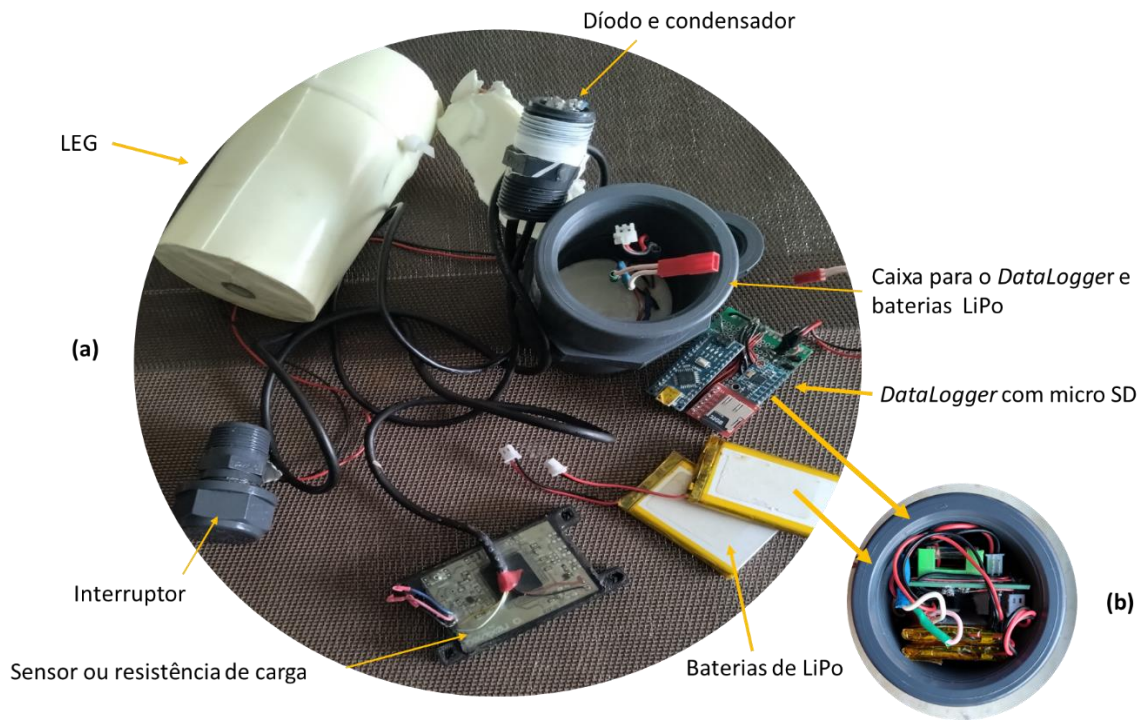


Figura 7.9. Montagem do datalogger. a) Conjunto do sistema, b) pormenor da montagem do Arduino® e baterias no corpo de PVC.

7.5 Resumo

Neste capítulo, foi apresentada uma descrição do fabrico do dispositivo desenvolvido para a produção de energia, assim como a sua estrutura. No que diz respeito ao corpo externo, foram considerados cuidados especiais relativamente aos volumes de água deslocados pelos corpos imersos e à massa volúmica do material a ser utilizado, de forma a permitir a realização de ajustes no peso do dispositivo.

Adicionalmente, na estrutura foi prevista um cabo limitador de ângulo. Foi fabricado um datalogger com base no Arduino® Nano, com o intuito de ser utilizado nos testes realizados no mar e na zona estuarina do Cávado. O programa principal inserido no Arduino está descrito no anexo IV.

Capítulo 8

Caracterização e aplicação em ambientes reais

No presente capítulo serão apresentados os resultados obtidos nos testes do mar e no rio Cávado. Os resultados são baseados no artigo, submetido na revista *Renewable Energy*, Elsevier, Faria, C.L.; Martins, M.S.; Matos, T.; Lima, R.; Miranda, J.M.; Gonçalves, L.M. “Experimental Characterization of a Low-Cost Linear Electromagnetic Generator in Submerged Nearshore Shallow Waters”.

Prevê-se que o dispositivo proposto produza energia para compensar o consumo energético dos sensores.

Este capítulo apresenta testes em ambiente real (oceano e rio em zona estuarina), com um sensor alimentado pelo gerador fabricado.

É apresentada a configuração dos testes, metodologias e localizações na costa do Oceano Atlântico no norte de Portugal e na zona estuarina do rio Cávado, seguido dos resultados alcançados.

8.1 Locais e Metodologia de teste

Conforme descrito anteriormente, embora seja possível fixar o gerador diretamente a uma âncora no leito marinho, foi desenvolvida uma estrutura de ancoragem submersa para melhor controle do posicionamento e das condições. Essa estrutura também permitiu o suporte a outros dispositivos de monitorização, como câmara e sensor de corrente, que são utilizados para caracterizar o ambiente e o comportamento do gerador, figura 8.1.

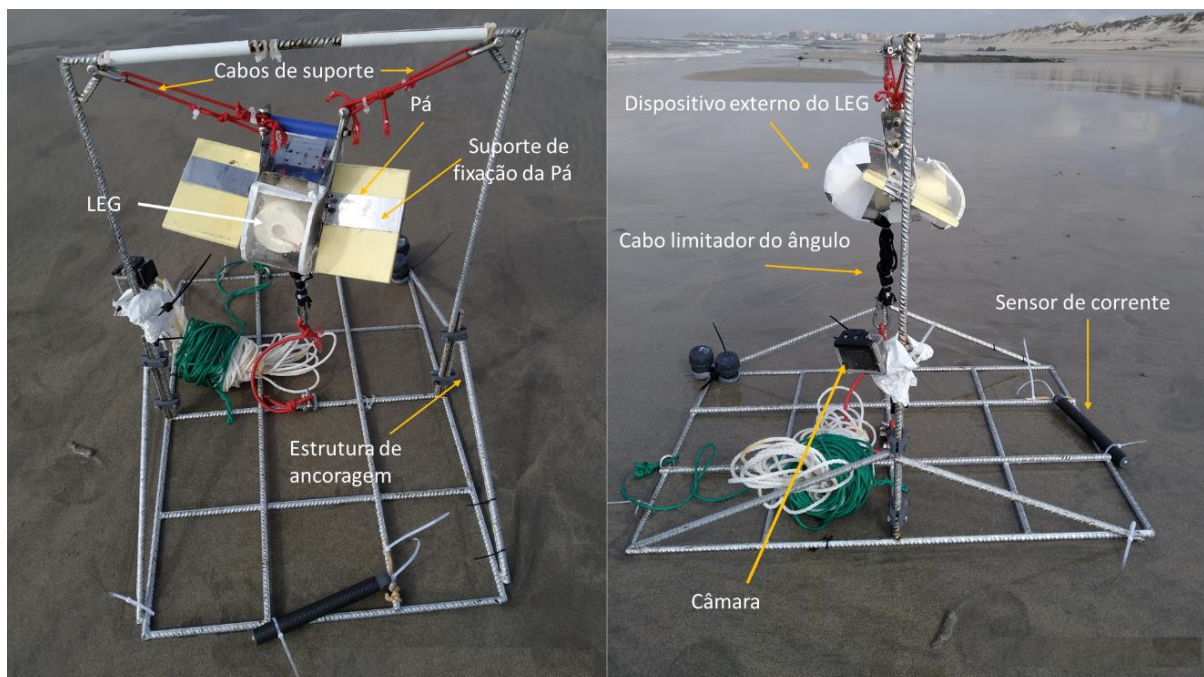


Figura 8.1. Vista frontal na imagem esquerda e vista lateral, na imagem direita. Componentes de montagem e suporte utilizados para os testes.

Utilizou-se um sensor de corrente TCM-4 da Lowell Instruments como uma ferramenta para avaliar a velocidade da água. No entanto, conforme ilustrado na figura 8.2, o uso deste dispositivo nem sempre foi viável devido às condições do mar. Várias leituras de velocidade da água não foram consideradas devido às algas marinhas ficarem presas na base da estrutura e interferirem com o funcionamento do sensor de corrente.



Figura 8.2. Base da estrutura com algas marinhas.

8.1.1 Localizações geográficas

Os testes de oceano foram realizados na localidade de Apúlia, norte de Portugal ($41^{\circ}28'27,4''N$, $8^{\circ}46'40,4''W$), figura 8.3.

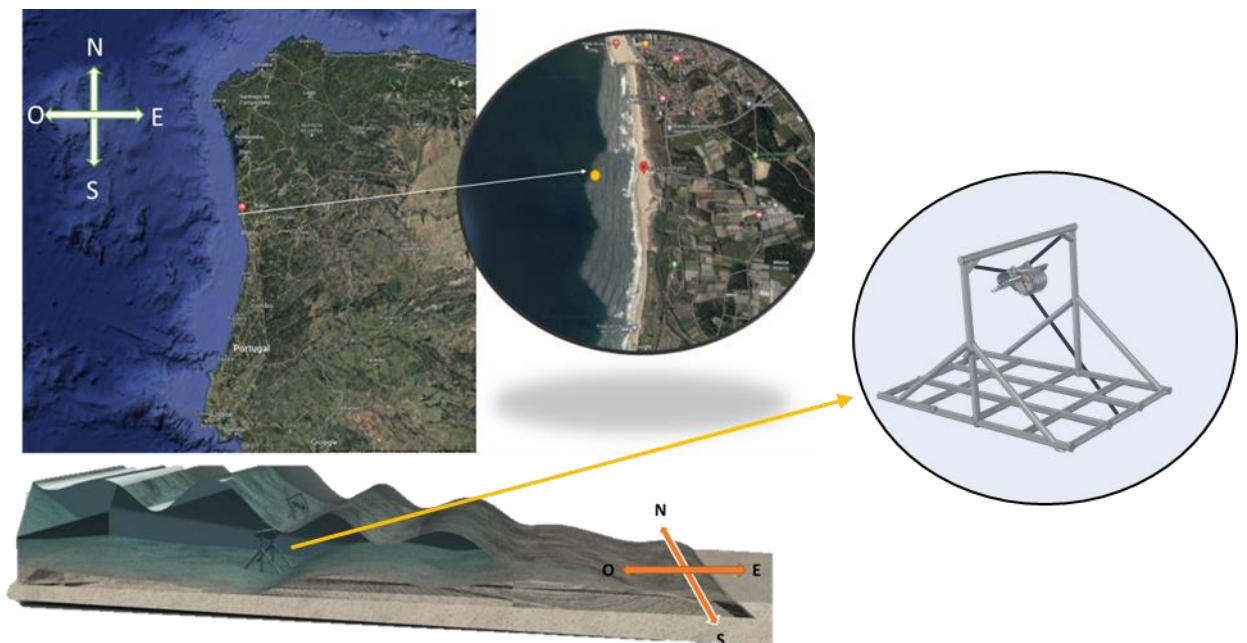


Figura 8.3. Localização dos testes e orientação da estrutura.

Nos testes no mar, a estrutura foi posicionada de forma que a secção frontal do LEG estivesse voltada para as ondas (Oeste), e a secção traseira do LEG voltada para a praia (Este), conforme apresentado na figura anterior.

Foram realizados diversos testes com marés altas e baixas e com diferentes coeficientes de maré. O coeficiente de maré mede a amplitude da maré (diferença na altura da água entre a maré alta e a maré baixa). Nesta zona, com um coeficiente de maré acima de 60, tornou-se desafiador ancorar o protótipo devido às elevadas correntes. Conforme mencionado nos capítulos anteriores, para produzir energia com este protótipo, são necessários movimentos de oscilação da água para que o magneto se movimente nos dois sentidos no interior tubo de acrílico. Quanto maior a frequência do movimento, maior será a produção de energia.

A figura 8.4 apresenta uma sequência de imagens do protótipo submersível com a parte superior da estrutura posicionada entre 1 e 1,5 metros abaixo da superfície do mar. A câmara está posicionada abaixo do gerador, conforme identificado na figura 8.1.

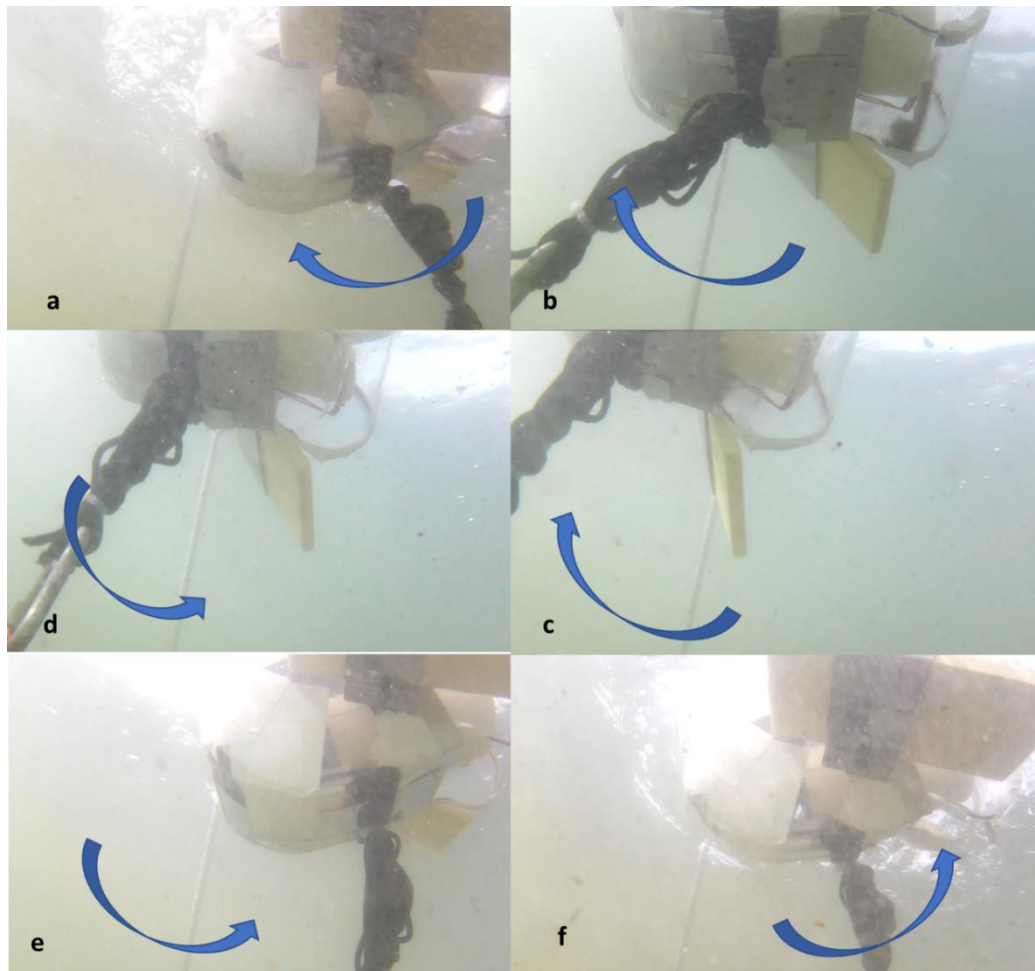


Figura 8.4. Movimento do protótipo. As posições "a" e "b" indicam movimento da direita para a esquerda. O movimento da esquerda para a direita é representado nas posições "d" e "c". As posições "e" e "f" mostram uma sequência do movimento de "d" e "c". As posições "e" e "f" mostram uma sequência do movimento de "d" para "c" com amplitude reduzida, iniciando a partir do centro da estrutura e progredindo em direção à direita.

Os testes no mar foram realizados na manhã de 08 de julho, de 04 a 14 de outubro e novembro de 2022.

Também foram conduzidos testes no rio Cávado para avaliar a adaptação da configuração do LEG para ambientes fluviais ou estuarinos. Os testes foram realizados no local com as coordenadas $41^{\circ}31'50,42''\text{N}$ e $8^{\circ}46'51,38''$, conforme identificado na figura 8.5.

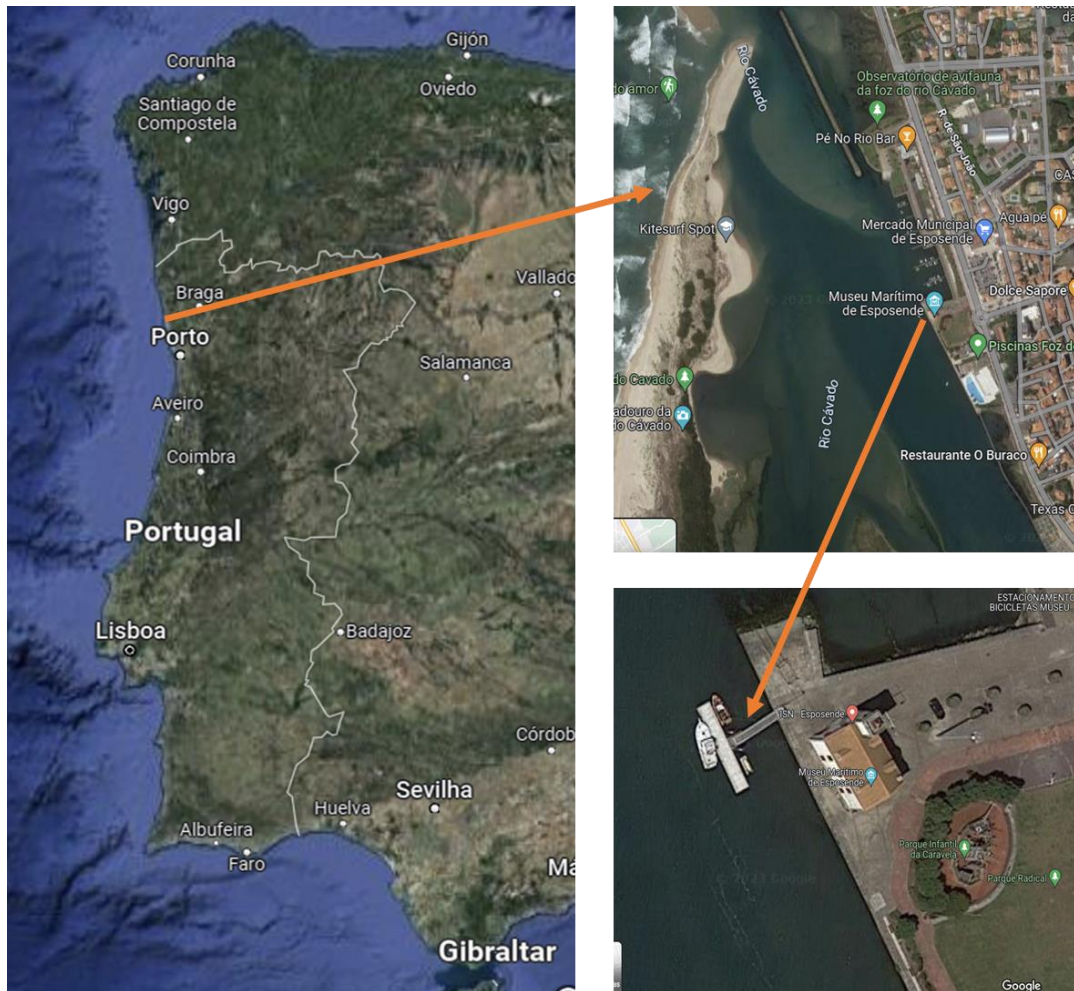


Figura 8.4. Zona estuarina do rio Cávado onde foram efetuados os testes.

8.1.2 Metodologia

Durante o teste são registadas as acelerações em cada eixo, o valor da tensão e a corrente (direção e intensidade da água). A frequência de aquisição dos dados utilizada foi de 285 Hz, com os dados a serem gravados a cada 60 segundos durante um período de 45 minutos. Amostragens de 5 minutos, foram utilizadas para efeitos de cálculo e apresentação dos dados. A medição da velocidade da água foi registada a uma frequência de amostragem de 1 Hz.

Um primeiro teste foi necessário para verificar que o sistema pode produzir tensões superiores a 3 V quando associado a uma resistência de carga equivalente ao valor da resistência

da bobina do LEG. Tensões acima de 3-4V são úteis para implementar o carregamento de bateria de lítio, sem a utilização de conversores *step-up*. Vários testes foram realizados com uma carga de $130\ \Omega$, com e sem retificação da tensão gerada. Com a carga de $130\ \Omega$, o gerador funciona próximo da sua capacidade máxima de potência, como já descrito anteriormente na otimização e configuração do LEG. Foram também realizados testes para analisar a capacidade de armazenamento de energia. Numa aplicação real, é prevista uma bateria recarregável de lítio. No entanto, o tempo de carregamento seria muito longo, e consequente o aumento da tensão seria muito pequena e pouco mensurável. Por isso, um condensador de 1F/5V foi utilizado, para melhor visualização do aumento da carga durante os testes. Um sensor de pressão de 0,6 mW de potência também foi utilizado nos testes.

8.2 Caracterização do gerador sem armazenamento de energia

É essencial verificar se o sistema alcança tensões superiores a 3 V. Vários testes são realizados com uma carga de $130\ \Omega$, com e sem retificação de onda.

8.2.1 Testes no oceano sem retificação da tensão com $130\ \Omega$

Em 08 de julho de 2022, às 11h35, um teste foi realizado durante o período de maré alta. O coeficiente de maré é considerado como médio, com um valor de 57. Uma amostra da tensão obtida com duas bobinas em série neste teste, pode ser analisada na figura 8.6.

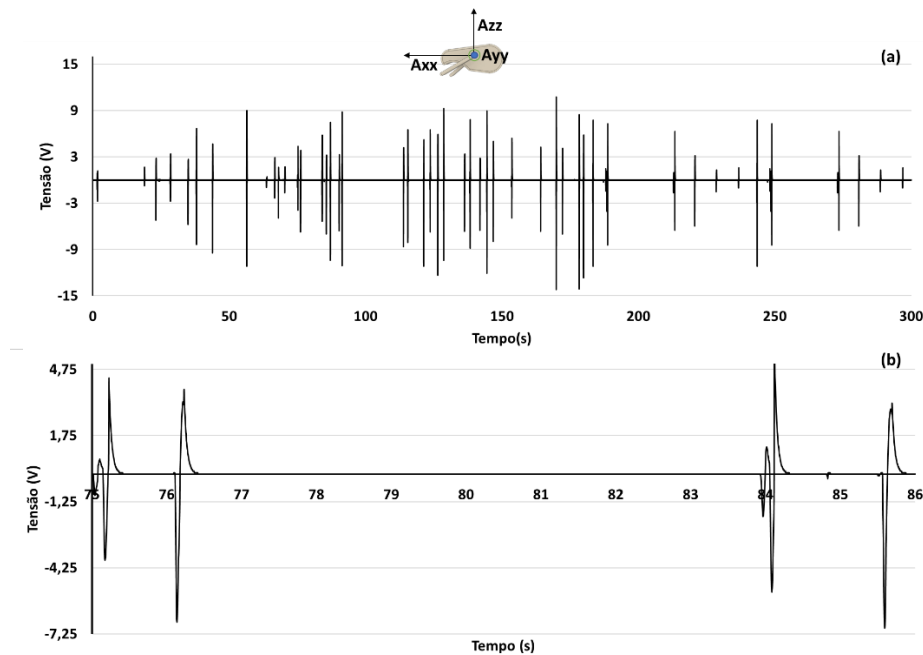


Figura 8.5. a) Representação do protótipo com as direções e sentido das acelerações. Gráfico da tensão obtida numa amostragem de 300 s, sem retificação da onda e sem condensador, b) Tensão de saída numa amostragem com dois ciclos completos.

Neste teste, o movimento do magneto produziu um impulso de tensão à medida que o magneto se deslocou através das duas bobinas num sentido. Ao atingir o limite do tubo de acrílico, o magneto mudou de sentido e produziu mais um impulso. Verifica-se na figura, que os intervalos de tempo entre os impulsos não são constantes. O número total de ciclos no gráfico foi determinado como sendo 48 impulsos, que, quando divididos por 2 (existem dois impulsos em cada ciclo de movimento do LEG), resultam em 24 ciclos completos em 300 segundos. Significa que nesta amostra, a frequência média das ondas do oceano foi de 0,08 Hz. Em todo o teste, a frequência média correspondente à ondulação esteve entre 0,03 Hz e 0,15 Hz (períodos de 9 e 45 segundos), valor obtido em amostras de 300 segundos. Na mesma amostra, na figura 8.7 está representada aceleração da força g na direção z (A_{zz}) ao longo de 300 segundos, com um foco na faixa entre 75 e 87 segundos. O eixo x do IMU foi posicionado na direção horizontal e sentido apontar para a frente do gerador, enquanto o eixo y foi orientado lateralmente e foi este posicionamento adotado para todos os testes.

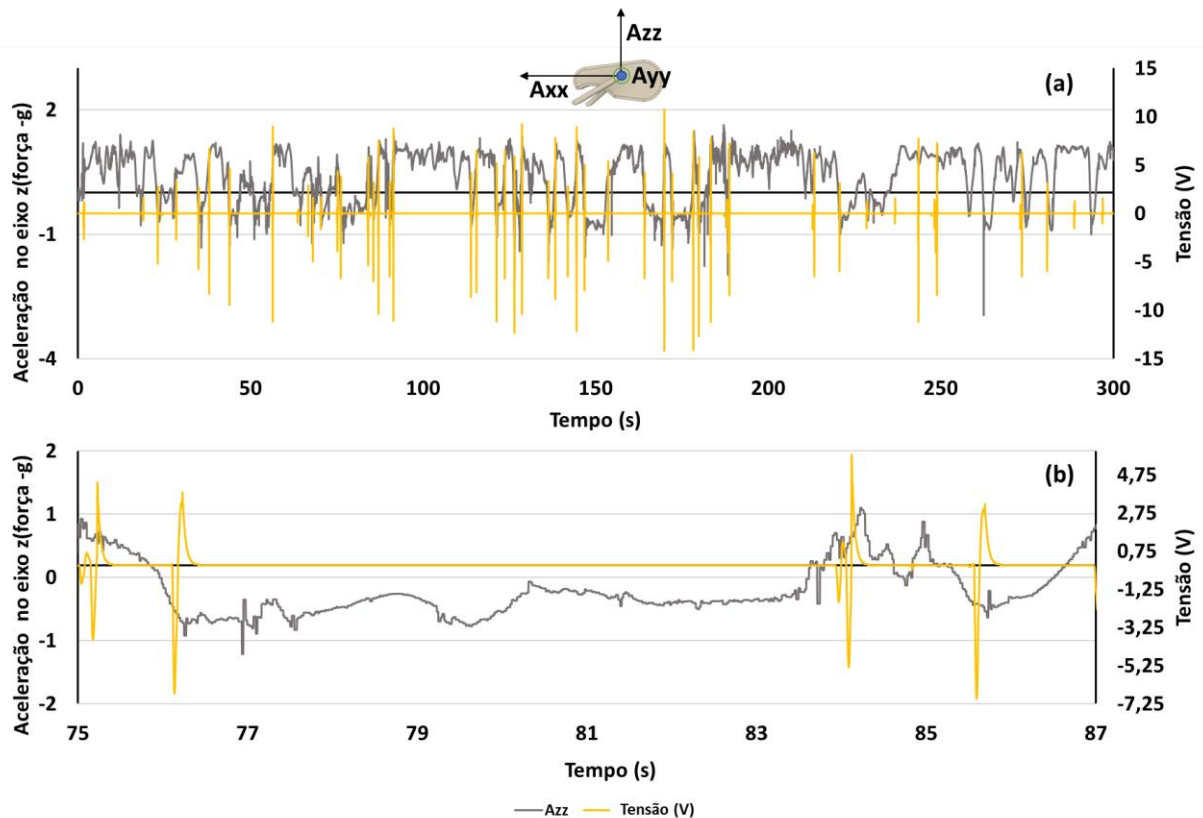


Figura 8.6. Sinal de tensão típico (linha amarela) versus aceleração (linha preta), a) Amostra de 300 segundos, b) Detalhe da amostra entre 75 e 87 segundos, para representação dos dois ciclos completos.

Existe aqui uma correlação visível entre a aceleração no eixo z e os impulsos de tensão produzidos. Há produção de energia, quando uma grande amplitude da aceleração no eixo z é acompanhada de inversão do sentido da gravidade. Verifica-se nos gráficos das figuras 8.6 e 8.7 que

a tensão está acima de 3 V em quase todos os impulsos. A potência de saída das amostras durante um período de 300 segundos foi calculada como sendo de 2,77 mW, calculado através das expressões 54 capítulo 4, mencionada anteriormente, isto é:

$$P = \frac{V_{RMS}^2}{R_L} ; \quad V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^N V_i^2}$$

Onde V_{RMS} é a tensão RMS (root mean square), V_i é a tensão instantânea em cada instante discreto i , R_L é a resistência de carga, N é o número de amostras no tempo, e P é a potência de saída. A tensão RMS foi calculada ao longo de um tempo total de 300 segundos, com um tempo de amostragem de $\frac{1}{285}$ segundos, resultando em um total de 85 500 amostras.

8.2.2 Testes no oceano com retificação de tensão

Uma série de testes foi realizada com uma carga ótima de 130 Ω após a retificação da onda completa para cada bobina. As duas tensões retificadas para DC foram ligadas em série. Como anteriormente mencionado, essa configuração resultou de uma tensão de saída mais alta (num período de tempo maior) e correntes mais baixas, mas maximiza a potência de saída. Para avaliar a influência das condições do oceano no desempenho do gerador, foram realizados 4 testes em 04, 07, 11 e 14 de outubro de 2022. Todos os detalhes desses testes podem ser encontrados no material suplementar (anexo V), e apenas um teste é descrito aqui. Os testes realizados em 11 e 14 de outubro são idênticos entre si, portanto, apenas os gráficos do dia 14 de outubro são apresentados no anexo V. No entanto, a potência obtida será incluída na Tabela 8.1.

Em 04 de outubro de 2022, às 10h20, foram realizados testes no oceano durante a maré alta com um coeficiente de maré baixa de 48. Os resultados deste teste, são apresentados na figura 8.8, para uma amostra das tensões obtidas em 300 segundos em conjunto com a aceleração em todos os eixos (A_{xx} , A_{yy} e A_{zz}). Para representar um período do movimento do magneto (passagem em ambos os sentidos), uma amostra de 3 segundos, é representado no gráfico b, da mesma figura.

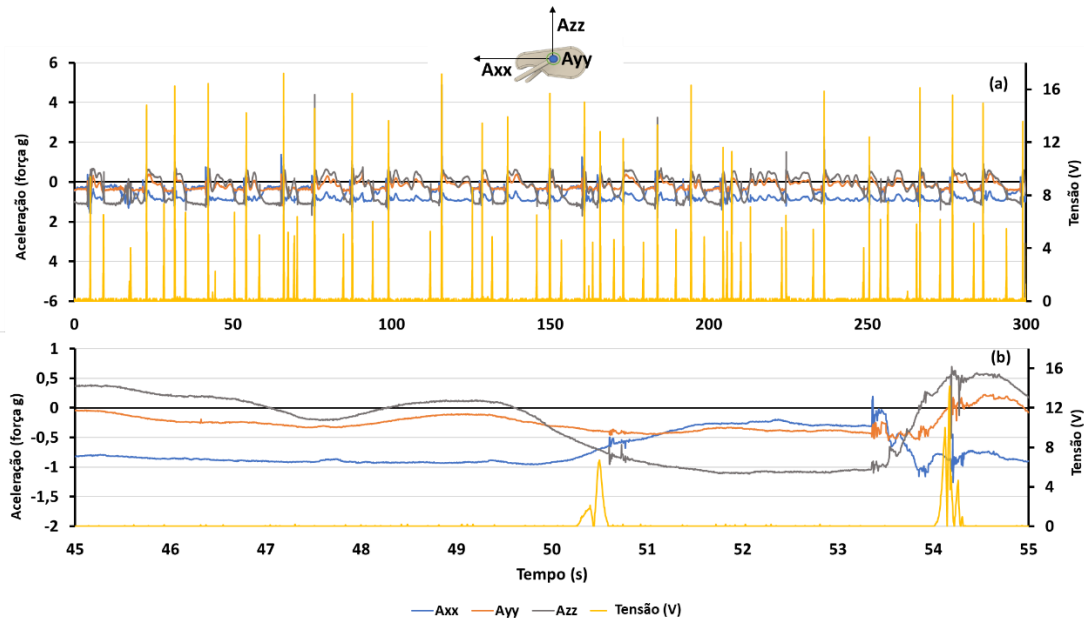


Figura 8.7. a) Tensão numa amostra de 300 s, com as acelerações Axx, Ayy e Azz, b) Detalhe de um ciclo completo.

Na figura 8.9 é representado a variação do ângulo do eixo X em função da aceleração e um ciclo completo de acordo com a variação do mesmo ângulo. O plano para obtenção do ângulo, é o plano xz, plano vertical, que contem a direção da ondulação, habitualmente perpendicular à linha da costa.

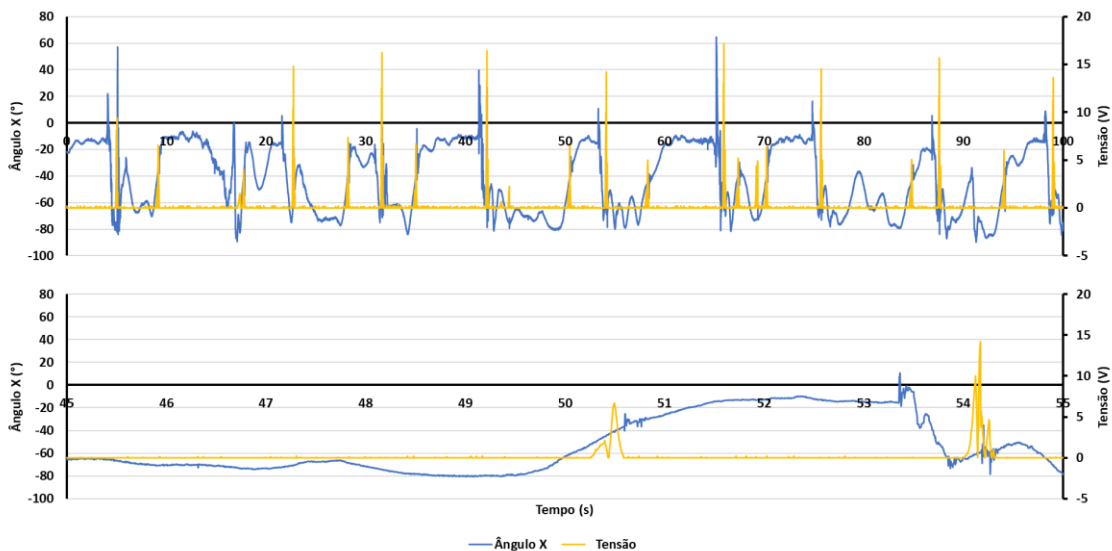


Figura 8.8. a) Amostragem de 100 segundos da produção tensão em função mudança do ângulo em x, b) Amostragem de um período completo.

O primeiro impulso da tensão (50,5 segundos) é produzido quando o magneto passa pelas bobinas, enquanto o segundo sinal (54 segundos) é produzido quando o LEG inverte o seu sentido

de movimento. A frequência obtida foi de 0,110 Hz. Para calcular a potência média, foram usadas as expressões anteriores, resultando uma potência média de 6,4 mW, considerando apenas as tensões acima de 3 V.

Na Tabela 8.1 estão representados os valores da potência média produzida durante 4 testes realizados no oceano, com uma carga ótima (130 Ω) e com retificador de onda completa, em vários coeficientes de maré e velocidade da água.

Tabela 8. 1. Potência produzida e respetivas condições oceânicas.

Data	Potência (mW)	Coefficiente de maré	Freq. (Hz)	Maré	Velocidade da água (ms^{-1})
04 out. 2022	6,4	48	0,11	Baixa	-
07 out. 2022	2,6	90	0,055	Alta	0,61
11 out.2022	5,5	58	0,087	Baixa	0,33
14 out 2022	5,5	93	0,083	Alta	0,73
Valor médio	5,0	72	0,084	-	0,56

Apesar de diferentes potências de saída, os testes realizados não apresentaram correlação entre a potência de saída e o coeficiente de maré ou velocidade da água. No entanto, uma forte correlação é observada entre a potência de saída e a frequência dos movimentos. Uma frequência das ondas mais alta resultará em uma potência de saída mais alta. A figura 8.10, estão as potências de saída medida nos 4 testes realizados, como função da frequência média das ondas.

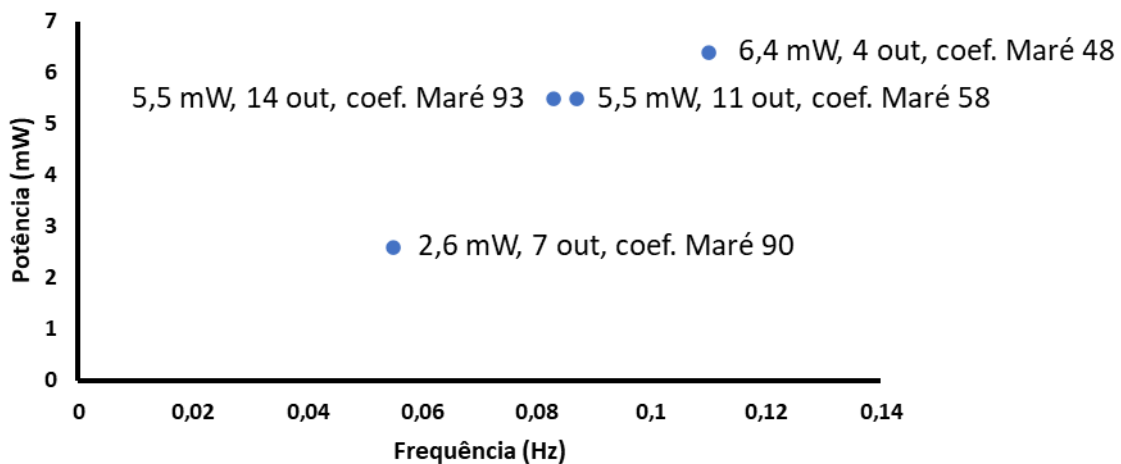


Figura 8.9. Caracterização do gerador no oceano. Potência produzida vs. frequência das oscilações durante 4 testes.

Esta correlação foi também verificada nos testes laboratoriais anteriores (onde a potência de saída aumenta com o aumento da frequência). No entanto, os testes no oceano apresentaram

uma saída de potência mais elevada do que os testes laboratoriais. A razão subjacente à discrepância na potência de saída entre os dois ambientes pode ser atribuída à restrição de um ângulo de oscilação de 45° durante os testes laboratoriais. Além disso, os testes no laboratório só permitiram a oscilação numa única direção, enquanto no oceano, várias direções de corrente geram forças de arrasto que impulsionam o corpo e o fazem movimentar em diferentes direções, com velocidades superiores. Outra diferença é de que as forças de arrasto no oceano não são em forma de onda sinusoidal, como foi imposto nos testes laboratoriais. Como resultado, o LEG é submetido a uma velocidade maior, levando a um aumento da tensão, de acordo com expressão da fem utilizada no cálculo das espiras das bobinas.

Na figura anterior, verificou-se também que as potências de saída dos dois últimos testes no oceano são semelhantes e a frequência é aproximadamente a mesma ($0,08\text{Hz}$), apesar das diferenças nas condições de maré e velocidade da água.

8.3 Aplicação do gerador com armazenamento de energia e com carga

Na secção anterior, foi demonstrado que o gerador produziu tensões superiores a 3 V nos testes no oceano e foi obtida uma potência média numa carga ótima de $130\ \Omega$. Devido à natureza pulsante da potência de saída, é necessário armazenar a energia, utilizando um condensador ou uma bateria. Para o efeito foi utilizado um condensador de $1\text{F}/5\text{V}$ e um sensor (como carga), mencionado no capítulo anterior. A potência solicitada por este sensor é de $0,6\text{ mW}$, podendo ser alimentado com tensões entre 3 e 5 V . Para determinar se o sistema produziu ou perdeu energia, os cálculos de potência foram baseados em amostras de 300 segundos, em testes com duração de 45 minutos no oceano. O supercondensador é pré-carregado com uma tensão inicial de $3,65\text{ V}$ (semelhante à tensão média de uma bateria de lítio).

8.3.1 Aplicação no oceano

Foram realizados dois testes com esta configuração. Apenas o teste das $10:30$ do dia 29 de novembro de 2022 é descrito detalhadamente na figura 8.11, o outro teste encontra-se no material suplementar, anexo V. A tensão do condensador, a aceleração nos 3 eixos (A_{xx} , A_{yy} e A_{zz}) e o ângulo do gerador (ângulo x) na direção x são representados durante um período representativo. Este teste foi realizado durante a maré baixa com um coeficiente de maré de 89 . Conforme evidenciado na figura 8.11, a tensão no condensador de armazenamento aumenta, demonstrando que a potência produzida excede a potência consumida pelo sensor e que a energia excedente é armazenada no condensador. Ao considerar apenas o eixo x , observa-se que a variação do ângulo x atinge os 80° . A

variação consecutiva do ângulo representa o movimento do dispositivo que é responsável principalmente pela produção de energia, ou seja, o ângulo na direção x (plano xz, plano vertical, que contém a direção da ondulação, habitualmente perpendicular à linha da costa). É visível que grandes variações no ângulo estão correlacionadas com os incrementos de tensão.

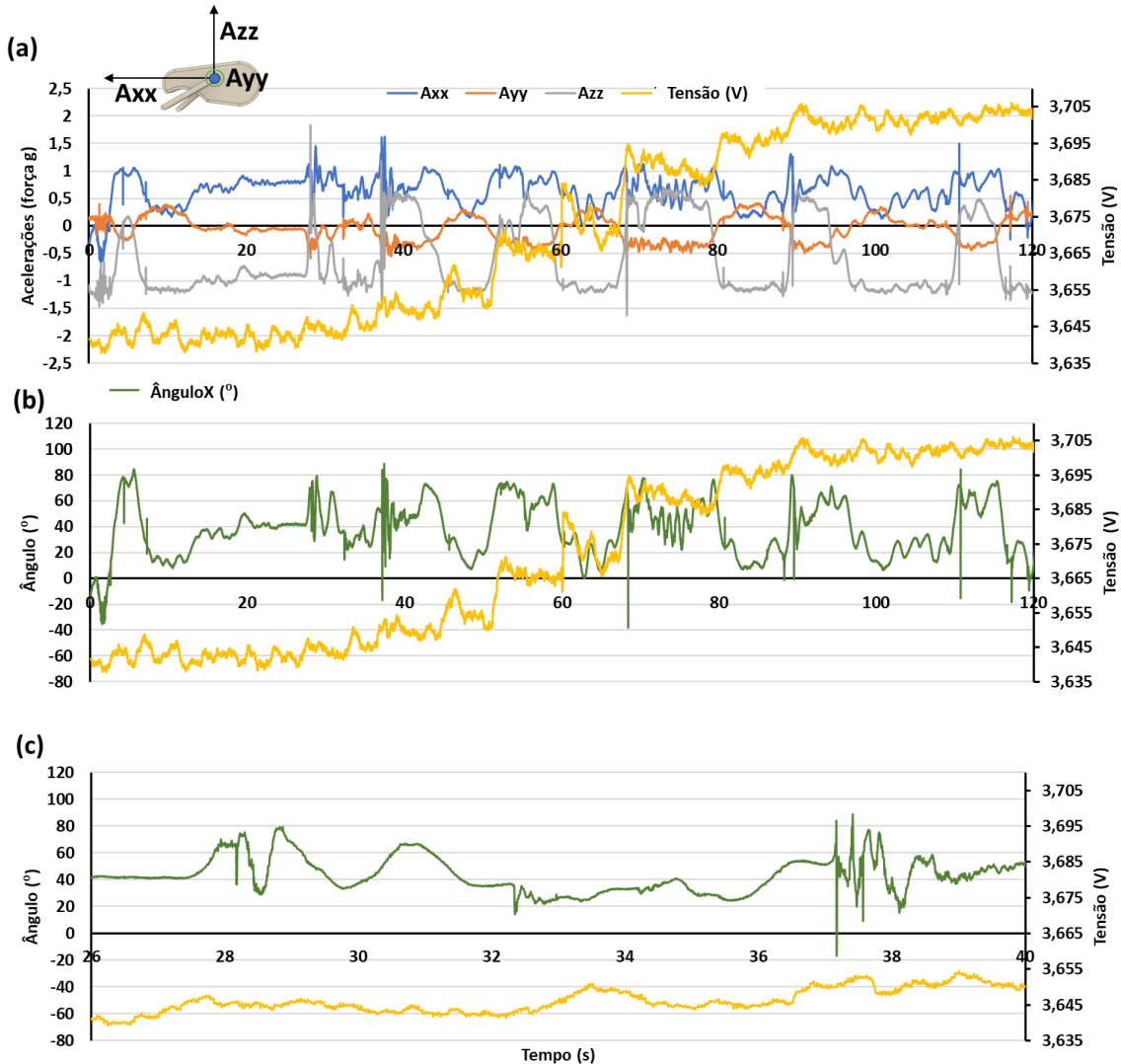


Figura 8.10. a) Tensão em função da aceleração, b) Tensão em função da alteração do ângulo, c) Detalhe da alteração do ângulo e incremento da tensão.

A energia armazenada no condensador é calculada usando a expressão anteriormente mencionada,

$$E_c = \frac{1}{2} C (V_f^2 - V_i^2)$$

onde, E_c é a energia em Joule, C é o valor do condensador em F (Farad), V_f é a tensão final em Volt e V_i é a tensão inicial no condensador em Volt. A Tabela 8.2 apresenta a quantidade de energia consumida e acumulada ao longo de 300 segundos, quando uma tensão inicial de 3,65 V e uma tensão final de 3,98 V foram medidas.

Tabela 8.2. Energia e balanço de potência. Produzido, consumido pelo sensor e armazenado no condensador no teste realizado no mar.

Dispositivo	Potência	Energia (300s)
Sensor (carga)	0,6 mW	180 mJ
Condensador (armazenamento)	4,2 mW	1259 mJ
Total produzido	4,8 mW	1439 mJ

O LEG forneceu 180 mJ de energia para o sensor e armazenou 1259 mJ (4,2 mW de potência) em 300 segundos. A energia total produzida foi de 1439 mJ, correspondente à potência média de 4,8 mW. Se a produção permanecesse constante, o sistema teria a capacidade de alimentar perto de 8 sensores. O dispositivo também foi testado com coeficientes de maré baixa.

Outro teste realizado em 15 de novembro de 2022, às 15h30 (os detalhes podem ser encontrados no material suplementar), com um coeficiente de maré de 33, resultou numa produção de energia total de 107,2 mJ (0,36 mW de potência) que pode suprir 60% da energia necessária (180 mJ). A Tabela 8.3 resume os testes realizados no oceano. Em coeficientes de maré mais altos, vários sensores podem ser alimentados pelo gerador, mas em condições calmas, a energia obtida pode apenas suprir parte da energia necessária.

Tabela 8. 3. Resumo dos testes de carregamento do condensador no oceano.

Data do teste	Coef. de maré	Potência produzida	Potência consumida pelo sensor	Número de sensores
15 nov 22	33	0,36 mW	0,6 mW	0,6
29 nov 22	89	4,8 mW	0,6 mW	8

8.3.2 Aplicação em rio

Estes testes foram realizados em vários dias durante dezembro de 2022 e janeiro de 2023. O LEG foi colocado na foz do rio Cávado, numa zona estuarina, sujeito à influência da maré, por períodos de 4 horas e o registo da velocidade da água foi efetuada durante este período. O sistema foi equipado com um condensador de 1F/5V (carregado previamente a 3,65 V) e uma carga de 16,75 k Ω (simulando o sensor de 0,6mW, que não estava disponível durante este teste). Os resultados do teste realizado em 27 de dezembro de 2022, às 11h30, com uma velocidade da água de 0,24 ms⁻¹ são detalhados na figura 8.12, que representa os movimentos oscilatórios ao longo de 300 segundos, representativos da análise de um teste de 3600 segundos.

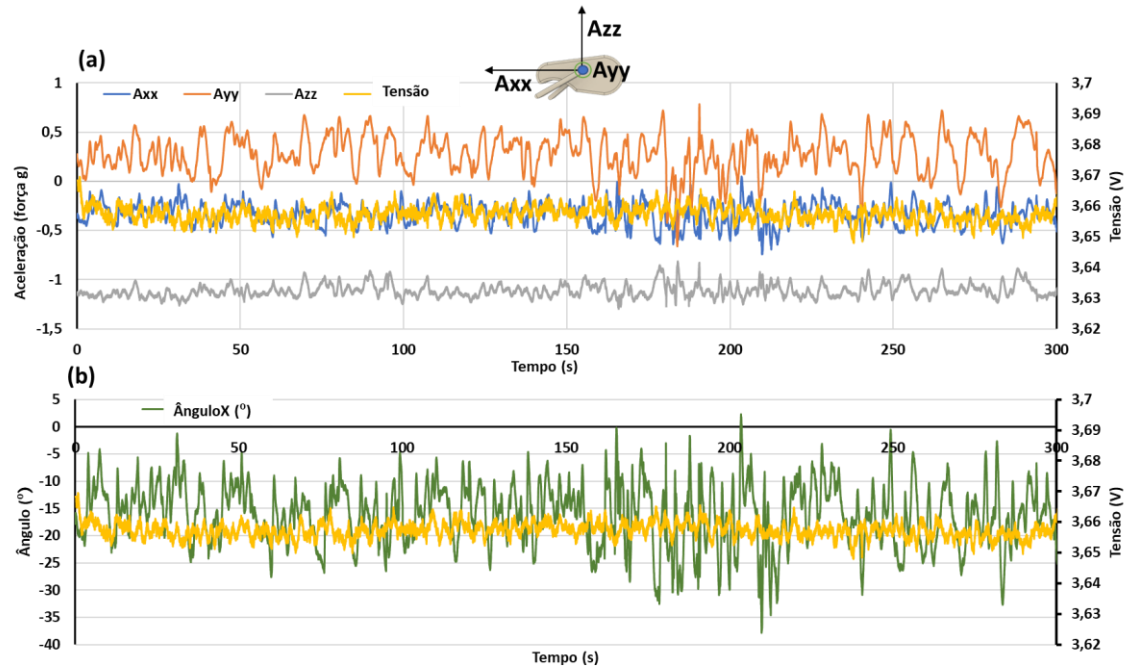


Figura 8.11. Aplicação no rio, a) Variação da aceleração e tensão no condensador, b) Variação do ângulo e da tensão.

Assim como nos testes no oceano, as oscilações no eixo x podem apresentar correlação com a produção de energia. No entanto, amplitude da variação do ângulo é muito pequena (recordemos que são necessários 15° para ultrapassar o atrito e obter movimento) e a produção de energia muito reduzida. A figura 8.13 apresenta a análise de produção de energia pelo gerador durante um período de 3600 segundos. O E_c representa a energia medida no condensador, com o gerador no rio e com a resistência de carga. O E_T é a energia calculada no condensador, caso o gerador não estivesse a carregar o condensador. A diferença entre as duas representa a energia produzida.

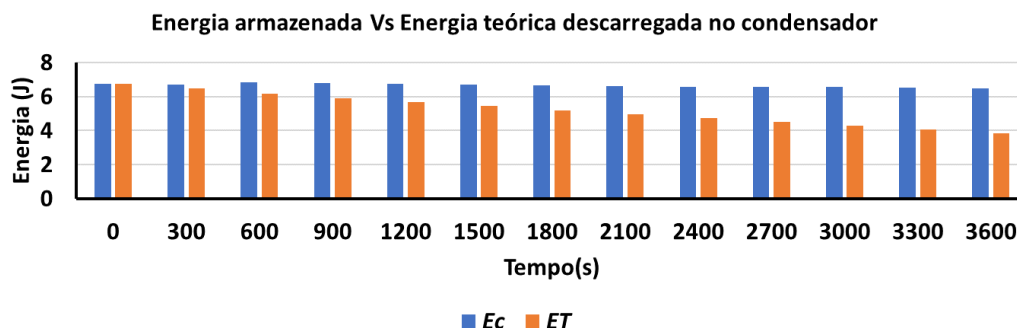


Figura 8.12. Variação da energia no condensador E_c e E_T é o valor teórico do descarregamento do condensador sem o gerador.

Tabela 8. 4. Variáveis e valores utilizados para calcular a energia armazenada no condensador.

Tempo (s)	V_i (V)	E_R (J)	E_P (J)	E_C (J)	E_T (J)
0	3,67	-	-	6,73	6,73
300	3,66	0,24	-0,04	6,69	6,49
600	3,70	0,24	0,15	6,84	6,15
900	3,66	0,24	-0,04	6,80	5,91
1200	3,64	0,24	-0,04	6,76	5,67
1500	3,63	0,24	-0,04	6,72	5,43
1800	3,61	0,23	-0,07	6,67	5,20
2100	3,59	0,23	-0,04	6,63	4,97
2400	3,58	0,23	-0,04	6,59	4,74
2700	3,58	0,23	0	6,59	4,51
3000	3,57	0,23	-0,04	6,55	4,28
3300	3,56	0,23	-0,04	6,51	4,05
3600	3,53	0,22	-0,04	6,47	3,83

Na tabela 8.4, V_i corresponde à tensão no condensador no instante (tempo), E_R é a energia consumida pela carga/resistência a cada 300 s, E_P é a energia entregue ao condensador a cada 300 s (um valor negativo indica que o condensador foi descarregado para fornecer energia à carga), E_C é a energia efetivamente armazenada no condensador e E_T é a energia que é expectável estar armazenada no condensador após o fornecimento à carga e sem produção de energia.

Neste teste no rio, a carga consumiu uma potência média de 0,80 mW. Deste valor, 0,73 mW foi fornecido pelo gerador e a potência restante (0,07 mW) foi obtida a partir do condensador conforme apresentado na tabela 8.5, resultando que o gerador só conseguiu repor 90% da energia consumida pelo sensor.

Tabela 8. 5. Energia e balanço de potência: Produzido, consumido pelo sensor e armazenado no condensador, no teste de rio.

Dispositivo	Potência	Energia (3600s)
Sensor	0,80 mW	2880 mJ
Condensador	-0,07 mW	-260 mJ
Total produzido	0,73 mW	2620 mJ

A tabela 8.6, apresenta o resumo dos resultados de ambos os testes, realizados em rio, sendo que o detalhe dos resultados do teste de 05 de jan. encontram-se no material suplementar, anexo V.

Tabela 8. 6. Resumo dos testes no rio

Teste	Velocidade (ms ⁻¹)	Potência Produzida (mW)	Potência consumida pelo sensor (mW)	Número de sensores
27 dez. 22	0,24	0,73	0,80	0,9
05 jan. 23	0,26	0,3	0,80	0,4

8.4 Resumo

Um gerador eletromagnético linear de baixo custo foi caracterizado em ambientes oceânicos e fluviais, completamente submerso, para fornecer energia a sensores de monitorização, utilizando oscilações e correntes no oceano e no rio.

Os resultados evidenciam que uma potência de 6,4 mW pode ser produzida em circunstâncias oceânicas consideradas ideais, isto é, em períodos de ondas que possibilitem a obtenção de uma frequência de movimento próxima de 0,1 Hz, para uma resistência de carga equivalente às bobinas em questão. Utilizando uma ponte retificadora completa, diretamente ligado a um supercondensador, uma potência média de 4,8 mW foi medida em condições ideais de ondulação. Nessas condições oceânicas, o sistema pode alimentar até 8 sensores de monitorização, como os utilizados neste trabalho. Mesmo nas piores condições do oceano experimentadas, o sistema pode recuperar alguma energia, aumentando a autonomia da bateria em cerca de 60%.

A análise dos dados revelou que a localização do sistema é importante, mas mesmo quando colocado no mesmo local, a direção do fluxo de água pode mudar. Além disso, mesmo com coeficientes de maré e valores semelhantes (tabela 8.1), foram observadas diferentes saídas de potência devido à direção da corrente. Por exemplo, em 07 de outubro, a corrente de água predominante era de norte a sul e produziu menos potência. A potência produzida não depende se a maré está alta ou baixa, mas sim da frequência do movimento. A análise demonstra que os picos de tensão mais elevados ocorrem quando as forças g são superiores 0,5 e há variação do ângulo em direção x . Também se evidencia que uma variação angular limitada, isto é, quando o gerador eletromagnético linear permanece estacionário, resulta uma baixa produção de energia. Por outro lado, variações angulares demasiado rápidas também impedem a capacidade do gerador produzir energia. Pode-se concluir que o sistema é capaz de produzir energia suficiente para alimentar os sensores, carregar a bateria ou aumentar o seu tempo de operação tanto em maré baixa quanto em maré alta ou em direções de corrente diferentes.

O gerador, devido ao seu movimento oscilatório, mostrou-se eficaz na prevenção da acumulação de algas marinhas, mas o sensor de medição de velocidade da água não obteve o mesmo

sucesso.

Os testes realizados em rios revelaram que o gerador eletromagnético linear pode aumentar significativamente a autonomia da bateria entre 43% a 90%. No entanto, sendo uma zona estuarina, a presença de material vegetal (galhos de árvores, plantas, etc.) interferiu no funcionamento do sistema. O sistema no rio tem potencial para gerar mais energia se for colocado numa área onde a corrente não transporte quantidades excessivas de detritos vegetais.

Capítulo 9

Conclusões e trabalho futuro

No presente capítulo são apresentadas as conclusões do trabalho de investigação realizado assim como recomendações para melhorias do sistema *energy harvesting*.

A principal finalidade da investigação realizada no âmbito desta tese de doutoramento, consistiu em garantir a concretização dos requisitos iniciais necessários para o desenvolvimento de um protótipo *energy harvesting* submersível, baseado no princípio de indução eletromagnética, com o propósito de melhorar a autonomia dos sensores, reduzindo assim a necessidade de substituição frequente das baterias ou, se possível, permitindo que os sensores sejam totalmente autónomos em termos energéticos.

9.1 Conclusões

No decorrer do estudo do estado da arte, constatou-se a escassez de investigações sobre dispositivos de produção de energia de pequena dimensão para aplicações marítimas. Dos poucos trabalhos existentes, a maioria estava orientada para aplicações em superfície e poucos para utilização em ambiente submersível. Após a análise dos diversos tipos de sistemas de conversão de energia, nomeadamente piezoelétricos, triboelétricos e eletromagnéticos, verificou-se que a opção pelo sistema de conversão eletromagnético, devido às suas vantagens (conforme tabela 2.2), seria a mais adequada para a aplicação proposta. A análise das diversas configurações e arquiteturas de dispositivos existentes e propostos permitiu selecionar a configuração e arquitetura que apresentava maior possibilidade de cumprir os requisitos, com base na análise das vantagens e desvantagens de cada uma delas. A escolha da configuração do gerador eletromagnético linear é específica para a aplicação pretendida, de acordo com o ambiente no qual o dispositivo de produção de energia extrai a energia.

Para a configuração selecionada, optou-se por um sistema de conversão simples, com o magneto localizado no interior de um tubo que se movimenta livremente. Esta solução mostrou-se mais adequada para a aplicação em questão, uma vez que se pretende extrair energia num ambiente cujas frequências são, na sua maioria, inferiores a 1 Hz e não são constantes. As outras configurações não foram adotadas devido às desvantagens já referidas no capítulo 5, secção 5.1.

O magneto é um componente crucial no mecanismo de conversão de energia eletromagnética, devido à importância do valor da densidade de fluxo magnético em função da distância. No sistema construído, o magneto movimenta-se livremente no interior de uma bobina, de modo que a densidade de fluxo magnético aumenta à medida que se aproxima da bobina e diminui quando se afasta. Após comparar os valores da densidade de fluxo magnético para diferentes geometrias (calculados a partir das expressões 38 a 41), foi selecionado o magneto N45 com a geometria de disco de 30 mm de diâmetro e 10 mm de altura, por apresentar a melhor relação entre densidade de fluxo magnético e distância. Dado que, na configuração adotada, existe um contato direto entre o magneto e a superfície onde este desliza, foi necessário realizar um estudo comparativo entre diversos materiais para selecionar o material com um coeficiente de atrito mais adequado para a aplicação pretendida. O polimetilmetacrilato, comercialmente conhecido como acrílico, foi selecionado não por apresentar o coeficiente de atrito mais baixo, mas sim um valor intermédio. Isso porque se pretende que o

sistema tenha um valor de atrito que permita o funcionamento do LEG a partir de um ângulo superior a 10° , de forma a poder ter energia cinética na sua posição de descida.

A determinação do número de espiras da bobina é um processo complexo que exige fazer algumas simplificações e considerações teóricas abordadas no capítulo 3. É proposto nesta tese um método simples, para a validação teórica do número de espiras. Numa primeira aproximação, foi considerado 1500 espiras.

O valor de 1500 espiras foi validado experimentalmente, mas não inclui o fator de acoplamento eletromagnético, que engloba outros fenômenos físicos, como as forças de arrasto magnéticas. Para validar o número de espiras, utilizou-se uma expressão que engloba o fator de acoplamento eletromagnético, dipolo magnético, volume da bobina, indutância e constantes associadas. Após efetuar o mesmo teste experimental, validou-se o número de espiras para o fabrico da bobina e verificou-se também maior concordância dos valores da tensão obtidos por esta expressão com os valores experimentais.

De acordo com a análise efetuada num artigo do estado da arte [56], optou-se por uma arquitetura para o fabrico do LEG que inclui dois magnetos unidos por atração com um espaçador entre eles, designado pelos autores do estudo como arquitetura tipo II. Em conjunto com este tipo de arquitetura, foram utilizadas duas bobinas em vez de uma, conforme sugerida no estudo. A razão desta escolha foi mencionada na seção 4.2 do capítulo 4. Para validar esta seleção, elaborou-se uma metodologia dos testes experimentais de forma a obter potências superiores ao valor necessário para um sensor de baixo consumo (<1 mW). Os ensaios foram realizados para ângulos que permitiram o deslizamento dos magnetos livremente, e após a otimização do LEG, a configuração obtida permitiu obter uma potência média acima de 4,35 mW, o que pode fornecer energia a mais do que um sensor de baixo consumo, se obtido com frequências baixas.

A otimização das distâncias entre os magnetos e as bobinas foi um passo importante para a obtenção da configuração com maior potência. A metodologia empregue permitiu selecionar o tipo de ligação e obter experimentalmente os valores de potência máxima em função da frequência selecionada. Para os testes de laboratório, foi concebida e produzida uma bancada de ensaios com recurso a impressão 3D, a fim de testar a oscilação em função das frequências de interesse no mar. Foi obtida uma potência média de 1,31 mW e 7,72 mW, para frequências de 0,1 Hz e 0,4 Hz, respetivamente. Essas frequências permitem alimentar de 1 a 8 sensores, de acordo com seus respetivos consumos e modos de funcionamento. A validação da configuração do LEG confirmou que ele não só pode repor a energia consumida por uma bateria de lítio ou supercondensador, mas também pode alcançar tensões superiores a 5 V.

No âmbito desta tese, foram também realizados testes de validação dos valores de potência obtidos em condições reais no mar e no rio. Para tal, foi imprescindível investigar e determinar a forma geométrica mais adequada para o corpo que aloja o LEG. Foram conduzidas diversas simulações numéricas em OpenFoam, tendo como objetivo obter os valores do coeficiente de sustentação e a força de arrasto, de forma a otimizar a geometria do protótipo capaz de proporcionar movimento do LEG através do movimento da água. O corpo

envolvente do LEG, é um elemento de elevada importância no sistema, deve ser capaz de converter velocidades inferiores a $0,5 \text{ ms}^{-1}$ em movimento. A análise dos valores obtidos permitiu verificar que é possível alcançar esse comportamento, mas com algumas limitações para velocidades de água iguais ou inferiores a $0,2 \text{ ms}^{-1}$ e para determinadas posições angulares assumidas pelo corpo. Os resultados obtidos através das simulações numéricas possibilitaram o cálculo da massa máxima permitida para o protótipo. Assim, foi verificado que a massa não deve exceder os 100 gramas, de forma a garantir que o corpo envolvente com o LEG não tenha flutuabilidade.

Adicionalmente, no âmbito deste estudo, foi utilizado material de baixo custo para fabricar o dispositivo de produção de energia, sem comprometer a sua integridade estrutural. Assim foi possível construir o dispositivo por um valor aproximado de 85€. Devido ao seu baixo custo, é possível o uso de mais de que um gerador, caso seja necessário, numa rede de sensores. Além disso, foi desenvolvida uma solução para ajustar a flutuabilidade do dispositivo (composto pelo corpo externo, LEG e outros componentes) usando placas de poliestireno extrudido (XPS), sem necessidade de alterar o LEG. Para os testes realizados no mar e no rio, foi construída uma estrutura de ancoragem que permitiu transportar de forma fácil e versátil o dispositivo e restringiu o seu movimento para evitar impactos e a degradação de cabos elétricos.

No sentido de validar os resultados obtidos em laboratório, foram realizados vários testes no mar e no rio. Contudo, a execução dos testes no mar mostrou-se, por vezes, muito desafiadora, devido às condições adversas impostas pelo mar. Da mesma forma, nos testes realizados no rio, foram enfrentados alguns desafios, nomeadamente devido às cheias que assolaram o país nesse período, tendo ocorrido um impacto considerável do dispositivo com um tronco de árvore num dos testes.

Não obstante, os testes realizados no mar foram bem sucedidos, tendo-se verificado que o dispositivo proposto de *energy harvesting* produz efetivamente energia. Mais concretamente, verificou-se que foram alcançadas potências superiores com frequências mais baixas do que as utilizadas em laboratório. Por conseguinte, o dispositivo conseguiu carregar um supercondensador, fornecendo uma potência de 4,8 mW, valor que se mostrou suficiente para alimentar oito sensores de baixo consumo, similares aos utilizados. Adicionalmente, num teste com uma resistência de carga, atingiu-se uma potência máxima de 6,4 mW. Assim sendo, o objetivo preconizado no mar foi atingido, ainda que mesmo em condições adversas, o dispositivo foi capaz de repor parte da energia.

Convém realçar que existe uma relação direta entre a frequência e a potência obtida, contudo, não foi possível constatar uma correlação evidente entre a velocidade da água e a produção de energia. Por sua vez, nos testes realizados no rio, foi possível atingir o objetivo de aumentar a autonomia do dispositivo, apesar de este não ter sido capaz de fornecer energia a um sensor. Nos referidos testes, verificou-se que foi possível repor entre 43% e 90% da energia consumida.

A presente tese de doutoramento, caracterizada por uma abordagem multidisciplinar, cumpriu

integralmente os objetivos delineados. Os resultados obtidos nas validações realizadas no mar superaram as expectativas. Uma possível explicação para este facto reside no elevado nível de energia das ondas na superfície, que promoveu oscilações mais acentuadas do sistema. A metodologia adotada na validação experimental e a identificação dos fatores que influenciam a otimização do LEG podem constituir uma base de partida útil para futuros estudos de outros investigadores, permitindo obter outras configurações ajustadas ao ambiente em que serão instaladas.

9.2 Trabalhos futuros

Os resultados obtidos evidenciam que, apesar dos requisitos do projeto terem sido cumpridos, incluindo o baixo custo do dispositivo de *energy harvesting*, ainda há margem para melhorias. No caso particular do dispositivo aplicado no rio, é necessária uma análise mais aprofundada dos ângulos das pás utilizadas pelo dispositivo. Conforme demonstrado pela simulação, era esperado que ocorresse uma maior oscilação, porém isso não se verificou. Uma das possíveis razões para este resultado pode ser a inadequação à zona de estudo, uma vez que esta se encontrava muito próxima de um cais de embarque. Assim, por forma a melhorar a análise do comportamento do dispositivo, sugere-se a realização de testes numa localização livre de obstáculos.

Adicionalmente, é necessário realizar um estudo detalhado para a alteração da configuração do dispositivo de *energy harvesting*, mantendo a sua arquitetura base, para áreas onde não há grande amplitude de movimento e oscilações adequadas, de forma a aumentar o espectro de frequência em que o dispositivo pode funcionar. Uma possível solução seria realizar testes experimentais para selecionar um magneto, que seria colocado nos topos do tubo de acrílico numa configuração de repulsão, garantindo que a oscilação ocorra apenas numa das bobinas quando o magneto estiver na posição apropriada. No entanto, o valor da repulsão não deve ser excessivo, a ponto de restringir a amplitude do movimento do magneto dentro do tubo de acrílico. Também deve-se analisar a possibilidade de integrar sensores no dispositivo de *energy harvesting*, a fim de evitar a necessidade de passagem do cabo elétrico em situações que isso for possível, nomeadamente, que não sejam afetados pelo campo magnético ou movimento do dispositivo.

Referências:

- [1] Elahi H, Eugeni M, Gaudenzi P. A review on mechanisms for piezoelectric-based energy harvesters. *Energies* (Basel) 2018;11. <https://doi.org/10.3390/en11071850>.
- [2] Izadgoshasb I, Lim YY, Lake N, Tang L, Padilla RV, Kashiwao T. Optimizing orientation of piezoelectric cantilever beam for harvesting energy from human walking. *Energy Convers Manag* 2018; 161:66–73. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.01.076>.
- [3] Hamdy Helal M, Nassar M, Labah D. Evaluation of Osseous Response after Placement of Experimental Implants in Femur of Diabetic Rabbits Using Piezoelectric Osteotomy. Remineralizing ability of recent hydraulic calcium silicate cement using different testing models View project Effect of Photodynamic Therapy Versus Diode Laser Therapy on the Treatment of Localized Aggressive Periodontitis View project n.d. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.20865.92004>.
- [4] Wang C, Wang S, Li QJ, Wang X, Gao Z, Zhang L. Fabrication and performance of a power generation device based on stacked piezoelectric energy-harvesting units for pavements. *Energy Convers Manag* 2018;163:196–207. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.02.045>.
- [5] Kim MO, Pyo S, Oh Y, Kang Y, Cho KH, Choi J, et al. Flexible and multi-directional piezoelectric energy harvester for self-powered human motion sensor. *Smart Mater Struct* 2018;27. <https://doi.org/10.1088/1361-665X/aaa722>.
- [6] Mutsuda H, Tanaka Y, Patel R, Doi Y, Moriyama Y, Umino Y. A painting type of flexible piezoelectric device for ocean energy harvesting. *Applied Ocean Research* 2017; 68:182–93. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2017.08.008>.
- [7] Cai W, Roussinova V, Stoilov V. Piezoelectric wave energy harvester. *Renew Energy* 2022;196:973–82. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.07.051>.
- [8] Viñolo C, Toma D, Mànuel A, del Rio J. An ocean kinetic energy converter for low-power applications using piezoelectric disk elements. *European Physical Journal: Special Topics* 2013;222:1685–98. <https://doi.org/10.1140/epjst/e2013-01955-3>.
- [9] Arbie A, Hasan ZA, Nuayi AW. Piezoelectric Configuration for Generating Electricity Using Waves Power. *Journal of Energy* 2021; 2021:1–9. <https://doi.org/10.1155/2021/7258449>.
- [10] Na Y min, Lee H seok, Park J kyu. A study on piezoelectric energy harvester using kinetic energy of ocean. *Journal of Mechanical Science and Technology* 2018;32:4747–55. <https://doi.org/10.1007/s12206-018-0922-1>.
- [11] Xie XD, Wang Q, Wu N. Energy harvesting from transverse ocean waves by a piezoelectric plate. *Int J Eng Sci* 2014;81:41–8. <https://doi.org/10.1016/j.ijengsci.2014.04.003>.
- [12] Shi G, Tan T, Hu S, Yan Z. Hydrodynamic piezoelectric energy harvesting with topological strong vortex by forced separation. *Int J Mech Sci* 2022;223. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2022.107261>.
- [13] Qian F, Liu M, Huang J, Zhang J, Jung H, Deng ZD, et al. Bio-inspired bistable piezoelectric energy harvester for powering animal telemetry tags: Conceptual design and preliminary experimental validation. *Renew Energy* 2022;187:34–43. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.01.018>.
- [14] Toma DM, Carbonell-Ventura M, David , Bresco P, Mànuel A, Jaume , et al. An impacting energy harvester through piezoelectric device for oscillating water flow. 5TH MARTECH International Workshop On Marine Technology
- [15] Haque RI, Briand D. Triboelectric freestanding flapping film generator for energy harvesting from gas flow in pipes. *Smart Mater Struct* 2019;28.

<https://doi.org/10.1088/1361-665X/ab0840>.

[16]Feng Y, Zhang L, Zheng Y, Wang D, Zhou F, Liu W. Leaves based triboelectric nanogenerator (TENG) and TENG tree for wind energy harvesting. *Nano Energy* 2019;55:260–8. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2018.10.075>.

[17]Liang X, Liu Z, Feng Y, Han J, Li L, An J, et al. Spherical triboelectric nanogenerator based on spring-assisted swing structure for effective water wave energy harvesting. *Nano Energy* 2021;83. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2021.105836>.

[18]Ouyang R, Huang Y, Ye H, Zhang Z, Xue H. Copper particles-PTFE tube based triboelectric nanogenerator for wave energy harvesting. *Nano Energy* 2022;102. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2022.107749>.

[19]Kim I, Kim D. 3d printed double roller-based triboelectric nanogenerator for blue energy harvesting. *Micromachines (Basel)* 2021;12. <https://doi.org/10.3390/mi12091089>.

[20]Wang Y, Liu X, Chen T, Wang H, Zhu C, Yu H, et al. An underwater flag-like triboelectric nanogenerator for harvesting ocean current energy under extremely low velocity condition. *Nano Energy* 2021;90. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2021.106503>.

[21]Zhao Z, Pu X, Du C, Li L, Jiang C, Hu W, et al. Freestanding Flag-Type Triboelectric Nanogenerator for Harvesting High-Altitude Wind Energy from Arbitrary Directions. *ACS Nano* 2016;10. <https://doi.org/10.1021/acs.nano.5b07157>.

[22]Wang Y, Yang E, Chen T, Wang J, Hu Z, Mi J, et al. A novel humidity resisting and wind direction adapting flag-type triboelectric nanogenerator for wind energy harvesting and speed sensing. *Nano Energy* 2020;78. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2020.105279>.

[23]Wang X, Gao Q, Zhu M, Wang J, Zhu J, Zhao H, et al. Bioinspired butterfly wings triboelectric nanogenerator with drag amplification for multidirectional underwater-wave energy harvesting. *Appl Energy* 2022;323. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119648>.

[24]Wang X, Zeng X, Li J, Yang X, Wang H. A Review on Recent Advancements of Substructures for Offshore Wind Turbines 2. n.d.

[25]Vennell R, Funke SW, Draper S, Stevens C, Divett T. Designing large arrays of tidal turbines: A synthesis and review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2015;41:454–72. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.08.022>.

[26]Niroomand M, Foroughi HR. A rotary electromagnetic microgenerator for energy harvesting from human motions. *Journal of Applied Research and Technology* 2016;14:259–67. <https://doi.org/10.1016/j.jart.2016.06.002>.

[27]Wang W, Cao J, Zhang N, Lin J, Liao WH. Magnetic-spring based energy harvesting from human motions: Design, modeling and experiments. *Energy Convers Manag* 2017;132:189–97. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.11.026>.

[28]Farrok O, Islam MdR, Sheikh MdRI. Analysis of the Oceanic Wave Dynamics for Generation of Electrical Energy Using a Linear Generator. *Journal of Energy* 2016;2016:1–14. <https://doi.org/10.1155/2016/3437027>.

[29]Li Y, Guo Q, Huang M, Ma X, Chen Z, Liu H, et al. Study of an electromagnetic ocean wave energy harvester driven by an efficient swing body toward the self-powered ocean buoy application. *IEEE Access* 2019;7:129758–69. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2937587>.

[30]Ding W, Song B, Mao Z, Wang K. Experimental investigations on a low frequency horizontal pendulum ocean kinetic energy harvester for underwater

- mooring platforms. *Journal of Marine Science and Technology (Japan)* 2016;21:359–67. <https://doi.org/10.1007/s00773-015-0357-7>.
- [31]Chiu MC, Karkoub M, Her MG. Energy harvesting devices for subsea sensors. *Renew Energy* 2017;101:1334–47. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.10.018>.
- [32]Shuvo MMH, Titirsha T, Amin N, Islam SK. Energy Harvesting in Implantable and Wearable Medical Devices for Enduring Precision Healthcare. *Energies (Basel)* 2022;15. <https://doi.org/10.3390/en15207495>.
- [33]Park JY, Salauddin M, Rasel MS. Nanogenerator for scavenging low frequency vibrations. *Journal of Micromechanics and Microengineering* 2019;29. <https://doi.org/10.1088/1361-6439/ab0241>.
- [34]Khan F, Sassani F, Stoeber B. Nonlinear behaviour of membrane type electromagnetic energy harvester under harmonic and random vibrations. *Microsystem Technologies* 2014;20:1323–35. <https://doi.org/10.1007/s00542-013-1938-1>.
- [35]Siddique ARM, Mahmud S, Heyst B van. A comprehensive review on vibration based micro power generators using electromagnetic and piezoelectric transducer mechanisms. *Energy Convers Manag* 2015;106:728–47. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.09.071>.
- [36]Ju S, Ji CH. Impact-based piezoelectric vibration energy harvester. *Appl Energy* 2018;214:139–51. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.01.076>.
- [37]Zuo L, Tang X. Large-scale vibration energy harvesting. *J Intell Mater Syst Struct*, vol. 24, 2013, p. 1405–30. <https://doi.org/10.1177/1045389X13486707>.
- [38]Khan FU, Qadir MU. State-of-the-art in vibration-based electrostatic energy harvesting. *Journal of Micromechanics and Microengineering* 2016;26. <https://doi.org/10.1088/0960-1317/26/10/103001>.
- [39]Wang ZL, Jiang T, Xu L. Toward the blue energy dream by triboelectric nanogenerator networks. *NanoEnergy* 2017;39:9–23. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2017.06.035>.
- [40]Chiu M-C, Karkoub M, Her M-G. Energy harvesting devices for subsea sensors. *Renew Energy* 2017;101:1334–47. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.10.018>.
- [41]Townsend N. In situ results from a new energy scavenging system for an autonomous underwater vehicle. *OCEANS 2016 MTS/IEEE Monterey*, OCE 2016, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.; 2016. <https://doi.org/10.1109/OCEANS.2016.7761200>.
- [42]Li H, Wu X, Zhang Z, Tan X, Pan Y, Dai C, et al. An extended-range wave-powered autonomous underwater vehicle applied to underwater wireless sensor networks. *IScience* 2022;25:104738. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2022.104738>.
- [43]Ding W, Song B, Mao Z, Wang K. Experimental investigation on an ocean kinetic energy harvester for underwater gliders. *2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE 2015*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.; 2015, p. 1035–8. <https://doi.org/10.1109/ECCE.2015.7309802>.
- [44]von Büren T, Tröster G. Design and optimization of a linear vibration-driven electromagnetic micro-power generator. *Sens Actuators A Phys* 2007;135:765–75. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2006.08.009>.
- [45]Mann BP, Sims ND. Energy harvesting from the nonlinear oscillations of magnetic levitation. *J Sound Vib* 2009;319:515–30. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2008.06.011>.
- [46]Shahruz SM. Design of mechanical band-pass filters for energy scavenging. *J Sound Vib* 2006;292:987–98. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2005.08.018>.
- [47]Shahruz SM. Limits of performance of mechanical band-pass filters used in

- energy scavenging. *J Sound Vib* 2006;293:449–61. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2005.09.022>.
- [48] Ghodssi R, Transducer Research Foundation, International Workshop on Micro and Nanotechnology for Power Generation and Energy Conversion Applications (9 2009.12.01-04 Washington DC), PowerMEMS (9 2009.12.01-04 Washington DC). Technical digest : Washington, DC, USA, December 1-4, 2009. Transducer Research Foundation; 2009.
- [49] Robertson W, Cazzolato B, Zander A. Axial force between a thick coil and a cylindrical permanent magnet: optimising the geometry of an electromagnetic actuator. n.d.
- [50] Sneller AJ, Mann BP. On the nonlinear electromagnetic coupling between a coil and an oscillating magnet. *J Phys D Appl Phys* 2010;43. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/43/29/295005>.
- [51] Mann BP, Owens BA. Investigations of a nonlinear energy harvester with a bistable potential well. *J Sound Vib* 2010;329:1215–26. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2009.11.034>.
- [52] Uluşan H, Yaşar O, Zorlu Ö, Kūlah H. Optimized electromagnetic harvester with a non-magnetic inertial mass. *Procedia Eng*, vol. 120, Elsevier Ltd; 2015, p. 337–40. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.629>.
- [53] Kecik K, Mitura A, Lenci S, Warminski J. Energy harvesting from a magnetic levitation system. *Int J Non Linear Mech* 2017;94:200–6. <https://doi.org/10.1016/j.ijnonlinmec.2017.03.021>.
- [54] Bobryk R v., Yurchenko D. On enhancement of vibration-based energy harvesting by a random parametric excitation. *J Sound Vib* 2016;366:407–17. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2015.11.033>.
- [55] Zhao X, Cai J, Guo Y, Li C, Wang J, Zheng H. Modeling and experimental investigation of an AA-sized electromagnetic generator for harvesting energy from human motion. *Smart Mater Struct* 2018;27. <https://doi.org/10.1088/1361-665X/aacdc4>.
- [56] Halim MA, Cho H, Salauddin M, Park JY. A miniaturized electromagnetic vibration energy harvester using flux-guided magnet stacks for human-body-induced motion. *Sens Actuators A Phys* 2016;249:23–31. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2016.08.008>.
- [57] Carneiro P, Soares dos Santos MP, Rodrigues A, Ferreira JAF, Simões JAO, Marques AT, et al. Electromagnetic energy harvesting using magnetic levitation architectures: A review. *Appl Energy* 2020;260. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114191>.
- [58] Toma DM, del Rio J, Carbonell-Ventura M, Masalles JM. Underwater energy harvesting system based on plucked-driven piezoelectrics. *MTS/IEEE OCEANS 2015 - Genova: Discovering Sustainable Ocean Energy for a New World*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.; 2015. <https://doi.org/10.1109/OCEANS-Genova.2015.7271599>.
- [59] Zhao L-C, Zou H-X, Xie X, Guo D-H, Gao Q-H, Wu Z-Y, et al. Mechanical intelligent wave energy harvesting and self-powered marine environment monitoring. *Nano Energy* 2023; 108:108222. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2023.108222>.
- [60] Joyce BS, Inman DJ, Kasarda ME, Tarazaga PA. Development of an Electromagnetic Energy Harvester for Monitoring Wind Turbine Blades. 2011.
- [61] Jadidi P, Zeinoddini M. Influence of hard marine fouling on energy harvesting from Vortex-Induced Vibrations of a single-cylinder. *Renew Energy* 2020;152:516–28. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.01.083>.
- [62] Joos J, Paul O. Spherical magnetic energy harvester with three orthogonal coils.

- 2015 IEEE SENSORS, vol. 1, IEEE; 2015, p. 1–4. <https://doi.org/10.1109/ICSENS.2015.7370662>.
- [63]Camacho JM, Sosa V. Alternative method to calculate the magnetic field of permanent magnets with azimuthal symmetry. *Revista Mexicana de Fisica E* 2013;59.
- [64]Levin Y, da Silveira FL, Rizzato FB. Electromagnetic braking: A simple quantitative model. *Am J Phys* 2006;74. <https://doi.org/10.1119/1.2203645>.
- [65]Donoso G, Ladera CL, Martín P. Magnet fall inside a conductive pipe: Motion and the role of the pipe wall thickness. *Eur J Phys* 2009;30:855–69. <https://doi.org/10.1088/0143-0807/30/4/018>.
- [66]Silva N, Santos P, Morais R, Frias C, Ferreira J, Ramos A, et al. A VIBRATION-BASED ENERGY HARVESTING SYSTEM FOR IMPLANTABLE BIOMEDICAL TELEMETRY SYSTEMS. *Proceedings of the International Conference on Biomedical Electronics and Devices, SciTePress - Science and Technology Publications*; 2011, p. 329–32. <https://doi.org/10.5220/0003134103290332>.
- [67]Matos T, Faria CL, Martins MS, Henriques R, Gomes PA, Goncalves LM. Development of a cost-effective optical sensor for continuous monitoring of turbidity and suspended particulate matter in marine environment. *Sensors (Switzerland)* 2019;19. <https://doi.org/10.3390/s19204439>.
- [68]<http://www.wolfdynamics.com/training/CFMESH/cfmesh2017>. Advanced meshing using OpenFOAM® technology: cfMesh. 2014.
- [69]<http://https://www.ipma.pt/pt/maritima/costeira>. Período de ondas, consultado em 2022 e 2023.

ANEXO I Cover page, Sensors, Volume 22, Issue 4



Figura cover page da revista sensors

ANEXO II - Valores do fluxo magnético

Valores do fluxo magnético Vs distância da bobina para geometrias de magnetos diferentes com espessura de 10 mm.

	Distância (mm)					
Geometria (espessura de 10 mm)	0	10	20	30	40	50
Bloco 30x30	0,329	0,157	0,066	0,031	0,017	0,01
Anel 30 (Diâmetro interno de 10 mm)	0,222	0,112	0,052	0,024	0,012	0,007
Esfera 30	0,875	0,11	0,033	0,014	0,007	0,004
Disco 30	0,366	0,162	0,062	0,028	0,014	0,008

	Distância (mm)					
Geometria (espessura de 10 mm)	0	10	20	30	40	50
Bloco 20x20	0,417	0,125	0,04	0,016	0,008	0,005
Anel 20 (Diâmetro interno de 10 mm)	0,122	0,074	0,025	0,01	0,005	0,004
Esfera 20	0,875	0,11	0,074	0,014	0,007	0,004
Disco 20	0,466	0,123	0,036	0,014	0,007	0,004

	Distância (mm)					
Geometria (espessura de 10 mm)	0	10	20	30	40	50
Bloco 30x30	0,329	0,157	0,066	0,031	0,017	0,01
Bloco 20x20	0,417	0,125	0,04	0,016	0,008	0,005
Bloco 10x10	0,507	0,053	0,012	0,005	0,002	0,001

	Distância (mm)					
Geometria (espessura de 10 mm)	0	10	20	30	40	50
Bloco 10x10	0,507	0,053	0,012	0,005	0,002	0,001
Anel 10 (Diâmetro interno de 5 mm)	0,047	0,035	0,008	0,003	0,001	0,001
Esfera 10	0,87	0,032	0,007	0,003	0,001	0,001
Disco 10	0,588	0,05	0,011	0,004	0,002	0,001

	Distância (mm)					
Geometria (espessura de 10 mm)	0	10	20	30	40	50
Disco 30	0,366	0,162	0,062	0,028	0,014	0,008
Disco 20	0,466	0,123	0,036	0,014	0,007	0,004
Disco 10	0,588	0,05	0,011	0,004	0,002	0,001

	Distância (mm)					
Geometria (espessura de 10 mm)	0	10	20	30	40	50
Bloco 30x30	0,329	0,157	0,066	0,031	0,017	0,01
Disco 30	0,366	0,162	0,062	0,028	0,014	0,008

ANEXO IIA Tabela de cálculo da tensão da bobina

Tabela usada para o cálculo da tensão da bobina, através da segunda fórmula do fator de acoplamento. Estão os valores para bobina 2, mas estes não foram calculados.

Variáveis	Valor	Descrição
μ_0	1,2566E-06	Permeability constant for free space (NA^{-2} or H/m)
m	7,421	Magnetic dipole moment, A-m ²
a1 Coil 1	0,018	Inner radius coil, m
a2 Coil 1	0,024	Outer radius coil, m
c1 Coil 1	0,055	Minimum coil position, m
c2 Coil 1	0,065	Maximum coil position, m
r1		Minimum radius, m
r2		Maximum radius, m
rs Coil 1		Radial position of magnet
Rcoil 1	130	Resistor of coil 1, Ω
Rcoil 2	130	Resistor of coil 2, Ω
Rload		Load, Ω
Lcoil 1		Inductance of coil 1, Henry
Lcoil 2		Inductance of coil 2, Henry
lwire coil 1	304,449	Length of wire for AWG 32, m
FF coil 1		Coil fill factor
Br	1,32	Residual flux Magnet, T
Vm	7,065 E-06	Volume of magnet, m ³
Dm	0,03	Diameter of magnet, m
M	0,0537	Mass of magnet, Kg
hm	0,01	Height of magnet, m
Hcoil1	0,01	Height of coil
Hcoil2	0,015	
Dwire	0,0002	Diameter of wire, m
Vcoil 1	7,912E-06	Coil 1 volume, m ³
Vcoil 2	6,146E-05	Coil 2 volume, m ³
Vwire 1	9,559E-06	Volume wire
Vwire 2	9,559E-06	Volume Wire
f(a2, c2) coil 1	2,718	Formula 1
f(a2, c1) coil 1	2,876	Formula 2
f(a1, c2) coil 1	2,726	Formula 3
f(a1, c1) coil 1	2,889	Formula 4
α coil 1	0,836	Fator de acoplamento
a3 Coil 2	0,036	Inner radius coil, m
a4 Coil 2	0,051	Outer radius coil, m
c3 Coil 2	0,08	Minimum coil position, m
c4 Coil 2	0,095	Maximum coil position, m

lwire coil 2	304,449	Leng of wire for AWG 32, m
FF1	1,208	Fill Factor coil 1
FF2	0,1555	Fill Factor coil 2
rs Coil 2	0,09	Radial position of magnet
f (a4, c4) coil 2	9,311	
f (a4, c3) coil 2	7,918	
f (a3, c4) coil 2	8,960	
f (a3, c3) coil 2	7,561	
α coil 2	-0,142	

Expressão utilizada:

$$\alpha(r) = \frac{0.5\mu_0 m l_c}{V_{Bob}} \left\{ \frac{R}{\sqrt{R^2 + (Z0 - r)^2}} - \ln(\sqrt{R^2 + (Z0 - r)^2} + r) \right\} l_{Z0=Z2}^{Z3} l_{R=R1}^{R2}$$

ANEXO III Parâmetros simulações

1. Parâmetros da simulação:

Tabela I
Valores de entrada

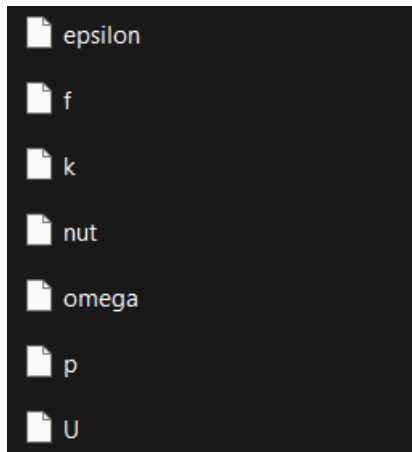
	$U(\text{m/s})$	$It(\%)$	$lt(\text{m})$	$Lc(\text{m})$	$\nu(\text{m}^2/\text{s})$	C_μ
1	0,1	0,57735	0,055	0,26	0,00000117	0,09
2	0,2	0,57735	0,055	0,26	0,00000117	0,09
3	0,25	0,57735	0,055	0,26	0,00000117	0,09
4	0,3	0,57735	0,055	0,26	0,00000117	0,09
5	0,5	0,57735	0,055	0,26	0,00000117	0,09

Tabela II
Parâmetros da simulação

	$K(\text{m}^2/\text{s}^2)$	$\varepsilon(\text{m}^2/\text{s}^3)$	$\omega(1/\text{s})$	Re
1	5,00E-07	5,79E-10	0,012856	22 222,22
2	2,00E-06	4,63E-09	0,025713	44 444,44
3	3,12E-06	9,04E-09	0,032141	55 555,55
4	4,50E-06	1,56E-08	0,038569	66 666,66
5	1,25E-05	7,23E-08	0,064282	111 111,10

Diretoria 0

Esta diretoria irá conter os ficheiros com os valores das tabelas anteriores de acordo com as velocidades consideradas para a simulação. Exemplo de uma das simulações, com os valores a serem usados de U (velocidade), K, p, ω



```
/*-----*- C++ -*-*/
=====
\\ / F ield | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
\\ / O peration | Website: https://openfoam.org
\\ / A nd | Version: 7
\\ / M anipulation |
/*-----*/
FoamFile
```

```

{
  version  2.0;
  format   ascii;
  class    volScalarField;
  location "0";
  object   epsilon;
}
//*****
dimensions  [0 2 -3 0 0 0 0];
internalField uniform 7.231763783057398e-8;
boundaryField
{
  inlet                                     (entrada)
  {
    type      fixedValue;
    value     uniform 7.231763783057398e-8;
  }
  outlet                                     (saída)
  {
    type      zeroGradient;
  }
  perfil                                     ( protótipo)
  {
    type      epsilonWallFunction;
    value     uniform 7.231763783057398e-8;
  }
  bottom                                     (parede inferior)
  {type      epsilonWallFunction;
    value     uniform 7.231763783057398e-8;
  }
  top                                     (parede superior)
  {  type      epsilonWallFunction;
    value     uniform 7.231763783057398e-8;
  }
}

```

```

right                                     (parede direita)
{
    type      epsilonWallFunction;
    value     uniform 7.231763783057398e-8;
}

left                                     (parede esquerda)
{
    type      epsilonWallFunction;
    value     uniform 7.231763783057398e-8;
}

// ***** //
/*-----*- C++ -*-----*\
===== |
\\ / Field | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
\\ / Operation | Website: https://openfoam.org
\\ / And | Version: 7
\\ / Manipulation |
\*-----*/

FoamFile
{
    version 2.0;
    format ascii;
    class volScalarField;
    location "0";
    object k;
}

// ***** //
dimensions [0 2 -2 0 0 0 0];
internalField uniform 0.00001249998834375;
boundaryField
{
    inlet
    {
        type      fixedValue;
        value     $internalField;
    }
}

```

```

    }
    outlet
    {
        type        zeroGradient;
    }
    perfil
    {
        type        kqRWallFunction;
        value        $internalField;
    }
    top
    {
        type        zeroGradient;
    }
    bottom
    {
        type        zeroGradient;
    }
    right
    {
        type        zeroGradient;
    }
    left
    {
        type        zeroGradient;

    }

}

// *****
/*-----*- C++ -*-----*\
===== |
\\ / F ield | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
\\ / O peration | Website: https://openfoam.org
\\ / A nd | Version: 7
\\ / M anipulation |
/*-----*-*/

FoamFile

```

```

{
    version 2.0;
    format ascii;
    class volScalarField;
    location "0";
    object omega;
}
// ***** //

dimensions [0 0 -1 0 0 0];
internalField uniform 0.06428240468163036;
boundaryField
{
    inlet
    {
        type fixedValue;
        value $internalField;
    }
    outlet
    {
        type zeroGradient;
    }
    perfil
    {
        type omegaWallFunction;
        value $internalField;
    }
    top
    {
        type zeroGradient;
    }
    bottom
    {
        type zeroGradient;
    }
    right
    {
        type zeroGradient;
    }
    left
    {
        type zeroGradient;
    }
}
// ***** //

-----*- C++ -*-----*\
=====
\\ / Field | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
\\ / Operation | Website: https://openfoam.org
\\ / And | Version: 7
\\ / Manipulation |

```

```
\*-----*/
FoamFile
{
    version    2.0;
    format     ascii;
    class      volScalarField;
    object     p;
}
// ***** //

dimensions    [0 2 -2 0 0 0];

internalField uniform 0;
boundaryField
{
    inlet
    {
        type      zeroGradient;
    }

    outlet
    {
        type      fixedValue;
        value      $internalField;
    }

    top
    {
        type      fixedValue;
        value      $internalField;
    }
    bottom
    {
        type      fixedValue;
        value      $internalField;
    }

    perfil
    {
        type      zeroGradient;
    }

    right
    {
        type      fixedValue;
        value      $internalField;
    }

    left
    {
        type      fixedValue;

```

```

    value      $internalField;
}
};

// *****
//-----*- C++ -*-----*\
=====
\\ / F ield      | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
\\ / O peration  | Website: https://openfoam.org
\\ / A nd        | Version: 7
\\ / M anipulation |
\*-----*/
FoamFile
{
    version 2.0;
    format  ascii;
    class   volVectorField;
    object  U;
}
// *****
dimensions [0 1 -1 0 0 0];

internalField uniform (0.5 0 0);

boundaryField
{
    Inlet
    {
        type      freestream;
        freestreamValue $internalField;
    }
    outlet
    {
        type      zeroGradient;
    }
    perfil
    {
        type fixedValue;
        value uniform (0 0 0);
    }
    top
    {
        type      zeroGradient;
    }
    bottom
    {
        type      zeroGradient;
    }
    right
    {

```

```

        type          zeroGradient;
    }

    left
    {
        type          zeroGradient;

    }
}
// ***** //

```

Diretoria constant

 constant

Nesta diretoria, estão os ficheiros das propriedades do fluido e modelo de simulação

 transportProperties
 turbulenceProperties

```

/*-----*- C++ -*-----*\
=====
\\ / F i e l d      | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
\\ / O p e r a t i o n | Website: https://openfoam.org
\\ / A n d          | Version: 7
\\ \ M a n i p u l a t i o n |
\*-----*/
FoamFile
{
    version 2.0;
    format  ascii;
    class   dictionary;
    location "constant";
    object  transportProperties;
}
// ***** //

```

transportModel Newtonian;

```

nu      [0 2 -1 0 0 0 0] 0.00000117;
// ***** //
/*-----*- C++ -*-----*\
=====
\\ / F i e l d      | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
\\ / O p e r a t i o n | Website: https://openfoam.org
\\ / A n d          | Version: 7
\\ \ M a n i p u l a t i o n |
\*-----*/
FoamFile
{
    version 2.0;
    format  ascii;
    class   dictionary;
    location "constant";
}

```

```

    object    turbulenceProperties;
}
// *****

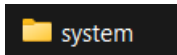
simulationType RAS;

RAS
{
    // Tested with kEpsilon, realizableKE, kOmega, kOmegaSST, v2f,
    // ShihQuadraticKE, LienCubicKE.
    RASModel    kOmegaSST;

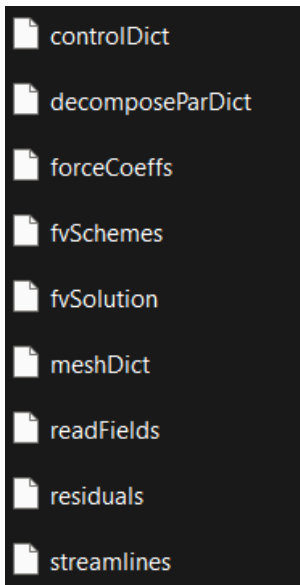
    turbulence    on;

    printCoeffs    on;
}
// *****
Diretoria systems

```



Nesta diretoria, serão utilizados os ficheiros:



```

*-----*- C++ -*-*\
=====
\\  / F ield    | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
\\  / O peration | Website: https://openfoam.org
\\  / A nd      | Version: 7
\\  / M anipulation |
\*-----*/

```

FoamFile

```
{
```

```

version 2.0;
format  ascii;
class   dictionary;
location "system";
object  controlDict;
}
// ***** //

application  pimpleFoam;

startFrom    latestTime; //latestTime

startTime    0;

stopAt       endTime ;

endTime      68.8 ;

deltaT       0.1 ;

writeControl  timeStep;

writeInterval 1 ;

purgeWrite    0;

writeFormat   ascii;

writePrecision 6;

writeCompression on;

timeFormat    general;

timePrecision 6;

runTimeModifiable true;

functions
{
    #includeFunc residuals
        #include "forceCoeffs"
    }
// ***** //
/*-----*- C++ -*-----*\
|=====|
|\\ / F ield | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
| \\ / O peration | Version: 4.x |
| \\ / A nd | Web: www.OpenFOAM.org |
| \\ / M anipulation |
\*-----*/

```

```
FoamFile
{
    version 2.0;
    format  ascii;
    class   dictionary;
    note    "mesh decomposition control dictionary";
    object  decomposeParDict;
}
// *****

numberOfSubdomains 3;


    level0
    {
        numberOfSubdomains 64;
        method scotch;
    }
    level1
    {
        numberOfSubdomains 6;
        method scotch;
    }
}*/

/*
hierarchicalCoeffs
{
    n      (1 2 1);
    delta  0.001;
    order  xyz;
}

metisCoeffs
{

    processorWeights
    (
        1
        1
        1
        1
    );

}

scotchCoeffs
{
}
```

```

*/
/*
manualCoeffs
{
    dataFile "decompositionData";
}

structuredCoeffs
{
    patches (movingWall);

    method scotch;
}

*/
// ***** //
/*-----* C++ -*-----*\
=====
\\ / F ield | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
\\ / O peration | Website: https://openfoam.org
\\ / A nd | Version: 7
\\ / M anipulation |
-----
Description
Calculates pressure and viscous forces over specified patches for a case
where the solver is incompressible (pressure is kinematic, e.g. m^2/s^2).

\*-----*/
forceCoeffs1
{
    type forceCoeffs;

    libs ("libforces.so");

    writeControl timeStep;
    timeInterval 1;

    log yes;

    patches ("perfil*");
    rho rhoInf; // Indicates incompressible
    rhoInf 1000; // Redundant for incompressible
    liftDir (0 0 1);
    dragDir (1 0 0);
    CofR (1.505 1.205 1.205); // Axle midpoint on ground
    pitchAxis (0 1 0);
    magUInf 0.5;

    lRef 0.260;

```

```

Aref          0.0346185;

/*
binData
{
    nBin      20;    // output data into 20 bins
    direction (1 0 0); // bin direction
    cumulative yes;
}
*/

}

// ***** //

/*-----*- C++ -*-----*\
===== |
\\ / F ield    | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
\\ / O peration | Website: https://openfoam.org
\\ / A nd      | Version: 7
\\ / M anipulation |
\*-----*/

FoamFile
{
    version 2.0;
    format  ascii;
    class   dictionary;
    location "system";
    object  fvSchemes;
}

// ***** //

ddtSchemes
{
    default steadyState;
}

gradSchemes

```

```
{
    default    Gauss linear;
    grad(U)    cellLimited Gauss linear 1;
}

divSchemes
{
    default    none;
    div(phi,U)  bounded Gauss linearUpwindV grad(U);
    turbulence  bounded Gauss upwind;

    div(phi,k)   bounded Gauss upwind;
    div(phi,omega)  bounded Gauss upwind;
    div((nuEff*dev2(T(grad(U))))) Gauss linear;

}

laplacianSchemes
{
    default    Gauss linear corrected;

}

interpolationSchemes
{
    default    linear; //cubic
}

snGradSchemes
{
    default    corrected;
}
```

```
wallDist
{
    method meshWave;
}

// ***** //
/*----- C++ -----*\
===== |
\\ / F i e l d      | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
\\ / O p e r a t i o n | Website: https://openfoam.org
\\ / A n d          | Version: 7
\\ / M a n i p u l a t i o n |
\*-----*/
FoamFile
{
    version 2.0;
    format ascii;
    class dictionary;
    location "system";
    object fvSolution;
}
// ***** //

solvers
{
    p
    {
        solver GAMG;
        tolerance 1e-08;
        relTol 0;
        smoother GaussSeidel;
    }
}
```

```
"(U|k|omega)"
{
    solver      smoothSolver;
    smoother    symGaussSeidel;
    tolerance    1e-08;
    relTol      0;
    nSweeps      1;
}
}
```

SIMPLE

```
{
    nNonOrthogonalCorrectors 0;
    consistent    yes;
```

residualControl

```
{
    p      1e-6;
    U      1e-7;
    "(k|omega)" 1e-7;
}
}
```

relaxationFactors

```
{

/* fields
{
    p      0.1;
    U      0.1;
    "(k|epsilon|omega|f|v2)" 0.1;
} */
equations
{
```

```

U      0.9; // 0.9 mais estável 0.95 mais convergente
k      0.7; // 0.9 mais estável 0.95 mais convergente
omega  0.7;

}

}

// ***** //

```

Ficheiro da malha a ser utilizada pelo cartesianMesh

```

/*-----*- C++ -*-----*\
|=====|
|\ \ / F i e l d | c f M e s h : A l i b r a r y f o r m e s h g e n e r a t i o n |
| \ \ / O p e r a t i o n |
| \ \ / A n d | A u t h o r : F r a n j o J u r e t i c |
| \ \ / M a n i p u l a t i o n | E - m a i l : f r a n j o . j u r e t i c @ c - f i e l d s . c o m |
\*-----*/

```

FoamFile

```

{
  version 2.0;
  format ascii;
  class dictionary;
  location "system";
  object meshDict;
}

// ***** //

```

surfaceFile "perfilBody.fms";

```

maxCellSize 0.25; //[m]
minCellSize 0.25; //[m]
boundaryCellSize 0.25; //[m]

```

localRefinement

```

{

```

```
    perfil
    {
        additionalRefinementLevels 5;
        refinementThickness 0.05; //[m]
    }
}

boundaryLayers
{

    patchBoundaryLayers
    {
        perfil
        {
            nLayers 5;
            thicknessRatio 1.2;
            allowDiscontinuity 1;
        }
    }

    optimiseLayer 1;

    optimisationParameters
    {
        nSmoothNormals          5;
        relThicknessTol          0.4;
        featureSizeFactor        0.8;
        reCalculateNormals        1;
        maxNumIterations          5;
    }

}

renameBoundary
```

```
{
  defaultType  wall;

  newPatchNames
  {
    "xMax"
    {
      newName outlet;
      type  patch;
    }
    "xMin"
    {
      newName inlet;
      type  patch;
    }
    "yMax"
    {
      newName left;
      type  wall;
    }
    "yMin"
    {
      newName right;
      type  wall;
    }
    "zMax"
    {
      newName top;
      type  wall;
    }
    "zMin"
    {
      newName bottom;
      type  wall;
    }
  }
}
```

```

    }

}

}

// ***** //
/*-----*- C++ -*-----*\
===== |
\\ / Field | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
\\ / Operation | Website: https://openfoam.org
\\ / And | Version: 7
\\ \ Manipulation |
-----

/*-----*/

readFields
{
functionObjectLibs ("libfieldFunctionObjects.so");
type readFields;
fields (p U K)

}
// ***** //
/*-----*- C++ -*-----*\
===== |
\\ / Field | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
\\ / Operation | Website: https://openfoam.org
\\ / And | Version: 7
\\ \ Manipulation |
-----

Description

For specified fields, writes out the initial residuals for the first
solution of each time step; for non-scalar fields (e.g. vectors), writes

```

the largest of the residuals for each component (e.g. x, y, z).

```
\*-----*/

#includeEtc "caseDicts/postProcessing/numerical/residuals.cfg"

fields (p U);

// ***** //
/*-----*- C++ -*-----*\
===== |
\\ / F i e l d | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
\\ / O p e r a t i o n | Website: https://openfoam.org
\\ / A n d | Version: 7
\\ / M a n i p u l a t i o n |
-----

Description

Writes out files of streamlines with interpolated field data in VTK format.

\*-----*/

direction both;

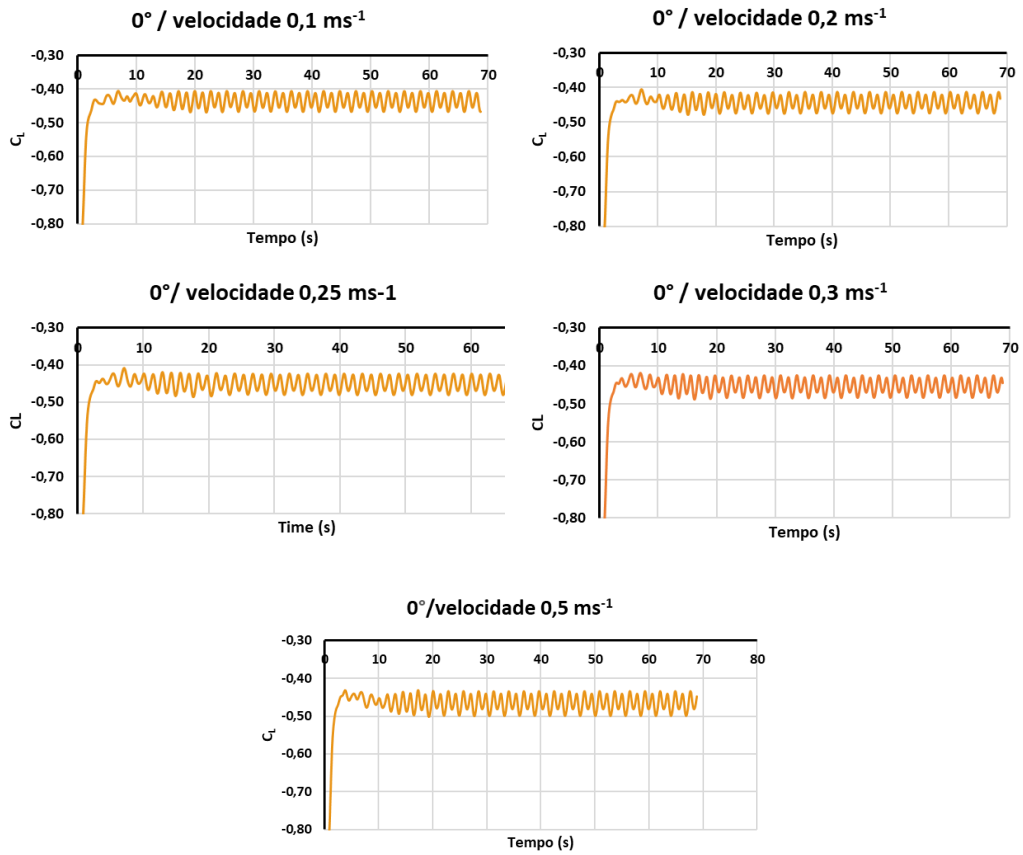
seedSampleSet
{
    type lineUniform;
    start (-0.0205 0.001 0.00001);
    end (-0.0205 0.0251 0.00001);
    nPoints 10;
    axis x;
}

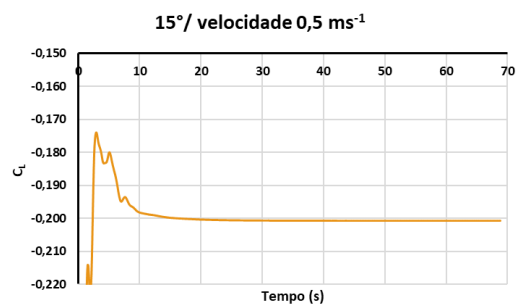
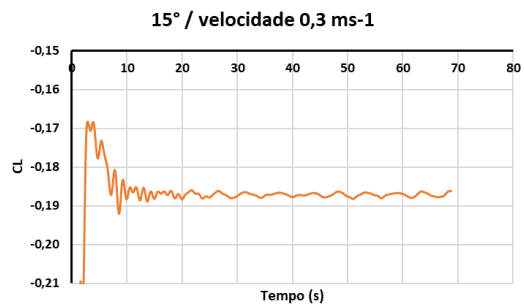
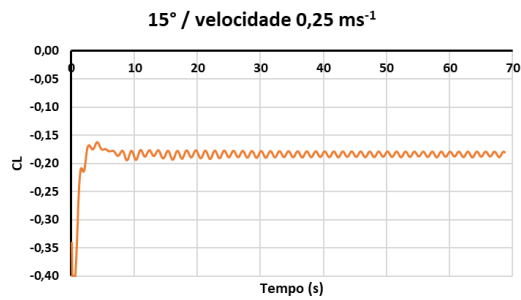
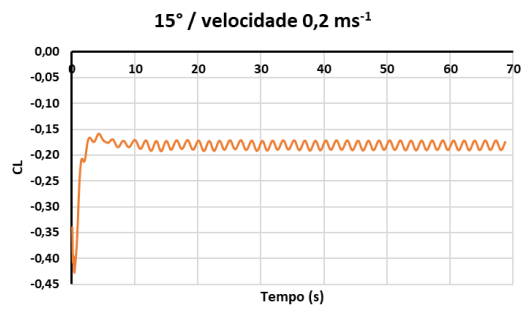
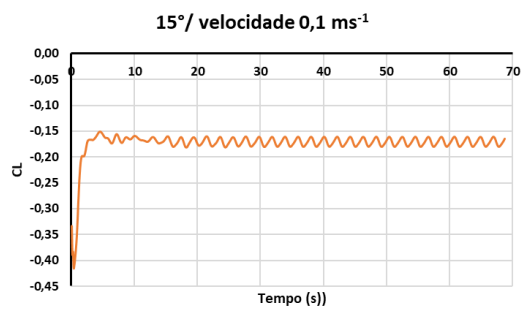
fields (p k U);

#includeEtc "caseDicts/postProcessing/visualization/streamlines.cfg"

// ***** //
```

ANEXO IIIA Gráficos do C_L para análise da oscilação





ANEXO IV Programa Arduino Nano

```
Deverá ser incluído as bibliotecas discriminadas no programa

#include "I2Cdev.h"
#include "MPU6050.h"
#include "TimerOne.h"
#include "Wire.h"
#include <SPI.h>
#include <SD.h>
#include <EEPROM.h>
#include "math.h"

#if I2CDEV_IMPLEMENTATION == I2CDEV_ARDUINO_WIRE
#endif

/*      Defines      */

#define OUTPUT_READABLE_ACCELGYRO

#define Segundo 285          //número de vezes que entrou no Timer que corresponde
a um segundo

#define Minuto 17143          //número de vezes que entrou no Timer que
corresponde a um minuto

#define MediaBobina1 545

#define MinimoBobina1 (MediaBobina1 - 20)    //valor mínimo aceitável para a
comparação com o valor recebido da bobina 1

#define MaximoBobina1 (MediaBobina1 + 20)    //valor máximo aceitável para a
comparação com o valor recebido da bobina 1

#define NumeroAmostras 5          //o número de amostrar para o qual vai gravar
depois de o valor da bobina 1 ser igual ao da comparação

#define TamanhoMatriz 30          //Tamanho da matriz em "altura"
#define TamanhoDados 7          //tamanho da matriz em "comprimento"

/*      IMU      */

MPU6050 accelgyro(0x69);
int16_t ax, ay, az;
int16_t gx, gy, gz;

/*      Cartão SD      */
```

```
File myFile;

/*      Timer      */

unsigned long TempoFicheiro = 0;    //contador para saber o número de vezes que entrou
no timer, com isto conseguimos saber que determinado valor corresponde ao valor x que entrou no
timer.

bool gravar = true;                //booleano para saber se está em modo de gravar para o
cartão

/*      Geral      */

int analog1 = A0;                  //ADC 0
int bobina1 = MediaBobina1;        //valor recebido da bobina 1
//unsigned int matriz[TamanhoMatriz][TamanhoDados];    //matriz onde grava os
valores no Timer

//unsigned long matrizLong[TamanhoMatriz][1];          //para guardar a variável que
define o tempo

unsigned int ContadorAmostras = 0;    //número de amostras que vai gravar depois
do ADC encontrar novamente o 0

int ContadorMatriz = 0;

unsigned int NumeroFicheiros = 0;    //o número sequencial que vai dar o nome
aos ficheiros

String NomeFicheiro;                //Nome do último ficheiro a ser criado

//bool blinkState = false;

const int pin = 3;
const int pin2 = 5;

float old_ax;
float old_ay;
float old_az;
float old_gx;
float old_gy;
float old_gz;
float GXX;
float Gyy;
float Gzz;

#define COEF 0.95

void setup() {
```

IMU

```

////////////////////////////////////
////////////////////////////////////

// join I2C bus (I2Cdev library doesn't do this automatically)
#if I2CDEV_IMPLEMENTATION == I2CDEV_ARDUINO_WIRE
    Wire.begin();
#elif I2CDEV_IMPLEMENTATION == I2CDEV_BUILTIN_FASTWIRE
    Fastwire::setup(400, true);
#endif

old_ax=0;
old_ay=0;
old_az=0;
old_gx=0;
old_gy=0;
old_gz=0;
GXX=0;
Gyy=0;
Gzz=0;
Serial.begin(1000000);

// initialize device
//Serial.println("Initializing I2C devices...");
accelgyro.initialize();
accelgyro.setFullScaleAccelRange(0x02);
accelgyro.setFullScaleGyroRange(0x03);

// verify connection
Serial.println("Testing device connections...");
Serial.println(accelgyro.testConnection() ? "MPU6050 connection successful" : "MPU6050
connection failed");

// configure Arduino LED pin for output
pinMode(pin, OUTPUT);
pinMode(pin2, OUTPUT);
digitalWrite(pin, LOW);

```

```
digitalWrite(pin2, LOW);
```

```

////////////////////////////////////// SD
//////////////////////////////////////
Serial.print("Initializing SD card...");
if (!SD.begin(10)) {
    Serial.println("initialization failed!");
    digitalWrite(pin, HIGH);
    delay(5000);
    EEPROM.write(0, 0);
    digitalWrite(pin, LOW);
    return;
}
else
{
    NumeroFicheiros = EEPROM.read(0);
    NomeFicheiro = String (NumeroFicheiros);
    NomeFicheiro += ".txt";
    myFile = SD.open(NomeFicheiro, FILE_WRITE);
    Serial.println("initialization done.");
    //////////////////////////////////// Timer 1
    ////////////////////////////////////
    Timer1.initialize(3500); // inicializa o Timer1 e configura para um período de 2MS
    segundos

    Timer1.attachInterrupt(aquisicao); // configura a função callback() como a função para
    ser chamada a cada interrupção do Timer1
    //////////////////////////////////// Geral
    ////////////////////////////////////
    }
    }
    void aquisicao()
    {
        digitalWrite(pin, HIGH);
        TempoFicheiro++;
    }

```

```
if (TempoFicheiro == Minuto) {
    NumeroFicheiros++;
    TempoFicheiro = 0;
    myFile.close();

    NomeFicheiro = String (NumeroFicheiros);
    NomeFicheiro += ".txt";
    myFile = SD.open(NomeFicheiro, FILE_WRITE);
    EEPROM.write(0, NumeroFicheiros);
}

bobina1 = analogRead(analog1);
myFile.print(TempoFicheiro); myFile.print("\t");
myFile.print(ax); myFile.print("\t");
myFile.print(ay); myFile.print("\t");
myFile.print(az); myFile.print("\t");
myFile.print(gx); myFile.print("\t");
myFile.print(gy); myFile.print("\t");
myFile.print(gz); myFile.print("\t");
myFile.print(bobina1); myFile.print("\t");
myFile.println("\t");
//Serial.println("NN");
digitalWrite(pin, LOW);
}

void loop() {
    void aquisicao();
    digitalWrite(pin2, !digitalRead(pin2));
    accelgyro.getMotion6(&ax, &ay, &az, &gx, &gy, &gz);
    old_ax=old_ax*COEF+ax*(1-COEF);
    old_ay=old_ay*COEF+ay*(1-COEF);
    old_az=old_az*COEF+az*(1-COEF);
    old_gx=old_gx*COEF+gx*(1-COEF);
    old_gy=old_gy*COEF+gy*(1-COEF);
    old_gz=old_gz*COEF+gz*(1-COEF);
    Gyy=(180/PI)* atan(old_ay/(sqrt(old_ax*old_ax+old_az*old_az)));
```

```
GXX=(180/PI)*atan(old_ax/(sqrt(old_ay*old_ay+old_az*old_az)));
Gzz=(180/PI)* atan(old_az/(sqrt(old_ax*old_ax+old_ay*old_ay)));
//Serial.print(" AX= "); Serial.print(float(old_ax)/4096);
//Serial.print(" Ay= "); Serial.print(float(old_ay)/4096);
//Serial.print(" AZ= "); Serial.print(float(old_az)/4096);
//Serial.print(" GX= "); Serial.print(float(old_gx)/16.4);
//Serial.print(" Gy= "); Serial.print(float(old_gy)/16.4);
//Serial.print(" GZ= "); Serial.print(float(old_gz)/16.4);
//Serial.print(" GXX= "); Serial.print (GXX);
//Serial.print(" Gyy= "); Serial.print (Gyy);
//Serial.print(" Gzz= "); Serial.print (Gzz);
//Serial.print(" BOBINE= "); Serial.print (bobina1);
    Serial.println( );
    Serial.println("L");
    digitalWrite(pin2, LOW);
}
```

ANEXO V Testes no Mar

A - Teste 07 out. 2022,10h30.

Este teste foi realizado durante a maré alta com um valor de coeficiente de maré de 90, o que representa um número elevado. A velocidade da água foi medida utilizando um medidor de Corrente TCM-4 com uma taxa de amostragem de 1 Hz, conforme ilustrado na figura A1.

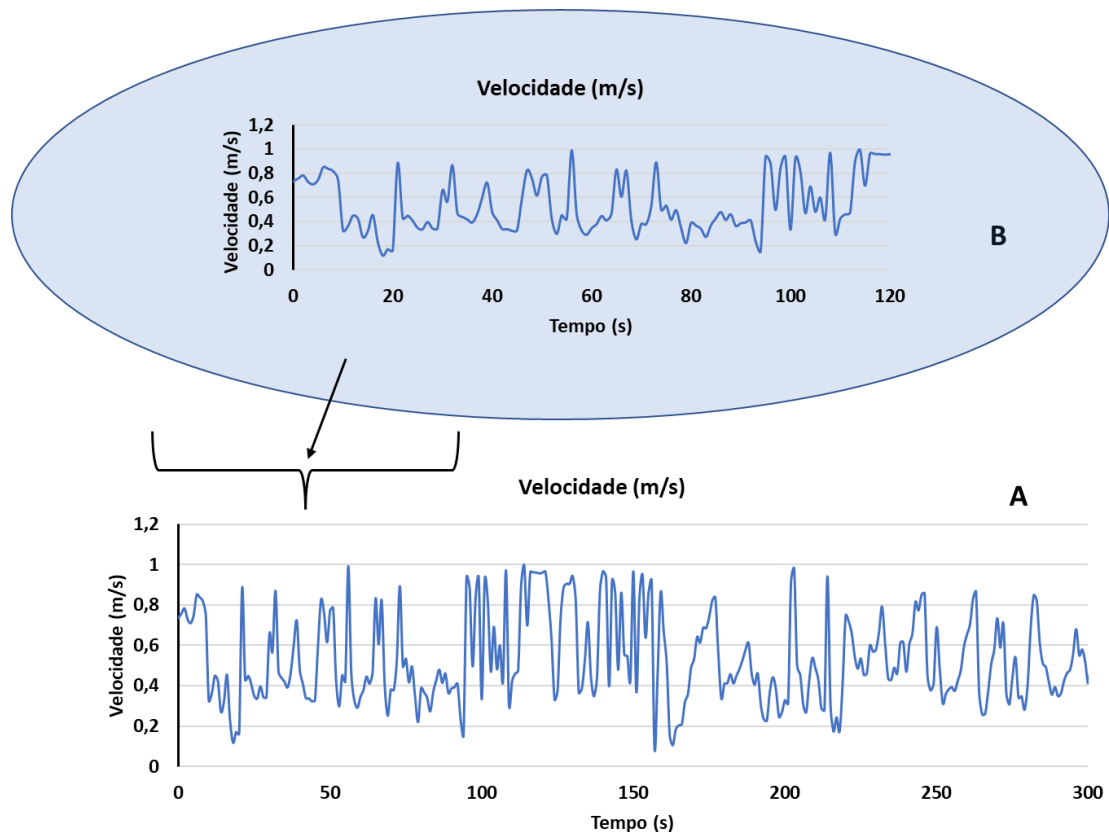


Figura A1. Perfil da velocidade da água, gráfico do artigo submetido, a) Velocidade em 300 s, b) Amostragem de 120 s.

A velocidade média de $0,62 \text{ ms}^{-1}$ foi calculada numa amostra de 3600 segundos com corrente predominante para Este.

Os mesmos parâmetros de teste anteriormente descritos foram utilizados para realizar este teste. A figura A2 apresenta 300 segundos de amostras de tensão e a aceleração nos eixos x, y e z, juntamente com os impulsos de tensão.

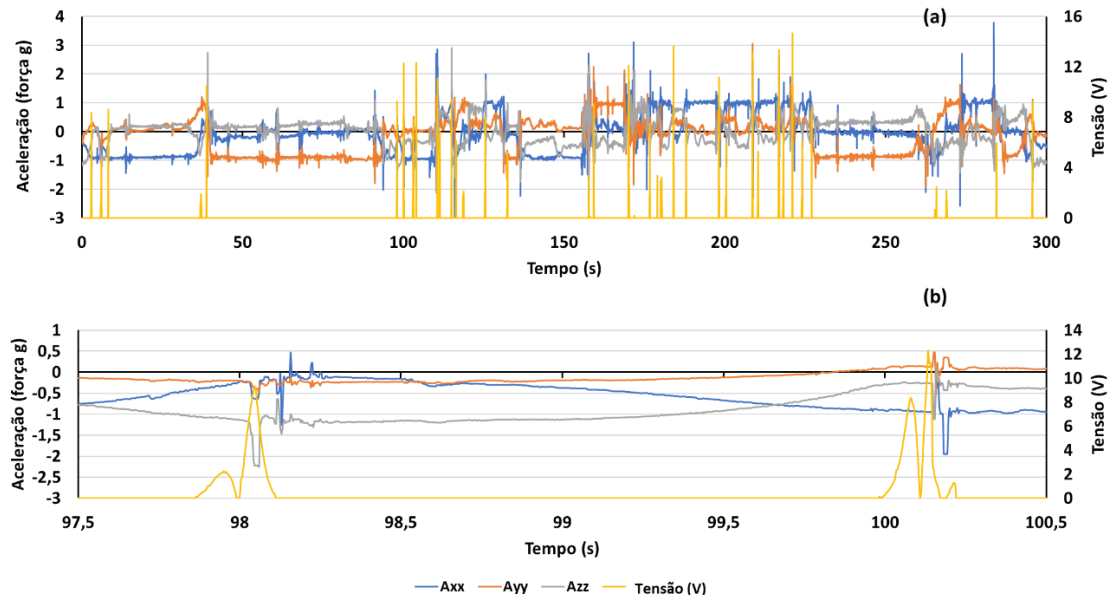


Figura A2. (a) Tensão obtida em 300s (b) Dois impulsos entre 97,5 -100,5 segundos, impulso num sentido e segundo impulso no sentido oposto.

A Figura A3 representa um ciclo da onda. Tal como nos testes anteriores, o primeiro sinal de onda é produzido à medida que o magneto passa pelas bobinas e o segundo sinal de onda ocorre quando inverte o sentido do LEG. Uma frequência de 0,055 Hz foi obtida. Com as equações consideradas para os mesmos testes e apenas tensões superiores a 3 V, a potência média foi calculada como sendo 2,61 mW.

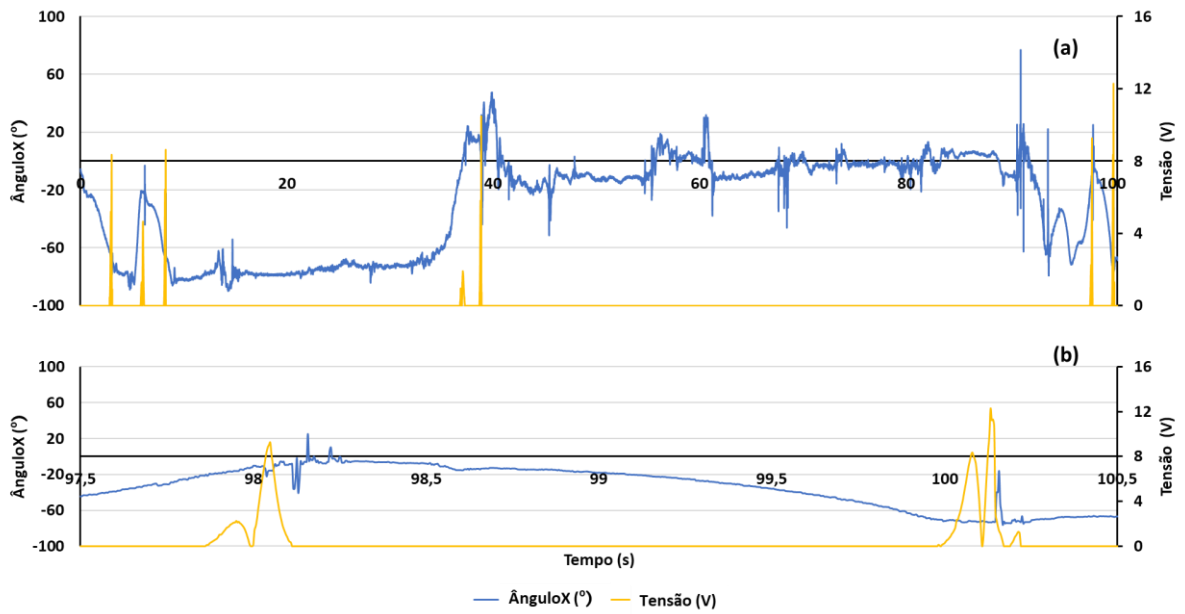


Figura A3. (a) Amostragem de 100 segundos, com variação dos ângulos, (b) Representação de um ciclo completo.

B - Teste em 14 de outubro de 2022, às 10h30

Os testes foram realizados sob a condição de maré baixa e com um coeficiente de maré de 58, considerado um valor médio. Utilizando um medidor de Corrente TCM-4 com uma taxa de amostragem de 1 Hz, a velocidade média da água foi calculada a partir de uma amostra de 1800 segundos, resultando numa velocidade média de $0,33 \text{ ms}^{-1}$.

A Figura B1 apresenta uma representação gráfica da velocidade da água ao longo de uma amostra de 300 segundos.

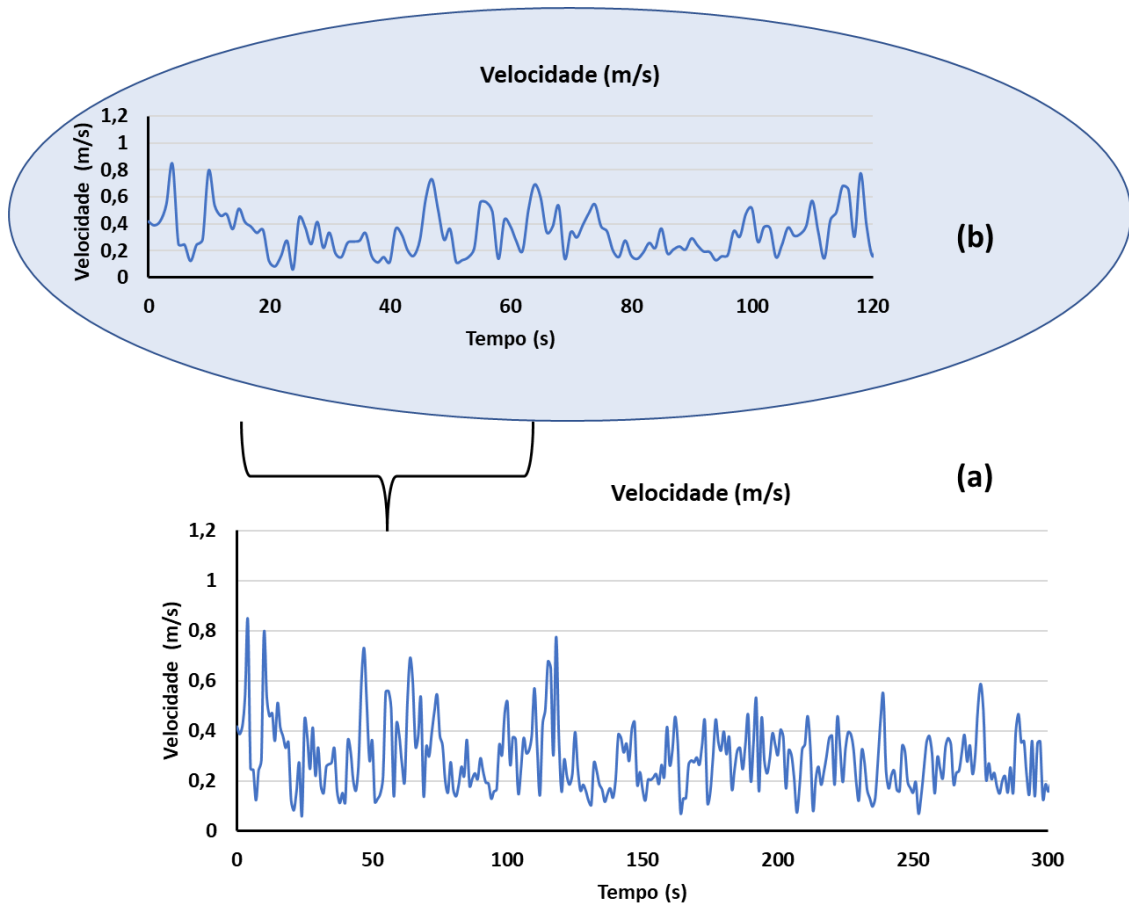


Figura B1. Perfil da velocidade da água, gráfico do artigo submetido, a) Velocidade da água em 300 s, b) Amostra de 120 s.

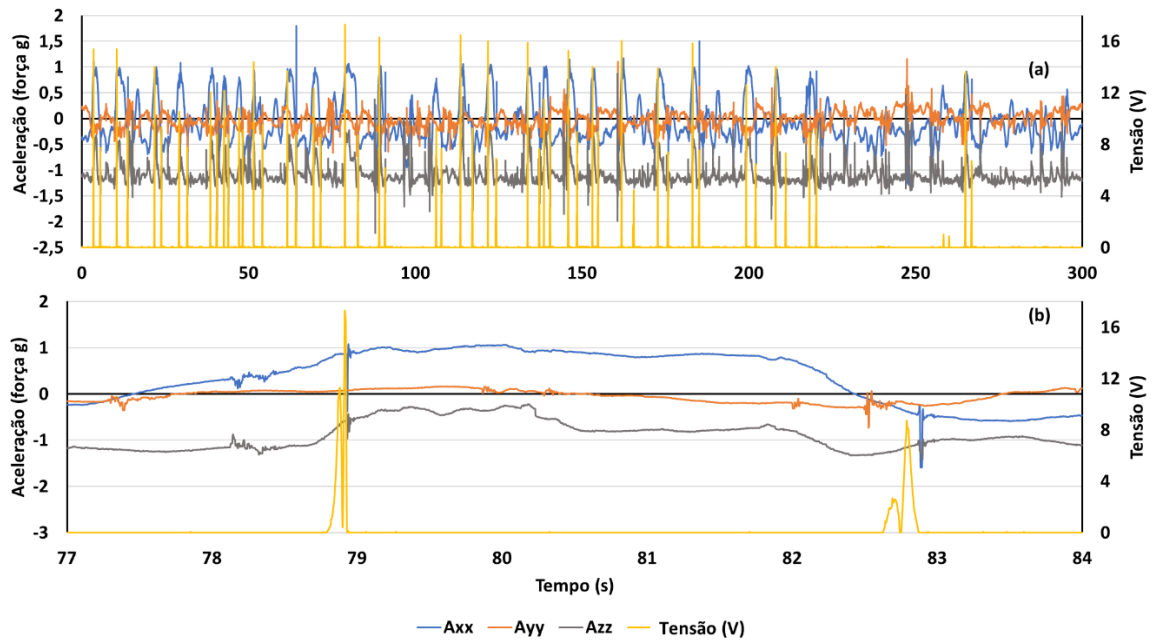


Figura B2. (a) Tensões e acelerações nos três eixos, (b) Amostragem reduzida para um ciclo completo.

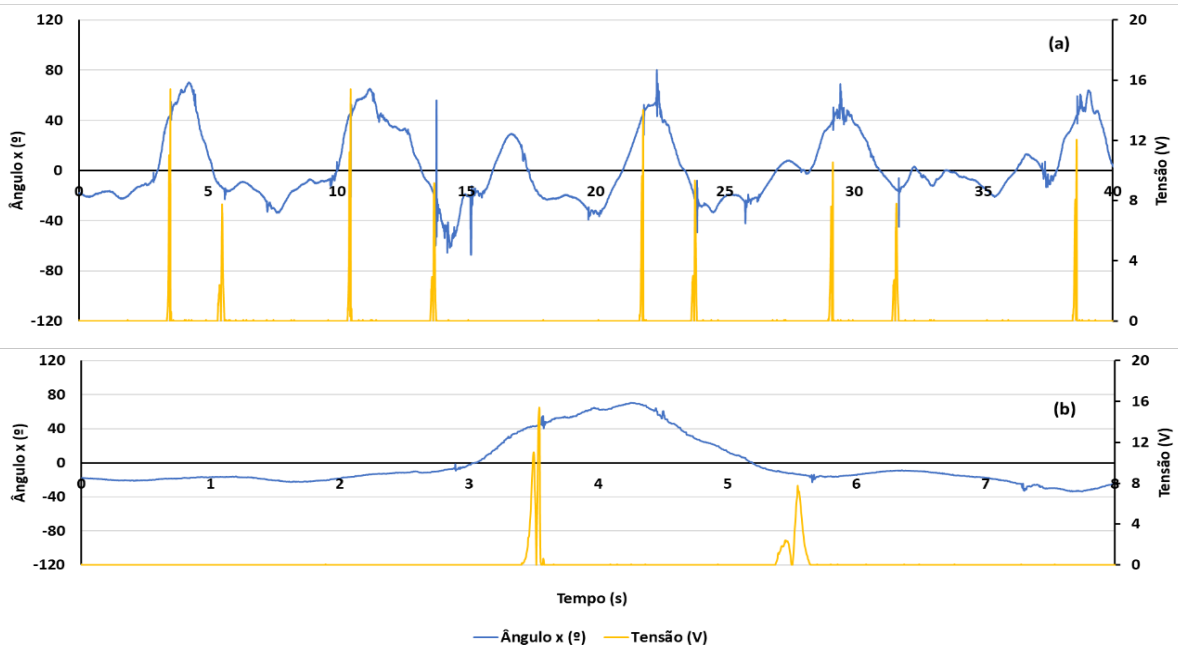


Figura B3. (a) Amostragem de vários ciclos completos, (b) Amostragem de um ciclo completo.

Para as variáveis tensão, ângulos e acelerações, são utilizados os mesmos parâmetros de amostra dos testes anteriores. A frequência obtida é de 0,087 Hz e, utilizando a expressão 54, considerando apenas tensões superiores a 3 V, a potência média calculada é de 5,5 mW.

C - Teste no oceano em 15 de novembro de 2022, às 15h30

Aplicação do gerador, com armazenamento de energia e carga de sensores.

Os testes foram realizados em condições de maré alta, com um coeficiente de maré de 33, um valor baixo. A velocidade da água não foi mensurável devido a um impacto que causou a interrupção da medição. A figura C1 evidencia a variação da tensão do condensador nessas condições oceânicas.

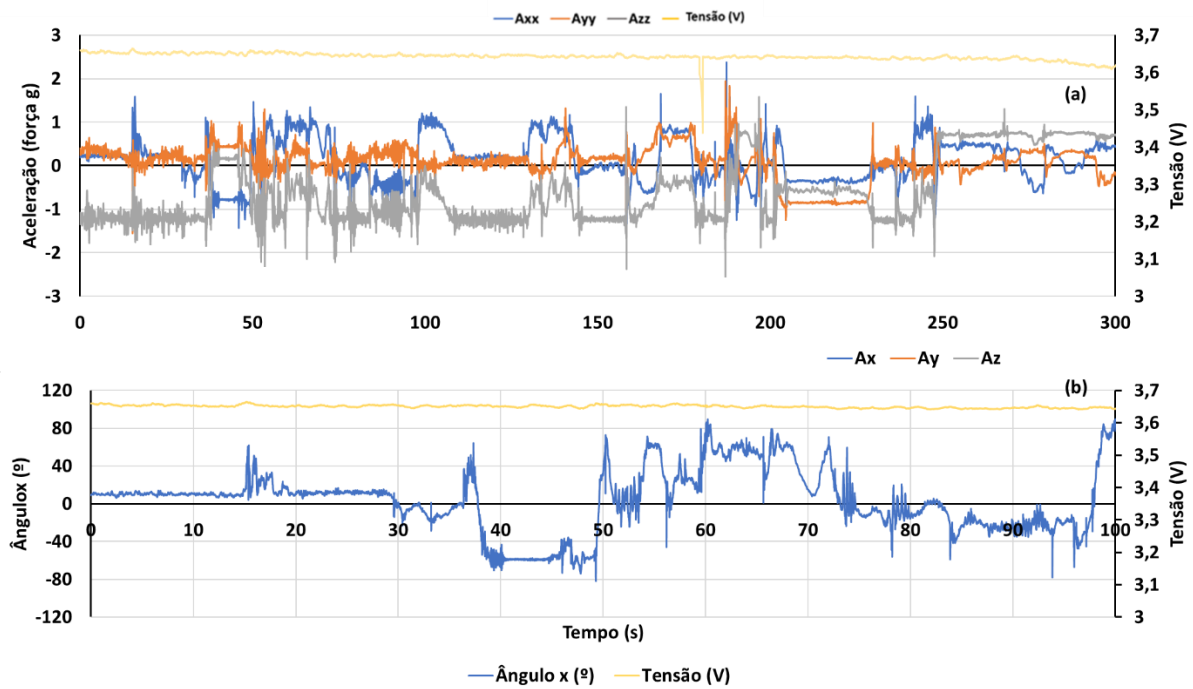


Figura C1. (a) Variação da aceleração e tensão nos três eixos, (b) Variação da tensão com o ângulo x.

A variação do eixo x é o que melhor permite observar que variações de aceleração maiores que 0,5 g produzem energia, assim como a variação do eixo z. O eixo y, por estar orientado para o lado do gerador, não permite verificar sua relação com a produção de energia. É calculada a energia mediante uma tensão inicial de 3,65 V e a uma tensão final de 3,63 V, A tabela C1 mostra a energia consumida e acumulada ao longo de 300 segundos.

Tabela C1. Energia consumida e acumulada.

Dispositivo	Potência (mW)	Energia (300s) (mJ)
Sensor	0,6	180
Condensador	-0,24	-72,8
Total produzido	0,36	107,2 mJ

O gerador produziu 107,2 mJ de energia, o que não é suficiente para atender aos requisitos do sensor. Apesar disso, o sistema ainda pode operar por um período mais longo neste dia em particular, já que produziu 59,6% da energia necessária.

D - Teste em rio em 05 de janeiro de 2023, às 10h30

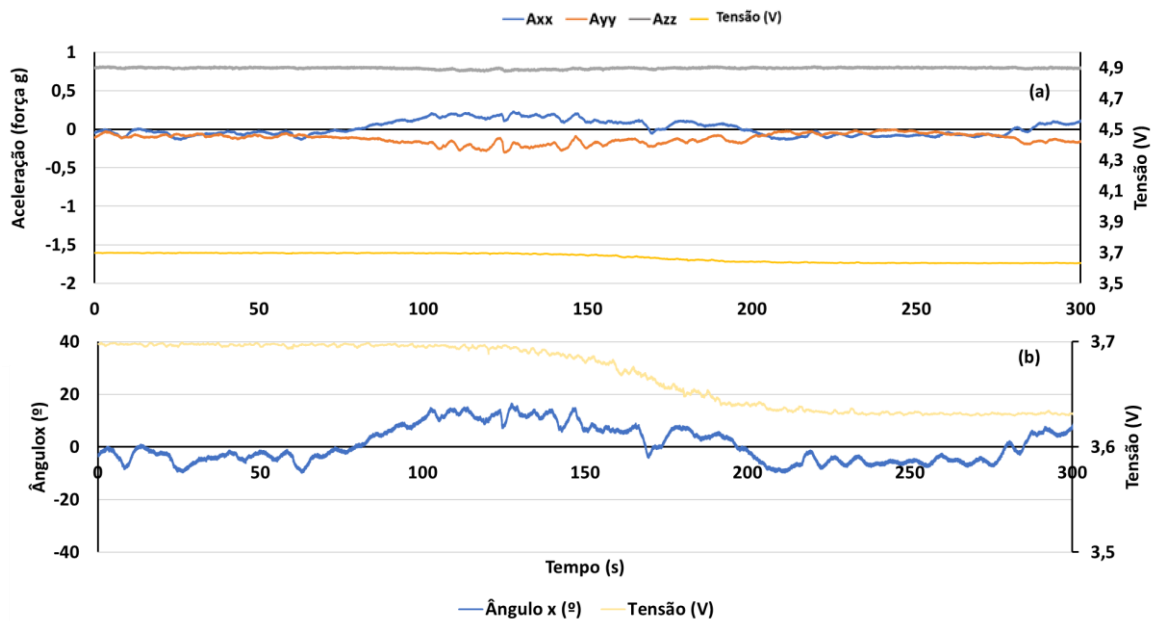


Figura D1. (a) Acelerações nos três eixos, x, y e z com a tensão, (b) Variação do ângulo x e tensão.

Um detalhe que se destaca é a forma dos sinais de aceleração/ângulo, figura D1 nesta amostra de 300 segundos. A velocidade da água foi de $0,27 \text{ ms}^{-1}$ (predominantemente de norte para sul).

A análise de produção de energia pelo gerador durante 3600 segundos é representada na figura D2 para este dia em particular. A Tabela D1 resume a produção de energia ao longo de uma hora, com base em amostras de 300 segundos. A potência média produzida pelo gerador durante 3600 segundos foi de 0,3 mW, considerando a diferença entre a energia produzida e consumida como 1,08 J. A potência média consumida pela carga foi de 0,7 mW, indicando que o gerador foi capaz de substituir apenas 42,8% da energia consumida.

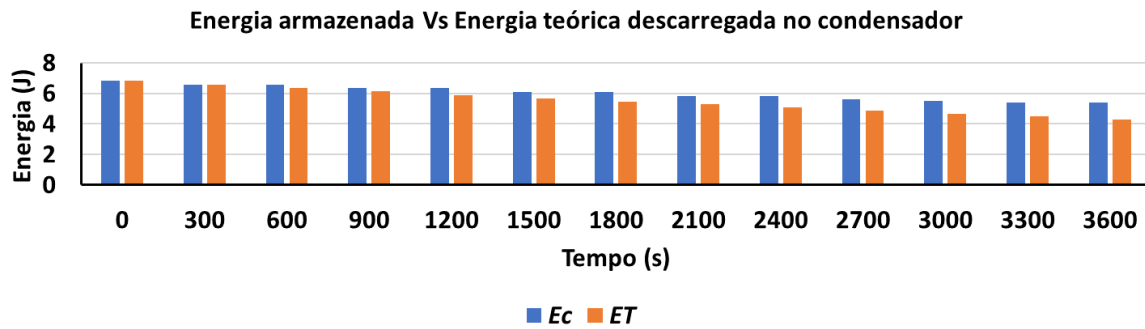


Figura D2. Energia armazenada (E_c) e Energia teórica descarregada pelo condensador.
Na tabela D1, estão representados os valores do gráfico da figura D2.

Tabela D1. Resumo da energia produzida.

Tempo (s)	V_i (V)	ER (J)	EP (J)	E_c (J)	E_T (J)
0	3,69	0	0	6,81	6,81
300	3,63	0,23	-0,22	6,59	6,58
600	3,63	0,23	0	6,59	6,35
900	3,56	0,23	-0,25	6,34	6,12
1200	3,56	0,22	0	6,34	5,90
1500	3,49	0,21	-0,25	6,09	5,69
1800	3,49	0,21	0	6,09	5,48
2100	3,42	0,20	-0,24	5,84	5,28
2400	3,42	0,20	0	5,84	5,08
2700	3,35	0,20	-0,24	5,60	4,88
3000	3,33	0,20	-0,06	5,53	4,68
3300	3,28	0,19	-0,14	5,39	4,49
3600	3,27	0,19	-0,03	5,38	4,30