



## **Estudo experimental de um sistema de conversão de energia das ondas para equipar uma boia oceanográfica auto-alimentada**

**Ricardo Jorge Chaves Andrade**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

**Engenharia e Gestão da Energia**

Orientadores: Prof. Luís Manuel de Carvalho Gato  
Prof. João Carlos de Campos Henriques

**Júri**

Presidente: Prof. José Alberto Caiado Falcão de Campos  
Orientador: Prof. Luís Manuel de Carvalho Gato  
Vogal: Prof. Paulo José da Costa Branco

**Junho 2018**



Às pessoas que fizeram de mim o que sou hoje, o meu Pai, a minha Mãe e os meus irmãos Anita e Paulo.



## **Agradecimentos**

Ao Professor Luís Gato, orientador desta tese, por me ter ajudado e aconselhado ao longo de todo o trabalho. Agradeço toda a sua disponibilidade, espírito crítico, bom humor, sensibilidade experimental e teórica, que me motivou para a concretização deste trabalho.

Ao Professor João Henriques, também orientador desta tese, por me ter dado a oportunidade de ingressar nesta tese e de agarrar um projeto real de engenharia. Agradeço a sua confiança, disponibilidade e a sua capacidade de resolução de problemas relacionadas com a escrita da tese em Latex.

À Ana Carrelhas, mais do que uma colega, uma orientadora e uma amiga, que me ensinou muito e esteve sempre pronta para ajudar. Desde programação até à análise experimental, a Ana mostrou ser uma verdadeira mestra de engenharia e com uma capacidade incrível de ensinamento e de transmissão de conhecimentos. Agradeço imenso também a sua ajuda na resolução de problemas relacionadas com o Latex e as suas ideias e aconselhamentos face à estrutura da tese.

À Maria José, pela sua simpatia e inteira disponibilidade em me ajudar, bem como todo o seu apoio e aconselhamento relacionados com o diálogo com empresas de fornecimento de material.

Ao Professor António Falcão, pela sua notável experiência em energia das ondas e pela sua bondade e disponibilidade em me ajudar.

Ao Professor Paulo Branco, pela sua extraordinária habilidade de ensinamento e extrema disponibilidade e boa vontade para me ajudar na parte elétrica do trabalho desenvolvido. Agradeço imenso a motivação excepcional que me proporcionou ao longo desta tese.

Ao Francisco Silva e ao Professor João Fernandes, pela disponibilidade do seu tempo e transmissão de conhecimentos da parte de sistemas elétricos.

Ao Professor Gil Marques, pela ajuda e aconselhamento experimental e teórico na área de máquinas e na conceção da primeira instalação experimental.

Às Professoras Alda Simões e Fátima Montemor, pela sua disponibilidade e transmissão de conhecimentos na área do armazenamento de energia, bem como todo o seu interesse demonstrado no projeto.

Ao Sr. Duarte Batista, por toda a ajuda e aconselhamento na conceção do banco de cargas resistivas e ao longo de todo o trabalho desenvolvido na primeira instalação. Aprecio imenso a sua boa disposição, vontade de trabalhar e de ajudar o próximo.

Ao Sr. João Paulo Pereira, pelos seus aconselhamentos na área da eletricidade e da segurança no manuseamento de instalações elétricas.

Ao Sr. Joaquim Frade e Sr. Pedro Alves pela ajuda na conceção de peças, transporte da turbina e montagem das instalações da turbina.

Aos meus pais, irmãos, sobrinha, padrinhos e amigos, por todo o apoio e motivação proporcionados ao longo da realização desta tese.

À minha namorada, Mariana, por todo o apoio, carinho, motivação e força que me transmitiu ao longo de todo o processo de realização da tese.

Ao meu avô Ângelo, por todas as suas conversas estimulantes e motivadoras que me fazem querer aprender mais e mais a cada dia.

Aos meus colegas de gabinete, Diogo Ferreira e João Nunes, pelo seu espírito de cooperação, incentivo e ótimos momentos passados em grupo durante o desenvolvimento da tese.

A todos os elementos do grupo de energia das ondas, pela ótima recepção à minha entrada e por toda a disponibilidade demonstrada em ajudar.

Este trabalho de investigação foi financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT) através do projeto WAVEBUOY - *Wave-powered oceanographic buoy for long term deployment* - PTDC/MAR-TEC/0914/2014.

## Resumo

O desenvolvimento de boias auto-alimentadas equipadas com sensores de aquisição de dados, aponta para uma nova tendência no domínio da tecnologia de monitorização oceanográfica. Uma boia capaz de extrair energia a partir das ondas e, ao mesmo tempo, fornecer medições de dados continuamente e em tempo real vem anunciar uma nova geração de boias oceanográficas. Os seus benefícios vão desde a redução de custos face à menor manutenção necessária até à possibilidade de uma implantação de mais longo prazo no oceano, comparativamente aos sistemas convencionais constituídos por módulos fotovoltaicos e baterias de armazenamento de energia.

Por esta razão, a cooperação num único projeto entre o IDMEC/IST e o DOP/UAç, visa projetar e implantar pela primeira vez no oceano aberto uma nova geração de boias oceanográficas auto-alimentadas equipadas com sensores de medição de dados. Este consórcio constitui um esforço significativo para o desenvolvimento de sistemas de dados integrados regionais, nacionais e internacionais na área da observação contínua e de longo prazo no oceano. A boia *Wave-Buoy* será instalada junto ao monte submarino Condor no arquipélago dos Açores (Portugal), por um período pretendido dum ano.

Esta tese descreve a conceção do sistema eletromecânico para a boia oceanográfica, bem como a construção e montagem de um protótipo a ser testado em três instalações de testes. Estes testes foram realizados nos laboratórios de máquinas elétricas e de ensaios de turbinas de 55 kW do IST.

**Palavras-chave:** Boia oceanográfica auto-alimentada, monitorização oceanográfica, sistema isolado da rede, coluna de água oscilante, turbina biradial, energia das ondas.





## Abstract

The development of self-powered buoys equipped with data acquisition sensors suggests a new trend around the ocean monitoring technology domain. A buoy capable of extracting energy from waves and, at the same time, providing continuous and real-time data acquisition announces a new generation of oceanographic buoys. Its benefits range from the costs reduction due to less maintenance needed till the possibility of longer periods of ocean deployment, compared to conventional systems including solar modules and batteries for energy storage.

For this reason, the cooperation in a single project between IDMEC/IST and DOP/UAz, aims to project and deploy for the first time in the open ocean a new generation of self-powered oceanographic buoys equipped with data acquisition sensors. This consortium indicates a significant effort for the development of regional, national and international integrated data systems in the continuous and long-term oceanographic observation. The buoy will be deployed close to the submarine mount Condor at the Azores archipelago (Portugal), for an intended period of one year.

This thesis describes the conception of the electromechanical system for the oceanographic buoy, as well as the construction and assembly of a prototype to be tested at three laboratory installations. The tests were performed at the electrical machines and 55 kW turbines testing laboratories at IST.

**Keywords:** Self-powered oceanographic buoy, oceanographic monitoring, grid-isolated system, oscillating water column, bi-radial turbine, wave energy.



# Conteúdo

Agradecimentos . . . . .	v
Resumo . . . . .	vii
Abstract . . . . .	ix
Lista de Tabelas . . . . .	xv
Lista de Figuras . . . . .	xvii
Lista de Abreviaturas e Símbolos . . . . .	xxi
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Boia oceanográfica auto-alimentada pela energia das ondas . . . . .	3
1.1.1 Tipos de turbinas a equipar tecnologia CAO . . . . .	4
1.2 Boia oceanográfica - Wavebuoy . . . . .	5
1.2.1 Local de instalação . . . . .	5
1.2.2 Geometria da boia . . . . .	6
1.2.3 Turbina bi-radial de pás fixas . . . . .	6
1.2.4 Elementos de consumo . . . . .	7
1.3 Oportunidades de negócio emergentes . . . . .	7
1.4 Motivação . . . . .	8
1.5 Contribuição e objetivos da tese . . . . .	8
1.6 Estrutura da tese . . . . .	9
<b>2 Modelação eletromecânica da boia oceanográfica</b>	<b>11</b>
2.1 Gerador elétrico . . . . .	11
2.1.1 Descrição dos componentes . . . . .	13
2.1.2 Esquema elétrico do gerador . . . . .	13
2.2 Motor de corrente contínua . . . . .	15
2.3 Turbina de ação axial . . . . .	15
2.4 Bateria . . . . .	15
2.4.1 Circuito equivalente da bateria . . . . .	17
2.5 Carga resistiva . . . . .	18
<b>3 Análise experimental de sensibilidade</b>	<b>21</b>
3.1 Descrição e construção da instalação . . . . .	21

3.2	Instrumentação	23
3.2.1	Corrente, tensão e potência elétrica	23
3.2.2	Velocidade de rotação	25
3.3	Sistema de aquisição de dados	25
3.4	Procedimentos de teste à instalação	25
<b>4</b>	<b>Análise experimental do Modelo</b>	<b>27</b>
4.1	Descrição da instalação	27
4.2	Construção da instalação	28
4.3	Instrumentação	29
4.3.1	Pressão	30
4.3.2	Binário e velocidade de rotação	32
4.3.3	Caudal volúmico	35
4.3.4	Massa volúmica do ar	35
4.3.5	Corrente, tensão e potência elétrica	35
4.4	Sistema de aquisição de dados	35
4.4.1	Regime permanente	35
4.4.2	Regime variável	36
4.5	Procedimento dos ensaios experimentais	37
4.5.1	Curvas de funcionamento da turbina e gerador	37
4.5.2	Cálculo do binário de atrito	37
4.5.3	Embalamento	38
4.5.4	Regime variável	38
4.6	Pós-processamento	39
<b>5</b>	<b>Resultados</b>	<b>41</b>
5.1	Resultados da análise de sensibilidade	41
5.2	Regime permanente	44
5.2.1	Curvas de funcionamento da turbina	45
5.2.2	Curvas de funcionamento do gerador	46
5.2.3	Embalamento	50
5.3	Regime variável	51
5.3.1	Análise da frequência de ocorrência	51
5.3.2	Análise temporal	54
<b>6</b>	<b>Conclusões e trabalho futuro</b>	<b>65</b>
6.1	Conclusões	65
6.2	Trabalho futuro	66
	<b>Bibliografia</b>	<b>69</b>

<b>A</b>	<b>Aplicação de filtros</b>	<b>A.73</b>
<b>B</b>	<b>Código em MATLAB</b>	<b>B.76</b>
B.1	Regime permanente - Aquisição de dados . . . . .	B.76
B.2	Regime variável - Aquisição de dados . . . . .	B.78
B.3	Pós-processamento . . . . .	B.80
B.4	Calibração do sensor de binário - Aquisição de dados . . . . .	B.82
<b>C</b>	<b>Construção das instalações experimentais</b>	<b>C.84</b>
<b>D</b>	<b>Desenhos técnicos de peças</b>	<b>D.86</b>



# Lista de Tabelas

1.1	Elementos de consumo da boia oceanográfica. . . . .	7
2.1	Valores de corrente e potência de carga para condições de funcionamento nominais. . . . .	18
4.1	Gamas de funcionamento dos manómetros de pressão utilizados. . . . .	31
4.2	Valores das retas de calibração dos manómetros de pressão. . . . .	31
4.3	Gama de funcionamento dos sensores e valores das retas de calibração de binário e velocidade de rotação. . . . .	35
5.1	Razão entre o valor depois e antes do decréscimo de corrente e potência. . . . .	49
5.2	Valores em regime variável. . . . .	63





# Lista de Figuras

1.1	Boia oceanográfica e estação de carregamento de AUVs da MBARI. . . . .	2
1.2	Dispositivo Wave Glider da empresa Liquid Robotics (retirado de [8]). . . . .	3
1.3	Boia com tecnologia CAO isolada da rede. . . . .	3
1.4	Tipos de rotores a equipar turbinas auto-retificadoras. . . . .	4
1.5	Representação geográfica do local do estudo oceanográfico e da instalação da boia. . . . .	5
1.6	Representação da linha de água e secção em corte longitudinal da estrutura da boia oceanográfica. . . . .	6
1.7	Proporção das dimensões da boia oceanográfica. . . . .	6
1.8	Turbina bi-radial do projeto OPERA no laboratório de ensaio de turbinas de 55 kW do IST e no quebra-mar do Mutriku. . . . .	7
2.1	Sistema eletromecânico real da boia oceanográfica. . . . .	11
2.2	Modelos de teste representativos do sistema eletromecânico real da boia oceanográfica. . . . .	12
2.3	Representação do gerador (alternador de automóvel) fora e dentro do seu ambiente de funcionamento. . . . .	12
2.4	Vista expandida do gerador (editado e retirado de [29]). . . . .	13
2.5	Esquema elétrico do gerador (fornecido pelo representante da Bosch e posteriormente editado). . . . .	14
2.6	Motor CC da primeira instalação. . . . .	15
2.7	Turbina de ação axial a usar na estação V-Flow. . . . .	16
2.8	Rotor da turbina de ação axial a usar na estação V-Flow. . . . .	16
2.9	Bateria de ácido-chumbo. . . . .	16
2.10	Circuito equivalente da bateria. . . . .	17
2.11	Circuito das cargas resistivas. . . . .	18
2.12	Banco de cargas resistivas. . . . .	19
3.1	Instalação de análise de sensibilidade: (1) motor CC, (2) gerador, (3) fusível, (4) bateria, (5) disjuntor, (6) banco de cargas resistivas, (7) analisador de potência FLUKE, (8) tacómetro, (9) auto-transformador, (10) lâmpada, (11) interruptor, (12) união elástica. . . . .	21
3.2	Construção do banco de cargas resistivas. . . . .	22
3.3	Furos e estrutura de suporte do gerador. . . . .	23
3.4	Esquema equivalente da instalação de análise de sensibilidade: (1) motor CC, (2) gerador, (3) fusível, (4) bateria, (5) disjuntor, (6) banco de cargas resistivas, (7) analisador de potência FLUKE, (8) tacómetro. . . . .	23

3.5	Equipamento de medição de corrente, tensão e potência. . . . .	24
3.6	Amperímetro e multímetro. . . . .	24
3.7	Tacómetro e ponto de medição da velocidade de rotação. . . . .	25
3.8	Sistema de aquisição de dados para os ensaios de análise de sensibilidade. . . . .	26
4.1	Esquema da instalação de ensaios de turbinas de 55 kW do IST (retirado de [19]). . . . .	27
4.2	Montagem da estrutura de suporte e fixação do gerador e sensor de binário. . . . .	28
4.3	Processo de montagem do rotor. . . . .	29
4.4	Processo de transformação do novo ponto de fixação da turbina. . . . .	29
4.5	Instalação em regime variável. . . . .	30
4.6	Esquema equivalente da instalação em regime permanente e variável: (1) turbina de ação axial, (2) gerador, (3) fusível, (4) bateria, (5) disjuntor, (6) banco de cargas resistivas, (7) analisador de potência FLUKE, (8a e 8b) sensores de binário e velocidade de rotação (RWT411-DE-KB, TG-5/BP) respetivamente, (9) manómetros de pressão. . . . .	30
4.7	Tomadas de pressão estática ao longo da instalação V-Flow. . . . .	31
4.8	Manómetros de pressão estática. . . . .	32
4.9	Sensores de binário e velocidade de rotação: esquerda (RWT411-DE-KB), direita (TG-5/BP). . . . .	32
4.10	Bancadas de calibração dos sensores de binário. . . . .	33
4.11	Retas de calibração de binário. . . . .	34
4.12	Retas de calibração de velocidade de rotação. . . . .	34
4.13	Sistema de aquisição de dados em regime permanente. . . . .	36
4.14	Sistema de aquisição de dados em regime variável. . . . .	37
4.15	Reta com os pontos experimentais do cálculo do binário de atrito (retirado de [36]). . . . .	38
5.1	Potências do gerador, da bateria e da carga em função da velocidade de rotação para uma carga fixa de $0,4 \Omega$ . . . . .	41
5.2	Potências da carga, do gerador e da bateria em função da velocidade de rotação e da carga aplicada. . . . .	42
5.3	Correntes do gerador, da bateria e da carga face à ligação de diferentes cargas em três velocidades de rotação (à esquerda: $\Omega = 1090$ r.p.m.; no centro: $\Omega = 1190$ r.p.m.; à direita: $\Omega = 1290$ r.p.m.). . . . .	43
5.4	Velocidade inicial e final face à ligação de diferentes cargas em três velocidades de rotação (à esquerda: $\Omega = 1090$ r.p.m.; no centro: $\Omega = 1190$ r.p.m.; à direita: $\Omega = 1290$ r.p.m.). . . . .	44
5.5	Rendimento da turbina em função do coeficiente de caudal e da carga aplicada. . . . .	46
5.6	Coefficiente de pressão em função do coeficiente de caudal e da carga aplicada. . . . .	46
5.7	Coefficiente de potência em função do coeficiente de caudal e da carga aplicada. . . . .	47
5.8	Binário do gerador em função da velocidade de rotação e da carga aplicada. . . . .	47
5.9	Potência do gerador em função da velocidade de rotação e da carga aplicada. . . . .	48
5.10	Corrente do gerador e da carga em função da velocidade de rotação e da carga aplicada (símbolos a cheio: $I_{ger}$ ; símbolos vazios: $I_{carga}$ ). . . . .	49
5.11	Tensão do gerador e da bateria em função da velocidade de rotação e da carga aplicada (símbolos a cheio: $V_{ger}$ ; símbolos vazios: $V_{bat}$ ). . . . .	50

5.12	Rendimento do gerador em função da velocidade de rotação e da carga aplicada. . . . .	50
5.13	Coeficientes de caudal e pressão para condições de embalamento. . . . .	51
5.14	Frequência de ocorrência dos valores de potência do gerador em regime variável. . . . .	52
5.15	Frequência de ocorrência dos valores de potência da bateria em regime variável. . . . .	53
5.16	Frequência de ocorrência dos valores de potência da carga em regime variável. . . . .	53
5.17	Frequência de ocorrência dos valores de binário do gerador em regime variável. . . . .	54
5.18	Frequência de ocorrência dos valores de velocidade de rotação do conjunto gerador e turbina em regime variável. . . . .	55
5.19	EM1, bateria carregada. . . . .	57
5.20	EM1, bateria a meia carga. . . . .	58
5.21	EM2, bateria carregada. . . . .	59
5.22	EM2, bateria a meia carga. . . . .	60
5.23	EM3, bateria carregada. . . . .	61
5.24	EM3, bateria a meia carga. . . . .	62
A.1	Sinais filtrados e não filtrados em regime permanente (binário do gerador e velocidade de rotação). . . . .	A.74
A.2	Sinais filtrados e não filtrados em regime permanente (pressão na câmara de pleno e caudal volúmico). . . . .	A.74
A.3	Sinais filtrados e não filtrados em regime variável (binário do gerador e velocidade de rotação). . . . .	A.74
A.4	Sinais filtrados e não filtrados em regime variável (pressão na câmara de pleno e caudal volúmico). . . . .	A.75
C.1	Desenho 3D da montagem da estrutura de suporte e fixação do gerador e sensor de binário feito em Solidworks. . . . .	C.84
C.2	Método de transporte das duas secções da turbina. . . . .	C.85
C.3	Instalação em regime permanente. . . . .	C.85
D.1	Desenho técnico da peça de suporte ao gerador I . . . . .	D.87
D.2	Desenho técnico da peça de fixação à turbina . . . . .	D.88
D.3	Desenho técnico da peça de suporte ao gerador II . . . . .	D.89
D.4	Desenho técnico da porta de fixação da turbina . . . . .	D.90



# Lista de Abreviaturas e Símbolos

## Abreviaturas

ABS	=	Acrilonitrila butadieno estireno
AGM	=	Absorbent Glass Mat
AI	=	Entrada analógica
AMCA	=	Air Movement and Control Association International
AUVs	=	Autonomous underwater vehicles
CAD	=	Desenho assistido por computador
CAO	=	Coluna de água Oscilante
Cap.	=	Capítulo
CC	=	Corrente contínua
CORES	=	Projeto Europeu Components for Ocean Renewable Energy Systems
D	=	Dimensões
DOP/UAç	=	Departamento de Oceanografia e Pescas
Eq.	=	Equação
EC	=	Estado de carga
EM	=	Estado de mar
Fig.	=	Figura
Hg	=	Mercurio
IST	=	Instituto Superior Técnico
IDMEC	=	Mechanical Engineering Institute
MBARI	=	Monterey Bay Aquarium Research Institute
NI	=	National Instruments
OPERA	=	Projeto Europeu Open Sea Operating Experience to Reduce Wave Energy Cost
PCI	=	Peripheral Component Interconnect
pH	=	Potencial hidrogeniónico
RC	=	Circuito resistivo e capacitivo
rms	=	Raiz do valor quadrático médio
std	=	Desvio padrão
Sec.	=	Secção

SNR	=	Signal-to-noise ratio
Tab.	=	Tabela
UE	=	União Europeia
VFR	=	Válvula de fecho rápido

## Símbolos Romanos

$b$	=	Ordenada na origem, comprimento do braço
$C$	=	Capacitância
$d$	=	Diferencial
$D$	=	Diâmetro
$E$	=	Energia
$g$	=	Aceleração da gravidade
$I$	=	Corrente, inércia
Ma	=	Número de Mach
$m$	=	Declive, massa, instante de ligação de cargas resistivas
$P$	=	Potência
$p$	=	Pressão
$Q$	=	Caudal volúmico, capacidade
$R$	=	Resistência, coeficiente de determinação, calor específico
Re	=	Número de Reynolds
$t$	=	Tempo
$T$	=	Binário, temperatura
$V$	=	Tensão

## Símbolos Gregos

$\Delta$	=	Varição
$\eta$	=	Rendimento
$\mu$	=	Viscosidade dinâmica
$\Pi$	=	Coefficiente de potência adimensional
$\rho$	=	Massa volúmica do ar
$\Phi$	=	Coefficiente de caudal adimensional
$\Psi$	=	Coefficiente de pressão adimensional
$\Omega$	=	Velocidade de rotação

## Índices Inferiores

0	=	Referente à câmara de pleno
1	=	Referente à secção antes da tubeira convergente
2	=	Referente à secção depois da tubeira convergente
a	=	Atrito
aero	=	Aerodinâmico
atm	=	Referente à atmosfera
ar	=	Referente ao ar
bat	=	Referente à bateria
carga	=	Referente à carga
disp	=	Disponível
ef	=	Referente ao ensaio a frio da bateria
eq	=	Equivalente
emb	=	Referente às condições de embalamento
f	=	Referente ao instante final, excitação
ger	=	Referente ao gerador
hu	=	Referente à temperatura húmida
i	=	Referente à resistência interna da bateria, instante inicial
mec	=	Mecânica
mot	=	Referente ao motor CC
N	=	Referente às condições nominais
se	=	Referente à temperatura seca
t	=	Referente à turbina
total	=	Referente ao sistema total
turb	=	Referente à turbina

## Índices Superiores

—	=	Referente à média
---	---	-------------------





# Capítulo 1

## Introdução

O desenvolvimento e a promoção de novas tecnologias marinhas de monitorização, bem como a redução de custos na aquisição de dados oceanográficos têm sido prioridades da União Europeia (UE) [1]. Do mesmo modo, a Estratégia Nacional para o Mar apresentada para o período de 2013-2020, realça o valor estratégico do oceano para o estímulo de pesquisas científicas e atividades sociais e económicas [2]. Sendo assim, é crucial o estímulo da inovação tecnológica nos sistemas de monitorização oceanográfica, bem como o fomento de tecnologias de “nova geração” promovendo a sinergia entre as áreas de energia, oceanografia e sustentabilidade.

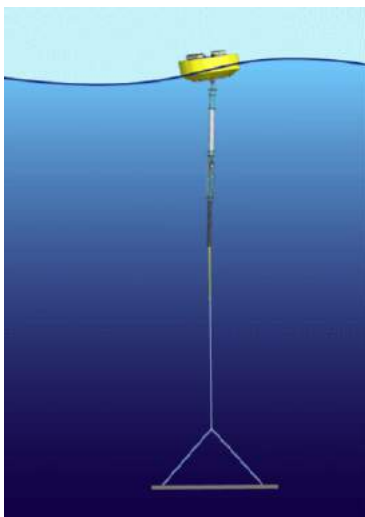
As tecnologias de monitorização oceanográfica atuais apresentam ainda inúmeros problemas e limitações, relacionadas com o elevado custo e tamanho dos sensores, baterias muito dispendiosas e muitas vezes não-recarregáveis como também a baixa potência e fiabilidade dos módulos solares e micro-turbinas eólicas para a produção de energia elétrica. Deste modo, verifica-se que os sistemas atuais são insuficientes para aplicações que exijam o uso de múltiplos sensores por longos períodos de tempo. A solução a estes constrangimentos tecnológicos pode passar pela adoção de tecnologias de “nova geração” que envolvam o aproveitamento da energia das ondas, uso de veículos submarinos autónomos (AUVs), melhoramento das unidades de armazenamento de energia e dos sistemas de aquisição, armazenamento e transmissão de dados. Os AUVs vêm possibilitar uma elevada versatilidade de operação no fundo marinho e significativa redução de custos quando comparados com a utilização de navios para o mesmo tipo de estudos. No entanto, enfrentam dois grandes problemas: a pouca autonomia e a dificuldade na transmissão de dados para terra. Estas limitações podem ser ultrapassadas pelo desenvolvimento de sistemas remotos de carregamento elétrico e de transmissão de informação que, estrategicamente posicionados, poderiam servir de suporte aos AUVs. Estes sistemas remotos podem ser boias equipadas com tecnologias de conversão de energia das ondas e de armazenamento de energia elétrica, capazes de fornecer energia a vários tipos de sensores de monitorização oceanográfica e ainda recarregar e recolher/transmitir informações aos AUVs. Desta forma, garante-se uma menor intervenção humana no local e proporciona-se um aumento do tempo das missões oceanográficas a executar com os AUVs, reduzindo drasticamente os custos da recolha de informação.

Evidentemente, existe uma extrema necessidade de desenvolver e testar em laboratório e no mar novas tecnologias que possam proporcionar produtos inovadores e comercialmente viáveis, sendo que para isso é perentório a comunicação e a cooperação entre todas as partes interessadas, reunindo especialistas de oceanografia, projetistas de sensores, investigadores, pessoal especializado da marinha, entre outros.

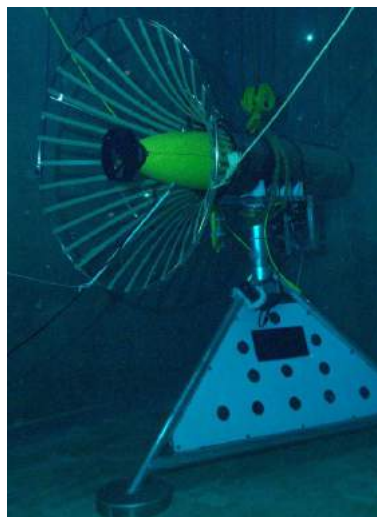
O aproveitamento da energia das ondas nas aplicações oceanográficas de pequena escala já não é um conceito novo, tendo sido desenvolvido por Yoshio Masuda (1925-2009) a fim de equipar milhares de boias de navegação nos mares da China e do Japão. A tecnologia das suas boias baseava-se no princípio de coluna de água oscilante (CAO) e utilizava uma turbina de ar conectada a um gerador que por sua vez alimentava uma luz de sinalização. Este tipo de boias começaram a ser comercializadas no Japão desde 1965, chegando aos Estados Unidos da América anos mais tarde [3, 4, 5].

Entretanto, uma equipa de investigação do MBARI (Monterey Bay Aquarium Research Institute) tem desenvolvido e testado em laboratório e em mar aberto, uma boia alimentada pela energia das ondas para fins de estudos oceanográficos [6] (ver Fig. 1.1). A tecnologia consiste em usar um corpo flutuante à superfície da água, uma placa de metal a 30 m de profundidade (ancorada ao fundo do mar) e um tubo equipado com um pistão entre os dois corpos [7]. A oscilação do corpo à superfície da água estimula o movimento do pistão e do fluido dentro do tubo e aciona um motor hidráulico, que por sua vez promove a rotação de um gerador elétrico e gera potência elétrica. Os dados obtidos demonstram que o sistema tem a capacidade de produzir 300 a 400 W de potência elétrica em média e 1000 W durante períodos de tempestade [6]. A equipa de investigação anda também a avaliar a hipótese de incorporar um posto de carregamento e de recolha de informação de AUVs e a realizar testes para ver se tecnologia se torna viável [6].

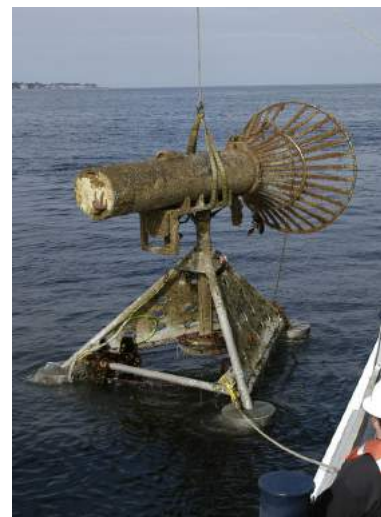
Por outro lado, a empresa Liquid Robotics também desenvolveu um dispositivo chamado de Wave Glider, capaz de recolher dados oceanográficos por 12 meses consecutivos a partir de um sistema composto por dois corpos, um flutuante e outro submerso a 8 m de profundidade [8] (ver Fig. 1.2). O corpo à superfície da água é composto por módulos solares, baterias, sensores e sistemas de comunicação, enquanto que o corpo inferior contém um hélice de baixo consumo (8 W) e pás para guiar e estabilizar os movimentos do corpo acima [8]. No entanto, este sistema não utiliza a energia das ondas para a produção de energia e está fora do foco desta tese.



(a) Boia oceanográfica da MBARI (retirado de [6]).



(b) Estação de teste de carregamento de AUVs da MBARI em laboratório (retirado de [6]).



(c) Estação de teste de carregamento de AUVs da MBARI em mar aberto (retirado de [6]).

Figura 1.1: Boia oceanográfica e estação de carregamento de AUVs da MBARI.



(a) Módulos solares e luz de sinalização do Wave Glider (retirado de [8]).



(b) Representação do sistema dos dois corpos do Wave Glider (retirado de [8]).

Figura 1.2: Dispositivo Wave Glider da empresa Liquid Robotics (retirado de [8]).

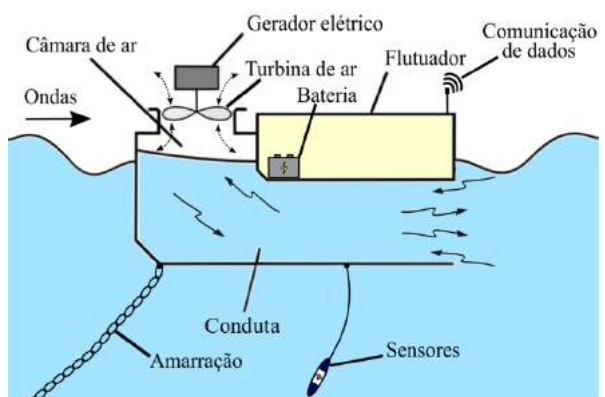
## 1.1 Boia oceanográfica auto-alimentada pela energia das ondas

O sistema electroprodutor da boia que converte a energia das ondas em energia elétrica, pode utilizar a tecnologia CAO. Para funcionar isolado da rede, para além de apresentar elementos como uma câmara de ar, turbina de ar, conduta para entrada e saída da água, gerador elétrico, flutuadores e amarração, tem de apresentar um sistema autónomo de armazenamento de energia, como por exemplo baterias [9].

Este tipo de tecnologia pode ser aplicada numa estrutura fixa instalada ao longo da costa ou numa estrutura flutuante ancorada perto ou longe da costa [10]. De entre estes dois tipos de estrutura, a que será aqui estudada é a estrutura flutuante, que representa a boia oceanográfica a ser instalada em alto mar. Esta estrutura, parcialmente submersa, é composta por uma entrada abaixo da linha de água e uma câmara de ar conectada, fazendo com que haja um volume de ar acima da linha de água dentro dessa câmara. O movimento de oscilação da linha de água presente dentro da estrutura irá promover o fluxo de ar ciclicamente reversível, através de uma turbina conectada a um gerador elétrico e baterias de armazenamento de energia elétrica [11, 12] (ver Fig. 1.3).



(a) Boia com tecnologia CAO na Baía de Galway, Irlanda (retirado de [13]).



(b) Esquema de uma boia oceanográfica com tecnologia CAO isolada da rede.

Figura 1.3: Boia com tecnologia CAO isolada da rede.

### 1.1.1 Tipos de turbinas a equipar tecnologia CAO

As turbinas de ar concebidas para equipar os dispositivos de conversão de energia das ondas podem ser de dois tipos: auto-retificadoras (ver Fig. 1.4) ou unidirecionais munidas de um sistema de válvula retificadoras. A turbina Wells, até à data, é a turbina mais estudada quer numericamente quer experimentalmente para este tipo de aplicações [14]. A sua construção é simples e pouco dispendiosa, quando comparada com outras turbinas. Porém esta turbina, apesar de apresentar rendimentos de pico elevados, apresenta uma gama de funcionamento estreita, onde rapidamente entra em perda e por consequência dá-se uma redução grave do rendimento.

Uma alternativa a esta turbina é a turbina de ação que apresenta uma gama de funcionamento mais alargada, quando comparada com a anterior [15, 16]. Todavia, esta turbina possui um grande revés que limita o aumento do seu rendimento, as grandes perdas de pressão de estagnação quando o escoamento é no sentido do rotor para as pás diretrizes. Para colmatar este problema surgiu a turbina bi-radial [17]. Esta turbina é simétrica relativamente a um plano perpendicular ao seu eixo de rotação e o escoamento de entrada e de saída é radial. O estator possui duas configurações distintas: pás móveis e pás fixas. No estator com pás móveis, as pás estão localizadas perto do rotor e, utilizando um sistema de atuação, movem-se para o estator por onde o escoamento está entrar. Desta forma, à saída o escoamento é livre, evitando assim as perdas de pressão de estagnação apresentadas nas turbinas de ação. No estator de pás fixas, as perdas são minimizadas através do afastamento radial das pás relativamente ao rotor [17].

A turbina bi-radial de pás fixas apresenta-se como uma turbina mecanicamente simples, segura e robusta [17], especialmente desenhada para equipar dispositivos do tipo CAO [18]. Ao contrário da turbina Wells, que tem problemas associados à sua elevada velocidade de rotação e difícil arranque, as turbinas bi-radial e de ação axial apresentam uma menor velocidade e mais fácil arranque, sendo mais adequadas para equipar dispositivos de conversão de energia das ondas instalados em mares muito energéticos [18]. Sendo assim, as turbinas bi-radial e de ação axial são apropriadas para aplicações que ofereçam altas quedas de pressão e baixos caudais, enquanto que a Wells será adequada em situações que ofereçam baixas quedas de pressão e caudais elevados [19].



(a) Rotor da turbina Wells.

(b) Rotor da turbina bi-radial.

(c) Rotor da turbina de ação axial.

Figura 1.4: Tipos de rotores a equipar turbinas auto-retificadoras.

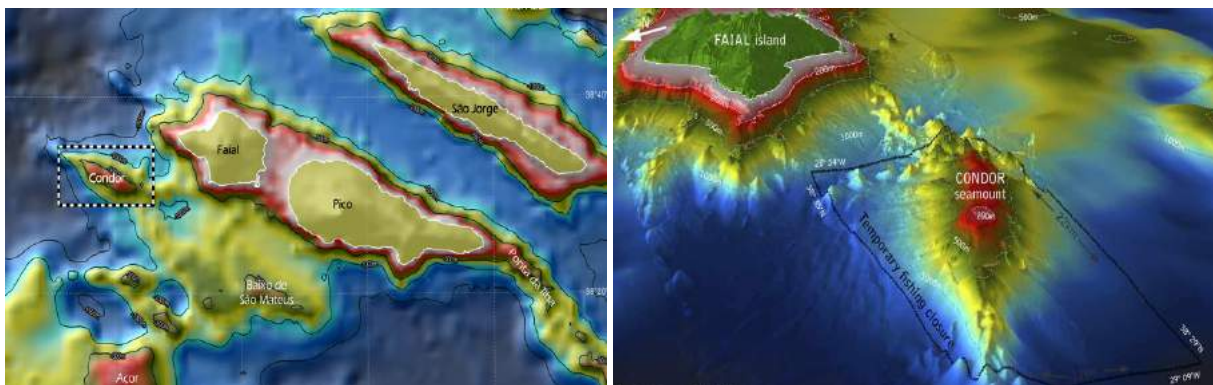
## 1.2 Boia oceanográfica - Wavebuoy

A conceção da boia oceanográfica em estudo, resultou de um projeto em conjunto entre o IDMEC/IST e o DOP/UAç, no qual se pretende elaborar um estudo oceanográfico no mar dos Açores e provar o conceito de uma nova geração de boias oceanográficas auto-alimentadas a partir da energia das ondas. Estipula-se que o estudo oceanográfico tenha um período de medição de um ano, durante o qual se registarão vários parâmetros marinhos tais como o potencial hidrogeniónico (pH), condutividade, temperatura, turbidez, oxigénio dissolvido e clorofila presente na água e ainda se avaliará o desempenho da turbina a equipar a boia para as condições do mar vigorantes. Uma caracterização do perfil da ondulação do local será também efetuada, onde serão registados valores de altura significativa, período, direção, coeficientes, altura e período máximo das ondas. O sistema eletromecânico da boia será constituído por uma turbina bi-radial, um gerador elétrico, um banco de baterias e todos os elementos de consumo que representam os equipamentos de aquisição e transmissão de dados.

### 1.2.1 Local de instalação

O monte submarino é denominado de Condor e encontra-se localizado a 17 km a oeste-sudoeste da ilha do Faial (Açores), tendo cerca de 1800 m de altura, 39 km de comprimento e 23 km de largura e estendendo-se desde os 185 m até aos 2000 m de profundidade (ver Fig. 1.5). O Condor, pela sua fácil acessibilidade, tem sido alvo de investigação científica intensiva desde 2008, permitindo o aumento do conhecimento sobre os ecossistemas dos montes submarinos, avaliando assim os efeitos da prática de pesca profissional e recreativa. Sendo assim, a prática de pesca no local está interdita até 2020, tornando-se possível monitorizar as dinâmicas ambientais e biológicas de várias espécies sem a influência da ação humana [20].

Atividades como o turismo marinho, mergulho com tubarões, observação de cetáceos e jardins de coral e, sem esquecer, a investigação científica, caracterizam o dia-a-dia deste magnífico monte submarino.



(a) Parcela do grupo central do Arquipélago dos Açores e localização do monte submarino Condor (retirado de [21]). (b) Localização aproximada do monte submarino (retirado de [22]).

Figura 1.5: Representação geográfica do local do estudo oceanográfico e da instalação da boia.

## 1.2.2 Geometria da boia

A Fig. 1.6 representa o desenho do protótipo inicial da boia concebido a partir da versão académica do software Solidworks. O desenho foi elaborado a par do desenvolvimento desta tese, no entanto está fora do âmbito do trabalho aqui desenvolvido. A boia será construída a partir de chapas de aço, reforços com vigas interiores e exteriores, flutuadores e apresentará dimensões de aproximadamente 4 m×4 m×4 m (ver Fig. 1.7).

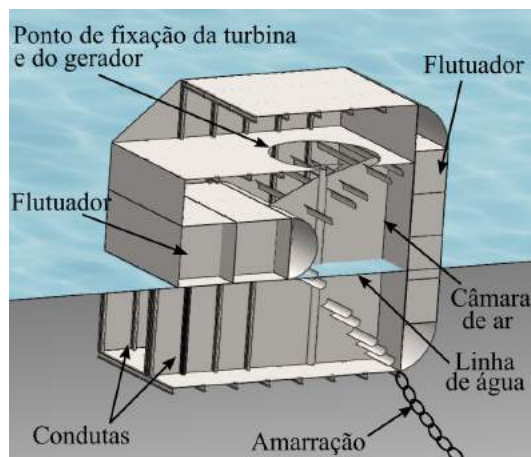


Figura 1.6: Representação da linha de água e secção em corte longitudinal da estrutura da boia oceanográfica.

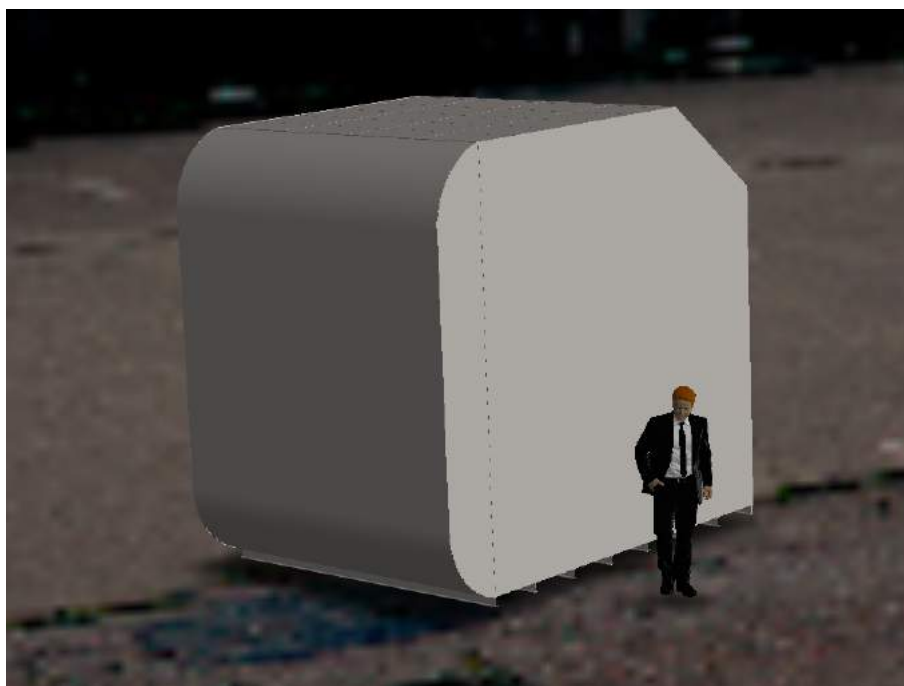


Figura 1.7: Proporção das dimensões da boia oceanográfica.

## 1.2.3 Turbina bi-radial de pás fixas

A turbina a equipar a boia oceanográfica é a turbina bi-radial de pás fixas. A equipa de investigação, no decorrer do projeto europeu OPERA H2020 (*Open Sea Operating Experience to Reduce Wave Energy Cost*), desenvolveu

e testou uma turbina deste tipo para integrar uma instalação de extração de energia das ondas situada num quebra-mar no Mutriku (Espanha), a qual já se encontra em funcionamento no local [23] (ver Fig. 1.8). A geometria utilizada na presente boia em estudo é igual à usada no projeto OPERA H2020.



(a) Turbina bi-radial na instalação V-Flow antes de ser transportada para o Mutriku (retirado de [19]). (b) Turbina bi-radial em funcionamento no quebra-mar do Mutriku (retirado de [19]). (c) Quebra-mar do Mutriku com instalações de CAO (retirado de [24]).

Figura 1.8: Turbina bi-radial do projeto OPERA no laboratório de ensaio de turbinas de 55 kW do IST e no quebra-mar do Mutriku.

### 1.2.4 Elementos de consumo

A Tab. 1.1 apresenta os elementos de consumo da boia e potências elétricas associadas a cada equipamento, a fim de aferir a potência instantânea total a ser consumida pelos equipamentos da boia.

Tabela 1.1: Elementos de consumo da boia oceanográfica.

Elementos de consumo	Potência de consumo [W]
Sensores de medição oceanográfica	10
Controlo da válvula	20
Lâmpada de iluminação	100
Transmissão de dados	20
Armazenamento de dados	110
Medição de operação	100
Total	360

Atente-se que o consumo total dos equipamentos é de aproximadamente 360 W e que terá de ser assegurado ininterruptamente pelo gerador e baterias. De modo a simular o comportamento do gerador e das baterias numa situação real, é necessário replicar em laboratório esta potência de consumo e avaliar, assim, o desempenho do gerador e da bateria para tais condições de funcionamento.

## 1.3 Oportunidades de negócio emergentes

A disponibilização de mais e melhor informação face aos avanços deste tipo de tecnologia, pode suscitar interesse a certos agentes económicos e trazer inúmeras vantagens competitivas para muitas áreas de atividade que se desenvolvam em redor do oceano. Estas áreas podem ser as seguintes:

1. Pesca.
2. Aquacultura.
3. Mapeamento batimétrico.
4. Inspeção de infraestruturas subaquáticas.
5. Mineração de zonas profundas.
6. Sistemas de dessalinização.
7. Parques para produção de eletricidade com ligação à rede elétrica.
8. Heliportos para recarregamento e descarga de informação de drones.

## 1.4 Motivação

A investigação e o desenvolvimento de novas formas de extração de energia têm vindo a crescer nas últimas décadas, de forma a colmatar as agressões diárias profundas ao nosso planeta e a combater o uso dos combustíveis fósseis. A par disto, o aumento da investigação dos oceanos levou à necessidade urgente da redução de custos e da adoção de tecnologias inovadoras com menor intervenção humana no local. Desta maneira, o desenvolvimento e o estudo de novas tecnologias de base à monitorização oceanográfica poderá vir a apresentar novas soluções e produtos para o mercado com um benéfico impacto ambiental, económico e social para Portugal e para a UE.

A motivação desta tese é o estudo experimental de um sistema de conversão de energia das ondas, de forma a avaliar a sua capacidade para equipar a boia oceanográfica auto-alimentada pela energia das ondas.

## 1.5 Contribuição e objetivos da tese

Com a presente tese pretendeu-se modelar e testar em laboratório o sistema eletromecânico a integrar na boia oceanográfica, com o objetivo de analisar e aferir os seus benefícios e limitações para o caso real da boia. Este sistema seria somente testado na nova instalação de ensaios de turbinas de 55 kW, em escoamento permanente, variável e unidirecional.

A turbina a equipar a Wavebuoy é uma turbina bi-radial de pás fixas. No entanto, face a atrasos na sua construção, optou-se por usar uma turbina que permitisse substituir a turbina bi-radial sem comprometer a validação do modelo eletromecânico utilizado. A turbina escolhida foi uma turbina auto-retificadora de ação axial, que face às suas semelhanças de funcionamento com a turbina bi-radial, demonstrou ser a melhor alternativa a adotar [17, 16].

Nos primeiros meses da elaboração desta tese houve a impossibilidade de ocupar a instalação de ensaios de turbinas, pelo que se decidiu construir uma instalação que permitisse uma análise de sensibilidade inicial do funcionamento do sistema gerador-bateria-elementos de consumo. Deste modo, foi montada uma instalação em que um motor de corrente contínua (CC), referido na Sec. 2.2 do Cap. 2, simulasse a turbina.

Sendo assim foram montadas três instalações de testes, a primeira no laboratório de máquinas elétricas da torre norte e as últimas no laboratório de ensaio a turbinas de 55 kW no Pavilhão de Mecânica IV do IST. A construção destas instalações experimentais englobou a compra de diversos equipamentos, tais como o gerador, as cargas resistivas, a bateria, entre outros. A par disto, houve a necessidade da transformação de certos materiais envolvendo trabalhos de corte, fresagem e soldadura e todo o processo de montagem da turbina (rotor, estator,



tubos exteriores), bem como o seu transporte utilizando uma grua. Com isto, foi possível estudar o comportamento da turbina, gerador, bateria e cargas resistivas para as várias situações de mar impostas e avaliar o trânsito de potência ao longo do seu funcionamento.

## **1.6 Estrutura da tese**

A tese divide-se em cinco capítulos.

No Capítulo 1 apresenta-se a finalidade da conceção da boia oceanográfica, o seu local de instalação e as características que ditaram o sistema eletromecânico a utilizar nos ensaios experimentais.

No Capítulo 2 revela-se o sistema eletromecânico escolhido para a representação da boia, de modo a ser possível simular e avaliar o seu funcionamento em laboratório.

No Capítulo 3 descreve-se a conceção da primeira instalação experimental, bem como a instrumentação, sistema de aquisição de dados e procedimentos dos ensaios adotados.

No Capítulo 4 apresenta-se a construção das últimas duas instalações experimentais, novamente explicitando a sua instrumentação, sistema de aquisição de dados e procedimentos dos ensaios associados.

Para terminar, no Capítulo 5 encontram-se os resultados das três instalações experimentais, bem como uma análise aos regimes permanente e variável estudados nas duas últimas instalações.



## Capítulo 2

# Modelação eletromecânica da boia oceanográfica

Na Fig. 2.1 apresenta-se o sistema eletromecânico real da boia oceanográfica.

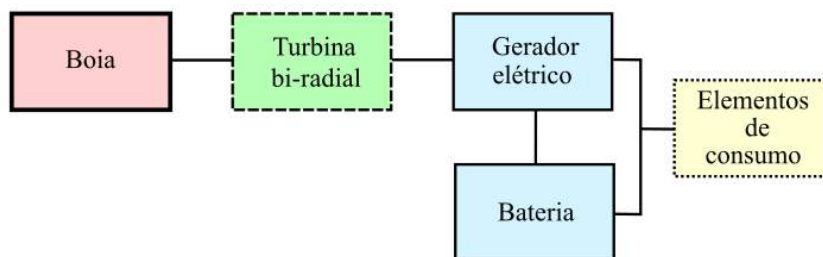


Figura 2.1: Sistema eletromecânico real da boia oceanográfica.

A diferença de pressão, originada pelo movimento da coluna de água da boia, faz rodar a turbina bi-radial. A turbina está, por sua vez, acoplada a um gerador elétrico, havendo deste modo produção de energia elétrica. Essa energia tem a finalidade de carregar as baterias e alimentar os elementos de consumo (sistemas de aquisição, armazenamento e transmissão de dados). Para simular este sistema em condições favoráveis num laboratório, o conjunto boia-turbina é substituído por um motor CC e uma turbina de ação axial, respetivamente, nas instalações de máquinas elétricas e de ensaios de turbinas de 55 kW do IST. Os elementos de consumo são substituídos por cargas resistivas com uma potência de consumo equivalente à situação real. A Fig 2.2 expõe os dois modelos de teste adotados nos ensaios.

Seguidamente é apresentada uma descrição detalhada das características dos componentes que integraram os dois modelos de teste ao sistema da boia oceanográfica.

### 2.1 Gerador elétrico

O gerador elétrico deverá apresentar características que demonstrem o melhor desempenho e funcionamento em ambientes marinhos extremamente adversos, bem como respeitar as características da turbina a qual será co-

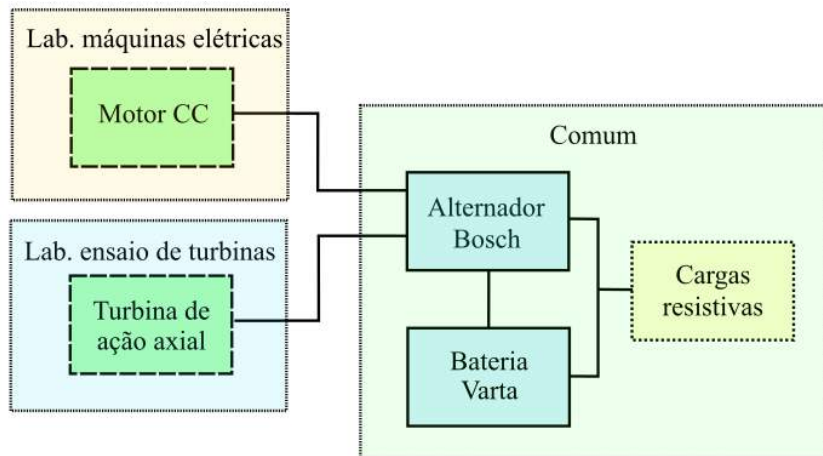


Figura 2.2: Modelos de teste representativos do sistema eletromecânico real da boia oceanográfica.

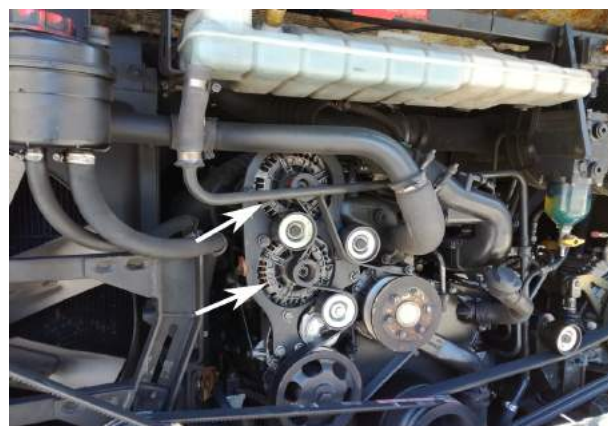
nectado. É desejável ter uma máquina com alto rendimento, robustez, fiabilidade e preço competitivo. Foi proposto pela equipa de investigação o estudo e a caracterização de um alternador de automóvel, para avaliar o seu desempenho ao integrar o sistema elétrico da boia. Por ser intensivamente utilizado em ambientes de elevada temperatura e vibração e por funcionar por longos períodos de tempo a elevadas velocidades de rotação, estabeleceu-se inicialmente como principal opção a usar na boia.

Foi então adquirido um alternador da marca Bosch, com uma tensão nominal de 14 V, corrente nominal de 150 A e uma potência nominal de 2100 W, de modo a satisfazer os requisitos de potência da turbina inicialmente estipulados pela equipa de investigação.

Um alternador de automóvel é um gerador trifásico com um circuito de retificação integrado, sendo responsável por carregar a bateria e alimentar todos os elementos de consumo do veículo, tais como sistemas de ignição, injeção, iluminação, entretenimento, entre outros [25] (ver Fig. 2.3). O alternador, ao ser acionado pelo motor do automóvel através de uma correia, transforma a energia mecânica em energia elétrica, possibilitando a alimentação das inúmeras funcionalidades anteriormente descritas [26].



(a) Gerador.



(b) Motor de autocarro e conjunto de dois geradores.

Figura 2.3: Representação do gerador (alternador de automóvel) fora e dentro do seu ambiente de funcionamento.

### 2.1.1 Descrição dos componentes

Os principais componentes que constituem o gerador são o rotor, o estator, o circuito retificador e o circuito regulador de tensão [27, 28] (ver Fig. 2.4).

O rotor é composto por uma bobina de cobre envolvida por garras, ambas construídas sobre um eixo de aço. Os electro-ímanes estão distribuídos uniformemente no rotor de modo a que haja uma alternância entre os polos norte e sul.

O estator constitui o corpo exterior do alternador e contém três conjuntos de fios, formando enrolamentos distribuídos de modo a criar um sistema alternado trifásico. Estes enrolamentos são feitos de cobre e estão fixos sobre um núcleo de aço. Quer no rotor, quer no estator, os fios de cobre são isolados entre si, cobertos por um verniz especial de modo a resistirem às altas temperaturas e ao contacto com resíduos vindos do exterior.

O circuito retificador transforma as correntes alternadas sinusoidais, criadas no estator, em corrente contínua de saída, possibilitando a alimentação dos equipamentos que operam a corrente contínua. O circuito é formado por uma placa retificadora constituída por seis díodos Zener, posicionados de modo a bloquear as correntes inversas.

O circuito regulador de tensão tem como função monitorizar e regular a tensão do rotor e, conseqüentemente, a tensão de saída do gerador, promovendo as condições ideais para o bom funcionamento do mesmo e da bateria. Esta regulação é feita a partir da medição da tensão da bateria e do conseqüente ajuste da corrente de excitação do rotor através do contacto das escovas do regulador com os anéis coletores do rotor. Com isto, faz-se o controlo da tensão do rotor e por sua vez da tensão de saída do gerador.

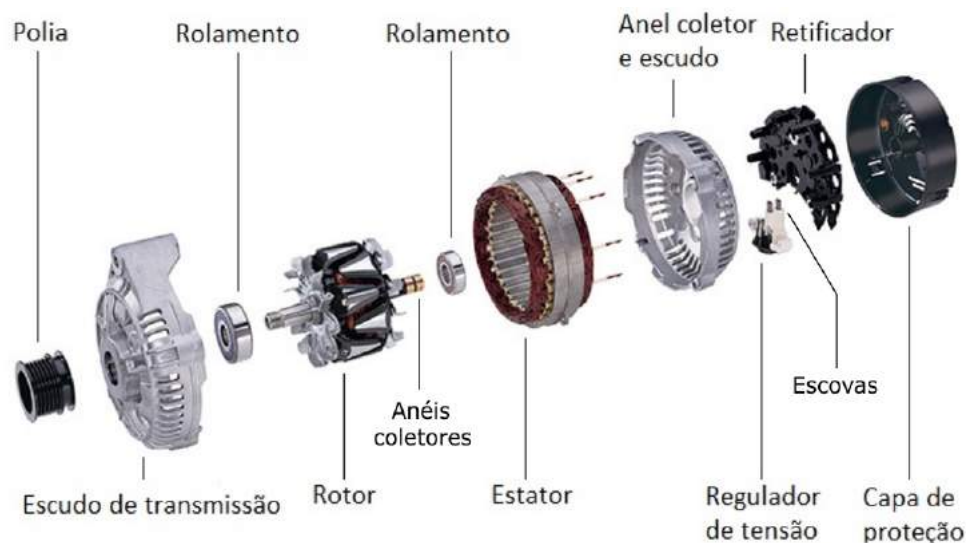


Figura 2.4: Vista expandida do gerador (editado e retirado de [29]).

### 2.1.2 Esquema elétrico do gerador

O esquema elétrico do gerador é representado pelo circuito da Fig. 2.5 e pode ser dividido em duas secções distintas, o circuito exterior e o interior à máquina.

A primeira secção está fora da máquina, sendo composto por uma bateria, dois cabos de ligação à bateria, um fusível, um interruptor e uma lâmpada de sinalização. Atente-se que o fusível não se encontra representado no

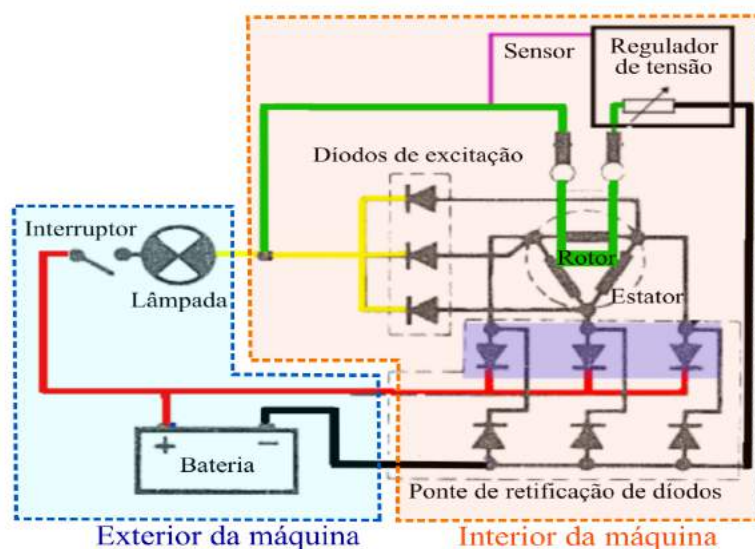


Figura 2.5: Esquema elétrico do gerador (fornecido pelo representante da Bosch e posteriormente editado).

esquema fornecido pelo representante da Bosch, pelo que foi usado como uma proteção extra da bateria. O fusível, o interruptor e a lâmpada são conectados no cabo que liga os terminais positivos do gerador e da bateria. Por outro lado, o segundo cabo faz a ligação entre os terminais negativos do gerador e da bateria, de modo a fechar o circuito. A corrente contínua de saída do gerador fluirá sempre através do seu terminal positivo.

A segunda secção representa o circuito no interior da máquina. Este tem uma parte em que a corrente é alternada sinusoidal e outra em que é posteriormente convertida em corrente contínua. O circuito é composto por uma ponte retificadora de seis díodos, um regulador de tensão que contém um par de escovas, um sensor de corrente, três díodos pertencentes ao circuito de excitação, os enrolamentos do rotor e um par de anéis coletores e ainda os enrolamentos do estator.

Antes do rotor adquirir movimento, o interruptor encontra-se fechado e a lâmpada de sinalização acesa, indicando que a bateria está operacional. Pelo facto do rotor não ser constituído por ímanes permanentes, é necessária uma corrente de excitação no rotor para criar um campo magnético. Esta corrente vem inicialmente da bateria, sendo aplicada no rotor a partir de um par de escovas que está em contacto com dois anéis situados no eixo do mesmo. No entanto, no caso de não haver movimento por parte do rotor, não existe a criação de corrente nos enrolamentos do estator.

Quando o rotor adquire movimento, são criadas tensões alternadas sinusoidais nos enrolamentos do estator devido à criação de um campo magnético. No entanto, só começará a existir produção de corrente quando o campo magnético criado tiver a intensidade suficiente para gerar tensões ligeiramente superiores à tensão da bateria. Isto só acontece quando o rotor atinge uma velocidade de rotação entre 900 e 1000 r.p.m.. A partir daí dá-se a contínua produção de corrente através dos enrolamentos do estator, carregando a bateria. Uma pequena parte dessa corrente irá integrar o circuito de excitação, fazendo com que o gerador se auto-excite. A partir deste momento, a lâmpada apaga-se (pelo facto da tensão aos seus terminais ser nula) e o interruptor pode ser aberto, pelo que o gerador pode trabalhar sem estar ligado à bateria (sendo assim necessária uma carga de dissipação de energia) [30].

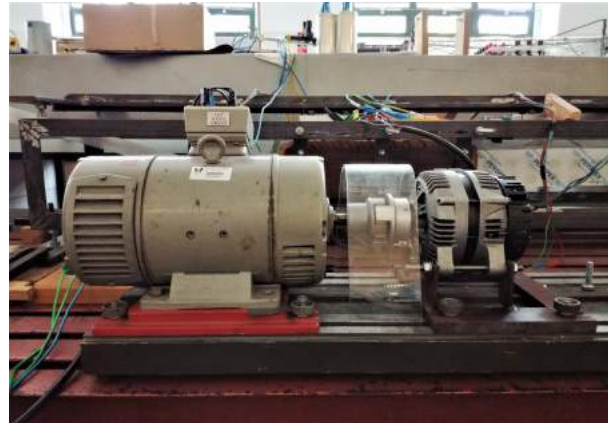
## 2.2 Motor de corrente contínua

Para um estudo inicial do conjunto gerador-bateria-elementos de consumo, um motor de corrente contínua (CC) proporcionou o binário necessário para promover a sua rotação (ver Fig. 2.6). Este motor foi usado até à instalação V-Flow ser totalmente desocupada e pronta a ser ensaiada no decorrer do desenvolvimento desta tese.

As características nominais do circuito de excitação do motor são as seguintes: tensão nominal,  $V_{N,mot}$ , de 220 V, corrente nominal,  $I_{N,mot}$ , de 7,5 A, velocidade de rotação nominal,  $\Omega_{N,mot}$ , de 1500 r.p.m. e potência nominal,  $P_{N,mot}$ , de 1,25 kW.



(a) Motor CC .



(b) Motor CC acoplado ao gerador.

Figura 2.6: Motor CC da primeira instalação.

## 2.3 Turbina de ação axial

A estrutura da turbina é composta por duas secções em tubo de aço, sendo que uma fica aberta para a atmosfera e outra em contacto com o interior da câmara de pleno (ver Fig. 2.7). O tubo tem um diâmetro interior de 600 mm e exterior de 700 mm, contendo uma das secções um veio, capaz de suportar o rotor da turbina. Foi usado um estator de entrada, de modo a guiar o escoamento com o ângulo correto para o rotor. Saliente-se que a configuração do rotor e do estator de entrada a usar nesta tese não apresenta a configuração normal, pelo que a análise profunda do desempenho da turbina está fora do âmbito desta tese. Esta configuração diferente do normal tem somente influência no rendimento da turbina, não comprometendo o bom funcionamento do sistema no geral.

O rotor é composto por 31 pás manufacturadas em plástico ABS, duas flanges de fixação, um cone de fixação ao veio da turbina e 62 parafusos de fixação feitos a partir de aço (ver Fig. 2.8). A massa do rotor totaliza um valor de 30,88 kg, resultando num momento de inércia  $I$  igual a 1,039 kg.m<sup>2</sup>.

## 2.4 Bateria

A bateria adquirida para ser utilizada nos ensaios em laboratório é da tecnologia de chumbo-ácido e é uma bateria de arranque usada em automóveis (ver Fig. 2.9). A bateria é da marca Varta e tem as seguintes características: tensão nominal,  $V_{N,bat}$ , de 12 V, capacidade,  $Q_{bat}$ , de 44 Ah e corrente de ensaio a frio,  $I_{ef,bat}$ , de 440 A.

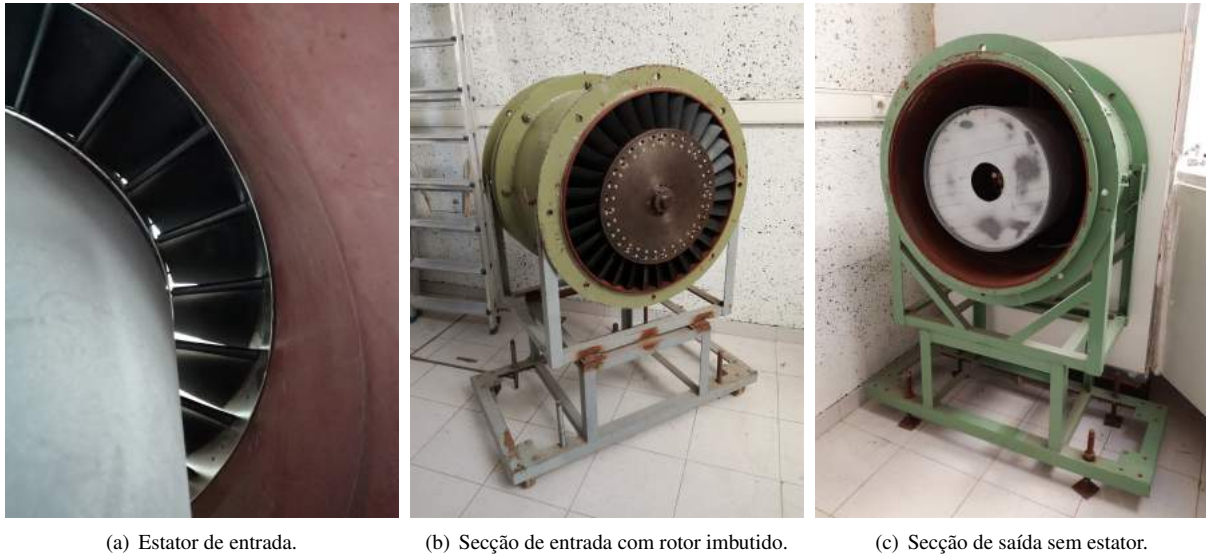


Figura 2.7: Turbina de ação axial a usar na estação V-Flow.



Figura 2.8: Rotor da turbina de ação axial a usar na estação V-Flow.

A bateria tem como finalidade a produção da corrente de excitação inicial do gerador e, por outro lado, assegurar o armazenamento da potência produzida pelo mesmo, como também o fornecimento de potência aos elementos de consumo, caso essa potência não seja assegurada pelo gerador.



Figura 2.9: Bateria de ácido-chumbo.



## 2.4.1 Circuito equivalente da bateria

Admitiu-se que a bateria seria representada por um circuito RC, composto por uma resistência interna e um condensador (ver Fig. 2.10).

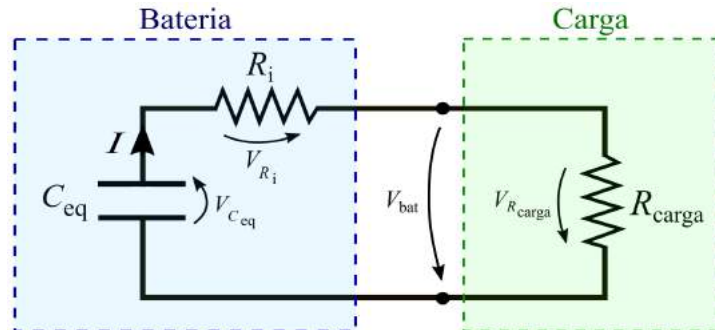


Figura 2.10: Circuito equivalente da bateria.

A resistência interna ( $R_i$ ) simboliza as perdas por efeito de Joule internas da bateria, que implica uma perda de tensão interna inerente ao seu funcionamento. O seu valor aumenta ligeiramente ao fim de uma longa utilização da bateria. No entanto admite-se neste trabalho que não há variação suficiente para comprometer os resultados. Realizou-se um ensaio de modo a aferir a resistência interna da bateria que consistiu em descarregar a bateria durante 10 s com uma corrente de descarga de 15 A, onde se registou a tensão inicial,  $V_i$ , e final,  $V_f$ , durante esse intervalo de tempo. O cálculo da resistência interna,  $R_i$ , faz-se a partir de

$$R_i = \frac{V_i - V_f}{I_i - I_f}, \quad (2.1)$$

pelo que se afere que  $R_i = 0,007 \Omega$ . Desta forma a tensão de funcionamento da bateria toma a forma de

$$V_{C_{eq}} - R_i I = V_{bat}, \quad (2.2)$$

O condensador tem associada a variável  $C_{eq}$ , que representa a capacidade equivalente da bateria, dada por

$$C_{eq} = \frac{Q}{V}, \quad (2.3)$$

em que  $Q$  representa o valor da carga elétrica armazenada na bateria e  $V$  a tensão em vazio inicial entre os seus terminais. A relação entre a tensão e a corrente é representada por

$$I(t) = C_{eq} \frac{dV_{C_{eq}}}{dt}. \quad (2.4)$$

A potência da bateria é determinada por

$$P = V_{bat} I = V_{bat} C_{eq} \frac{dV_{C_{eq}}}{dt}, \quad (2.5)$$

e sabendo a energia total inicialmente acumulada da bateria, a partir do seu *datasheet*, o valor de  $C_{eq}$  é calculado por

$$E = \int_0^t C_{eq} \frac{dV_{C_{eq}}}{dt} V dt = \frac{1}{2} C_{eq} V^2. \quad (2.6)$$

A bateria como nova e totalmente carregada detinha um valor de tensão em vazio  $V$  igual a 12,9 V, o que pela Eq. (2.6), apresentava um valor de energia acumulada  $E = 1,9 \times 10^6$  J, traduzindo-se num valor de  $C_{eq} = 22845$  F e seguidamente de  $Q = 295 \times 10^3$  As. Considera-se que o valor de  $C_{eq}$  toma um valor constante ao longo da utilização da bateria, sendo a sua variação desprezável. Posto isto, a partir da Eq. (2.6) é possível determinar, para qualquer momento, a energia acumulada na bateria e a respetiva percentagem do estado de carga através da medição da tensão aos seus terminais em vazio ( $V$ ).

## 2.5 Carga resistiva

De modo a simular o consumo por parte dos equipamentos da boia oceanográfica, foi concebido e construído em laboratório um banco de cargas resistivas. Estas cargas resistivas consomem e dissipam a energia em forma de calor. A disposição do circuito resistivo foi concebido para ser o mais flexível possível em termos da regulação da potência a ser dissipada pelo mesmo (ver Fig. 2.11).

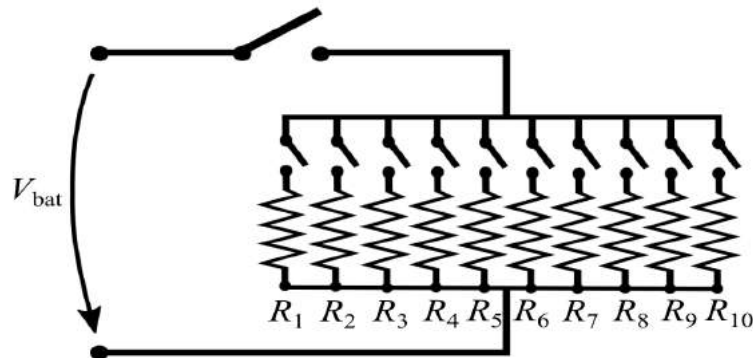


Figura 2.11: Circuito das cargas resistivas.

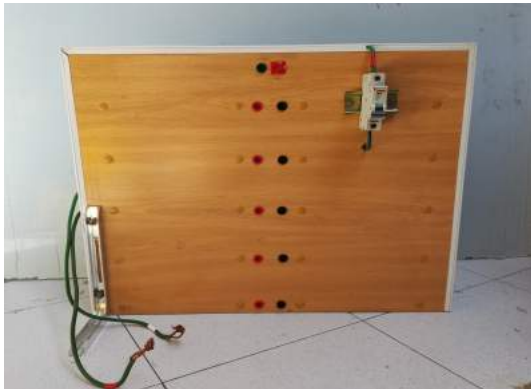
Dez cargas resistivas foram dispostas em paralelo, com a capacidade de serem ligadas ou desligadas do circuito muito facilmente. As cargas resistivas são resistências do tipo bobinadas e apresentam as seguintes características unitárias: potência nominal,  $P_{N,carga}$ , de 180 W, corrente nominal,  $I_{N,carga}$ , de 15 A, tensão nominal,  $V_{N,carga}$ , de 12 V, valor resistivo,  $R_{N,carga}$ , de  $0,8 \Omega$  e dimensões  $30 \times 200$  mm (ver Fig. 2.12).

Deste modo, as cargas resistivas poderiam apresentar valores de resistência entre  $0,8$  e  $0,08 \Omega$ , correspondendo a potências nominais de consumo entre 180 e 1800 W respetivamente. Isto é, com a adição de cada resistência em paralelo ao circuito espera-se um aumento de aproximadamente 180 W de potência de consumo (para condições de funcionamento nominais) (ver Tab. 2.1).

Tabela 2.1: Valores de corrente e potência de carga para condições de funcionamento nominais.

Nº de resistências em paralelo [-]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$R_{eq} [\Omega]$	0,8	0,4	0,27	0,2	0,16	0,13	0,11	0,10	0,09	0,08
$I_{carga} [A]$	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150
$P_{carga} [W]$	180	360	540	720	900	1080	1260	1440	1620	1800

As carga resistivas servem também para efetuar descargas à bateria quando é necessário realizar ensaios em que o seu estado de carga é inferior a 100%.



(a) Vista frontal do banco.



(b) Vista traseira do banco.

Figura 2.12: Banco de cargas resistivas.



## Capítulo 3

# Análise experimental de sensibilidade

Neste capítulo é descrita a bancada de ensaios de sensibilidade do laboratório de máquinas elétricas do IST, bem como a instrumentação usada e os procedimentos de ensaio adotados.

### 3.1 Descrição e construção da instalação

Na Fig. 3.1 encontra-se representada a bancada construída para a análise experimental de sensibilidade, localizada no laboratório de máquinas elétricas do IST.

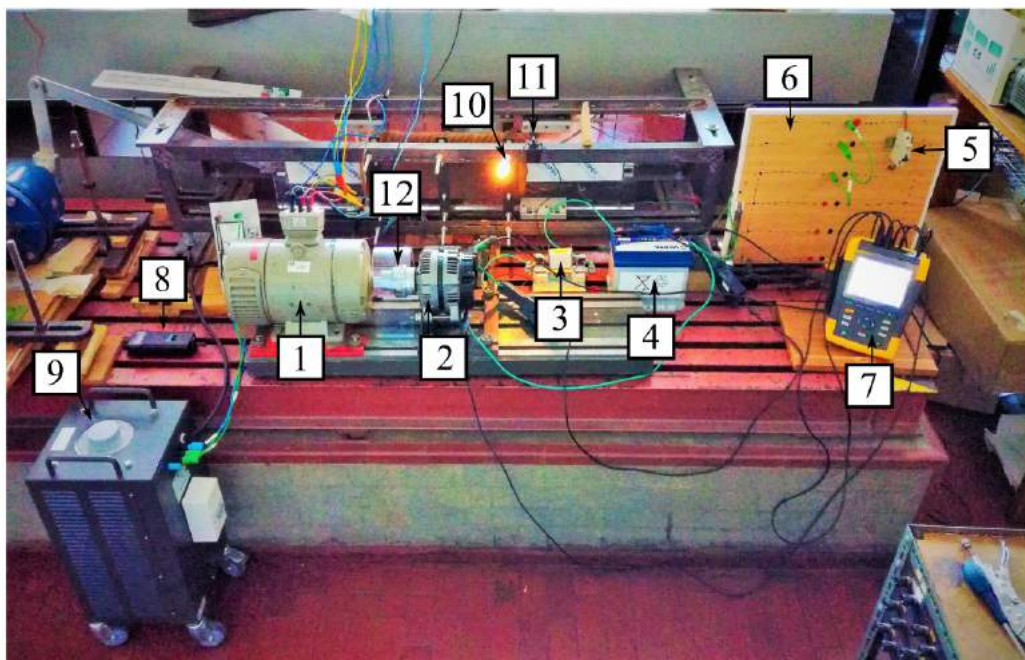


Figura 3.1: Instalação de análise de sensibilidade: (1) motor CC, (2) gerador, (3) fusível, (4) bateria, (5) disjuntor, (6) banco de cargas resistivas, (7) analisador de potência FLUKE, (8) tacómetro, (9) auto-transformador, (10) lâmpada, (11) interruptor, (12) união elástica.

O motor CC (1) foi acoplado ao gerador (2) através de uma união elástica (12), permitindo a propagação da velocidade de rotação e de potência do motor para o gerador. O motor foi ligado a um auto-transformador, o

qual possibilitava o comando da sua velocidade de rotação. A velocidade de rotação por sua vez foi medida com um tacómetro de foto/contacto (8). O gerador foi fixo à bancada através de um suporte feito em aço construído para o efeito (ver Fig. 3.3 (b)). Posteriormente, o gerador foi ligado à bateria (4) por meio de cabos revestidos a borracha com o núcleo constituído por um multifilamento de cobre, com um diâmetro exterior de 6 mm e interior de 5 mm. No cabo de ligação que liga os terminais positivos do gerador e da bateria foi posicionado um fusível de 160 A (3) a fim de proteger a bateria de possíveis picos de corrente de saída do gerador e assim estabelecer uma ligação segura entre os dois componentes. Aos terminais da bateria foi ligado o banco de cargas resistivas (6) para simular a potência de consumo dos equipamentos da boia. Entre o terminal positivo da bateria e da carga, foi posicionado um disjuntor (5) para atuar como proteção do banco de cargas resistivas e também como um interruptor que possibilitasse controlar o trânsito de corrente para a carga (ligar/desligar) de um modo seguro e rápido. Construiu-se de raiz o banco de cargas resistivas (6) (ver Fig. 3.2). Após a aquisição das dez resistências e dos seus pequenos suportes em ferro, foi necessário construir a sua placa de suporte e estabelecer o esquema elétrico representado na Fig. 2.11. Foram feitos trabalhos de furação a todos os suportes de ferro das resistências e também à placa de madeira que se usou para a fixação das mesmas. Os fios de ligação usados eram revestidos a borracha com um núcleo feito de monofilamento de cobre com um diâmetro externo de 3 mm e interno de 2 mm, os quais foram cortados à medida, descarnados e nas suas pontas foram colocados bornes de ligação. Para que a placa permanecesse vertical, foram fixadas duas cantoneiras de ferro de ambos os lados da placa. Sendo que o gerador se trata de um alternador de automóvel, foi indispensável a compra de uma lâmpada de sinalização (10), permitindo a comutação do circuito de excitação do gerador. A esta lâmpada foi ligado um pequeno interruptor (11) para ligar/desligar o circuito da lâmpada. Finalmente, foi utilizado um analisador de potência FLUKE para medir as correntes e as tensões do gerador e da bateria.

Na Fig. 3.4 encontra-se representado o esquema equivalente da bancada.



Figura 3.2: Construção do banco de cargas resistivas.



(a) Furos de suporte do gerador.



(b) Suporte de fixação do gerador.

Figura 3.3: Furos e estrutura de suporte do gerador.

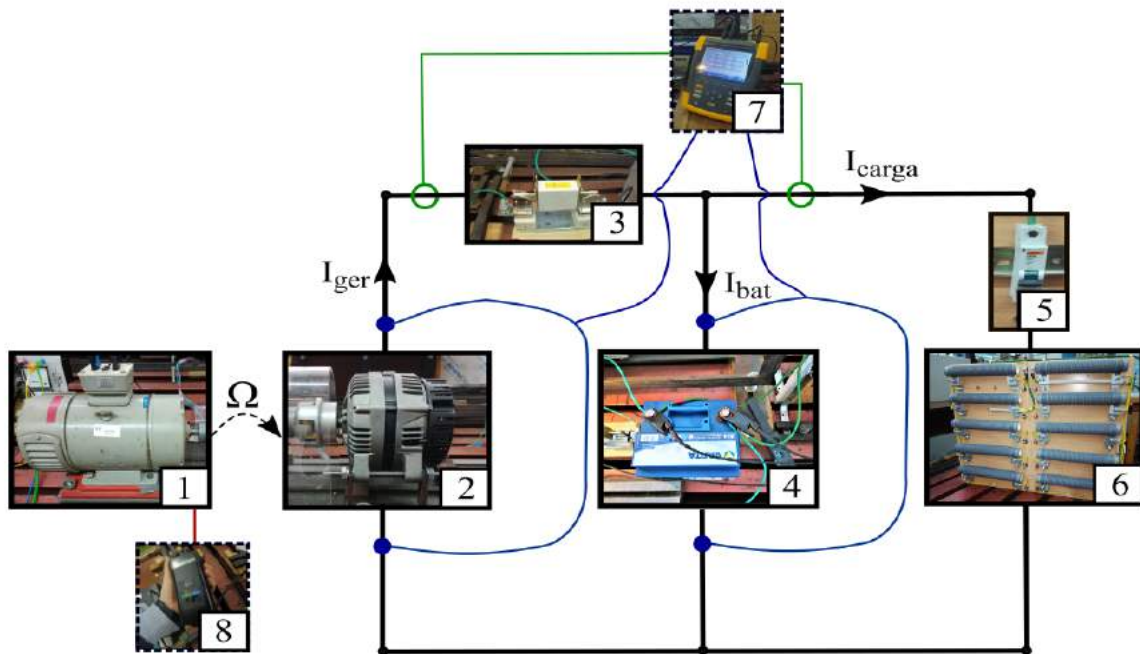


Figura 3.4: Esquema equivalente da instalação de análise de sensibilidade: (1) motor CC, (2) gerador, (3) fusível, (4) bateria, (5) disjuntor, (6) banco de cargas resistivas, (7) analisador de potência FLUKE, (8) tacômetro.

## 3.2 Instrumentação

No decorrer dos ensaios experimentais foi essencial medir grandezas tais como corrente, tensão, potência e velocidade de rotação. Nas secções seguintes apresentam-se os equipamentos de medição dessas grandezas.

### 3.2.1 Corrente, tensão e potência elétrica

Para medir as grandezas elétricas como a corrente, tensão e potência foi utilizado um analisador de potência FLUKE 435 Série II (7) (ver Fig. 3.5 (a)) [31]. Este equipamento dispõe de várias pinças de medição de corrente e de tensão (ver Fig. 3.5 (b) e (c)). Foram também utilizados um amperímetro e um multímetro portáteis de modo a comparar em simultâneo os valores medidos pelo FLUKE (ver Fig. 3.6). Houve sempre o cuidado de regular os



(a) Analisador de potência FLUKE 435 Série II.



(b) Pinças de medição de corrente e de tensão do gerador.



(c) Pinças de medição de corrente da carga e de tensão da bateria.

Figura 3.5: Equipamento de medição de corrente, tensão e potência.



Figura 3.6: Amperímetro e multímetro.

equipamentos para o valor zero, antes de efetuar qualquer medição de corrente.

Para caracterizar o sistema consideraram-se três pontos, assinalados na Fig. 3.4, denominados por gerador (2), bateria (4) e carga (6). Nestes pontos foram medidos valores de corrente,  $I_{\text{ger}}$  e  $I_{\text{carga}}$ , tensão,  $V_{\text{ger}}$  e  $V_{\text{bat}}$ , e posteriormente potência elétrica,  $P_{\text{ger}}$ ,  $P_{\text{bat}}$  e  $P_{\text{carga}}$ . Os sentidos gerador-bateria e gerador-carga são aqui considerados positivos.

De acordo com a leis das malhas [32], a corrente da bateria,  $I_{\text{bat}}$ , é dada por

$$I_{\text{bat}} = I_{\text{ger}} - I_{\text{carga}}. \quad (3.1)$$

Em cada um dos pontos a potência elétrica é dada por

$$P_{\text{ger}} = V_{\text{ger}} I_{\text{ger}}, \quad (3.2)$$

$$P_{\text{bat}} = V_{\text{bat}} I_{\text{bat}}, \quad (3.3)$$

$$P_{\text{carga}} = V_{\text{bat}} I_{\text{carga}}. \quad (3.4)$$



### 3.2.2 Velocidade de rotação

A velocidade de rotação foi medida com um tacómetro digital de foto/contacto (8) (ver Fig. 3.7 (a)). Este tacómetro possui num dos extremos um ponto de contacto que possibilita o registo da velocidade de rotação. A velocidade de rotação foi medida diretamente no veio do motor CC, como demonstrado na Fig. 3.7 (b).



(a) Tacómetro digital foto/contacto.



(b) Ponto de medição da velocidade de rotação do motor CC.

Figura 3.7: Tacómetro e ponto de medição da velocidade de rotação.

### 3.3 Sistema de aquisição de dados

O sistema de aquisição de dados consistiu em usar o analisador de potência FLUKE, um cartão de memória SD, um computador e um tacómetro (ver Fig. 3.8). Com o FLUKE foi possível medir os parâmetros elétricos  $I_{ger}$ ,  $I_{carga}$ ,  $V_{ger}$ ,  $V_{bat}$  com uma frequência de amostragem de 4 Hz (máxima permitida pelo instrumento) e armazená-los no cartão de memória, que permitia a sua transferência para o computador. Recorreu-se ao software de análise de dados da FLUKE, o Power Log 430 - II, para ser possível exportar todos os valores registados para formato *.txt*. Posteriormente, os dados são exportados para o MATLAB [33], assim como o registo manual da velocidade de rotação para cada ensaio.

### 3.4 Procedimentos de teste à instalação

Para os ensaios de análise de sensibilidade a bateria encontrava-se com uma tensão inicial de 11.7 V. Doravante este estado de carga denomina-se de meia carga.

Primeiramente pretendeu-se aferir a relação entre a velocidade de rotação do gerador, a carga resistiva aplicada e consequentes correntes  $I_{ger}$ ,  $I_{carga}$ , e tensões  $V_{ger}$  e  $V_{bat}$ . Estes ensaios consistiram em impor uma velocidade de rotação ao gerador e aumentar a carga resistiva gradualmente em intervalos de cinco a dez segundos. Foram testadas quatro velocidades de rotação com a adição sucessiva de seis cargas de  $0.8 \Omega$  cada.

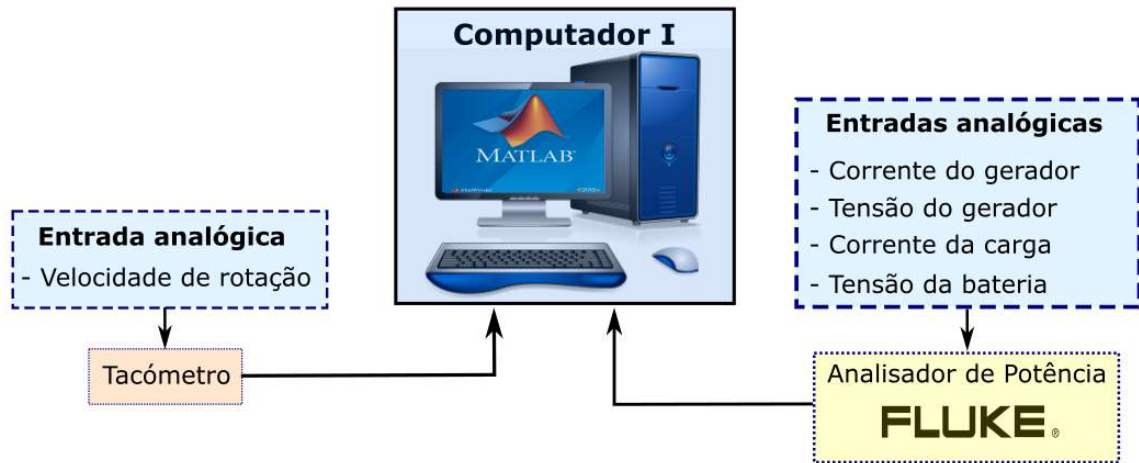


Figura 3.8: Sistema de aquisição de dados para os ensaios de análise de sensibilidade.

Seguidamente, com a carga resistiva limitada a  $0.4 \Omega$  (representação aproximada da potência de consumo da boia - 360 W) fez-se um varrimento com pequenos incrementos na velocidade de rotação do gerador, novamente para aferir os parâmetros elétricos do ensaio acima referido.

Por fim, fizeram-se vários ensaios a fim de verificar a influência nas três correntes ( $I_{ger}$ ,  $I_{bat}$  e  $I_{carga}$ ) e na velocidade de rotação do gerador, após um aumento súbito no valor de potência de consumo por parte da carga. Este ensaio serviu para avaliar uma técnica de controlo de velocidade do gerador e respetivos picos de corrente associados com a ligação das cargas resistivas e, por outro lado, averiguar três situações de carregamento súbito de AUVs, examinando três potências de carregamento distintas para três diferentes velocidades de rotação iniciais do gerador.

## Capítulo 4

# Análise experimental do Modelo

Neste capítulo será descrito todo o processo da conceção da instalação de testes do conjunto turbina e gerador, bem como a instrumentação usada, os procedimentos de ensaios adotados e o sistema de aquisição de dados concebido para o caso.

### 4.1 Descrição da instalação

A instalação de ensaios de turbinas de 55 kW situada no pavilhão de mecânica IV do IST é utilizada para testar turbinas de ar auto-retificadoras sob escoamento unidirecional permanente e variável. Um esquema da instalação é apresentado na Fig. 4.1.

A câmara de adaptação (2), acoplada à câmara de pleno 1 (3), permite a montagem de turbinas de eixo vertical de uma forma mais eficiente. Na presente tese, a turbina a testar possui um eixo horizontal e é ligada diretamente à câmara de pleno 1 e o furo existente na câmara de adaptação é devidamente tapado. A câmara de pleno 1 permite a uniformização e desaceleração do escoamento para a entrada deste numa conduta composta por uma estrutura

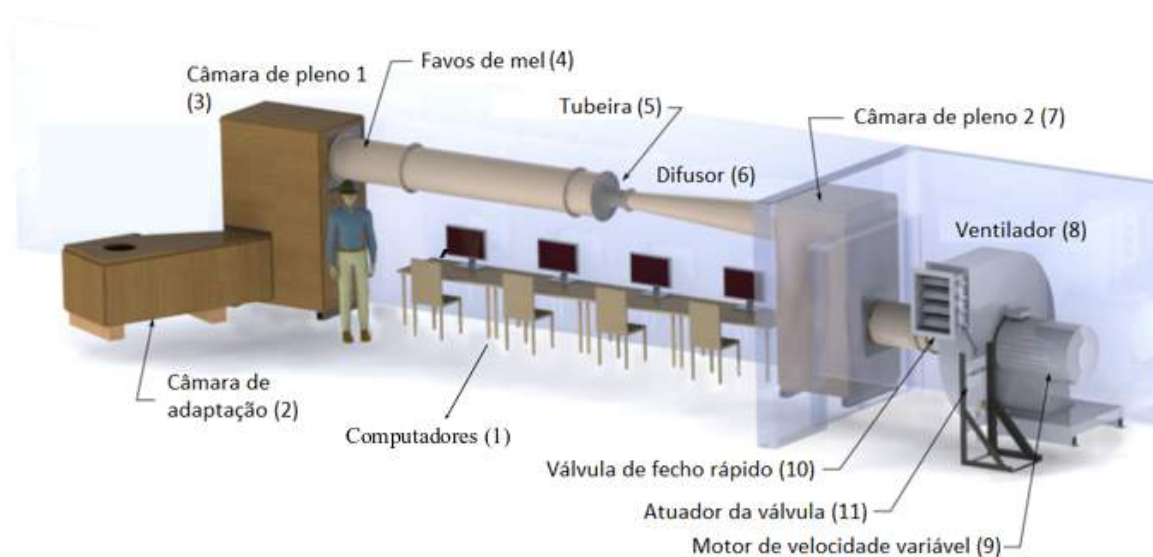


Figura 4.1: Esquema da instalação de ensaios de turbinas de 55 kW do IST (retirado de [19]).

de favos de mel (4). Esta estrutura retira vorticidade ao escoamento e alinha-o para a sua entrada numa tubeira (5) convergente onde o caudal é medido. Seguidamente, encontra-se um difusor (6) desenhado para recuperar a energia cinética, que por sua vez está conectado a uma segunda câmara de pleno (7). Esta câmara de pleno atua como proteção suavizando as ondas de pressão que podem ser produzidas pelo fecho rápido da válvula de ar (VFR) (10) a jusante. Um ventilador de 55 kW (8) está conectado à câmara de pleno 2 através de uma conduta de diâmetro constante e impõe a queda de pressão na instalação. Este ventilador é acionado por um motor (9) o qual é regulado por um variador de frequência com dois quadrantes. Por fim, a jusante do ventilador encontra-se a abertura de saída do ar para a atmosfera, a qual contém a válvula de ar ligada a um atuador (11).

## 4.2 Construção da instalação

De modo a testar o sistema electromecânico da boia procederam-se a trabalhos de transporte da turbina (ver Apêndice C), montagem de alguns componentes da mesma e adaptação da instalação experimental.

Para fixar o gerador à estrutura pré-existente da turbina e alinhar os veios do gerador com o do rotor da turbina, foram desenhadas as estruturas apresentadas nas Fig. 4.2 (a), (b) e (c). Os desenhos CAD 3D destes elementos encontram-se no Apêndice C [34]. Utilizaram-se cantoneiras de aço, as quais sofreram trabalhos de corte, furação e soldadura, tendo em consideração a necessidade de integrar um sensor de binário e as uniões elásticas dos veios no suporte. Todas as dimensões foram definidas de acordo com as limitações do espaço de fixação. Através de uniões elásticas, os veios do gerador, do rotor da turbina e do sensor de binário foram acoplados. Aparafusou-se um tripé em aço à estrutura de cantoneiras, proporcionando uma maior estabilidade ao suporte do gerador, evitando indesejadas vibrações.

Para a montagem do rotor da turbina, as suas pás foram posicionadas e aparafusadas entre os discos de fixação em alumínio (ver Fig. 4.3). De seguida, posicionou-se o rotor na secção de entrada da turbina, inseriu-se o veio de ligação da turbina no furo do rotor e foram fixados entre si com dois anéis roscados. Seguidamente, as duas secções da turbina foram finalmente alinhadas e aparafusadas entre si.



(a) Peças de fixação do gerador.

(b) Estrutura de suporte e fixação do gerador.

(c) Montagem completa do suporte e fixação do gerador e sensor de binário.

Figura 4.2: Montagem da estrutura de suporte e fixação do gerador e sensor de binário.



(a) Pás do rotor.



(b) Perfil da pá.



(c) Montagem do rotor.

Figura 4.3: Processo de montagem do rotor.

Para fazer a ligação entre a turbina e a câmara de pleno 1, foi desenhada uma nova placa de madeira para fazer o novo furo de fixação para a turbina numa das faces da câmara. Após a furação da abertura da turbina e dos furos de fixação da segunda secção da mesma à câmara de pleno, a placa foi colada com silicone à câmara e a turbina aparafusada a essa placa, integrando assim a instalação (ver Fig. 4.4).

Foram montadas proteções em madeira e plástico acrílico, tendo sido reforçado no caso do regime variável face ao seu funcionamento mais intenso.

As instalações adotadas em regime permanente e variável encontram-se respetivamente ilustradas nas Figs. C.3 e 4.5. Na Fig. 4.6 está ilustrado o esquema equivalente das duas instalações.

### 4.3 Instrumentação

No decorrer dos ensaios experimentais foi necessário medir grandezas tais como pressão, binário, velocidade de rotação, caudal volúmico, massa volúmica do ar, corrente, tensão e potência. Nas secções seguintes apresentam-se os equipamentos de medição dessas grandezas.

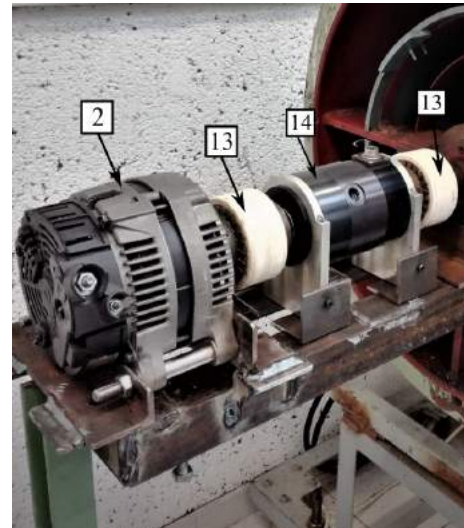
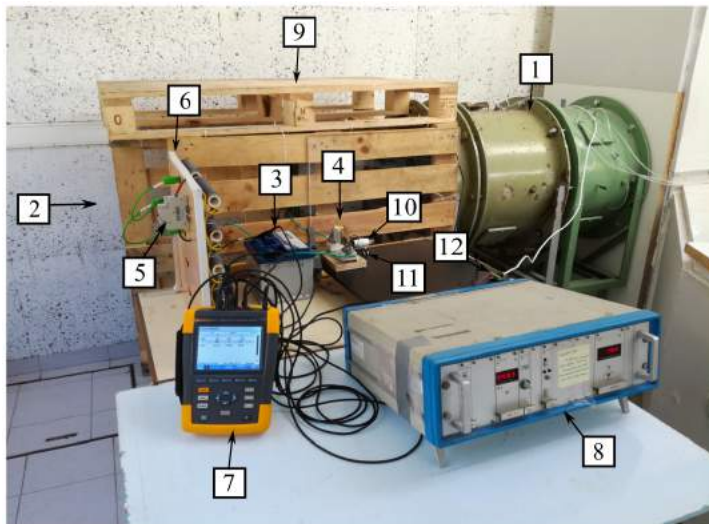


(a) Local de fixação da turbina à câmara de pleno.



(b) Nova porta de fixação da turbina.

Figura 4.4: Processo de transformação do novo ponto de fixação da turbina.



(a) (1) turbina, (2) gerador, (3) bateria, (4) fusível, (5) disjuntor, (6) banco de cargas resistivas, (7) analisador de potência FLUKE, (8) sistema de tratamento de dados e alimentação do sensor de binário, (9) proteção em madeira e acrílico reforçada, (10) lâmpada, (11) interruptor, (12) ligação via cabo *ethernet* para transmissão dos sinais de binário e velocidade de rotação.

(b) (2) gerador, (13) uniões elásticas, (14) sensor de binário e velocidade de rotação.

Figura 4.5: Instalação em regime variável.

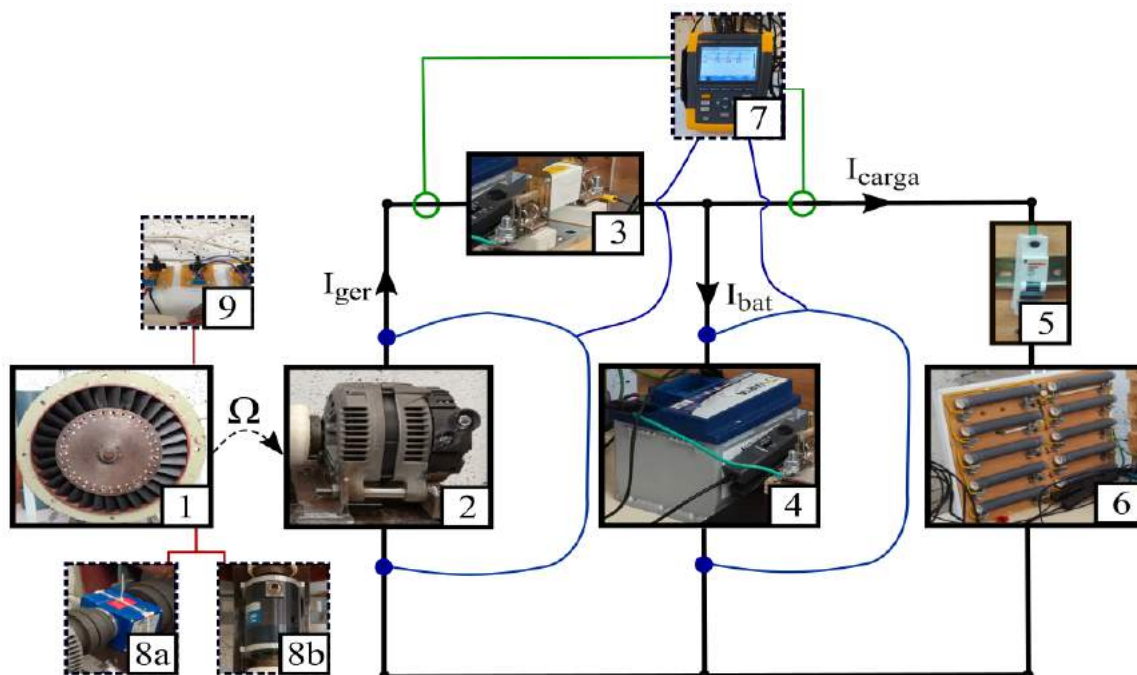


Figura 4.6: Esquema equivalente da instalação em regime permanente e variável: (1) turbina de ação axial, (2) gerador, (3) fusível, (4) bateria, (5) disjuntor, (6) banco de cargas resistivas, (7) analisador de potência FLUKE, (8a e 8b) sensores de binário e velocidade de rotação (RWT411-DE-KB, TG-5/BP) respetivamente, (9) manómetros de pressão.

### 4.3.1 Pressão

A pressão foi medida em secções distribuídas ao longo da instalação apresentadas na Fig. 4.7. A primeira tomada localiza-se na câmara de pleno,  $\Delta p_0$ , (Fig. 4.7 (a)), a segunda imediatamente antes da tubeira convergente,  $p_1$ , (Fig. 4.7 (b)) e a terceira imediatamente depois desta,  $p_2$ , ( Fig. 4.7(c)). As tomadas são compostas por furos



(a) Tomadas de pressão na câmara de pleno. (b) Tomadas de pressão antes da tubeira convergente (a seta a traço interrompido indica a tomada que está atrás do tubo). (c) Tomadas de pressão depois da tubeira convergente.

Figura 4.7: Tomadas de pressão estática ao longo da instalação V-Flow.

de 1 mm de diâmetro e a pressão é lida através de tubos de latão concêntricos com o furo da tomada de pressão. Tubos de plástico unem estes tubos aos manómetros (ver Fig. 4.8 (c)). Para todas as secções referidas, existiam três tomadas de pressão dispostas no mesmo plano, as quais estavam ligadas em paralelo a um tubo que as ligava ao manómetro respetivo. Portanto, o valor adquirido pela placa de aquisição de dados é uma média das três tomadas de pressão.

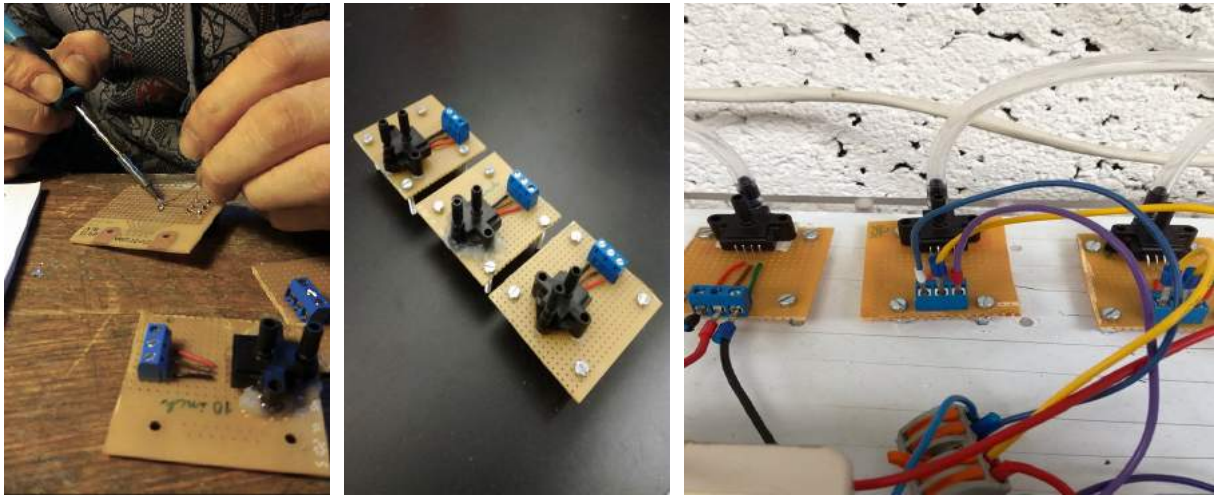
Os manómetros convertem uma diferença de pressão numa diferença de tensão capaz de ser lida pela placa de aquisição de dados utilizada. Dentro da instalação, o valor de pressão máxima,  $\Delta p_{\max}$ , variava acima da gama de funcionamento de dois manómetros. Sendo assim, utilizaram-se cinco manómetros de modo a cobrir a gama de pressões para os diferentes pontos de funcionamento (ver Tab. 4.1). Garante-se desta forma que pressões mais baixas são lidas com sensores com a devida precisão. Os manómetros foram integrados num circuito que se construiu para adquirir os sinais de pressão, o que envolveu trabalhos de corte e descarte de fios, soldadura a estanho e posicionamento dos circuitos em placas individuais (ver Fig. 4.8). Na Tab. 4.2 são apresentadas as retas de calibração usadas, fornecidas pelo fabricante dos manómetros.

Tabela 4.1: Gamas de funcionamento dos manómetros de pressão utilizados.

Tomada de pressão	Gama do manómetro [Pa]	
	$\Delta p_{\max} \leq 6800$	$\Delta p_{\max} \geq 6800$
$\Delta p_0$	0 - 2500	0 - 6800
$p_1$	0 - 2500	0 - 6800
$p_2$	0 - 6800	0 - 10 000

Tabela 4.2: Valores das retas de calibração dos manómetros de pressão.

Gama [Pa]	$m$ [Pa/V]	$b$ [Pa]	$R^2$	Precisão [%]
0 - 2500	1000	-2500	1	$\pm 0,1$
0 - 6800	2720	-6800	1	$\pm 0,1$
0 - 10 000	4000	-10 000	1	$\pm 0,1$



(a) Processo de soldadura dos circuitos dos manómetros. (b) Placas com os manómetros e circuitos. (c) Ligação dos manómetros de pressão às tomadas de pressão e respetivos fios de sinal, alimentação e ground.

Figura 4.8: Manómetros de pressão estática.

### 4.3.2 Binário e velocidade de rotação

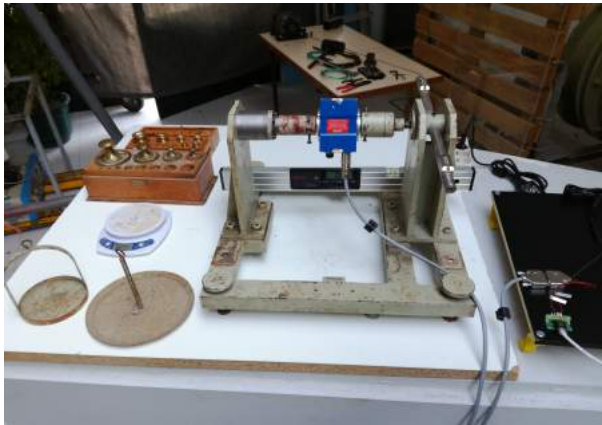
Para a medição da velocidade de rotação e do binário foram utilizados dois sensores (ver Fig. 4.9). O primeiro sensor a ser utilizado foi o RWT411-DE-KB. A sua escolha teve por base a gama de funcionamento das variáveis a medir. No entanto face a uma avaria durante os ensaios, houve a necessidade de usar um segundo sensor para finalizar os ensaios, o modelo TG-5/BP. A gama de funcionamento dos dois sensores está exibida na Tab. 4.3. Após uma análise da Tab. 4.3 verifica-se a elevada diferença entre as gamas de funcionamento dos dois sensores. Para validar o uso do segundo sensor, repetiram-se alguns ensaios anteriormente efetuados com o primeiro sensor. Aferiu-se que os resultados obtidos coincidiram com as medições efetuadas pelo primeiro sensor (RWT411-DE-KB), validando assim o uso do sensor TG-5/BP.

Foi realizada a calibração dos dois sensores utilizando uma bancada de calibração para o efeito (ver Fig. 4.10). A bancada é composta por uma estrutura que fixa as duas extremidades do veio do sensor e por dois braços que

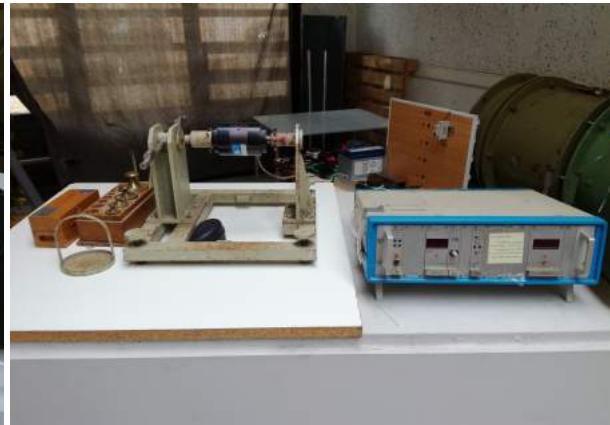


Figura 4.9: Sensores de binário e velocidade de rotação: esquerda (RWT411-DE-KB), direita (TG-5/BP).





(a) Sensor de binário RWT411-DE-KB.



(b) Sensor de binário TG-5/BP.

Figura 4.10: Bancadas de calibração dos sensores de binário.

suportam pratos para a adição de massas. Ao se adicionarem massas provoca-se um binário e a relação entre o binário e a tensão de saída lida com uma placa de aquisição de dados é estabelecida. Os binários podem ser positivos ou negativos, tendo em conta o braço onde são aplicadas as massas, tendo-se estipulado o esquerdo para os valores positivos e o direito para os negativos.

As medições foram cuidadosamente controladas, de modo a que a força produzida pela massa aplicada tivesse apenas a componente vertical. Para isto, foram usados dois níveis, de modo a assegurar a horizontalidade dos braços e a inclinação nula num plano perpendicular aos braços.

Desta forma, o binário é calculado por

$$T = mbg, \quad (4.1)$$

em que  $T$  representa o binário aplicado em Nm,  $m$  a massa aplicada em kg,  $b$  o comprimento do braço onde a força é aplicada em m, e  $g$  a força de aceleração da gravidade em  $m/s^2$ .

O procedimento de calibração é seguidamente descrito:

1. Posicionou-se o sensor de binário nas peças de suporte da bancada e fixaram-se os veios com parafusos. Certificou-se que os veios não deslizavam sobre as peças de fixação, o que podia comprometer os resultados.
2. Ligou-se a alimentação do sensor de binário e conectou-se os cabos de sinal do sensor à placa de aquisição de dados. Conectou-se a placa de aquisição de dados ao computador.
3. Fez-se um programa em Matlab que adquiria o sinal da tensão de saída e gravava durante 30 s os seus valores, com uma frequência de amostragem de 500 Hz.
4. Antes de se correr o programa em Matlab e adquirir o sinal, certificou-se sempre que os braços estavam horizontais e que a força produzida pelas massas tinha somente uma componente vertical (por via dos dois níveis). Imobilizou-se a balança de suporte das massas para prevenir interferências nas medições.
5. Usaram-se pratos para o posicionamento das massas e uma argola para fixar cada um dos pratos nos respectivos braços e contabilizaram-se os seus pesos (pratos e argolas) na análise dos resultados.
6. Realizaram-se medições de ordem crescente e decrescente entre 0 e 10 kg, com incrementos de 0,5 kg para ambos os braços.

7. Após a aquisição de todos os valores de tensão, elaborou-se um gráfico com a relação entre o binário e a tensão de saída e realizou-se a regressão linear dos pontos para ambos os braços.

Relativamente à velocidade de rotação, os sensores foram calibrados diretamente na instalação experimental, onde se registaram valores de tensão com o sistema de aquisição de dados e de velocidade de rotação através de um tacómetro digital que contém uma célula fotoelétrica. Os ensaios tiveram uma duração de 60 s, com sentidos ascendente e descendente e teve-se o cuidado de estabilizar sempre a velocidade de rotação, após 60 s de tempo de espera. As retas de calibração obtidas relativamente aos valores de binário e velocidade de rotação são apresentadas nas Figs. 4.11 e 4.12 e Tab. 4.3. Para uma melhor visualização, as legendas das figuras apresentam a gama de funcionamento do binário dos dois sensores, pelo que 0-20 Nm e 0-100 Nm correspondem respetivamente aos modelos RWT411-DE-KB e TG-5/BP.

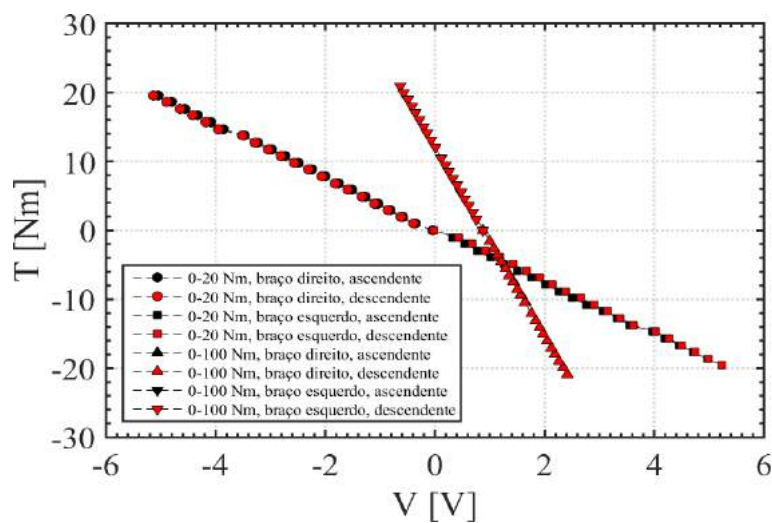


Figura 4.11: Retas de calibração de binário.

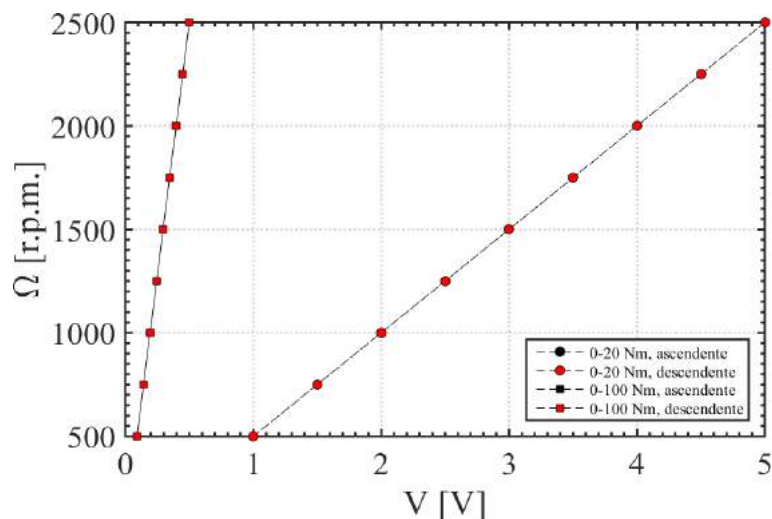


Figura 4.12: Retas de calibração de velocidade de rotação.

As Figs. 4.11 e 4.12 demonstram um comportamento linear entre a tensão e as variáveis, como seria expectável. Não foram detetados efeitos de histerese.

Tabela 4.3: Gama de funcionamento dos sensores e valores das retas de calibração de binário e velocidade de rotação.

Sensor	Variável	Gama	$m$	$b$	$R^2$	Precisão [%]
RWT411-DE-KB	$T$ [Nm]	0 - 20	-4,0673 [Nm/V]	0,1246 [Nm]	0,999	$\pm 0,1$
	$\Omega$ [r.p.m.]	0 - 2500	500 [r.p.m./V]	0 [r.p.m.]	1	$\pm 0,1$
TG-5/BP	$T$ [Nm]	0 - 100	-13,733 [Nm/V]	12,099 [Nm]	0,999	$\pm 0,1$
	$\Omega$ [r.p.m.]	0 - 10 000	4893,2 [r.p.m./V]	55,65 [r.p.m.]	0,999	$\pm 0,1$

### 4.3.3 Caudal volúmico

O caudal volúmico foi medido através da diferença de pressão na tubeira convergente (ver Fig. 4.7 (b) e (c)). O desenho da tubeira e o cálculo do caudal são os especificados pela norma AMCA 210/67 [35].

### 4.3.4 Massa volúmica do ar

A massa volúmica do ar,  $\rho_{ar}$ , foi calculada através de medições da pressão atmosférica,  $p_{atm}$ , temperatura seca,  $T_{se}$ , e temperatura húmida,  $T_{hu}$  do ar. Relativamente à pressão atmosférica, esta foi medida com um barómetro digital da marca Testo modelo 551, com precisão de  $\pm 300$  Pa. As temperaturas, seca e húmida, foram medidas com um termómetro de mercúrio de menor divisão 0,1 mmHg, tendo a segunda sido medida com o bolbo envolvido em algodão húmido. A massa volúmica do ar foi então calculada de acordo com a norma AMCA 210/67 [35], por

$$\rho_{ar} = \frac{p_{atm} - 0,378p_p}{R(T_{se} + 273,15)}, \quad (4.2)$$

onde

$$p_p = p_e - p_{atm} \left( \frac{T_{se} - T_{hu}}{1500} \right), \quad (4.3)$$

e

$$p_e = 3,25T_{se}^2 + 18,6T_{hu} + 692, \quad (4.4)$$

em que  $R = 287,1$  J/kgK,  $T_{se}$  e  $T_{hu}$  são dados em  $^{\circ}\text{C}$  e  $p_{atm}$ ,  $p_p$  e  $p_e$  em Pa.

### 4.3.5 Corrente, tensão e potência elétrica

A instrumentação usada para a medição das correntes, tensões e potências elétricas foi a mesma utilizada nos ensaios de análise de sensibilidade (ver Sec. 3.2.1 do Cap. 3).

## 4.4 Sistema de aquisição de dados

Foram utilizados dois tipos de sistemas de aquisição de dados, um para o regime permanente e outro para o regime variável.

### 4.4.1 Regime permanente

O sistema de aquisição de dados para o regime permanente é apresentado na Fig. 4.13.



Figura 4.13: Sistema de aquisição de dados em regime permanente.

Utilizou-se um computador, com a sua *Motherboard* conectada a uma placa da National Instruments (NI) NI PCI-6221 através do barramento *Peripheral Component Interconnect* (PCI). A placa NI estava por sua vez ligada a um bloco de terminais, que continha entradas e saídas, analógicas e digitais. A este bloco de terminais estavam ligados todos os sensores a serem utilizados nos ensaios (pressão, velocidade de rotação e binário), através de entradas analógicas (AI) com os respectivos cabos de ligação de sinal e terra (*ground*). Devido à grande distância entre o sensor de binário e velocidade de rotação e a placa de aquisição, utilizou-se um dispositivo de interface, que permite a comunicação através de um cabo de *ethernet* - CAT6.

Os dados foram posteriormente recolhidos e guardados por um programa feito na versão académica do software MATLAB [33], que tinha a habilidade de comunicar, adquirir e guardar os sinais recebidos pela placa. Este programa possibilitava também a visualização dos sinais em tempo real, de modo a que fosse possível a monitorização do bom funcionamento da instalação e de todos os sensores. Todas as variáveis lidas a partir da placa de aquisição de dados foram medidas com uma frequência de 100 Hz.

Relativamente aos parâmetros elétricos,  $V_{ger}$ ,  $I_{ger}$ ,  $V_{bat}$  e  $I_{carga}$ , a sua aquisição foi feita a partir do analisador de potência FLUKE. O pós-processamento dos parâmetros elétricos foi o mesmo descrito na Sec. 3.2.1 do Cap. 3. Todas as variáveis lidas a partir do FLUKE foram novamente medidas com uma frequência de 4 Hz.

#### 4.4.2 Regime variável

O sistema de aquisição de dados em regime variável equipara-se com o usado em regime permanente. No entanto existe um computador adicional que controla a abertura da válvula de fecho rápido (ver Fig. 4.14).

O computador de aquisição de dados foi o mesmo usado no regime permanente e serviu para adquirir os mesmos sinais do regime permanente, com a mesma frequência de amostragem do analisador de potência FLUKE (4 Hz). Relativamente ao novo computador, este tinha a finalidade de impor um sinal de abertura/fecho da válvula de modo a simular um dado espectro de pressão. No seu monitor era possível visualizar os espectros de ondas, pressão e a posição da válvula em tempo real.

O analisador de potência FLUKE foi utilizado para a medição dos mesmos parâmetros elétricos do regime permanente, com o mesmo método de pós-processamento e mesma frequência de medição anteriormente usada.

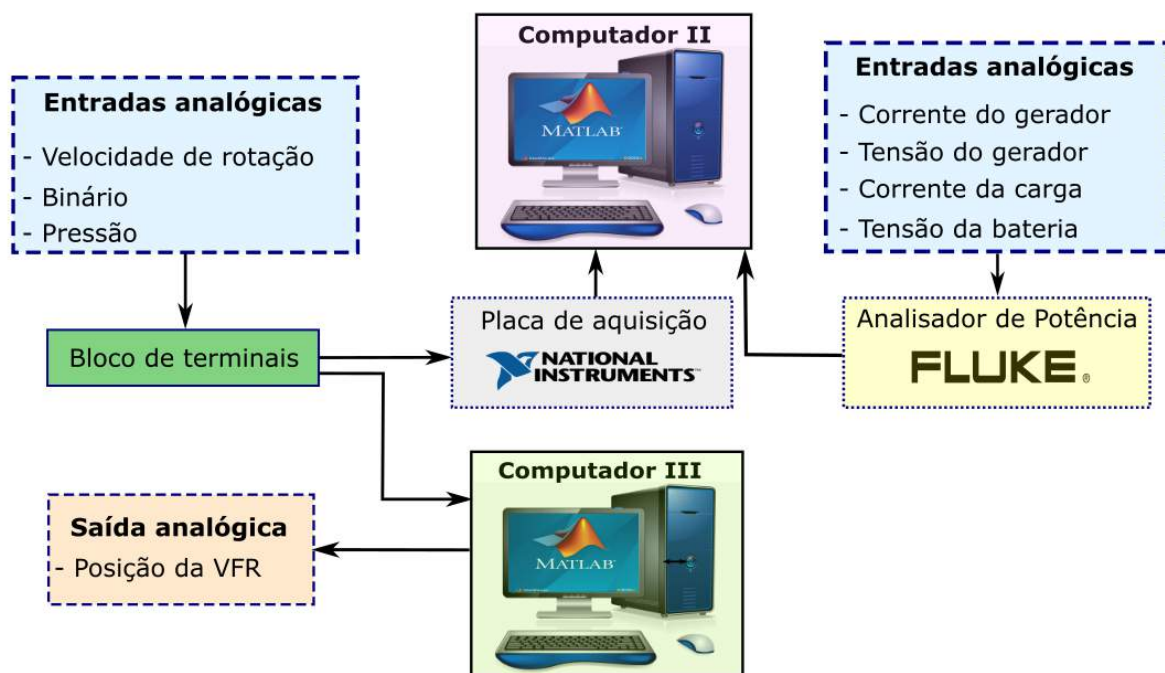


Figura 4.14: Sistema de aquisição de dados em regime variável.

## 4.5 Procedimento dos ensaios experimentais

### 4.5.1 Curvas de funcionamento da turbina e gerador

Em regime permanente pretendeu-se aferir o comportamento da turbina e do gerador para diferentes velocidades de rotação e potências de consumo. Estipulou-se que a bateria estaria sempre completamente carregada no início e decorrer de cada ensaio. Para isso, foi necessário assegurar que a corrente do gerador,  $I_{ger}$ , fosse sempre superior à corrente pedida pela carga resistiva,  $I_{carga}$ . Posto isto, verificou-se que os ensaios teriam de começar a partir das 1000 r.p.m., velocidade a partir da qual  $I_{ger} > I_{carga}$ , e que esta velocidade teria que ser gradualmente incrementada com o sucessivo aumento da carga resistiva. A par disto, a velocidade de rotação máxima foi limitada a 2500 r.p.m. devido às limitações do primeiro sensor de binário já anteriormente referidas na Tab. 4.3.

Os ensaios tiveram a duração de 120 s garantindo que a velocidade de rotação da turbina estabilizasse entre cada medição, de modo a evitar transitórios e avaliar corretamente cada ponto de funcionamento.

### 4.5.2 Cálculo do binário de atrito

A determinação do binário de atrito é muito importante quando se quer caracterizar rigorosamente o rendimento de turbinas. Esta turbina foi experimentalmente testada em [36] onde a relação do binário de atrito com a velocidade de rotação foi analisada. Mediu-se o binário de atrito a partir de um procedimento que consiste em impor uma velocidade de rotação na turbina e ao mesmo tempo impedir que o escoamento se desenvolva nas pás do rotor. Para isto, é aplicado sobre as pás do rotor duas chapas que impeçam o escoamento sobre as mesmas. No final espera-se obter uma relação entre a velocidade de rotação e o binário de atrito, de modo a ser possível a correção do binário medido pelos sensores durante os ensaios. Na Fig. 4.15 encontra-se representado a relação

entre o binário de atrito e a velocidade de rotação.

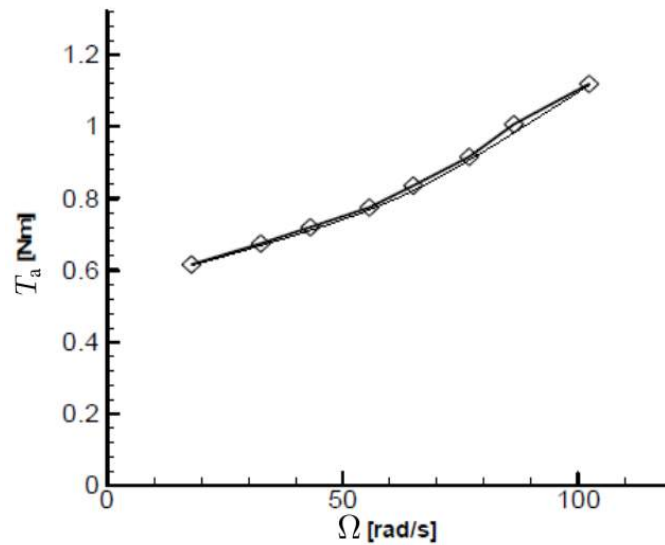


Figura 4.15: Reta com os pontos experimentais do cálculo do binário de atrito (retirado de [36]).

Verificou-se, como seria de esperar, que a variação do binário de atrito teve um comportamento quadrático com o aumento da velocidade de rotação. O ajustamento da curva é apresentado na Eq. (4.5), com um coeficiente de correlação  $R^2 = 0,9971$ .

$$T_a = 8 \times 10^{-5}\Omega^2 - 0,0019\Omega + 0,6 \quad (4.5)$$

com  $\Omega$  em rad/s.

### 4.5.3 Embalamento

O ensaio de embalamento serviu para aferir a velocidade de embalamento da turbina quando a mesma é sujeita a uma condição limite de pressão constante no tempo. Os ensaios foram realizados com o gerador em vazio, em que a velocidade do ventilador foi gradualmente aumentada até à velocidade máxima atingida em regime permanente. Após cada incremento de velocidade de rotação foi tomado um compasso de espera de modo a estabilizar a velocidade de rotação da turbina. Foram feitos ensaios com a duração de 30 s e medidos os valores de pressão na câmara de pleno, caudal volúmico na turbina e velocidade de rotação do conjunto turbina e gerador.

### 4.5.4 Regime variável

Com este tipo de ensaio foi possível aferir o funcionamento da turbina e do gerador em regime variável para um espectro de ondas real, obtido a partir de medições no quebra-mar do Mutriku. Foram definidos três estados de mar (EM), doravante denominados por EM1, EM2 e EM3. O EM3 é o mais energético e o EM1 o menos energético. Do ponto de vista elétrico, estipularam-se duas situações distintas, em que numa a bateria estaria inicialmente carregada e na outra a meia carga.

A potência de consumo foi aproximada ao máximo da potência de consumo da boia oceanográfica (360 W).

Para isso utilizaram-se como carga duas cargas resistivas em paralelo, totalizando uma resistência equivalente de  $0,4 \Omega$ .

No decorrer dos seis ensaios, foi imposta sempre a mesma velocidade de rotação na turbina a partir do variador de frequência e somente a abertura e fecho da válvula gerava as diferenças de pressão na câmara, simulando a ação das ondas. Os ensaios tiveram a duração de 1200 s e foram registados valores de pressão na câmara de pleno, caudal volúmico na turbina, velocidade de rotação do conjunto turbina e gerador, binário do gerador, correntes, tensões e potências elétricas.

## **4.6 Pós-processamento**

Para o pós-processamento, foi criado um programa que visou aplicar todas as retas de calibração dos parâmetros adquiridos, aplicar filtros específicos para atenuar o ruído do sinal e construir gráficos para correlação de variáveis, para os regimes permanente e variável. Os programas encontram-se descritos no Apêndice B. É de frisar que ali se encontram os códigos de exemplo na aquisição de dados, pós-processamento e calibração dos sensores e binário, pelo que houve a necessidade de mudar as retas de calibração do código mediante os sensores de pressão e de binário e velocidade de rotação a utilizar para cada ensaio.





## Capítulo 5

# Resultados

No presente capítulo são apresentados os resultados obtidos na instalação de análise de sensibilidade, seguidos dos ensaios em regime permanente e variável na instalação de ensaios de turbinas de 55 kW.

### 5.1 Resultados da análise de sensibilidade

Relembre-se que todos os ensaios foram realizados com a bateria num estado de carga inicial de 50% (11,7 V), esta condição era verificada no início de cada ensaio. A velocidade rotação nominal do motor CC é de 1500 r.p.m., pelo que é esta a velocidade de rotação máxima nestes ensaios.

Durante o funcionamento normal da boia oceanográfica, a potencia de consumo do sistema é de 360 W. A velocidade de rotação da turbina varia consideravelmente. Para simular esta situação, para uma mesma carga resistiva, variou-se a velocidade de rotação do gerador com os seguintes incrementos: 0 - 970 - 1020 - 1070 - 1170 - 1250 - 1316 - 1370 - 1450 r.p.m.. Na Fig. 5.1 apresentam-se os resultados relativos a este ensaio, relativamente ao trânsito de potências estudadas.

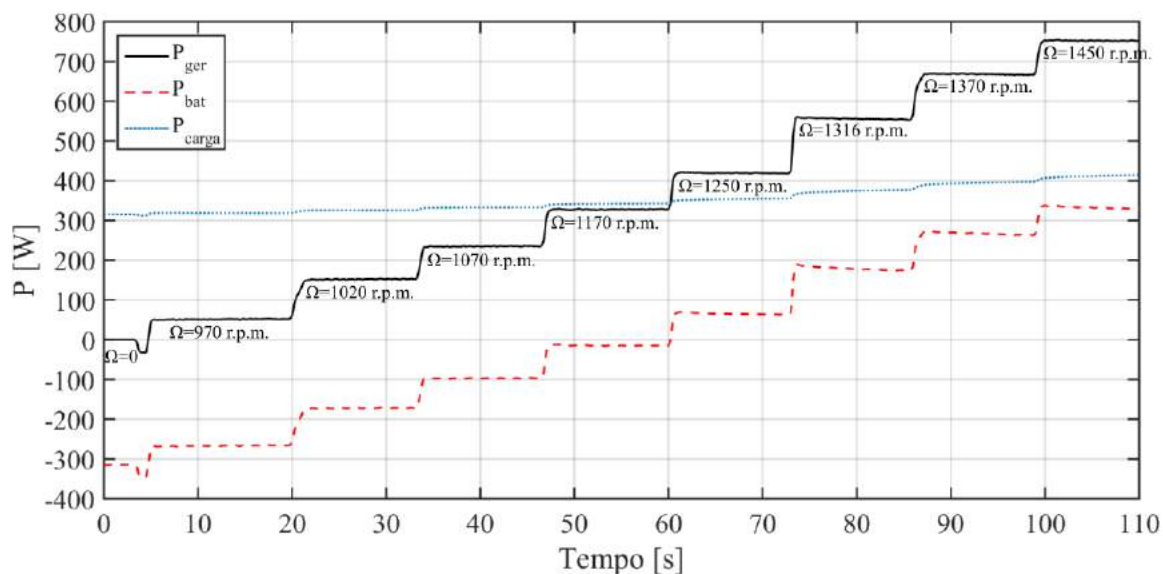


Figura 5.1: Potências do gerador, da bateria e da carga em função da velocidade de rotação para uma carga fixa de 0,4 Ω.

De uma forma geral, o aumento da velocidade de rotação, provoca um aumento de  $P_{ger}$  e  $P_{bat}$ , em oposição à  $P_{carga}$  que manteve uma variação suave ao longo do ensaio, com uma variação total de 33% (100 W).

Para velocidades de rotação abaixo de 900 r.p.m., como concluído anteriormente, o gerador comporta-se como um motor, consumindo potência em vez de a produzir. Saliente-se o vale inicial registado nos valores de  $P_{ger}$  que demonstra tal acontecimento. A curva de  $P_{bat}$  também apresenta este vale, o que evidencia que a bateria fornece a potência inicial requerida pelo gerador, de modo a alimentar o seu circuito de excitação. A partir de 1250 r.p.m., verifica-se que  $P_{ger} > P_{carga}$  e a bateria começa a ser carregada. Nota-se que a bateria atua como um *buffer* entre o gerador e a carga resistiva, suavizando o aumento de  $P_{carga}$  face ao incremento da velocidade de rotação. Esta situação não ocorre se a bateria não fizer parte do circuito, pelo que a carga resistiva pode ser danificada e ficar inutilizada.

A boia não possui um consumo constante ao longo do seu período de vida útil. A título de exemplo o carregamento de AUVs ou a transmissão de informação das variáveis em monitorização para terra, acarreta consumos de potência maiores que a situação anterior. Para aferir o comportamento das potências do gerador, da bateria e da carga para uma determinada velocidade de rotação e diferentes cargas resistivas realizou-se um ensaio onde, para uma velocidade de rotação fixa, variava-se com intervalos compreendidos entre 5 e 10 s, a carga resistiva do sistema. As cargas resistivas foram adicionadas em incrementos de  $0,8 \Omega$ . A Fig. 5.2 apresenta a relação entre as potências do gerador, da bateria e da carga e a variação da carga resistiva para quatro velocidades de rotação. Para uma melhor visualização, as variáveis encontram-se desfasadas por um intervalo de tempo de 10 s entre cada um dos ensaios a diferentes velocidades de rotação.

A adição sucessiva das cargas resistivas provoca, em média, um aumento de  $P_{carga}$  de 180 W (correspondente à potência nominal de cada resistência). E para uma mesma carga resistiva,  $P_{carga}$  apresenta um valor mais elevado devido ao facto do gerador apresentar uma produção,  $P_{ger}$ , maior, para velocidades de rotação mais elevadas. O aumento percentual de  $P_{carga}$  diminui a partir da adição da primeira carga até à última, variando entre 40 e 10% entre cargas.

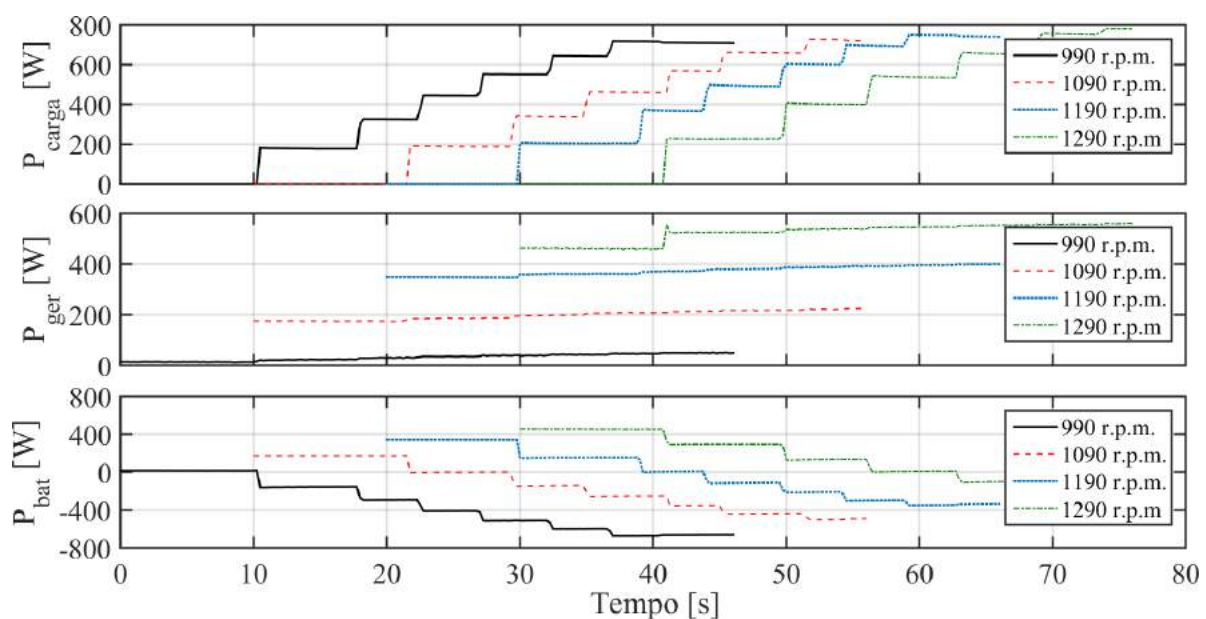


Figura 5.2: Potências da carga, do gerador e da bateria em função da velocidade de rotação e da carga aplicada.

A potência do gerador,  $P_{ger}$ , aumenta com a velocidade de rotação e sofre um ligeiro aumento com a adição das cargas, havendo somente um pico de potência medido na adição da primeira carga para a velocidade de rotação igual a 1290 r.p.m..

As curvas de  $P_{bat}$  demonstram que a bateria tem de compensar a potência pedida pela carga que não é assegurada pelo gerador. Para a velocidade de rotação de 990 r.p.m. a bateria está sempre a descarregar, mas para as restantes velocidades mais elevadas, já se verifica o seu carregamento. Note-se que os casos em que  $P_{bat} = 0$ , sugerem que a bateria não está a carregar nem a descarregar, o que implica que  $P_{ger} = P_{carga}$ .

Na Fig. 5.3 avalia-se o trânsito das correntes,  $I_{ger}$ ,  $I_{bat}$  e  $I_{carga}$ , para três velocidades de rotação iniciais e três valores distintos de cargas resistivas. Neste ensaio a bateria foi assegurada inicialmente a meia carga, no entanto isto não foi assegurado para os seguintes ensaios a diferentes velocidades e diferentes cargas resistivas.

Nos primeiros segundos, o gerador encontra-se somente ligado à bateria. Nesta situação, o aumento de velocidade de rotação de 1090 para 1190 r.p.m. proporciona uma subida na corrente  $I_{ger}$  de 15 para 25 A. O mesmo não se verifica com a variação de velocidade de rotação de 1190 para 1290 r.p.m., onde a corrente mantém-se constante. Isto aconteceu porque a bateria começou a ser carregada ao longo destes ensaios, o que resultou no aumento da tensão da bateria e posterior diminuição da corrente do gerador.

Após a ligação das cargas, regista-se uma subida percentual de  $I_{ger}$  de 25% para o caso de 1090 r.p.m. e de 15 e 30% respetivamente para os casos de 1190 e 1290 r.p.m.. É também possível notar para os dois últimos casos a existência de picos de corrente após a ligação das cargas. Os valores de  $I_{ger}$  para cada velocidade de rotação são muito similares, independentemente do valor da carga aplicada. Tal facto acontece porque a carga retira mais potência à bateria em vez de a retirar ao gerador. Observa-se que a diferença entre os valores de  $I_{ger}$  para cada velocidade de rotação, aumenta com o aumento desta.

Demonstra-se a partir dos valores de  $I_{bat}$  que o carregamento da bateria depende da velocidade de rotação do gerador e da carga aplicada. O carregamento/d Descarregamento da bateria é função da diferença entre  $I_{ger}$  e  $I_{carga}$ ,

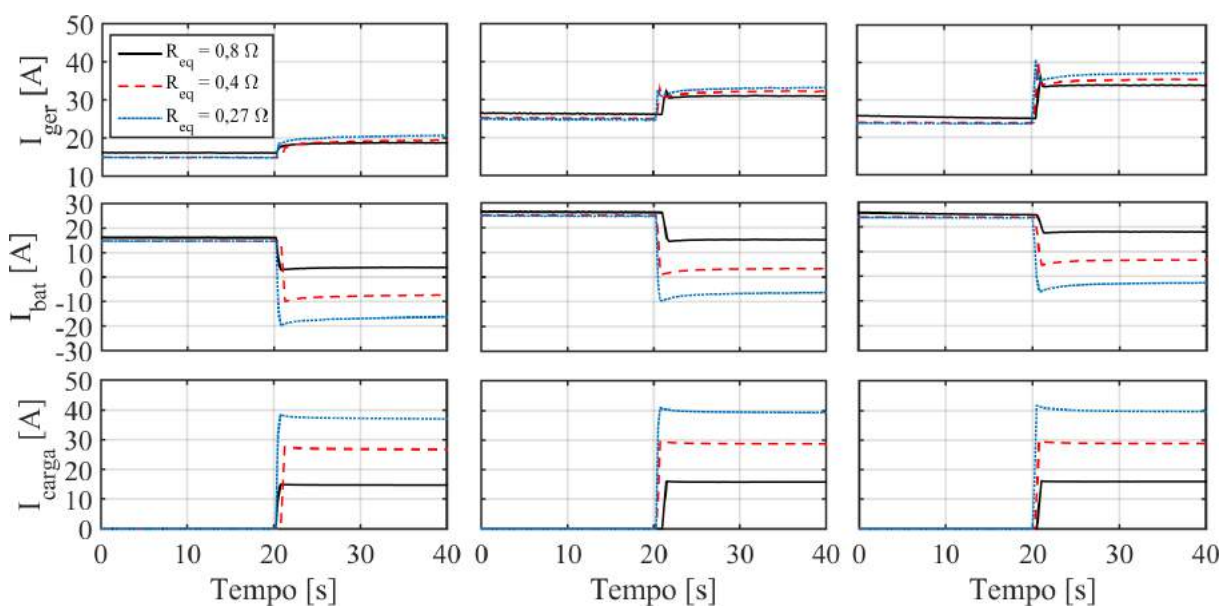


Figura 5.3: Correntes do gerador, da bateria e da carga face à ligação de diferentes cargas em três velocidades de rotação (à esquerda:  $\Omega = 1090$  r.p.m.; no centro:  $\Omega = 1190$  r.p.m.; à direita:  $\Omega = 1290$  r.p.m.).

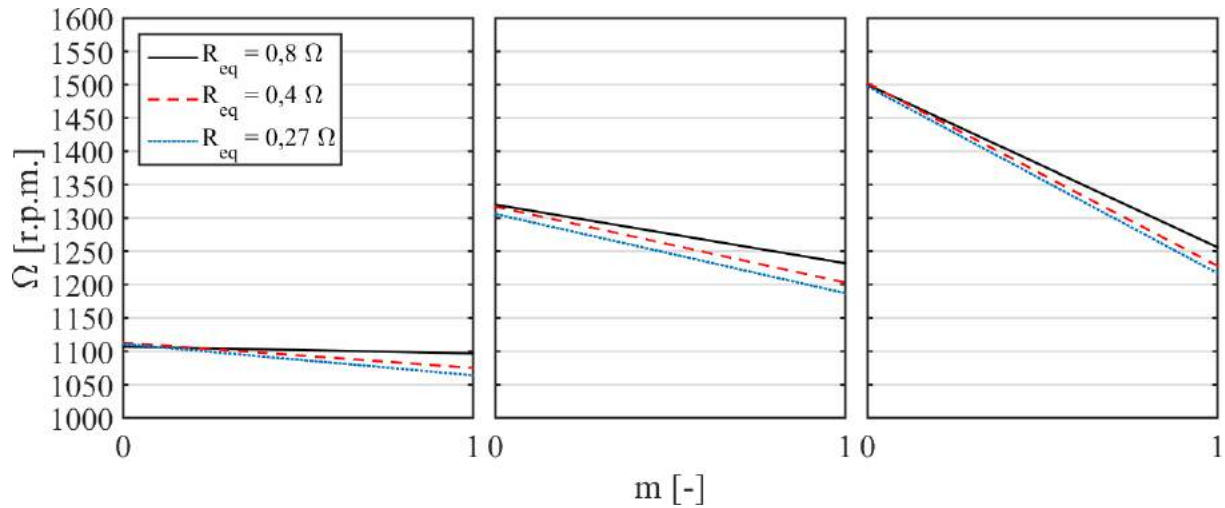


Figura 5.4: Velocidade inicial e final face à ligação de diferentes cargas em três velocidades de rotação (à esquerda:  $\Omega = 1090$  r.p.m.; no centro:  $\Omega = 1190$  r.p.m.; à direita:  $\Omega = 1290$  r.p.m.).

pele que para  $I_{ger} > I_{carga}$ , a bateria é carregada e para  $I_{ger} < I_{carga}$  a bateria descarrega.

Relativamente à corrente da carga,  $I_{carga}$ , com a ligação de cada carga resistiva, denota-se um aumento do seu valor em 15, 30 e 40 A, respetivamente para os valores de  $R_{eq}$  de 0,8, 0,4 e 0,27  $\Omega$  e verifica-se um ligeiro aumento desta corrente para velocidades de rotação mais elevadas.

Na Fig. 5.4 está ilustrada a variação da velocidade de rotação associada à ligação das cargas resistivas, onde  $m = 0$  representa o instante sem qualquer carga resistiva ligada e  $m = 1$  o instante em que as cargas são imediatamente ligadas.

Verifica-se que a variação de velocidade de rotação, para uma mesma velocidade de rotação inicial, é pouco significativa para diferentes cargas resistivas aplicadas, sendo cerca de 1 a 2%. Para ensaios com velocidade de rotação iniciais maiores, verifica-se que a diminuição de velocidade de rotação torna-se mais acentuada. Isto resulta do facto de, como apresentado na Fig. 5.3, à medida que se aumenta a velocidade de rotação, a adição de cargas proporciona uma maior produção de corrente do gerador e consequentemente um binário do gerador mais elevado. Para 1090, 1190 e 1290 r.p.m. a variação entre a velocidade final e inicial é de, aproximadamente, 1 a 4%, 7 a 9% e 16 a 19%, respetivamente.

## 5.2 Regime permanente

Dada a impossibilidade prática de realizar ensaios para vários estados de carga da bateria, estipulou-se que esta teria o seu estado de carga sempre a 100%, ou seja, sempre carregada. Foi sempre assegurado que a bateria não descarregava e que a corrente de consumo da carga,  $I_{carga}$ , nunca excederia a corrente produzida pelo gerador,  $I_{ger}$ . Deste modo, à medida que se testou a adição de cargas que requeriam mais corrente, os ensaios tiveram de ser iniciados a velocidades de rotação superiores, traduzindo-se em valores mais elevados de  $I_{ger}$ . Os valores da legenda dos gráficos a apresentar de seguida, representam a potência consumida pelas cargas resistivas utilizadas em cada ensaio, sendo os valores de 180, 360, 540, 720 e 900 W correspondentes, respetivamente, ao uso de uma resistência equivalente de carga de 0,8, 0,4, 0,27, 0,2 e 0,16  $\Omega$ .

O controlo do binário eletromagnético do gerador baseia-se no balanço de quantidade de movimento angular

$$T_{\text{aero}}(t) - T_{\text{ger}}(t) - T_a(t) = I \frac{d\Omega}{dt}, \quad (5.1)$$

onde  $I$  é a inércia do rotor da turbina,  $\Omega$  a velocidade de rotação do conjunto turbina e gerador,  $T_{\text{aero}}$  o binário aerodinâmico da turbina,  $T_{\text{ger}}$  o binário ao veio do gerador e  $T_a$  o binário de atrito, todos em função do tempo  $t$ .

Em regime permanente, a velocidade de rotação é constante, pelo que a Eq. (5.1) pode ser escrita como

$$T_{\text{ger}}(t) = T_{\text{aero}}(t) - T_a(t). \quad (5.2)$$

### 5.2.1 Curvas de funcionamento da turbina

Atente-se que o principal objetivo desta tese é a caracterização do sistema completo da boia oceanográfica auto-alimentada pela energia das ondas, pelo que um estudo exaustivo do escoamento do ar na turbina encontra-se fora do âmbito desta tese. Assumiu-se que o número de Reynolds era suficientemente elevado para que os efeitos da sua variação possam ser considerados desprezáveis. O número de Mach foi igualmente assumido como baixo para que o escoamento fosse considerado incompressível. Recorre-se a análise dimensional [37] para a análise e apresentação dos resultados. Sejam os coeficientes de pressão, caudal e potência definidos respetivamente por

$$\Psi = \frac{\Delta p_0}{\rho_{\text{ar}} \Omega^2 D^2}, \quad (5.3)$$

$$\Phi = \frac{Q_t}{\Omega D^3}, \quad (5.4)$$

$$\Pi = \frac{P_{\text{aero}}}{\rho_{\text{ar}} \Omega^3 D^5}, \quad (5.5)$$

onde  $Q_t$  representa o caudal que atravessa a turbina e  $P_{\text{aero}}$  a potência aerodinâmica [19]. Sendo assim, definiu-se o rendimento da turbina por [19]

$$\eta_{\text{turb}} = \frac{\Pi}{\Phi \Psi}. \quad (5.6)$$

A Fig. 5.5 ilustra a relação entre o rendimento da turbina e o coeficiente de caudal.

O rendimento da turbina máximo obtido é de aproximadamente 53%, para um valor de coeficiente de caudal  $\Phi$  de 0,072. Relembre-se que como concluído na Sec. 5.1, abaixo das 900 r.p.m. o gerador não é capaz de carregar a bateria. Por outro lado, a partir das 2500 r.p.m. a estrutura da turbina apresentava vibrações que poderiam a longo prazo inviabilizar os restantes ensaios. Assim, a gama de coeficientes de pressão ficou limitada e não foi possível uma caracterização completa das curvas da turbina. Note-se que independentemente da carga resistiva aplicada, os valores têm um ajustamento apreciável, demonstrando que a análise dimensional foi bem realizada. Verifica-se um maior número de ocorrências para valores de  $\Phi$  entre a gama de valores, 0,055 a 0,065, correspondendo a um valor percentual de 77% dos pontos de funcionamento obtidos. Este intervalo de valores de  $\Phi$  corresponde a valores mais elevados de velocidade de rotação e de caudal volúmico.

A Fig. 5.6 ilustra a relação entre o coeficiente de pressão e o coeficiente de caudal. Verifica-se que a relação entre o coeficiente de caudal e de pressão apresenta um comportamento quadrático. Este comportamento é expectável nas turbinas de ação. Este comportamento teria sido mais perceptível se os ensaios tivessem compreendido coeficientes de pressão com uma gama maior. Pois para turbinas de ação, esta relação é aproximadamente quadrática [37].

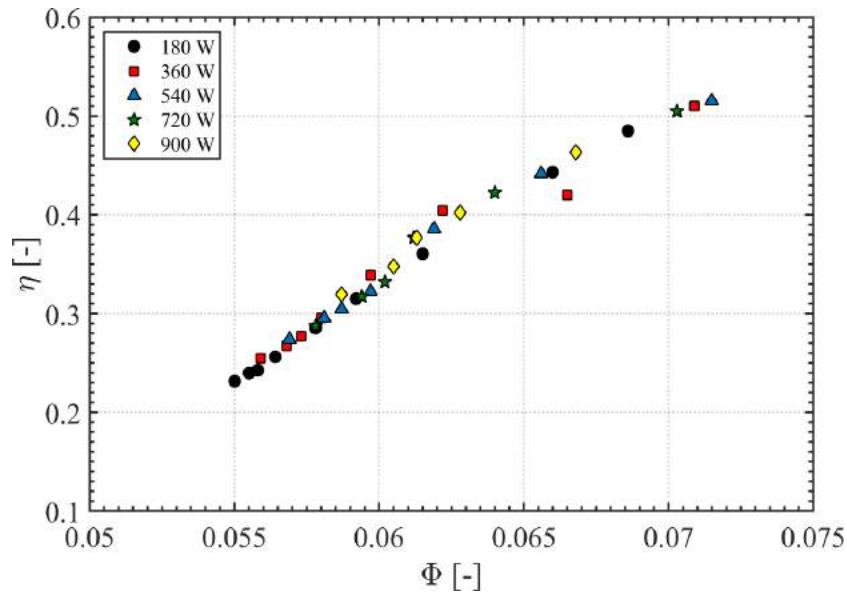


Figura 5.5: Rendimento da turbina em função do coeficiente de caudal e da carga aplicada.

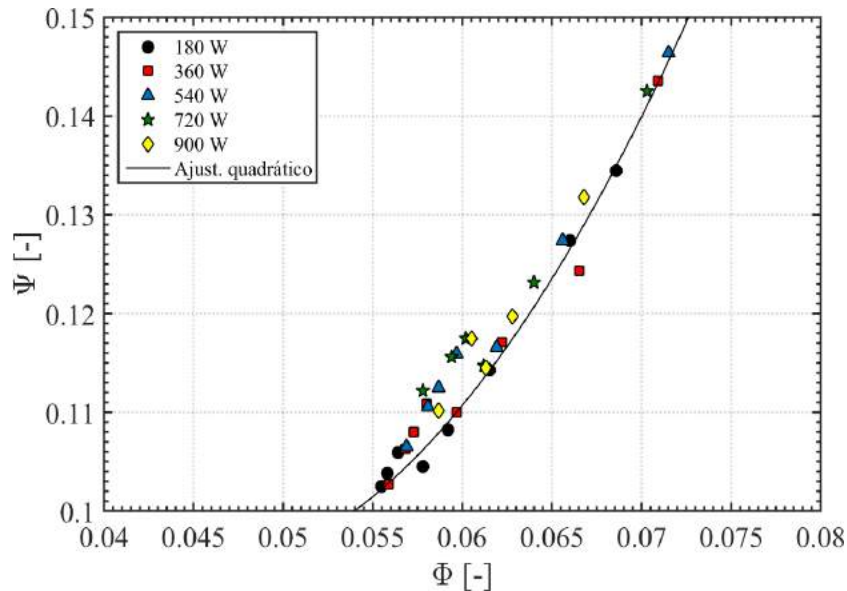


Figura 5.6: Coeficiente de pressão em função do coeficiente de caudal e da carga aplicada.

A gama de funcionamento situa-se entre os valores de  $\Psi$ , 0,1 a 0,15, e de  $\Phi$ , 0,055 a 0,072.

A Fig. 5.7 ilustra a relação entre o coeficiente de potência e o coeficiente de caudal. Verifica-se que a relação entre o coeficiente de caudal e de potência apresenta um comportamento cúbico e que a zona de funcionamento situa-se entre os valores de  $\Pi$ , 0,0005 a 0,004, e de  $\Phi$ , 0,055 a 0,072.

## 5.2.2 Curvas de funcionamento do gerador

Para avaliação das curvas de funcionamento do gerador foram analisados os valores de binário, corrente, tensão e potência elétrica relativamente à sua velocidade de rotação e carga resistiva imposta. Nesta análise não são apresentados resultados relativos a  $V_{\text{carga}}$ , devido a limitações de material para medir esta tensão. Como o sistema gerador-bateria-carga encontra-se ligado em paralelo, as tensões  $V_{\text{carga}}$ ,  $V_{\text{bat}}$  e  $V_{\text{ger}}$  são aproximadamente iguais, ha-

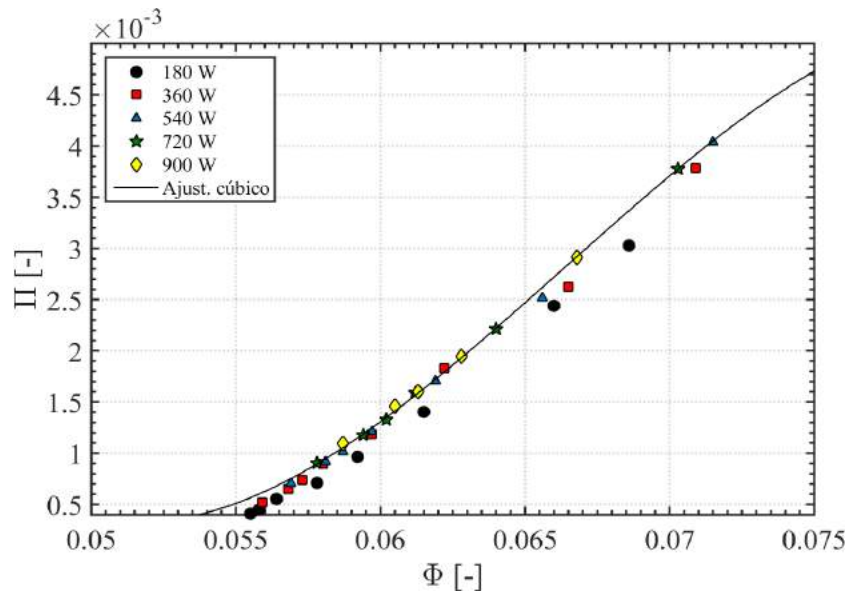


Figura 5.7: Coeficiente de potência em função do coeficiente de caudal e da carga aplicada.

vendo somente quedas de tensão desprezáveis ao longo do circuito elétrico, pelo que, na presente análise, assumiu-se que  $V_{\text{carga}} = V_{\text{bat}}$ . Para estes ensaios, à medida que se aumentou a carga resistiva, a velocidade de rotação inicial do gerador era reciprocamente aumentada de modo a assegurar a carga total da bateria. Como concluído na secção anterior, o gerador só começa a produzir corrente quando a velocidade de rotação se aproxima de 900 r.p.m., e para essa corrente ultrapassar a corrente de consumo (de modo a manter a bateria carregada) houve necessidade de iniciar os ensaios a velocidades aproximadamente iguais a 1000 r.p.m..

A Fig. 5.8 ilustra a relação entre o binário do gerador, velocidade de rotação e carga resistiva aplicada.

O binário do gerador aumenta com o aumento da carga resistiva aplicada e diminui com o aumento da velocidade de rotação. Tal acontece porque, para uma potência elétrica constante (devido ao facto da bateria estar completamente carregada) quando a velocidade de rotação aumenta, o binário eletromagnético tem necessaria-

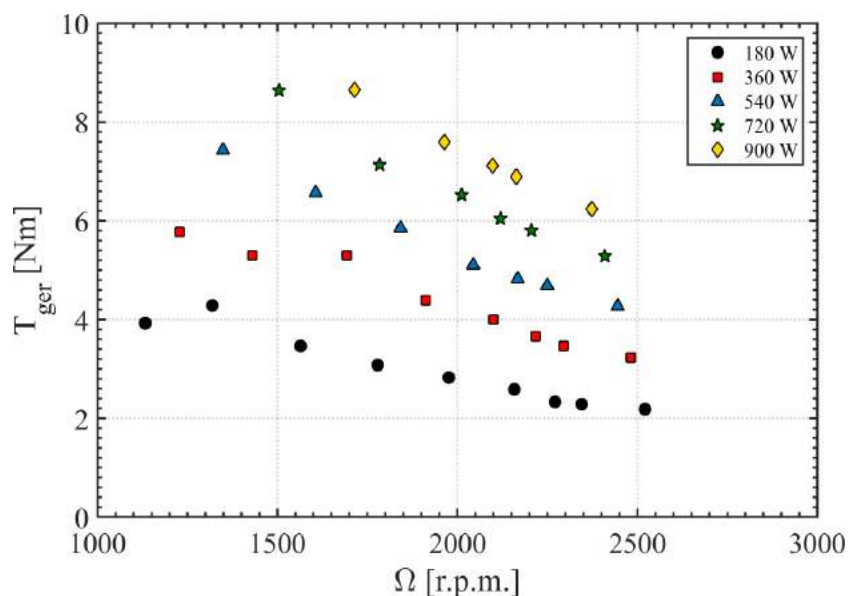


Figura 5.8: Binário do gerador em função da velocidade de rotação e da carga aplicada.

mente que diminuir. A variação percentual entre o valor inicial e final do binário é de 50, 45, 44, 43, 39 e 29% respetivamente para os casos de potências de carga igual a 180, 360, 540, 720 e 900 W.

Observa-se que para um mesmo caudal, com o aumento da carga resistiva, dá-se um aumento do binário eletromagnético do gerador, o que se traduz numa menor velocidade de rotação da turbina.

A Fig. 5.9 reflete a relação entre a potência elétrica, velocidade de rotação do gerador e carga resistiva imposta.

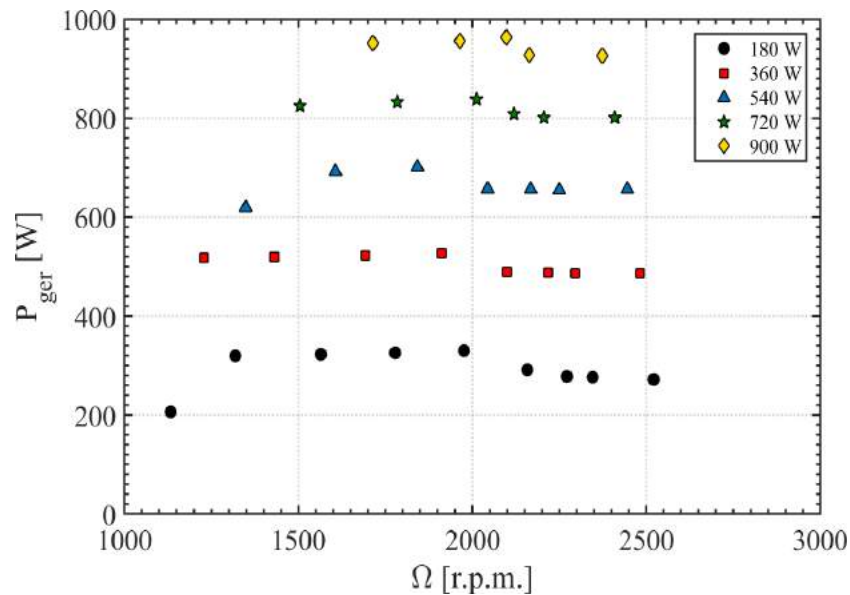


Figura 5.9: Potência do gerador em função da velocidade de rotação e da carga aplicada.

Independentemente da carga aplicada, a potência aumenta até cerca de 1500 r.p.m., mantendo-se constante até 2000 r.p.m.. Velocidade a partir da qual a potência apresenta um decréscimo (de aproximadamente 50 W), mantendo-se constante até à velocidade máxima estudada. Não foi possível aferir a razão pela qual a potência decresce a partir de 2000 r.p.m..

Para uma velocidade de rotação aproximadamente igual, a potência do gerador aumenta significativamente com o valor da carga resistiva imposta. A potência elétrica é três vezes superior para o caso de 900 W relativamente ao de 180 W de carga resistiva. Para velocidades de rotação superiores a 1500 r.p.m., o aumento de potência elétrica é de 40, 25, 20 e 15%, respetivamente entre os casos de 180 e 360 W, 360 e 540 W, 540 e 720 W e 720 e 900 W.

A Fig. 5.10 reflete a relação entre a corrente do gerador e a corrente da carga.

À medida que se aumenta o valor da carga resistiva, a corrente da carga tem um aumento percentual de 50, 35, 20 e 15%, respetivamente entre os casos de 180 e 360 W, 360 e 540 W, 540 e 720 W e 720 e 900 W. Este aumento do valor da carga resistiva, proporciona também uma maior produção de corrente por parte do gerador. A corrente do gerador apresenta um comportamento semelhante ao verificado na Fig. 5.9 relativamente à potência do gerador. A corrente de carga varia aproximadamente entre 15 e 67 A enquanto que a corrente do gerador varia entre 20 e 70 A, respetivamente para cargas resistivas de 180 e 900 W. Nota-se que a corrente sofre um ligeiro decréscimo a partir das 2000 r.p.m., representando uma variação entre 2 a 4 A.

Saliente-se o facto de se observar uma diferença entre a corrente do gerador e a corrente da carga, evidenciando que a bateria está a ser sobrecarregada. Verifica-se que esta corrente de sobrecarga da bateria diminuiu com o



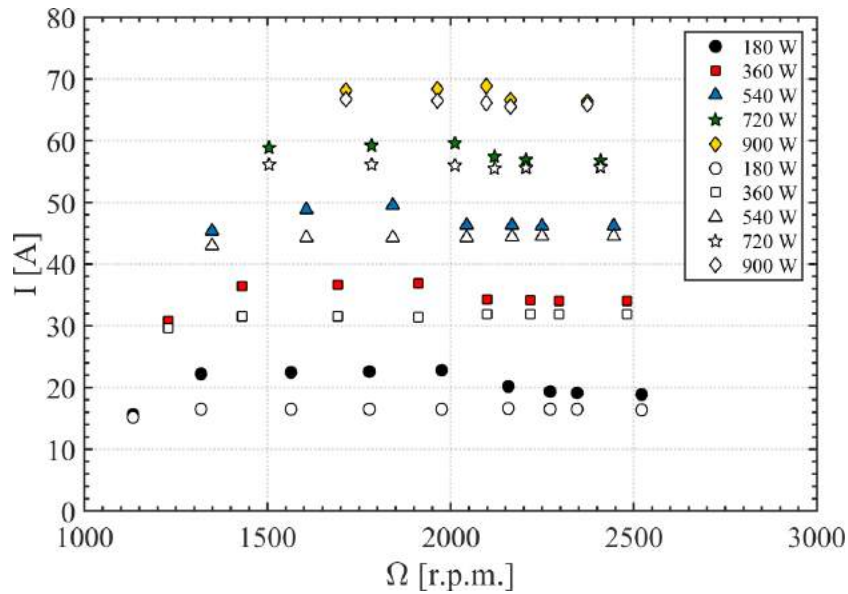


Figura 5.10: Corrente do gerador e da carga em função da velocidade de rotação e da carga aplicada (símbolos a cheio:  $I_{ger}$ ; símbolos vazios:  $I_{carga}$ ).

aumento da carga imposta e toma valores inferiores para os ensaios a partir das 2000 r.p.m.. No entanto, até às 2000 r.p.m. a diferença percentual entre o valor da corrente do gerador e da corrente da carga foi de 30, 16, 10, 5 e 3% respetivamente às potências de carga de 180, 360, 540, 720 e 900 W. De modo a aferir a influência do decréscimo na corrente e na potência elétrica, calculou-se a razão entre o valor medido antes e depois desse acontecimento. Os resultados são apresentados na Tab. 5.1.

Tabela 5.1: Razão entre o valor depois e antes do decréscimo de corrente e potência.

Carga resistiva [W]	180	360	540	720	900
Relação da potência	0,97	0,97	0,96	0,96	0,91
Relação da corrente	0,96	0,96	0,91	0,92	0,90

A partir desta análise, pode concluir-se que o fenómeno que implica a diminuição de corrente e de potência pode ser considerado desprezável e que não compromete nenhum dos resultados, visto que a variação dos parâmetros é inferior a 10%.

A Fig. 5.11 reflete a variação da tensão do gerador e da bateria.

Verifica-se que entre as 1000 e as 1500 r.p.m., a tensão aumenta. Para velocidades de rotação superiores, a tensão mantém-se constante. Por outro lado, observa-se que a diferença entre os valores de tensão do gerador e da bateria aumenta com a carga resistiva imposta. No entanto, esta diferença pode ser considerada desprezável, visto que a variação é de somente 0,1 a 0,4 V. Os valores de tensão apresentados na presente figura, demonstram um aumento de tensão relativamente à tensão nominal da bateria (12 V). Assim sendo, nesta situação, a bateria encontra-se em constante sobrecarga tal como antecipado na análise das correntes  $I_{ger}$  e  $I_{carga}$  ilustradas na Fig. 5.10.

A Fig. 5.12, mostra o resultado do rendimento do gerador em regime permanente. O rendimento do gerador é dado por

$$\eta_{ger} = \frac{P_{ger}}{P_{mec}}, \quad (5.7)$$

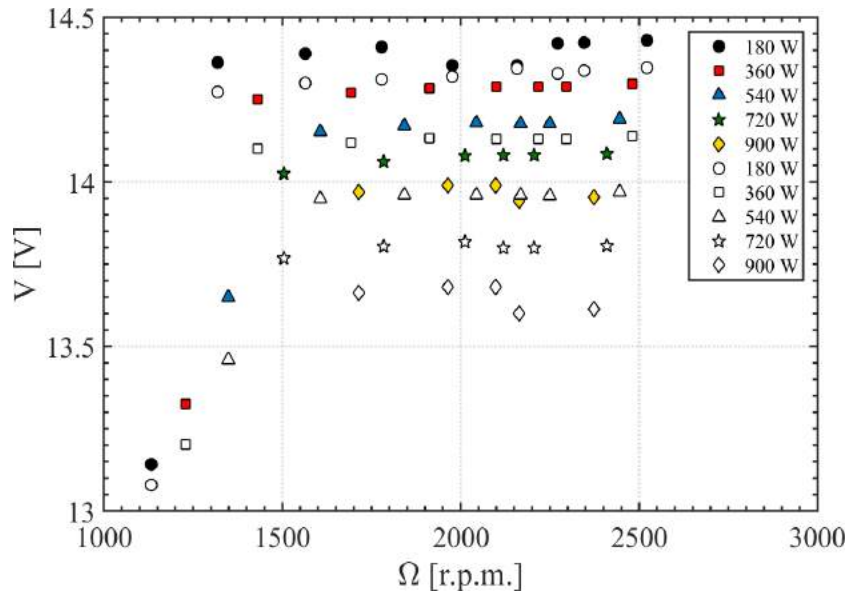


Figura 5.11: Tensão do gerador e da bateria em função da velocidade de rotação e da carga aplicada (símbolos a cheio:  $V_{ger}$ ; símbolos vazios:  $V_{bat}$ ).

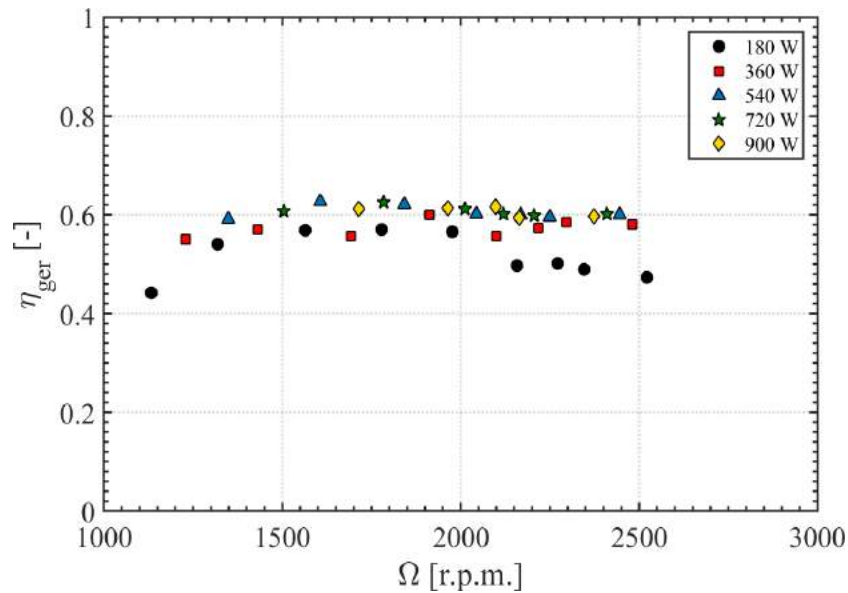


Figura 5.12: Rendimento do gerador em função da velocidade de rotação e da carga aplicada.

onde  $P_{mec} = \Omega T_{ger}$ .

O comportamento da variação de rendimento em função da velocidade de rotação, é semelhante, independentemente das cargas resistivas aplicadas. O rendimento máximo toma o valor de 65% e ocorre no intervalo de 1500 a 2000 r.p.m.. O rendimento decresce marginalmente para velocidades de rotação superiores a 2000 r.p.m., devido ao decréscimo de corrente analisado anteriormente na Fig. 5.10.

### 5.2.3 Embalamento

Aqui são aferidos os valores dos coeficientes de caudal e pressão para as condições de embalamento do gerador,  $\Phi_{emb}$  e  $\Psi_{emb}$ , para velocidades de rotação compreendidas entre 1000 e 2500 r.p.m.. Os resultados dos ensaios

obtidos estão apresentados na Fig. 5.13.

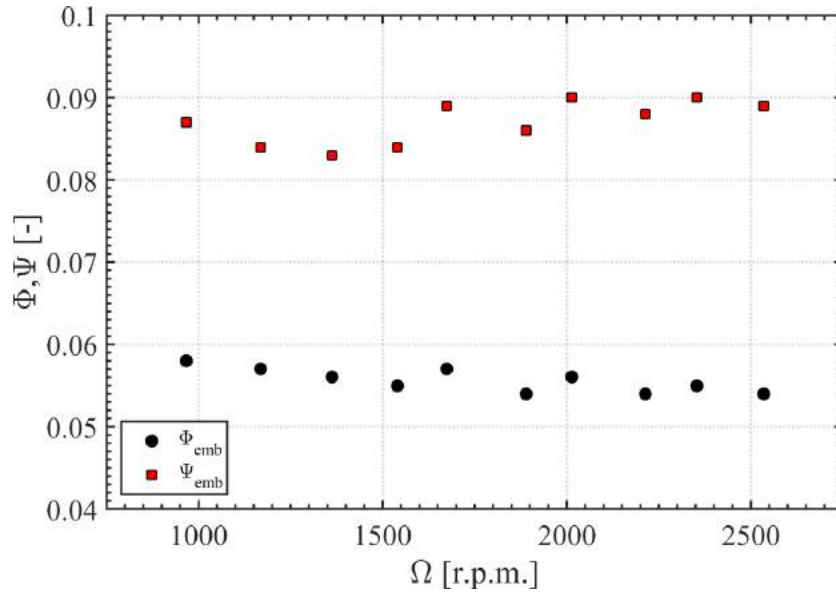


Figura 5.13: Coeficientes de caudal e pressão para condições de embalamento.

Observa-se que os valores de  $\Phi_{emb}$  e  $\Psi_{emb}$  são independentes da velocidade de rotação. A média de cada um dos coeficientes é dada por  $\bar{\Phi}_{emb} = 0,056$  e  $\bar{\Psi}_{emb} = 0,087$ , sendo possível estimar as velocidades de embalamento para uma determinada diferença de pressão ou caudal. Por exemplo, toma-se o valor de  $\bar{\Psi}_{emb} = 0,087$ ,  $\Delta p_0 = 3$  kPa e  $D = 0.59$  m e, pela Eq (5.3) estima-se uma velocidade de rotação de embalamento de 2640 r.p.m..

### 5.3 Regime variável

Nesta secção são apresentados os resultados obtidos em regime variável, para três estados de mar e dois estados de carga da bateria. Avalia-se a frequência de ocorrência das variáveis  $P_{ger}$ ,  $P_{bat}$ ,  $P_{carga}$ ,  $T_{ger}$  e  $\Omega$ , representa-se temporalmente a evolução de  $\Delta p_0$ ,  $Q_t$ ,  $P_{disp}$ ,  $\Omega$ ,  $T_{ger}$ ,  $P_{mec}$ ,  $I_{ger}$ ,  $I_{carga}$ ,  $I_{bat}$ ,  $V_{ger}$ ,  $V_{bat}$ ,  $P_{ger}$ ,  $P_{bat}$  e  $P_{carga}$  e calculam-se os valores médios, raízes do valor quadrático médio, desvios padrão, máximos e mínimos de todas as variáveis referidas, bem como os valores médios de  $T_{turb}$ ,  $\eta_{turb}$ ,  $\eta_{ger}$  e  $\eta_{total}$ . O rendimento total do sistema é definido por

$$\eta_{total} = \eta_{turb} \eta_{ger}. \quad (5.8)$$

#### 5.3.1 Análise da frequência de ocorrência

A Fig. 5.14 apresenta a frequência de ocorrência da potência do gerador,  $P_{ger}$ .

Com a bateria carregada verifica-se que, independentemente do estado de mar, a potência do gerador apresenta um pico em 500 W. Este valor advém do consumo conjunto da carga e da bateria. A frequência de ocorrência do pico aumenta gradualmente com o aumento da potência disponível em cada estado de mar. O pico de potência é superior para o estado de mar menos energético, EM1, porque a bateria descarrega por mais tempo, implicando um aumento da potência do gerador. A frequência de ocorrência para potências mais baixas aumenta à medida que o estado de mar apresenta menos energia disponível. Realça-se o caso do EM1, onde as potências se distribuem

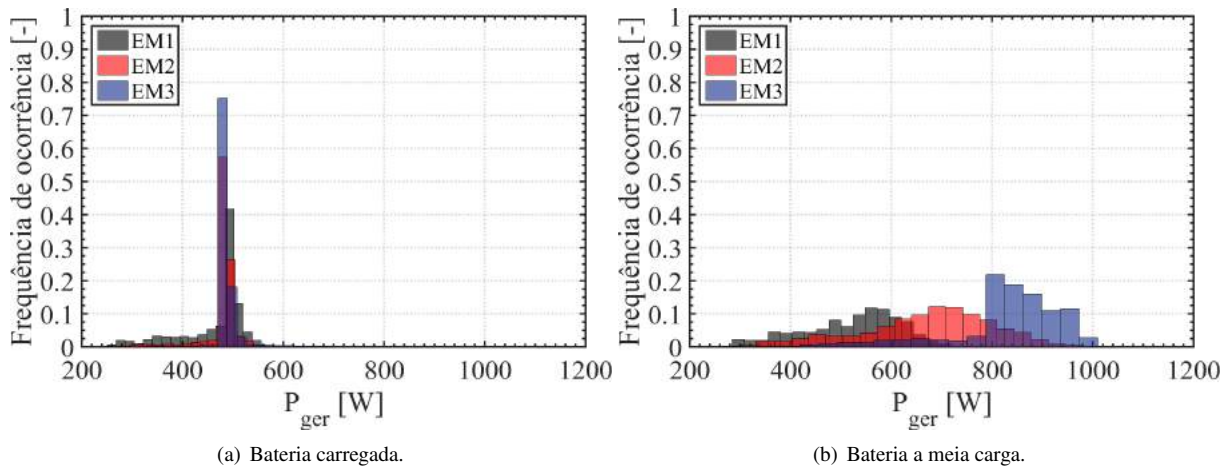


Figura 5.14: Frequência de ocorrência dos valores de potência do gerador em regime variável.

uniformemente de 250 a 450 W, enquanto que no EM2 e EM3 a frequência de ocorrência para essa gama de valores é quase nula. A partir do cálculo da frequência de ocorrência acumulada, conclui-se que o gerador não é capaz de fornecer os 360 W de potência à carga em aproximadamente 7 e 2% do tempo, respetivamente nos EM1 e EM2, para ambos os casos de estado de carga da bateria. Por outro lado, o gerador assegura sempre esta potência no caso do EM3.

Relativamente à situação com a bateria a meia carga é notável uma ampla diferença nos valores de  $P_{ger}$ . Estes aumentam significativamente com o aumento do valor de  $P_{disp}$  consoante o estado de mar e apresentam picos mais distribuídos comparativamente à primeira situação com a bateria carregada. No caso do EM1, as frequências de ocorrência distribuem-se maioritariamente por potências inferiores a 500 W. Contudo verifica-se que as potências com maior frequência de ocorrência são entre 500 e 600 W. No caso do EM2, existe um pico por volta dos 650 e 750 W, seguido de um decréscimo gradual para ambos os lados. No caso do EM3, é perceptível uma maior frequência de ocorrência de potências entre 800 e 1000 W, e para potências inferiores a 800 W há uma distribuição de frequência com valores muito reduzidos. O comportamento apresentado da potência do gerador é expectável. O seu valor é muito dependente da velocidade de rotação, que por sua vez é dependente do estado de mar. Ora, como em EM3 a potência disponível é muito maior (quando comparada com os restantes estados de mar), a velocidade de rotação apresenta valores mais elevados e, por consequência, a potência do gerador aumenta, para uma carga resistiva constante.

Na Fig. 5.15 está ilustrada a potência da bateria,  $P_{bat}$ .

Verifica-se que no caso da bateria carregada, o valor da potência prevalece maioritariamente nos 50 W. Esta potência deve-se à dissipação de energia na bateria devido à sua resistência interna e pelo fato de a bateria descarregar ligeiramente durante os ensaios dos EM1 e EM2 (devido à pouca potência disponível nestes estados de mar), tendo havido necessidade de ser novamente carregada. Pela análise dos valores de tensão do gerador, representados nas Fig. 5.19 à Fig. 5.24, verifica-se também que a bateria é sempre carregada acima da sua tensão nominal (12 V), e, deste modo, sobrecarregando-a. Nota-se que, a partir dos valores negativos de potência bateria, a mesma tem de fornecer potência à carga uma pequena parte do tempo no EM1 e EM2.

No caso da bateria a meia carga, constata-se que a bateria descarrega ligeiramente nos EM1 e EM2 e que a

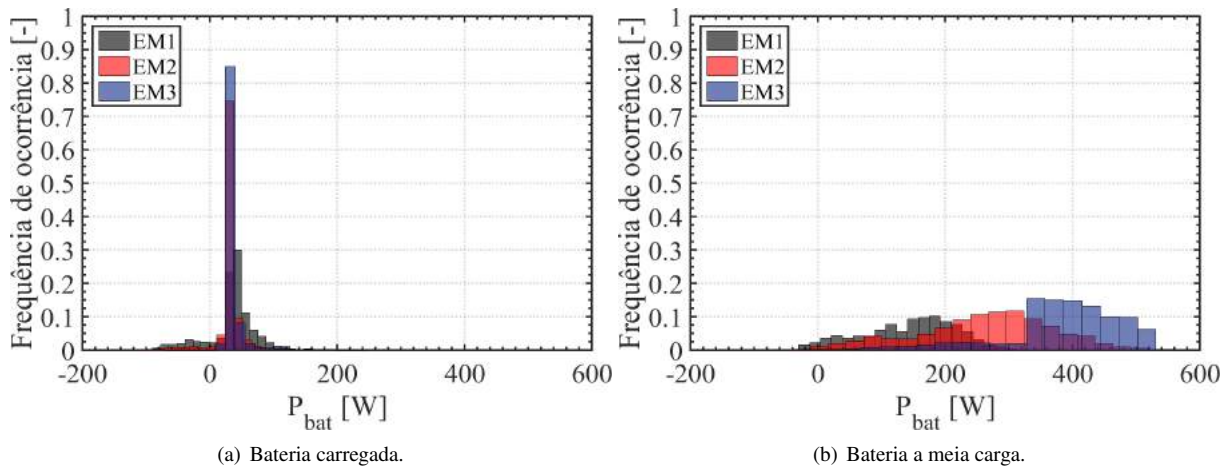


Figura 5.15: Frequência de ocorrência dos valores de potência da bateria em regime variável.

potência de carregamento intensifica-se com a potência disponível do estado de mar.

Na Fig. 5.16 apresenta-se a frequência de ocorrência da potência da carga,  $P_{carga}$ .

Com a bateria carregada, a potência da carga varia entre 350 e 450 W, aumentando em cerca de 30% além do valor de potência nominal de 360 W. Verifica-se que esta potência aumenta com o aumento da energia disponível em cada estado de mar, se bem que residualmente. Isto deve-se ao facto de as cargas utilizadas serem cargas resistivas passivas e de consumirem aquilo que o sistema produz, pelo que para estados de mar mais energéticos a potência do gerador apresenta valores mais elevados e posteriormente mais dissipação de potência nas cargas.

No caso da bateria a meia carga, verifica-se que  $P_{carga}$  varia entre 300 e 450 W, apresentando um decréscimo relativamente à sua potência nominal em cerca de 20%. Com a bateria carregada, há mais potência direcionada para a carga, enquanto que a meia carga, essa potência tem de ser repartida pela bateria e pela carga, não esquecendo que a bateria atua como um *buffer*. Verifica-se que para este estado de carga da bateria,  $P_{carga}$  apresenta valores mais elevados à medida que a potência disponível do estado de mar aumenta. A partir do cálculo da frequência de ocorrência acumulada, nota-se que a potência da carga é inferior a 360 W em 12 e 6% do tempo respetivamente no EM1 e EM2 para a bateria a meia carga e em 4% do tempo no EM1 para a bateria carregada.

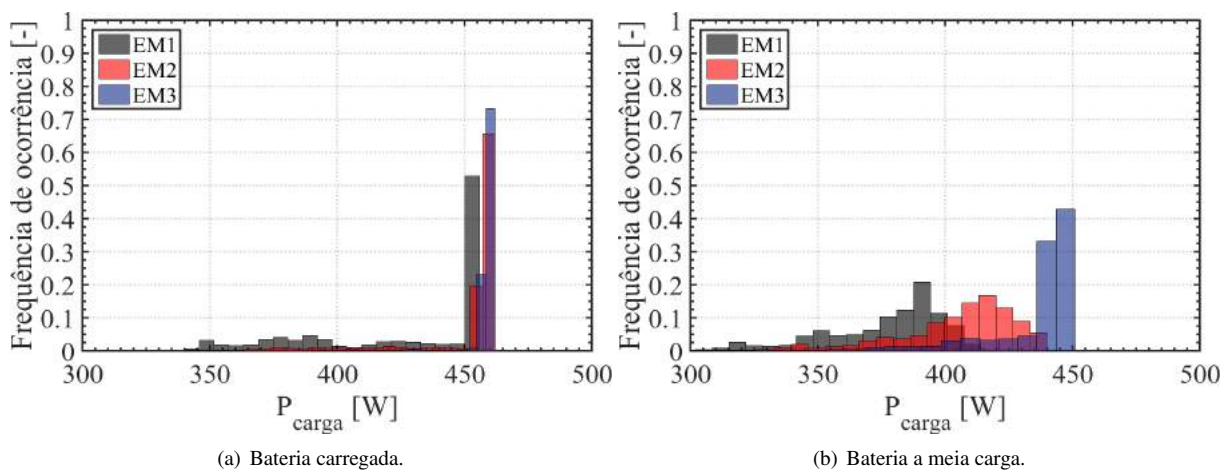


Figura 5.16: Frequência de ocorrência dos valores de potência da carga em regime variável.

A Fig. 5.17 mostra a frequência de ocorrência do binário do gerador.

No caso da bateria carregada, para os estados de mar mais energéticos (EM2 e EM3), o binário adquire valores menores com maior frequência do que no estado de mar menos energético EM1. Isto acontece porque, como o valor de  $P_{ger}$  é mantido constante, ver Fig. 5.14 (a), para velocidades de rotação mais elevadas, o binário tem de necessariamente de diminuir. Verifica-se também que para velocidades de rotação mais baixas, como no caso do EM1, o binário tem uma maior distribuição de frequência para valores de binário mais elevados.

Por outro lado, com a bateria a meia carga, verifica-se que o binário aumenta com o aumento da potência disponível no estado de mar. Isto reflete-se no facto de com a bateria descarregada, haja a necessidade de carregar a bateria e alimentar as cargas resistivas, aumentando deste modo o valor de  $I_{ger}$  e por sua vez  $T_{ger}$ .

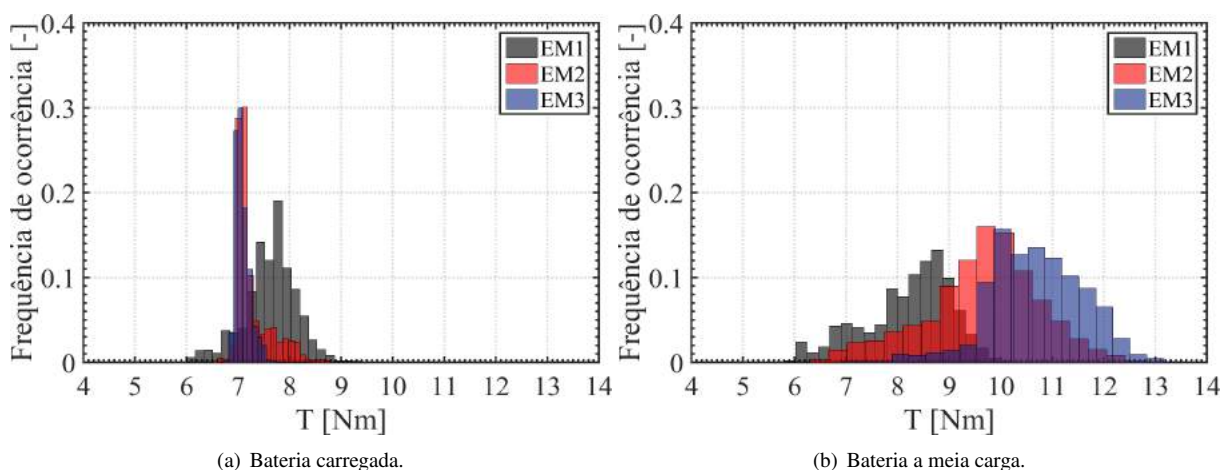


Figura 5.17: Frequência de ocorrência dos valores de binário do gerador em regime variável.

A Fig. 5.18 mostra a frequência de ocorrência da velocidade de rotação.

Com a bateria carregada é visível o aumento da velocidade de rotação com o aumento da potência disponível em cada estado de mar. Com a bateria a meia carga, estes valores mostram ser inferiores ao caso anterior. A velocidade de rotação sofre uma redução porque o valor binário do gerador,  $T_{ger}$ , aumenta na situação da bateria a meia carga (ver Fig. 5.17 (b)).

### 5.3.2 Análise temporal

Aqui ilustra-se a evolução temporal das variáveis ao longo do período dos ensaios em regime variável para os diferentes estados de mar e estados de carga da bateria (ver Figs. 5.19, 5.20, 5.21, 5.22, 5.23 e 5.24). Para facilitar a visualização dos dados a escala temporal foi reduzida para o intervalo de 200 a 1000 s. Realizam-se dois tipos de análise relativamente ao funcionamento do sistema, de modo a aferir a sua diferença face aos diferentes estados de mar e estados de carga da bateria. Em primeiro lugar, analisa-se individualmente cada estado de mar e a diferença do funcionamento do sistema face às situações com a bateria carregada e a meia carga. Por último, averigua-se para o mesmo estado de carga da bateria (carregada e a meia carga) a diferença do funcionamento do sistema face à influência da potência disponível em cada estado de mar.

É notório um aumento de  $\Delta p_0$ ,  $Q_t$  e  $P_{disp}$ , respetivamente na ordem dos 20, 10 e 30%, consecutivamente entre cada estado de mar, começando em EM1, passando por EM2 e acabando em EM3, e que estes valores são

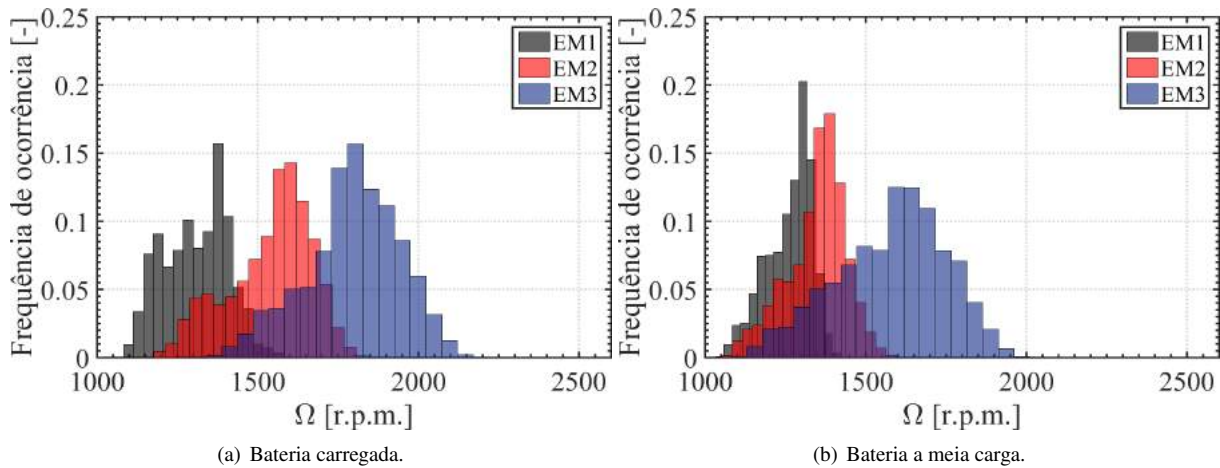


Figura 5.18: Frequência de ocorrência dos valores de velocidade de rotação do conjunto gerador e turbina em regime variável.

independentes do estado de carga da bateria. A gama de funcionamento da instalação em termos de  $\Delta p_0$  e  $Q_t$  é respetivamente entre 700 a 2300 Pa e 1.6 a 2.9 m<sup>3</sup>/s, traduzindo-se numa gama de valores de  $P_{disp}$  entre 1100 a 6700 W.

Relativamente à velocidade de rotação do conjunto turbina e gerador,  $\Omega$ , constata-se um aumento de 15% entre cada EM para ambos os casos com a bateria carregada e a meia carga. Ao se analisar a diferença entre a velocidade de rotação no caso da bateria carregada e a meia carga para os mesmos estados de mar, conclui-se que há uma diminuição do primeiro para o segundo caso em 5, 20 e 15% respetivamente a EM1, EM2 e EM3. Isto acontece devido ao aumento de  $P_{ger}$  e consequente aumento de  $T_{ger}$ , resultando em seguida na diminuição de  $\Omega$ .

Em relação ao binário do gerador,  $T_{ger}$ , com a bateria carregada não existe uma variação significativa entre os três estados de mar, pelo que só entre os 200 e os 400 s do EM1 são obtidos valores ligeiramente superiores. Isto deve-se à necessidade da bateria ser novamente carregada, traduzindo-se em valores superiores de  $P_{ger}$  e consequentemente de  $T_{ger}$ . Por outro lado, com a bateria a meia carga, nota-se um aumento de 15% entre o EM1 e o EM2 e de 10% entre o EM2 e o EM3, traduzido pelo aumento dos valores de  $P_{disp}$ ,  $P_{ger}$  e consequentemente  $T_{ger}$ . Comparando os casos da bateria carregada e a meia carga para o mesmo estado de mar, constata-se um aumento de 5, 25 e 35% nos valores de  $T_{ger}$  do primeiro para o segundo caso, respetivamente ao EM1, EM2 e EM3.

Verifica-se que a potência mecânica,  $P_{mec}$ , com a bateria carregada, é muito semelhante nos EM1 e EM2, sendo ligeiramente superior no último caso e que existe um aumento de 20% do EM2 para o EM3. No caso da bateria a meia carga, observa-se um aumento de 20% do EM1 para o EM2 e de 25% do EM2 para o EM3. Por outro lado, nota-se um aumento de 5, 15 e 25% entre o caso da bateria carregada e a meia carga, respetivamente ao EM1, EM2 e EM3.

Seguidamente, analisam-se os parâmetros elétricos e avalia-se o modo de funcionamento do gerador, da bateria e da carga. Faz-se somente a comparação entre as potências, uma vez que as correntes e as tensões seguem o mesmo comportamento. Relativamente à potência do gerador,  $P_{ger}$ , verifica-se que com a bateria carregada, o seu valor é praticamente igual e constante nos três estados de mar, pelo que só entre os 200 e os 400 s do EM1 o seu valor oscila entre valores inferiores devido às baixas velocidades de rotação. Notam-se picos de potência logo a seguir a esse período, indicando o carregamento da bateria. Por outro lado, no caso da bateria a meia carga, verifica-se

que o valor de  $P_{ger}$  aumenta 20% entre cada estado de mar e que no EM3 é possível verificar o acionamento do sistema de limitação de potência do gerador a partir do controlo da corrente de excitação  $I_f$  e consequentemente de  $T_{ger}$ . Este controlo é acionado pelo facto do sistema composto pela bateria e carga não conseguir absorver mais potência, daí a limitação desta em 1000 W para velocidades superiores a 1700 r.p.m. (ver Fig. 5.24). Verifica-se que a potência é limitada a valores mais baixos à medida que a bateria começa a ficar mais carregada. Comparando os casos da bateria carregada e a meia carga para o mesmo estado de mar, verifica-se um aumento de  $P_{ger}$  do primeiro para o segundo caso na ordem dos 20, 30 e 40% respetivamente ao EM1, EM2 e EM3.

Constata-se que a potência da bateria,  $P_{bat}$ , toma valores residuais no caso da bateria carregada, pelo que esses valores se traduzem na dissipação de potência através da resistência interna da bateria e na sobrecarga da mesma. O valor de  $P_{bat}$  no EM1 adquire valores 20% superiores ao EM2, pelo fato de haver uma descarga inicial da bateria, seguida de um posterior carregamento. Por outro lado, observa-se um incremento do valor de  $P_{bat}$  em 10% do EM2 para o EM3. No caso da bateria a meia carga verifica-se uma grande variação entre os diferentes estados de mar, pelo que se afere um aumento dos valores de  $P_{bat}$  de 50% entre o EM1 e o EM2 e de 40% entre o EM2 e o EM3. Isto traduz-se no facto da bateria ser maioritariamente carregada no caso dos estados de mar mais energéticos. A partir da integração de  $P_{bat}$  ao longo do decorrer de cada ensaio, conclui-se que no caso da bateria a meia carga é efetuado um carregamento de 9, 17 e 24% respetivamente para o EM1, EM2 e EM3.

Finalmente, os valores da potência da carga,  $P_{carga}$ , mostram ser praticamente constantes no caso da bateria carregada, exceto no intervalo entre os 200 e os 400 s do EM1 devido aos baixos valores de  $\Omega$  e consequentemente de  $P_{ger}$ . Com a bateria a meia carga nota-se um aumento de 10% nos valores de  $P_{carga}$  entre cada estado de mar. Efetuando a comparação entre os casos da bateria carregada e a meia carga para os mesmos estados de mar, verifica-se que o valor de  $P_{carga}$  diminui do primeiro para o segundo caso em 15, 10 e 5% respetivamente a EM1, EM2 e EM3.

Para terminar, avaliam-se os valores médios do rendimento da turbina,  $\eta_{turb}$ , do gerador,  $\eta_{ger}$ , e do conjunto,  $\eta_{total}$ , para as diferentes condições de mar e de estado de carga da bateria. Afere-se que os valores de  $\eta_{turb}$  têm uma variação de 36 a 53%, o menor valor é obtido para o EM3 com a bateria carregada e o maior valor para o EM2 com a bateria a meia carga. Nota-se que esta variação é pouco acentuada entre os diferentes estados de mar, principalmente com a bateria a meia carga. O gerador apresenta valores de  $\eta_{ger}$  entre 37 e 49% e o valor inferior e superior são igualmente obtidos em conformidade com os valores de  $\eta_{turb}$ . Finalmente, os valores de  $\eta_{total}$  mostram estar entre 13 e 25%, com o valor máximo e mínimo novamente concordantes com os casos anteriores.

Os valores em regime variável são apresentados na Tab. 5.2.



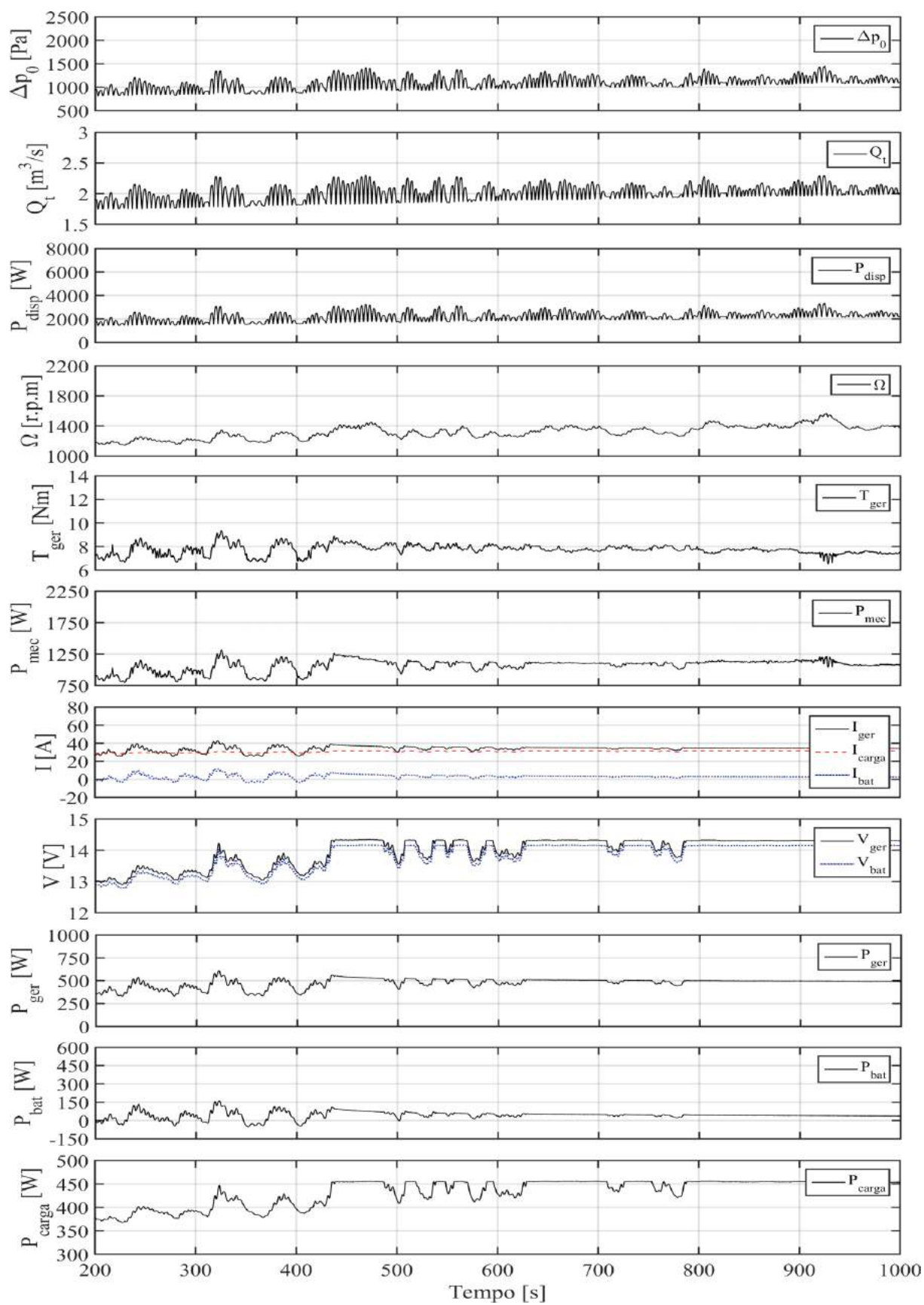


Figura 5.19: EM1, bateria carregada.

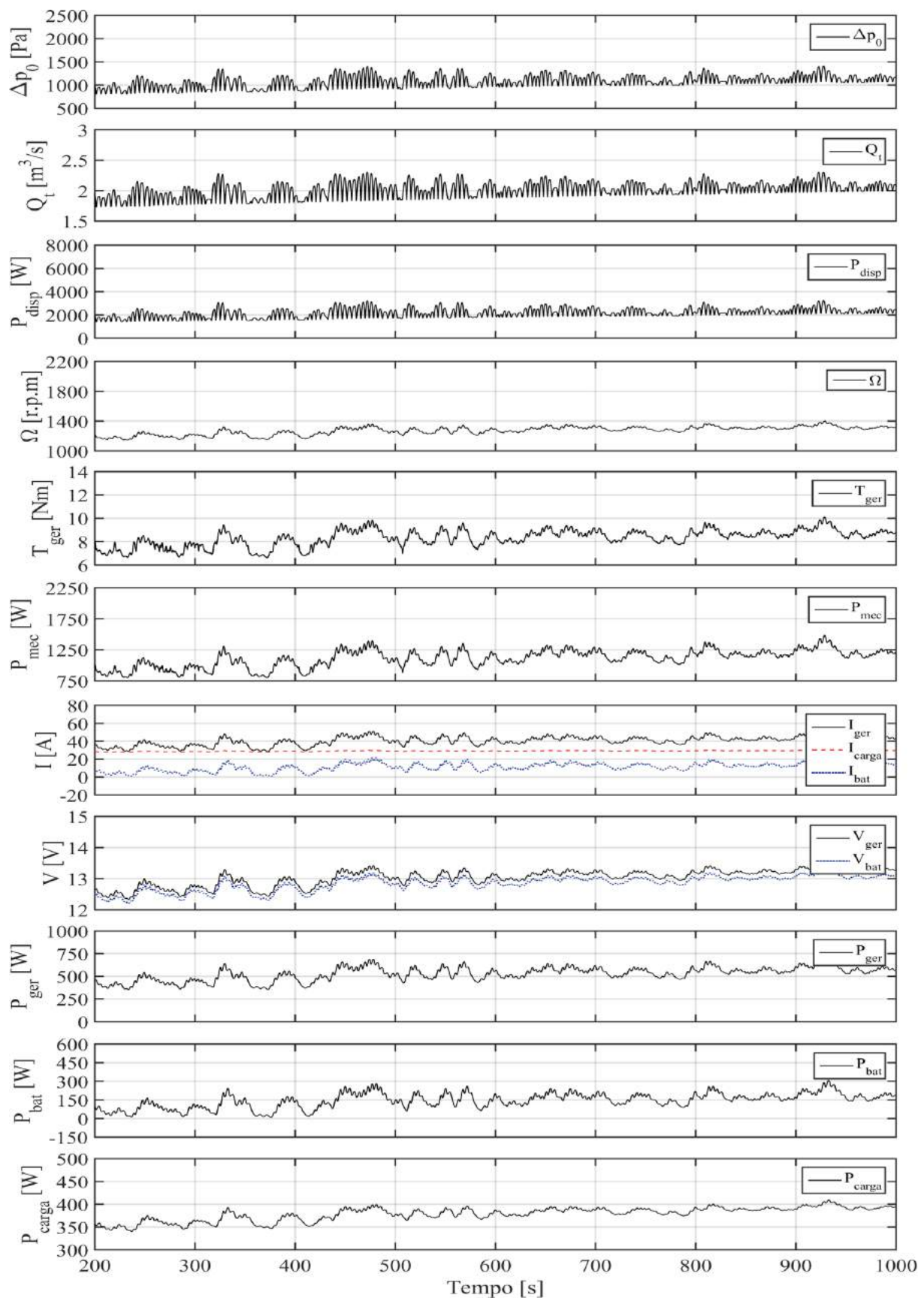


Figura 5.20: EM1, bateria a meia carga.

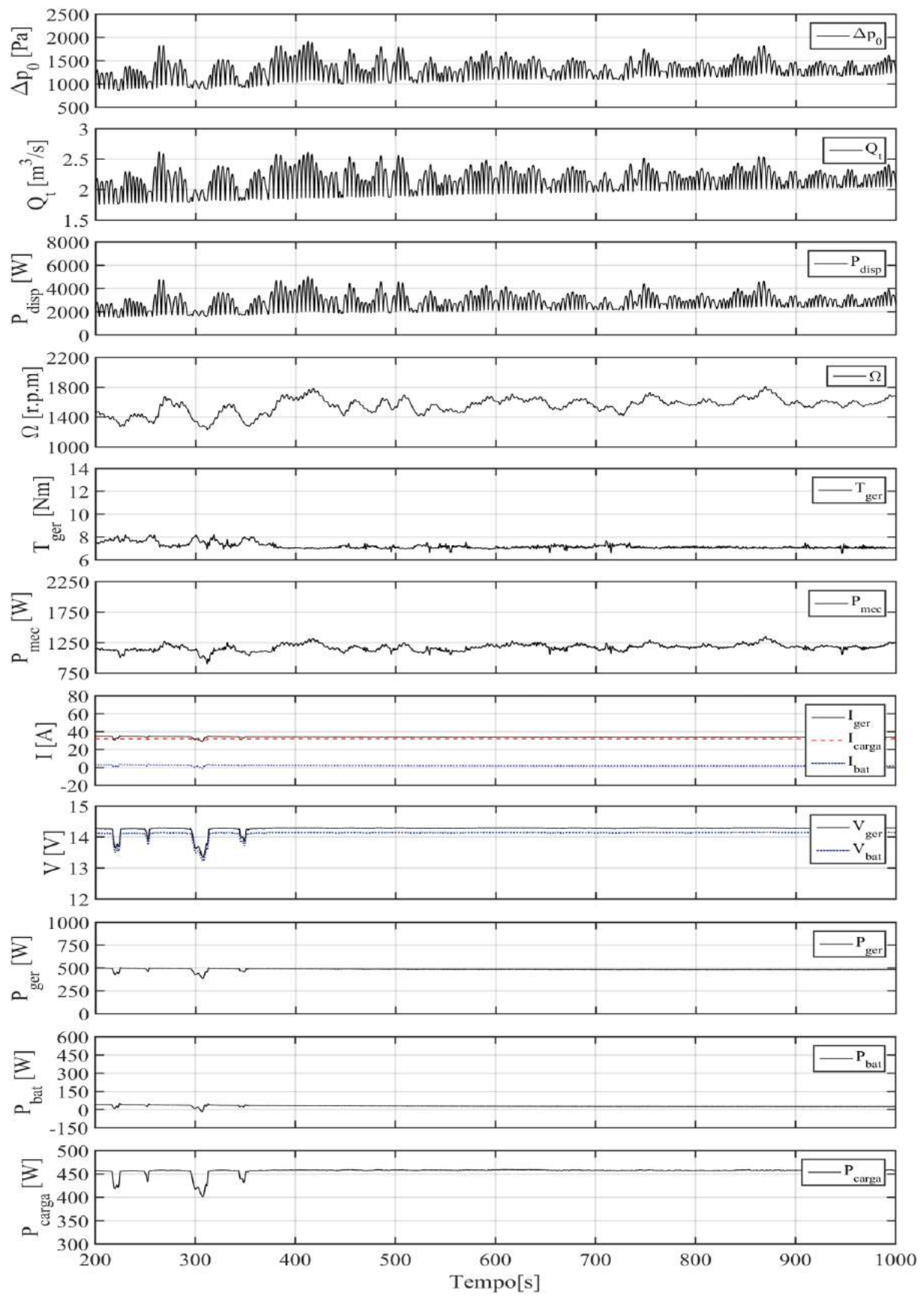


Figura 5.21: EM2, bateria carregada.

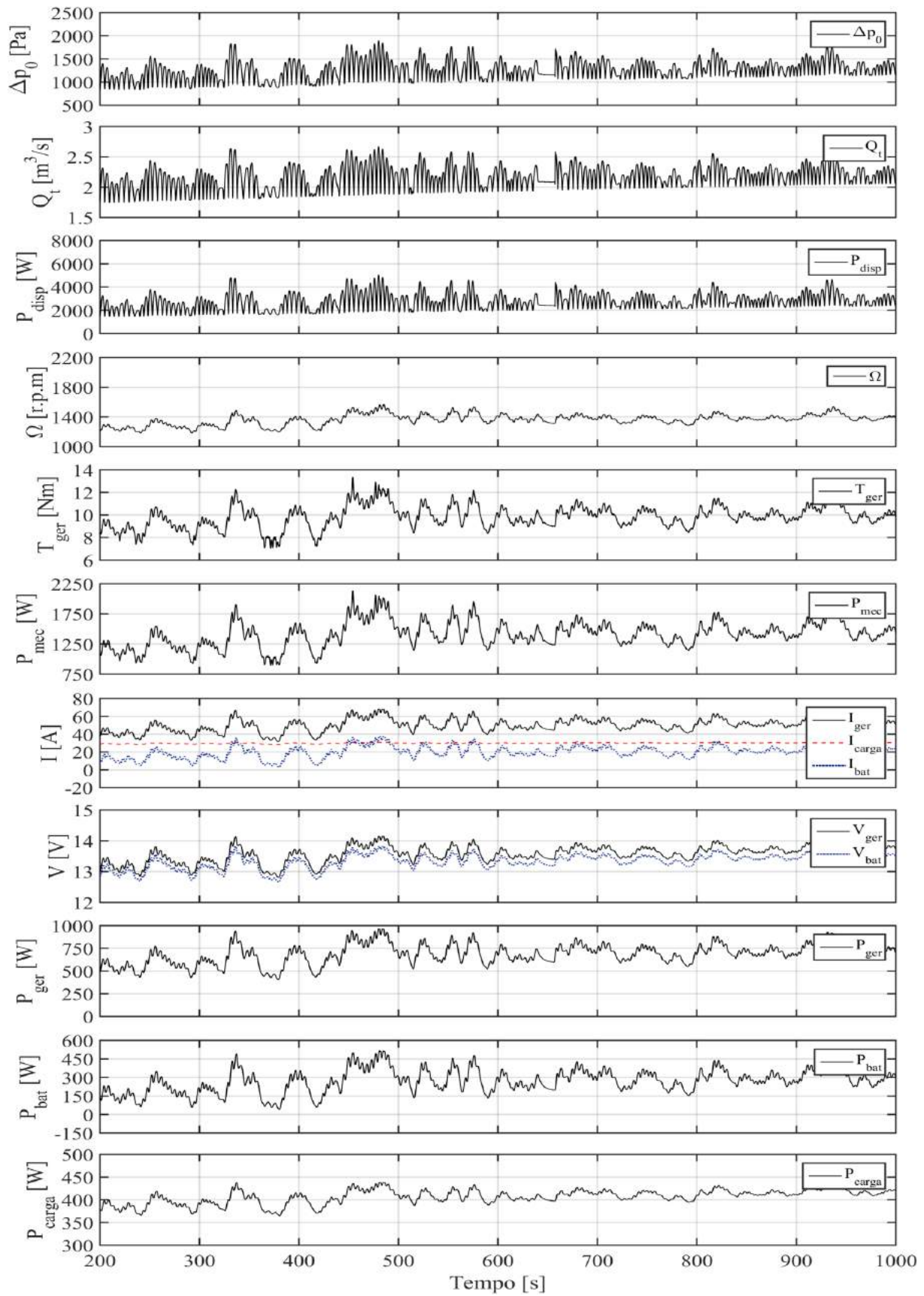


Figura 5.22: EM2, bateria a meia carga.

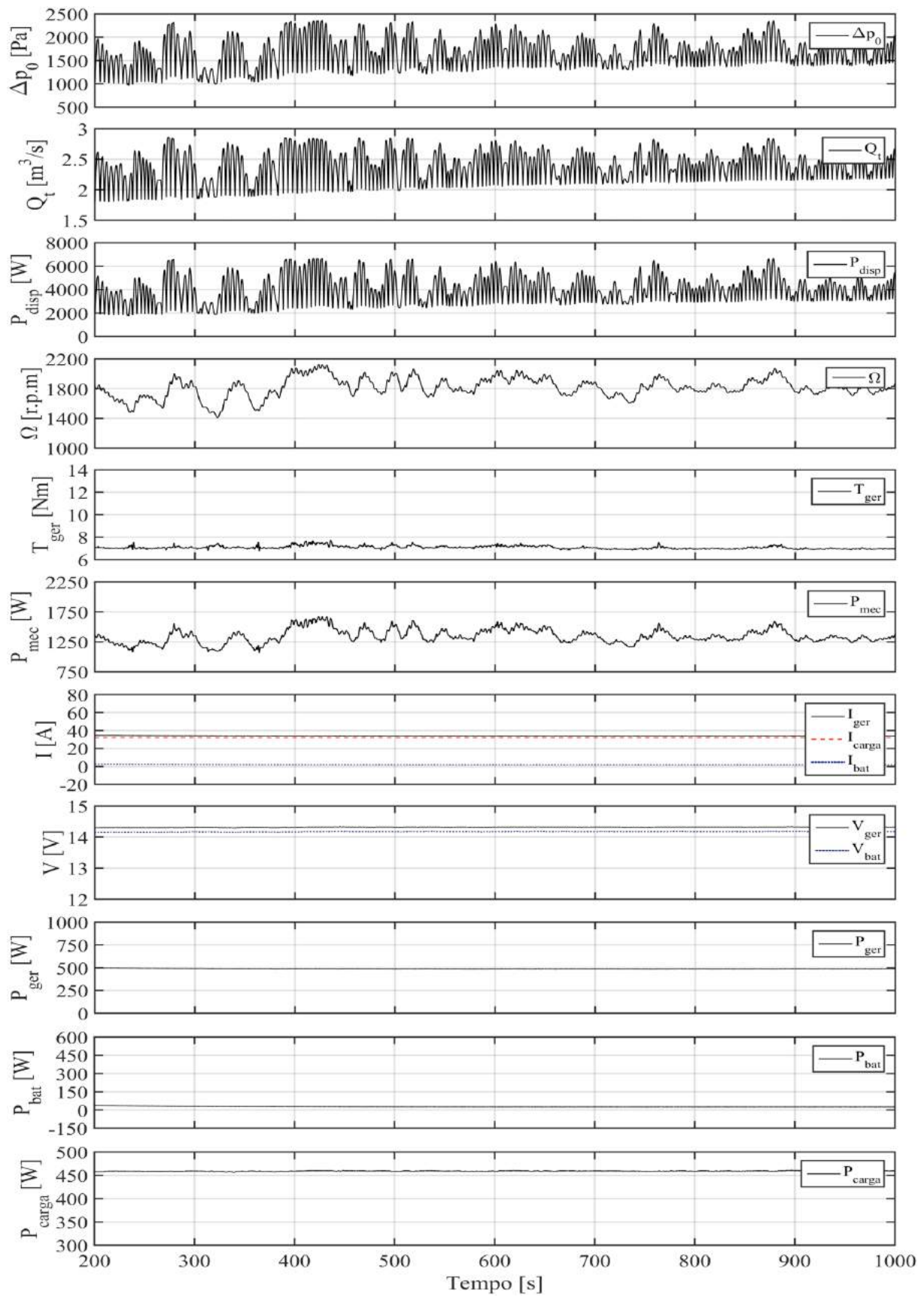


Figura 5.23: EM3, bateria carregada.

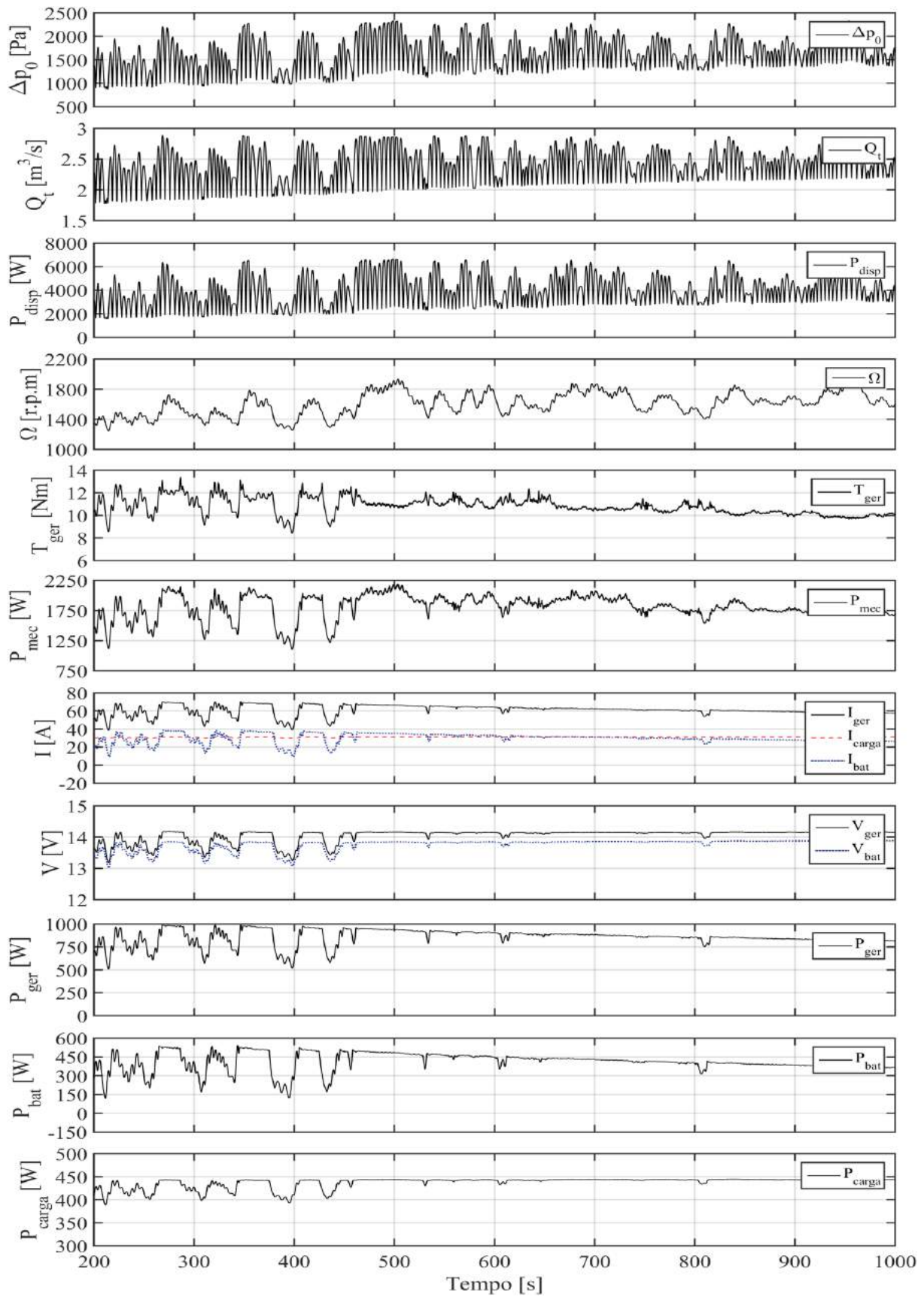


Figura 5.24: EM3, bateria a meia carga.

Tabela 5.2: Valores em regime variável.

$EC_{bat}$	$EM$	Valor	$T_{ger}$ [Nm]	$T_{turb}$ [Nm]	$\Omega$ [r.p.m.]	$\Delta p_o$ [Pa]	$Q_t$ [m <sup>3</sup> /s]	$P_{disp}$ [W]	$P_{mec}$ [W]	$\eta_{turb}$ [-]	$P_{ger}$ [W]	$I_{ger}$ [A]	$V_{ger}$ [V]	$P_{bat}$ [W]	$I_{bat}$ [A]	$V_{bat}$ [V]	$P_{carga}$ [W]	$I_{carga}$ [A]	$\eta_{ger}$ [-]	$\eta_{total}$ [-]
100%	EM1	Médio	7,63	7,66	1307	1076	2,00	2168	1046	0,49	462	33	13,9	35	3	13,7	426	31	0,44	0,22
		rms	7,64		1311	1085	2,00	2208	1052		466	33	13,9	51	4	13,7	428	31		
		std	0,51		98	142	0,13	419	114		64	4	0,6	37	3	0,6	36	1		
		Min	6,01		1100	738	1,68	1243	693		255	20	12,5	-88	-7	12,4	344	27		
		Max	9,37		1568	1451	2,31	3329	1321		610	43	14,4	163	12	14,2	456	32		
		Médio	7,27	7,30	1539	1294	2,15	2810	1169	0,44	481	34	14,2	29	2	14,0	451	32	0,41	0,18
	EM2	rms	7,28		1544	1310	2,15	2886	1171		482	34	14,2	38	3	14,0	451	32		
		std	0,35		126	204	0,17	659	65		35	2	0,3	23	2	0,3	19	1		
		Min	6,54		1183	784	1,70	1338	823		265	21	12,7	-98	-8	12,6	364	29		
		Max	8,77		1813	1923	2,62	5035	1355		610	44	14,3	176	13	14,2	461	32		
		Médio	7,09	7,17	1796	1648	2,37	3974	1334	0,36	490	34	14,3	32	2	14,1	458	32	0,37	0,13
		rms	7,09		1802	1676	2,38	4129	1340		491	34	14,3	38	3	14,1	458	32		
		std	0,14		145	309	0,24	1122	120		21	1	0,1	20	1	0,1	6	0		
		Min	6,70		1283	860	1,70	1477	1066		327	25	13,2	-65	-5	13,1	392	30		
		Max	8,46		2128	2363	2,86	6686	1675		696	49	14,3	243	17	14,2	461	32		
50%	EM1	Médio	8,20	8,22	1262	1062	2,00	2142	1090	0,52	522	40	13,0	143	11	12,8	376	29	0,48	0,25
		rms	8,25		1264	1071	2,00	2181	1103		531	40	13,0	161	12	12,8	377	29		
		std	0,85		68	138	0,13	413	166		97	6	0,4	73	5	0,4	23	1		
		Min	5,92		1079	741	1,68	1251	669		277	24	11,3	-30	-3	11,2	288	25		
		Max	10,14		1403	1417	2,31	3266	1488		731	54	13,7	312	23	13,4	413	30		
		Médio	9,66	9,68	1347	1235	2,14	2686	1372	0,53	672	49	13,5	262	19	13,3	405	30	0,49	0,26
	EM2	rms	9,72		1350	1253	2,15	2770	1393		685	50	13,5	283	21	13,3	406	30		
		std	1,11		89	209	0,19	680	240		131	8	0,4	107	8	0,4	23	1		
		Min	6,36		1087	754	1,68	1273	725		304	25	11,8	-25	-2	11,7	310	26		
		Max	13,37		1569	1894	2,67	5058	2138		968	68	14,1	517	37	13,8	440	31		
		Médio	10,68	10,71	1579	1579	2,37	3833	1768	0,50	828	59	14,0	385	28	13,7	435	31	0,47	0,23
		rms	10,72		1588	1614	2,39	4015	1785		835	59	14,0	396	29	13,7	436	31		
		std	0,91		168	333	0,26	1193	240		113	7	0,3	95	7	0,3	18	1		
		Min	7,10		1134	783	1,68	1332	845		289	25	11,6	-14	-1	11,5	303	26		
		Max	13,41		1963	2337	2,89	6690	2196		996	70	14,3	542	39	14,0	450	32		





## Capítulo 6

# Conclusões e trabalho futuro

### 6.1 Conclusões

Um estudo experimental de um sistema de conversão de energia das ondas para integrar uma boia oceanográfica auto-alimentada foi efetuado. Os ensaios foram realizados no laboratório de máquinas elétricas e no de ensaios de turbinas de 55 kW do IST e nesses foram desenvolvidas três instalações de testes. Na primeira instalação foi usado um motor CC para promover a rotação do gerador e somente se registou parâmetros elétricos e velocidades de rotação da máquina. Por outro lado, nas duas últimas instalações, o mesmo sistema elétrico (gerador, bateria e carga) foi integrado numa estação de testes com uma turbina de ar de ação axial, onde foi medido um maior número de variáveis.

Verificou-se que a potência do gerador,  $P_{ger}$ , foi extremamente dependente da sua velocidade de rotação e ainda da carga resistiva imposta. As potências elétricas,  $P_{ger}$ ,  $P_{bat}$  e  $P_{carga}$ , obtidas em regime permanente e em regime variável com a bateria carregada e carga resistiva constante ( $R_{eq} = 0,4 \Omega$ ) apresentaram coerência entre si. Quer nos ensaios de análise de sensibilidade, quer nos ensaios em regime variável, constatou-se que a bateria atuou como um *buffer* quando existiam picos de corrente do gerador causados pelo aumento da sua velocidade de rotação. Sendo assim, torna-se imprescindível o uso de uma bateria no sistema de modo a atenuar tais picos ou então de um conversor DC-DC a fim de controlar a corrente que vai para a carga. Por outro lado, pode haver um sistema de controlo de velocidade de rotação da turbina que, por meio de válvulas mecânicas, limita o escoamento através da mesma. Além disso, como demonstrado nesta tese, pode ser adotado um sistema de dissipação de energia, composto por cargas resistivas, a fim de controlar a velocidade de rotação do conjunto gerador-turbina.

Constatou-se que a bateria foi muitas vezes carregada acima da sua tensão nominal (12 V). Devido a isto, através da análise dos valores de  $P_{bat}$  em regime permanente e variável com a bateria carregada, foi possível observar a sobrecarga da mesma. Este problema pode ser ultrapassado com o uso de um conversor DC-DC entre o gerador e a bateria, onde se limite a tensão de carregamento da bateria a 12 V.

Verificou-se que com a bateria quase descarregada, a mesma não tinha potência suficiente para alimentar inicialmente o sistema de excitação do gerador, pelo que com o aumento da velocidade do motor CC, o gerador embalava e não produzia qualquer potência e binário. Isto pode representar um problema para o caso da boia oceanográfica, pelo que tem de ser assegurado que a bateria não desce a partir de um determinado valor de tensão,

ou então ter sempre uma bateria de reserva para evitar tal acontecimento.

Em regime variável, constatou-se que o comportamento do gerador foi extremamente influenciado pelo estado de carga da bateria e, também, pela energia disponível do estado de mar. Variáveis como  $P_{ger}$ ,  $P_{bat}$ ,  $T_{ger}$  e  $P_{mec}$  demonstraram ser superiores quando a bateria estava a meia carga, enquanto que  $\Omega$  e  $P_{carga}$  mostraram ser superiores com a bateria carregada. Com a bateria a meia carga, as variáveis  $P_{ger}$ ,  $P_{bat}$ ,  $P_{carga}$  e  $T_{ger}$  revelaram-se extremamente dependentes da velocidade de rotação do conjunto, enquanto que com a bateria carregada, os valores foram praticamente constantes e dependentes da energia disponível em cada estado de mar.

Finalmente, relativamente ao rendimento da turbina, em regime permanente o valor máximo registado foi de 52% e em regime variável o seu valor médio foi entre 36 e 53%. O gerador apresentou em regime permanente um rendimento máximo de 63% e em regime variável o seu valor médio foi entre 37 e 49%. O rendimento médio total do sistema em regime variável foi entre 13 e 26%. Verifica-se que os valores de rendimento total do sistema são relativamente baixos e que numa situação real em mar aberto, este rendimento iria sofrer um decréscimo face ao rendimento do sistema de extração de energia da própria boia.

## 6.2 Trabalho futuro

Em primeiro lugar, face ao desenvolvimento desta tese e à recente associação entre o IDMEC/IST e o DOP/AUç, é credível o seu crescente interesse em mais projetos de investigação apelando à sinergia entre a extração de energia das ondas e a monitorização dos oceanos. Deste modo, estudos experimentais em laboratório serão necessários para testar, avaliar e validar novas tecnologias que incorporem produtos viáveis para o mercado. No seguimento do trabalho desenvolvido no decorrer desta tese, notou-se que certos aspetos terão de ser tomados em conta para estudos experimentais futuros relacionados com o mesmo tipo de tecnologia.

Face ao funcionamento do circuito elétrico usado, sugere-se a incorporação de um conversor DC-DC entre o gerador e a bateria e entre o gerador e a carga, de modo a evitar a sobrecarga da bateria e picos de corrente na carga. A adoção de um sistema de armazenamento com baterias com maior capacidade ou emparelhamentos em paralelo deveria ser estudado. Neste último caso, um sistema em que houvesse uma comutação entre a bateria que recebia e a que fornecia energia poderia ser avaliado, de modo a assegurar o funcionamento dos sensores por um período de tempo mais longo. A par disto, deverão de ser estudadas outras tecnologias de baterias, principalmente as de *deep cycle*, particularmente as de AGM (*Absorbent Glass Mat*) e de lítio, porque a usada neste estudo experimental não seria a indicada para o caso de descargas profundas. Além disso, aconselha-se o uso de cargas com capacidade de auto-ajustamento, fazendo com que a sua potência de consumo seja sempre a nominal, o que não se verificou nos testes realizados.

A fim de ser possível a comparação entre o gerador aqui testado e novos tipos de máquinas, nomeadamente outros geradores síncronos, de corrente contínua e de indução, é aconselhado a sua posterior análise experimental para as mesmas condições aqui estudadas. No entanto, no caso dos geradores síncronos e de corrente contínua, a corrosão pode apresentar um problema, respetivamente nos anéis de excitação do rotor e no comutador. Sendo assim, numa situação real em mar aberto, terá que ser assegurada a máxima estanquidade do gerador, a fim de garantir a maior longevidade possível da máquina em boas condições de funcionamento. Os geradores síncronos e de corrente contínua têm a vantagem de fácil regulação da corrente de excitação e por sua vez binário, enquanto

que nos de indução a situação torna-se mais difícil. Os geradores de corrente contínua têm também o problema de não apresentarem uma boa relação entre o seu peso, volume e potência, condicionando o seu uso em espaços constrangidos e de elevada potência de consumo. Um sistema de monitorização em tempo real dos parâmetros elétricos do gerador, pode vir a apresentar uma forma de acompanhar à distância o seu normal e, se possível, intervir rapidamente no local.

Por fim, se se continuar a avaliar a alternativa aqui estudada (alternadores de automóveis), aconselha-se a retirar o regulador interno de tensão do gerador e desenvolver um novo que vá ao encontro do controlo ótimo da sua potência e binário para as condições de funcionamento da turbina.



# Bibliografia

- [1] Plano de ação para uma estratégia marítima na região atlântica para um crescimento inteligente, sustentável e inclusivo. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/?uri=CELEX%3A52013DC0279>. Acedido a 06-01-18.
- [2] Estratégia nacional para o mar 2013-2020. <https://www.portugal.gov.pt/media/1318016/Estrategia%20Nacional%20Mar.pdf>. Acedido a 18-10-17.
- [3] Y. Masuda. Wave-activated generator. In *Int. Colloq Exposition Oceans, Bordeaux, France*, 1971.
- [4] T. Setogushi and M. Takao. Current status of self rectifying air turbines for wave energy conversion. In *Energy Conversion Management 2006*, volume 47, pages 2382–2396, 2006.
- [5] J. C. C. Henriques, J. C. C. Portillo, L. M. C. Gato, R. P. F. Gomes, D. N. Ferreira, and A. F. O. Falcão. Design of oscillating-water-column wave energy converters with an application to self-powered sensor buoys. *Energy*, 112:852 – 867, 2016.
- [6] Mbari - power. <https://www.mbari.org/technology/emerging-current-tools/power/>. Acedido a 10-02-18.
- [7] S. Bastien, R. Sepe, A. Grilli, S. Grilli, and M. Spaulding. Ocean wave energy harvesting buoy for sensors. pages 3718 – 3725, 2009.
- [8] Wave glider, the most experienced ocean surface robot on the planet. <https://www.liquid-robotics.com/>. Acedido a 21-03-18.
- [9] J. C. C. Henriques, A. F. O. Falcão, R. P. F. Gomes, and L. M. C. Gato. Air turbine and primary converter matching in spar-buoy oscillating water column wave energy device. In *Proceedings of the 32nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, OMAE 2013*, Nantes, France, June 2013.
- [10] L. Trigo. The OWC option. In *Workshop on Powering the Future - Marine Energy Opportunities, Lisbon*, 2009. URL [http://www.wavec.org/eventos/marine\\_energy\\_2009#.WG-14dKLSos](http://www.wavec.org/eventos/marine_energy_2009#.WG-14dKLSos).
- [11] T. V. Heath. A review of oscillating water columns. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 370(1959):235–245, 2011. doi: 10.1098/rsta.2011.0164.

- [12] A. F. O. Falcao. Wave energy utilization: A review of the technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(3):899 – 918, 2010. doi: 10.1016/j.rser.2009.11.003.
- [13] Testing of ocean energy buoy at galway bay, ireland. <https://tethys.pnnl.gov/annex-iv-sites/testing-ocean-energy-buoy-galway-bay-ireland>. Acedido a 19-03-18.
- [14] A. S. Sheata, Q. Xiao, K. M. Saqr, and A. Day. Wells turbine for wave energy conversion: a review. *Int. J. Energy Res.*, 41:6–38, 2017.
- [15] A. F. O. Falcão and J. C. C. Henriques. Oscillating-water-column wave energy converters and air turbines: A review. *Renewable Energy*, 85:1391 – 1424, 2016. doi: 10.1016/j.renene.2015.07.086.
- [16] T. Setoguchi, S. Santhakumar, H. Maeda, M. Takao, and K. Kaneko. A review of impulse turbines for wave energy conversion. *Renew. Energy*, 23:261–292, 2001.
- [17] A. F. O. Falcão, L. M. C. Gato, and E. P. A. S. Nunes. A novel radial self-rectifying air turbine for use in wave energy converters. Part 2. Results from model testing. *Renewable Energy*, 53:159 – 164, 2013. doi: 10.1016/j.renene.2012.11.018.
- [18] A. F. O. Falcão and L. M. C. Gato. Turbine with radial inlet and outlet rotor for use in bidirectional flows, Feb. 15 2011. US Patent App. 13/580,099.
- [19] A. A. D. Carrelhas. Estudo experimental do modelo e do protótipo de uma turbina auto-retificadora bi-radial com pás fixas. Master’s thesis, IST, Universidade de Lisboa, 2017.
- [20] Proibição de pesca no banco condor até 2020. <http://www.acorianooriental.pt/noticia/governo-regional-alarga-a-proibicao-de-pesca-no-banco-condor-ate-2020-284423>, 2017. Acedido a 01-05-18.
- [21] Governo dos açores apoia investigação científica no banco condor. <http://diariodalagoa.com/arquivo/21841>, 2015. Acedido a 24-11-17.
- [22] Notícias do dop e do centro do imar da uac. <http://www.horta.uac.pt/intradop/index.php/notas-do-dop-mainmenu-1/desde-julho-2006-mainmenu-69/2012?view=archive&month=3>, 2006. Acedido a 24-11-17.
- [23] J. C. C. Henriques, W. Sheng, A. Falcão, and L. M. C. Gato. A comparison of biradial and wells air turbines on the mutriku breakwater owc wave power plant. 06 2017.
- [24] Open sea operating experience to reduce wave energy cost. <http://opera-h2020.eu/>. Acedido a 30-01-18.
- [25] D. J. Perreault and V. Caliskan. Automotive power generation and control. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 19:1–13, 2004.
- [26] Robert’s and son - alternators. <https://www.robertsandson.com/page/alternators>, 2018. Acedido a 11-10-17.

- [27] Alternators and starters. <https://www.boschautoparts.com/en/auto/alternators-and-starters>, 2018. Acedido a 21-11-17.
- [28] A short course on charging systems. <https://www.carparts.com/classroom/charging.htm>, 2017. Acedido a 13-10-17.
- [29] Replacement parts for alternators. <https://tw.bosch-automotive.com/>. Acedido a 21-11-17.
- [30] Charging system basics. <http://www.bcae1.com/charging.htm>, 2018. Acedido a 11-10-17.
- [31] Manual do usuário, fluke 434-ii/435-ii/437-ii, analisadores de qualidade de potência e energia trifásicos. 2012.
- [32] G. Marques and M. J. Resende. *Sebenta de circuitos elétricos - sistemas elétricos e electromecânicos*. 2009.
- [33] Mathworks. [https://www.mathworks.com/matlabcentral/?s\\_tid=gn\\_mlc](https://www.mathworks.com/matlabcentral/?s_tid=gn_mlc). Acedido a 28-09-17.
- [34] Solidworks community. <https://www.solidworks.com/sw/community.htm>. Acedido a 16-09-17.
- [35] Laboratory method of testing fans for aerodynamic performance rating. AMCA Standard (2004).
- [36] R. P. F. Gomes. *Análise numérica e experimental do escoamento numa turbina auto-rectificadora de acção para dispositivos de CAO para aproveitamento de energia das ondas*. Master's thesis, IST, Universidade de Lisboa, 2007.
- [37] S. Dixon and C. Hall. Chapter 6 - Three-Dimensional Flows in Axial Turbomachines. In S. Dixon and C. Hall, editors, *Fluid Mechanics and Thermodynamics of Turbomachinery (Seventh Edition)*, pages 215 – 263. Butterworth-Heinemann, Boston, seventh edition edition, 2014.





# Apêndice A

## Aplicação de filtros

Um estudo experimental que engloba a aquisição de sinais de certas variáveis, acarreta sempre uma dada incerteza no sinal adquirido. Esta incerteza pode resultar de erros, podendo ser denominados por erros grosseiros, sistemáticos e aleatórios. Os erros grosseiros derivam do mau manuseamento da instalação/instrumentos por parte do utilizador. Os sistemáticos têm a ver com o comportamento dos instrumentos, relacionados com as suas calibrações e precisões. Os aleatórios são causados por flutuações imprevisíveis que não se repetem no decorrer de um grande número de ensaios.

Posto isto, no decorrer do pós processamento do sinal de determinadas variáveis, verificou-se que os sinais adquiridos nos ensaios eram compostos pela sobreposição do seu sinal efetivo e de um certo ruído. A fim de evitar a presença deste ruído no sinal das dadas variáveis, procedeu-se à aplicação de filtros aos sinais de velocidade de rotação, binário do gerador, pressão na câmara de pleno e caudal volúmico.

Primeiramente, em regime permanente foram aplicados os filtros, de modo a eliminar as frequências indesejadas presentes no sinal, correspondentes ao ruído. Foram utilizados filtros Savitzky-Golay. Estes filtros digitais são aplicados a uma série de dados com o objetivo de suavizar o seu sinal, aumentando a razão entre o sinal e o ruído (*Signal-to-noise ratio - SNR*) e ao mesmo tempo evitando a sua distorção.

As Figs. [A.1](#) e [A.2](#) representam respetivamente os sinais do binário do gerador e da velocidade de rotação do conjunto turbina e gerador e ainda a pressão na câmara de pleno e o caudal volúmico na turbina. Nestas figuras estão também presentes dois filtros que foram aplicados, de modo a escolher um que melhor ilustrasse a evolução do sinal com o menor ruído possível. Dado que estes ensaios foram feitos a uma velocidade de rotação constante, assumiu-se que o sinal filtrado 1 se aproximava mais do que foi observado no decorrer dos ensaios.

Em regime variável procedeu-se também à aplicação do mesmo filtro e a adoção do sinal filtrado 1 (ver Figs. [A.3](#) e [A.4](#)).

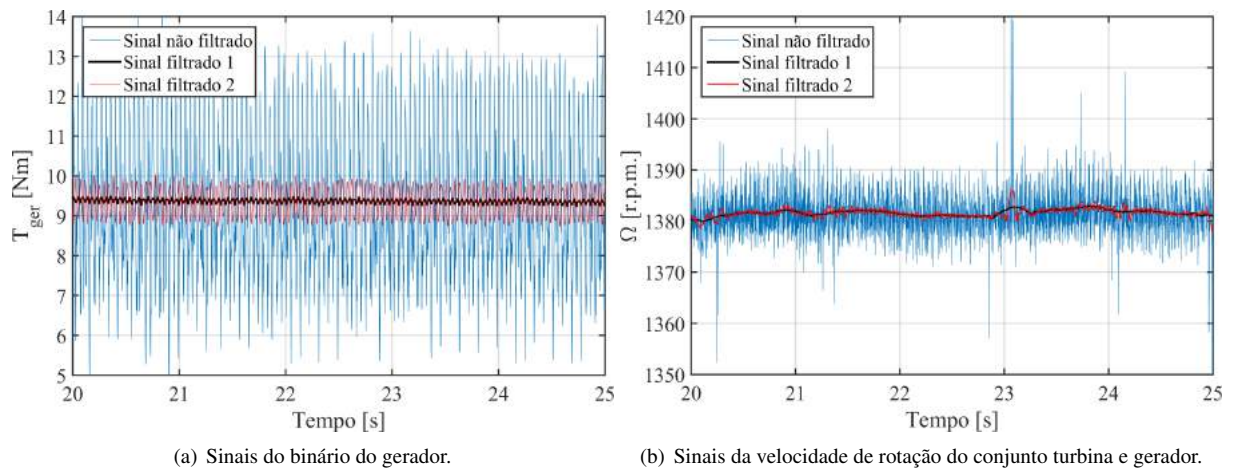


Figura A.1: Sinais filtrados e não filtrados em regime permanente (binário do gerador e velocidade de rotação).

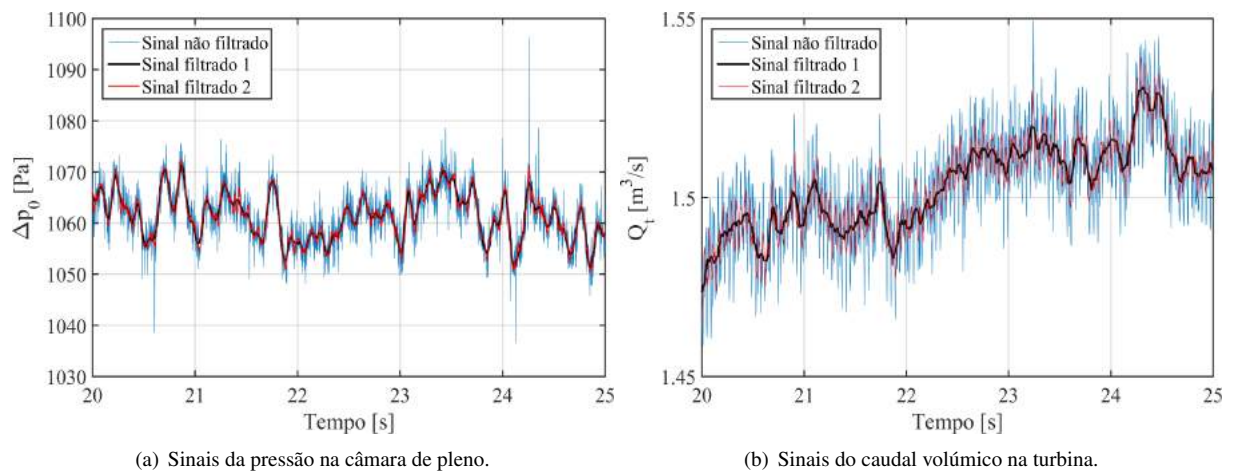


Figura A.2: Sinais filtrados e não filtrados em regime permanente (pressão na câmara de pleno e caudal volúmico).

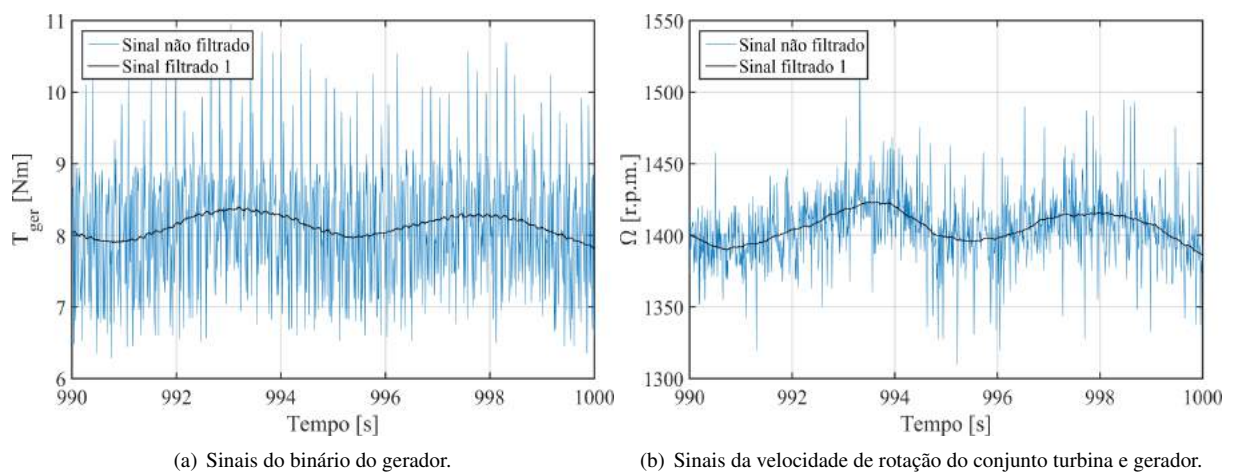
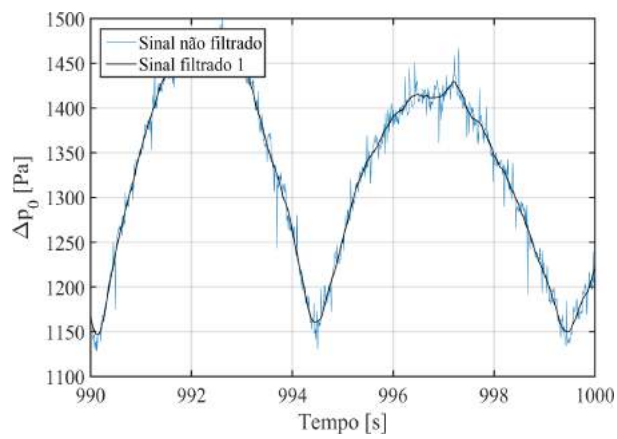
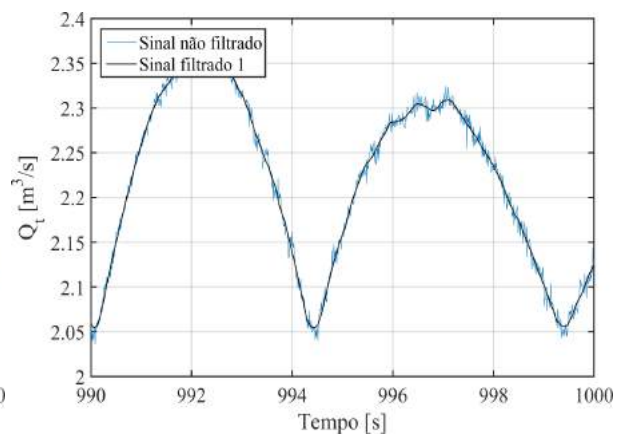


Figura A.3: Sinais filtrados e não filtrados em regime variável (binário do gerador e velocidade de rotação).



(a) Sinais da pressão na câmara de pleno.



(b) Sinais do caudal volúmico na turbina.

Figura A.4: Sinais filtrados e não filtrados em regime variável (pressão na câmara de pleno e caudal volúmico).

# Apêndice B

## Código em MATLAB

### B.1 Regime permanente - Aquisição de dados

```
1
2 %% Initialize_Aquisicao_de_dados_em_Regime_Permamente
3 clc; clear;
4 clear variables
5 close all
6
7 Hz = input('Valor introduzido em Hz:\n');
8 Hz = num2str(Hz);
9 frequency          = 4; %can change
10
11 %% Create a data acquisition session
12 daq.getDevices
13 daqSession          = daq.createSession('ni');
14
15 %% Add channels specified by subsystem type and device
16 ch1 = addAnalogInputChannel(daqSession, 'Dev2', 'ai15', 'Voltage'); % RPM
17 ch1.TerminalConfig = 'SingleEndedNonReferenced'
18
19 ch2 = addAnalogInputChannel(daqSession, 'Dev2', 'ai4', 'Voltage'); % Binario
20 ch2.TerminalConfig = 'SingleEndedNonReferenced'
21
22 ch3 = addAnalogInputChannel(daqSession, 'Dev2', 'ai2', 'Voltage'); % PPLENO
23 ch3.TerminalConfig = 'SingleEndedNonReferenced'
24
25 ch4 = addAnalogInputChannel(daqSession, 'Dev2', 'ai11', 'Voltage'); % P1
26 ch4.TerminalConfig = 'SingleEndedNonReferenced'
27
28 ch5 = addAnalogInputChannel(daqSession, 'Dev2', 'ai0', 'Voltage'); % P2
29 ch5.TerminalConfig = 'SingleEndedNonReferenced'
30
31 %% Configure Data Acquisition Properties
32 daqSession.DurationInSeconds          = 120; % segundos da medicao
```

```

33 daqSession.Rate = frequency;
34 daqSession.NotifyWhenDataAvailableExceeds = 2*frequency;
35 lh = daqSession.addlistener('DataAvailable', @plotData);
36
37 %% Run Session & Acquire Data
38 disp( 'A adquirir...' )
39 [data,time,triggerTime] = daqSession.startForeground();
40 disp( 'Acabou de adquirir...' )
41
42 %% Data to variables
43 rpm = data(:,1); % RPM_tensao
44 T = data(:,2); % torque_tensao
45 Ppleno = data(:,3); % PPleno_tensao
46 P1 = data(:,4); % P1_tensao
47 P2 = data(:,5); % P2_tensao
48
49 %Mean and std
50 rpm_mean = mean(rpm);
51 rpm_std = std(rpm);
52
53 T_mean = mean(T);
54 T_std = std(T);
55
56 Ppleno_mean = mean(Ppleno);
57 Ppleno_std = std(Ppleno);
58
59 P1_mean = mean(P1);
60 P1_std = std(P1);
61
62 P2_mean = mean(P2);
63 P2_std = std(P2);
64
65 % Save data .mat
66 DefaultName = [ 'Ensaios_alternador_1R_bateria_cheia_2018_02_22' Hz '_' datestr(now, '
dd-mmm-yyyy ') ];
67 TDataName = [ DefaultName '.mat' ];
68
69 TData.time =time;
70 TData.rpm =rpm;
71 TData.T =T;
72 TData.Ppleno =Ppleno;
73 TData.P1 =P1;
74 TData.P2 =P2;
75
76 save( TDataName, 'TData' );
77
78 %% Save data .txt
79 probeTitleTxt = [ 'Ensaios_alternador_regime_permanente' '_' datestr(now, 'dd-mmm-
yyyy ') ];

```

```

80 results_probe_calc = [ probeTitleTxt '.txt'];
81
82     fid =fopen (results_probe_calc,'at');
83     fprintf(fid, '%s          ', Hz);
84
85     fprintf(fid, '%2.4f          ', rpm_mean );
86     fprintf(fid, '%2.4f          ', rpm_std );
87
88     fprintf(fid, '%2.4f          ', T_mean );
89     fprintf(fid, '%2.4f          ', T_std );
90
91     fprintf(fid, '%2.4f          ', Ppleno_mean);
92     fprintf(fid, '%2.4f          ', Ppleno_std);
93
94     fprintf(fid, '%2.4f          ', P1_mean);
95     fprintf(fid, '%2.4f          ', P1_std);
96
97     fprintf(fid, '%2.4f          ', P2_mean);
98     fprintf(fid, '%2.4f          ', P2_std);
99
100    fprintf(fid, '%2.4f          ', frequency);
101    fprintf(fid, '%s', datestr(now));
102    fprintf(fid, '\n');
103    fclose(fid);

```

## B.2 Regime variável - Aquisição de dados

```

1
2 %% Initialize_Aquisicao_de_dados_em_Regime_Variavel
3 clc; clear;
4 clear variables
5 close all
6
7 frequency          = 4;
8
9 %% Create a data acquisition session
10 daq.getDevices
11 daqSession          = daq.createSession('ni');
12
13 %% Add channels specified by subsystem type and device
14 ch1 = addAnalogInputChannel(daqSession,'Dev2','ai4','Voltage'); % RPM
15 ch1.TerminalConfig = 'SingleEndedNonReferenced'
16
17 ch2 = addAnalogInputChannel(daqSession,'Dev2','ai12','Voltage'); % Binario
18 ch2.TerminalConfig = 'SingleEndedNonReferenced'
19
20 ch3 = addAnalogInputChannel(daqSession,'Dev2','ai3','Voltage'); % PPLENO
21 ch3.TerminalConfig = 'SingleEndedNonReferenced'
22

```

```

23 ch4 = addAnalogInputChannel(daqSession, 'Dev2', 'ai11', 'Voltage'); % P1
24 ch4.TerminalConfig = 'SingleEndedNonReferenced'
25
26 ch5 = addAnalogInputChannel(daqSession, 'Dev2', 'ai0', 'Voltage'); % P2
27 ch5.TerminalConfig = 'SingleEndedNonReferenced'
28
29 %% Configure Data Acquisition Properties
30 daqSession.DurationInSeconds = 1200; % segundos da medicao
31 daqSession.Rate = frequency;
32 daqSession.NotifyWhenDataAvailableExceeds = 2*frequency;
33 lh = daqSession.addListener('DataAvailable', @plotData);
34
35 %% Run Session & Acquire Data
36 disp( 'A adquirir...' )
37 [data,time,triggerTime] = daqSession.startForeground();
38 disp( 'Acabou de adquirir...' )
39
40 %% Aloca dados a variaveis
41 rpm = data(:,1); % RPM_tensao
42 T = data(:,2); % torque_tensao
43 Ppleno = data(:,3); % Ppleno_tensao
44 P1 = data(:,4); % P1_tensao
45 P2 = data(:,5); % P2_tensao
46
47 % Media e desvio padrao
48 rpm_mean = mean(rpm);
49 rpm_std = std(rpm);
50
51 T_mean = mean(T);
52 T_std = std(T);
53
54 Ppleno_mean = mean(Ppleno);
55 Ppleno_std = std(Ppleno);
56
57 P1_mean = mean(P1);
58 P1_std = std(P1);
59
60 P2_mean = mean(P2);
61 P2_std = std(P2);
62
63 % Guardar dados : guarda o vetor todo para ser possivel aceder
64 % posteriormente
65 DefaultName = [ 'Ensaio_alternador_regime_variavel' datestr(now, 'dd-mmm-yyyy ') ];
66 TDataName = [ DefaultName '.mat' ];
67
68 TData.time = time;
69 TData.rpm = rpm;
70 TData.T = T;
71 TData.Ppleno = Ppleno;

```

```

72 TData.P1          = P1;
73 TData.P2          = P2;
74 TData.frequency   = frequency;
75 TData.Hz          = Hz;
76
77 save( TDataName , 'TData' );

```

### B.3 Pós-processamento

```

1  %% Initialize_Pos_processamento_de_dados_em_Regime_Variavel
2  close all
3  clc
4
5  frequency = TData.frequency;
6  range_max = 1200;
7  range_min = 0;
8
9  %% Retas de calibracao
10
11 % RETA CALIBRACAO TORQUE
12 m_t = -13.733;
13 b_t = 12.099;
14 % RETA CALIBRACAO RPM
15 m_vrot = 4893.2;
16 b_vrot = 55.65;
17 % RETA CALIBRACAO PPLENO
18 m_Ppleno = 2720;
19 b_Ppleno = -6800;
20 % RETA CALIBRACAO P1
21 m_p1 = 2720;
22 b_p1 = -6800;
23 % RETA CALIBRACAO P2
24 m_p2 = 4000;
25 b_p2 = -10000;
26
27 D = 0.59; % Diametro da turbina
28
29
30 %% Calcula Potencia Mecanica
31 % Velocidade de rotacao
32 vrot      = m_vrot*TData.rpm(range_min:range_max,1) + b_vrot;
33 vrads     = pi/30*vrot;
34 windowSize = [201,101];
35 vrads_filt = filtro(vrads,windowSize);
36
37 % Binario
38 %Reta de torque_atrito do Rui Gomes
39 torque_atrito = (8E-05)*vrads.^2 - 0.0019*vrads + 0.6;
40 torque        = -(m_t*TData.T(range_min:range_max,1) + b_t);

```



```

41 torque      = torque + (torque_atrito);
42 windowSize  = [201,101];
43 torque_filt  = filtro(torque,windowSize);
44 Pmec = torque_filt.*vrads_filt;
45
46 %% Calculo do caudal
47 % Esta rotina pede p1, p2, temperatura e Patm
48 p1 = m_p1*TData.P1(range_min:range_max,1) + b_p1;
49 p2 = m_p2*TData.P2(range_min:range_max,1) + b_p2;
50 % Furo antes do nozzle pn2
51 pn2 = p1;
52 % Furo depois do nozzle pn3
53 pn3 = p2;
54 Temp = 19;
55
56 n = size( pn2 );
57 for i= 1: n
58     T5(i,1) = Temp;
59 end
60
61 Q_Approx = zeros( n );
62 rho_mean = 0.0;
63
64 for i =1:n
65
66     C_D = 0.028128;
67     p_atm = 100315;
68
69     Ce0 = 0.95;
70     E = 1.043;
71     mu = 1.819*(1e-5);
72     nu = 1.5328737178409*(1e-5);
73     Rair = 287.058;
74     Dp = 190;
75     Dg = 495;
76     B = Dp/Dg;
77     Ap = (Dp *0.5*(1e-3))^2 * pi;
78     Ag = (Dg *0.5*(1e-3))^2 * pi;
79
80     TempK = T5(i) + 273.15;
81     p_abs = p_atm + pn2(i);
82     rho = p_abs / ( TempK * Rair );
83     Alpha = 1.0 - ( pn3(i) / ( rho * Rair * TempK ) );
84     Y = 1.0 - ( 0.548 + 0.71* B^4 ) * ( 1.0 - Alpha );
85     Re1st = ( 2.0^0.5 ) / mu * Ce0 * Dp * Y * ( pn3(i) * rho / ( 1.0 - E * B^4 ) )
        ^0.5;
86     C1st = 0.9986 - 7.006/( Re1st^0.5 ) + 134.6/Re1st;
87     e1 = C1st - Ce0;
88

```

```

89     for iter = 1: 15
90         Re2nd          = ( 2.0^0.5 )/ mu * C1st * Dp * Y * ( pn3(i) * rho / ( 1.0 - E * B^4 ) )
           ^0.5;
91         C2nd          = 0.9986 - 7.006/( Re2nd^0.5 ) + 134.6/Re2nd;
92         e2            = abs( C2nd - C1st );
93
94         if e2 < 0.00001
95             break
96         else
97             Re1st = Re2nd;
98             C1st  = C2nd;
99         end
100    end
101
102    C = C2nd;
103    Q_Approx(i) = C * Ap * Y * (2.0 * pn3(i) / rho)^0.5 / ( ( 1.0 - E * B^4 )^0.5 );
104    rho_mean = rho_mean + rho;
105 end
106
107 Q          = Q_Approx;
108 windowSize = [59];
109 Q_filt     = filtro(Q,windowSize);
110
111 %% Calculo de coeficientes
112 % Pressao na camara
113 Ppleno     = TData.Ppleno(range_min:range_max,1)*m_Ppleno + b_Ppleno;
114 windowSize = [59];
115 Ppleno_filt = filtro(Ppleno,windowSize);
116 Pavail     = Q_filt.* Ppleno_filt;
117 eff        = Pmec ./ Pavail; %zeros(Pmec);
118 Phi        = Q_filt ./ (vrads_filt* D^3);
119 Psi        = Ppleno_filt ./ (rho * vrads_filt.^2 * D.^2);
120 Pi         = Pavail ./ (rho * vrads_filt.^3 * D.^5);

```

## B.4 Calibração do sensor de binário - Aquisição de dados

```

1 %% Initialize_Calibracao_Sensor_Binario_Braco_Direito_Exemplo
2 clc; clear;
3 clear variables
4 close all
5
6 peso = input('Peso colocado em g:\n');
7 peso = num2str(peso);
8
9 %% Ver variavel em tempo real
10 function plotData(src,event)
11     plot(event.TimeStamps, event.Data)
12     legend( 'AIO' ); % Mostra 1 sinal
13 end

```

```

14
15 %% Create a data acquisition session
16 daq.getDevices
17 daqSession          = daq.createSession('ni');
18
19 %% Add channels specified by subsystem type and device
20 ch1 = addAnalogInputChannel(daqSession,'Dev2','ai2','Voltage'); % AI1
21 ch1.TerminalConfig = 'SingleEndedNonReferenced'
22 frequency          = 500 %podese mudar
23 %% Configure Data Acquisition Properties
24 daqSession.DurationInSeconds          = 20; % segundos da medicaao
25 daqSession.Rate                      = frequency;
26 daqSession.NotifyWhenDataAvailableExceeds = 2*frequency;
27 lh = daqSession.addlistener('DataAvailable', @plotData);
28
29 %% Run Session & Acquire Data
30 disp( 'A adquirir...' )
31 [data,time,triggerTime] = daqSession.startForeground();
32 disp( 'Acabou de adquirir...' )
33
34 %% Aloca dados a variaveis
35 t          = data(:,1); % Torque
36 %Media e desvio padrao
37 u_mean     = mean(t);
38 u_std      = std(t);
39
40 % Guardar dados em .mat
41 DefaultName = [ 'CalibracaoBinario0_20Nm_Lado_direito_Peso_' peso '_' datestr(now, 'dd-
    mmm-yyyy ') ];
42 TDataName = [ DefaultName '.mat'];
43 TData.time=time;
44 TData.t=t;
45 TData.peso=peso;
46
47 save( TDataName, 'TData' );
48 % Guarda dados em .txt
49
50 %% Guarda txt dos resultados
51 probeTitleTxt = [ 'CalibracaoBinario0_20Nm_Lado_direito' '_' datestr(now, 'dd-mmm-yyyy ')
    ];
52 results_probe_calc = [ probeTitleTxt '.txt'];
53
54     fid =fopen (results_probe_calc,'at');
55         fprintf(fid, '%s          ', peso);
56         fprintf(fid, '%2.4f          ', u_mean );
57         fprintf(fid, '%2.4f          ', u_std );
58         fprintf(fid, '%s', datestr(now));
59         fprintf(fid, '\n');
60     fclose(fid);

```

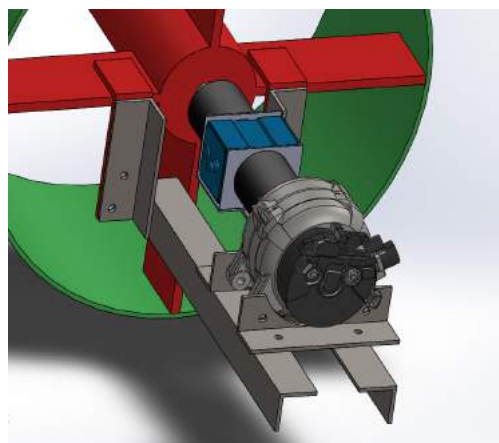
## Apêndice C

# Construção das instalações experimentais

A Fig. C.1 ilustra os desenhos CAD 3D das peças de fixação do gerador à estrutura da turbina.



(a) Suporte de fixação ao gerador e sensor de binário.



(b) Montagem completa.

Figura C.1: Desenho 3D da montagem da estrutura de suporte e fixação do gerador e sensor de binário feito em Solidworks.

O transporte da turbina desde o laboratório de turbo-máquinas até ao laboratório V-Flow foi necessário, o que acarretou o uso de um carretel, correntes, cintas e um porta-paletes (ver Fig. C.2). Primeiramente a turbina (desmontada) foi içada do laboratório de turbo-máquinas até ao laboratório de fluidos e, de seguida, arriada do mesmo até à estrada. Posto isto, foi transportada com um porta-paletes até ao laboratório V-Flow. Como a turbina é dividida em duas secções com mais de 150 kg cada, foi necessário realizar o transporte de cada uma das secções separadamente.

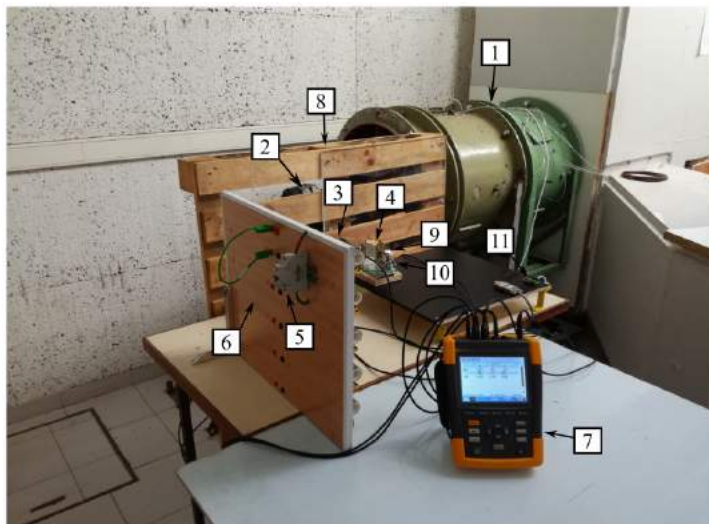
Atente-se que a configuração do suporte do gerador e os tipos de acoplamentos dos veios sofreram algumas modificações entre os ensaios. Sendo assim, houve necessidade de mudar de sensor de binário, uniões elásticas, originando novos trabalhos de corte e soldadura no suporte do gerador.

A Fig. C.3 representa a primeira instalação utilizada para estudar o sistema em regime permanente.

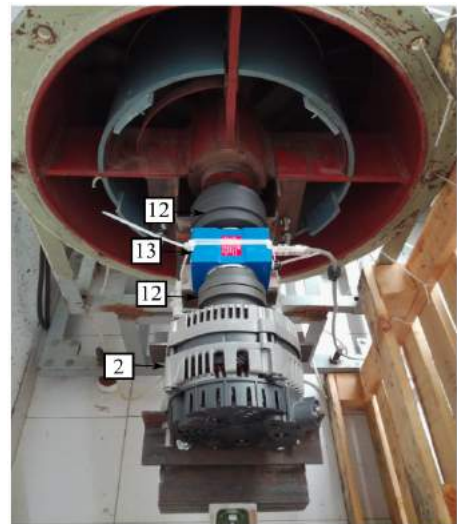


(a) Transporte das diferentes condutas da turbina. (b) Içamento de uma secção da conduta da turbina. (c) Carretel, correntes e grua de içamento da turbina.

Figura C.2: Método de transporte das duas secções da turbina.



(a) (1) turbina, (2) gerador, (3) bateria, (4) fusível, (5) disjuntor, (6) banco de cargas resistivas, (7) analisador de potência FLUKE, (8) proteção em madeira e acrílico, (9) lâmpada, (10) interruptor, (11) ligação via cabo *ethernet* para transmissão dos sinais de binário e velocidade de rotação.



(b) (2) gerador, (12) uniões elásticas, (13) sensor de binário e velocidade de rotação.

Figura C.3: Instalação em regime permanente.

## **Apêndice D**

### **Desenhos técnicos de peças**

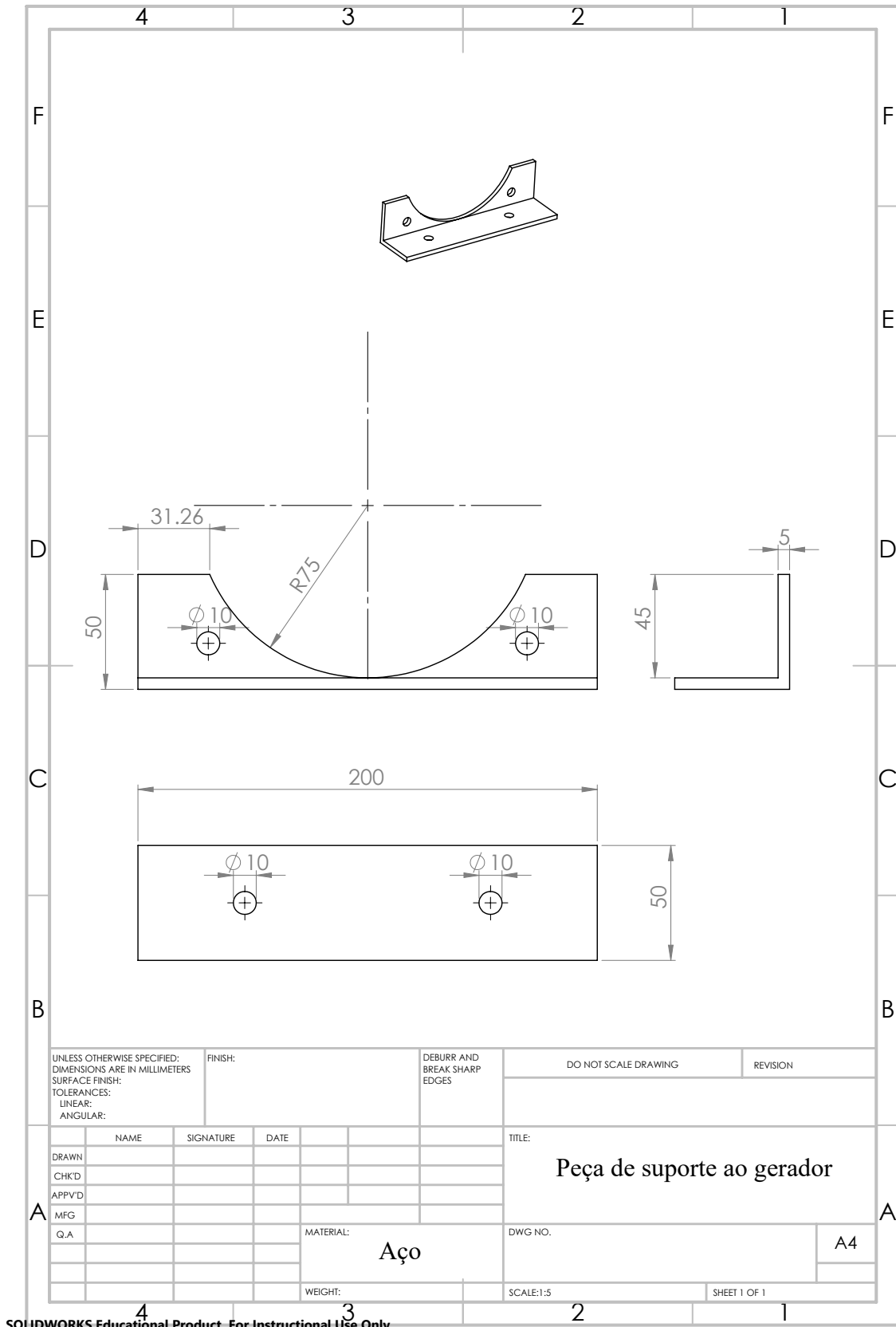
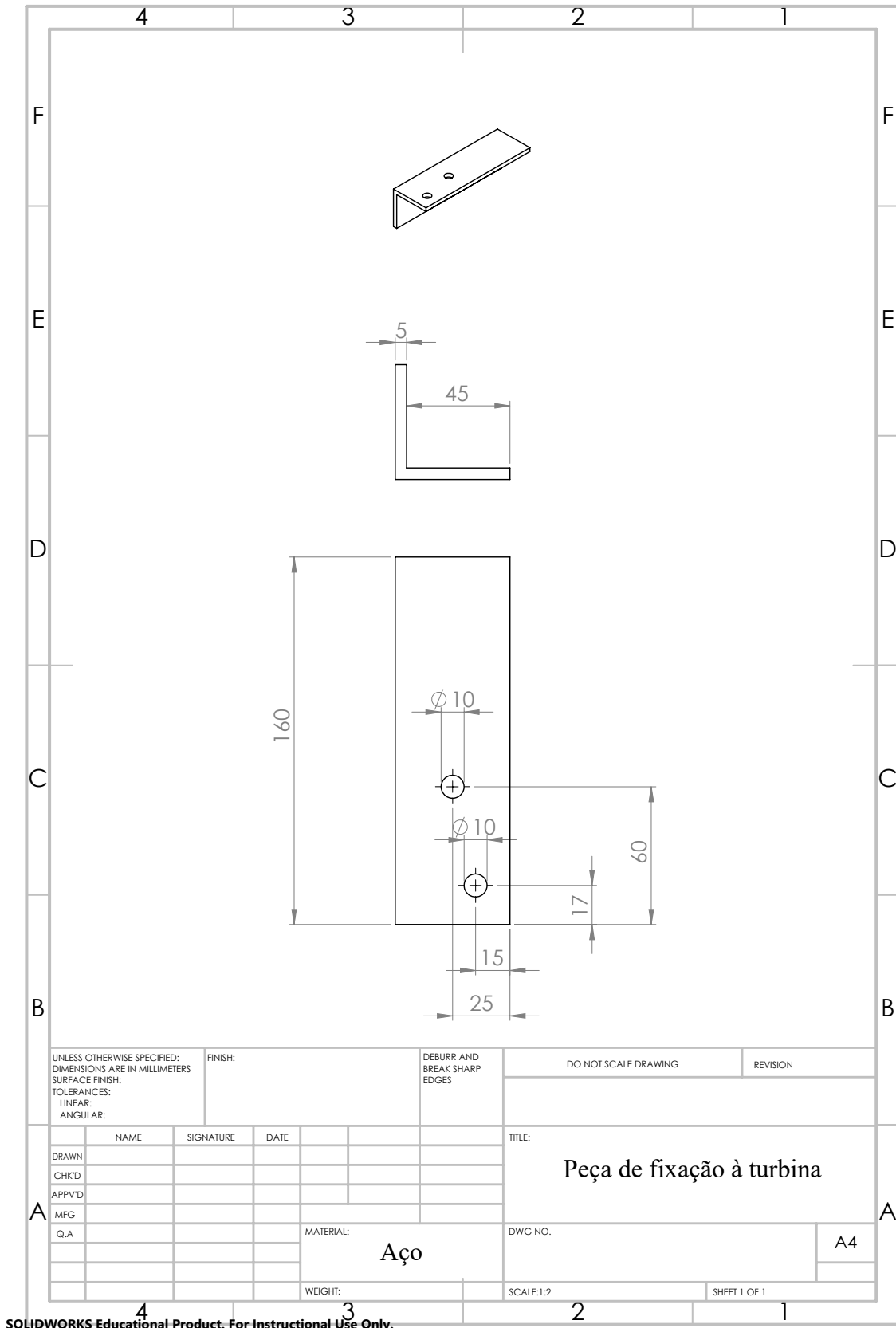


Figura D.1: Desenho técnico da peça de suporte ao gerador I



SOLIDWORKS Educational Product. For Instructional Use Only.

Figura D.2: Desenho técnico da peça de fixação à turbina



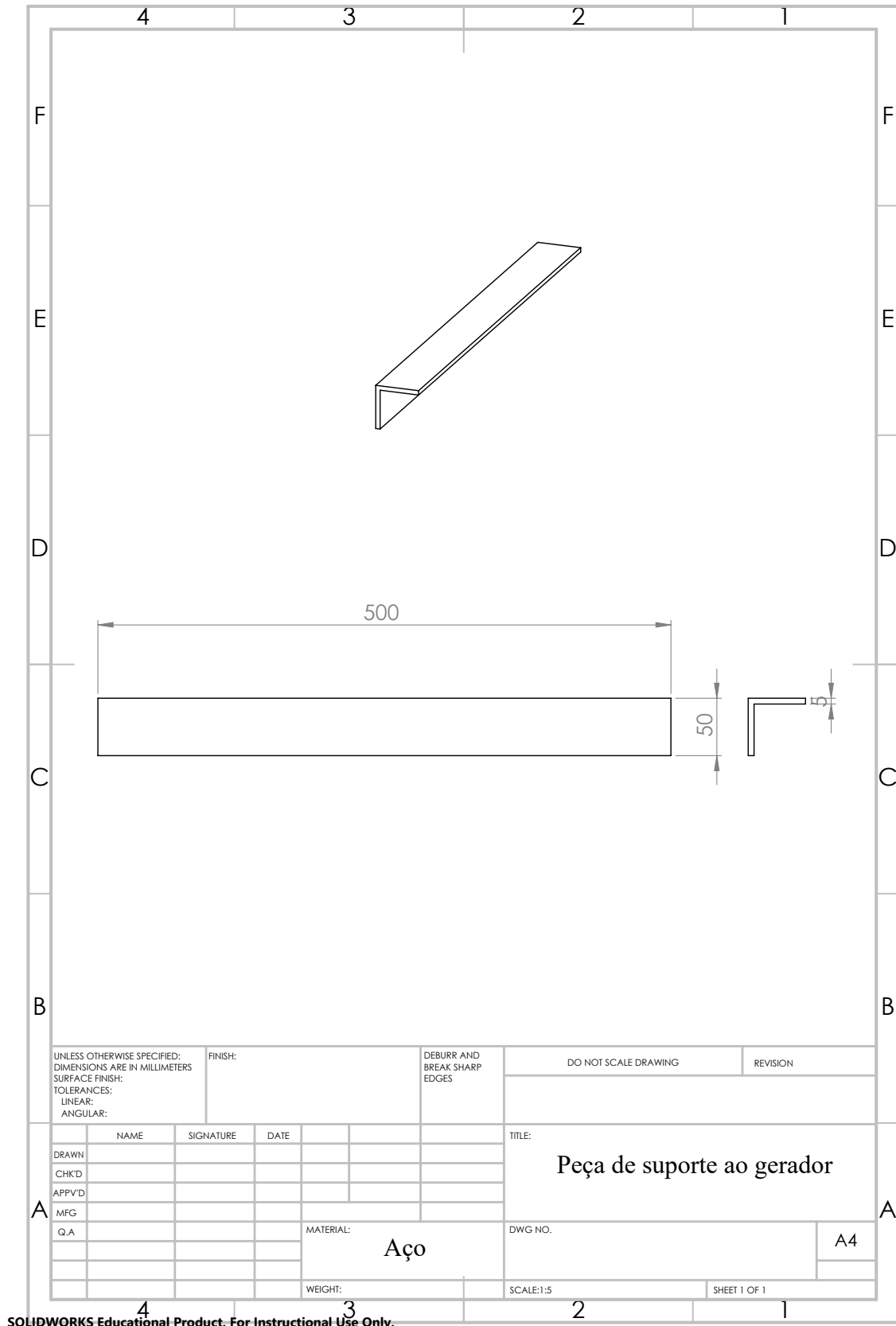


Figura D.3: Desenho técnico da peça de suporte ao gerador II

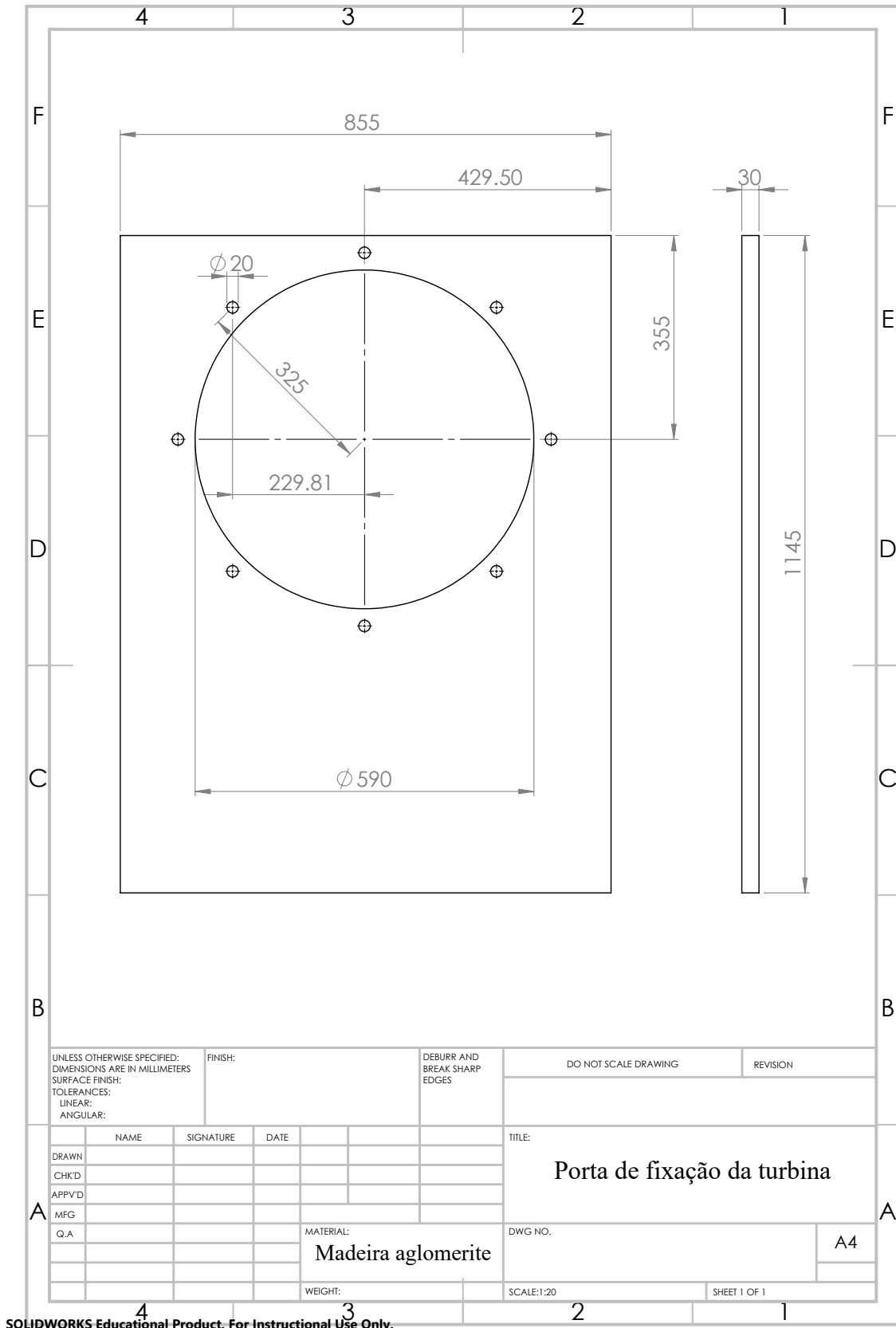


Figura D.4: Desenho técnico da porta de fixação da turbina