

Projeto de simulador de conversor da energia das ondas para plataforma flutuante offshore

JOÃO PEDRO DA SILVA JORGE GONÇALVES
(Licenciado em Engenharia Mecânica)

Trabalho de Projeto para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, na Área de Especialização de Energia, Refrigeração e Climatização

Orientadores:

Doutor Mário José Gonçalves Cavaco Mendes
Doutor José Manuel Ferreira Gaspar

Júri:

Presidente: Doutor André Rui Dantas Carvalho
Vogais:
Doutor Pedro Jorge Borges Fontes Negrão Beirão
Doutor José Manuel Ferreira Gaspar

Projeto de simulador de conversor da energia das ondas para plataforma flutuante offshore

JOÃO PEDRO DA SILVA JORGE GONÇALVES
(Licenciado em Engenharia Mecânica)

Trabalho de Projeto para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, na Área de Especialização de Energia, Refrigeração e Climatização

Orientadores:

Doutor Mário José Gonçalves Cavaco Mendes, ISEL/IPL
Doutor José Manuel Ferreira Gaspar, IST/UL

Júri:

Presidente: Doutor André Rui Dantas Carvalho, ISEL/IPL

Vogais:

Doutor Pedro Jorge Borges Fontes Negrão Beirão, ISEC/IPC
Doutor José Manuel Ferreira Gaspar, IST/UL

Agradecimentos

Gostaria de agradecer aos orientadores doutor Mário Mendes e doutor José Gaspar tanto pelo apoio, experiência e conhecimento fornecidos durante todo o decurso deste trabalho de projeto, como também pela enorme paciência demonstrada perante os momentos mais desafiadores.

Gostaria de agradecer também à minha família por me permitirem seguir o meu percurso académico e por sempre me apoiarem em todas as decisões ao longo destes anos de vida escolar que culminaram neste momento.

Em especial aos meus pais, a quem eu devo tudo o que consegui atingir e quem me tornei, agradeço por todo o amor e apoio que nunca me faltou.

Quero agradecer também à minha namorada, porto seguro perante os momentos mais difíceis deste trabalho, que sempre me motivou e me deu a confiança necessária para finalizar o que tinha começado. A força que me deu para não desistir é incomensurável e sem ela este trabalho não estaria acabado.

Agradecer também ao meu empregador CANALCENTRO SA, à equipa de investigação do CENTEC/IST e à equipa do Núcleo de Oficinas NOF/IST por toda a ajuda prestada.

Este trabalho foi realizado no âmbito do projeto “Sistema de conversão da energia das ondas de geometria variável para plataformas flutuantes.” financiado pela Fundação para a Ciência e a tecnologia (FCT) sob o contrato PTDC/EME-REN/0242/2020.

Declaração de integridade

Declaro que este trabalho de projeto é o resultado da minha investigação pessoal e independente. O seu conteúdo é original e todas as fontes listadas nas referências bibliográficas foram consultadas e estão devidamente mencionadas no texto. Mais declaro que todas as referências científicas e técnicas relevantes para o desenvolvimento do trabalho estão devidamente citadas e constam das referências bibliográficas.

O autor

Assinado por: **João Pedro da Silva Jorge
Gonçalves**

Num. de Identificação: 15333856

Data: 2025.12.28 21:51:17+00'00'

Lisboa, 28 de dezembro de 2025

Projeto de simulador de conversor da energia das ondas para plataforma flutuante offshore

Resumo

Este trabalho de projeto incide no desenvolvimento de um conversor da energia das ondas destinado a ser instalado num modelo experimental de uma plataforma flutuante híbrida *offshore* do tipo semi-submersível.

Este projeto envolveu a conceção, modelação e análise numérica das peças e subconjuntos constituintes do sistema recorrendo ao software *SolidWorks*.

O sistema incorpora um atuador pneumático, responsável por amortecer o movimento induzido pelas forças hidrodinâmicas no flutuador, em conjunto com um mecanismo de braços ajustáveis que assegura a ligação mecânica entre ambos. Para efeitos de validação e ensaio, foi igualmente concebida uma bancada experimental que integra um atuador elétrico capaz de reproduzir as forças exercidas pelo flutuador.

A instrumentação das válvulas pneumáticas que controlam as pressões no atuador é assegurada através da utilização de uma célula de carga e de um sensor de rotação. O atuador elétrico foi igualmente instrumentado com uma célula de carga para medição das forças desenvolvidas. O sistema de controlo foi implementado através da integração de *hardware* (*Speedgoat Real-Time Simulation Machine* (RTSM)) e *software* (*Simulink Real-Time*), permitindo a realização de ensaios em condições próximas das reais e a preparação para simulações em ambiente *Hardware-in-the-Loop* (HIL).

Após a fase de fabrico e montagem, foram conduzidos ensaios experimentais para verificação funcional do sistema. A partir destes testes preliminares, foi possível obter resultados em malha fechada, que serviram de base para a introdução de melhorias e correções ao projeto.

Palavras-chave: Plataforma flutuante híbrida *offshore*, Conversores da energia das ondas, *Hardware-in-the-Loop*

Design of a wave energy converter simulator for a floating offshore platform

Abstract

This project focuses on the development of a wave energy converter (WEC) to be integrated into an experimental model of a hybrid semi-submersible offshore floating platform.

The work involved the design, modelling, and numerical analysis of the system's components and subassemblies, carried out using SolidWorks software.

The proposed system incorporates a pneumatic actuator designed to dampen the motion induced by hydrodynamic forces on the floater, together with an adjustable arm mechanism that ensures the mechanical connection between both elements. For validation and testing purposes, a dedicated test bench was also developed, including an electric actuator capable of reproducing the forces applied by the floater.

The instrumentation of the pneumatic actuator was implemented using a load cell and a rotation sensor, while the electric actuator was also instrumented with a load cell for force measurement. The control system was developed by integrating hardware (*Speedgoat Real-Time Simulation Machine* (RTSM)) and software (*Simulink Real-Time*), enabling experimental testing under near-real conditions and preparation for Hardware-in-the-Loop simulations (HIL).

Following the fabrication and assembly stages, experimental tests were conducted to verify the functional performance of the system. From these preliminary tests, results were obtained in closed loop, which guided the implementation of improvements and adjustments to the project.

Keywords: Hybrid offshore floating platform, Wave energy converters, Hardware-in-the-loop

Lista de Símbolos e Abreviaturas

Alfabeto romano

A_L	Área da câmara inferior do atuador pneumático
A_U	Área da câmara superior do atuador pneumático
B	Coefficiente de amortecimento
c_{ref}	Coefficiente de amortecimento de referência
$e(t)$	Erro calculado
F_{ref}	Força de referência
F_{real}	Força medida
K	Coefficiente de rigidez
K_{CC}	Ganho da célula de carga
K_{SR}	Ganho do sensor de rotação
K_{SP}	Ganho do sensor de pressão da válvula
\overline{OA}	Distância entre o eixo de rotação e a ligação ao atuador do braço
$P(t)$	Pressão medida pelo sensor de pressão
P_{AVG}	Pressão média
$Range$	Amplitude de medição do sensor
T_s	Tempo de amostragem
$U(t)$	Resposta em tensão do sensor
$u(t)$	Sinal de comando do sistema
\dot{x}	Velocidade linear do atuador pneumático
\dot{z}	Velocidade linear do flutuador
z	Posição do flutuador

Alfabeto grego

ΔP	Diferencial de pressão de comando
ΔF_{amort}	Diferencial de força de comando
$\theta(t)$	Ângulo dos braços ao longo do
$\dot{\theta}(t)$	tempo Velocidade angular dos braços
λ	Fator de escala

Abreviaturas

AWS	Archimedes Wave Swing
CENTEC	Centro de Engenharia e Tecnologia Naval e Oceânica
DGEG	Direção-Geral de Energia e Geologia
EDGAR	<i>Emissions Database for Global Atmospheric Research</i>
FDM	<i>Fused Deposition Modeling</i>
FPGA	<i>Field-Programmable Gate Array</i>
HDL	<i>Hardware Description Language</i>
HIL	<i>Hardware-in-the-Loop</i>
IST	Instituto Superior Técnico
MPC	<i>Model Predictive Control</i>
NOF	Núcleo de Oficinas
OWC	<i>Oscillating Wace Column</i>
PID	Proporcional, Integrativo e Derivativo
PLA	<i>Polylactic Acid</i>
PTO	<i>Power-Take-Off</i>
RCP	<i>Rapid Control Prototyping</i>
RNBC	Roteiro Nacional de Baixo Carbono
TFM	Trabalho Final de Mestrado
TLP	<i>Tension Leg Platform</i>
UE	União Europeia
WEC	<i>Wave Energy Converter</i>

Índice

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	ENQUADRAMENTO.....	1
1.2	MOTIVAÇÕES E OBJETIVOS	3
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	3
2	ESTADO DA ARTE	5
2.1	TIPOS DE FUNDAÇÕES DAS TURBINAS EÓLICAS.....	5
2.1.1	<i>Fundações fixas</i>	5
2.1.2	<i>Fundações flutuantes</i>	6
2.1.3	<i>Parques eólicos offshore em funcionamento</i>	7
2.2	CONVERSORES DA ENERGIA DAS ONDAS.....	8
2.2.1	<i>Atenuadores</i>	8
2.2.2	<i>Absorvedor Pontual</i>	8
2.2.3	<i>Galgamento</i>	9
2.2.4	<i>Coluna de água oscilante</i>	9
2.2.5	<i>Oscilantes</i>	9
2.2.6	<i>Exemplos reais de conversores da energia das ondas</i>	10
2.3	CONTROLO EM CONVERSORES DA ENERGIA DAS ONDAS	11
2.3.1	<i>Controlo Resistivo</i>	11
2.3.2	<i>Controlo Reativo</i>	11
2.3.3	<i>Controlo por Latching</i>	12
2.3.4	<i>Controlo Preditivo Baseado em Modelos (MPC)</i>	12
2.3.5	<i>Controlo Aprendizagem por Reforço (RL)</i>	13
2.4	PLATAFORMAS HÍBRIDAS.....	13
2.4.1	<i>Eólica-Galgamento</i>	14
2.4.2	<i>Eólica-OWC</i>	14
2.4.3	<i>Eólica-Absorvedor Pontual</i>	15
2.5	MODELOS EXPERIMENTAIS DE PLATAFORMAS HÍBRIDAS	15
2.6	DESAFIOS ATUAIS DAS PLATAFORMAS HÍBRIDAS.....	16
3	IMPLEMENTAÇÃO	17
3.1	OBJETIVOS DOS SISTEMAS.....	18
3.2	MODELO EXPERIMENTAL À ESCALA	18
3.2.1	<i>Plataforma à escala</i>	19
3.2.2	<i>Casquilhos Auto-Lubrificantes</i>	19
3.2.3	<i>Atuador Pneumático (PTO)</i>	20
3.2.4	<i>Braços oscilantes (Interior e Exterior)</i>	23
3.2.5	<i>Flutuador (Boia)</i>	28

3.3	BANCADA DE TESTES.....	29
3.3.1	<i>Estrutura Base</i>	29
3.3.2	<i>Ligação dos atuadores à estrutura</i>	30
3.3.3	<i>Ligação do atuador elétrico aos braços</i>	32
3.3.4	<i>Ligação do atuador elétrico aos braços</i>	33
3.4	INTEGRAÇÃO E AJUSTAMENTO DOS COMPONENTES.....	33
4	CONTROLO	43
4.1	CONTROLADOR	44
4.2	CONTROLO DO ATUADOR ELÉTRICO	46
4.3	CONTROLO DO ATUADOR PNEUMÁTICO.....	49
5	TESTES E RESULTADOS EXPERIMENTAIS	55
5.1	ENSAIOS DO SENSOR DE ROTAÇÃO	55
5.2	ENSAIOS DO PTO	56
5.3	DISCUSSÃO DE RESULTADOS.....	59
6	CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO	61
6.1	CONCLUSÕES	61
6.2	TRABALHO FUTURO.....	62
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63
	APÊNDICE A	71
	ANEXO A	85

Índice de figuras

FIGURA 2.1 – FUNDAÇÕES FIXAS: (A) BASE GRAVÍTICA OU CAIXA DE SUÇÃO (B) MONOCOLONA (C) TRIPÉ (D) <i>JACKET FRAME</i> . ADAPTADO DE [16].	5
FIGURA 2.2 – FUNDAÇÕES FLUTUANTES: (A) SEMI-SUBMERSÍVEIS (B) <i>SPAR</i> (C) <i>BARGE</i> (D) TLP. ADAPTADO DE [19].	6
FIGURA 2.3 – WEC DO TIPO ATENUADOR DA ENERGIA DAS ONDAS. ADAPTADO DE [31].	8
FIGURA 2.4 – WEC DO TIPO ABSORSOR PONTUAL (<i>WAVE STAR</i>). ADAPTADO DE [32].	8
FIGURA 2.5 – WEC DO TIPO SOBRE-ELEVAÇÃO DE ONDAS (<i>WAVE DRAGON</i>). ADAPTADO DE [33].	9
FIGURA 2.6 – WEC DO TIPO COLUNA DE ÁGUA OSCILANTE (<i>OWC</i>). ADAPTADO DE [34].	9
FIGURA 2.7 – WEC DO TIPO ONDAS OSCILANTES. ADAPTADO DE [35].	10
FIGURA 2.8 – GRAUS DE LIBERDADE DE UMA PLATAFORMA FLUTUANTE. ADAPTADO DE [49].	14
FIGURA 3.1 – WECs APLICADO A UMA PLATAFORMA FLUTUANTE SEMI-SUBMERSÍVEL.	17
FIGURA 3.2 – BANCADA DE TESTES PARA O WEC.	17
FIGURA 3.3 – SUBSISTEMAS INTEGRANTES DA PLATAFORMA EXPERIMENTAL.	18
FIGURA 3.4 – PLATAFORMA BASE À ESCALA DE 1:70 DESENVOLVIDA PELO CENTEC/IST.	19
FIGURA 3.5 – CASQUILHOS AUTOLUBRIFICANTES IGUS. ADAPTADO DE [59].	20
FIGURA 3.6 – BASES INFERIOR E SUPERIOR.	20
FIGURA 3.7 – APOIO DO ATUADOR PNEUMÁTICO.	21
FIGURA 3.8 – CONJUNTO PNEUMÁTICO COMPLETO.	21
FIGURA 3.9 – GUIA DE ALINHAMENTO E VARÃO DE APERTO.	22
FIGURA 3.10 – LIGAÇÃO DA CÉLULA DE CARGA.	22
FIGURA 3.11 – MONTAGEM DA CÉLULA DE CARGA E LIGAÇÕES AOS BRAÇOS.	23
FIGURA 3.12 – BRAÇOS DE FABRICO EM METAL.	23
FIGURA 3.13 – BRAÇOS DE FABRICO EM IMPRESSÃO 3D.	24
FIGURA 3.14 – SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO BRAÇO EXTERIOR SÓLIDO. ANÁLISE AO DESLOCAMENTO RESULTANTE AO SER APLICADA UMA FORÇA DE 20 kN.	24
FIGURA 3.15 – SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO BRAÇO EXTERIOR COM TRELIÇAS. ANÁLISE AO DESLOCAMENTO RESULTANTE AO SER APLICADA UMA FORÇA DE 20 kN.	24
FIGURA 3.16 – SUBSISTEMA DOS BRAÇOS OSCILANTES.	25
FIGURA 3.17 – APERTO DOS BRAÇOS E AJUSTE DE ÂNGULO.	25
FIGURA 3.18 – AMPLITUDES MÁXIMA E MÍNIMA DO TUBO MANUALMENTE AJUSTÁVEL.	26
FIGURA 3.19 – LIGAÇÃO DO FLUTUADOR.	26
FIGURA 3.20 – VEIO DE TRANSMISSÃO DE ÂNGULO.	27
FIGURA 3.21 – LIGAÇÃO DO VEIO AOS BRAÇOS E APOIO DO SENSOR DE ROTAÇÃO.	27
FIGURA 3.22 – ALTERAÇÕES À PLATAFORMA FLUTUANTE.	28
FIGURA 3.23 – TIPOS DE FLUTUADORES. (A) #1 – CILÍNDRICO (B) #2 – TOROIDAL (C) #3 – CÓNICO.	28
FIGURA 3.24 – SUBSISTEMAS DA BANCADA DE TESTES.	29
FIGURA 3.25 – ESTRUTURA BASE DA BANCADA DE TESTES.	30
FIGURA 3.26 – FIXAÇÃO DO TUBO CENTRAL À BANCADA.	30

FIGURA 3.27 – APOIO DO ATUADOR ELÉTRICO À BANCADA.	31
FIGURA 3.28 – APOIO DO ATUADOR PNEUMÁTICO À BANCADA.....	31
FIGURA 3.29 – GAIOLAS DE PROTEÇÃO DOS ATUADORES.	32
FIGURA 3.30 – LIGAÇÃO DO ATUADOR ELÉTRICO AOS BRAÇOS.	32
FIGURA 3.31 – MODIFICAÇÕES AO SISTEMA DE FIXAÇÃO DO ATUADOR ELÉTRICO.....	33
FIGURA 3.32 – FABRICAÇÃO DA PLATAFORMA À ESCALA.....	34
FIGURA 3.33 – PORMENORES DA PLATAFORMA À ESCALA 1:70.	34
FIGURA 3.34 – FABRICAÇÃO DA BASE INFERIOR E APERTO.....	34
FIGURA 3.35 – PEÇAS REALIZADAS POR IMPRESSÃO 3D.....	35
FIGURA 3.36 – PORMENOR DE <i>INSERTS</i> INTRODUZIDOS NAS PEÇAS IMPRESSAS.....	35
FIGURA 3.37 – MONTAGEM DA ESTRUTURA DA BANCADA DE TESTES.	36
FIGURA 3.38 – BANCADA DE TESTES FINAL.....	36
FIGURA 3.39 – NÍVEL UTILIZADO PARA NIVELAR A ESTRUTURA DA BANCADA DE TESTES.	36
FIGURA 3.40 – SENSOR DE ROTAÇÃO INTEGRADO NA BANCADA DE TESTES.	37
FIGURA 3.41 – BRAÇOS EXTERIOR E INTERIOR INTEGRADOS NA BANCADA DE TESTES.	37
FIGURA 3.42 – LIGAÇÃO ENTRE O BRAÇO EXTERIOR E O ATUADOR ELÉTRICO.	37
FIGURA 3.43 – COMPRESSOR DE AR COM PRESSÃO REGULÁVEL.	38
FIGURA 3.44 – CIRCUITO PNEUMÁTICO.....	38
FIGURA 3.45 – VÁLVULAS DE CORTE E REGULADORA DE PRESSÃO PNEUMÁTICA.	38
FIGURA 3.46 – LIGAÇÃO PNEUMÁTICA AO ATUADOR PNEUMÁTICO.....	39
FIGURA 3.47 – COMPONENTES ELETRÓNICOS INTEGRADOS NA BANCADA DE TESTES.....	39
FIGURA 3.48 – LIGAÇÕES ELÉTRICAS AO MÓDULO DE ENTRADAS/SAÍDAS DO CONTROLADOR.....	39
FIGURA 3.49 – CALHA UTILIZADA PARA ARRUMAÇÃO DE CABOS ELÉTRICOS.	40
FIGURA 3.50 – LIGAÇÃO TERRA À ESTRUTURA METÁLICA DA BANCADA DE TESTES.	40
FIGURA 3.51 – <i>BREADBOARD</i> PARA LIGAÇÃO DAS VÁLVULAS PNEUMÁTICAS.	40
FIGURA 3.52 – ESTRUTURA A INTEGRAR NO INTERIOR DA COLUNA LATERAL DA PLATAFORMA FLUTUANTE. ESTA ESTRUTURA INTEGRA O SISTEMA TESTADO NA BANCADA DE TESTES DO WEC.	41
FIGURA 4.1 – SUBSISTEMA REFERENTE AOS BLOCOS DE CONFIGURAÇÃO DE <i>SPEEDGOAT</i>	44
FIGURA 4.2 – MAPA DE LIGAÇÕES DA CARTA ANALÓGICA DO IO324 DA <i>SPEEDGOAT</i>	45
FIGURA 4.3 – MALHA DE CONTROLO PARA O ATUADOR ELÉTRICO. LEGENDA: (F_{REF}) FORÇA DE EXCITAÇÃO DA ONDA DE REFERÊNCIA, (F_{REAL}) FORÇA DE EXCITAÇÃO DA ONDA MEDIDA, ($E(T)$) ERRO MEDIDO EM TEMPO REAL E ($U(T)$) SINAL PROCESSADO PELO CONTROLADOR PID.....	46
FIGURA 4.4 – SUBSISTEMA ADAPTADO DO FICHEIRO <i>FWAVE_10_LOOKUP_TABLES.SLX</i> PARA CRIAÇÃO DE PERFIL DE FORÇA DE EXCITAÇÃO DA ONDA DE REFERÊNCIA. ADAPTADO DE [65].	46
FIGURA 4.5 – MALHA DE CONTROLO DO ATUADOR ELÉTRICO.....	47
FIGURA 4.6 – OPÇÕES DE CONTROLO DO ATUADOR ELÉTRICO.....	47
FIGURA 4.7 – TRATAMENTO DE SINAL DAS CÉLULAS DE CARGA.....	48
FIGURA 4.8 – CONTROLADOR PID APLICADO EM AMBIENTE <i>SIMULINK</i> . LEGENDA: (K_P) GANHO PROPORCIONAL, (K_I) GANHO INTEGRAL, (K_D) GANHO DERIVATIVO, (T_s) TEMPO DE AMOSTRAGEM.....	48

FIGURA 4.9 – MALHA DE CONTROLO DAS VÁLVULAS PNEUMÁTICAS. LEGENDA: (F_{REF}) FORÇA DE AMORTECIMENTO DE REFERÊNCIA, (F_{REAL}) FORÇA DE AMORTECIMENTO MEDIDA, ($E(t)$) ERRO MEDIDO EM TEMPO REAL E ($U(t)$) SINAL PROCESSADO PELO CONTROLADOR PID.	49
FIGURA 4.10 – TRATAMENTO DO SINAL DO SENSOR DE ROTAÇÃO.	49
FIGURA 4.11 – CÁLCULO DA VELOCIDADE LINEAR DO ATUADOR PNEUMÁTICO.	50
FIGURA 4.12 – CÁLCULO DA FORÇA NO ATUADOR PNEUMÁTICO ATRAVÉS DAS PRESSÕES.	51
FIGURA 4.13 – CÁLCULO DAS ÁREAS DO ATUADOR PNEUMÁTICO.	51
FIGURA 4.14 – TRATAMENTO DE SINAL DOS SENSORES DE PRESSÃO.	51
FIGURA 4.15 – MALHA DE CONTROLO DAS VÁLVULAS PNEUMÁTICAS APLICADO EM AMBIENTE <i>SIMULINK</i>	52
FIGURA 4.16 – SUBSISTEMA PARA CÁLCULO DA PRESSÃO DE COMANDO PARA AS VÁLVULAS PNEUMÁTICAS.	53
FIGURA 4.17 – OPÇÕES DE CONTROLO DAS VÁLVULAS PNEUMÁTICAS.	53
FIGURA 5.1 – FILTRO DE MEDIANA APLICADO AO SINAL DO SENSOR DE ROTAÇÃO EM AMBIENTE <i>SIMULINK</i>	55
FIGURA 5.2 – ENSAIO À PTO ATRAVÉS DA UTILIZAÇÃO DE UMA SEQUÊNCIA DE DEGRAUS DE FORÇA DE AMORTECIMENTO DE REFERÊNCIA.	56
FIGURA 5.3 – ENSAIO DINÂMICO À PTO ($C_{REF} = 150 \text{ N.s/m} / P_{AVG} = 1,5 \text{ BAR}$): (A) APENAS UMA CÂMARA; (B) AMBAS AS CÂMARAS.	57
FIGURA 5.4 – ENSAIO DINÂMICO À PTO ($C_{REF} = 150 \text{ N.s/m} / P_{AVG} = 0,5 \text{ BAR} / \text{AMBAS AS CÂMARAS}$).	57
FIGURA 5.5 – ENSAIO DINÂMICO À PTO ($C_{REF} = 75 \text{ N.s/m} / P_{AVG} = 0,5 \text{ BAR} / \text{AMBAS AS CÂMARAS}$).	58
FIGURA 5.6 – ENSAIO DINÂMICO À PTO ($C_{REF} = 18 \text{ N.s/m} / P_{AVG} = 0,75 \text{ BAR}$): (A) APENAS UMA CÂMARA; (B) AMBAS AS CÂMARAS.	58
FIGURA 5.7 – ENSAIO DINÂMICO À PTO ($C_{REF} = 18 \text{ N.s/m} / P_{AVG} = 1,5 \text{ BAR} / \text{AMBAS AS CÂMARAS}$).	59
FIGURA 5.8 – INTEGRAÇÃO DE SENSORES DIFERENCIAIS DE PRESSÃO NA BANCADA.	60
FIGURA 5.9 – DANOS NA TUBAGEM DE LIGAÇÃO AOS SENSORES DIFERENCIAIS DE PRESSÃO.	60

Índice de tabelas

TABELA 2.1 – EXEMPLOS DE APLICAÇÕES REAIS DOS DIFERENTES TIPOS DE FUNDAÇÕES DE TURBINAS EÓLICAS <i>OFFSHORE</i>	7
TABELA 3.1 – DIMENSÕES DOS FLUTUADORES.	29
TABELA 4.1 – ENTRADAS ANALÓGICAS UTILIZADOS PELO MODELO.	45
TABELA 4.2 – SAÍDAS ANALÓGICAS UTILIZADOS PELO MODELO.	45
TABELA 5.1 – PARÂMETROS FINAIS DO CONTROLADOR DAS VÁLVULAS PNEUMÁTICAS.	56

1 Introdução

1.1 Enquadramento

Segundo o *Emissions Database for Global Atmospheric Research* (EDGAR), em 2023, verificou-se um aumento de 1,9% na emissão de gases com efeito de estufa em relação a 2022 [1]. O combate à crise climática, aliado à pressão que as diretivas ambientais da União Europeia (UE) impõem, obrigam a um investimento na transição energética.

Portugal tem realizado grandes avanços neste sentido, ao retirar de operação as suas centrais térmicas e ao investir na construção e desenvolvimento de parques energéticos com recurso a energia renovável. Os resultados, segundo o *Eurostat*, no ano de 2022 são de 34,7% da energia bruta final consumida a nível nacional proveniente de fontes renováveis, sendo o 4º país com maior quota de eletricidade proveniente de fontes renováveis (61,0%) [2].

No entanto, aplicadas as diretrizes e objetivos climáticos atualmente definidos através dos vários protocolos realizados, a previsão para o valor médio da temperatura global supera o máximo estabelecido de 1,5 °C, podendo situar-se bem acima dos 2 °C [3].

Em Portugal, a transição energética está a ser impulsionada através de um forte investimento em fontes de energia renovável, com o objetivo de alcançar 80% na produção de eletricidade e 47% no consumo final bruto de energia proveniente de fontes renováveis até 2030, conforme indicado pela Direção Geral de Energia e Geologia (DGEG) em 2023 [2].

Não só os efeitos da emissão de gases com efeito de estufa pelo ser humano como também o crescimento acelerado tanto económico como social estão a levar a uma maior procura por fontes de energia renováveis que possam substituir as formas tradicionais de geração de energia e aumentar de forma significativa a produção energética global de forma a colmatar as necessidades energéticas mundiais [4].

De acordo com o *Global Wind Report 2025*, a indústria eólica *onshore* instalou um recorde de 117 GW de nova capacidade globalmente. O relatório também destaca que no final de 2024 a capacidade instalada total de energia eólica ultrapassou o 1 TW, prevendo mais 1 TW de capacidade instalada até 2023 [5]. Apesar do seu ponto de

custos reduzidos em relação ao potencial de produção energético que oferece, existem limitações no seu desenvolvimento, como o seu potencial energético e tamanho máximos como o perfil de ventos existente no continente. A solução que permite ultrapassar estas barreiras é a energia eólica *offshore*, que permite a utilização de turbinas com maior envergadura e perfis de ventos mais favoráveis à produção energética [6].

Atualmente, o projeto *WindFloat Atlantic*, o primeiro parque do mundo a utilizar plataformas flutuantes semi submersíveis, está a superar todas as expectativas previstas, atingindo a produção energética de 80 GWh de eletricidade no ano de 2023 [2]. Situado na costa ao largo de Viana do Castelo em Portugal e ancorado a 100 metros de profundidade, este é constituído por três plataformas, cada uma com uma turbina *Vestas V164* com uma potência de 8,4 MW [7].

Ainda em Portugal, o principal projeto de implementação de parques *offshore* de energia eólica está a avançar rapidamente. As metas definidas pelas diretivas ambientais da UE obrigam a grandes avanços em termos de neutralidade carbónica, sendo esta uma grande alternativa para produção elétrica. Este projeto consiste na criação de várias áreas *offshore* para parques eólicos, totalizando uma previsão de 10 GW de potência produzida. Numa primeira fase, inicialmente previsto para o ano de 2023, seria lançado um leilão energético que contabilizaria três áreas iniciais num total de 3,5 GW de produção, sendo estas Viana do Castelo com 1 GW, Leixões com 500 MW e ainda Figueira da Foz com 2 GW. As restantes áreas, ou seja, Ericeira, Sintra-Cascais e Sines, estarão integradas num leilão que será realizado previsivelmente em 2030, perfazendo então os 10 GW previstos [8].

Por outro lado, apesar de menos popular e ainda subdesenvolvida, a conversão de energia das ondas surge como uma oportunidade de produção energética a um ritmo constante e que contribui para a diversificação da matriz energética. O Roteiro Nacional de Baixo Carbono (RNBC) de 2050 reconhece o enorme potencial desta tecnologia, apesar do progresso em projetos comerciais ser ainda algo limitado. Até agora, a instalação de WECs (*Wave Energy Converters*) tem avançado apenas de forma experimental, com diversos projetos-piloto em funcionamento [9].

A combinação da experiência *offshore* com a sua longa linha costeira e padrões de ondas favoráveis posiciona Portugal como um possível líder na exploração da energia das ondas na Europa [10].

Em Portugal irá estar implementado um projeto piloto da UE, denominado por EU-SCORES. Nas várias ações deste projeto, a aplicação em Portugal inclui a instalação de uma frota de 4 WECs da *CorPower Ocean*, totalizando 1,2 MW, colocados e ligados à rede do local de testes em Aguçadoura. Estes estarão interligados às plataformas *offshore* já existentes no local de testes, utilizando assim a mesma rede energética de ligação que as plataformas já existentes no local [11].

1.2 Motivações e Objetivos

A motivação deste trabalho surge no desenvolvimento desta tecnologia híbrida de forma a promover ainda mais a transição energética urgente ao tornar esta tecnologia mais robusta e funcional, confirmando a sua utilidade e validade na indústria energética *offshore*. A integração de WECs em turbinas eólicas *offshore* flutuantes tem como objetivo uma maior estabilidade na plataforma, diminuindo assim a presença de movimentos não desejados na *nacelle*, o que aumenta a sua eficiência e a sua vida útil e possibilita a instalação de turbinas de maior envergadura.

O objetivo do presente trabalho de projeto é o desenvolvimento de um WEC integrado numa plataforma *offshore* flutuante à escala de 1:70, sujeita a testes em tanques de ondas, assim como todo o controlo necessário de forma a criar um sistema capaz de responder às solicitações pretendidas. Este sistema é instalado numa primeira fase numa bancada de testes, de forma a realizar testes a seco através da metodologia *Hardware In the Loop* (HIL).

1.3 Estrutura do trabalho

A estrutura do presente trabalho de projeto assenta em seis capítulos.

O capítulo 1 apresenta o enquadramento deste trabalho de projeto, assim como as motivações e os principais objetivos deste.

No capítulo 2 é realizada uma análise do estado da arte, onde são descritos os tipos de fundações de turbinas eólicas e os tipos de WECs, e de seguida é realizada uma análise às plataformas híbridas e os seus casos reais e possíveis.

No capítulo 3 é apresentada a modelação de componentes a integrar no modelo experimental à escala, abrangendo a integração dos atuadores pneumáticos e os braços ajustáveis que ligam os atuadores aos flutuadores instalados nas suas extremidades. Este capítulo apresenta também a modelação dos componentes que possibilitem testes em bancada utilizando a metodologia HIL e que simulem as condições reais do modelo experimental, principalmente o desenvolvimento da bancada de testes utilizando perfis normalizados de alumínio extrudido e de vários adaptadores e acessórios desenvolvidos, construídos e testados para o efeito.

No capítulo 4 é descrito o desenvolvimento do controlo do sistema e a integração do *hardware* com as necessidades do *software*.

No capítulo 5 são descritos os testes e ensaios realizados no decorrer do projeto, assim como os seus resultados devidamente comentados.

No capítulo 6 são apresentadas as conclusões provenientes deste trabalho de projeto, assim como o trabalho futuro possível referente ao mesmo.

2 Estado da arte

2.1 Tipos de fundações das turbinas eólicas

As turbinas eólicas podem ser instaladas tanto em terra (*onshore*) como no mar (*offshore*). Os sistemas de energia eólica *offshore* possibilitam a utilização de turbinas de maior potência, uma vez que as velocidades do vento em ambiente marítimo tendem a ser superiores e mais constantes quando comparadas com as registadas em terra [12]. A ausência de rugosidade da superfície marítima aliada à uniformidade das condições atmosféricas, contribui para um desempenho mais eficiente do equipamento. As turbinas eólicas *offshore* podem ser instaladas em fundações fixas ou flutuantes. A escolha do tipo de fundação depende de múltiplos fatores, nomeadamente as características geotécnicas do terreno, a profundidade de instalação, as condições ambientais e o custo associado à construção e manutenção [13].

2.1.1 Fundações fixas

Atualmente, as fundações fixas representam a maioria das instalações [14,15]. Este tipo de fundação caracteriza-se pela ligação rígida da plataforma ao leito marinho, sendo geralmente utilizada em zonas de baixa profundidade (até 50 m) e próximas da costa (até 50 km). A Figura 2.1 ilustra alguns dos tipos de fundações fixas existentes.

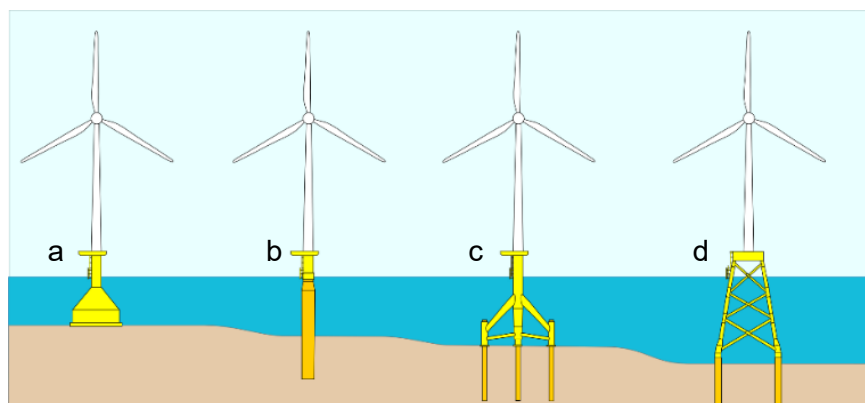


Figura 2.1 – Fundações fixas: (a) Base Gravítica ou Caixa de Sucção (b) Monocoluna (c) Tripé (d) *Jacket Frame*. Adaptado de [16].

A estrutura do tipo “Base Gravítica” depende do peso de uma base de betão para contrabalançar os momentos e forças exercidas na estrutura, sem qualquer tipo de ancoragem. Geralmente utilizadas em águas muito pouco profundas, estas necessitam de fundos marítimos regulares para a sua colocação [17]. A fixação do tipo “Caixa de Sucção” consiste numa estrutura oca com uma abertura na sua parte inferior, de onde se retira a água e depósitos de forma a criar uma pressão negativa que fixe a estrutura ao fundo marítimo. Ideais para solos arenosos e baixas profundidades, apresentam um baixo impacto ambiental e custos e prazos de instalação reduzidos [14]. Na estrutura do tipo “Monocoluna” utilizam-se uma estaca vertical, cravada no fundo marítimo. A sua simplicidade de projeto e facilidade e rapidez de instalação fazem com que contribuam em aproximadamente 80% das estruturas de fixação *offshore* utilizadas na Europa. A estrutura do tipo “Tripé” consiste numa base de três pernas equilaterais conectadas a um pilar central. A sua arquitetura permite uma distribuição uniforme dos esforços causados pelo vento ou pelas ondas. Apesar de leves e estáveis, as suas dimensões elevadas dificultam a sua instalação com como os seus custos de instalação. Por fim, a fixação do tipo “*Jacket Frame*” consiste em torres com treliças, que permitem a distribuição eficiente dos esforços exercidos na estrutura. Utilizadas em águas mais profundas, estas são contruídas em estaleiro e depois transportadas para o local de ancoragem [17].

2.1.2 Fundações flutuantes

As fundações flutuantes distinguem-se pela ausência de uma ligação rígida ao fundo marinho. Esta característica confere-lhes uma maior flexibilidade em termos de instalação, tornando o custo de implementação menos dependente da profundidade do local de ancoragem. Consequentemente, este tipo de solução permite a instalação de turbinas com potências nominais mais elevadas [18].

Na Figura 2.2 pode-se observar os tipos mais comuns de sistemas flutuantes, entre elas as estabilizadas por flutuação (como as Semi-Submersíveis ou as *Barge*), por lastro (como as *Spar*) ou ainda por amarração (como as *Tension Leg Platform*) [17].

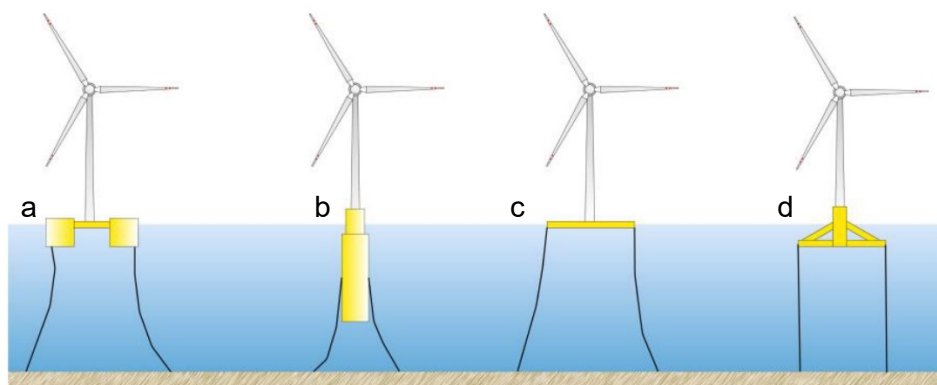


Figura 2.2 – Fundações Flutuantes: (a) Semi-submersíveis (b) *Spar* (c) *Barge* (d) TLP.

Adaptado de [19].

As estruturas semi-submersíveis são constituídas por uma estrutura flutuante, ancorada ao fundo marítimo, que se encontra parcialmente submersa. Apesar de mais adaptável a várias profundidades de água, este tipo de fundação sofre maiores solicitações dinâmicas que outras, sofrendo também de ciclos de fadiga mais elevados. As estruturas *Spar* apresentam-se como uma coluna flutuante vertical, ancorada através de linhas catenárias. Projetada para que o seu centro de gravidade esteja abaixo do ponto de flutuação, permitindo a sua estabilidade relativamente à ondulação, são bastante estáveis no seu movimento vertical quando comparadas com as restantes. A estrutura *Barge* é constituída por uma plataforma flutuante ancorada ao fundo marítimo. Apesar dos seus custos reduzidos de construção devido à sua simplicidade e desenvolvimento atual, esta não possui grandes capacidades de estabilidade quando instalada, principalmente em condições mais adversas. As fundações *Tension Leg Platform* (TLP) consistem numa coluna central conectada a uma estrutura com pontos de fixação de modo a ancorar cabos pré tensionadas ao seio marítimo. O seu método de ancoragem complexo torna os custos de instalação elevados e também faz com que seja sensível a mudanças na maré [17].

2.1.3 Parques eólicos offshore em funcionamento

Na tabela 2.1 podem-se observar alguns dos parques eólicos em funcionamento atualmente e as suas especificações.

Tabela 2.1 – Exemplos de aplicações reais dos diferentes tipos de fundações de turbinas eólicas *offshore*.

Tipologia	Nome	Localização	Turbinas Instaladas	Potência Total	Ano
Base gravítica	Tunø Knob [20]	Tunø, Dinamarca	10 Vestas	5,0 MW	1995
Caixa de Sucção	Jiangsu Xiangshui [21]	Jiangsu, China	55	202 MW	2016
Monopile	Greater Gabbard [22]	Suffolk, Inglaterra	140 Vestas	504 MW	2012
Tripod	Alpha Ventus [23]	Borkum, Alemanha	6 Adwen 6 Senvion	60 MW	2009
Jacket-frame	Moray East [24]	Moray Firth, Reino Unido	100 Vestas	950 MW	2022
Spar	HyWind Tampen [25]	Bergen, Noruega	11 Siemens	88 MW	2022
TLP	Provence Grand Large [26]	Marseille, França	3 Siemens	25 MW	2023
Barge	EolMed [27]	Gruissan, França	3 Vestas	30 MW	2025
Semi-subm.	WindFloat Atlantic [28]	Viana do Castelo, Portugal	3 Vestas	25 MW	2020

2.2 Conversores da energia das ondas

Os WECs convertem a energia cinética da ondulação do mar em energia elétrica através do movimento relativo entre o conversor, que interage com o movimento da onda, e o sistema de tomada de potência ou PTO (*Power Take-Off*), que recolhe a energia da mesma. A viabilidade económica, eficiência e complexidade de um WEC dependem em grande medida do seu PTO. A manutenção no mar é uma tarefa exigente e dispendiosa, pelo que é necessária uma elevada fiabilidade e durabilidade do PTO [29].

2.2.1 Atenuadores

Os WECs do tipo atenuadores da energia das ondas (Figura 2.3) são posicionados paralelamente à direção da onda incidente. Adequados a ondas frequentes mas não muito elevadas, a oscilação resultante na articulação dos vários corpos flutuantes interligados, idealmente separados por meio comprimento de onda, é convertida em eletricidade através de PTOs hidráulicos [30].



Figura 2.3 – WEC do tipo atenuador da energia das ondas. Adaptado de [31].

2.2.2 Absorvedor Pontual

Os WECs do tipo absorvedor pontual (*Point Absorber*) (Figura 2.4), colocados à superfície do oceano ou imediatamente abaixo, são capazes de recolher a energia das ondas em todas as direções. Através de uma boia ou flutuador verticalmente submerso, sujeito à impulsão devido à ondulação, absorve a energia das ondas e depois converte-a em eletricidade através do PTO [30].



Figura 2.4 – WEC do tipo absorvedor pontual (Wave Star). Adaptado de [32].

2.2.3 Galgamento

Os WECs do tipo galgamento (*Overtopping*) (Figura 2.5) funcionam de forma semelhante a uma barragem hidroelétrica. O movimento de um volume de água transborda, preenchendo um reservatório. Ao vazar, esse volume de água aciona uma turbina hidroelétrica através da energia potencial resultante da elevação da água entre o reservatório e o nível médio do mar. Em climas de ondas com elevada energia por metro, prevê-se que esta tecnologia seja economicamente competitiva com a energia eólica *offshore* num futuro próximo [30].



Figura 2.5 – WEC do tipo sobre-elevação de ondas (Wave Dragon). Adaptado de [33].

2.2.4 Coluna de água oscilante

Os WECs do tipo coluna de água oscilante ou OWC (*Oscilating Water Column*) (Figura 2.6) baseiam-se no princípio da pressurização do ar induzida pela ondulação. A passagem das ondas altera o nível da água dentro de um reservatório fechado aumentando e diminuindo a pressão do ar, o que faz com que haja rotação numa turbina ligada à câmara. A utilização de uma turbina bidirecional permite a produção de energia tanto no ciclo ascendente como descendente, e portanto de forma contínua [30].



Figura 2.6 – WEC do tipo coluna de água oscilante (OWC). Adaptado de [34].

2.2.5 Oscilantes

Os WEC do tipo ondas oscilantes (Figura 2.7) são constituídos por abas que se movimentam com a ondulação em torno de um eixo paralelo à frente de incidência da onda. Estes podem ser articulados na base ou num eixo de rotação próximo da superfície. Com o objetivo de diminuir as flutuações na produção energética que esta tecnologia oferece, é usual a utilização de sistemas de inércia. Embora apresentem uma eficiência elevada, ainda não foram implementados modelos operacionais em grande escala [30].

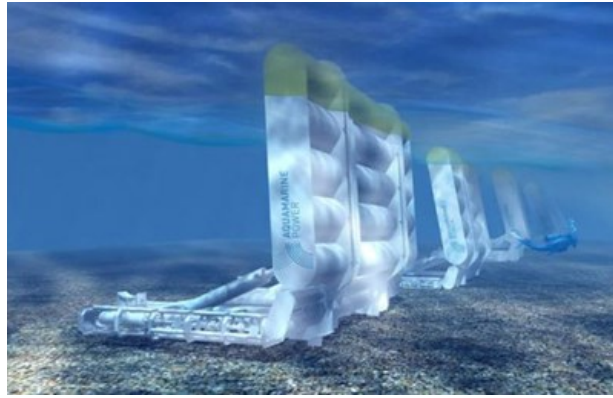


Figura 2.7 – WEC do tipo ondas oscilantes. Adaptado de [35].

2.2.6 Exemplos reais de conversores da energia das ondas

Em 1999, era terminada a construção da primeira central de ondas em Portugal. Localizada em Porto Cachorro, ilha do Pico, Açores, esta era uma central experimental de conceção inteiramente portuguesa, a primeira no mundo à escala real ligada à rede de distribuição de eletricidade. A central, com potência instalada de 400 kW, recorria à tecnologia OWC acoplada a uma turbina *Wells*. Encerrou a atividade por razões de segurança em 2018 [36].

O parque de ondas de Aguçadoura, na Póvoa de Varzim, tornou-se a zona de testes de muitos modelos experimentais, como a colocação em 2004 de um dispositivo de oscilação vertical à escala 1:2 com 2 MW de potência, denominado *Archimedes Wave Swing* (AWS), ou em 2008 de três dispositivos de superfície *Pelamis*, com o total de 2,25 MW de potência instalada, que seria o primeiro “parque” a produzir eletricidade para a rede de distribuição elétrica [37].

Em 2023 entrou em funcionamento o *CorPower C4*, um dispositivo pré-comercial à escala real que utiliza a tecnologia absorvedor pontual e que possui 300 kW de capacidade de produção elétrica. Parcialmente construído e montado nas instalações da empresa no Porto Comercial de Viana do Castelo, este está ligado à rede elétrica nacional por cabo submarino [38].

Um dos exemplos de WECs do tipo absorvedor pontual é o *Wavestar*. A energia do movimento dos braços conectados a boias é captada numa linha hidráulica comum. Este sistema é capaz de elevar toda a instalação, o que lhe confere uma elevada resistência a condições de tempestade adversas. Até à data, este método ainda não foi utilizado à escala real. Uma das principais vantagens deste tipo de exploração é o contacto mínimo com a água, colocando a maquinaria e componentes elétricos delicados fora do alcance de qualquer corrosão ou força física das ondas [39].

2.3 Controlo em conversores da energia das ondas

Para além das forças primárias (força de excitação das ondas e do PTO), existem ainda outras forças hidrodinâmicas e hidrostáticas que afetam o comportamento do WEC, como a força de radiação, a força de difração, a força de amortecimento viscoso e a força de flutuação [37].

O controlo do PTO para obter um desempenho ótimo requer um conhecimento futuro da força de excitação da onda. Embora este conhecimento seja simples para ondas regulares, torna-se bastante mais complexo para ondas irregulares [40].

A maior parte da energia produzida pelos dispositivos WEC ocorre quando a força de excitação está em fase com a velocidade do dispositivo. Se o amortecimento for demasiado elevado, os movimentos são limitados e é produzida pouca energia. Se o amortecimento for demasiado leve, então o amortecedor absorve pouca potência [41].

A complexidade do controlo de um WEC advém de não só se tratar de otimizar a extração energética de um movimento oscilatório irregular, como também da presença de um corpo sólido flutuante na água com interações hidrodinâmicas complexas [42].

2.3.1 Controlo Resistivo

O controlo resistivo consiste em regular o amortecimento aplicado ao sistema, influenciando a dissipação de energia sem introduzir acelerações adicionais, com o objetivo de ajustar a resposta do WEC à frequência da onda incidente e, assim, otimizar a ressonância entre ambos. Neste método, o WEC aplica forças de realimentação proporcionais à velocidade instantânea do movimento da boia, de forma a extrair energia de modo passivo e estável. A força de amortecimento é determinada através da equação (2.1), na qual a força de referência ($F_{ref}^{resist.}$) é proporcional à velocidade instantânea (\dot{z}) com um ganho de amortecimento (B) que define a intensidade da resistência imposta ao movimento [43].

$$F_{ref}^{resist.} = B \cdot \dot{z} \quad (2.1)$$

O ganho deve ser cuidadosamente ajustado de modo a maximizar a transferência de energia entre a onda e o corpo oscilante, mantendo simultaneamente a estabilidade do sistema. É fundamental que a medição da velocidade instantânea seja precisa e que o sistema de realimentação (*feedback*) apresente baixa latência, uma vez que qualquer atraso ou erro de medição compromete a eficiência do controlo resistivo e, conseqüentemente, a potência captada pelo conversor.

2.3.2 Controlo Reativo

O controlo reativo consiste em aplicar forças ao WEC que atuam simultaneamente sobre a posição e a velocidade instantânea do corpo, de forma a sincronizar o movimento do conversor com a fase da onda incidente e maximizar a energia captada.

Neste método, a força de referência do PTO ($F_{ref}^{reat.}$) é determinada através da aplicação de um ganho de amortecimento (B) à velocidade instantânea (\dot{z}), que controla a desaceleração do corpo, e de um ganho de rigidez (K) à posição instantânea (z), que permite influenciar diretamente a aceleração do WEC, como se pode observar na equação 2.2.

$$F_{ref}^{reat.} = K \cdot z + B \cdot \dot{z} \quad (2.2)$$

Este tipo de controlo exige medições precisas tanto da posição como da velocidade instantânea do flutuador, bem como a implementação de um sistema de realimentação de baixa latência [44].

2.3.3 Controlo por Latching

O controlo por *latching* consiste em bloquear temporariamente o movimento do WEC durante intervalos específicos do ciclo oscilatório, com o objetivo de ajustar a fase entre o movimento do corpo e a onda incidente, de modo a maximizar a energia captada.

Neste método, o WEC é mantido imobilizado (*latched*) até que a força de excitação da onda atinja um valor favorável, sendo então libertado (*unlatched*) para oscilar livremente. Esta libertação é sincronizada com o instante em que a força de excitação e a velocidade do corpo estão em fase, permitindo que a boia atinja a sua velocidade máxima quando a onda se encontra no ponto ótimo de transferência de energia [45].

A condição de *latching* pode ser representada pela equação (2.3), onde o movimento é restringido através da imposição de uma força de bloqueio ($F_{ref}^{lat.}$) proporcional à diferença entre a posição instantânea (z) e a posição de bloqueio (z_{bloq}), com um ganho de rigidez do bloqueio (K_{bloq}) que deve ser suficientemente elevado para garantir a imobilização efetiva do conversor durante o período de bloqueio.

$$F_{ref}^{lat.} = K_{bloq} \cdot (z_{bloq} - z) \quad (2.3)$$

A determinação do instante ótimo de libertação do flutuador depende da previsão ou medição da força de excitação, podendo basear-se em critérios de fase, energia ou aceleração. Um sincronismo adequado é essencial para maximizar a potência extraída e evitar esforços excessivos na estrutura e no PTO.

2.3.4 Controlo Preditivo Baseado em Modelos (MPC)

O controlo preditivo baseado em modelo ou *Model Predictive Control* (MPC) é uma estratégia de controlo avançada que tem como objetivo otimizar o desempenho dinâmico do WEC através da previsão do comportamento futuro da onda e da resposta do sistema. Esta abordagem utiliza um modelo matemático do WEC e do PTO para antecipar a evolução do estado do sistema num horizonte temporal definido, calculando em cada instante a força ótima de atuação que maximiza a energia captada, sujeita a restrições físicas e operacionais.

Como se pode observar na equação (2.4), a força ótima a realizar pelo PTO ($F_{PTO}(t)$) é determinada através da minimização a cada passo temporal de uma função de custo (J), que depende também da potência captada pela PTO ($P_{capt}(t)$) e de um fator de ponderação (λ) que penaliza esforços excessivos.

$$\min_{F_{PTO}(t)} J = \int_t^{t+T_p} [-P_{capt}(\tau) + \lambda \cdot F_{PTO}^2(\tau)] d\tau \quad (2.4)$$

Apesar da vantagem de controlo ótimo em condições de mar variáveis, a implementação prática do MPC apresenta desafios significativos. A necessidade de prever o perfil de onda com precisão, bem como o elevado custo computacional dos algoritmos de otimização em tempo real, requerem *hardware* de processamento rápido e modelos hidrodinâmicos de alta fidelidade, capazes de garantir a convergência e estabilidade da solução em ambiente operacional.[40].

2.3.5 Controlo Aprendizagem por Reforço (RL)

O controlo baseado em aprendizagem por reforço ou *Reinforcement Learning* (RL) representa uma abordagem inovadora e adaptativa para otimização do desempenho do WEC em ambientes marítimos não determinísticos. Neste método, o controlador aprende a maximizar a energia captada através da interação contínua com o ambiente, sem depender explicitamente de um modelo hidrodinâmico [46].

O controlo por RL destaca-se pela sua capacidade de adaptação em tempo real a condições de mar variáveis, sendo particularmente promissor para sistemas híbridos. No entanto, a sua implementação prática requer processamento computacional intensivo, extensas fases de treino e ambientes de simulação realistas, de forma a garantir políticas seguras e energeticamente eficientes antes da operação experimental.

2.4 Plataformas Híbridas

A integração de outras formas de produção energética em plataformas flutuantes *offshore* permite reduzir o custo generalizado das mesmas [47]. As tecnologias mais utilizadas para esta combinação são parques fotovoltaicos flutuantes e WECs [48].

A característica flutuante das plataformas implica que a torre da turbina esteja sujeita às ações combinadas do ambiente aerodinâmico e hidrodinâmico no local de operação. Estas forças induzem movimentos de translação na plataforma flutuante, correspondentes ao avanço (*surge*), à deriva (*sway*) e à arfagem (*heave*), enquanto os movimentos rotacionais se designam por balanço (*roll*), cabeceio (*pitch*) e guinada (*yaw*) [48], conforme ilustrado na Figura 2.8.

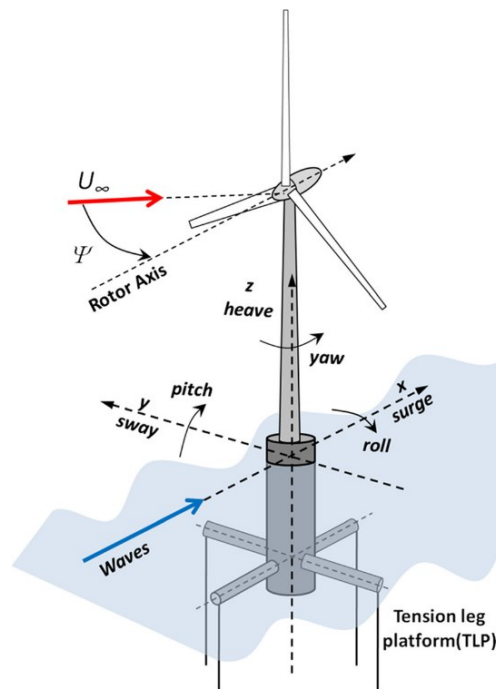


Figura 2.8 – Graus de liberdade de uma plataforma flutuante. Adaptado de [49].

Estes movimentos influenciam diretamente o desempenho global da turbina eólica, podendo reduzir o seu rendimento e afetar a sua vida útil devido aos esforços adicionais transmitidos à estrutura [50]. A integração de WECs nestes sistemas permite não só melhorar a estabilidade da plataforma como também aumentar a capacidade de produção energética desta [51]. Estes podem também reduzir a altura das ondas dentro de um parque eólico, aumentando assim as janelas meteorológicas de acesso às turbinas eólicas para manutenção [52]. Existem vários tipos de combinação de WECs com plataformas flutuantes: (i) Eólica-Galgamento, (ii) Eólica-OWC e (iii) Eólica-Absorvedor Pontual.

2.4.1 Eólica-Galgamento

A combinação Eólica-Galgamento consiste maioritariamente na instalação de turbinas eólicas em plataformas já desenvolvidas de sistemas de grande escala de WECs flutuantes de sobre-elevação, aproveitando assim as estruturas já existentes. Este tipo de plataformas híbridas ainda se encontra numa fase conceptual, pelo que os projetos que existem a decorrer são apenas experimentais [17].

2.4.2 Eólica-OWC

Com uma larga aplicação a nível experimental, a combinação Eólica-OWC está já presente em projetos de grande escala, com resultados interessantes que fundamentam o capital investido. Em fundações flutuantes, é mais comum a utilização de três câmaras, organizadas num triângulo equilátero, de forma a criar uma distribuição mais uniforme de esforços pela estrutura [17].

2.4.3 Eólica-Absorvedor Pontual

A arquitetura Eólica-Absorvedor Pontual perfaz a maioria de plataformas híbridas existentes. É usual haver a existência não de apenas um WEC mas sim de vários acoplados à mesma plataforma [17]. O WEC neste tipo de plataformas híbridas não tem como objetivo apenas a produção energética mas também a estabilização da plataforma, permitindo assim diminuir acelerações não desejáveis à produção energética da turbina [51].

2.5 Modelos experimentais de plataformas híbridas

Os modelos experimentais de turbinas eólicas flutuantes constituem uma base importante para a compreensão do comportamento dinâmico de sistemas híbridos que combinam energia eólica e energia das ondas. Estes permitem analisar os respetivos métodos construtivos, instrumentação utilizada e principais limitações.

No âmbito do projeto *InnWind*, foram estudadas diferentes configurações para a simulação dos efeitos aerodinâmicos em turbinas eólicas flutuantes. A instrumentação do modelo experimental incluiu acelerómetros distribuídos na plataforma e na *nacelle*, para monitorizar o movimento global da estrutura [53].

A plataforma flutuante utilizada neste projeto baseou-se no modelo OC4-DeepCwind, amplamente utilizado em estudos experimentais. Trata-se de uma estrutura semi-submersível composta por quatro colunas interligadas por tubos horizontais. A torre da turbina é montada na coluna central, enquanto os lastros são distribuídos nas colunas periféricas, assegurando a estabilidade hidrostática e o controlo do momento de arfagem [54].

Foi também testado um conceito alternativo de estabilização ativa da plataforma flutuante através da integração de múltiplos WECs dispostos concentricamente, com a utilização de doze WECs, distribuídos radialmente em torno da plataforma, com o objetivo de reduzir os movimentos de arfagem e guinada [55].

Entre cada WEC e a plataforma foi instalada uma ligação articulada equipada com um amortecedor rotativo, representando a PTO. Os ensaios em tanque de ondas permitiram recolher dados relativos ao perfil das ondas incidentes, forças nos cabos de ancoragem e movimentos da plataforma, registados através do sistema *Qualisys* [18].

Na sequência dos modelos anteriores, foi desenvolvida uma plataforma híbrida baseada na geometria *OC4-DeepCwind*, na qual os WECs foram integrados diretamente na estrutura semi-submersível. Esta configuração permitiu estudar, em ambiente experimental, a interação acoplada entre a extração de energia das ondas e a resposta dinâmica da plataforma flutuante, representando um avanço significativo na investigação de sistemas híbridos eólico-ondulatórios [56].

2.6 Desafios atuais das plataformas híbridas

Existem ainda desafios no desenvolvimento de sistemas híbridos de energia eólica e das ondas. Os WEC ainda se encontram numa fase de desenvolvimento experimental precoce, não havendo convergência de conceito e tecnologia.

A principal vantagem da combinação da energia das ondas com a energia eólica *offshore* flutuante é a supressão do movimento não desejado da plataforma, tanto passiva como ativamente, mas a sua investigação e desenvolvimento é ainda relativamente recente.

Um dos problemas atuais é o desenvolvimento de sistemas de WECs com o objetivo de captar ao máximo a energia das ondas, o que não é ideal para a estabilização da plataforma [57]. Por este motivo, existem ainda poucos estudos sobre a utilização destes sistemas para a estabilização da plataforma [58].

Assim verificam-se as seguintes lacunas e oportunidades de investigação do caso de absorvedor pontual acoplado a uma plataforma semi-submersível:

- Comparação sistemática de leis de controlo: avaliação comparativa de controlos resistivos, reativos, *latching*, MPC e RL considerando simultaneamente produção de potência e redução de movimentos da plataforma.
- Robustez a incertezas ambientais e de modelo: desenvolvimento de controlos robustos ou adaptativos que preservem desempenho perante variações de espectro de ondas e erro de modelação.
- Coordenação entre subsistemas: estudar estratégias coordenadas entre o controlo da turbina e do WEC para otimizar produção total e minimizar movimentos críticos.
- Validação experimental com plataforma em escala: testes em tanque de geração de ondas com modelos à escala de plataformas semi-submersíveis e WECs para validar modelos numéricos e tipos de controlo (incluindo cenários irregulares e multidirecionais).
- Avaliação de vida útil e fiabilidade: análise de fadiga referente a cada forma de controlo para quantificar impactos na manutenção e custo de ciclo de vida.

3 Implementação

Este capítulo tem como objetivo descrever e justificar as escolhas efetuadas no desenvolvimento do projeto de todos os componentes necessários ao projeto do WEC. O sistema será desenvolvido tendo em conta a sua aplicação numa plataforma à escala de 1:70 já desenvolvida (Figura 3.1), que poderá realizar testes em tanque de geração de ondas, e também numa bancada de testes (Figura 3.2), onde serão realizados testes a seco do sistema.

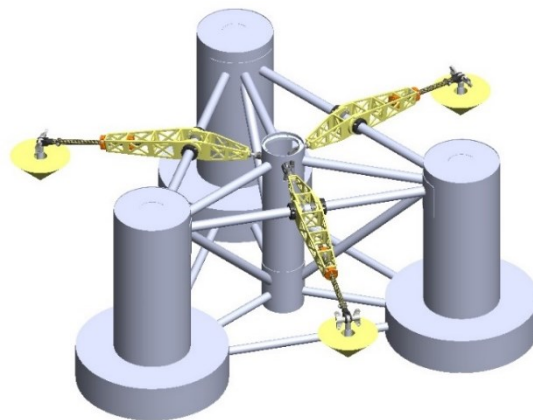


Figura 3.1 – WECs aplicado a uma plataforma flutuante semi-submersível.
Projeto PTDC/EME-REN/0242/2020.



Figura 3.2 – Bancada de testes para o WEC.

3.1 Objetivos dos sistemas

Foram definidos os seguintes objetivos para o desenvolvimento de componentes:

- Integração do PTO no interior da coluna central da plataforma de forma a permitir uma fácil montagem do conjunto, assim como uma célula de carga capaz de medir a força efetuada por este.
- Criação de um mecanismo de ligação entre o flutuador e o PTO, que possua rigidez para aguentar os esforços máximos previstos, que possua ligações rápidas entre o PTO e o flutuador a este, e que possibilite o ajuste de ângulo entre os dois e o ajuste de distância do flutuador em relação à plataforma.
- Integração de um sensor de rotação capaz de medir o ângulo do sistema, e de onde se possam aferir as velocidades angular do mecanismo e linear quer do PTO quer do flutuador.
- Integração do sistema desenvolvido para a plataforma à escala na bancada de testes de forma a ser possível realizar testes em HIL.
- Integração na bancada de um atuador elétrico que servirá de simulador da ação das ondas no flutuador para os testes HIL, assim como uma célula de carga que possa medir a força efetuada por este nos braços.

3.2 Modelo experimental à escala

Na figura 3.3 podem-se observar os vários subsistemas que compõem os WECs aplicado ao modelo experimental à escala:

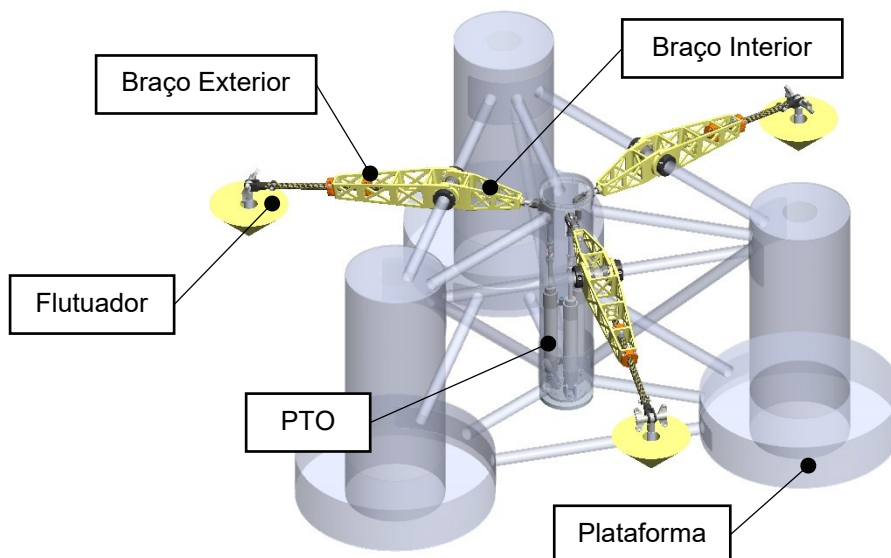


Figura 3.3 – Subsistemas integrantes da plataforma experimental.

3.2.1 *Plataforma à escala*

A plataforma à escala de 1:70 a utilizar (Figura 3.4), construída pelo Centro de Engenharia e Tecnologia Naval e Oceânica do Instituto Superior Técnico (CENTEC/IST), é composta por chapa e tubos de alumínio com 2 mm de espessura, cortados à medida e soldados segundo o modelo desenvolvido.

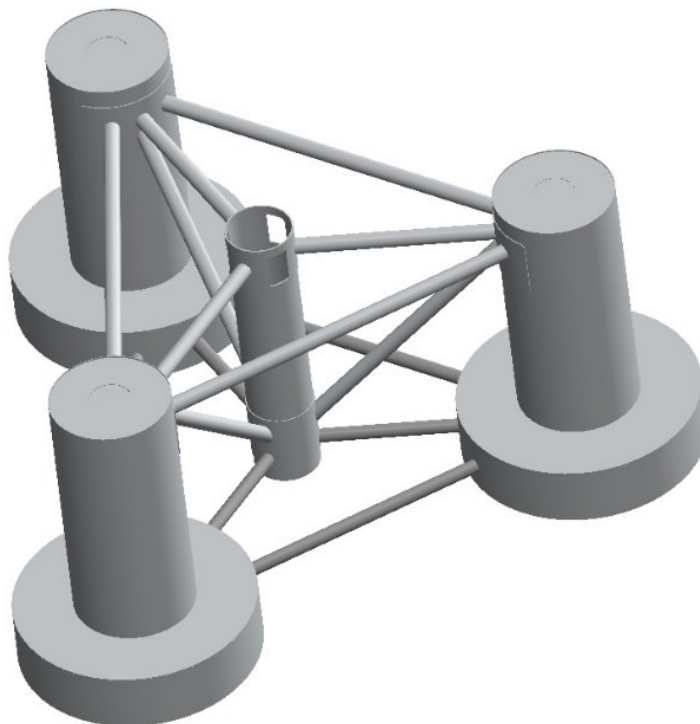


Figura 3.4 – Plataforma base à escala de 1:70 desenvolvida pelo CENTEC/IST.

Desenvolvida segundo o tipo de plataforma semi-submersível flutuante, esta apresenta três colunas laterais, de forma a realizar a ação flutuante e onde irá estar a maior parte dos componentes eletrónicos, e um central, onde se fixa a turbina eólica e onde estarão colocados os PTOs pneumáticos.

3.2.2 *Casquilhos Auto-Lubrificantes*

A utilização de casquilhos autolubrificantes da IGUS [59] é transversal a todo o projeto de componentes que estejam sujeitas ao contacto com outros de forma cíclica. Estes permitem diminuir significativamente o atrito entre as superfícies, e assim eliminar esforços não desejáveis aos testes.

A marca dispõe de várias opções de material, cada um com as suas vantagens e desvantagens para a aplicação desejada. O principal fator a ter em conta na escolha deste material é o contacto com ambientes agressivos, neste caso água salgada e condições adversas, e também a fadiga elevada sentida por estes no funcionamento do sistema. Pode-se verificar as opções consideradas de material disponibilizado pela IGUS, nomeadamente a série H, na figura 3.5.




 <p>iglidur® H1 Endurance runner with high media resistance</p>	Temperature [°C] ¹²³	+200	-	■	■	■	■	■	■	+
	Surface pressure [MPa] ¹²⁴	80	-	■	■	■	■	■	■	+
	Coefficient of friction [μ] ¹²⁵	0.17	-	■	■	■	■	■	■	+
	Wear [μm/km] ¹²⁵	0.29	-	■	■	■	■	■	■	+
	Price index	-	-	■	■	■	■	■	■	+
 <p>iglidur® H370 Long service life under water</p>	Temperature [°C] ¹²³	+200	-	■	■	■	■	■	+	
	Surface pressure [MPa] ¹²⁴	75	-	■	■	■	■	■	■	+
	Coefficient of friction [μ] ¹²⁵	0.17	-	■	■	■	■	■	■	+
	Wear [μm/km] ¹²⁵	1.20	-	■	■	■	■	■	■	+
	Price index	-	-	■	■	■	■	■	■	+
 <p>iglidur® H The classic with high resistance to media and temperature</p>	Temperature [°C] ¹²³	+200	-	■	■	■	■	■	+	
	Surface pressure [MPa] ¹²⁴	90	-	■	■	■	■	■	■	+
	Coefficient of friction [μ] ¹²⁵	0.17	-	■	■	■	■	■	■	+
	Wear [μm/km] ¹²⁵	2.10	-	■	■	■	■	■	■	+
	Price index	-	-	■	■	■	■	■	■	+

Figura 3.5 – Casquilhos Autolubrificantes IGUS. Adaptado de [59].

Das várias opções possíveis do material *iglidur* da IGUS [59], escolheu-se a gama de média resistência e de compatibilidade com o meio marítimo, a gama H. Apesar da maior capacidade de resistência a ambientes aquáticos do H370 em relação ao H1, este acaba por compensar em relação ao menor desgaste quando comparado com o primeiro, tendo sido o escolhido.

3.2.3 Atuador Pneumático (PTO)

A fixação dos atuadores pneumáticos à plataforma realiza-se na parte inferior da coluna central. Como o acesso a este espaço é bastante restrito, foi necessária uma solução que permitisse uma fácil montagem e desmontagem dos componentes. Chegou-se então à solução de uma base inferior, soldada à plataforma, e uma segunda base superior, onde se realiza a fixação dos suportes dos atuadores. Adicionaram-se ainda pontos de fixação de contrapesos necessários para o equilíbrio do centro de massa da plataforma segundo o pretendido, como se pode observar na Figura 3.6.

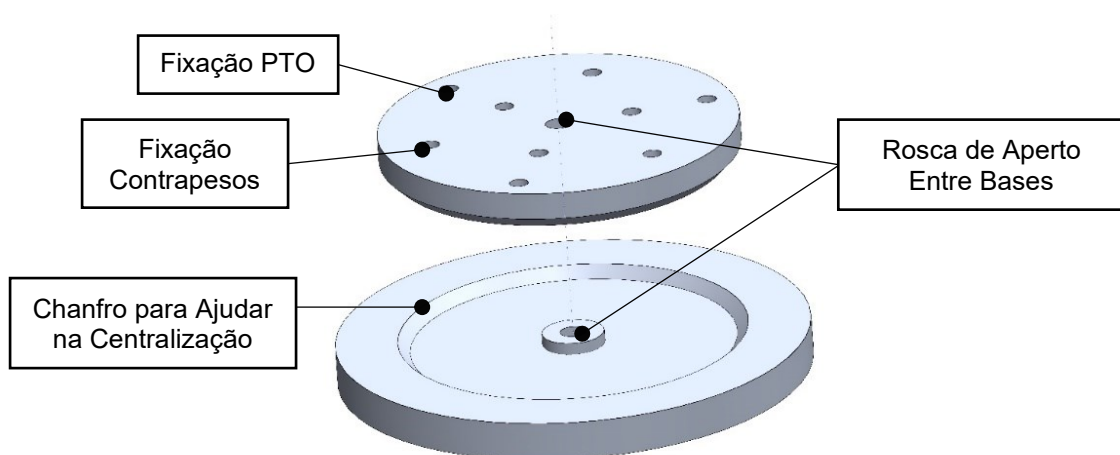


Figura 3.6 – Bases Inferior e Superior.

Esta segunda base superior permite montar o conjunto completo no exterior, sendo depois possível descê-lo pelo topo do interior da plataforma. Uma outra vantagem da utilização de discos de alumínio com uma espessura igual a 10 mm é a rigidez adicional que oferecem ao tubo central da plataforma.

O atuador pneumático possui um suporte específico (SMC C85C25 [60]), que será responsável por realizar a fixação do atuador à plataforma, como se pode verificar na Figura 3.7. Este é composto por um veio com dimensões inferiores ao furo passante do atuador, o que permite a utilização de casquilhos autolubrificantes de forma a manter o atrito mínimo entre superfícies.

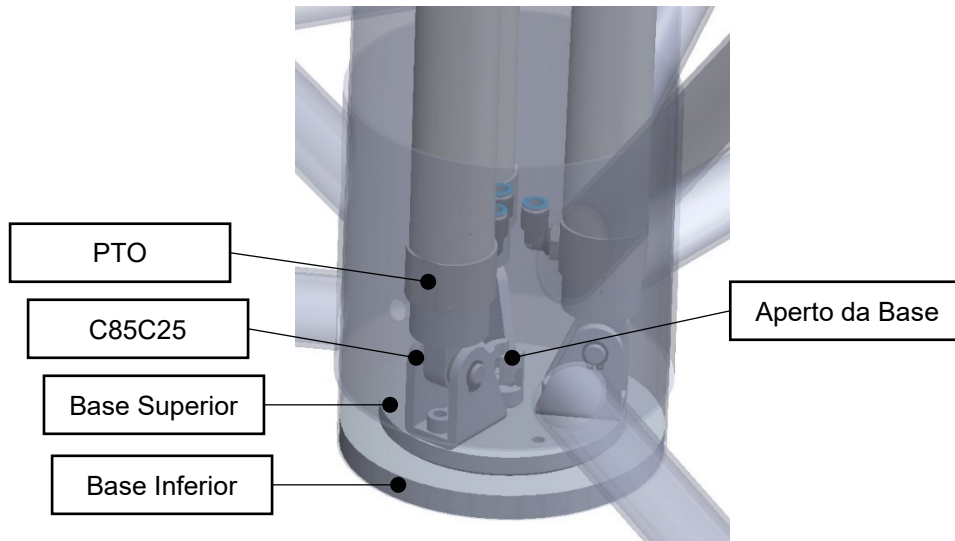


Figura 3.7 – Apoio do Atuador Pneumático.

Relativamente à descida e subida do conjunto completo de potência (Figura 3.8), foi criado um sistema de aperto entre as duas bases também capaz de realizar a elevação e a descida do conjunto, conseguido através da utilização de uma peça removível, para não aumentar o centro de massa.



Figura 3.8 – Conjunto pneumático completo.

Na Figura 3.9 está ilustrada a peça criada para auxiliar o alinhamento do varão concentricamente à plataforma e alinhada com o aperto na base inferior. Esta é fixa à flange criada por Daniel Agostinho [61] para a fixação do simulador de turbina eólica integrada na plataforma experimental.

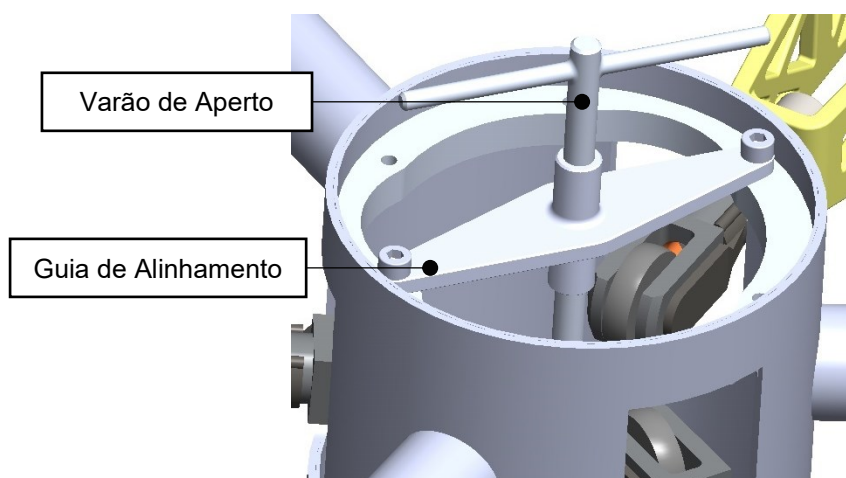


Figura 3.9 – Guia de alinhamento e varão de aperto.

A célula de carga deve ser instalada concentricamente ao movimento do PTO. Na Figura 3.10 está presente o sistema criado de união com rosca de forma a fixar a célula ao mesmo. Por ser de extrema dificuldade a fabricação da peça projetada com tamanho reduzido e que cumprisse o pretendido, foi criada uma solução em duas partes composta por um fuso de aperto M3 para enroscar na célula de carga e uma porca de redução de M3 para o fuso e M10 para a haste do atuador pneumático.

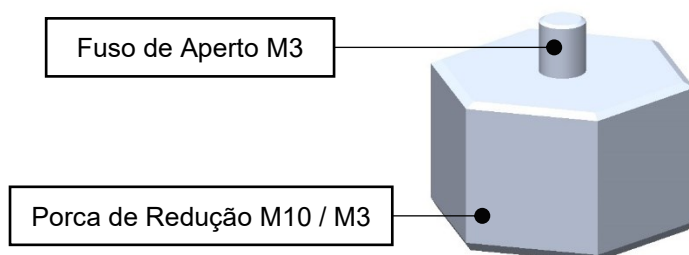


Figura 3.10 – Ligação da Célula de Carga.

A ligação entre o PTO e o sistema de braços móveis necessita de ser uma ligação rápida que permita uma rotação de baixo atrito. Na Figura 3.11 estão presentes as conexões rápidas selecionadas da IGUS [62], equipadas com rótulas de material *iglidur* H1, que permitem um baixo atrito e alta resistência às condições adversas que esta zona poderá sofrer. A presença das rótulas oferece também liberdade na ocorrência de eventuais movimentos não desejáveis para a integridade da célula de carga.

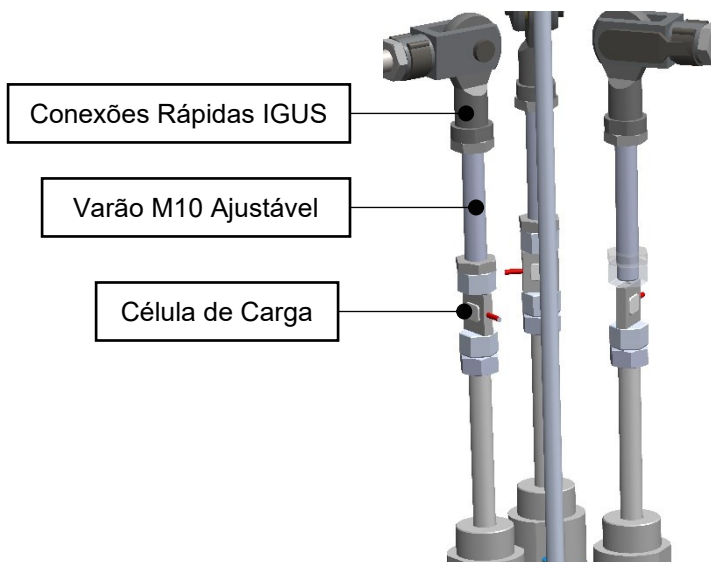


Figura 3.11 – Montagem da Célula de Carga e Ligações aos Braços.

3.2.4 Braços oscilantes (Interior e Exterior)

Para a ligação entre os flutuadores e o PTO foi projetado um conjunto de braços de forma a serem adaptáveis a vários comprimentos e ângulos.

Inicialmente, foi pensado serem fabricados em alumínio por ser leve e fácil de manobrar. Foram consideradas diversas opções. Uma opção era a fabricação dos braços em alumínio, fresados em forma de viga H, descartada pelo custo elevado e dificuldade de fabrico. Outra opção era uma solução híbrida entre chapas de aço quinadas e soldadas e ligações finais em alumínio, conectadas através de ligações roscadas, conforme apresentado na Figura 3.12.

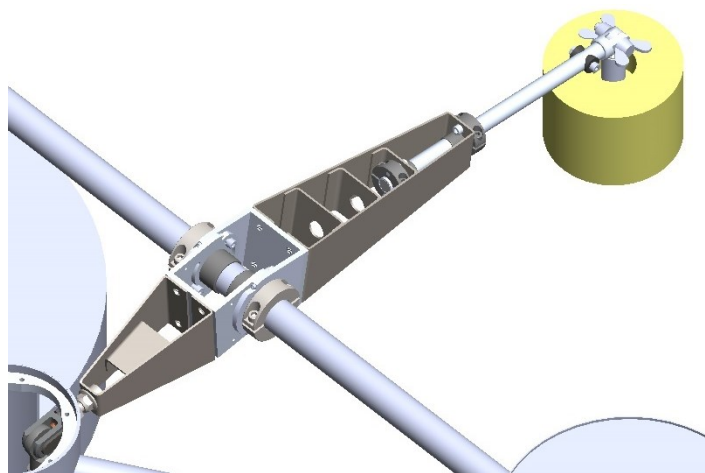


Figura 3.12 – Braços de fabrico em metal.

Por fim, tendo em conta a necessidade de rapidez e facilidade de fabrico, culminou-se na solução de utilizar processos de fabrico aditivos para a produção dos braços, como se pode verificar na Figura 3.13.

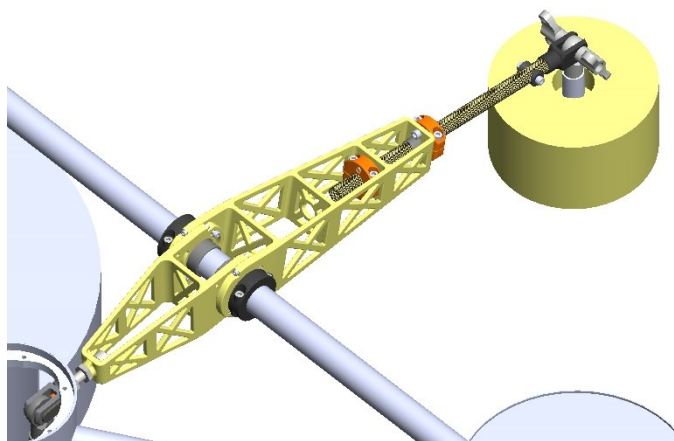


Figura 3.13 – Braços de fabrico em impressão 3D.

A escolha do material para a impressão de peças que para a bancada de testes é ácido polilático (PLA) e para o modelo experimental em acrilonitrila butadieno estireno (ABS) ou politereftalato de etileno (PET).

A utilização de treliças permitiu reduzir a massa de ambos os braços interior e exterior em aproximadamente 30%. Através de simulação numérica das peças (Figuras 3.14 e 3.15), verificou-se que a utilização de treliças permite manter a integridade dos braços perante as forças máximas capazes de ser efetuadas pelo atuador pneumático (17N), com um fator de segurança no mínimo de 2.

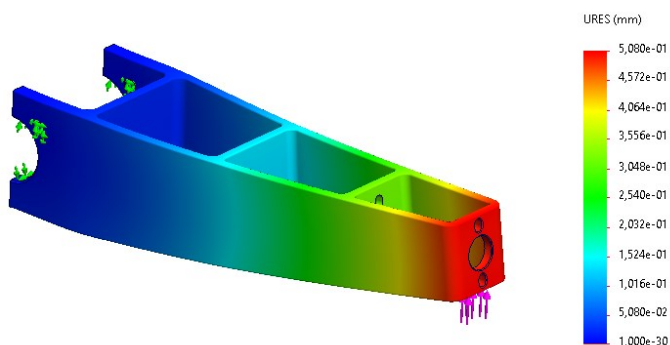


Figura 3.14 – Simulação numérica do braço exterior sólido. Análise ao deslocamento resultante ao ser aplicada uma força de 20 kN.

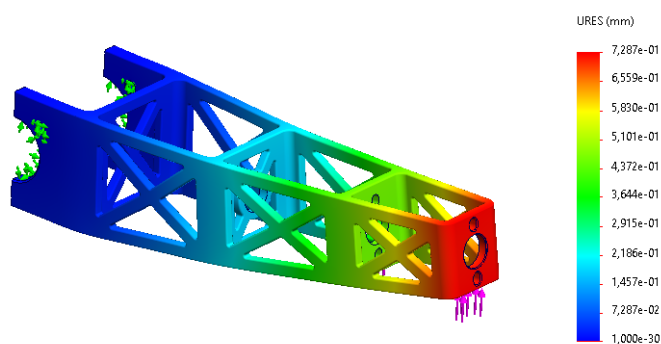


Figura 3.15 – Simulação numérica do braço exterior com treliças. Análise ao deslocamento resultante ao ser aplicada uma força de 20 kN.

A fabricação através de modelação por deposição fundida (FDM) permite a integração mais natural de componentes necessários para criar um sistema ajustável, como está ilustrado na Figura 3.16.

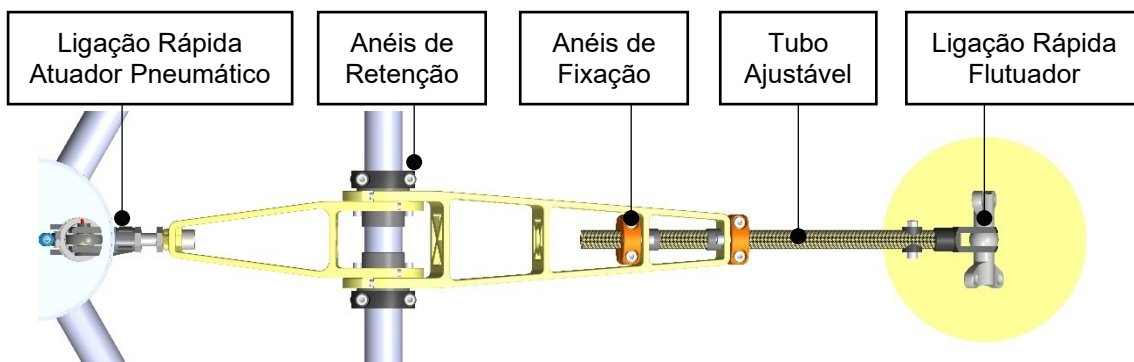


Figura 3.16 – Subsistema dos braços oscilantes.

De forma a ser possível o ajuste de ângulo no conjunto, foi criada a solução de dois braços, um interior e um exterior, interligados através de um sistema de ângulo ajustável (Figura 3.17), responsável também por permitir simular o modo de tempestade dos WECs, em que os braços exteriores devem estar totalmente recolhidos.

Para a montagem dos braços quer na plataforma quer na bancada de testes, teve de ser criado um método de fixação destes ao tubo que possa permitir o seu aperto e ajuste de fricção (Figura 3.15), que estará garantida novamente através de casquilhos autolubrificantes da IGUS [59]. Ao utilizarem-se casquilhos com borda, a fricção lateral também será evitada no contacto entre estes e os anéis limitadores da REIMAN [63].

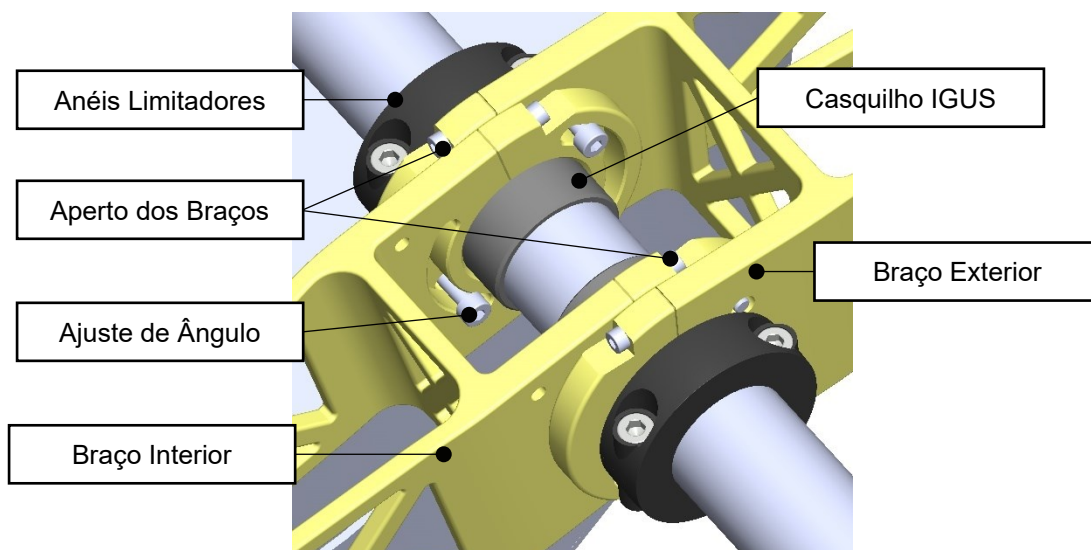


Figura 3.17 – Aperto dos braços e ajuste de ângulo.

No braço exterior, a ligação ao flutuador necessita de poder ser ajustável também em comprimento, como se pode verificar na Figura 3.18. Para tal, foi projetado um sistema de tubo móvel em fibra de carbono, fixo através de anéis de fixação presos ao braço.

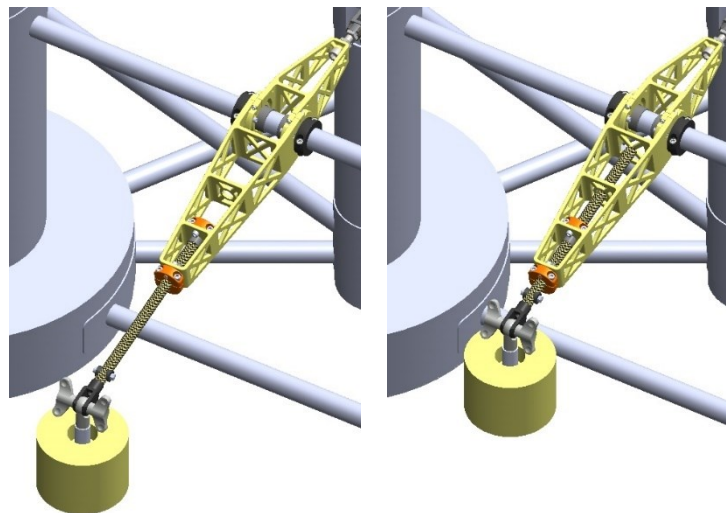


Figura 3.18 – Amplitudes máxima e mínima do tubo manualmente ajustável.

Na ponta desse mesmo tubo existe a ligação ao flutuador, pensada para permitir o ajuste rápido e manual do ângulo no flutuador em relação ao braço, de forma a que possa ficar perpendicular ao plano da água no seu ponto intermédio de rotação e assim permitir a melhor passagem de força da onda. De forma a eliminar possíveis forças não desejáveis na boia, foi adicionada uma rótula no final da ligação desta de forma a haver liberdade na rotação da mesma, conforme ilustrado na Figura 3.19.

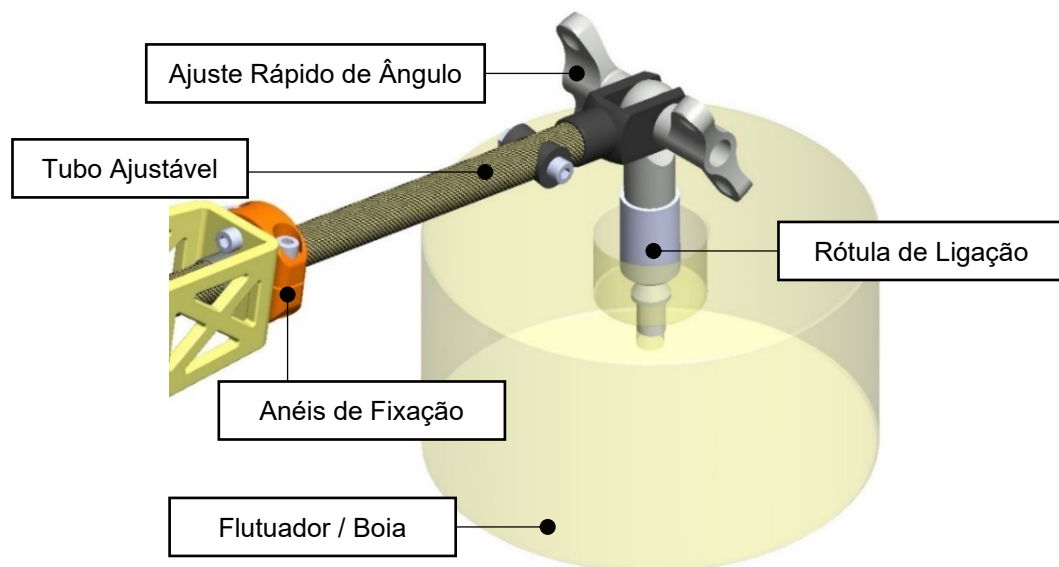


Figura 3.19 – Ligação do flutuador.

Uma das partes mais desafiante do projeto de peças foi a integração do sensor de rotação utilizado para medir o movimento do conjunto. A principal dificuldade na integração deste sensor foi a necessidade da colocação deste concentricamente ao eixo de rotação dos braços, ao qual também é concêntrico o tubo de ligação das colunas laterais da plataforma, com cerca de 26 mm de diâmetro.

Inicialmente pensou-se num sistema de engrenagens, hipótese descartada pelo seu tamanho e condições adversas que este enfrentaria na posição colocada. De forma a proteger o sensor, pensou-se então na sua integração no interior de uma das colunas laterais, local estanque onde está localizada grande parte da eletrônica da plataforma, como se pode verificar na Figura 3.20.

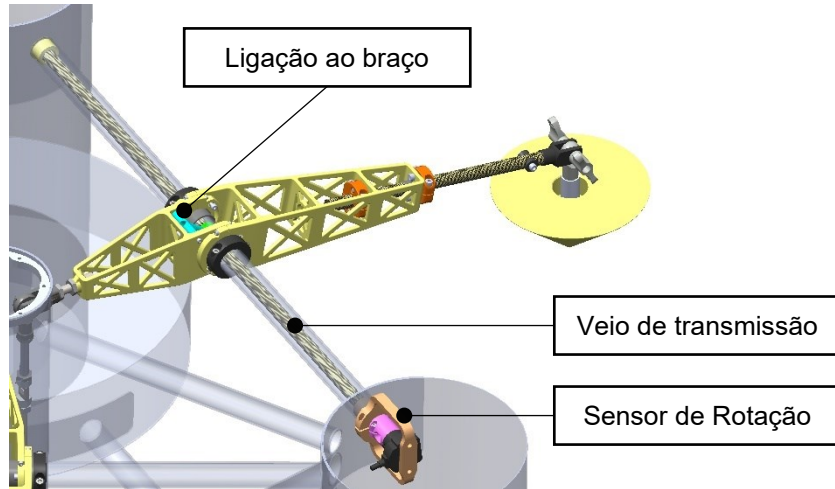


Figura 3.20 – Veio de transmissão de ângulo.

Desta forma, seria necessária a captação do movimento de rotação dos braços (Figura 3.21a), e de alguma forma, a sua transmissão para o pontão (Figura 3.21b). Sendo o tubo oco, permite a passagem de um veio no seu interior, concêntrico ao mesmo e aos braços, que seria a forma de transmitir o movimento de rotação para o interior do pontão.

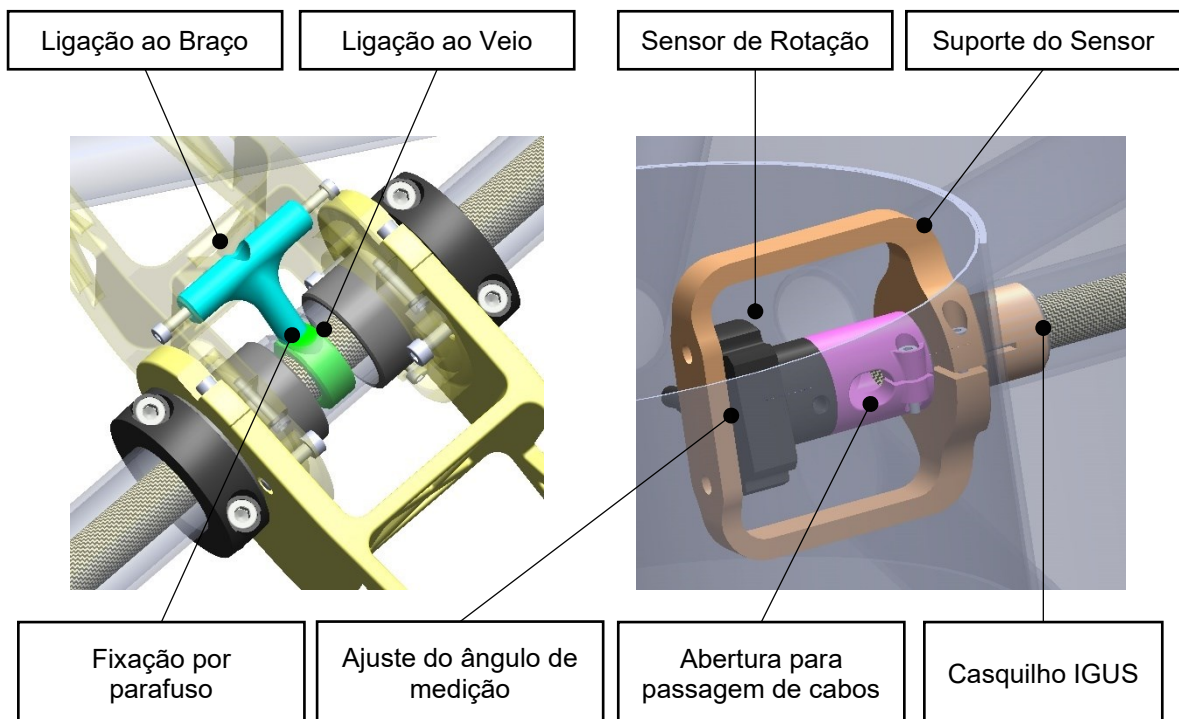


Figura 3.21 – Ligação do veio aos braços e apoio do sensor de rotação.

Esta solução obrigou a mudanças na fabricação da própria plataforma, com a abertura de um rasgo no tubo onde estão apoiados os braços, não muito largo de forma a não afetar estruturalmente o mesmo e a abertura de um furo na coluna que permitisse a entrada do veio concentricamente ao tubo, conforme ilustrado na Figura 3.22.

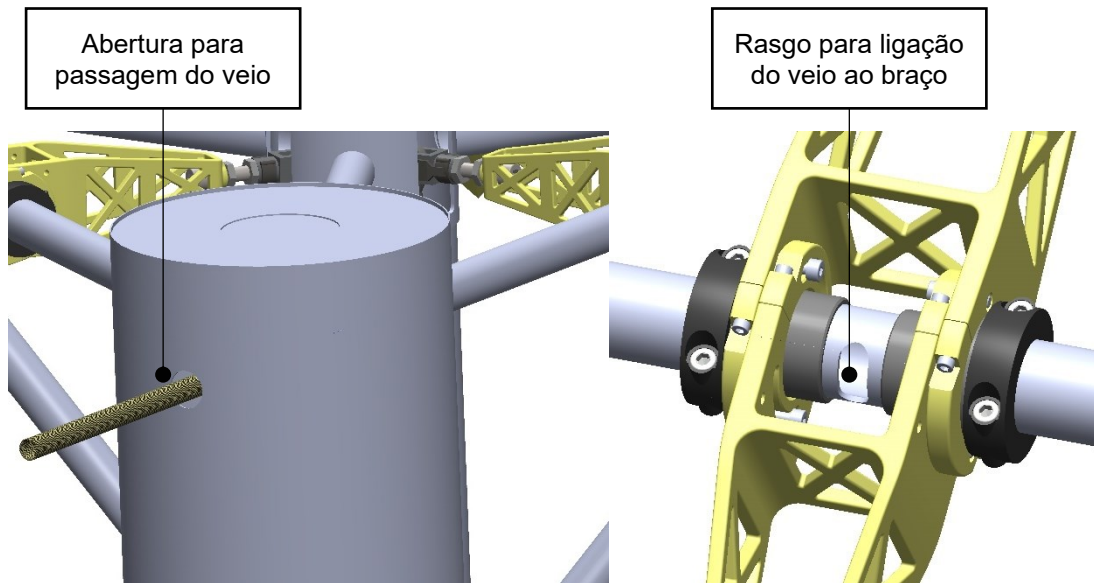


Figura 3.22 – Alterações à plataforma flutuante.

3.2.5 Flutuador (Boia)

Na Figura 3.23 apresentam-se os flutuadores desenvolvidos, cujas dimensões foram definidas com base nos resultados das simulações realizadas por Tiago Hallak (CENTEC/IST), otimizadas para a maior captura energética possível. Os modelos considerados abrangem três configurações geométricas principais (cilíndrica (#1), toroidal (#2) e cônica (#3)) permitindo avaliar a influência da forma do flutuador na capacidade de conversão e geração de energia do sistema.

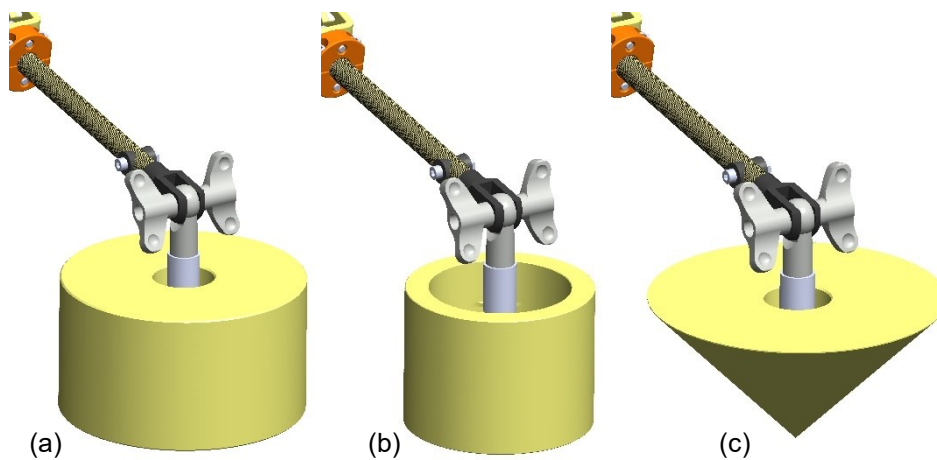


Figura 3.23 – Tipos de flutuadores. (a) #1 – Cilíndrico (b) #2 – Toroidal (c) #3 – Cônico.

As suas dimensões podem ser analisadas na Tabela 3.1. Estes foram pensados para um desempenho ótimo de recolha de energia das ondas para o sistema projetado.

Tabela 3.1 – Dimensões dos flutuadores.

	Borda Livre		Calado		Diâmetro		Diâmetro Interno	
	Real	Modelo	Real	Modelo	Real	Modelo	Real	Modelo
	[m]	[mm]	[m]	[mm]	[m]	[mm]	[m]	[mm]
#1-	2,1	30	4,2	60	5,6	80	-	-
#1	2,1	30	4,2	60	8,4	120	-	-
#1+	2,1	30	4,2	60	11,2	160	-	-
#2	2,1	30	4,2	60	8,4	120	6,3	90
#3	2,1	30	4,2	60	12,6	180	-	-

3.3 Bancada de testes

Segue-se a criação de uma bancada de testes de forma a poder testar a seco o sistema criado através da metodologia HIL. Para tal, é necessário integrar o sistema, assim como todos os elementos adicionais que permitem a simulação das condições a que este irá estar sujeito no tanque de ondas, numa estrutura que seja capaz de acomodar todos esses elementos de forma estável e segura. Esta estrutura deve possuir ainda a possibilidade de realizar ajustes se necessário para o teste de várias soluções.

Na Figura 3.24 podem-se observar os vários subsistemas que constituem a bancada:

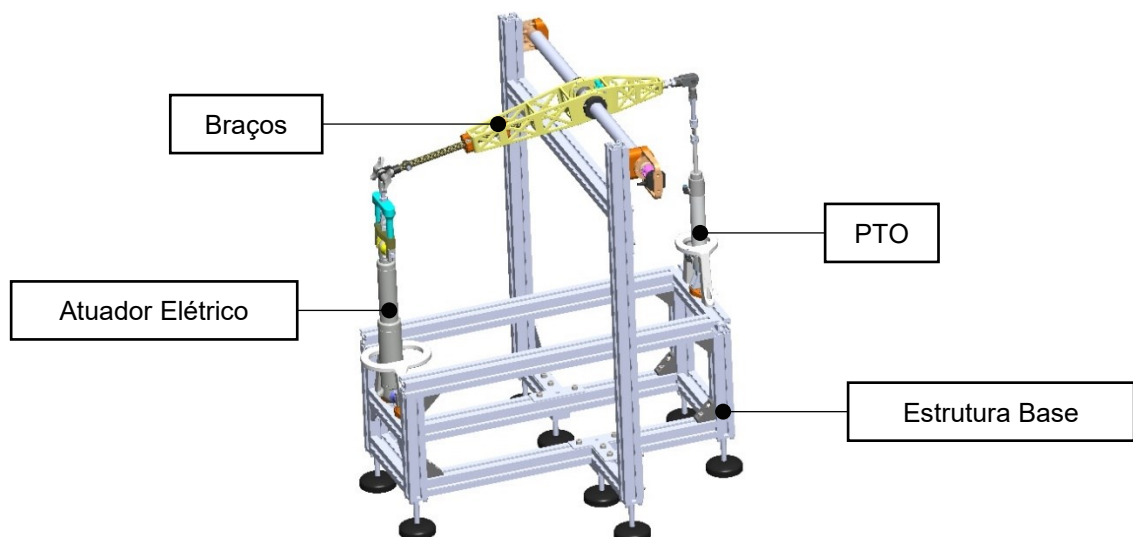


Figura 3.24 – Subsistemas da bancada de testes.

3.3.1 Estrutura Base

Os objetivos principais da estrutura base são assegurar uma distância entre componentes semelhante ao que se encontra na plataforma flutuante, ser capaz de

realizar ajustes se necessário, e ainda suportar todos os elementos eletrônicos, como o controlador, as válvulas pneumáticas, amplificadores de sinal, entre outros.

Para a bancada de testes, foram utilizados como base perfis extrudidos de alumínio da REIMAN [64], que permitem uma rápida e fácil integração de componentes graças ao seu sistema de fixação, como se pode observar na Figura 3.25.

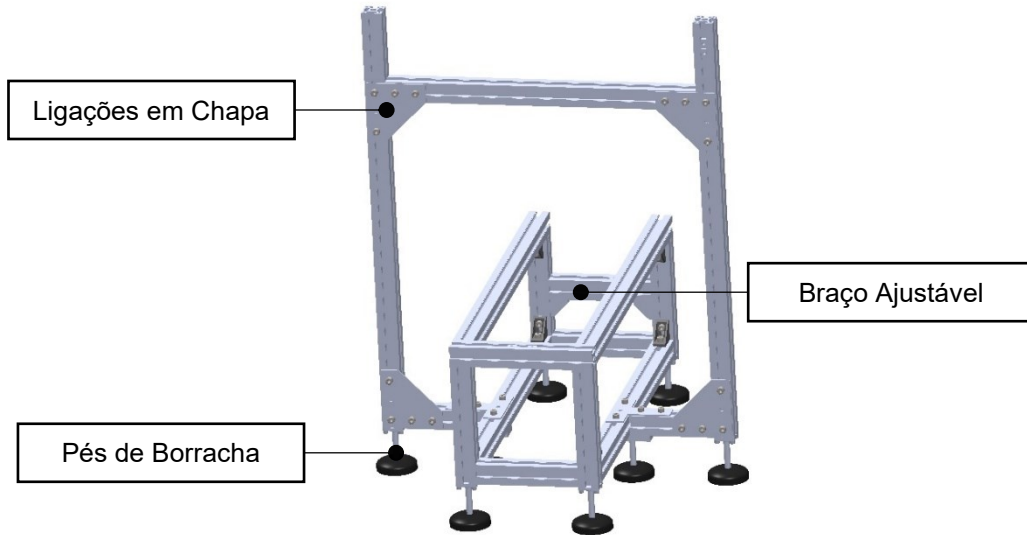


Figura 3.25 – Estrutura base da bancada de testes.

Foram utilizados pés de borracha ajustáveis em altura para servir de atenuadores de vibrações entre a bancada de testes e a superfície de repouso desta.

3.3.2 *Ligação dos atuadores à estrutura*

Para a montagem do tubo onde estão apoiados os braços à bancada de testes foram projetados suportes que permitem fixar com segurança o eixo e ainda o ajuste da altura com facilidade, conforme ilustrado na Figura 3.26.

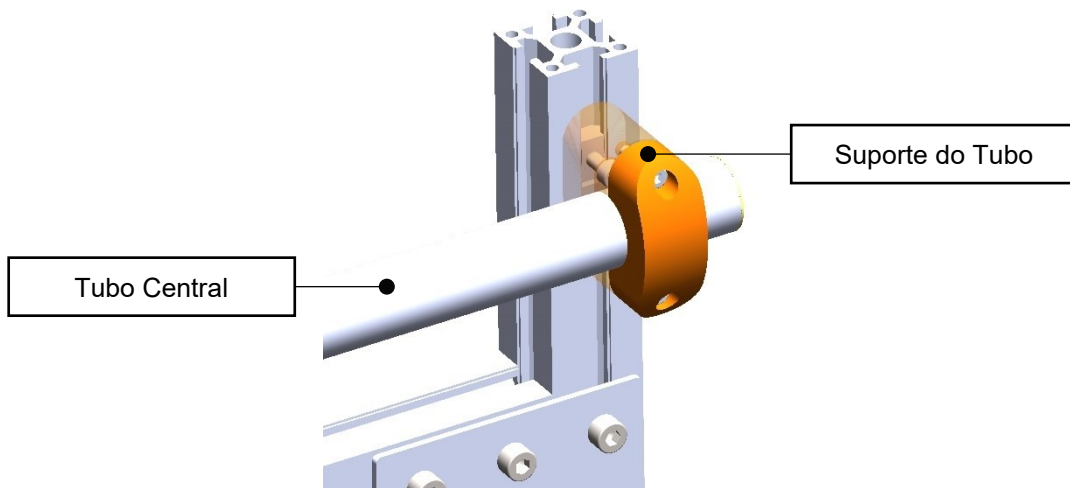


Figura 3.26 – Fixação do tubo central à bancada.

O atuador elétrico, fixo ao braço no local onde estará montada a rótula do flutuador, está fixo através de um sistema de fixação REIMAN, que utilizado em conjunto com os casquilhos da IGUS [59], assegura um movimento seguro e sem atrito na zona de rotação, como se observa na Figura 3.27.

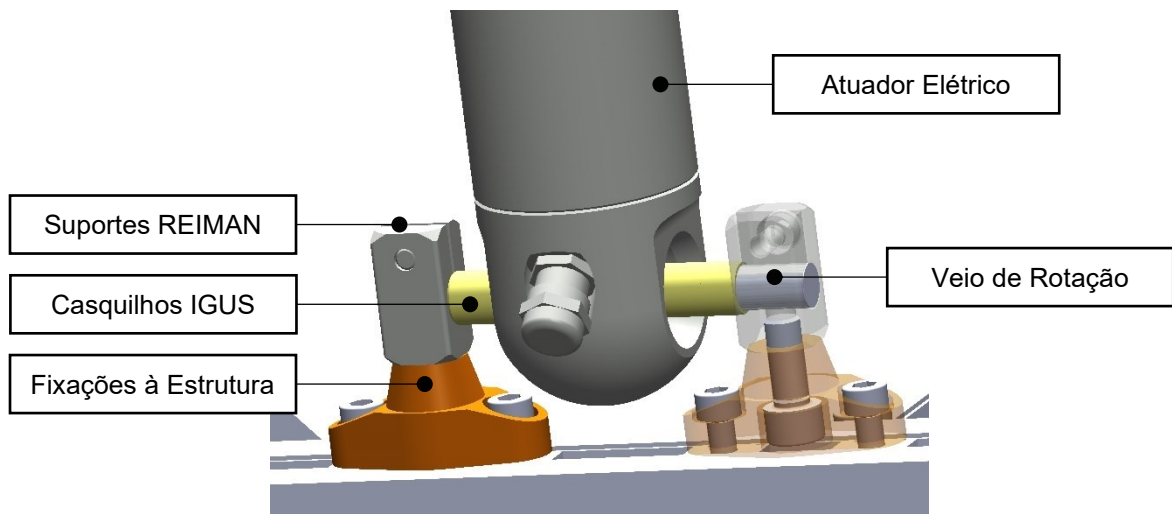


Figura 3.27 – Apoio do atuador elétrico à bancada.

O atuador pneumático está fixo através de uma peça de fixação do suporte a apertos do perfil extrudido, também realizada através de métodos de fabrico aditivos, conforme ilustrado na Figura 3.28.

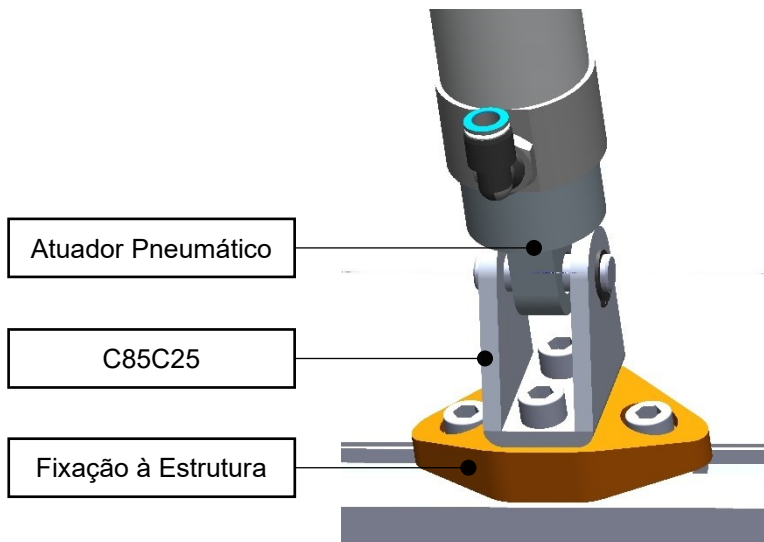


Figura 3.28 – Apoio do atuador pneumático à bancada.

Para a ocorrência de alguma falha estrutural nos componentes integrantes dos braços, criaram-se uma espécie de gaiolas que fossem capazes de sustentar a queda de ambos os atuadores (Figura 3.29), de forma a prevenir qualquer dano nos componentes nos restantes componentes.

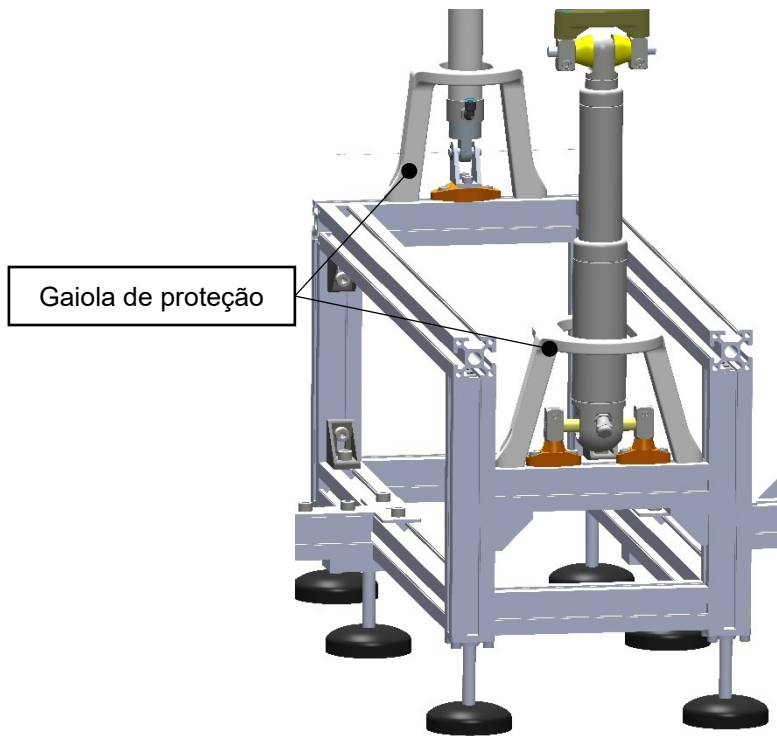


Figura 3.29 – Gaiolas de proteção dos atuadores.

3.3.3 Ligação do atuador elétrico aos braços

O atuador elétrico deve ser fixo à ligação rápida para o flutuador. Nesta ligação deve estar integrada a célula de carga que irá medir a força efetuada por este no braço, como se observa na Figura 3.30. À semelhança da ligação à estrutura, aqui também é utilizado o sistema de apoios da REIMAN e de veio com casquilhos da IGUS, de forma a eliminar qualquer tipo de atrito existente na rotação do conjunto.

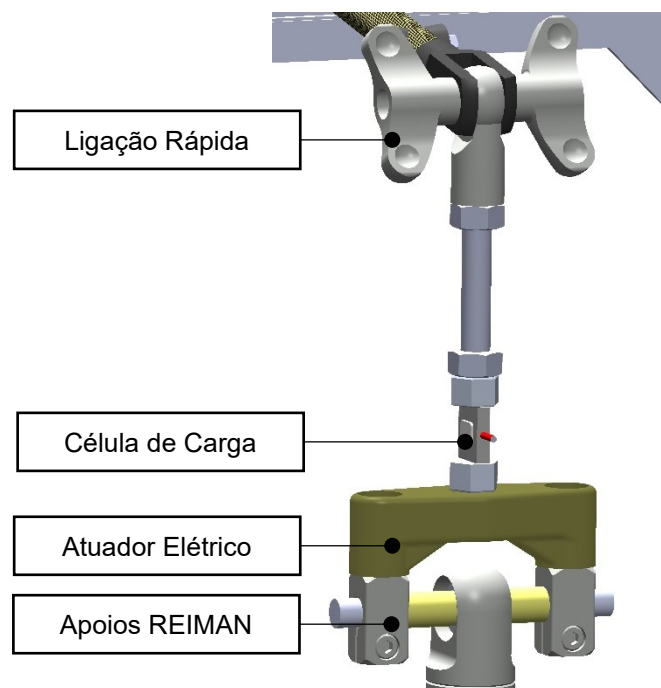


Figura 3.30 – Ligação do atuador elétrico aos braços.

3.3.4 Ligação do atuador elétrico aos braços

Nos testes preliminares do sistema, verificou-se uma vibração excessiva no movimento do atuador elétrico. Para eliminar este, foram criados espaçadores quer na ligação do atuador à estrutura quer na ligação aos braços, como se pode observar na Figura 3.31.

O movimento do atuador faz com que o sistema de ligação à célula de carga rode. Como o torque de aperto da célula de carga à sua porca de redução é baixo, o sistema estava em risco de desenroscar no movimento ascendente ou de partir a célula de carga no movimento descendente por estar a efetuar forças de corte na transversal. Para eliminar esse risco, criou-se uma espécie de garfo que impede a rotação do conjunto conforme está ilustrado na Figura 3.31, não afetando a medição da força pela célula de carga. A não rotação é atingida através de um sistema de porca-contraporca entre o garfo e duas porcas, uma superior e uma inferior, para impedir a rotação para os dois sentidos.

No futuro, podem ser aplicados casquilhos da IGUS nestas ligações de forma a eliminar atritos residuais, que afetam as medições realizadas ao sistema.

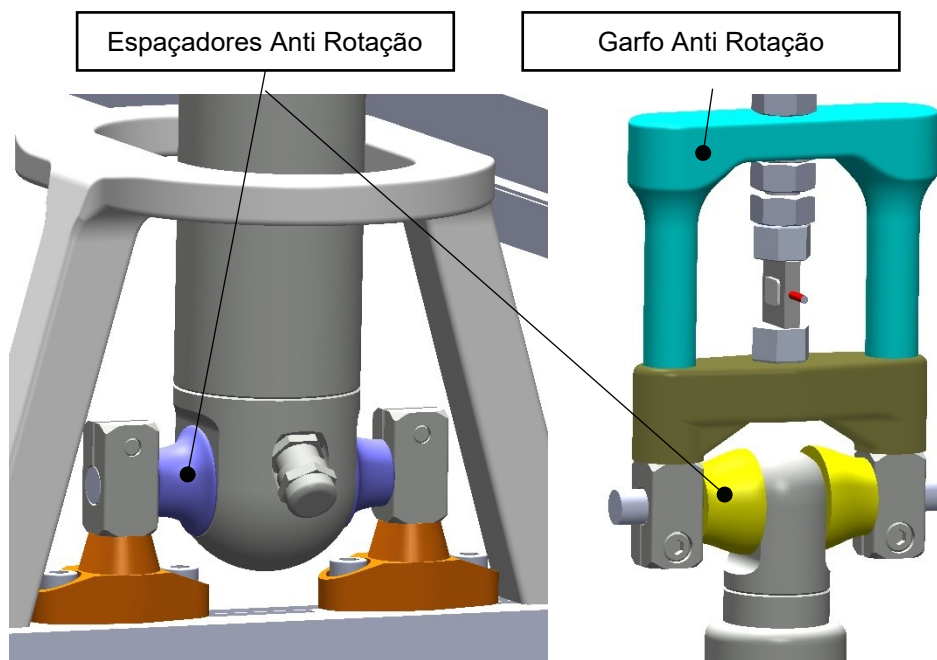


Figura 3.31 – Modificações ao sistema de fixação do atuador elétrico

3.4 Integração e ajustamento dos componentes

As peças em metal foram fabricadas pelo Núcleo de Oficinas do Instituto Superior Técnico (NOF/IST), que também providenciou apoio técnico no projeto das peças de todo o sistema. Na Figura 3.32 apresenta-se a plataforma fabricada em alumínio.



Figura 3.32 – Fabricação da plataforma à escala.

Na Figura 3.33 apresentam-se alguns pormenores construtivos da plataforma já fabricada, como a base soldada no fundo da coluna central e as aberturas nos tubos superiores laterais para a conexão dos braços dos WECs ao veio do sensor de rotação.



Figura 3.33 – Pormenores da plataforma à escala 1:70.

Na Figura 3.34 apresenta-se a base superior já fabricada, com os atuadores pneumáticos montados, e o seu aperto central.

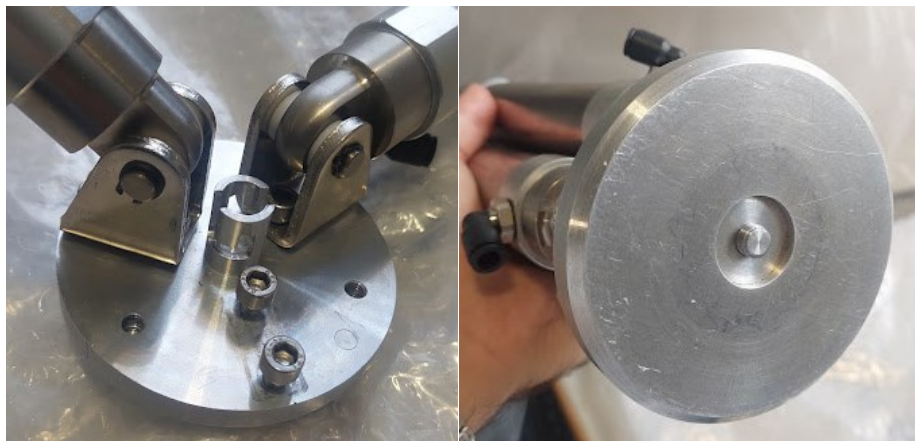


Figura 3.34 – Fabricação da base inferior e aperto.

Os desenhos técnicos das peças fabricadas em metal podem ser consultados no apêndice A – peças desenhadas.

A impressão dos braços, devido ao seu tamanho superior ao de impressoras com mesas de 200x200mm, também foi realizada pelo NOF que possui a capacidade de impressão até 400x400mm.

Inicialmente, todas as peças realizadas por FDM para a bancada de testes foram fabricadas com densidade de 15-20% para poupar material, caso houvesse alterações e fosse necessário reimprimir a peça. Desta forma, foi possível verificar fisicamente a viabilidade das peças e testá-las com confiança. Na figura 3.35 pode-se observar algumas das peças impressas em PLA.

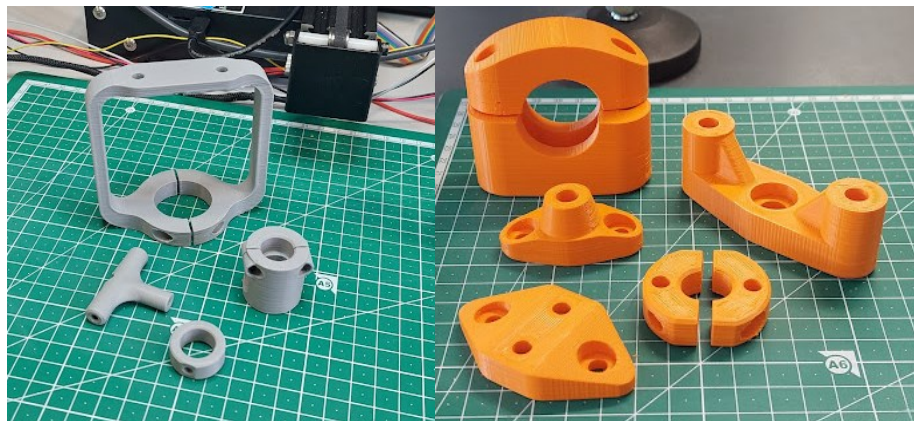


Figura 3.35 – Peças realizadas por impressão 3D.

Para a realização de aperto por rosca entre peças, foram utilizados *inserts* metálicos nas peças impressas, introduzidos a quente. O resultado final é apresentado na figura 3.36.



Figura 3.36 – Pormenor de *inserts* introduzidos nas peças impressas.

Na Figura 3.37 apresenta-se a montagem da estrutura base da bancada de testes, composta por perfis em alumínio.

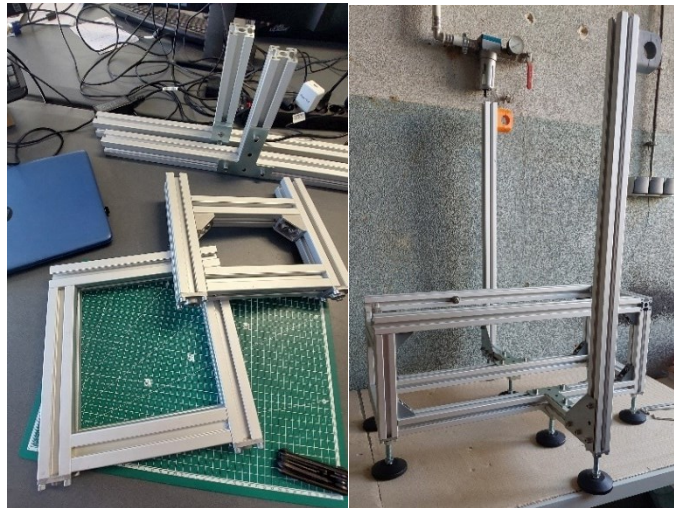


Figura 3.37 – Montagem da estrutura da bancada de testes.

Na Figura 3.38 apresenta-se a bancada de testes final, com todos os componentes e acessórios integrados. No seu lado esquerdo encontra-se o controlador e no seu lado direito encontra-se o computador anfitrião.



Figura 3.38 – Bancada de testes final.

Através dos pés de borracha ajustáveis em altura, é possível nivelar a plataforma, o que é realizado com o auxílio de níveis colocados em vários pontos da estrutura, como se mostra na Figura 3.39.



Figura 3.39 – Nível utilizado para nivelar a estrutura da bancada de testes.

Na Figura 3.40 apresenta-se a integração do sistema desenvolvido para o sensor de rotação, na extremidade do tubo de união das colunas verticais do modelo experimental da plataforma híbrida (Figura 3.40).

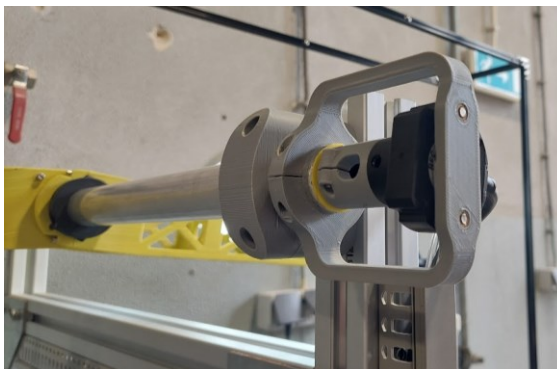


Figura 3.40 – Sensor de rotação integrado na bancada de testes.

Na Figura 3.41 é visível o sistema de ligação dos braços ao veio colocado no interior do tubo da bancada que permite a medição do movimento dos braços pelo sensor de rotação.

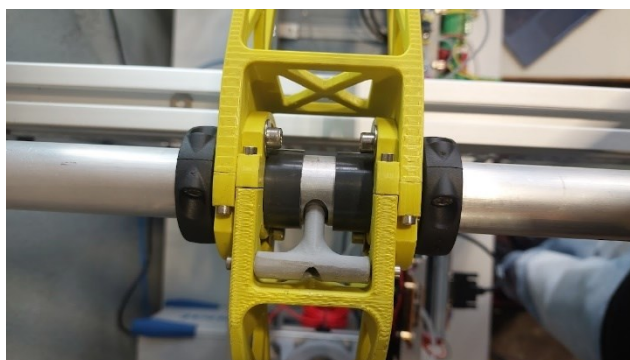


Figura 3.41 – Braços exterior e interior integrados na bancada de testes.

Na Figura 3.42 mostra-se a extremidade do braço exterior, onde está localizada a ligação ao atuador elétrico e o sistema do tubo extensível e os anéis de fixação do mesmo ao braço.



Figura 3.42 – Ligação entre o braço exterior e o atuador elétrico.

O compressor pneumático (pág. 50) é apresentado na Figura 3.43. Nos dois manômetros é possível verificar a pressão no interior do reservatório e a pressão definida para a linha de alimentação do sistema (0-6 bar).



Figura 3.43 – Compressor de ar com pressão regulável.

O circuito criado para a alimentação de ar comprimido (Figura 3.44) do sistema tem integradas uma válvula de corte para casos de emergência e uma válvula reguladora de pressão (Figura 3.45) para definir a pressão do ar de admissão nas válvulas proporcionais de regulação de pressão (pág. 48).

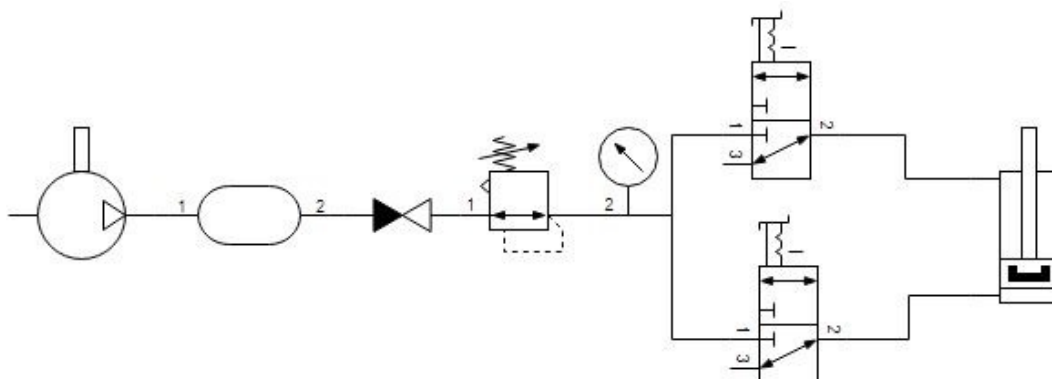


Figura 3.44 – Circuito pneumático.

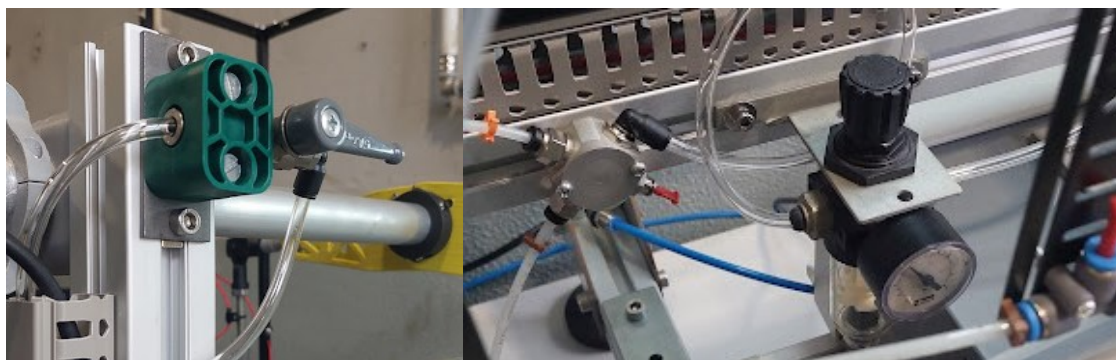


Figura 3.45 – Válvulas de corte e reguladora de pressão pneumática.

Na Figura 3.46 mostra-se a ligação pneumática ao atuador. De forma a serem facilmente identificáveis, todas as ligações estão numeradas.



Figura 3.46 – Ligação pneumática ao atuador pneumático.

Na Figura 3.47 mostram-se os componentes eletrônicos integrados na bancada de testes e suas fixações através de calhas DIN.

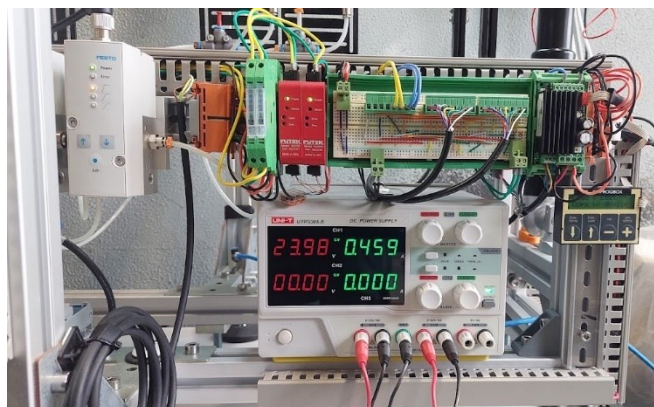


Figura 3.47 – Componentes eletrônicos integrados na bancada de testes.

Na Figura 3.48 apresenta-se o módulo de entradas e saídas analógicas integrado na bancada de testes, também fixo através de calhas DIN. O esquema de cores utilizado na realização das ligações elétricas, com o azul para as saídas analógicas, o amarelo para as entradas analógicas e o verde/preto para o negativo/neutro das ligações analógicas, pode ser visto na mesma figura.

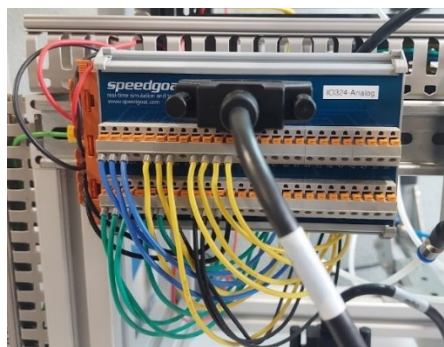


Figura 3.48 – Ligações elétricas ao módulo de entradas/saídas do controlador.

As calhas para arrumação de cabos vista (Figura 3.49) são utilizadas para evitar o perigo de interferência de algum cabo solto no movimento do sistema.

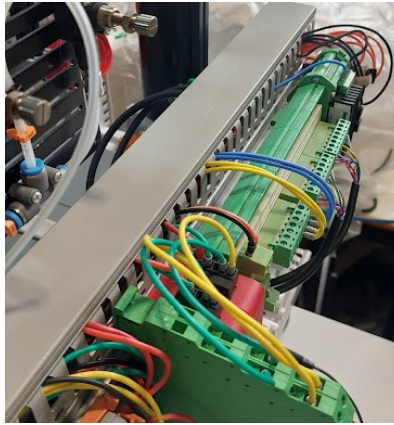


Figura 3.49 – Calha utilizada para arrumação de cabos elétricos.

A ligação da terra à bancada e aos componentes é realizada em pontos estratégicos onde existe continuidade através da fonte de alimentação, como se pode observar na Figura 3.50.

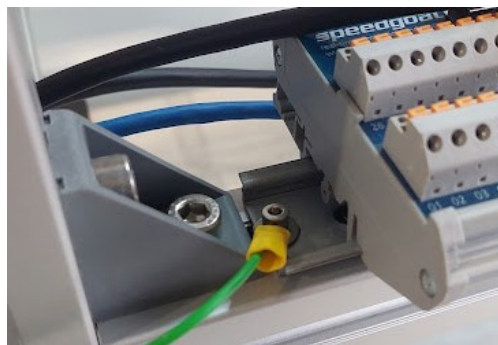


Figura 3.50 – Ligação terra à estrutura metálica da bancada de testes.

Na Figura 3.51 apresenta-se a *breadboard* utilizada para facilitar a conexão das ligações das válvulas proporcionais com o controlador. Para melhorar a integração na plataforma à escala, esta poderá ser transformada numa placa de circuitos integrados.

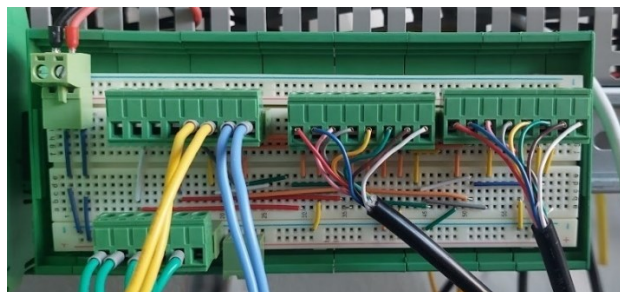


Figura 3.51 – *Breadboard* para ligação das válvulas pneumáticas.

Todo o sistema de controlo desenvolvido neste projeto terá de ser integrado numa estrutura semelhante à apresentada na Figura 3.52 de modo a ser introduzida nas colunas laterais da plataforma flutuante. Este trabalho encontra-se em desenvolvimento no âmbito de outro projeto.

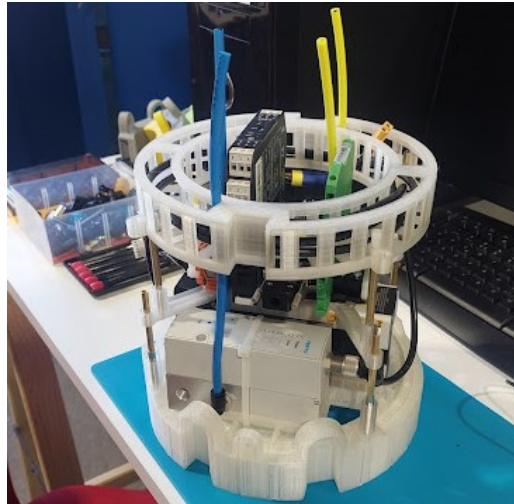


Figura 3.52 – Estrutura a integrar no interior da coluna lateral da plataforma flutuante. Esta estrutura integra o sistema testado na bancada de testes do WEC.

4 Controlo

Neste capítulo apresenta-se o desenvolvimento do controlo do WEC a integrar na plataforma flutuante, assim como o desenvolvimento do controlo envolvido na bancada de testes com a metodologia HIL.

Através da utilização de válvulas pneumáticas, é possível controlar o nível de amortecimento no atuador pneumático.

A força de amortecimento real é medida através da utilização de uma célula de carga, que permite verificar a força exercida no eixo do atuador pneumático.

A força de amortecimento de referência será definida pelo cálculo dependente da medição da velocidade linear do atuador pneumático e de um coeficiente de amortecimento de referência.

O sistema de testes em HIL é completado com o atuador elétrico, também controlado pelo RTSM, para simular diversos perfis de ondulação no lugar do flutuador. Este será controlado através da comparação da força medida por uma célula de carga na sua ligação aos braços com um perfil de força de excitação da onda de referência fornecida por Tiago Hallak (CENTEC/IST).

Através da afinação (*tuning*) dos controladores PID de ambos os conjuntos, o objetivo passa por obter um sistema capaz de reagir ao movimento do atuador elétrico, em conformidade com o nível de amortecimento desejado.

O controlo será efetuado tendo em conta um modelo criado em ambiente *Simulink/MATLAB*. Este pode correr em tempo real ligado diretamente ao controlador *Speedgoat RTSM*, e posteriormente pode ser convertido em linguagem *Hardware Description Language* (HDL) e ser aplicado diretamente ao módulo I/O com *Field-Programmable Gate Array* (FPGA), permitindo atingir taxas de amostragem muito superiores em relação ao caso anterior.

4.1 Controlador

Todos os sistemas comunicam e são controlados através do controlador *Speedgoat RTSM* através do módulo de comunicação IO324. Este sistema permite a integração com o ambiente *Simulink Real-Time* de forma a realizar simulações em tempo real em código C através do *CPU* do controlador.

O módulo IO324 é um FPGA programável, que permite, através da ferramenta *HDL Coder*, transformar o modelo criado em ambiente *Simulink* para linguagem HDL automaticamente, o que permite realizar simulações com taxas de amostragem até 100MHz diretamente no FPGA.

Na Figura 4.1 estão ilustrados os blocos necessários para a comunicação analógica ao *hardware*. Estes são os blocos de configuração global (*Setup*) e os de blocos específicos do sinal analógico (*Analog Setup*, *Analog Input* e *Analog Output*).

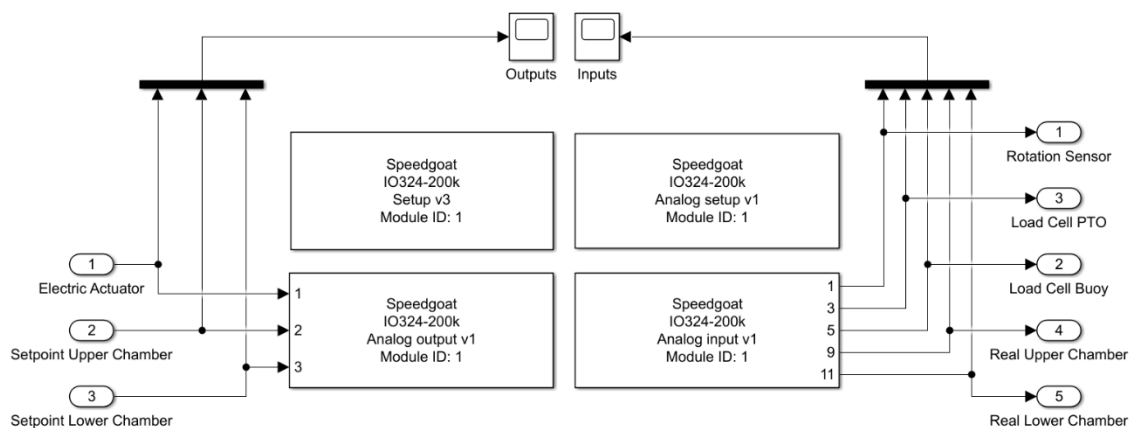


Figura 4.1 – Subsistema referente aos blocos de configuração de *Speedgoat*.

No bloco principal de configuração (*Setup*) define-se o tipo de carta de comunicação que se vai utilizar (IO324) e o tipo de comunicação (*Rapid Control Prototyping (RCP)*, *HIL* ou *Comms*). Para testes rápidos, é aconselhável a utilização de *RCP*, de forma a poupar recursos e tempo de execução. Depois de realizados os testes iniciais, é aconselhável a utilização de *HIL* uma vez que fornece uma melhor resposta para testes em tempo real.

Na Figura 4.2 pode ser verificado o mapa de ligações (*pin mapping*) disponibilizado pela *Speedgoat* referente à carta de ligações analógicas do IO324. As entradas analógicas podem ser tanto simples (*single*) como diferenciais (*differential*), enquanto que as saídas são apenas simples.

Terminal board 2: analog I/O

Pin	Single-ended	Differential	Analog	Pin	Single-ended	Differential	Analog
1	Ground			26	Analog output 01	-	
2	Ground			27	Analog output 02	-	DAC 01
3	Ground			28	Analog output 03	-	
4	Ground			29	Analog output 04	-	
5	Analog input 02	Analog input 01 (-)		30	Analog input 01	Analog input 01 (+)	
6	Analog input 04	Analog input 03 (-)	ADC 01	31	Analog input 03	Analog input 03 (+)	
7	Analog input 06	Analog input 05 (-)		32	Analog input 05	Analog input 05 (+)	ADC 01
8	Analog input 08	Analog input 07 (-)		33	Analog input 07	Analog input 07 (+)	
9	Analog input 10	Analog input 09 (-)		34	Analog input 09	Analog input 09 (+)	
10	Analog input 12	Analog input 11 (-)	ADC 02	35	Analog input 11	Analog input 11 (+)	
11	Analog input 14	Analog input 13 (-)		36	Analog input 13	Analog input 13 (+)	ADC 02
12	Analog input 16	Analog input 15 (-)		37	Analog input 15	Analog input 15 (+)	
13	Ground			38	Analog output 05	-	
14	Ground			39	Analog output 06	-	DAC 02
15	Ground			40	Analog output 07	-	
16	Ground			41	Analog output 08	-	
17	Analog input 18	Analog input 17 (-)		42	Analog input 17	Analog input 17 (+)	
18	Analog input 20	Analog input 19 (-)		43	Analog input 19	Analog input 19 (+)	
19	Analog input 22	Analog input 21 (-)	ADC 03	44	Analog input 21	Analog input 21 (+)	
20	Analog input 24	Analog input 23 (-)		45	Analog input 23	Analog input 23 (+)	
21	Analog input 26	Analog input 25 (-)		46	Analog input 25	Analog input 25 (+)	
22	Analog input 28	Analog input 27 (-)	ADC 04	47	Analog input 27	Analog input 27 (+)	
23	Analog input 30	Analog input 29 (-)		48	Analog input 29	Analog input 29 (+)	ADC 04
24	Analog input 32	Analog input 31 (-)		49	Analog input 31	Analog input 31 (+)	
25	Ground			50	Ground		

Figura 4.2 – Mapa de ligações da carta analógica do IO324 da *Speedgoat*.

Já no bloco de configuração analógica (*Analog Setup*), referente ao IO324, é necessário definir a taxa de amostragem que irá ser efetuada pelos inputs. Para os outputs, definiu-se uma taxa de resposta igual à do modelo (100 kHz). Nesta também se definem os inputs e outputs a utilizar, assim como as suas bandas de leitura/resposta. Para o controlo da bancada, são utilizados 5 inputs e 3 outputs analógicos, todos na faixa dos 0-10V, como se pode observar na Tabela 4.1 e 4.2. Os blocos de entradas analógicas (*Analog Inputs*) e saídas analógicas (*Analog Outputs*) são utilizados para ligação de sinais.

Tabela 4.1 – Entradas analógicas utilizados pelo modelo.

Entradas analógicas (0-10V)	Pin U+	Pin U-
Sensor de Rotação	30	5
Célula de Carga do PTO	31	6
Célula de Carga do Atuador Elétrico	32	7
Sensor Pressão VPPM (Superior)	34	9
Sensor Pressão VPPM (Inferior)	35	10

Tabela 4.2 – Saídas analógicas utilizados pelo modelo.

Saídas analógicas (0-10V)	Pin U _{out}	Pin GND
Válvula Pneumática PTO (Superior)	26	1
Válvula Pneumática PTO (Inferior)	27	2
Atuador Elétrico	28	3

4.2 Controlo do atuador elétrico

Na Figura 4.3 apresenta-se a malha de controlo do atuador elétrico.

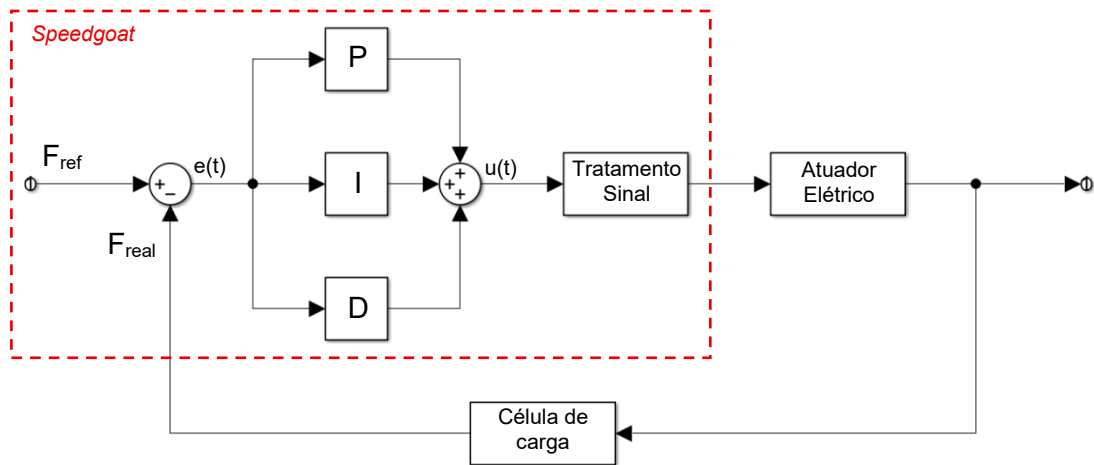


Figura 4.3 – Malha de controlo para o atuador elétrico. Legenda: (F_{ref}) Força de excitação da onda de referência, (F_{real}) Força de excitação da onda medida, ($e(t)$) Erro medido em tempo real e ($u(t)$) sinal processado pelo controlador PID.

A força de referência é retirada de valores tabelados de força de excitação da onda ao longo do tempo ($F_{ref}^{onda\ real}$) à escala de 1:1. Tiago Hallak (CENTEC/IST) forneceu o ficheiro *Time_Domain_Generate_Force_Series.m* para gerar a força de excitação das ondas consoante cinco níveis de intensidade e para perfis regular ou irregular. Sara Lilloni [65] desenvolveu o ficheiro *Fwave_10_lookup_tables.slx* em *Simulink* que permite selecionar as diversas opções de força de excitação (Figura 4.4).

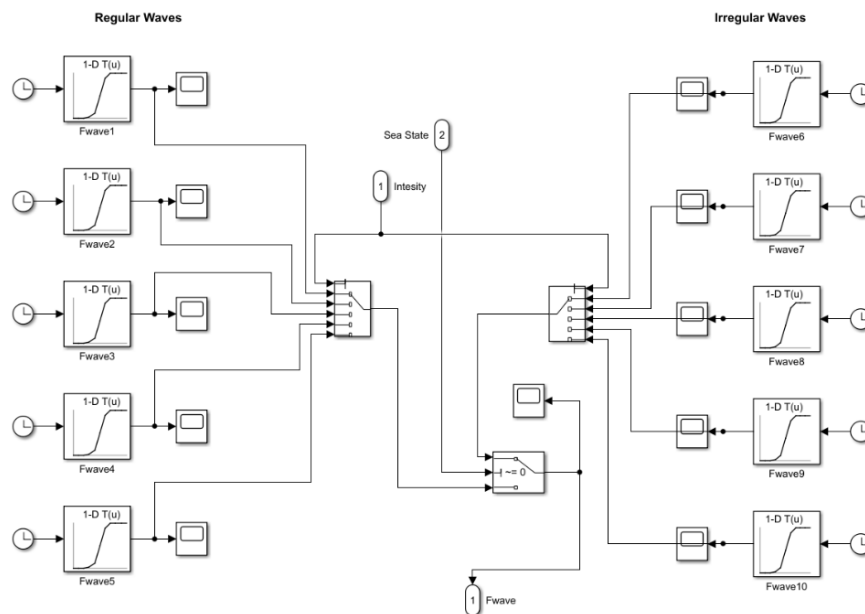


Figura 4.4 – Subsistema adaptado do ficheiro *Fwave_10_lookup_tables.slx* para criação de perfil de força de excitação da onda de referência. Adaptado de [65].

A força simulada é gerada à escala real, pelo que a força de referência a utilizar (F_{ref}^{onda}) pode ser obtida aplicando o fator de escala de 1:70 (λ), elevado ao coeficiente de escala para grandezas de força (n), conforme a equação 4.1.

$$F_{ref}^{onda}(t) = \frac{1}{\lambda^n} \cdot F_{ref}^{onda\ real}(t) = \frac{1}{70^3} \cdot F_{ref}^{onda\ real}(t) \quad (4.1)$$

Na Figura 4.5, apresenta-se a malha fechada do atuador elétrico aplicada em ambiente *Simulink*.

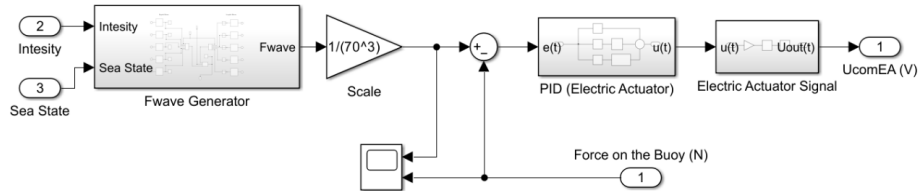


Figura 4.5 – Malha de controlo do atuador elétrico.

Para testes iniciais da resposta do atuador elétrico, optou-se pelo controlo através de um valor fixo ou também através de uma sinusoidal, como se observa na Figura 4.6.

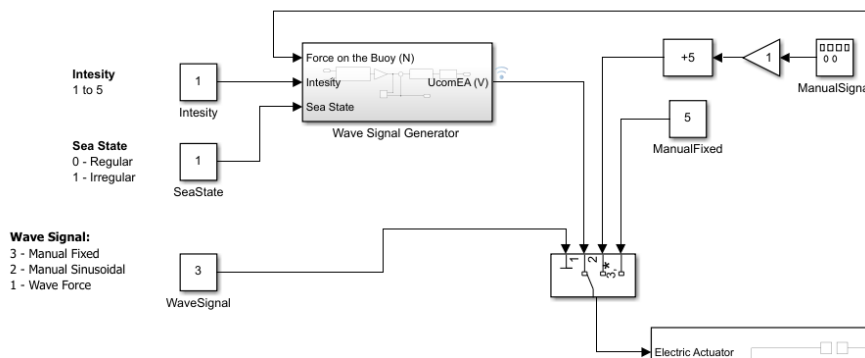


Figura 4.6 – Opções de controlo do atuador elétrico.

A força real efetuada pelo atuador elétrico (F_{real}^{onda}) será medida pela célula de carga (FUTEK LSB210 [66]), instalada entre a ligação da haste do atuador ao braço do WEC. O sinal obtido é condicionado por um amplificador dedicado (FUTEK IAA200 [67]) com resposta de 4-20 mA. Uma vez que o módulo de entradas analógicas IO324 apenas aceita sinais em tensão, foi utilizada uma carta de transformação (Phoenix MINI MCR-SL-UI-UI-NC [68]), com entrada de 4-20 mA e saída de 0-10 V.

Antes da sua utilização, procedeu-se à calibração da célula de carga, através do ajuste do seu valor de zero através de um potenciómetro. De seguida, através da utilização de uma massa calibrada de 514 g, foi ajustada a gama de resposta da célula de carga (amplitude ou *span*), através de outro potenciómetro para os 5,10 V. Depois de realizado, retira-se a carga e ajusta-se de novo o zero se necessário. Para as células de carga, através da calibração realizada, garantiu-se que, para uma massa calibrada de 514 g, se obtinha uma leitura de 5,10 V, em comparação com os 5,00 V da célula sem peso aplicado. O ganho das células de carga (K_{CC}) é definido pela equação 4.2.

$$K_{CC} = g \cdot \frac{\Delta m}{\Delta U} = 9.81 \cdot \frac{0,514-0,000}{5,10-5,00} [N/V] \quad (4.2)$$

onde g é a aceleração gravítica, Δm é a diferença entre a presença e a ausência de uma massa calibrada e ΔU é a diferença entre diferença de potencial nos dois casos.

Para a obtenção do valor da força real efetuada pelo atuador elétrico (F_{real}^{onda}) em função do sinal em diferença de potencial proveniente da carta de transformação associada à célula de carga ($U(t)$) é necessário ter em conta os 5 V de desvio (*offset*) e o ganho da célula, como se observa na equação 4.3. Na Figura 4.7 ilustra-se a implementação desta equação 4.3 em ambiente *Simulink*.

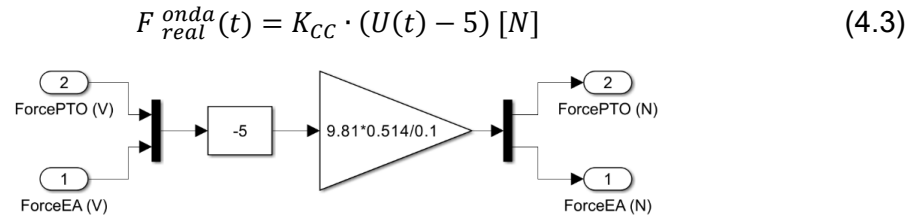


Figura 4.7 – Tratamento de sinal das células de carga.

Para a entrada no PID, deve ser calculado o erro ($e(t)$) entre o valor de referência e o valor real medido pela célula de carga, conforme a equação 4.4. Através da medição deste será é calculado posteriormente pelo PID o valor a ser introduzido no atuador elétrico.

$$e(t) = F_{ref}^{onda}(t) - F_{real}^{onda}(t) \quad (4.4)$$

Como se pode observar na Figura 4.8, o controlador PID implementa-se através da conjugação dos blocos individuais de ganho, de derivação e de integração. Estes blocos têm de ser discretos para que o modelo seja executado em tempo real no módulo FPGA.

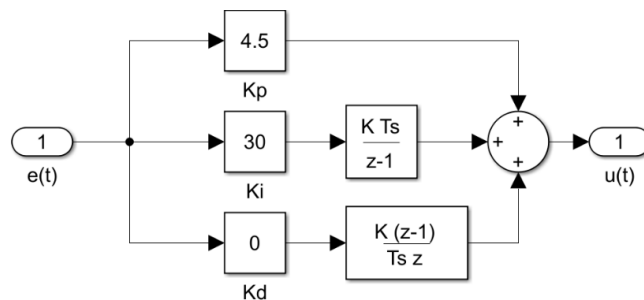


Figura 4.8 – Controlador PID aplicado em ambiente *Simulink*. Legenda: (Kp) ganho proporcional, (Ki) ganho integral, (Kd) ganho derivativo, (Ts) tempo de amostragem.

O atuador elétrico (BANSBACH easyE-50 [69]) tem uma amplitude máxima de 100 mm, para permitir a adaptação da sua amplitude de trabalho consoante os deslocamentos máximos pretendidos no braço exterior do WEC. Através do seu controlador dedicado (BANSBACH EEL S2-2 [70]) realizam-se as ligações elétricas e é possível conectar o programador próprio (BANSBACH S2-PROG [71]), para ajustar parâmetros como amplitudes máxima e mínima ou velocidade máxima de deslocamento.

4.3 Controlo do atuador pneumático

Para o atuador pneumático, é necessário criar uma malha de fechada para ser possível controlar as duas válvulas proporcionais, por forma a atingir o valor de referência para a força de amortecimento, como se mostra na Figura 4.9.

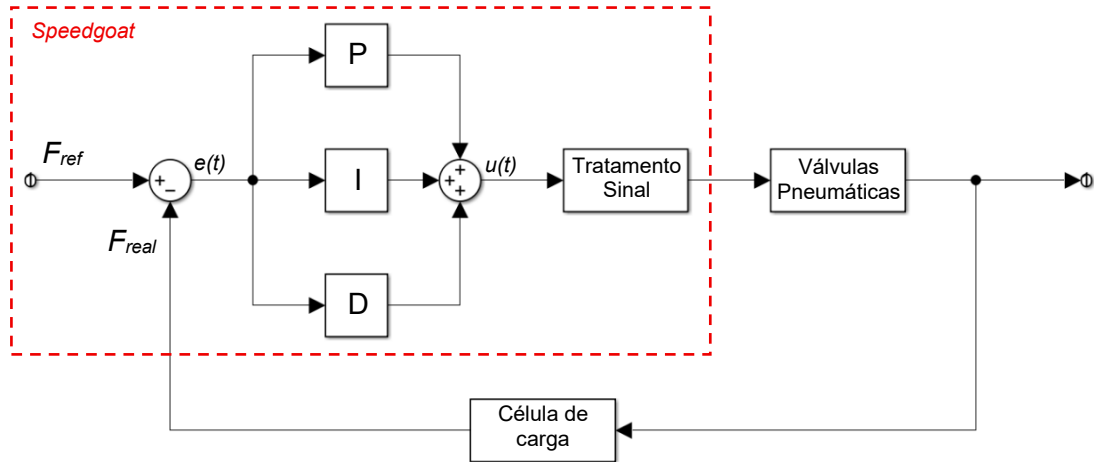


Figura 4.9 – Malha de controlo das válvulas pneumáticas. Legenda: (F_{ref}) Força de amortecimento de referência, (F_{real}) Força de amortecimento medida, ($e(t)$) Erro medido em tempo real e ($u(t)$) sinal processado pelo controlador PID.

A medição do movimento angular dos braços é realizada pelo sensor de rotação (NOVOTECHNIK RFC-4800 [72]). Ao utilizar tecnologia *hall*, a leitura do ângulo é realizada sem atrito. O sensor apresenta uma amplitude (A) de 30° e uma resposta linear de 0-10V. Considerou-se os 5 V como os 0° do braço interior em relação à plataforma, com uma amplitude de 15° para cada lado. O ganho do sensor (K_{SR}) pode ser calculado conforme a equação 4.5.

$$K_{SR} = \frac{A}{U_{max} - U_0} = \frac{30}{10 - 0} = 3 \text{ [}^\circ/V\text{]} \quad (4.5)$$

Para a obtenção do ângulo dos braços ($\theta(t)$) em função do sinal em tensão proveniente do sensor de rotação ($U(t)$) é necessário ter em conta os 5 V de desvio (*offset*) e o ganho do sensor, conforme a equação 4.6. Na Figura 4.10 apresenta-se a implementação da equação 4.6 em ambiente *Simulink*.

$$\theta(t) = K_{SR} \cdot (U(t) - 5) \text{ [}^\circ\text{]} \quad (4.6)$$

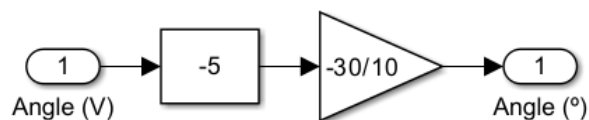


Figura 4.10 – Tratamento do sinal do sensor de rotação.

A velocidade angular dos braços ($\dot{\theta}(t_n)$) é obtida através da derivação do ângulo dos mesmos ($\theta(t)$), conforma mostra a Equação 4.7.

$$\dot{\theta}(t_n) = \frac{2\pi}{360} \cdot \frac{\theta(t_n) - \theta(t_{n-1})}{T_s} \text{ [rad/s]} \quad (4.7)$$

onde $(\theta(t_n))$ é o ângulo dos braços no momento, $(\theta(t_{n-1}))$ é o ângulo dos braços no momento anterior e (T_s) é o período de amostragem.

Assumindo que o movimento do atuador pneumático é praticamente vertical, a velocidade linear do êmbolo do atuador $(\dot{x}(t))$ pode ser calculada através da multiplicação da velocidade angular dos braços $\dot{\theta}(t)$ com a distância \overline{OA} entre o centro de rotação destes e a ligação ao atuador pneumático, conforme a equação 4.8.

$$\dot{x}(t) = \dot{\theta}(t) \cdot \overline{OA} \text{ [m/s]} \quad (4.8)$$

A força de amortecimento de referência $(F_{ref}^{amort.})$ é calculada em função do valor de coeficiente de amortecimento de referência (c_{ref}) e da velocidade linear do êmbolo ao longo do tempo, como se pode observar na equação 4.9. Para a escala utilizada de 1:70, é espectável que os coeficientes de amortecimento de referência a ser testados estejam entre os 15 e 22 N.s/m².

$$F_{ref}^{amort.}(t) = \dot{x}(t) \cdot c_{ref} \text{ [N]} \quad (4.9)$$

Na Figura 4.11 apresenta-se o subsistema para a obtenção da força de amortecimento de referência aplicado em ambiente *Simulink*.

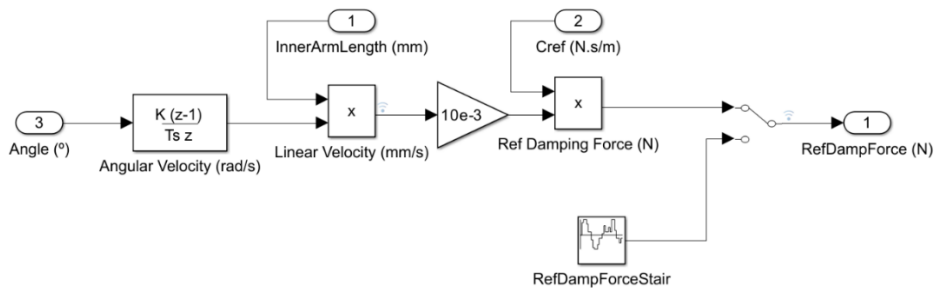


Figura 4.11 – Cálculo da velocidade linear do atuador pneumático.

Na equação 4.10, pode-se observar a obtenção da força medida no atuador $(F_{real}^{amort.})$ através da resposta da célula de carga colocada na extremidade da haste do atuador.

$$F_{real}^{amort.}(t) = K_{CC} \cdot (U(t) - 5) \text{ [N]} \quad (4.10)$$

As válvulas proporcionais reguladoras de pressão (FESTO VPPM [73]) são controladas para regular o nível de amortecimento do sistema. Estas permitem uma regulação de pressão entre os 0,06-6 bar, através da resposta de entrada entre os 0-10 V. As válvulas possuem controlo interno com três níveis possíveis de resposta, e fornecem o seu valor atual de pressão através de um sinal de saída de 0-10 V.

O ganho dos sensores de pressão (K_{SP}) presentes no interior das válvulas pneumáticas pode ser calculado conforme a equação 4.11.

$$K_{SP} = \frac{P_{max} - P_{min}}{U_{max} - U_{min}} = \frac{6 - 0}{10 - 0} = 0,6 \text{ [bar/V]} \quad (4.11)$$

onde (P_{max}) é a pressão máxima de regulação, (P_{min}) é a pressão mínima de regulação, (U_{max}) é a tensão máxima de resposta e (U_{min}) é a tensão mínima de resposta.

Na equação 4.13 mostra-se que a força efetuada pelo atuador pode ser obtida através da medição da diferença de pressão entre as duas câmaras ($P(t)$) utilizando a equação 4.12, e das áreas de atuação do êmbolo.

$$P(t) = K_{SP} \cdot (U(t) - U_0) \text{ [bar]} \quad (4.12)$$

$$F_{real}^{amort.}(t) = P_L(t) \cdot A_L - P_U(t) \cdot A_U \text{ [N]} \quad (4.13)$$

onde ($P_L(t)$) é a pressão na câmara inferior, (A_L) é a área do êmbolo na câmara inferior, ($P_U(t)$) é a pressão na câmara superior e (A_U) é a área do êmbolo na câmara superior. Na Figura 4.12, apresenta-se o subsistema para o cálculo da força exercida pelo atuador através das pressões medidas pelos sensores das válvulas pneumáticas. Para o efeito é necessário calcular as áreas de cada lado do êmbolo do atuador pneumático, como se pode observar na Figura 4.13, e a pressão no interior de cada câmara, conforme a Figura 4.14.

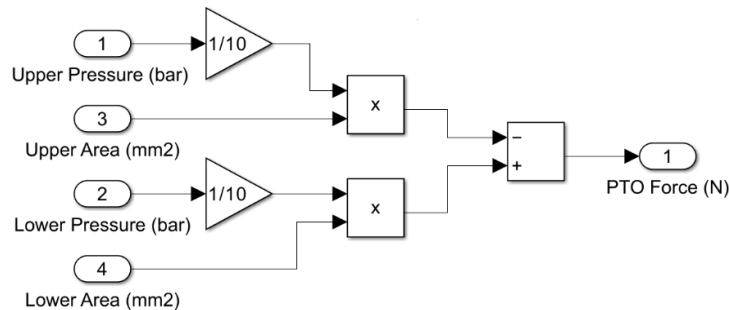


Figura 4.12 – Cálculo da força no atuador pneumático através das pressões.

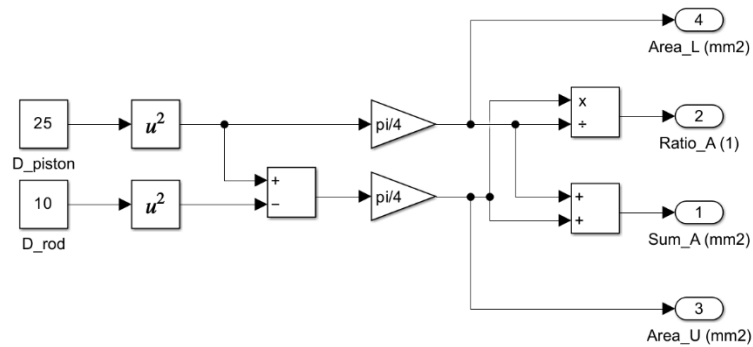


Figura 4.13 – Cálculo das áreas do atuador pneumático.

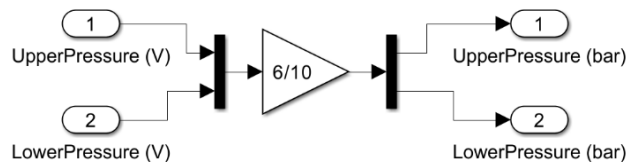


Figura 4.14 – Tratamento de sinal dos sensores de pressão.

Os atuadores pneumáticos (SMC MQMLC25-100D [74]), controlados pelas válvulas pneumáticas, possuem uma pressão de funcionamento de 0,05-7 bar e um baixo coeficiente de fricção na sua lateral. Cada atuador é conectada a duas válvulas pneumáticas, uma para cada câmara do atuador.

Para a alimentação de ar comprimido, foi utilizado um compressor com reservatório de 6L e com pressão de funcionamento ajustável até 8 bar (STANLEY FATMAX [75]).

Através da medição do erro $e(t)$ entre os sinais de referência e real, é calculado pelo controlador PID o valor do sinal de controlo conforme a equação 4.14.

$$e(t) = F_{ref}^{amort.}(t) - F_{real}^{amort.}(t) [N] \quad (4.14)$$

O sinal de controlo $u(t)$ terá no entanto de ser processado antes de ser enviado para as válvulas proporcionais reguladoras de pressão (Equação 4.15). Assim, obtém-se o diferencial de pressão $\Delta P(t)$ entre as duas válvulas correspondente à diferença de força que resulta do processamento do PID ($\Delta F_{amort}(t)$) e que deve ser aplicada nas duas câmaras, como se mostra na equação 4.16.

$$e(t) \rightarrow PID \rightarrow u(t) \quad (4.15)$$

$$\Delta P(t) = \frac{\Delta F_{amort}(t)}{A_U + A_L} = \frac{u(t)}{A_U + A_L} \quad (4.16)$$

Na Figura 4.15 apresenta-se a malha de controlo para as válvulas pneumáticas aplicada em ambiente *Simulink*. O sinal proveniente do PID tem de ser tratado de acordo com as equações mostradas no subcapítulo anterior. Existe também a opção de comutar entre os dois tipos de medição de força real disponíveis (célula de carga ou sensores de pressão) ou entre os dois tipos de pressão de comando a introduzir nas válvulas (ambas as câmaras ou apenas uma câmara).

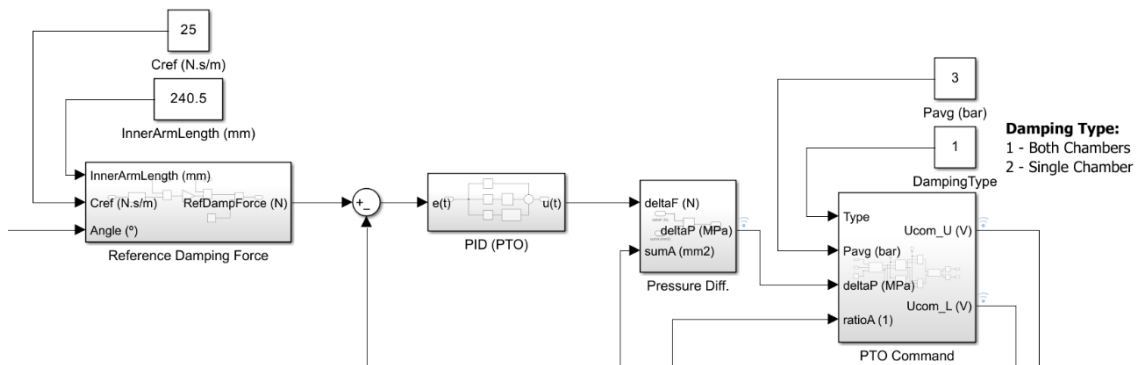


Figura 4.15 – Malha de controlo das válvulas pneumáticas aplicado em ambiente *Simulink*.

Adicionalmente, deve ser considerada uma pressão média P^{AVG} para cada câmara. Esta deve ser calculada tendo em conta uma resultante de forças nula por parte do atuador pneumático quando o erro é nulo. Conforme se pode verificar na equação 4.17, este equilíbrio resulta principalmente da razão entre áreas de atuação do êmbolo em cada câmara, e adicionalmente alguma pressão de compensação (P_C) existente por parte do peso do conjunto a afetar o movimento do atuador.

$$F_U - F_L = 0 \leftrightarrow P_U \cdot A_U - P_L \cdot A_L = 0 \leftrightarrow P_L = \frac{A_U}{A_L} \cdot P_U \rightarrow \begin{cases} P_U^{AVG} = P_{AVG} \\ P_L^{AVG} = \frac{A_U}{A_L} \cdot P_{AVG} + P_C \end{cases} \quad (4.17)$$

Relativamente ao valor das pressões de comando $P^C(t)$ das válvulas, existem duas formas possíveis de as determinar, ou através da aplicação do diferencial de pressão às duas câmaras em simultâneo (Equação 4.18) ou apenas uma câmara com a outra câmara em pressão constante (Equação 4.19).

$$\begin{cases} P_U^C(t) = P_U^{AVG} - \frac{\Delta P(t)}{2} \\ P_L^C(t) = P_L^{AVG} + \frac{\Delta P(t)}{2} \end{cases} \quad (4.18)$$

$$\begin{cases} P_U^C(t) = P_U^{AVG} \\ P_L^C(t) = P_L^{AVG} + \Delta P(t) \end{cases} \quad (4.19)$$

Na Figura 4.16 está presente a lógica de cálculo para calcular a pressão de comando a introduzir nas válvulas.

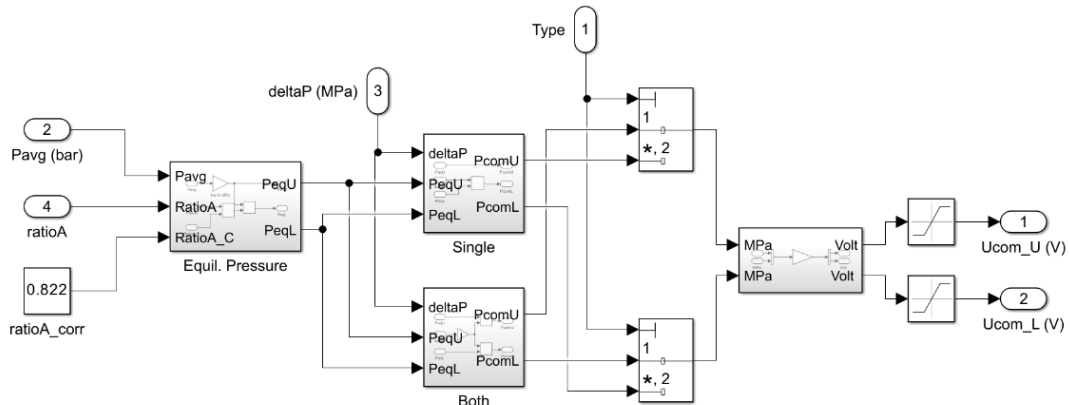


Figura 4.16 – Subsistema para cálculo da pressão de comando para as válvulas pneumáticas.

Depois de saturados, os valores são direcionados para as válvulas pneumáticas, fechando a malha. Estas possuem uma alternativa de controlo de forma a testar a resposta destas num ponto fixo de pressão, conforme se apresenta na Figura 4.17.

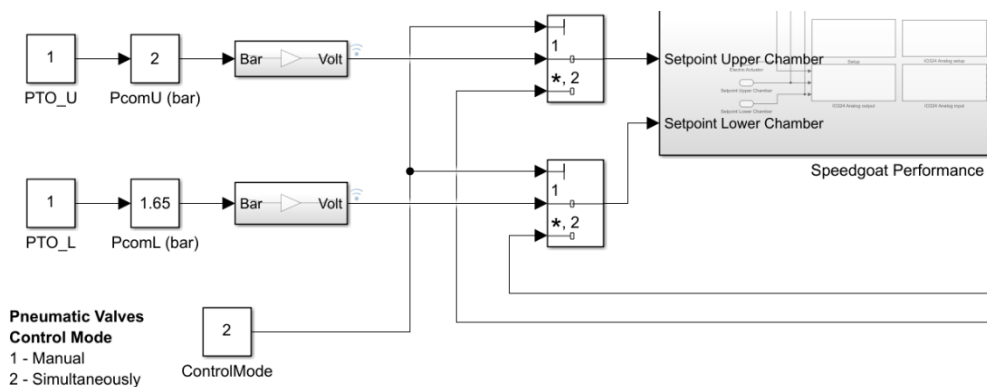


Figura 4.17 – Opções de controlo das válvulas pneumáticas.

5 Testes e Resultados Experimentais

5.1 Ensaio do Sensor de Rotação

Ao colocar o sensor de rotação em funcionamento, verificou-se a presença de ruído devido ao movimento brusco do atuador elétrico, principalmente na mudança de direção de sentido, o que por sua vez criava uma grande discrepância no valor da velocidade angular calculada através da derivação do ângulo medido. Para resolver esse problema, foi implementado um filtro da mediana (*median filter*) em ambiente *Simulink*, uma solução simples e de baixo custo computacional que seria suficiente para a suavização dos picos.

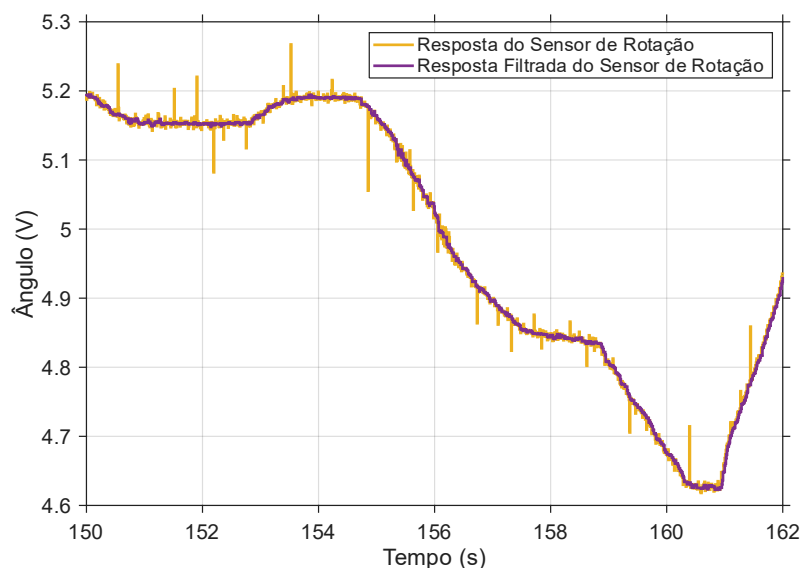


Figura 5.1 – Filtro de mediana aplicado ao sinal do sensor de rotação em ambiente *Simulink*

Depois de testadas várias janelas de resposta (5-50 pontos de amostragem), verificou-se que a utilização de uma janela com 15 pontos de amostragem é o suficiente para evitar o ruído sem atraso do sinal, preservando a dinâmica do sistema de medição (Figura 5.1).

5.2 Ensaio do PTO

Com o objetivo de ajustar iterativamente os parâmetros do controlador PID das válvulas pneumáticas, efetuaram-se testes com o atuador elétrico imobilizado e sob condições de baixa pressão média. Inicialmente, foi considerada uma pressão média de 1 bar, tendo-se realizado uma sequência de degraus (*steps*) de força de amortecimento de referência para simular a força de amortecimento pretendida.

Após um processo de afinação dos parâmetros do controlador, obteve-se uma resposta satisfatória, conforme se apresenta na Figura 5.2.

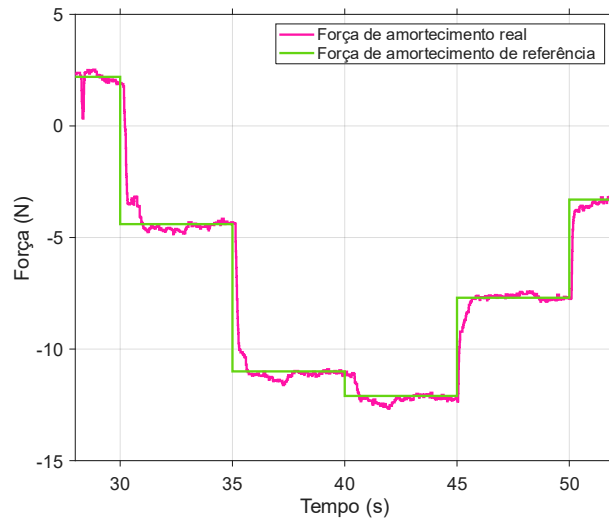


Figura 5.2 – Ensaio à PTO através da utilização de uma sequência de degraus de força de amortecimento de referência.

Verificou-se que a introdução de um ganho derivativo no controlador provocava instabilidade no sistema, devido à amplificação do ruído presente no sinal da célula de carga. Por este motivo, optou-se pela utilização apenas de ganhos proporcionais e ganho integrativos, cujos valores finais se apresentam na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Parâmetros finais do controlador das válvulas pneumáticas.

Parâmetro	K _p	K _i	K _d
Valor	4	31	-

Posteriormente, com o objetivo de avaliar o desempenho do controle em condições dinâmicas, realizaram-se ensaios com o atuador elétrico em movimento, executando um sinal sinusoidal de amplitude fixa para simular ondas regulares. A força de referência foi determinada a partir do cálculo efetuado com base no ângulo dos braços do mecanismo. Foram conduzidos diversos testes, variando os coeficientes de amortecimento de referência entre 150 e 18 N.s/m² e as pressões médias de operação entre 0,5 e 1,5 bar, de modo a analisar a influência destes parâmetros na resposta do sistema, e adicionalmente ambos os métodos de controle de pressão da PTO.

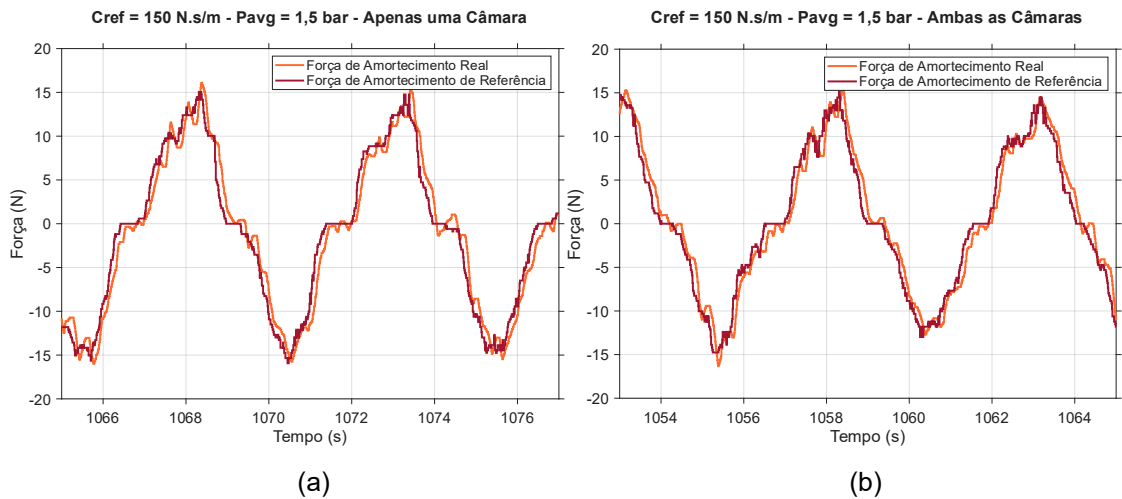


Figura 5.3 – Ensaio dinâmico à PTO ($C_{ref} = 150 \text{ N.s/m}$ / $P_{avg} = 1,5 \text{ bar}$): (a) Apenas uma câmara; (b) Ambas as câmaras.

Ao analisar a Figura 5.3a e a Figura 5.3b verifica-se um comportamento semelhante entre o comportamento do PTO com o controlo de ambas as câmaras ou de apenas uma câmara com a outra fixa.

Verifica-se a instabilidade no equilíbrio de pressões quando a força se aproxima de 0 N, ou seja, quando o atuador pneumático inverte o sentido. Tal fenómeno ocorre porque, durante a inversão, a pressão aplicada necessita inicialmente de vencer o atrito estático, passando posteriormente a atuar apenas contra o atrito dinâmico, de menor magnitude e praticamente nulo.

Na Figura 5.4 observa-se que a utilização de pressões médias mais baixas (0,5 bar), em comparação com outras mais elevadas, não afeta a eficácia do controlo da PTO para coeficientes de amortecimento de referência elevados.

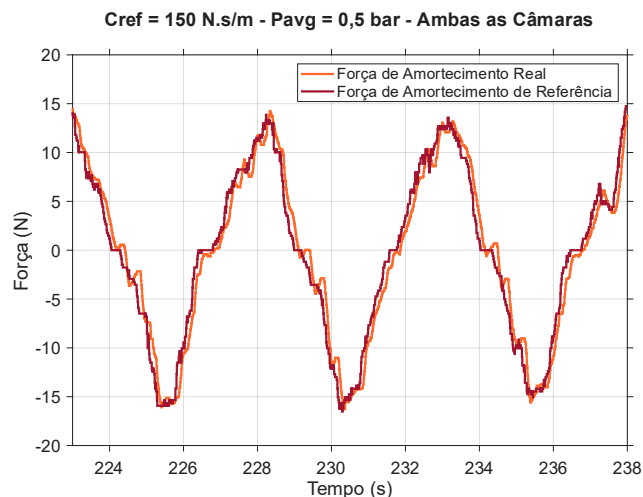


Figura 5.4 – Ensaio dinâmico à PTO ($C_{ref} = 150 \text{ N.s/m}$ / $P_{avg} = 0,5 \text{ bar}$ / Ambas as câmaras).

Na Figura 5.5 verifica-se que para coeficientes de amortecimento de referência mais baixos, e portanto menores forças de amortecimento de referência, o sistema não é tão eficiente.

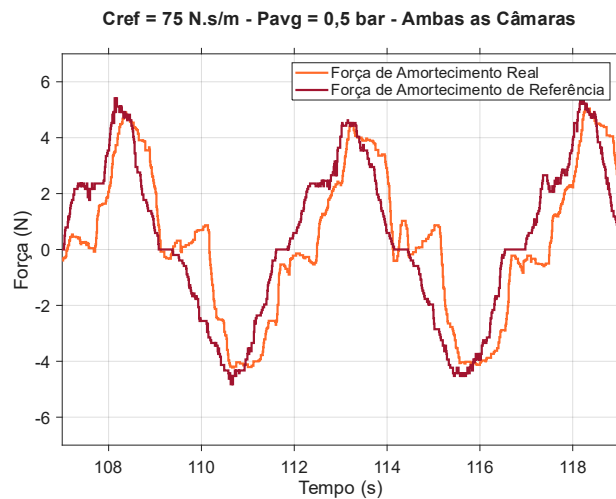


Figura 5.5 – Ensaio dinâmico à PTO ($C_{ref} = 75 \text{ N.s/m}$ / $P_{avg} = 0,5 \text{ bar}$ / Ambas as câmaras).

Ao observar a Figura 5.6a e a Figura 5.6b, observa-se uma elevada instabilidade na resposta do controlador com coeficientes de amortecimento de referência próximos dos previstos para a plataforma experimental. Esta deve-se também à resolução da célula de carga, que não permite a leitura de forças com as amplitudes testadas com fiabilidade e fluidez.

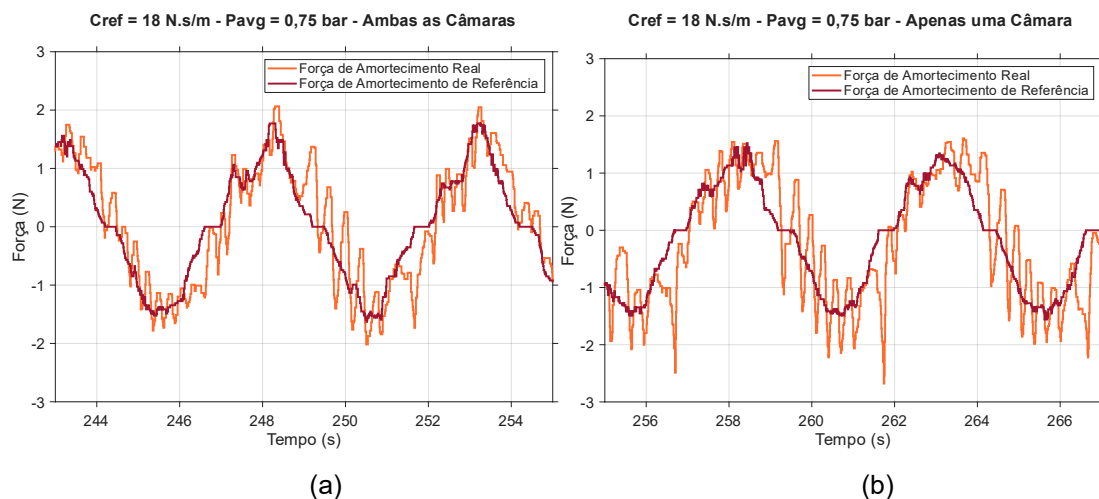


Figura 5.6 – Ensaio dinâmico à PTO ($C_{ref} = 18 \text{ N.s/m}$ / $P_{avg} = 0,75 \text{ bar}$): (a) Apenas uma câmara; (b) Ambas as câmaras.

Através da observação das mesmas figuras verifica-se que os picos de instabilidade no controlo aquando da inversão de sentido do atuador pneumático influenciam mais em forças menores por serem independentes da força de amortecimento de referência. Pode-se observar na Figura 5.7 que a instabilidade diminui com a utilização de pressões médias mais elevadas.

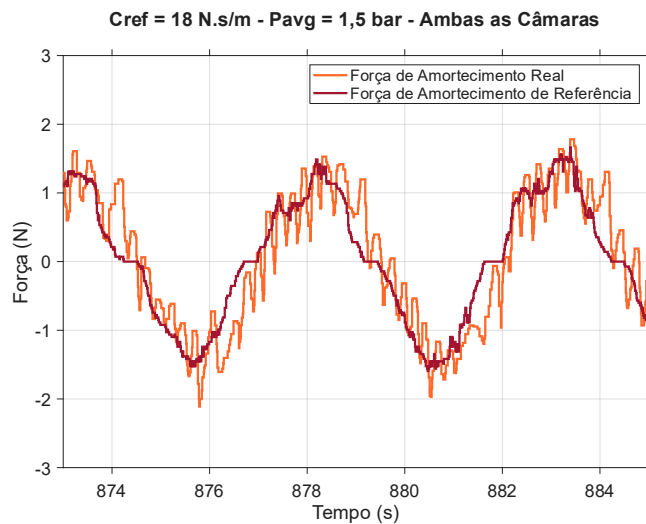


Figura 5.7 – Ensaio dinâmico à PTO ($C_{ref} = 18 \text{ N.s/m}$ / $P_{avg} = 1,5 \text{ bar}$ / Ambas as câmaras).

Assim, estas figuras indicam que o ar comprimido para pressões mais elevadas apresenta menor compressibilidade, o que se traduz numa resposta mais estável e menos sujeita a oscilações no equilíbrio de pressões entre as câmaras. Este efeito está associado ao facto de, para um gás aproximadamente ideal, a compressibilidade ser inversamente proporcional à pressão absoluta, levando a uma resposta dinâmica progressivamente mais rígida à medida que a pressão aumenta

Portanto, a operação do sistema de controlo com pressões mais baixas tende a introduzir uma maior elasticidade no sistema pneumático, o que originar ligeiros atrasos ou variações transitórias na força gerada, sobretudo em regimes dinâmicos. Assim, a escolha da pressão média deve resultar de um compromisso entre estabilidade e eficiência energética do sistema.

5.3 Discussão de resultados

A bancada experimental desenvolvida encontra-se funcional e permitiu a integração e operação conjunta de todos os componentes do sistema de controlo e aquisição de dados. Foi possível realizar o controlo em malha fechada das pressões no interior do atuador pneumático, ajustando-as de acordo com a força medida pela célula de carga. No entanto, o funcionamento do sistema de controlo para valores de força de referência reduzidos ficou aquém do pretendido para as simulações associadas aos coeficientes de amortecimento desejados, evidenciando limitações de *hardware*. As células de carga disponíveis, originalmente selecionadas para outro projeto, apresentam uma amplitude de medição excessiva face às forças requeridas, o que reduz a sensibilidade e a precisão da medição em regimes de força reduzida.

Adicionalmente, as válvulas pneumáticas utilizadas apresentam um limite mínimo de ajuste de 0,06 bar, restringindo a capacidade de controlo fino da pressão diferencial e, consequentemente, da força de amortecimento aplicada.

Com o objetivo de contornar estas limitações, testou-se a adição de sensores diferenciais de pressão de elevada precisão para medir a queda de pressão introduzida por válvulas de estrangulamento manual na entrada pneumática do atuador. Esta abordagem visava criar diferenças de pressão controladas de pequena magnitude, permitindo um controlo mais preciso do amortecimento pneumático.

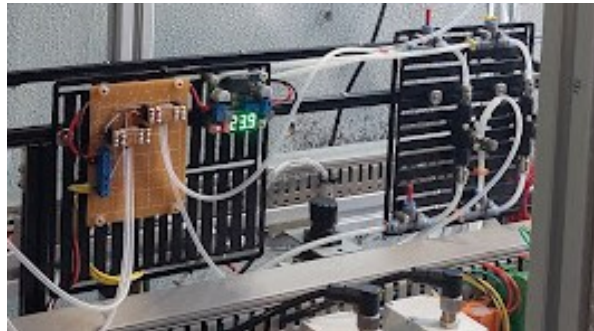


Figura 5.8 – Integração de sensores diferenciais de pressão na bancada.

Procurou-se também mitigar o efeito da compressibilidade do ar através da realização de ensaios a pressões médias mais elevadas. Contudo, a utilização de pressões superiores (4,5 bar) provocou danos nos tubos de ligação, levando à interrupção temporária dos ensaios. Não foi possível entretanto adquirir atempadamente os tubos de substituição.

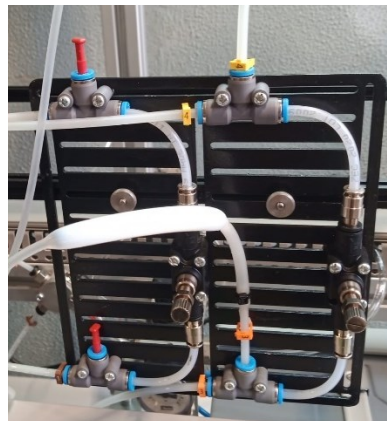


Figura 5.9 – Danos na tubagem de ligação aos sensores diferenciais de pressão.

6 Conclusões e Trabalho Futuro

6.1 Conclusões

O desenvolvimento deste projeto permitiu a integração completa dos sistemas mecânico, pneumático e de controlo, resultando numa bancada experimental funcional e capaz de reproduzir o comportamento dinâmico do conversor. O projeto mecânico culminou na produção dos desenhos técnicos (Apêndice A) e na fabricação de componentes tanto por processos convencionais como por fabrico aditivo (FDM).

Os testes experimentais decorreram sem ocorrência de falhas estruturais relevantes e controlo de pressão em malha fechada revelou-se eficaz, demonstrando a capacidade do sistema em ajustar a pressão de acordo com a força medida e validando também a possibilidade de operação com apenas uma câmara variável.

Verificou-se que pressões mais baixas aumentam a elasticidade do circuito pneumático, podendo introduzir atrasos e flutuações transitórias na força desenvolvida. Assim, a pressão média de operação deve ser definida como um compromisso entre estabilidade e eficiência energética.

De forma global, o trabalho permitiu validar o conceito funcional do WEC desenvolvido através dos ensaios realizados na bancada de testes, demonstrando o seu potencial para estudos de controlo de sistemas PTO pneumáticos em plataformas híbridas e estabelecendo uma base sólida para a continuação e aperfeiçoamento do projeto.

No decorrer do trabalho de projeto foi publicado um artigo científico na *RENEW 2024 - 6th International Conference on Renewable Energies Offshore*, 19-21 novembro 2024, em Lisboa, referente à construção da balança que permite a determinação da posição do centro de massa nas três coordenadas cartesianas [76].

Foi também submetido um resumo pendente de aprovação para a publicação de um artigo científico na *MARTECH 2026 - 8th International Conference on Maritime Technology and Engineering*, 27-29 maio 2026, em Lisboa, referente à bancada de testes desenvolvida no presente trabalho de projeto.

6.2 Trabalho Futuro

Tendo em conta os resultados obtidos, identificam-se as seguintes oportunidades de melhoria e evolução da bancada experimental:

- Melhoria do sistema de controlo, tanto pneumático como elétrico, com vista a aumentar a rapidez de resposta, a robustez e a fiabilidade.
- Implementação de filtragem de sinais específica para cada canal de entrada, com o intuito de reduzir o impacto do ruído de medição.
- Integração de parâmetros adicionais de segurança, como sensores de fim de curso ou limites internos de sinal, para preservar a integridade dos componentes.
- Substituição das células de carga atuais por versões de maior sensibilidade, adequadas a forças mais reduzidas e a regimes com coeficientes de amortecimento baixos, garantindo maior precisão no controlo em malha fechada.
- Introdução de uma pressão adicional transitória no início do movimento do atuador, para superar o atrito estático e obter uma resposta mais linear e estável.
- Melhoria do controlo de pressões baixas, através da utilização dos sensores diferenciais de pressão ultra precisos e da criação de quedas de pressão controladas em válvulas manuais de estrangulamento.
- Substituição dos tubos pneumáticos por versões dimensionadas para suportar pressões superiores, permitindo ensaios com maior amplitude de operação.
- Aperfeiçoamento da interface de controlo, incorporando elementos físicos de interação (botões, potenciômetros) e maior integração de sensores analógicos e digitais, especialmente para testes futuros em tanque de ondas.
- Integração de um modelo hidrodinâmico completo do flutuador no sistema de simulação, de forma a representar com maior rigor a interação entre o atuador pneumático e o elétrico e reproduzir condições marítimas irregulares de forma mais realista.

Estas melhorias permitirão elevar a precisão, fiabilidade e representatividade experimental da bancada, garantindo a continuidade do desenvolvimento do sistema e consolidando-o como uma plataforma de ensaio robusta para estudos futuros de controlo de WECs.

Referências bibliográficas

- [1] European Commission. Joint Research Centre. e IEA., *GHG emissions of all world countries*. LU: Publications Office, 2024. Acedido: 30 de setembro de 2025. [Online]. Disponível em: <https://data.europa.eu/doi/10.2760/4002897>
- [2] DGE, ADENE, e Observatório De Energia, *Energia em Números - Edição 2024*, ADENE. 2024.
- [3] K. Calvin *et al.*, «IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland.», Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), jul. 2023. doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.
- [4] E. A. Rosa e T. Dietz, «Human drivers of national greenhouse-gas emissions», *Nat. Clim. Change*, vol. 2, n.º 8, pp. 581–586, ago. 2012, doi: 10.1038/nclimate1506.
- [5] Global Wind Energy Council, «Global Wind Report 2025», 2025. [Online]. Disponível em: https://www.gwec.net/gwec-news/wind-industry-installs-record-capacity-in-2024-despite-policy-instability?utm_source=chatgpt.com
- [6] P. Hevia-Koch e H. Klinge Jacobsen, «Comparing offshore and onshore wind development considering acceptance costs», *Energy Policy*, vol. 125, pp. 9–19, fev. 2019, doi: 10.1016/j.enpol.2018.10.019.
- [7] V. Ramos, G. Giannini, T. Calheiros-Cabral, M. López, P. Rosa-Santos, e F. Taveira-Pinto, «Assessing the Effectiveness of a Novel WEC Concept as a Co-Located Solution for Offshore Wind Farms», *J. Mar. Sci. Eng.*, vol. 10, n.º 2, p. 267, fev. 2022, doi: 10.3390/jmse10020267.
- [8] Reuters, «Portugal keen to create offshore wind cluster, could reach 10 gigawatts», Reuters. Acedido: 1 de setembro de 2025. [Online]. Disponível em: https://www.reuters.com/sustainability/climate-energy/portugal-keen-create-offshore-wind-cluster-could-reach-10-gigawatts-2025-01-17/?utm_source=chatgpt.com

- [9] Agência Portuguesa do Ambiente, «Roteiro Nacional de Baixo Carbono 2050», 2012. [Online]. Disponível em: https://apambiente.pt/sites/default/files/_Clima/Mitiga%C3%A7%C3%A3o/RNBC/RNBC_COMPLETO_2050_V04.pdf?utm_source=chatgpt.com
- [10] F. Onea e E. Rusu, «An Evaluation of Marine Renewable Energy Resources Complementarity in the Portuguese Nearshore», *J. Mar. Sci. Eng.*, vol. 10, n.º 12, p. 1901, dez. 2022, doi: 10.3390/jmse10121901.
- [11] EU-SCORES, «EU-SCORES | European Scalable Offshore Renewable Energy Sources». Acedido: 1 de setembro de 2025. [Online]. Disponível em: https://euscores.eu/?utm_source=chatgpt.com
- [12] D. A. Spera, Ed., *Wind turbine technology: fundamental concepts of wind turbine engineering*, 1. pbk. print. New York: Asme Press, 1998.
- [13] M. Dehghan Manshadi, M. Mousavi, M. Soltani, A. Mosavi, e L. Kovacs, «Deep Learning for Modeling an Offshore Hybrid Wind–Wave Energy System», *Energies*, vol. 15, n.º 24, p. 9484, dez. 2022, doi: 10.3390/en15249484.
- [14] X. Wu *et al.*, «Foundations of offshore wind turbines: A review», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 104, pp. 379–393, abr. 2019, doi: 10.1016/j.rser.2019.01.012.
- [15] Z. Jiang, «Installation of offshore wind turbines: A technical review», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 139, p. 110576, abr. 2021, doi: 10.1016/j.rser.2020.110576.
- [16] Ghost456, «Offshore wind foundation types», Wikimedia Commons. Acedido: 1 de setembro de 2025. [Online]. Disponível em: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Offshore_wind_foundation_types.svg
- [17] X. Dong, Y. Li, D. Li, F. Cao, X. Jiang, e H. Shi, «A state-of-the-art review of the hybrid wind-wave energy converter», *Prog. Energy*, vol. 4, n.º 4, p. 042004, out. 2022, doi: 10.1088/2516-1083/ac821d.
- [18] M. Kamarlouei *et al.*, «Experimental study of wave energy converter arrays adapted to a semi-submersible wind platform», *Renew. Energy*, vol. 188, pp. 145–163, abr. 2022, doi: 10.1016/j.renene.2022.02.014.
- [19] D. Micallef e A. Rezaeiha, «Floating offshore wind turbine aerodynamics: Trends and future challenges», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 152, p. 111696, dez. 2021, doi: 10.1016/j.rser.2021.111696.
- [20] «Tuno Knob (Denmark)», The Wind Power. Acedido: 1 de setembro de 2025. [Online]. Disponível em: https://www.thewindpower.net/windfarm_en_1160_tuno-knob.php
- [21] «Jiangsu Xiangshui Offshore Wind Farm», PowerTechnology. Acedido: 1 de setembro de 2025. [Online]. Disponível em: <https://www.power-technology.com/projects/jiangsu-xiangshui-offshore-wind-farm/?cf-view>

- [22]«Power plant profile: Greater Gabbard, UK», PowerTechnology. Acedido: 1 de setembro de 2025. [Online]. Disponível em: <https://www.power-technology.com/data-insights/power-plant-profile-greater-gabbard-uk/?cf-view>
- [23]«Power plant profile: Alpha Ventus, Germany», PowerTechnology. Acedido: 1 de setembro de 2025. [Online]. Disponível em: <https://www.power-technology.com/data-insights/power-plant-profile-alpha-ventus-germany/?cf-view&cf-closed>
- [24]«Moray East (United-Kingdom)», The Wind Power. Acedido: 1 de setembro de 2025. [Online]. Disponível em: https://www.thewindpower.net/windfarm_en_33433_moray-east.php
- [25]«Hywind Tampen (Norway)», The Wind Power. Acedido: 1 de setembro de 2025. [Online]. Disponível em: https://www.thewindpower.net/windfarm_en_18514_hywind-tampen.php
- [26]«Provence Grand Large (France)», The Wind Power. Acedido: 1 de setembro de 2025. [Online]. Disponível em: https://www.thewindpower.net/windfarm_en_24152_provence-grand-large.php
- [27]Adnan Memija, «30 MW French Floating Wind Farm Enters Final Phase Ahead of Commissioning Later This Year», offshoreWIND.biz. Acedido: 25 de setembro de 2025. [Online]. Disponível em: <https://www.offshorewind.biz/2025/09/22/30-mw-french-floating-wind-farm-enters-final-phase-ahead-of-commissioning-later-this-year/>
- [28]«WindFloat Atlantic (Portugal)», The Wind Power. Acedido: 1 de setembro de 2025. [Online]. Disponível em: https://www.thewindpower.net/windfarm_en_16547_windfloat-atlantic.php
- [29]Y. Wang, S. Huang, G. Xue, e Y. Liu, «Influence of Hydraulic PTO Parameters on Power Capture and Motion Response of a Floating Wind-Wave Hybrid System», *J. Mar. Sci. Eng.*, vol. 10, n.º 11, p. 1660, nov. 2022, doi: 10.3390/jmse10111660.
- [30]J. Lian, X. Wang, X. Wang, e D. Wu, «Research on Wave Energy Converters», *Energies*, vol. 17, n.º 7, p. 1577, mar. 2024, doi: 10.3390/en17071577.
- [31]The Guardian, «Marine energy companies to get funding boost from Carbon Trust». Acedido: 1 de setembro de 2025. [Online]. Disponível em: <https://www.theguardian.com/environment/2009/sep/11/tidal-wave-power-uk>
- [32]Wave Star, «Unlimited Clean Energy». Acedido: 1 de setembro de 2025. [Online]. Disponível em: <https://wavestarenergy.com/>
- [33]Maritime Journal, «Wave Dragon's WEC system». Acedido: 1 de setembro de 2025. [Online]. Disponível em: https://www.researchgate.net/figure/Wave-Dragons-WEC-system-Maritime-Journal-accessed-19-Sep-2019_fig7_336279051
- [34]«Conceptual view of an inclined oscillating-water-column (OWC) wave energy converter integrated with breakwater.» Acedido: 1 de setembro de 2025. [Online].

- Disponível em: https://www.researchgate.net/figure/Conceptual-view-of-an-inclined-oscillating-water-column-OWC-wave-energy-converter_fig1_339766663
- [35] Eureka!, «Making marine energy viable». Acedido: 1 de setembro de 2025. [Online]. Disponível em: <https://www.eurekamagazine.co.uk/content/technology/making-marine-energy-viable>
- [36] WavEC – Wave Energy Center, «Central Piloto Europeia de Energia das Ondas – Ilha do Pico», 2018. Acedido: 1 de setembro de 2025. [Online]. Disponível em: https://www.wavec.org/contents/reports/brochura-central-do-pico-2018.pdf?utm_source=chatgpt.com
- [37] M. Leary, C. Rusch, Z. Zhang, e B. Robertson, «Comparison and Validation of Hydrodynamic Theories for Wave Energy Converter Modelling», *Energies*, vol. 14, n.º 13, p. 3959, jul. 2021, doi: 10.3390/en14133959.
- [38] J. H. Todalshaug *et al.*, «Tank testing of an inherently phase-controlled wave energy converter», *Int. J. Mar. Energy*, vol. 15, pp. 68–84, set. 2016, doi: 10.1016/j.ijome.2016.04.007.
- [39] B. Guo, T. Wang, S. Jin, S. Duan, K. Yang, e Y. Zhao, «A Review of Point Absorber Wave Energy Converters», *J. Mar. Sci. Eng.*, vol. 10, n.º 10, p. 1534, out. 2022, doi: 10.3390/jmse10101534.
- [40] M. Zhang, S.-R. Yu, G.-W. Zhao, S.-S. Dai, F. He, e Z.-M. Yuan, «Model predictive control of wave energy converters», *Ocean Eng.*, vol. 301, p. 117430, jun. 2024, doi: 10.1016/j.oceaneng.2024.117430.
- [41] B. Zhou, J. Hu, P. Jin, K. Sun, Y. Li, e D. Ning, «Power performance and motion response of a floating wind platform and multiple heaving wave energy converters hybrid system», *Energy*, vol. 265, p. 126314, fev. 2023, doi: 10.1016/j.energy.2022.126314.
- [42] M. Kamarlouei *et al.*, «Experimental analysis of wave energy converters concentrically attached on a floating offshore platform», *Renew. Energy*, vol. 152, pp. 1171–1185, jun. 2020, doi: 10.1016/j.renene.2020.01.078.
- [43] X. Zhipeng e W. Xuanyin, «Development of a Novel High Pressure Electronic Pneumatic Pressure Reducing Valve», *J. Dyn. Syst. Meas. Control*, vol. 133, n.º 1, p. 011011, jan. 2011, doi: 10.1115/1.4002715.
- [44] J. Hals, J. Falnes, e T. Moan, «A Comparison of Selected Strategies for Adaptive Control of Wave Energy Converters», *J. Offshore Mech. Arct. Eng.*, vol. 133, n.º 3, p. 031101, ago. 2011, doi: 10.1115/1.4002735.
- [45] S. Thomas, M. Eriksson, M. Göteman, M. Hann, J. Isberg, e J. Engström, «Experimental and Numerical Collaborative Latching Control of Wave Energy Converter Arrays», *Energies*, vol. 11, n.º 11, p. 3036, nov. 2018, doi: 10.3390/en11113036.

- [46]F. G. Pierart, P. G. Campos, C. E. Basoalto, J. Rohten, e T. Davey, «Experimental Implementation of Reinforcement Learning Applied to Maximise Energy from a Wave Energy Converter», *Energies*, vol. 17, n.º 20, p. 5087, out. 2024, doi: 10.3390/en17205087.
- [47]P. Aboutalebi, F. M'zoughi, I. Garrido, e A. J. Garrido, «A control technique for hybrid floating offshore wind turbines using oscillating water columns for generated power fluctuation reduction», *J. Comput. Des. Eng.*, vol. 10, n.º 1, pp. 250–265, jan. 2023, doi: 10.1093/jcde/qwac137.
- [48]Sara Rodrigues, Nuno Fonseca, e João Santos, *Análise do comportamento do navio no mar por um método dos painéis simplificado e pela teoria das faixas*. 2012.
- [49]T. Sant e K. Cuschieri, «Comparing Three Aerodynamic Models for Predicting the Thrust and Power Characteristics of a Yawed Floating Wind Turbine Rotor», *J. Sol. Energy Eng.*, vol. 138, n.º 3, p. 031004, jun. 2016, doi: 10.1115/1.4032684.
- [50]Y. Li, S. Yan, H. Shi, Q. Ma, D. Li, e F. Cao, «Hydrodynamic analysis of a novel multi-buoy wind-wave energy system», *Renew. Energy*, vol. 219, p. 119477, dez. 2023, doi: 10.1016/j.renene.2023.119477.
- [51]T. Asai, S. Tsukamoto, Y. Nemoto, K. Yoshimizu, U. Watanabe, e Y. Taniyama, «Numerical Simulation of a Floating Offshore Wind Turbine Incorporating an Electromagnetic Inerter-Based Device for Vibration Suppression and Wave Energy Conversion», *Struct. Control Health Monit.*, vol. 2023, pp. 1–18, ago. 2023, doi: 10.1155/2023/5513733.
- [52]E. Gubesch *et al.*, «Experimental investigation of a co-located wind and wave energy system in regular waves», *Renew. Energy*, vol. 219, p. 119520, dez. 2023, doi: 10.1016/j.renene.2023.119520.
- [53]INNWIND.EU, «About INNWIND.EU». Acedido: 1 de setembro de 2025. [Online]. Disponível em: https://www.innwind.eu/?utm_source=chatgpt.com
- [54]A. Robertson *et al.*, «Definition of the Semisubmersible Floating System for Phase II of OC4», NREL/TP-5000-60601, 1155123, set. 2014. doi: 10.2172/1155123.
- [55]M. T. Andersen, «Floating Foundations for Offshore Wind Turbines», 2016, *Aalborg University Press*. doi: 10.5278/VBN.PHD.ENGSCI.00175.
- [56]E. Faraggiana, M. Sirigu, A. Ghigo, E. Petracca, G. Mattiazzo, e G. Bracco, «Conceptual design and optimisation of a novel hybrid device for capturing offshore wind and wave energy», *J. Ocean Eng. Mar. Energy*, vol. 10, n.º 1, pp. 35–56, fev. 2024, doi: 10.1007/s40722-023-00298-7.
- [57]D. Zhang *et al.*, «A coupled numerical framework for hybrid floating offshore wind turbine and oscillating water column wave energy converters», *Energy Convers. Manag.*, vol. 267, p. 115933, set. 2022, doi: 10.1016/j.enconman.2022.115933.
- [58]Z. Deng, B. Zhang, Y. Miao, B. Zhao, Q. Wang, e K. Zhang, «Multi-Objective Optimal Design of the Wind-Wave Hybrid Platform with the Coupling Interaction», *J. Ocean*

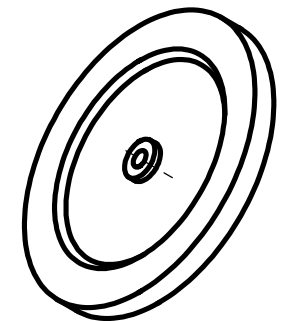
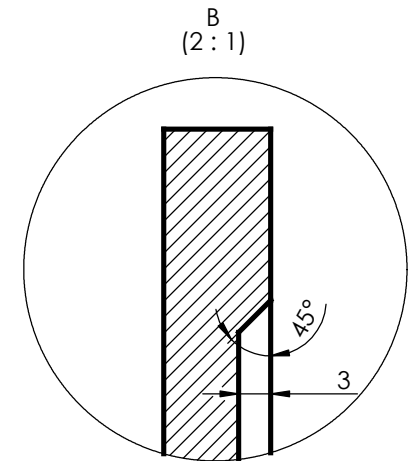
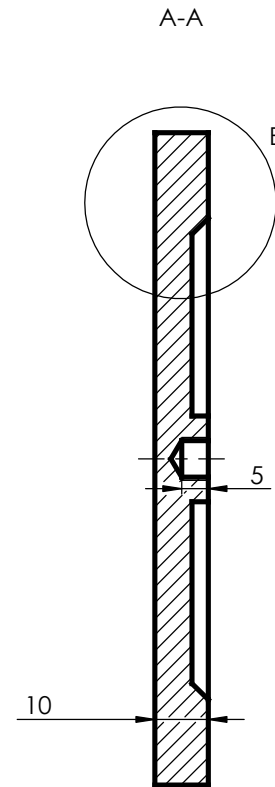
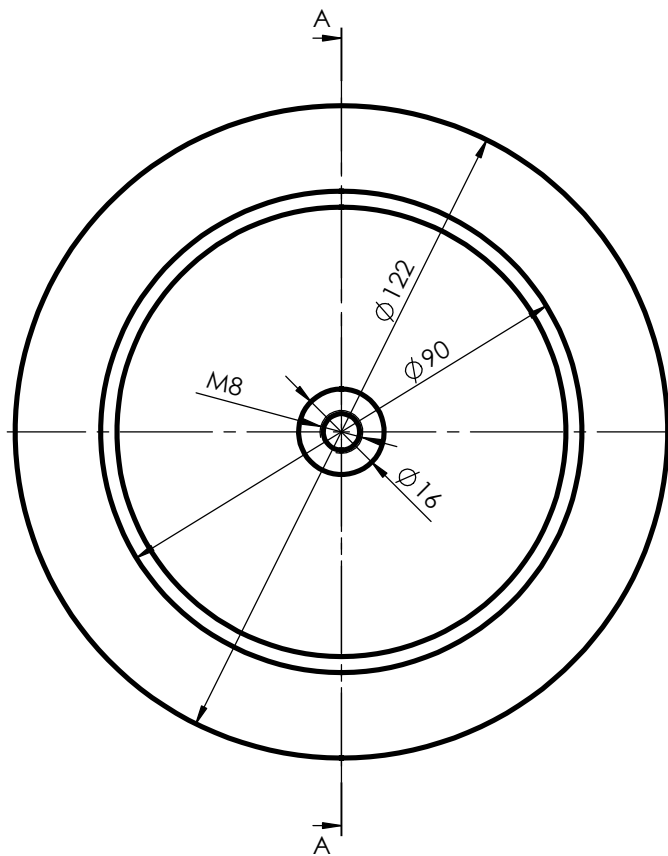
Univ. China, vol. 22, n.º 5, pp. 1165–1180, out. 2023, doi: 10.1007/s11802-023-5242-0.

- [59]IGUS, «Casquilhos deslizantes iglidur® isentos de manutenção e autolubrificados». Acedido: 1 de setembro de 2025. [Online]. Disponível em: <https://www.igus.pt/casquilhos-deslizantes>
- [60]SMC Pneumatics, «SMC C85C25 clevis bracket». Acedido: 1 de setembro de 2025. [Online]. Disponível em: <https://www.smc Pneumatics.com/C85C25.html>
- [61]D. V. L. Agostinho, «Projeto de simulador de uma turbina eólica instalada numa plataforma flutuante offshore», Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, 2024.
- [62]IGUS, «igubal® - rótulas e chumaceiras auto-alinháveis em plástico». Acedido: 1 de setembro de 2025. [Online]. Disponível em: <https://www.igus.pt/chumaceiras-esfericas>
- [63]REIMAN, «ANPS Desmontáveis colares bipartidos de fixação». Acedido: 1 de setembro de 2025. [Online]. Disponível em: <https://reiman.pt/pt/anps-dismountable-split-set-collars/>
- [64]REIMAN, «Perfil de alumínio 40x40 4 rasgos Reforçado». Acedido: 1 de setembro de 2025. [Online]. Disponível em: <https://reiman.pt/pt/ast04004004h-aluminium-profile-40x40-4-slots-heavy/>
- [65]Sara Lilloni, «Real-Time Wind and Wave Emulation for Floating Offshore Wind Turbines : From Matlab Modeling to Hardware-in-the-Loop Integration», Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2025.
- [66]FUTEK, «Submersible Miniature S-Beam Jr.® Load Cell». Acedido: 1 de setembro de 2025. [Online]. Disponível em: <https://www.futek.com/store/load-cells/s-beam-load-cells/submersible-miniature-s-beam-lsb210>
- [67]FUTEK, «Strain Gauge Analog Amplifier with Current Output». Acedido: 1 de setembro de 2025. [Online]. Disponível em: <https://www.futek.com/store/instruments/analog-amplifier/strain-gauge-analog-amplifier-current-output-iaa200>
- [68]Phoenix Contact, «MINI MCR-SL-UI-UI-NC - Input signal conditioner». Acedido: 1 de setembro de 2025. [Online]. Disponível em: <https://www.phoenixcontact.com/en-pc/products/signal-conditioner-mini-mcr-sl-ui-ui-nc-2864150>
- [69]BANSBACH EASYLIFT, «Easy-E 50». Acedido: 1 de setembro de 2025. [Online]. Disponível em: <https://www.easye.us/products/easye50/>
- [70]BANSBACH EASYLIFT, «EEL-S2-2». Acedido: 1 de setembro de 2025. [Online]. Disponível em: <https://www.easye.us/products/EEL-S2-2/>
- [71]BANSBACH EASYLIFT, «EEL-S2-PROGBOX». Acedido: 1 de setembro de 2025. [Online]. Disponível em: <https://store.easylift.com/easye/accessories/eel-s2-progbox-programming-box/>

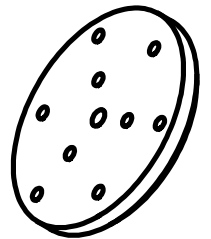
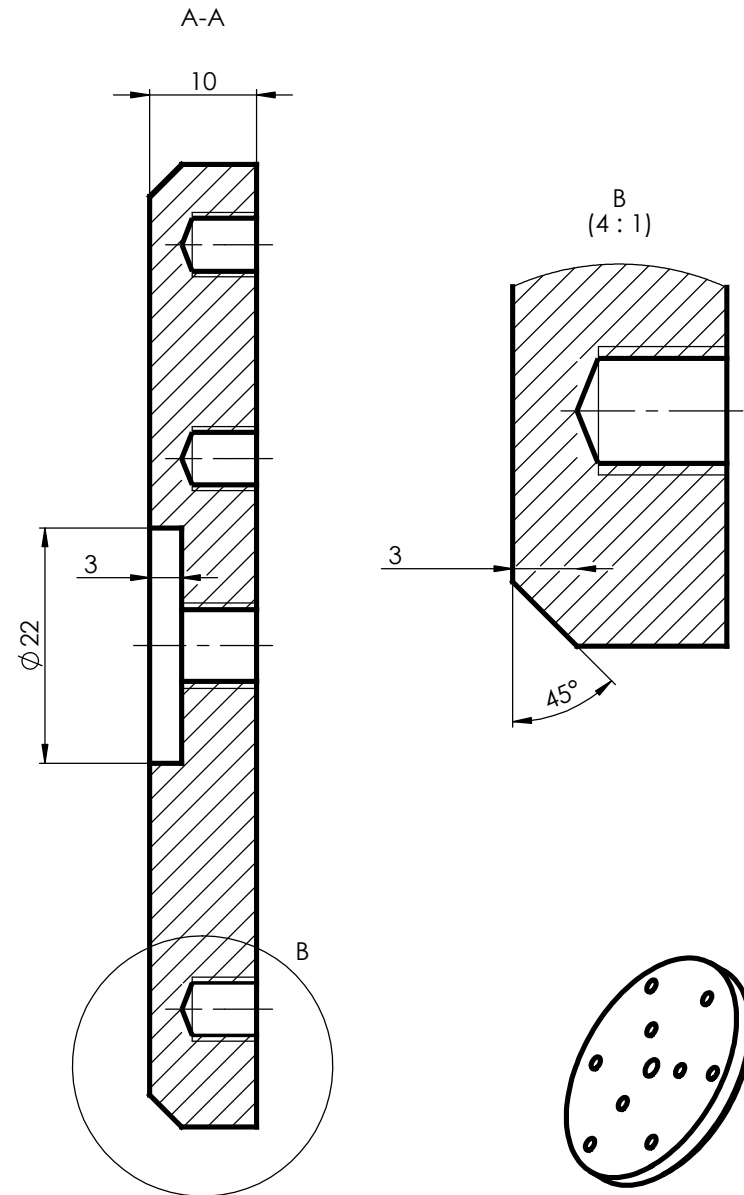
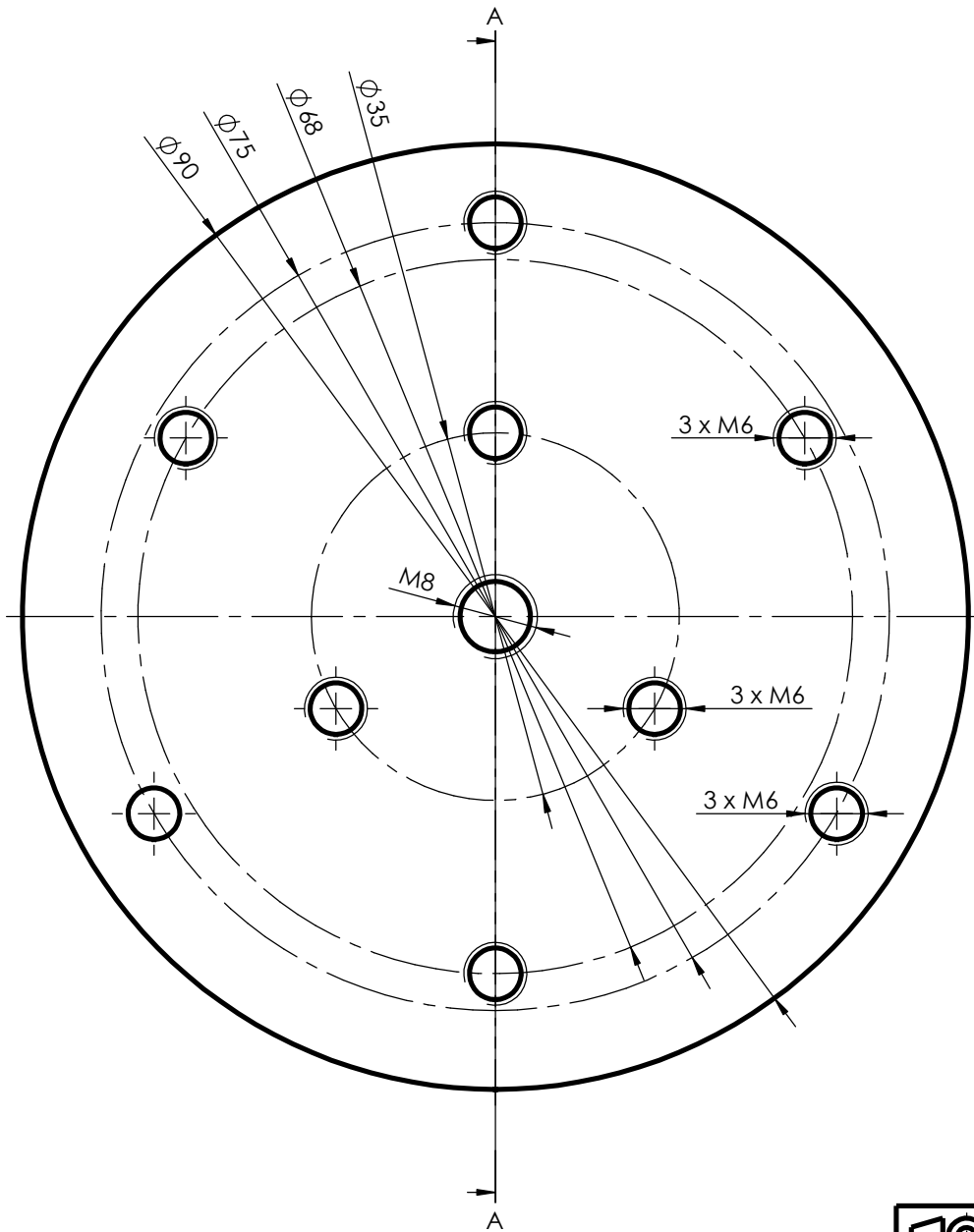
- [72]novotechnik, «RFC-4800». Acedido: 1 de setembro de 2025. [Online]. Disponível em: <https://novotechnik.ind.br/es/rfc-4800-es/>
- [73]FESTO, «VPPM-6L-L-1-G18-0L10H-V1P-S1». Acedido: 1 de setembro de 2025. [Online]. Disponível em: <https://www.festo.com/pt/pt/a/554040/>
- [74]SMC Pneumatics, «SMC MQMLC25-100D cyl, low friction». Acedido: 1 de setembro de 2025. [Online]. Disponível em: <https://www.smc-pneumatics.com/MQMLC25-100D.html>
- [75]Ferramentaspro, «Compressor silencioso 1Hp 8Bar 6L Fatmax [DST 101/8/6] refª B2BL104STF564 STANLEY». Acedido: 1 de setembro de 2025. [Online]. Disponível em: [https://www.ferramentaspro.pt/pt/stanley/compressor-silencioso-1hp-8bar-6l-fatmax\[dst-10186\]-ref-b2bl104stf564-stanley_p36672.html?utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=Pmax-GERAL&gad_source=1&gad_campaignid=17182849411&gbraid=0AAAAABJ9guuWiPLV3SoPf3x8Z77gn4eue&gclid=Cj0KCQiAiKzIBhCOARIsAKpKLAMtuoQiwKwCNxRGhNYImJOOSG1tTRqvuMJufti8ywZZG2i8zWqrWQoaAj7xEALw_wcB](https://www.ferramentaspro.pt/pt/stanley/compressor-silencioso-1hp-8bar-6l-fatmax[dst-10186]-ref-b2bl104stf564-stanley_p36672.html?utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=Pmax-GERAL&gad_source=1&gad_campaignid=17182849411&gbraid=0AAAAABJ9guuWiPLV3SoPf3x8Z77gn4eue&gclid=Cj0KCQiAiKzIBhCOARIsAKpKLAMtuoQiwKwCNxRGhNYImJOOSG1tTRqvuMJufti8ywZZG2i8zWqrWQoaAj7xEALw_wcB)
- [76]J. F. Gaspar, F. P. Santos, C. G. Soares, M. J. G. C. Mendes, J. P. Gonçalves, e D. V. Agostinho, «Calibration of floating offshore wind turbine experimental models using a novel workbench apparatus», em *Innovations in Renewable Energies Offshore*, 1.^a ed., London: CRC Press, 2024, pp. 667–677. doi: 10.1201/9781003558859-73.

Apêndice A

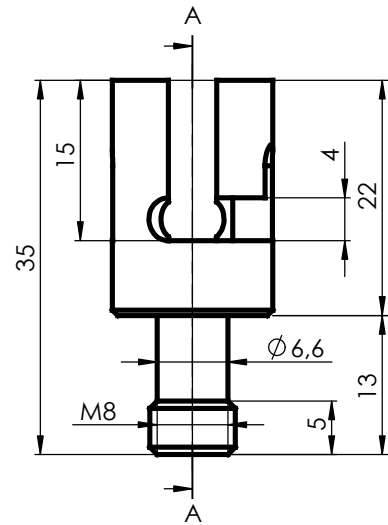
Peças Desenhadas



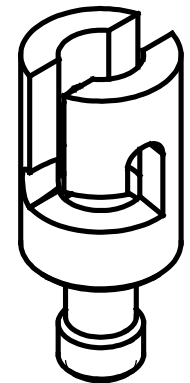
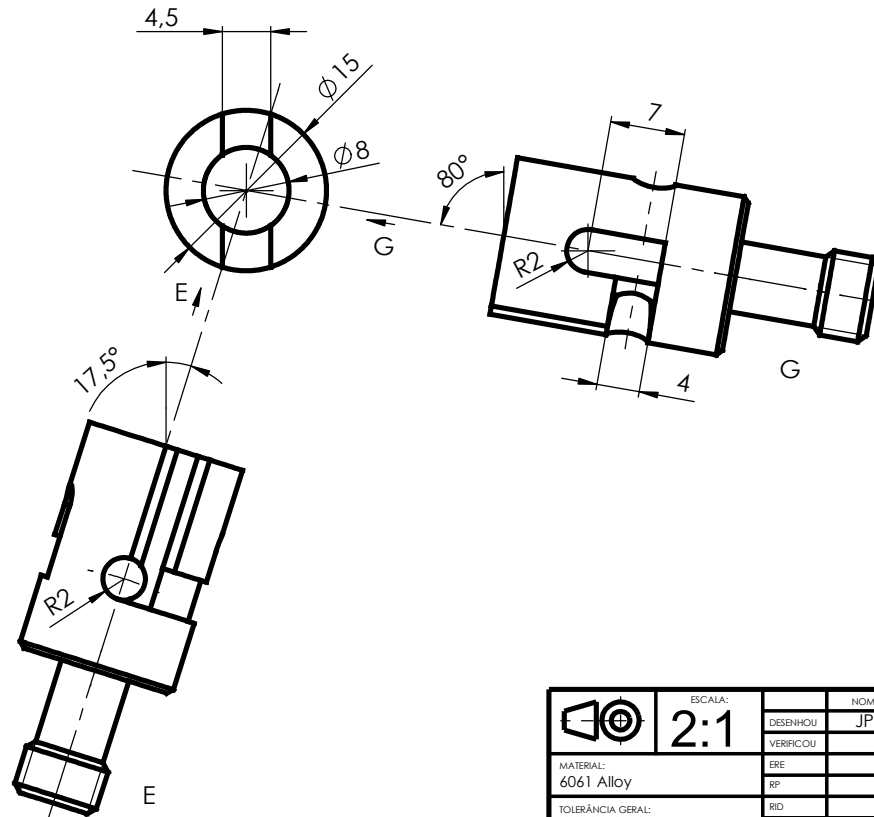
	ESCALA:	NOME	DATA		DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA			
	1:1	DESENHOU	JPG		23/12/2023	MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA		
MATERIAL:	ERE	VERIFICOU			CONJUNTO: PLATAFORMA FLUTUANTE - MODELO A ESCALA			
6061 Alloy	RF				COMPONENTE:			
TOLERÂNCIA GERAL:	RID				BASE.EXTERIOR			
ISO 2768 classe m-K	MITA							
ISO 8015	NOTAS:				DESENHO N.º	FOLHA:	MASSA [g]:	REVISÃO:
ACABAMENTOS:					A3	PLAT.BASE.EXT	1/1	A



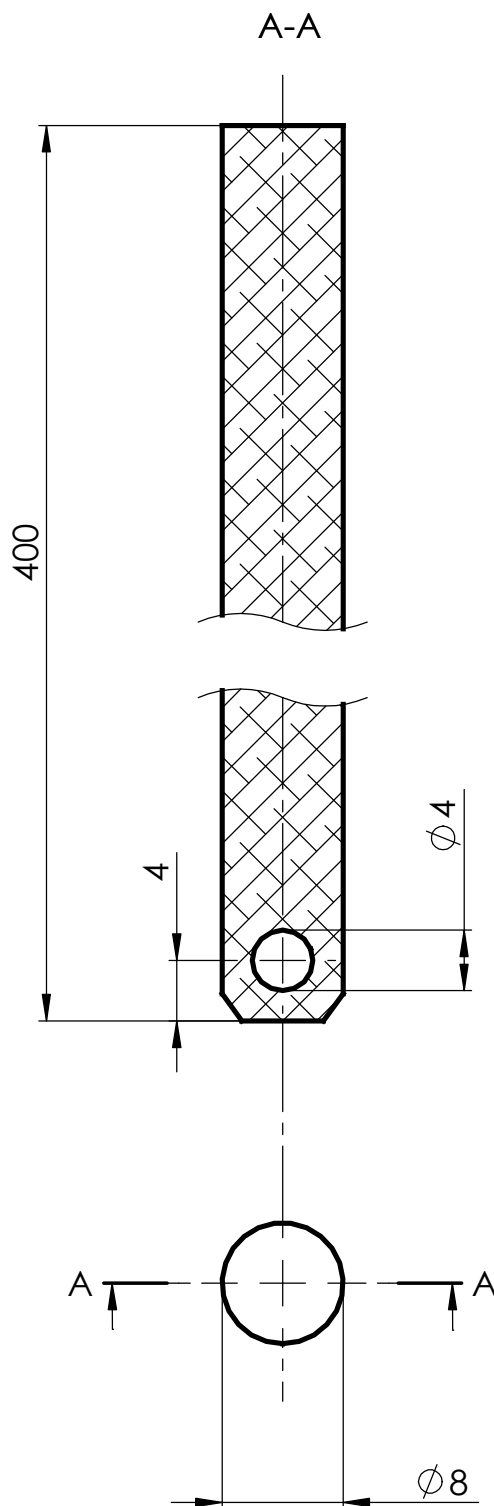
	ESCALA:	2:1	NOME	JPG	DATA	23/12/2023		DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA			
	DESENHO	VERIFICOU	ERE	RF	RID	MITA		MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA			
MATERIAL:	6061 Alloy						CONJUNTO: PLATAFORMA FLUTUANTE - MODELO A ESCALA				
TOLERÂNCIA GERAL:	ISO 2768 classe m-K						COMPONENTE:				
ACABAMENTOS:							BASE				
NOTAS:							DESENHO N.º	FOLHA:	MASSA [g]:	REVISÃO:	
							A3	PLAT.BASE	1/1	A	



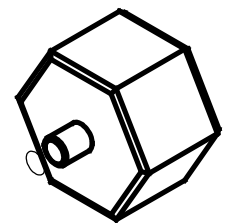
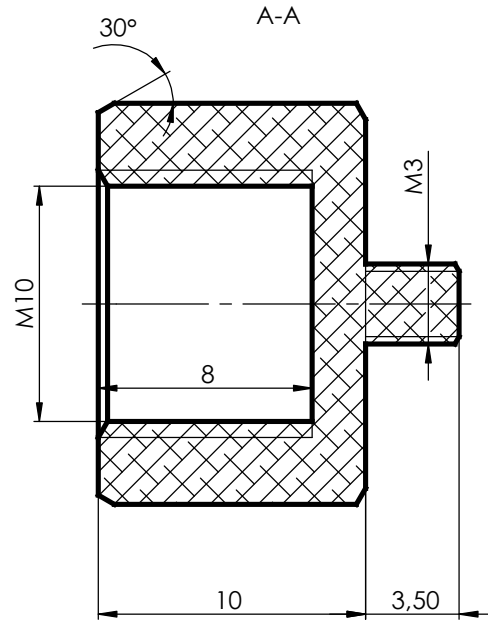
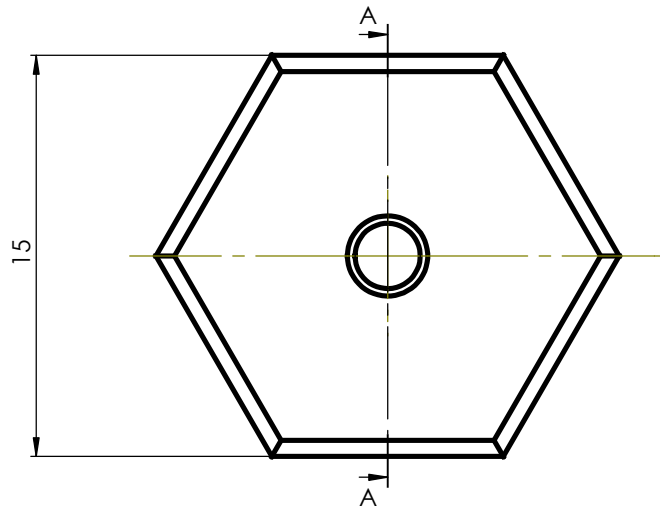
NOTAS:
 As vistas auxiliares "E" e "G" fazem um ângulo de 10° e de 72,5° com a vertical da vista de topo, respetivamente, de forma a representar de frente os elementos cotados, que se apresentam a 17,5° e a 80° do plano de visualização principal, respetivamente.



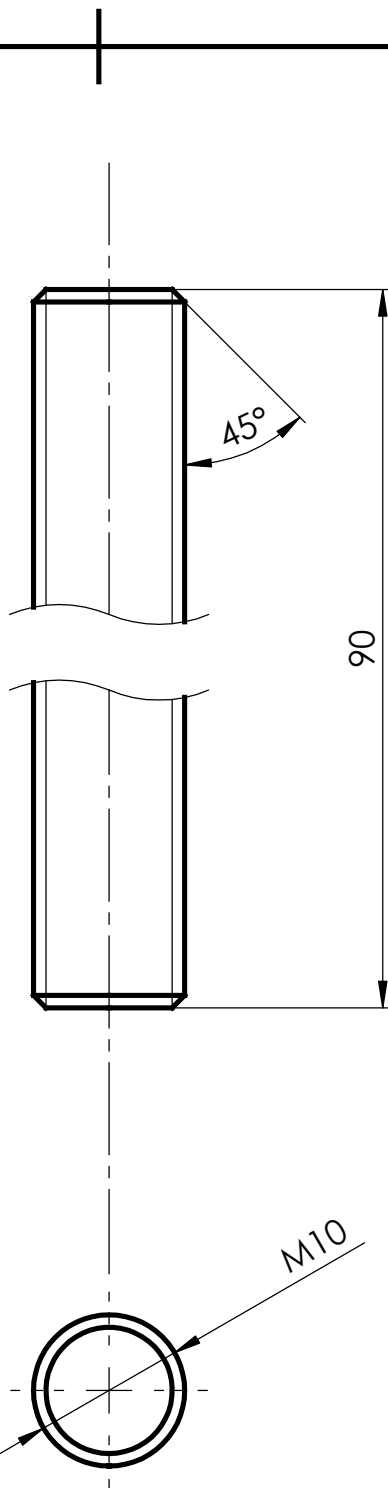
	ESCALA:	NOME	DATA		DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA		
	2:1	DESENHOU	JPG		23/12/2023	MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA	
MATERIAL:		VERIFICOU		CONJUNTO: PLATAFORMA FLUTUANTE - MODELO A ESCALA			
6061 Alloy		ERE		COMPONENTE:			
TOLERÂNCIA GERAL:		RID		APERTO DA BASE			
ISO 2768 classe m-K		MITA					
ISO 8015		NOTAS:		DESENHO N.º	FOLHA:	MASSA [g]:	REVISÃO:
ACABAMENTOS:				A3	PLAT.APERTO	1/1	B





	ESCALA:	NOME	DATA		DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA			
	2:1	DESENHOU	JPG		23/12/2025	MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA		
MATERIAL:	ERE	VERIFICOU			TRABALHO FINAL DE MESTRADO			
TOLERÂNCIA GERAL: ISO 2768 classe m-K ISO 8015	RP	RID			CONJUNTO: PLATAFORMA FLUTUANTE - MODELO À ESCALA			
ACABAMENTOS:	MTTA	NOTAS:			COMPONENTE: VARÃO DE APERTO DA BASE			
					DESENHO N.º	FOLHA:	MASSA [g]:	REVISÃO:
					A4 PLAT.VARAO	1/1		B



	ESCALA:	NOME	DATA		DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA		
	5:1	DESENHOU	JPG		20/12/2023	MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA	
MATERIAL:	ERE	VERIFICOU			CONJUNTO: PLATAFORMA FLUTUANTE - MODELO A ESCALA		
6061 Alloy	RF				COMPONENTE:		
TOLERÂNCIA GERAL:	RID				ADAPTADOR M10 PARA M3		
ISO 2768 classe m-K	MITA				DESENHO N.º	FOLHA:	MASSA [g]:
ISO 8015	NOTAS:				A3	PLAT.ADPT	1/1
ACABAMENTOS:							REVISÃO:
							B

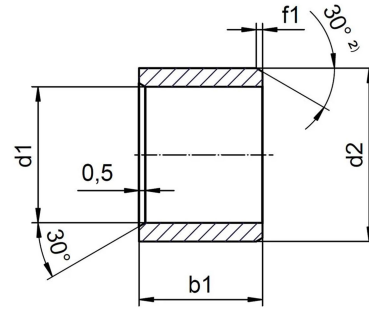


	ESCALA:	NOME	DATA	 ISEL	DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA			
	2:1	DESENHOU	JPG		23/12/2025	MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA		
MATERIAL:		ERE		CONJUNTO: PLATAFORMA FLUTUANTE - MODELO À ESCALA				
1060 Alloy		RP		COMPONENTE:				
TOLERÂNCIA GERAL:		RID		EXTENSOR M10				
ISO 2768 classe m-K		MTA						
ISO 8015		NOTAS:		DESENHO N.º	FOLHA:	MASSA [g]:	REVISÃO:	
ACABAMENTOS:				A4	PLAT.EXTENSOR	1/1	19.03	A

Anexo A

Especificações Técnicas

iglidur® H1, sleeve bearing, mm H1SM-0304-05



iglidur® H1, sleeve bearing, mm

- Excellent wear resistance at room temperature
- Very good wear resistance at medium temperatures
- Excellent wear resistance at high temperatures
- Suitable for very high speeds
- Excellent coefficient of friction
- Very low moisture absorption
- Good wear resistance under water
- Very high media resistance
- Resistant to high loads (>60N/mm²)
- Mould resistant according to DIN EN ISO 846

Product description

Introducing the iglidur® H1 sleeve bearing, your ideal solution for demanding environments. Designed for longevity, it excels in extreme wear resistance and offers excellent performance in high temperatures and humidity. Perfect for applications in the packaging, beverage, and textile industries, this bearing is mould resistant and features a low coefficient of friction, ensuring smooth operation even at high speeds. Trust iglidur® H1 for reliability and durability in your toughest applications.

Electricity attributes

Specific transitional resistance	> 10 ¹² Ωcm, test method DIN IEC 93
Surface resistance	> 10 ¹¹ Ω, test method DIN 53482

Requirements

Mould-resistant according to DIN EN ISO 846 Procedure A	Yes
Detectable	No
RoHS 2 compliant according to EU guideline 2011/65/EU	Yes

General properties

Coefficient of friction, dynamic, against steel	0,06 - 0,20 μ
pv value, max. (dry)	0.80 MPa · m/s
Radioactive radiation max.	2 · 10 ² Gy
CO2 equivalent per piece	0.0055 kg



Thermal properties

Max. long-term application temperature	200 °C
Max. short-term application temperature	240 °C
Lower application temperature	-40 °C
Heat conductivity	0.24 W/m · K, Prüfmethode ASTM C 177
Thermal expansion coefficient (at 23°C/73°F)	6 K ⁻¹ · 10 ⁻⁵

Dimensions

Shaft diameter	3 mm
Ø d2	4.5 mm
b1	5 mm
Length of bevel (f1)	0.3 mm
Length of bevel (f4)	0.5 mm
Bevel angle (f1)	30 °
Bevel angle (f4)	30 °

Mechanical properties

Compressive strength	78 MPa
Max. recommended surface pressure	80 MPa
Maximum surface speed, oscillating, short-term	1.5 m/s
Maximum surface speed, rotating, continuous	2 m/s
Maximum surface speed, rotating, short-term	2.5 m/s
Maximum surface speed, oscillating, continuous	1 m/s
Maximum surface speed, linear, continuous	5 m/s
Maximum surface speed, linear, short-term	7 m/s

Manufacturing and installation tolerances

b1 tolerance	h13
Tolerance of shaft	h9
d1 after press-fit (max.)	3.046 mm
d1 after press-fit (min.)	3.006 mm
Shaft dimensions (max.)	3 mm
Shaft dimensions (min.)	2.975 mm
Tolerance d2 Housing bore min.	0 mm
Tolerance d2 Housing bore max.	0.012 mm

Certificates and standards



Gabelgelenkkombination:
GERMFE und GELMFE



Bestellschlüssel

Typ	Größe [mm]	Optionen
GE ... MFE - 05		
Gabelkopf	Maßreihe E	Gewinde
	Gewinde	L = Linksgewinde
	metrisch	R = Rechtsgewinde
	mit Federklappbolzen und Gelenkkopf	
	Innen-Ø	

i Material:
igumid G ► Seite 1560

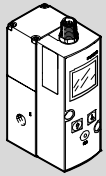
m Lebensdauerberechnung online
► www.igus.de/igubal-experte

Technische Daten

Art.-Nr.	max. statische Zugbelastung		max. statische Querbelastung		Gewicht [g]
	kurzzeitig	langzeitig	kurzzeitig	langzeitig	
	[N]	[N]	[N]	[N]	
GE□MFE-05	900	450	150	75	7,0
GE□MFE-06	1.300	650	200	100	7,9
GE□MFE-08	2.000	1.000	450	225	15,9
GE□MFE-10	2.300	1.150	500	250	29,2
GE□MFE-10 F	2.300	1.150	500	250	29,2
GE□MFE-12	3.300	1.650	550	275	46,0
GE□MFE-12 F	3.300	1.650	550	275	46,0
GE□MFE-16	5.000	2.500	850	425	94,4
GE□MFE-16 F	5.000	2.500	850	425	94,4

Gabelköpfe mit Federklappbolzen, kombiniert mit Gelenkköpfen der Maßreihe E,
EBRM und EARM ► Seite 708–711

Poportional pressure regulator VPPM-...C1 (LCD)



FESTO

Festo AG & Co. KG

Postfach
D-73726 Esslingen
++49/711/347-0
www.festo.com

Operating instructions

753 264
1007c

Original: de



Note

Installation and commissioning may only be performed in accordance with these operating instructions by technicians with appropriate qualifications.

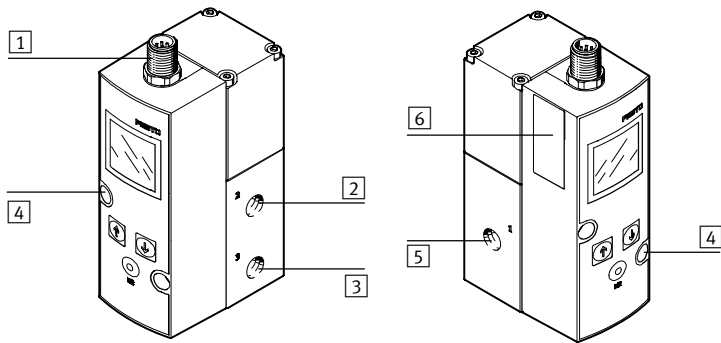


Note

The product is suitable for use only for industrial purposes. In residential areas, measures for radio interference suppression may be necessary.

1 Product description

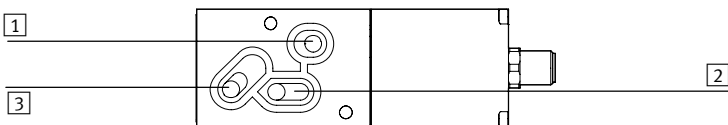
1.1 Connections, mounting holes and control sections (in-line valve)



- 1 Electrical connecting plug M12 (8-pin)
- 2 Air connection (2), pressure output
- 3 Exhaust connection (3)
- 4 Through-holes for fastening
- 5 Compressed air connection (1), supply port
- 6 Rating plate

Fig. 1

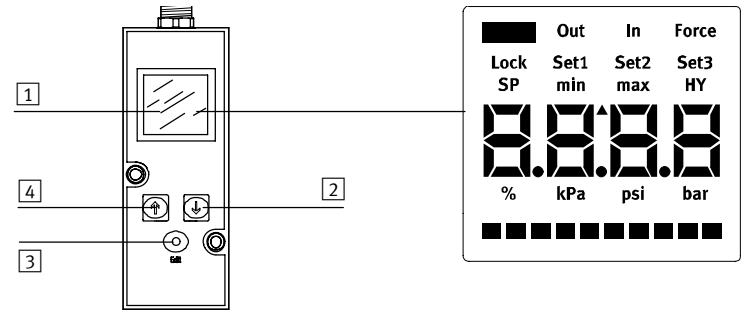
1.2 Pneumatic connections (flanged valve)



- 1 Duct (2) air, pressure output
- 2 Duct (1) compressed air, supply port
- 3 Duct (3) exhaust

Fig. 2

1.3 Display and control elements, display symbols



- 1 Display
- 2 DOWN button
- 3 EDIT button
- 4 UP button

Fig. 3

2 Application and function

The VPPM-...C1 has been designed for regulating a pressure proportional to a specified setpoint value. A built-in pressure sensor records the pressure at the working line and compares this value with the setpoint value. If the actual value differs from the setpoint value, the regulating valve is actuated further until the output pressure reaches the setpoint value.

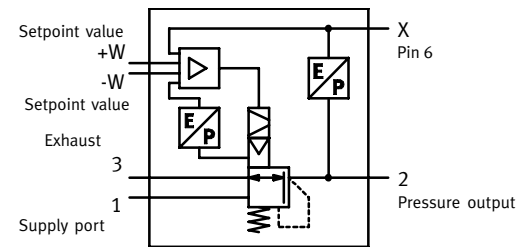


Fig. 4

3 Variants of the VPPM-...

Type code of the VPPM-...

Item	Properties	Meaning
1	Nominal size [mm] Valve type	6, 8 F (flanged), L (in-line)
2	Dynamic response class	L (Low)
3	Valve function	1 (3-way pressure regulator normally closed)
4	Pneumatic port - Flange/sub-base - ISO thread - NPT thread	F G18 (1/8"), G14 (1/4") N18 (NPT 1/8), N14 (NPT 1/4)
5	Standard control range: - Lower pressure value - Upper pressure value Alternative control ranges: 1) - Lower pressure value - Upper pressure value	0L (0 bar) 2H (2 bar), 6H (6 bar), 10H (10 bar) ...L (... = value between 0.1...10 bar) e.g. 4L ...H (... = value between 0.1...10 bar) e.g. 9H
6	- Setpoint specification - Switching output	A4 (4 ... 20 mA), V1 (0 ... 10 V) P (PNP), N (NPN)
7	Accuracy Operator unit	... (2%, standard), S1 (1%) ... (LED), C1 (LCD)

1) When an upper and lower pressure value are used, it is not possible to guarantee the overall accuracy of the VPPM-...C1.

Fig. 5

4 Requirements for product use



Warning

Depending on the functions of the machine/system, the manipulation of signal statuses can cause serious injury to human beings and material damage.

- Note that if the switching characteristics of the switching outputs are modified in the EDIT mode, the new status will be effective immediately.
- Activate the password protection (security code) in order to prevent unintentional modification by unauthorised third parties (see section 6 under EDIT mode).



Note

Improper handling can result in malfunctions.

- Make sure that the following specifications are always observed in order to ensure correct and safe use of the product.

- Compare the limit values specified in these operating instructions with your actual application (e.g. operating media, pressures, forces, torques, temperatures, masses, speeds, voltages).
- Take into consideration the ambient conditions at the location of use.
- Please comply with national and local safety laws and regulations.
- Remove all transport packing such as protective wax, foils (polyamide), caps (polyethylene), cardboard boxes. The packing is intended for recycling (except for: oiled paper = general waste).
- Use the product in its original state. Unauthorised modification is not permitted.
- Observe the warnings and instructions on the product and in the relevant operating instructions.
- Ensure that the compressed air is properly prepared (see section "Technical data").
- Pressurise your entire system slowly. This ensures that there will not be any uncontrolled movements.

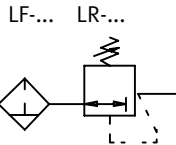


Fig. 6

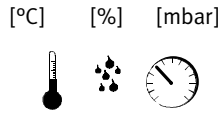


Fig. 7

5 Installation

5.1 Mechanical



Note

- Installation and commissioning may only be performed in accordance with the operating instructions and by qualified personnel.
- Handle the VPPM-...C1 with care so that the electrical connection is not damaged. This could lead to an impairment of operational reliability.

- Make sure there is sufficient space for the cable connection and tube couplings. This prevents the connecting cable from being bent.
- Place the VPPM-...C1 as near as possible to the consuming device. This leads to improved control precision and shorter response times.

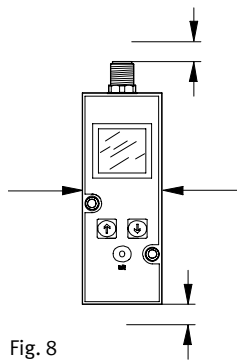


Fig. 8

Wall mounting (in-line valve)

- Fasten the VPPM-...C1 in the intended position with two M4 screws. In order to do this use angle bracket type VAME-P1-A (see diagram). When mounting the VPPM with the aid of the bracket, the VPPM-...C1 may only be loaded statically (torque: 1.0 Nm).

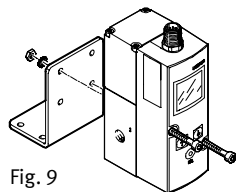
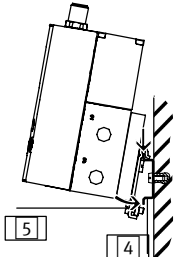
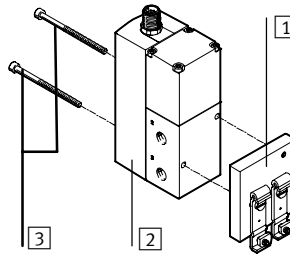


Fig. 9

H-rail mounting (in-line valve)

- Mount the H-rail adaptor on the VPPM-...C1 using the screws included (1/8": M4 x 65, 1/4": M4 x 77) (tightening torque approx. 1.5 Nm).
- Hang the VPPM-... onto the H-rail.
- Secure the VPPM-...C1 with the retaining screws of the H-rail adapter (tightening torque 1.5 Nm).



- 1 H-rail adaptor type VAME-P1-T
- 2 VPPM-...C1

- 3 Mounting screws M4
- 4 H-rail
- 5 H-rail clamping unit

Fig. 10

Sub-base mounting (flanged valve)

- Fasten the VPPM-...C1 (2) on the pneumatic manifold rail type VABM-P1-SF-G18-... (1).
- Tighten the mounting screws (3) (tightening torque 1.5 Nm).

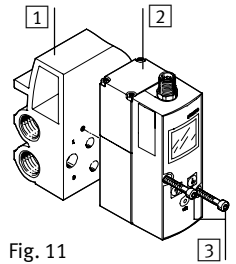


Fig. 11

5.2 Pneumatic (in-line valve)

- Remove the covers from the supply ports.
- Attach the pneumatic tubing to the following connections (see Fig. 1):
 - Supply port (1) Item. [5]
 - Supply port (2) Item. [2]
- Install a silencer at exhaust port (3) Item [3] or remove the exhaust with ducted tubing.

5.3 Electric



Warning

For electrical isolation of operating voltage:

- Use only power sources which guarantee reliable electrical isolation of the operating voltage as per IEC/DIN EN 60204-1. Observe also the general requirements for PELV circuits as per IEC/DIN EN 60204-1. Switched-mode power supplies are permitted, providing they guarantee reliable isolation in accordance with EN 60950/VDE 0805.



Note

Long signal lines reduce the resistance to interference.

- Make sure that the signal lines are no longer than 10 m.

- Using the rating plate, check which valve variant you have:

	Designation on the rating plate	
	VPPM-...-V1...C1	VPPM-...-A4...C1
Designation	Voltage variant	Current variant
Electrical setpoint value	DC 0 ... 10 V	4 ... 20 mA

Fig. 12

- Check whether the following options are used on the VPPM-...C1:
 - Measuring the actual voltage/current value
- Make sure that the cables are not squashed, bent or stretched:



Fig. 13

- Use the pre-assembled plug socket with cable from Festo (for accessories, see www.festo.com/catalogue). You can then guarantee that the specified protection class IP 65 and EMC are fulfilled.
- If a screened cable is used, earth the screening on the opposite end of the cable from the VPPM-...C1.



Note

If the Y-connecting cable type NEBV-M12G8-KD-...-M12G5 is connected to CPX I/O modules, the I/O modules will no longer be galvanically isolated.

- Connect the cables of the VPPM-...C1 in accordance with the circuit diagram.

Circuit diagrams for the VPPM-...C1

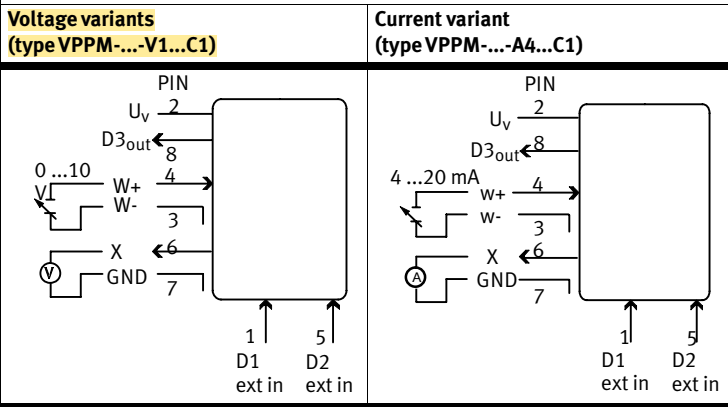


Fig. 14

- The individual pins on the electrical connection are allocated as follows:

PIN	Cable colour 1)	Port designations		Plug M12
		Voltage variants type VPPM-...-V1...C1	Current variants type VPPM-...-A4...C1	
1	White (WH)	Digital input D1		
2	Brown (BN)	+24 V DC power supply		
3	Green (GN)	Analogue input W- (- setpoint value)		
4	Yellow (YE)	Analogue input W+ (+ setpoint value) 0 ... 10 V	Analogue input W+ (+ setpoint value) 4 ... 20 mA	
5	Grey (GY)	Digital input D2		
6	Pink (PK)	Analogue output X (actual value)		
7	Blue (BU)	GND Supply earth		
8	Red (RD)	Digital output D3 2)		
PE braided screen on thread				

1) Using the plug socket with cable as specified in the chapter "Accessories". The maximum tightening torque is 0.5 Nm.

Fig. 15

VPPM-...circuit diagrams Switching output

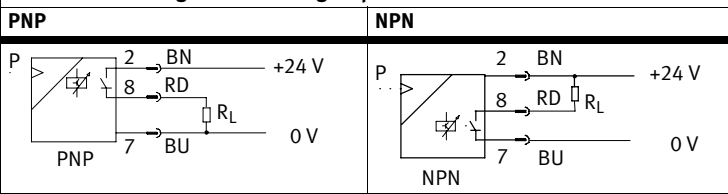


Fig. 16

6 Commissioning

6.1 Fast commissioning with factory setting

The VPPM-...C1 is delivered with the following factory setting:

- Switching characteristics: Threshold value comparator
- Switching point: 40 % FS (full scale)
The switching point is only active when a comparator is selected (threshold value or window comparator).

- Hysteresis: 0.5 % FS
- Switching characteristic: NO (normally open – contact)

If you wish to use the factory setting but define a different switching point for Out, proceed as follows;



Note

When the operating voltage is switched on, the VPPM-...C1 will automatically be in the RUN mode (basic setting). If you are not sure whether the VPPM-...C1 is in the RUN mode, hold the EDIT button down for 3 s. The VPPM-...C1 will then be in the RUN mode. You can set switching points manually.

You can set a switching point manually as follows:

- In order to activate the EDIT mode, press the EDIT button. [Out] flashes.
- Press the EDIT button twice. SP flashes.
- Edit the threshold value shown with the UP or DOWN button.
- Hold the EDIT button pressed down for 3 s. The VPPM-...C1 will then be in the RUN mode.

6.2 Preparing for commissioning



Note

- Make sure that the VPPM-...C1 is not subjected to high-frequency irradiation (e.g. by radio sets, mobile telephones or other devices which emit interference). In this way you will avoid increased tolerances in the output pressure (cf. specifications on EMC in the section "Technical data").
- The VPPM-...C1 interprets setpoint value signals which are smaller than 1 % full scale as 0 V (see output pressure range table). In this case the working pressure will be set to the ambient pressure.

During the initial start-up the RUN mode will appear. This shows the current measured value. By briefly pressing the DOWN button you can display the setpoint value.

The RUN mode can be accessed from other modes:

- Press the EDIT button down for 3 s.
- If a monitoring time expires (for timeout, see section "Menu structure")

Proceed with preparation for commissioning as follows:

- Switch on the operating voltage. The VPPM-...C1 will then be in the RUN mode.
- Check the functioning of the VPPM-...C1

Observe the following points for setting the control characteristics via digital inputs or display:



Note

Selection of the control characteristics via digital inputs D1 and D2 takes priority over the factory parameter sets in VPPM-...C1.

- If you wish to select the control characteristics via the factory parameters, make sure that a logic 0 signal is present at digital inputs D1 and D2.
- You can select the desired factory parameter set in the EDIT menu on the VPPM-...C1 (see Fig. 28). Parameter set Set2 (universal control characteristics) is preselected ex-works.

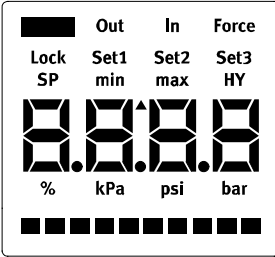
- If you wish to preselect the control characteristics via the digital inputs, activate the following signals at digital inputs D1 and D2:

Parameter set	Control characteristics	Input D1 PIN 1	Input D2 PIN 5
1	Fast control reaction	1 ¹⁾	0 ¹⁾
2	Universal control reaction (factory setting)	0 ¹⁾	1 ¹⁾
3	Precise control reaction	1 ¹⁾	1 ¹⁾
...	Select parameter set via display of the VPPM-...C1	0 ¹⁾	0 ¹⁾

1) 1 = 24 V DC / 0 = 0 V DC

Fig. 17

6.3 Symbols on the display of the VPPM-...C1



Menu level	Symbol	Description
Out		Switching output set/not set
	[Out]	Switching output
		Threshold value comparator
	[SP]	Switching point
		Window comparator
	[SP max] [SP min]	Upper switching point Lower switching point
	SP.O.	SetPoint OK
	[HY]	Hysteresis
	[NO] [NC]	Contact (normally open) Contact (normally closed)
In	[In]	Input
	[min] [max]	Lower pressure value Upper pressure value
	[mA] or [V] ¹⁾ , [%], [bar], [psi], [kPa] ²⁾	Units of the input
Force	[Force]	Manual setpoint specification
Set...	[Set 1], [Set 2], [Set 3]	Factory parameter sets
SPEC	[SPEC]	Special menu
	[LOCK]	Security code active (blocked against unauthorised programming)
	[kPa], [psi], [bar]	Units of pressure, can be switched
		Pressure display as bar chart

1) Depends on the variant of the VPPM-...C1
2) Depends on unit set in SPEC menu

Fig. 18

6.4 Symbols for representing the menu structure

Symbol	Meaning
	(Timeout) Automatic return to the basic status (RUN mode) when the monitoring time has expired (e.g. here after 80 seconds)
	EDIT (Cancel) In order to return manually to the basic status (RUN mode), press the EDIT button for 3 seconds.
	Out The icon on the display flashes (here Out)
	Security code active (lock - blocked against unauthorised programming)
	Security code inactive (Lock)
	Press button (here UP button)
	Press the UP button or the DOWN button to set values or functions)
	Press the UP button or the DOWN button to change the functions in the menu.
	Edit Press the EDIT button.

Fig. 19

RUN mode

The RUN mode indicates the current pressure value for the output (Out). By briefly pressing the DOWN button you can display the setpoint value for the input (In).

SHOW mode (see Fig. 20)

If the VPPM-...-C1 is in RUN mode, the SHOW mode will become active when the UP button or the DOWN button is pressed twice.

If the output (Out) is selected, the current settings of the switching output (Out) will be displayed one after the other each time the UP button is pressed.

If the input (In) is selected, the minimum pressure value and the maximum pressure of the input [In] will be displayed one after the other when the DOWN button is pressed.

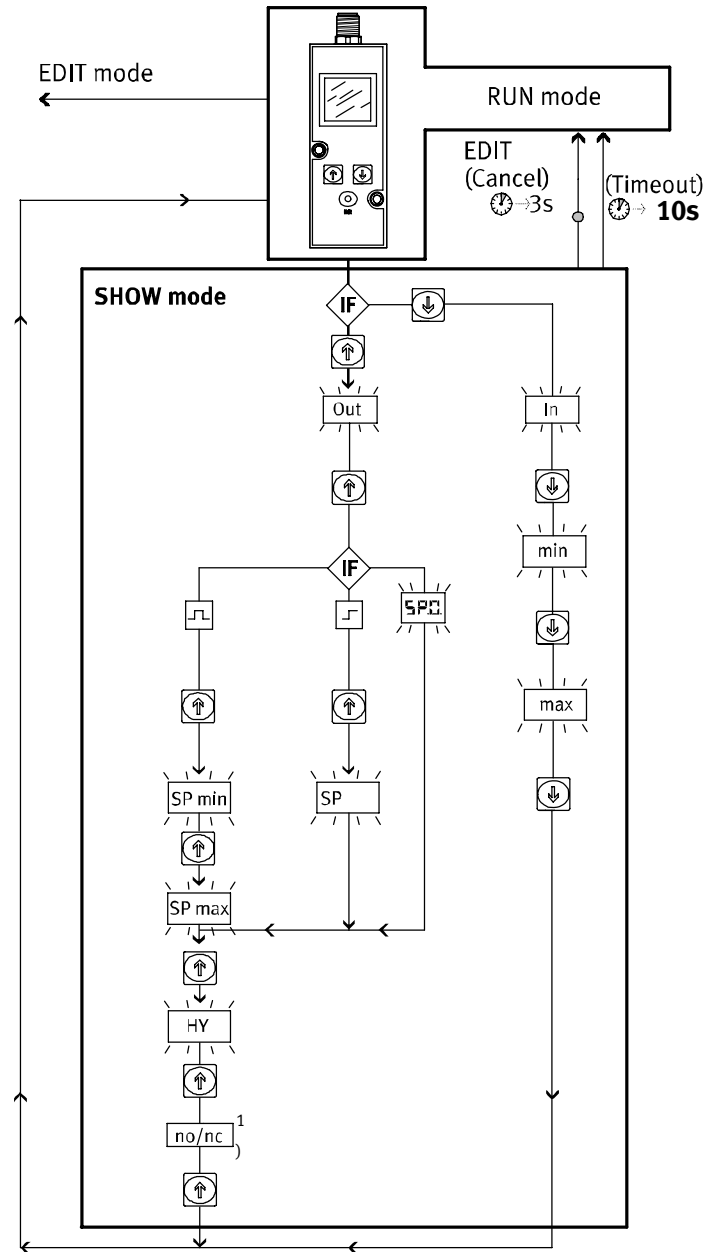
The SHOW mode shows the following settings and values:

Settings for [Out]:

- Switching function [threshold value/window comparator/SP.O.]
- Switching point [SP] or [SP min] and [SP max]
- Hysteresis [HY]
- Switching characteristic [NO/NC]
- Press the UP button again several times and check the current values and settings of [Out]. After the switching characteristic is displayed you can return to the RUN mode by pressing the UP button again.

Settings for [In]:

- Minimum pressure value [min]
- Maximum pressure value [max]
- Press the DOWN button several times and check the current values of [In]. When the maximum pressure is displayed you can return to the RUN mode by pressing the DOWN button again.



1) Depending on the setting in the [Out] menu in the EDIT mode

Fig. 20

EDIT mode (see also Fig. 21)

The EDIT mode enables the following settings:

In the OUT menu:

- Selecting the switching function (threshold value, window comparator or SP.O.)
- Setting the switching points [SP] or [SP min] and [SP max] and hysteresis [HY]
- Selecting the switch type [NO/NC] (normally open/closed)

In the IN menu

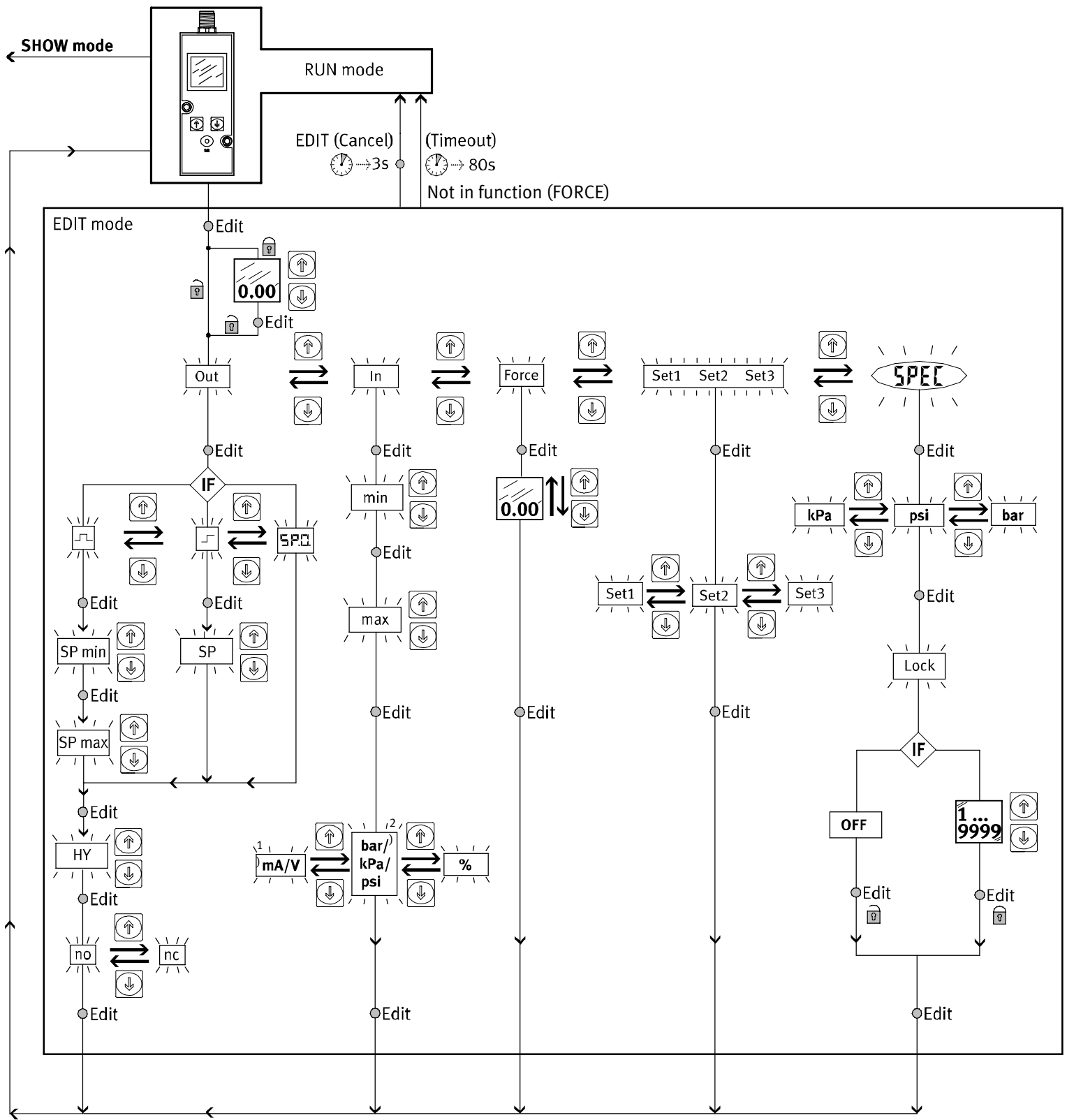
- Setting the minimum and maximum pressure for the pressure regulation range
- Selecting the pressure unit [kPa, psi, bar] or [mA/V] or [%] (depending on setting in menu [SPEC])

In the Set menu:

- Selecting a factory parameter set [Set1], [Set2] or [Set3]

In the SPEC menu:

- Setting the security code [Lock] and the pressure unit [kPa, psi, bar]



1) Depends on the version of the VPPM-...C1

2) Depends on the setting in the [SPEC] menu

Fig. 21 EDIT mode

6.5 Configuring the VPPM-...C1

Editing the pressure range and the arrangement of the setpoint value display	
1. In order to activate the EDIT mode, press the EDIT button.	
Only with active security locking - [Lock] flashes:	
2. Press the UP/DOWN button until the desired security code is set and confirm by pressing the EDIT button.	
[Out] flashes.	
3. Press the UP/DOWN button until [In] flashes in the display, then press the EDIT button.	
[min] flashes.	
Editing the pressure regulation range:	
4. Set the minimum pressure value with the UP/DOWN buttons, then press the EDIT button.	
[max] flashes.	
5. Set the maximum pressure value with the UP/DOWN buttons, then press the EDIT button.	
The current setpoint value display type flashes.	
– Either [mA] or [V] blinks, depending on the variant of the VPPM-...C1	
– or in percent blinks [%]	
– or [kPa], [psi] or [bar] blink, depending on the unit set in the SPEC menu.	
Configuring the setpoint value display	
6. Set the desired display type using the UP/DOWN buttons, then press the EDIT button.	
The VPPM-...C1 is then in the RUN mode again.	

Fig. 22

Configuring the switching output (Out)



Warning

Depending on the functions of the machine/system, the manipulation of signal statuses can cause serious injury to human beings and material damage.

- Note that if the switching characteristics of the switching outputs are modified in the EDIT mode, the new status will be effective immediately.

- Define the desired switching characteristics of switching output D3.

Switching points (SP...) and hysteresis (Hy)

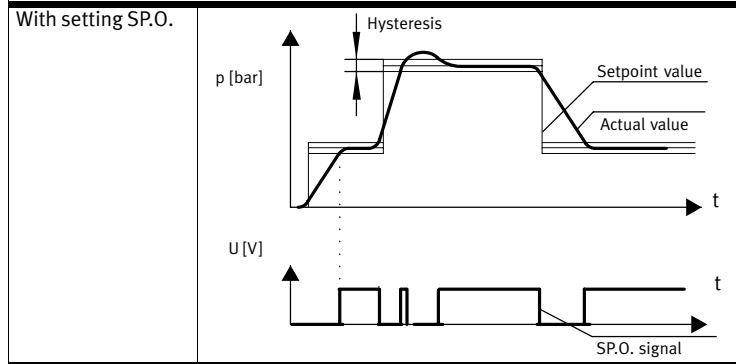


Fig. 23

Switching points (SP...) and hysteresis (Hy) with NO setting (normally open contact)

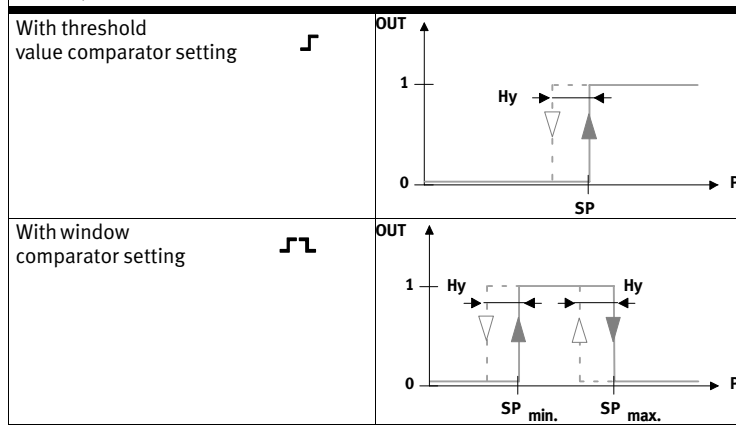


Fig. 24

Switching points (SP...) and hysteresis (Hy) with NC setting (normally closed contact)

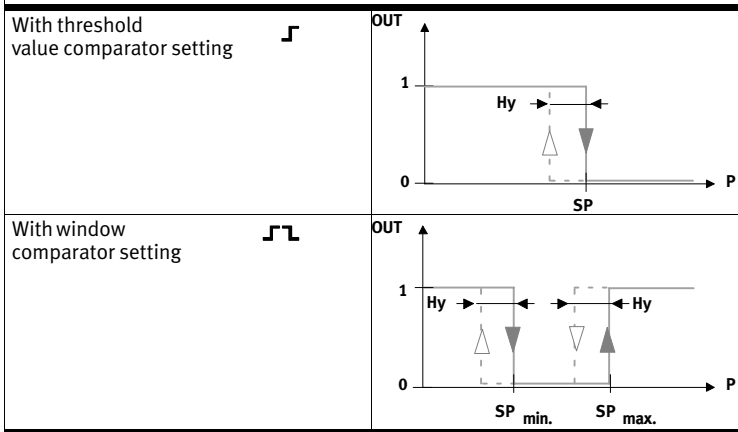


Fig. 25

Configuring the switching output

1. In order to activate the EDIT mode, press the EDIT button.
Only with active security locking: [Lock] flashes.
2. Press the UP/DOWN button until the desired security code is set and confirm by pressing the EDIT button.
[Out] flashes.
3. Press the EDIT button.
The current switching characteristic flashes.
4. Select the desired switching characteristic (threshold value/window comparator or S.P.O.) with the UP/DOWN button and confirm with the EDIT button.
With switching function Threshold Value/Window Comparator:
[SP] or [SP] _{min} flashes.
5. Set the switching point (SP or SP _{min}) with the UP/DOWN button and confirm with the EDIT button.
With "window comparator" switching function:
[SP] _{max} flashes
6. Set the switching point (SP _{max}) with the UP/DOWN button and confirm with the EDIT button.
[HY] flashes.
7. Set the hysteresis (HY) with the UP/DOWN button and confirm with the EDIT button.
[NO] or [NC] flashes.
8. Set the switching characteristic (NO/NC) with the UP/DOWN button and confirm with the EDIT button.
The VPPM-...C1 is then in the RUN mode again.

Fig. 26

Forcing the input

1. In order to activate the EDIT mode, press the EDIT button.
Only with active security locking: [Lock] flashes.
2. Press the UP/DOWN button until the desired security code is set and confirm by pressing the EDIT button.
[Out] flashes.
3. Press the UP/DOWN button until [Force] flashes in the display, then press the EDIT button.
[Force] flashes.
4. The set value can now be edited by pressing the UP and DOWN buttons.
Caution
Please note: the controller will apply the new set value immediately.
5. By pressing the EDIT button you can exit the Force mode. The analogue voltage and current values of the input still apply.
The VPPM-...C1 is then in the RUN mode again.

Fig. 27

Selecting factory parameter sets (presets)

- In order to activate the EDIT mode, press the EDIT button.
 - Only with active security locking - [Lock] flashes:
2. Press the UP/DOWN button until the desired security code is set and confirm by pressing the EDIT button.
 - [Out] flashes.
3. Press the UP/DOWN button until [Set1 Set2 Set3] flashes in the display, then press the EDIT button.
 - [Set1], [Set2] or [Set3] flashes.
4. Select the desired factory parameter set value with the UP/DOWN buttons.
Set1 (parameter set 1): Fast control reaction
Set2 (parameter set 2): Universal control reaction
Set3 (parameter set 3): Precise control reaction
The selected parameter set flashes. In order to confirm, press the EDIT button.
- The VPPM-...C1 is then in the RUN mode again.

Fig. 28

Setting the unit of measurement and the security code

- In order to activate the EDIT mode, press the EDIT button.
 - Only with active security locking - [Lock] flashes:
2. Press the UP/DOWN button until the desired security code is set and confirm by pressing the EDIT button.
 - [Out] flashes.
3. Press the UP/DOWN button until [SPEC] flashes in the display, then press the EDIT button.
 - The current unit [kPA] or [psi] or [bar] flashes.
4. Select the desired unit [kPA], [psi] or [bar] with the UP/DOWN button. The selected unit flashes. In order to confirm, press the EDIT button.
 - [Lock] flashes, display [OFF] or display of security code.
5. Set the desired security code, maximum 4-figure, with the UP/DOWN button (OFF = no protection). In order to confirm, press the EDIT button.
Tip: Keep the security code in a safe place.
If you forget the security code, please see section 7.
 - In order to confirm, press the EDIT button.
- The VPPM-...C1 is then in the RUN mode again.

Fig. 29

- Connect the VPPM-...C1 with a setpoint value signal. The VPPM-...C1 possesses a "differential input." The setpoint value signal 0 ... 10 V is then applied to contacts 3 and 4, whereby the lower potential must be connected to contact 3 and the higher potential to contact 4. Contact 3 (- setpoint value) can be connected to contact 7 (0 V DC).
- Apply direct current (DC) to the VPPM-...C1 (supply voltage UV = 24 V DC ± 10%).
- Pressurise the VPPM-...C1 with a supply pressure at least 1 bar higher than the maximum desired output pressure. An output pressure p2 proportionate thereto is then set. The following output pressure is then assigned to the setpoint value signal:

VPPM-...C1	Output pressure with Signal 1 % FS ¹⁾	Output pressure with Signal 100 % FS ¹⁾
2 bar type	0.02 bar	2 bar
6 bar type	0.06 bar	6 bar
10 bar type	0.1 bar	10 bar

- 1) - FS = Full scale:
(1 % FS = 0.1 V or 4.16 mA / 100 % FS = 10 V or 20 mA)
- Output pressure: 0 V or 4 mA creates an output pressure of 0 bar

Fig. 30

Select a suitable parameter set:

Recommended parameter sets VPPM-... Sizes 1/8"

Tube length ¹⁾	Open system	Output values in ml		
		0 ... 100	100 ... 1000	> 1000
0 m	3	3	2	1
1 m	3	3	2	2
3 m	3	3	3	2
5 m	3	3	3	2

- 1) with tubing inner diameter 6 mm for 1/8" or 8 mm for 1/4"

Fig. 31

Recommended parameter sets VPPM-... Sizes 1/4"

Tube length ¹⁾	Open system	Output values in ml		
		0 ... 500	500 ... 2000	> 2000
0 m	3	1	2	3
1 m	3	1	2	3
3 m	3	2	3	3
5 m	3	3	3	3

- 1) with tubing outer diameter 8 mm or 10 mm

Fig. 32

7 Operation



Note

When switching off the VPPM..., make sure that first the setpoint value is set to 0 V or 4 mA, then the supply pressure, then the setpoint value and finally the supply voltage are switched off.

Resetting the VPPM-...C1 to the factory setting

(also if the security code cannot be found)



Note

By resetting to factory setting, the current settings are lost.

- If needed, note down these settings before resetting.

- Proceed as follows:

Reset the VPPM-...C1

- Press and hold down the UP, DOWN and EDIT buttons.
 - Switch on the operating voltage.
 - Then release the buttons.
- [ALL] flashes.
- Select the parameters which you wish to reset to the factory setting with the UP and DOWN buttons.
[Out] flashes: All output parameters are reset.
[In] flashes: All input parameters are reset.
[All] flashes: All input and output parameters as well as the security code are reset.
- Press the EDIT button in order to reset the selected parameters.
- The VPPM-...C1 is then in the RUN mode again.

Fig. 33

8 Service and maintenance

Cleaning:

- Switch off the following sources of energy before cleaning the exterior of the device:
 - Operating voltage
 - Compressed air
 - If the VPPM-...C1 is dirty, clean the exterior with a soft cloth.
- The permitted cleaning agents are mild soapy water (max. + 50 °C) or all non-abrasive media.

9 Disassembly

Disassembling:

- Switch off the following sources of energy:
 - Operating voltage
 - Compressed air
- Disconnect the relevant connections on the VPPM-...C1.
- Remove the VPPM-...C1 from the mounting surface/H-rail.

10 Accessories

For accessories, see www.festo.com/catalogue

11 Safety setting

Wire break	Voltage type	Current type
Setpoint value	Output pressure drops to 0 bar.	The last value is saved. The output pressure is maintained but not regulated.
Supply voltage	The last value is saved. The output pressure is maintained but not regulated. In the medium term the pressure at the output can increase or diminish.	

Fig. 34

12 Eliminating malfunctions

Cause	Error display
<ul style="list-style-type: none"> – Limit value not reached (setpoint value) – Limit value exceeded (setpoint value) 	ER.09 ER.10
<ul style="list-style-type: none"> – Undervoltage in the 24 V operating voltage – Overvoltage in the 24 V operating voltage – Hardware error – Temperature range exceeded in VPPM-...C1 	ER.05 ER.26 ER.01 ER.28

Fig. 35

Malfunction	Possible cause	Remedy
VPPM-...C1 not reacting	Supply voltage not applied, POWER LED does not light up	<ul style="list-style-type: none"> • Check connection of the 24 V DC power supply
	Set value voltage or set value current not applied	<ul style="list-style-type: none"> • Check controller • Check connection
	VPPM-... C1 defective	Send the device to Festo for repairs.
Flow rate too low	Restriction of the flow cross section due to connection design (swivel fittings).	<ul style="list-style-type: none"> • Use an alternative connection
Pressure increase too slow	Large cylinder volume and long tubing	<ul style="list-style-type: none"> • Select different parameter set • Use larger nominal size VPPM-...C1
Pressure constant despite modified setpoint specification	<ul style="list-style-type: none"> – Supply cable breakage (the last output pressure set is maintained but not regulated. In the medium term the pressure at the output can increase or diminish). – Supply pressure P1 too low 	<ul style="list-style-type: none"> • Replace power supply cable • Increase supply pressure
UP/DOWN buttons on the VPPM-...C1 do not react.	Voltage is present at digital inputs D1 and D2.	<ul style="list-style-type: none"> • Apply 0 V DC to digital inputs D1 and D2.

Fig. 36

13 Technical data

General data	
Design	Proportional pressure regulator
Mounting position	Any, preferably horizontal (display components facing upwards)
Medium	Filtered, unlubricated compressed air (grade of filtration min. 40 µm), no condensation permissible.
Protection class	IP 65 when mounted, with tightened mounting screws, in connection with plug socket according to "Accessories".
Perm. temp. range [°C]	<ul style="list-style-type: none"> – Ambient 0 ... +50 – Medium +10 ... +50 – Storage -10 ... +70
Vibration and shock	<p>The following data does not apply to mounting the VPPM... to the angle bracket VAME-P1-A.</p> <p>Tested according to DIN/IEC 68/EN 60068 part 2-6; for wall mounting: 0.35 mm path at 10 ... 60 Hz, 5 g acceleration at 60 ... 150 Hz</p> <p>Tested according to DIN/IEC 68/EN 60068 part 2-27; for wall mounting: ±30 g at 11 ms duration; 5 shocks per direction</p>
Materials	<p>Housing Al wrought alloy</p> <p>Cap PAXM D6-GF50/gr-P, PA6-GB20,GF10/gr-P</p> <p>Seals NBR</p> <p>Lubrication Silicone-free</p>
Weight [g]	<p>1/8": 400</p> <p>1/4": 560</p>

Fig. 37

Pneumatics data	2 bar type	6 bar type	10 bar type
Pressure ranges [bar]			
<ul style="list-style-type: none"> – Perm. supply pressure – Regulation range 	0 ... 4 0,02 ... 2	0 ... 8 0,06 ... 6	0 ... 11 0,1 ... 10
	Supply pressure p1 at least 1 bar over output pressure p2		
Total leakage when new [l/h]	< 5		
Ports	G1/8" (1/8 NPT), G1/4" (1/4 NPT)		
Nominal size [mm]			
<ul style="list-style-type: none"> – Pressurisation – Exhaust 	<p>with 1/8": 6</p> <p>with 1/4": 8</p> <p>with 1/8": 4.5</p> <p>with 1/4": 7</p>		

Fig. 38

Electrics data	2 bar type	6 bar type	10 bar type
Electrical connection	Pin contact M12x1, 8-pin		
Perm. operating voltage [V DC]	21.6 ... 26.4 V DC (perm. residual ripple max. 10 %)		
Max. electrical power consumption [W]	7		
Power rating of digital switching output D3 (PIN 8 in el. connection) [mA]	Max. 60		
Max. perm. supply and signal line length [m]	10		
Overall accuracy [bar]			
<ul style="list-style-type: none"> – Standard (2 %) +0.5 x Hysteresis – Class S1 (1 %) +0.5 x Hysteresis 	0.045 0.025	0.135 0.075	0.225 0.125
Hysteresis	0.5 % Full scale		
Voltage boy VPPM-...-V1-...C1			
<ul style="list-style-type: none"> – Setpoint variable – Input resistance (setpoint value) – Load of actual value output 	[V DC] [kΩ] [kΩ]	0 ... +10 10 min. 2	
Current type VPPM-...-A4-...C1			
<ul style="list-style-type: none"> – Setpoint variable [mA] – Input resistance (setpoint value) – Load of actual value output [Ω] 	[mA] [Ω] [Ω]	4 ... 20 250 Max. 500	
Electromagnetic compatibility (EMC)			
<ul style="list-style-type: none"> – interference emission and resistance 	<p>See declaration of conformity</p> <p>➔ www.festo.com</p> <p>CE conformity for industrial installations fulfilled.</p>		

Fig. 39

Low Friction Cylinders

Series MQ

Metal Seal Type



Compact Low Friction Cylinder Series MQQ

P.1172

Series	Bore size (mm)	Operating pressure range (MPa)	Actuation speed (mm/s)
MQQT Standard type	10	0.005 to 0.5	0.3 to 300
	16		
	20		
MQQL Lateral load resisting type (Built-in ball bushing)	25	0.005 to 0.7	0.5 to 500
	30		
	30		
	40		



Lateral Load Resisting Low Friction Cylinder Series MQM

P.1181

Series	Bore size (mm)	Operating pressure range (MPa)	Actuation speed (mm/s)
MQML Standard type	6 (Standard only)	ø6: 0.02 to 0.7 ø10 to ø25: 0.005 to 0.7	0.5 to 1000
	10		
	16		
MQML□□H High speed/frequency	20	0.01 to 0.7	5 to 3000
	25		



Low Friction Cylinder (Single Acting) Series MQP

P.1192

Series	Bore size (mm)	Operating pressure range (MPa)	Thrust control standard (N)
MQP	ø4	0.001 to 0.7 (Except for moving parts mass)	0.01 to 8
	ø6		0.03 to 19
	ø10		0.08 to 50
	ø16		0.20 to 140
	ø20		0.30 to 200

REA

REB

REC

C□Y

C□X

MQ

RHC

RZQ

D-□

-X□

Individual
-X□

Metal Seal

Lateral Load Resisting Low Friction Cylinder Series MQM

ø6, ø10, ø16, ø20, ø25

How to Order

MQML B 10 - 15 D

Lateral load resisting low friction specification

Type

L Lateral load resisting type (Built-in ball bushing)

Mounting

B	Basic type
L	Foot type
F	Rod side flange type
G	Head side flange type (Except for ø6)
C ^{Note 1)}	Single clevis type (Non-integrated type)
D ^{Note 2)}	Double clevis type

Note 1) Bore size: 20, 25 mm only
* Mounting brackets are included when shipped, but unassembled. (Except for clevis type.)
Note 2) ø6, ø10, ø16 Integrated type
ø20, ø25 Non-integrated type

Bore size

6	6 mm
10	10 mm
16	16 mm
20	20 mm
25	25 mm

Action

D Double acting

Cylinder stroke

Bore size (mm)	Standard stroke (mm)
6	15, 30, 45, 60
10	15, 30, 45, 60, 75, 100
16	15, 30, 45, 60, 75, 100
20	15, 30, 45, 60, 75, 100
25	15, 30, 45, 60, 75, 100

* Strokes are available in 1mm increments by installing spacers in standard stroke cylinders.

Function

Nil	Standard type
H ^{Note)}	High speed/High frequency type (Without fixed orifice)

Note) Except for 6 mm bore size.

Port thread type

Nil	M thread	ø6 to ø16
	Rc	
TN	NPT	ø20, ø25
TF	G	

* The MQM series is not auto switch capable.

Mounting Style/Accessories

Mounting bracket		B: Basic	L: Foot	F: Rod side flange	G: Head side flange	C: Single clevis	D: Double clevis	Note
Standard	Mounting nut ^{Note 1)}	● (1 pc.)	● (2 pcs.)	● (1 pc.)	● (1 pc.)	— ^{Note 1)}	— ^{Note 2)}	
	Rod end nut	●	●	●	●	●	●	
	Clevis pin	—	—	—	—	—	●	
Option	T-bracket	—	—	—	—	—	●	With pin

Note 1) Mounting nut is not included with the integral clevis, single clevis and double clevis types.
Note 2) Pin and retaining ring are packed with the double clevis type.

Mounting Bracket Part No.

Bore size (mm)	Foot ^{Note 1)}	Flange	Single clevis	Double clevis (with pin) ^{Note 2)}	T-bracket ^{Note 3)}
6	CJK-L016B	CJK-F016B	—	—	CJ-T010B
10	MQM-L010		—	—	
16	MQM-L016	CLJ-F016B	—	—	CJ-T016B
20	CM-L020B	CM-F020B	CM-C020B	CM-D020B	—
25	CM-L032B	CM-F032B	CM-C032B		—

Note 1-1) Bore size 6 mm:
1 foot bracket is included.
When ordering foot brackets, order 1 piece per a cylinder unit.
Note 1-2) Bore size other than 6 mm (10, 16, 20 and 25 mm) (Same as Series CM):
2 foot brackets and 1 mounting nut (1 set) are used for a cylinder unit.
When ordering foot brackets, order 2 pieces per a cylinder unit (shipped as a set).
Note 2) Clevis pin and retaining ring are included in package.
Note 3) T-bracket is applicable to the double clevis type (D).

REA

REB

REC

C□Y

C□X

MQ

RHC

RZQ

D-□

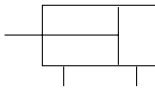
-X□

Individual
-X□



Symbol

Double acting, Single rod



Specifications

Bore size (mm)		6	10	16	20	25
Seal construction		Metal seal				
Action		Double acting, Single rod				
Fluid		Air				
Proof pressure		1.05 MPa				
Maximum operating pressure		0.7 MPa				
Minimum operating pressure <small>Note 1)</small>	Standard type	0.02MPa	0.005 MPa			
	H (High speed/High frequency type)	—	0.01 MPa			
Ambient and fluid temperature		-10 to 80°C				
Cushion		Rubber bumper (Standard)				
Lubrication <small>Note 2)</small>		Not required (Non-lube)				
Stroke length tolerance		+1.0 0				
Piston speed <small>Note 3)</small>	Standard type	0.5 to 1000 mm/s (Refer to page 1191.)				
	H (High speed/High frequency type)	—	5 to 3000 mm/s (Refer to page 1191.)			
Total allowable leakage	Supply pressure 0.1 MPa	150 cm ³ /min or less	250 cm ³ /min or less	300 cm ³ /min or less		
	Supply pressure 0.3 MPa	800 cm ³ /min or less	1000 cm ³ /min or less	1200 cm ³ /min or less		
	Supply pressure 0.5 MPa	1500 cm ³ /min or less	2500 cm ³ /min or less	3000 cm ³ /min or less		

Note 1) Value when horizontal. (Use clean, dry, and nonfreezing air) However, as the stroke increases, it will likely be affected by the mass of its moving parts and the pressure will likely increase by approx. 0.003 to 0.005 MPa due to an offset load from the mass of the rod.

Note 2) Refer to precautions on page 1189 regarding lubrication.

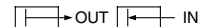
Note 3) Control low speed actuation with differential pressure and a speed controller, etc. (Refer to recommended circuit examples on page 1169 for further details.)

Mass: Standard Type, High Speed/High Frequency Type

Unit: g

Bore size (mm)	Cylinder stroke (mm)					
	15	30	45	60	75	100
6	52.5	60.7	68.9	77.1	—	—
10	92.4	102.7	113.0	123.3	133.6	143.9
16	152.4	175.2	198.0	220.8	243.6	266.4
20	349.8	392.6	435.4	478.2	521.0	563.8
25	460.8	510.0	559.2	608.4	657.6	706.8

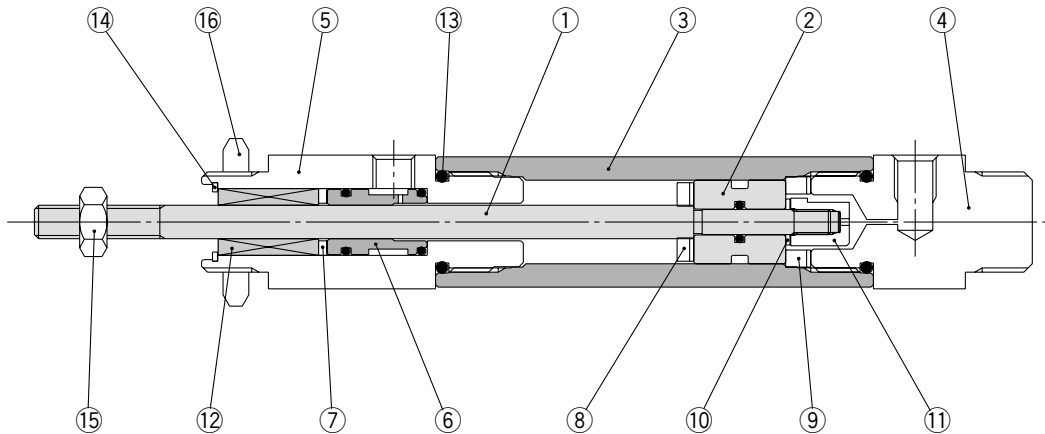
Theoretical Output



Unit: N

Bore size (mm)	Rod size (mm)	Direction	Piston area (mm ²)	Operating pressure (MPa)						
				0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7
6	4	IN	15.7	1.6	3.2	4.7	6.3	7.9	9.4	11.0
		OUT	28.3	2.8	5.7	8.5	11.3	14.2	17.0	19.8
10	4	IN	66.0	6.6	13.2	19.8	26.4	33.0	39.6	46.2
		OUT	78.5	7.9	15.7	23.6	31.4	39.3	47.1	55.0
16	5	IN	181.4	18.1	36.3	54.4	72.6	90.7	108.8	127.0
		OUT	201.1	20.1	40.2	60.3	80.4	100.6	120.7	140.8
20	8	IN	263.9	26.4	52.8	79.2	105.6	132.0	158.3	184.7
		OUT	314.2	31.4	62.8	94.3	125.7	157.1	188.5	219.9
25	10	IN	412.3	41.2	82.5	123.7	164.9	206.2	247.4	288.6
		OUT	490.9	49.1	98.2	147.3	196.4	245.5	294.5	343.6

Construction



Component Parts

No.	Description	Material	Note
1	Rod	Carbon steel	Hard chrome plated
2	Piston	Special stainless steel	
3	Tube	Special stainless steel	
4	Head cover	Aluminum alloy	Hard anodized
5	Rod cover	Aluminum alloy	Hard anodized
6	Sleeve	Special stainless steel	
7	Seat	NBR	
8	Bumper A	Polyurethane	
9	Bumper B	Polyurethane	
10	Bumper C	Polyurethane	
11	Nut	Aluminum alloy	
12	Ball bushing		
13	O-ring	NBR	
14	Retaining ring	Carbon tool steel	Nickel plated
15	Rod end nut	Steel	Nickel plated
16	Mounting nut	Steel	

REA

REB

REC

C□Y

C□X

MQ

RHC

RZQ

D-□

-X□

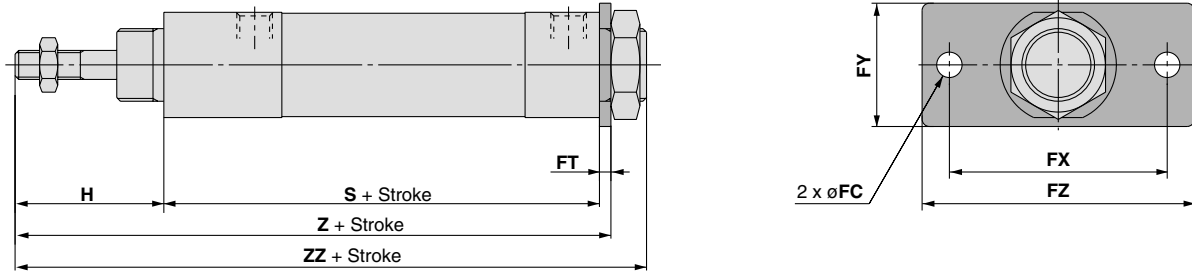
Individual
-X□

Series MQM

Refer to the basic type on page 1184 for other dimensions.

Dimensions

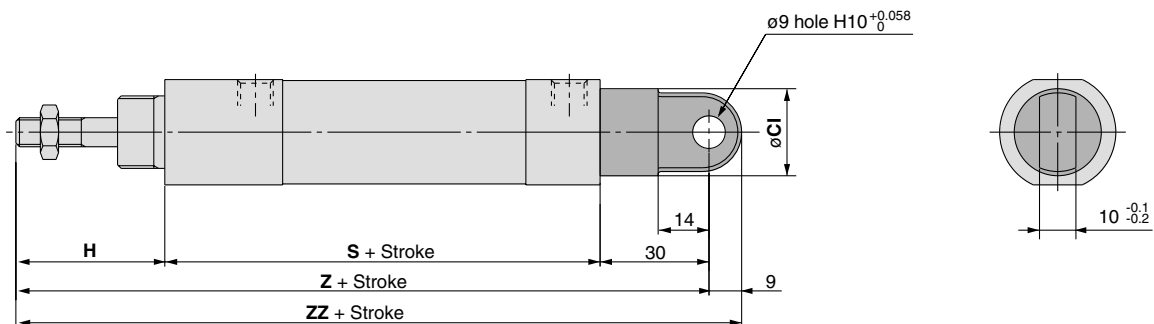
Head side flange type: MQMLG (Except for $\varnothing 6$)
 $\varnothing 10$, $\varnothing 16$, $\varnothing 20$, $\varnothing 25$



(mm)

Bore size (mm)	FC	FT	FX	FY	FZ	H	S	Z	ZZ
10	5.5	2.3	33	20	42	28	65	95.3	101
16	5.5	2.3	42	24	54	30	74	106.3	114
20	7	4	60	34	75	40.5	97.5	142	151
25	7	4	60	40	75	44.5	102.5	151	160

Single clevis type: MQMLC ($\varnothing 20$ and $\varnothing 25$ only)
 $\varnothing 20$, $\varnothing 25$ (Non-integrated type)



(mm)

Bore size (mm)	CI	H	S	Z	ZZ
20	24	40.5	97.5	168	177
25	30	44.5	102.5	177	186



Series *MQQ/MQM* Specific Product Precautions 1

Be sure to read before handling.

Refer to front matters 42 and 43 for Safety Instructions and pages 3 to 11 for Actuator and Auto Switch Precautions.

Operation

Caution

1. When mounting, thoroughly flush out the connector piping and be sure that dirt and chips, etc., do not get inside the cylinder.
2. Install an air filter with a filtration degree of 5 μm or less on the air supply. Furthermore, when controlling for low speed or controlled output, use clean air (atmospheric pressure dew point temperature of -10°C). Installation of a mist separator (filtration degree 0.3 μm or less) is also recommended.
3. Use a metal seal type when using solenoid valves for cylinder actuation. If a rubber seal type is used, there may be an increase in operating resistance due to grease sprayed from the main valve.
4. Operate so that the load applied to the piston rod is normally in the axial direction.
In the event that a lateral load is unavoidable, do not exceed the range of the allowable lateral load at the rod end (refer to pages 1190 and 1191). (Use outside of the operating limits may cause an adverse effect on the life of the unit through problems such as looseness in the guide unit and a loss of precision.)
5. Take care not to scratch or gouge the sliding portion of the rod. This may cause malfunction or shorten the unit's life.
6. When attaching a work piece to the end of the rod, move the rod to the fully retracted position and use the wrench flats at the end of the rod. Fasten the work piece without applying a large amount of torque to the rod.
7. Be certain to connect a load so that the rod axis is aligned with the load and its direction of movement.
Especially when a cylinder rod is connected directly to a guide function (such as bearings, etc.) on the equipment side, the following is likely to occur. Either an offset load will occur and the sliding resistance will not be stable or galling will occur on the metal seal parts. Therefore, be sure to use a floating joint or a spherical joint.
8. When a piston rod is driven with a circuit from an external force such as force, control, tension control, etc., a stick-slip phenomenon will likely occur and sliding resistance will not be stable if the amount of displacement is 0.05 mm or less.
9. When it is used in locations where a constant vibration is applied, such as a polishing machine, etc., consult with us.

Disassembly

Caution

1. The component parts of the metal seal cylinder are manufactured to precision tolerances, and therefore cannot be disassembled.

Lubrication

Caution

1. Lubrication of non-lube type cylinder

Do not apply lubrication when controlling for low speed or controlled output. If lubrication is applied, there may be changes in operating resistance due to factors such as the viscosity and surface tension of the oil. Also, use a metal seal type when using solenoid valves for cylinder actuation. If a rubber seal type is used, there may be an increase in operating resistance due to grease sprayed from the main valve.

Lubrication is also unnecessary for high speed actuation, but in the event that lubrication is applied, use turbine oil class 1 (with no additives) ISO VG32. (Do not use spindle oil or machine oil.)

REA

REB

REC

C□Y

C□X

MQ

RHC

RZQ

D-□

-X□

Individual
-X□



Series MQQ/MQM Specific Product Precautions 2

Be sure to read before handling.

Refer to front matters 42 and 43 for Safety Instructions and pages 3 to 11 for Actuator and Auto Switch Precautions.

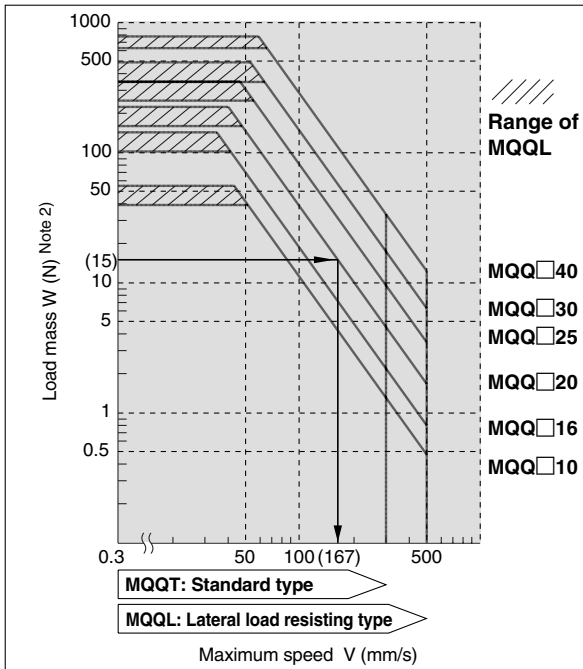
Selection

Series MQQ



Operating Speed

Load Weight and Maximum Speed: MQQT/MQQL



Example)
Driving a load of 15(N) using the MQQT 20 with a maximum speed of 167 (mm/sec)

Lateral load resisting type: MQQ

Bore size (mm)	Allowable kinetic energy (J)
10	0.006
16	0.010
20	0.022
25	0.044
30	0.080
40	0.160

Note 1) When a load is attached to the rod end, adjust the speed so that the maximum speed is no more than that shown in the graph for the corresponding load mass.

Note 2) The mass of cylinder's moving parts is included in the load mass. (See the graph on the right.)

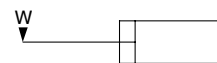
Moving Parts Mass

MQQ Moving Parts Mass

Bore size (mm)	MQQT Moving parts mass (g)	MQQL Moving parts mass (g)
10	Mass = 8.9 + {3.1 x (stroke/10)}	Mass = 16.7 + {3.1 x (stroke/10)}
16	Mass = 22.9 + {4.0 x (stroke/10)}	Mass = 34.9 + {4.0 x (stroke/10)}
20	Mass = 34.8 + {6.6 x (stroke/10)}	Mass = 57.9 + {6.6 x (stroke/10)}
25	Mass = 66.9 + {8.8 x (stroke/10)}	Mass = 97.7 + {8.8 x (stroke/10)}
30	Mass = 115.0 + {15.8 x (stroke/10)}	Mass = 190.2 + {15.8 x (stroke/10)}
40	Mass = 182.2 + {15.8 x (stroke/10)}	Mass = 257.4 + {15.8 x (stroke/10)}

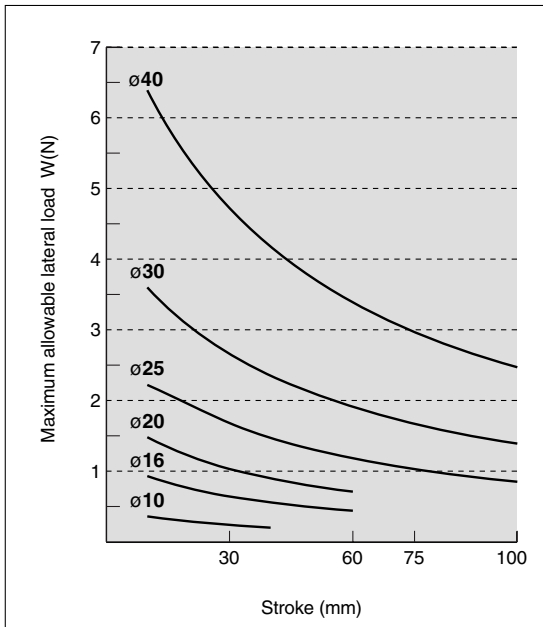
Note) For the rod side flange type, add 10 mm to the stroke length of the MQQ

Allowable Lateral Load at Rod End

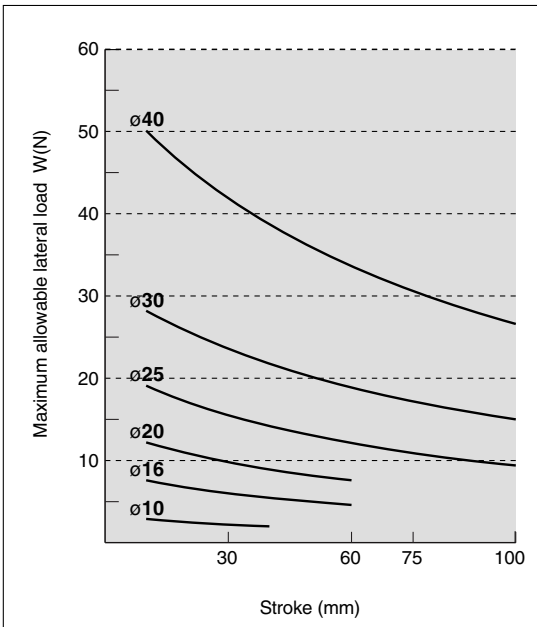


(Mounting orientation: Horizontal
supply pressure: 0.5 MPa
1 N = 0.102 kgf)

Standard Type: MQQTB



Lateral Load Resisting Type: MQQLB/Built-in Ball Bushing



Note 1) The indicated allowable lateral load at the rod end is for the rod end female thread.

Note 2) The allowable lateral load varies depending on the size of a load (the distance to the load's center of gravity). Please contact SMC for further details.



Series MQQ/MQM Specific Product Precautions 3

Be sure to read before handling.

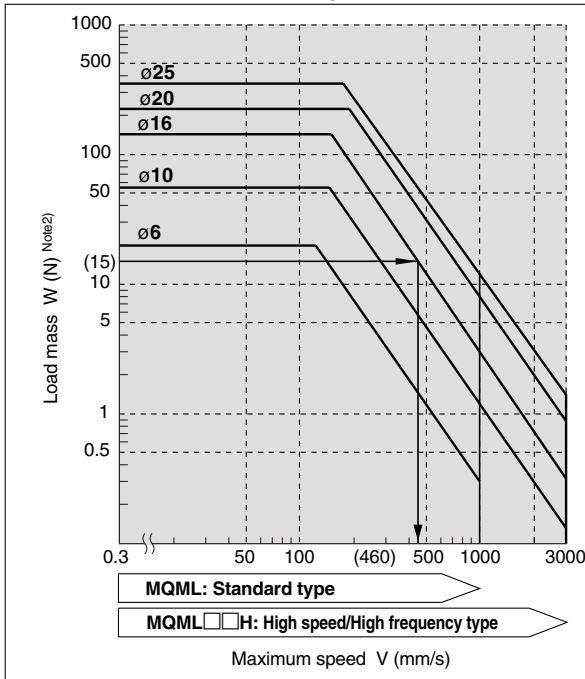
Refer to front matters 42 and 43 for Safety Instructions and pages 3 to 11 for Actuator and Auto Switch Precautions.

Selection

Series MQM

Caution Operating Speed

Load Mass and Maximum Speed: MQML/MQML□□H



Example)
Driving a load of 15(N) using the **MQM16** with a maximum speed of 460 (mm/sec)

Lateral load resisting type: MQML/MQML□□H

Bore size (mm)	Allowable kinetic energy (J)
6	0.015
10	0.059
16	0.161
20	0.386
25	0.597

Note 1) When a load is attached to the rod end, adjust the speed so that the maximum speed is no more than that shown in the graph for the corresponding load mass.

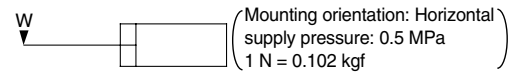
Note 2) The mass of cylinder's moving parts is included in the load mass. (See the graph on the right.)

Moving Parts Mass

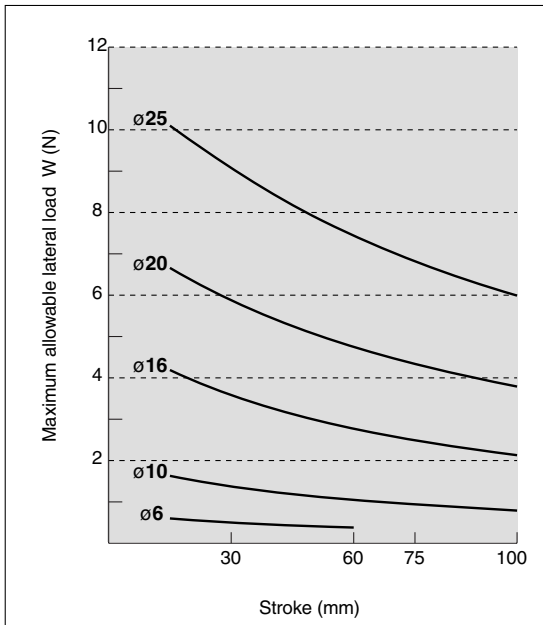
MQM Moving Parts Mass

Bore size (mm)	Moving parts mass (g)
6	Mass = 8.2 + {1.6 x (stroke/15)}
10	Mass = 12.0 + {1.6 x (stroke/15)}
16	Mass = 28.6 + {2.2 x (stroke/15)}
20	Mass = 72.0 + {6.4 x (stroke/15)}
25	Mass = 117.6 + {9.2 x (stroke/15)}

Allowable Lateral Load at Rod End



Allowable Lateral Load at Rod End



Note 1) The allowable lateral load varies depending on the size of a load (the distance to the load's center of gravity). Please contact SMC for further details.

REA

REB

REC

C□Y

C□X

MQ

RHC

RZQ

D-□

-X□

Individual
-X□

easyE-line



linear in-line actuators

Bansbach
easylift

EN

BIBUS

BIBUS s.r.o.
+420 547 125 300
www.bibus.cz

Gear ratio	C*	D	E	F	G	H
easyE-35						12/24VDC
Force 24V (dyn. push and pull) [N]	120	400	600	900	1600	2200
Speed at maximum load [mm/s]	33	16	12	7,5	4	3
Force 12V (dyn. push and pull) [N]	-	400	600	900	1500	2000
Speed at maximum load [mm/s]	-	16	9	7,5	3,5	2,5
Current at maximum load: 12VDC (max 14 VDC) = 3,6A, 24VDC (max 28 VDC) = 1,8A						
easyE-50						12/24VDC
Force 24V (dyn. push and pull) [N]	500	1750	2200	3100	4500	4500
Speed at maximum load [mm/s]	70	20	17	12	6	4
Force 12V (dyn. push and pull) [N]	-	1400	1700	2400	4500	4500
Speed at maximum load [mm/s]	-	14	10	6	3	3,5
Current at maximum load: 12VDC (max 14 VDC) = 16A (ratio C-F), 14A (G), 9A (H), 24VDC (max 28VDC) = 8A (C-F), 7A (G), 4,5A (H)						
easyE-60						24VDC
Force 24V (dyn. push and pull) [N]		1900	4300	6600	8100	10000
Speed at maximum load [mm/s]		26	12	8	6	5
Current at maximum load: 24VDC (max 28VDC) = 11,5A						

Max. load limited for stroke > 400mm:
1000N (easyE-35), 2000N (easyE-50), 5000N (easyE-60)

*only 24V DC power supply

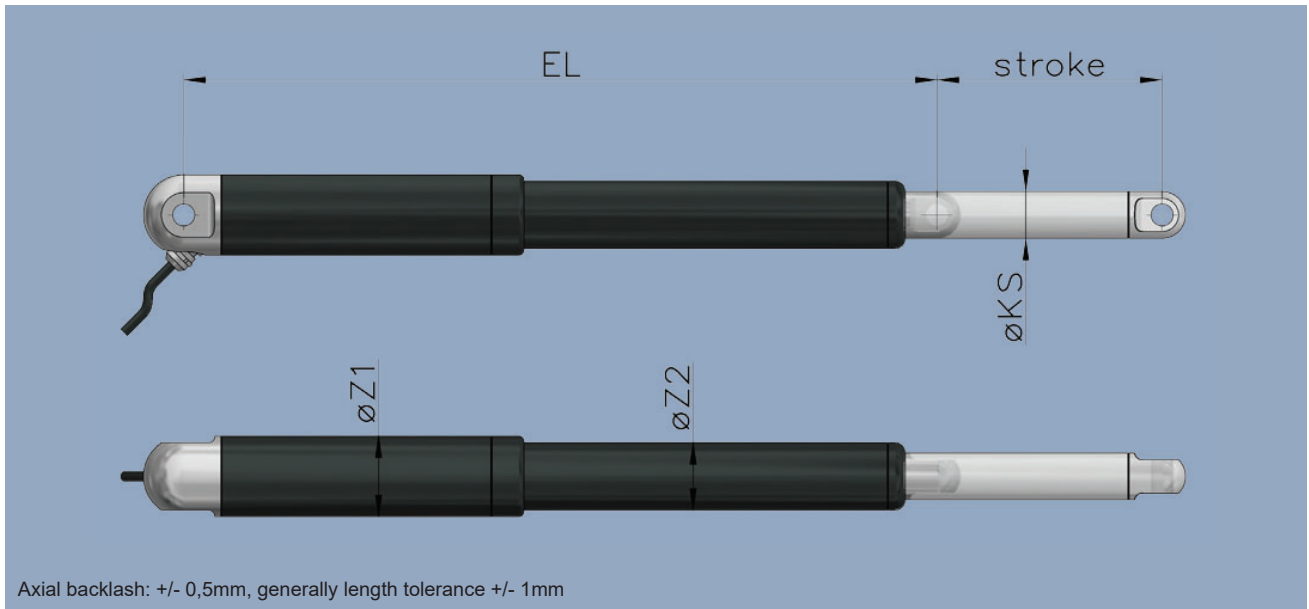
Features:

- Stroke length: 50, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 500 and 750mm (others on request)
- Cable: easyE-35: 1m, 2X0.52mm² (AWG20), Ø = 4.8mm, black, Molex Mini-Fit Jr. 6 pin
easyE-50: 1m, 2X1.3mm² (AWG16), Ø=6.4mm, black, Molex Mini-Fit Jr. 6 pin
easyE-60: 1m, 2X1.3mm² (AWG16), Ø=6.4mm, black, Molex Mini-Fit Jr. 6 pin
- Bending radius: 6x cable diameter
- Materials: Motor and actuator tube are powder coated steel or stainless steel
Piston rod is aluminum (easyE-35) or stainless steel (easyE-50 and easyE-60)
Front and rear brackets are PA, Aluminium or stainless steel
- Protection class: IP66 (standard), harsh environment (according to IP68 and IP69)
- Max. static load/
Self locking force
easyE-35: PA brackets: 2000N Alu/AISI: 5400N
easyE-50: PA brackets: 4700N Alu/AISI: 16800N
easyE-60: Alu/AISI: 18100N
Depending on stroke length for push-applications
- Temperature: Operation: -20°C to +70°C (easyE-35 and easyE-50) -20°C to +50°C (easyE-60)
Storage: -40°C to +70°C
- Duty cycle: Max. 10% or 2 minutes in use followed by 18 minutes rest

Please Note:

- Never expose the actuator to hammer strike during installation or in other situations
- Retrofitted bushings should be pressed into the bracket-borings. No hammering
- Power supply without over-current protection can cause serious damage to the actuator at mechanical end-stop or when actuator is overloaded in another way
- Keep piston tube clean
- Longer cable lengths may cause voltage drop which affects the performance of the actuator
- For medical applications (IEC60601-1, ANSI/AAMI/ES60601-1, CAN/CSA-C22.2 No60601-1):
Operating temperature +5°C to +48°C, Relative humidity 20% - 70% atmospheric pressure = 1atm.
Connect to medically approved supply source only and according to guidelines provided with the source.
- Function of the actuator is subject to the settings of the control box. If using your own controller please contact us.
- The dust and water sealing of harsh environment actuators might affect their performance
- All specifications are for 25 °C ambient – low temperature might affect performance
- Depending on load and application, nominal and actual stroke length may differ due to internal disc springs not being fully compressed.
- The combination of gearing and stroke can cause limitations in the use of „End limit FW“ when using the S2-3 controller. See more in the datasheet for S2-3.

Please note the important advices at www.bansbach.de/easyE-line



Axial backlash: +/- 0,5mm, generally length tolerance +/- 1mm

	EL	Clevis rear	Hall	UL/ EN60.601	harsh env.	Emergency lowering/spline	ØZ1	ØZ2	ØKS
easyE-35									
Gear ratio: C, D, E, F	stroke+160*	+10	+10	+10	+11	-	Ø35	Ø28	Ø20
Gear ratio: G, H	stroke+170*								
easyE-50									
Gear ratio: C, D, E, F	stroke+240**	-	+15	+15	+14	+23 / +6	Ø50	Ø40	Ø30
Gear ratio: G, H	stroke+255**								
easyE-60									
Gear ratio: all ratios	stroke+358***	-	+15	-	+25	+31 / +10	Ø60	Ø50	Ø35

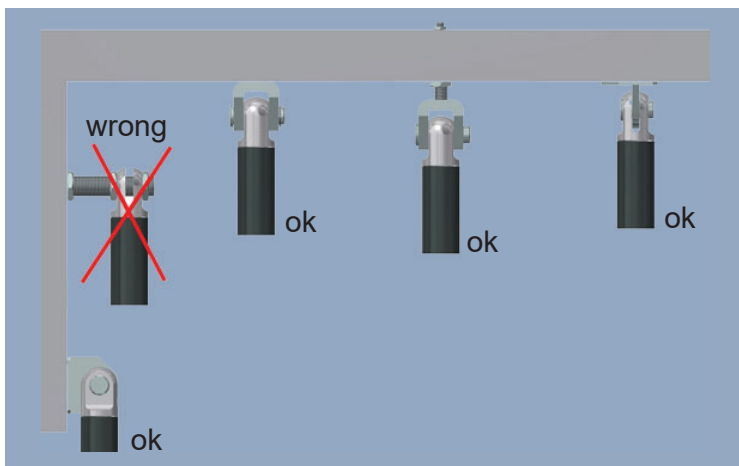
*If stroke >400mm: EL+7mm, if stroke >700mm: EL+42mm

**If stroke >750mm: EL+100mm (on request)

***If stroke >400mm: EL+25mm (not Harsh-Environment-version)

Recommended mounting methods:

- Do not clamp actuators on tubing
- Always keep both brackets mounted in the same orientation and ensure to flush mount actuator
- Brackets must always be able to rotate on axis in mountings
- Avoid radial forces at all times



Choose your actuator:

1. Model:

- easyE-35
- easyE-50
- easyE-60

2. Stroke length:

- 50, 100, 150, 200, 250, 300,
350, 400, 500 and 750mm (others on request)

3. Gear ratio:

- C, D, E, F, G, H (speed and load see table)

4. Voltage:

- 12V DC (only easyE-35 and easyE-50)
- 24V DC

6. Cable length:

- 1m - 9m (others on request)

7. Connector:

- no connector
- Molex minifit

8. Material:

- Standard steel
- AISI 316

9. Protection class:

- IP66 (standard)
- harsh environment (according to IP68 and IP69)

10. Certification:

- For medical applications:
IEC60601-1, ANSI/AAMI/ES60601-1,
CAN/CSA-22.2 No60601-1 (only 24 V DC)
(Operation temperature: +5°C to +48°C)

11. Hall sensor:

- no (standard)
- yes (cable will change)

12. Low noise:

- no (standard)
- yes (not available in stainless steel)

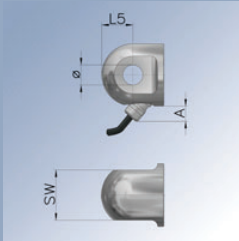
13. Color:

- Black (standard)
Available in all RAL colors

14. Connecting parts




Connecting parts “motor side“:

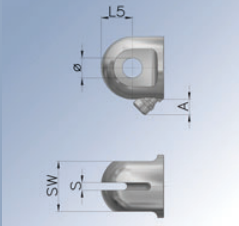


Code	Ø	L5	SW	A	Material	Max static load
easyE-35						
A1M	10 ^{+0,2}	17,5	28	6	Alu	5400 N
B1M	10 ^{+0,2}	17,5	28	-	Polyamid (PA)	2000 N
C1M	10 ^{+0,2}	17,5	28	6	stainless steel (316)	5400 N
easyE-50						
A2M	16 ^{+0,2}	25	40	12,3	Alu	16800 N
B2M	16 ^{+0,2}	25	40	-	Polyamid (PA)	4700 N
C2M	16 ^{+0,2}	25	40	12,3	stainless steel (316)	16800 N
easyE-60						
A3M	16 ^{+0,2}	30	50	12,3	Alu	18100 N
C3M	16 ^{+0,2}	30	50	12,3	stainless steel (316)	18100 N

with spherical bearings



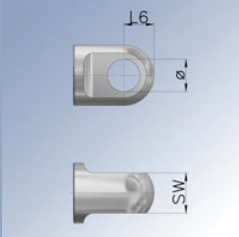
Code	Ø	L5	SW	A	Material	Max static load
easyE-35						
E1M	8 _{-0,008}	17,5	28	-	Alu	5400 N
easyE-50						
E2M	12 _{-0,008}	25	40	-	Alu	11000 N
easyE-60						
E3M	15 _{-0,008}	30	50	12	Alu	11000 N
J3M	15 _{-0,008}	30	50	12	stainless steel (316)	11000 N



Code	Ø	L5	SW	A	S	Material	Max static load
easyE-35							
F1M	10 ^{+0,2}	17,5	28	6	6,2	Alu	5400 N
G1M	10 ^{+0,2}	17,5	28	-	4,2	Polyamid (PA)	2000 N
H1M	10 ^{+0,2}	17,5	28	6	6,2	stainless steel (316)	5400 N
easyE-50							
F2M	16 ^{+0,2}	25	40	12,3	6,2	Alu	16800 N
G2M	16 ^{+0,2}	25	40	-	6,2	Polyamid (PA)	4700 N
H2M	16 ^{+0,2}	25	40	12,3	6,2	stainless steel (316)	16800 N
easyE-60							
F3M	16 ^{+0,2}	30	50	14	8,2	Alu	18100 N
H3M	16 ^{+0,2}	30	50	14	8,2	stainless steel (316)	18100 N


PA-connecting parts are not available for gear ratio G and H

Connecting parts “piston rod side“:

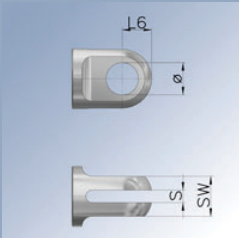


Code	Ø	L6	SW	Material	Max static load
easyE-35					
A1K	10 ^{+0,2}	10	13	Alu	5400 N
B1K	10 ^{+0,2}	10	13	Polyamid (PA)	2000 N
C1K	10 ^{+0,2}	10	13	stainless steel (316)	5400 N
easyE-50					
A2K	16 ^{+0,2}	15	20	Alu	16800 N
B2K	16 ^{+0,2}	15	20	Polyamid (PA)	4700 N
C2K	16 ^{+0,2}	15	20	stainless steel (316)	16800 N
easyE-60					
A3K	16 ^{+0,2}	17,5	25	Alu	18100 N
C3K	16 ^{+0,2}	17,5	25	stainless steel (316)	18100 N

with spherical bearings



Code	Ø	L6	SW	Material	Max static load
easyE-35					
E1K	8 _{-0,008}	12	18	Alu	5400 N
easyE-50					
E2K	12 _{-0,008}	15	20	Alu	11000 N
easyE-60					
E3K	15 _{-0,008}	20	28	Alu	11000 N
J3K	15 _{-0,008}	20	28	stainless steel (316)	11000 N



Code	Ø	L6	SW	S	Material	Max static load
easyE-35						
F1K	10 ^{+0,2}	10	15	6,2	Alu	5400 N
G1K	10 ^{+0,2}	10	13	4,2	Polyamid (PA)	2000 N
H1K	10 ^{+0,2}	10	15	6,2	stainless steel (316)	5400 N
easyE-50						
F2K	16 ^{+0,2}	15	20	6,2	Alu	16800 N
G2K	16 ^{+0,2}	15	20	6,2	Polyamid (PA)	4700 N
H2K	16 ^{+0,2}	15	20	6,2	stainless steel (316)	16800 N
easyE-60						
F3K	16 ^{+0,2}	17	25	8,2	Alu	18100 N
H3K	16 ^{+0,2}	17	25	8,2	stainless steel (316)	18100 N

PPA-connecting parts are not available for gear ratio G and H

Controllers:

EEL-S1

For 1-3 actuators



FEATURES:

- Plug and play solution
- Handset or external switches
- for easyE-35 and easyE-50

TECHNICAL DETAILS:

- Supply: 230V
- Output voltage: 24V

EEL-S2-1

For 1 actuator



FEATURES:

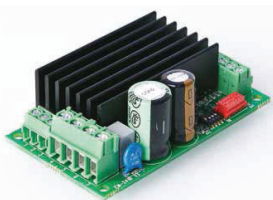
- Adjustable start and stop ramp
- Adjustable current limit
- Continuous-mode, impulse-mode
- Easy interfacing to PLC etc.
- DIN-rail fittable
- Hall sensors not supported

TECHNICAL DETAILS:

- Supply: 10 to 35VDC
- Output voltage = supply voltage
- Over voltage protection: 40 V
- Idle current: Approx. 15 mA
- Driving current: 10 A continuous, 16 A with duty cycle 50%, Max 16 A on duty 2 min

EEL-S2-2

For 1 actuator



FEATURES:

- Precise position control from analog voltage input
- Adjustable start and stop ramp
- Settable current limit
- High momentary load capacity
- DIN-rail base fittable
- "Position reached" - signal
- Hall sensors necessary

TECHNICAL DETAILS:

- Supply: 10 to 35VDC
- Output voltage = supply voltage
- Actuator current continuous max: 15A
- Current limit adj.: 0.1-20A
- Overheat limit: 100°C
- Hall input freq.: Max 1kHz
- Input control logic (pos.): High=4-30V, Low=0-1V or open

EEL-S2-3

For 2 actuators



FEATURES:

- Synchronized operation of 2 actuators
- Current and temperature protection
- Settable drive speed
- Adjustable start- and stop ramp
- Easy setting with serial interface
- Autobalance feature
- Hall sensors necessary

TECHNICAL DETAILS:

- Supply: 10 to 35VDC
- Output voltage = supply voltage
- Quiescent current: 15mA
- Motor current: 2x10A cont. 2x20A, 25% duty
- Current limit: 1-20A
- Pulse input freq. max.: 1kHz
- Pulse inputs pull- up/down: 10kΩ
- Control inputs: 0-1V=OFF; 4-30V=ON

EEL-S3

EEL-S4

For 1-4 actuators



FEATURES:

- Battery powered for mobile use
- 24VDC NiMH or Li-Ion battery
- Customized colors and foil design
- Wired handset

EEL-S3:

- 1 actuator
- up- and down function

EEL-S4:

- Adjustable current limit in and out
- Adjustable calibration speed and current
- Adjustable virtual min/max-position
- Individual or synchronous operation for drive 1-4 actuators

TECHNICAL DETAILS:

- Supply: 24VDC NiMH or Li-Ion battery
- Output voltage: 24V
- Idle current: < 5mA
- Current limit: 8A/ch max. total 12A
- Ramps 0-3 sec
- Connector type Molex Mini-Fit 6 pin

The flyer is subject to technical alterations and printing mistakes.

Bansbach easylift GmbH

Barbarossastraße 8
D-73547 Lorch

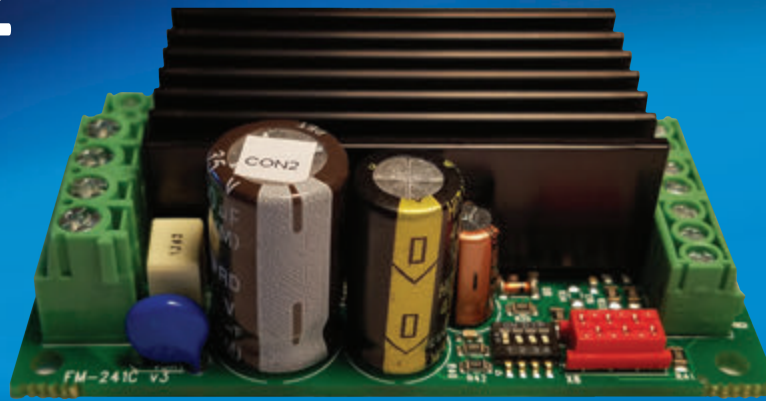
Tel. +49 (0) 7172/9107-0
Fax +49 (0) 7172/9107-44

info@bansbach.de
www.bansbach.de

Bansbach
easylift

03/2021

EEL-S2-2



Bansbach
easy^{lift}

Advanced Actuator Controller

Features:

- Precise position control from analog voltage input
- Adjustable start ramp
- Adjustable stop ramp
- Settable current limit
- High efficiency
- High momentary load capacity
- DIN-rail base fittable
- “Position reached” signal

Technical Data:

- Supply voltage: 10-35VDC
- Ripple: Less than 20%
- Actuator current continuous max: 15A ($T_a < 60^\circ\text{C}$)
- Actuator current max: 20A (short time)
- Current limit adj.: 0.1-20A
- Overheat limit: 100°C
- PWM frequency: 2kHz
- Hall input freq.: Max 1kHz
- Idle current: 45mA
- Input control logic (pos.):
 - High=4-30V,
 - Low=0-1V or open
- Control input impedances typ.: 30kohm
- Motor and supply connectors: 2.5mm wires max
- Control connectors: 1mm wires max
- Dimensions: 73x43x25mm (LxWxH)
- Weight: 75g
- Operating temp: -20° to $+70^\circ\text{C}$

The EEL-S2-2 actuator controller provides advanced positioning and control of actuators through easy and flexible integration with the application. The controller is designed to work with Bansbach® easyE®-line actuators in applications where positioning is required. EEL-S2-2 has adjustable start and stop ramps, which make smooth starts and stops possible.

Adjustable current limits in both directions protect the motor against overcurrent. In learning mode the number of hall pulses in a full stroke of the actuator is counted which enables accurate positioning during normal operation.

The position of the actuator is controlled by a DC voltage between 0-5 or 0-10 Volts to the EEL-S2-2. Adjustments and parameter settings like current limit value, ramp times, speed etc. are set with S2-PROG interface unit or S2-USB “dongle” connected to a PC.

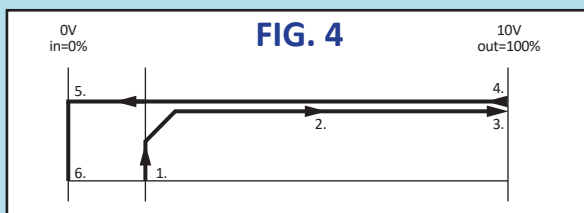
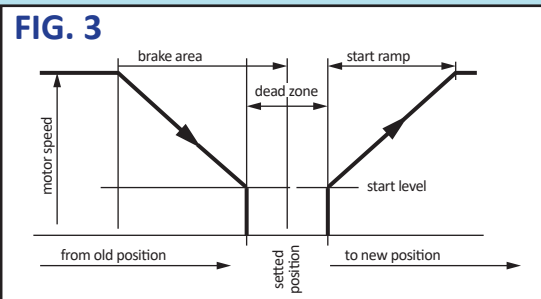
Wiring and Settings

First run the learning cycle and then do the settings with serial interface unit "S2-PROG" or PC. Default values in ()

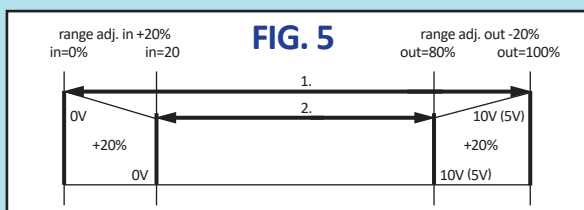
1/15	Speed: 35 - 100% <=> 35-100 (100)	limits the maximum speed
2/15	Learning speed: 35 - 100% <=> 35-100 (50)	sets the learning cycle speed
3/15	I-limit "forward": 0,1 - 20,0A <=> 1-200 (20)	are individual for reverse and forward directions
4/15	I-limit "reverse": 0,1 - 20,0A <=> 1-200 (20) Notice! Current limits are 1.5 times higher during start ramp and 1 sec. thereafter	
5/15	I-trip enable: 0/1 <=> off/on (1)	enables the trip function, so that motor will be shut down when the set I-limit is exceeded. Motor has to be started in opposite direction after trip
6/15	I-trip delay: 0 - 255ms <=> 0 - 255 (5)	defines the reaction time for trip
7/15	Load compensation: 0 - 255 <=> 0 - 255 (0)	increases the torque at low speed. Note that over-compensation will cause oscillation and twitching of the motor
8/15	Pulse lost timeout: 1 - 5s <=> 1 - 5 (2)	stops motor after the set time without pulses
9/15	Start value: 0 - 50% <=> 0 - 50 (30)	is a voltage level for start (% of full), this ensures that the motor gets an adequate voltage to start properly, but note that too high start level will cause motor vibration (FIG. 3)
10/15	Hour/Start count reset: 0 - 1, reset when set to 1	makes possible to set the hour/start counter to zero
11/15	Stop ramp: 0,0 - 20,0% <=> 0 - 200 (50)	is proportional value of the full stroke. In low speed application good value is near 1%, and in high speed solution it can be near to 20% (FIG. 3)
12/15	Dead zone: 0,0 - 10,0% <=> 0 - 100 (10)	is steady area, suitable size of this zone depends on the mechanical accuracy of the system, this value is also a ratio of the full stroke (%) (FIG. 3)
13/15	Range scale in: + 0,0 - 50,0% <=> 0 - 500 (7)	adjustment is for scaling of the stroke, with this the scale can be adjusted after learning. The reverse and forward ends are individually scaleable to get the suitable mechanical stroke for set value from 0-10V (0-5V) (FIG. 5)
14/15	Range scale out: - 0,0 - 50,0% <=> 0 - 500 (70)	
15/15	Start ramp: 0,1 - 5s <=> 0 - 500 (100)	defines the time before reaching full speed

Status LED Signals

1. Fast blinking = Stopped due to current limiter active
2. Slow blinking = Overtemperature
3. 2x short, mid, long... = Hall pulse lost
4. 4x fast blinking (burst), pause = Overvoltage
5. 2x short, 1x long = Fault in
6. LED permanent on = Learning not completed, new learning required



1. Start learning by giving an impulse to learn input (10)
2. Motor starts to run "out" direction with learn speed
3. Current limit stops the motor when mechanical end is reached
4. Motor starts to "in" direction and makes a full stroke
During stroke the pulse counter measures the range
5. Motor reaches the mechanical end "in", and current limit stops the motor
6. Device stores full range value and is ready for use



1. Original learned range = mechanical full range equals the signal range 0-10V (0-5V)
2. Modified range example:
If range scale in = +20% and range scale out = -20%
now stroke of actuator is compressed to:
positioning set value 0V = 20% position
positioning set value 10V (5V) = 80% position



EEL-S2-2-A (board alone)

73 x 43 x 25 mm (L x W x H)



EEL-S2-2-B (box version)

102 x 73 x 47 mm (L x W x H)



EEL-S2-2-D (DIN rail version)

90 x 46 x 56 mm (L x W x H)



Accessories

- EEL-S2-PROGUSB
Programming cable for PC
- EEL-S2-PROG
Programming unit
- EEL-S2-ADAP
Minifit-Adapter

Warnings and Recommendations:

- If EEL-S2-2 goes into "trip" (overcurrent), it is only possible to run actuator in opposite direction.
- Please adjust the max. current to be 10% higher than maximum current during running the actuator. This gives the best conditions for long motor and actuator mechanical and electrical lifetime.
- Please ensure that the power supply for the controller is capable of supplying sufficient current – otherwise the controller and the actuator may be damaged.
- Doublecheck correct polarity of power supply. If wrong connected, the EEL-S2-1 will be damaged.
- Attention! EEL-S2-2 has no fuse in it. Use external fuse according to application (2 -> 16A slow).
- Bansbach® does not have any responsibility over the possible errors in this data sheet. Specifications are to be changed without notice.

Bansbach Easylift®

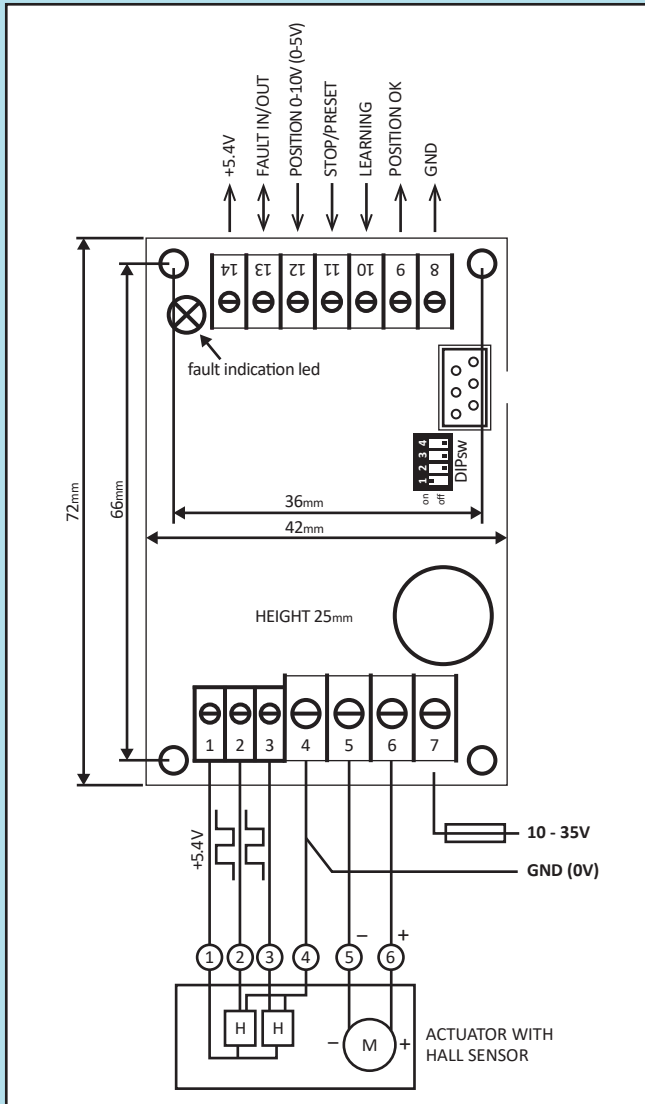
50 West Drive
Melbourne, FL 32904

Tel: (321) 253-1999
Fax: (321) 253-5546

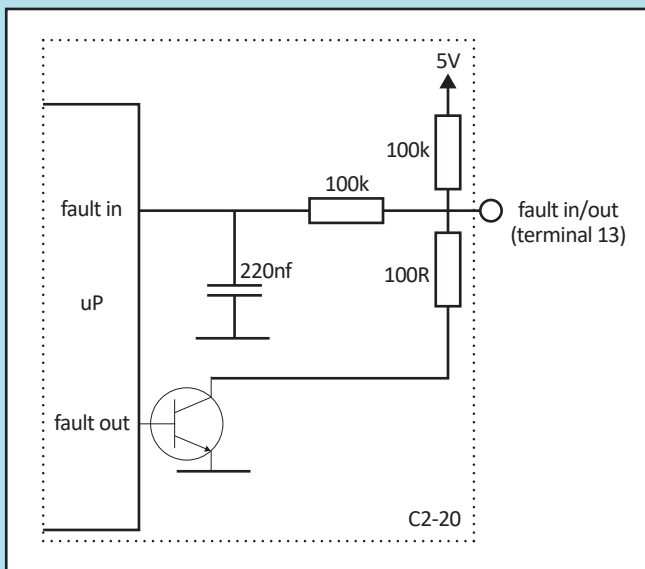
sales@easylift.com
www.easylift.com

Bansbach
easylift®

Wiring S2-2



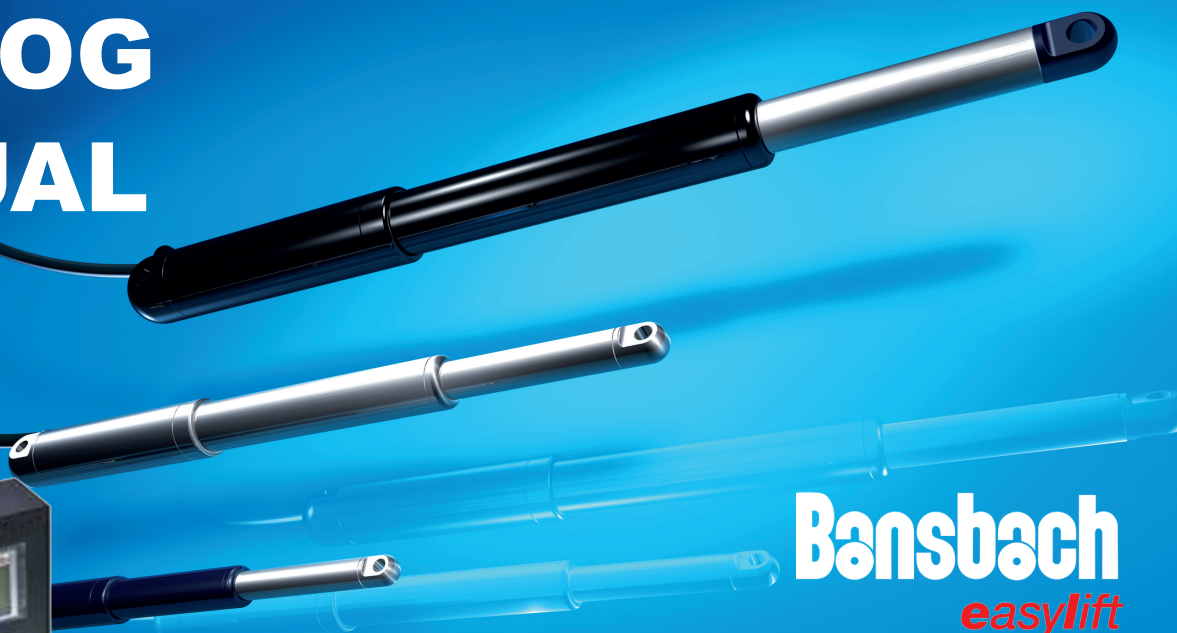
Circuit diagram



Screw Terminals

- 1 Supply for hall sensors (+5V output)**
- 2 Hall channel A**
- 3 Hall channel B**
- 4 GND (0V) and gnd for hall**
- 5 Actuator -**
- 6 Actuator +**
- 7 Supply**
10–35 VDC (Use fuse)
- 8 GND (0V)**
- 9 Position OK**
Digital output 5V through 1kΩ when wanted position is reached and low during travel. Note: If “stop ramp” is very long, then POSITION OK signal can be difficult to reach, since the motor only gets very low power to reach within the “dead zone”
- 10 Learning**
Digital input (>4V and max supply voltage) starts “learning”. Rin 47kΩ
- 11 Stop/Reset**
Digital input (>4V and max supply voltage) Stops the motor and resets any fault. Rin 47kΩ
- 12 Pos. Set**
Analog input
DIPsw 1 on=0-10,8V
DIPsw 1 off=0-5,4V
DIPsw 2-4 not used
Rin 30kΩ
- 13 Fault IN/OUT**
NPN open collector max 100mA can be connected to other S2-2 modules, thereby all modules connected will stop if one module sends a FAULT signal. If wire length is more than 1 meter, a 10kΩ pull-up resistor connected to supply is recommended. Diagram in FIG 2
- 14 +5,4V output, max 10mA**

S2-PROG MANUAL



Bansbach
easylift

FUNCTIONS OF S2-PROG

Load & Edit

This will pick up the parameters from the driver unit. Parameters will be displayed and you can scroll and edit those with S2-PROG. After editing a value, it will blink three times before it is valid.

NOTE: Edited parameter list is only in RAM until you save. After saving (pressing 2sec save button) new edited parameters will be sent to driver unit and stocked in to selected memory slots of the S2-PROG Interface unit.

Copy to device

This command will send the parameter list in selected slot in to the driver unit.

Monitor values

This will enable user to monitor some dynamic values during the use of the driver. Monitorable values can be scrolled with arrow -buttons.

Memory

* Show selected

From here you can see the parameter list which is stored in the slot which is selected at the time. First you get a message, which slot is selected and for what product the parameters are. Then you are displayed the parameters, which you can scroll trough, but not edit until those are saved.

* Select slot

Here you choose which one of the 5 memory slots is active. When you save, copy, or go to „Show selected“, the operation is referred to the slot you have chosen here.

SAVING

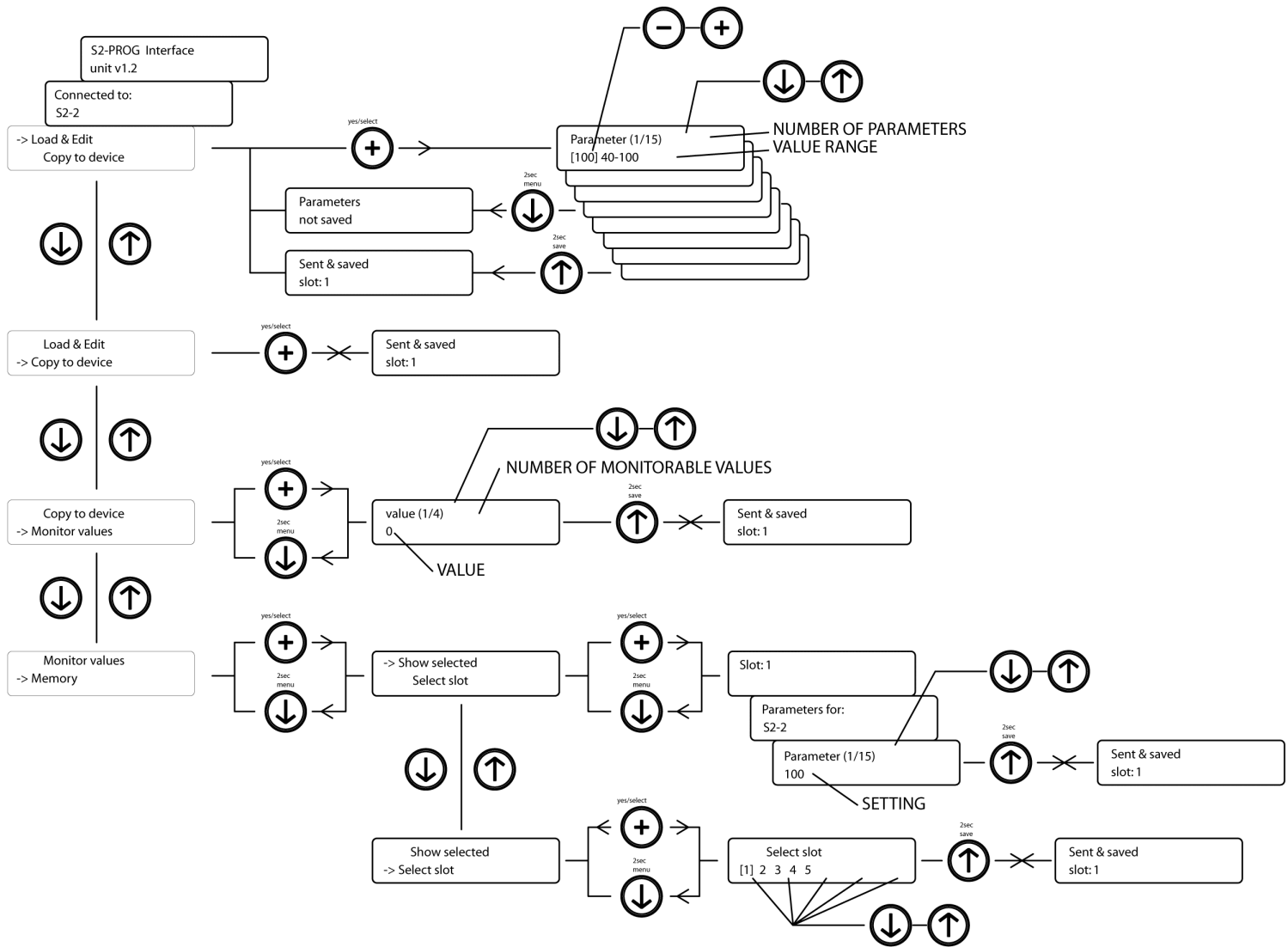
1. In „Load & Edit“ press „2sec save“ -button. The displayed parameters (edited or not) will be sent to the driver device and saved to the interface units active slot.
2. „Copy to device“ will send the parameters that are in the interface units active slot to the driver device.
3. In all other situations, pressing „2sec save“ -button will send the parameters from active slot to driver unit.

NOTE: If you by mistake leave from the „Load & Edit“ window with out saving the edited parameters. The edits will stay there if you dont do any saving or copying, or you dont un plug the supply.

To save edited parameters you have to go back to „Load & Edit“ and push „2sec save“ button. Then the edited parameters are saved to active slot and sent to the driver device.

START UP

Interface unit is started up by connecting it to a powered driver unit



The menu map of S2-PROG Interface Unit.

Note. This unit is for parameter setting of various products, but in examples we have used the code S2-2 as target device.

The flyer is subject to technical alterations and printing

Bansbach easylift GmbH

Barbarossastraße 8
D-73547 Lorch

Tel. +49 (0) 7172/9107-0
Fax +49 (0) 7172/9107-44

info@bansbach.de
www.bansbach.de

Bansbach
easylift

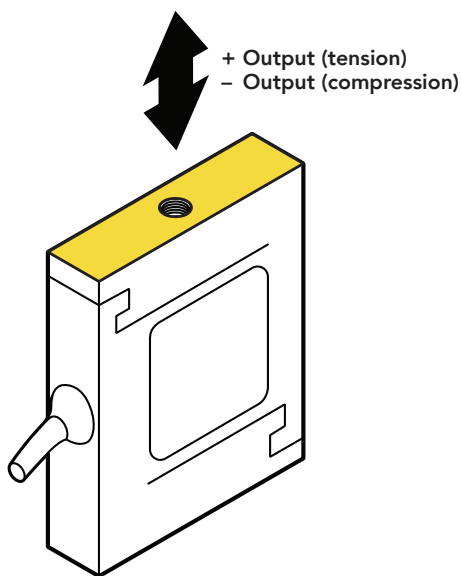
12/2017



FEATURES

- Up to 10 times the overload protection
- Light weight
- Loads up to 100 lb (445 N)
- Miniature size

 Active end



SPECIFICATIONS

PERFORMANCE

Nonlinearity	See chart on next page
Hysteresis	See chart on next page

ELECTRICAL

Excitation (VDC)	10 max
Bridge Resistance	1000 Ohm nom (100 g), 350 Ohm nom
Insulation Resistance	≥500 MOhm @ 50 VDC
Connection	#29 AWG, 4 conductor, spiral shielded silicone cable, 5 ft [1.5 m] long
Wiring/Connector Code	WC1

MECHANICAL

Weight (approximate)	0.3 oz [9 g] (100 g–10 lb) 0.9 oz [26 g] (100 lb)
Safe Overload ¹	1000% of RO 200% of RO tension only (100 lb)
Material	Anodized aluminum (100 g–10 lb), 17-4 PH stainless-steel (100 lb)
IP Rating	IP68
Water Resistance	Up to 50 ft in fresh water for less than one week

TEMPERATURE

Operating Temperature	0 to 160°F [-17 to 72°C]
Compensated Temperature	60 to 160°F [15 to 72°C]
Temperature Shift Zero	±0.02% of RO/°F [0.04% of RO/°C]
Temperature Shift Span	±0.04% of Load/°F [0.08% of Load/°C]

CALIBRATION

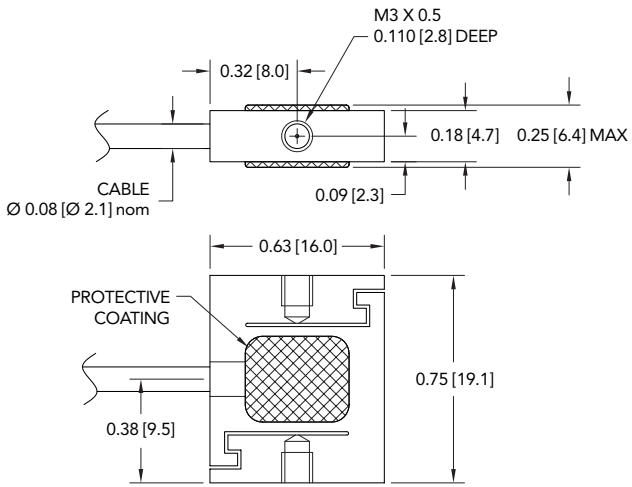
Calibration Test Excitation	5 VDC
Calibration (standard)	5-pt Tension
Calibration (available)	Compression
Shunt Calibration Value	60.4 kOhm, 301 kOhm (100 g)

CONFORMITY

RoHS	2011/65/EU
CE	EN61326-1:2006

¹Sensor structure can handle high overloads but threads may limit overload at higher capacity

DIMENSIONS inches [mm]



CAPACITIES

ITEM #	lb	N	RO (nom)	Non-Linearity	Hysteresis	Zero Return	Creep 10 mins
FSH03940	100 g	1	1 mV/V	3% RO	5% RO	3% RO	12% RO
FSH03941	2	8.9	2 mV/V	0.5% RO	1% RO	0.5% RO	1% RO
FSH03942	10	44.5	2 mV/V	0.2% RO	0.2% RO	0.2% RO	0.5% RO
FSH03943	100	445	2 mV/V	0.2% RO	0.2% RO	0.2% RO	0.2% RO

WIRING CODE (WC1)

RED	+ EXCITATION
BLACK	- EXCITATION
GREEN	+ SIGNAL
WHITE	- SIGNAL
SHIELD	FLOATING

Drawing Number: F11318-D

FUTEK reserves the right to modify its design and specifications without notice.
Please visit www.futek.com/salesterms for complete terms and conditions.

10 Thomas, Irvine, CA 92618 USA

Tel: (949) 465-0900

Fax: (949) 465-0905

www.futek.com



RoHS



U.S. Manufacturer

**SPECIFICATIONS****GENERAL**

Item Number	FSH04804
Material	Aluminum Body/Stainless Steel Cover
Weight	0.23 lb [105 g]
IP Rating	IP40

INPUT

Input Type	Strain Gauge (Differential Input from ± 0.2 to ± 500 mV/V) ⁴
Internal Shunt Value	30, 43.7, 60.4, 87.6, 100, 150, 300 ³ , 432 ³ k Ω ($\pm 0.1\%$)
Nonlinearity	$\pm 0.005\%$ of FSR ¹
Bridge Excitation	5 or 10 VDC (DIP Switch)
Min/Max Bridge Resistance	87.5 to 5000 Ω

OUTPUT

Gain Range	110 to 6300 ²
Output Range	4 - 20, 0 - 20 ⁵ , 5 - 25, & 12 ± 8 mA
Load Impedance	< 700 Ω
Bandwidth	See Chart ⁶
Noise	See Chart ⁶
Calibration Span/Offset range	$\pm 10\%$ of FSR ¹

POWER

Supply	12 to 30 VDC
Inrush Current	1 A (Max)
Power Consumption	1 W (Max)(Instrument Only)
Power Indicator	Green LED

ENVIRONMENT

Operating Temperature	-13° to 158°F (-25° to 70°C)
Storage Temperature	-40° to 185°F (-40° to 85°C)
Temperature Stability/Drift	± 10 ppm of FSR ¹ /°C

CONFORMITY

RoHS	2011/65/EU Compliant
CE	FCC 15.107:2022, FCC 15.109:2022, FCC 15.109(g):2022, ICES-003 Issue 7:2020, VCCI-CISPR 32:2016, EN IEC 61326-1:2021

FEATURES

- Uni-directional/bi-directional output, differential input
- 256 selectable shunt and gain combinations (DIP Switch)
- Digitally controlled remote shunt with externally accessible activation button
- Internal span and offset potentiometers
- Sensor polarity reversal DIP switch
- Zero shift DIP switch (selectable 0 and midpoint)
- Reliable spring loaded DIN clip design
- Removable magnetic cover for instrument setting access and protection
- External chassis connection ([Refer to Guide](#))
- Hot swappable with on-board ESD and over voltage/ current protection

MATERIAL & MANUFACTURING

- High-reliability PCB/assembly (IPC CLASS III)
- High-temperature rated material/BOM items
- Strictly controlled inspection, test, and calibration process
- Fully controlled handling/packaging process
- Extensive test and validation for 100% of production units
- Individual calibration report/certification for instruments and systems

APPLICATIONS

- Medical
- Aerospace
- Precision Industrial Automation
- Lab & Field Instrumentation
- Precision Manufacturing

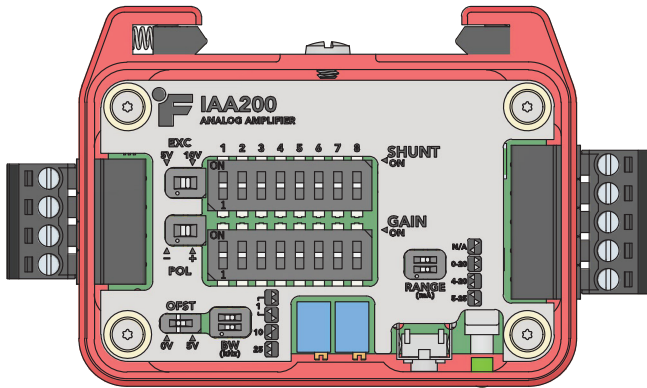
Sensor Solution Source

Load · Torque · Pressure · Multi-Axis · Calibration · Instruments · Software

www.futek.com

Model IAA200

DIP SWITCHES CONFIGURATION

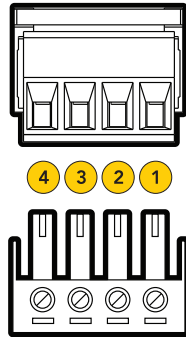


NOISE

Bandwidth kHz	Default Gain $\mu\text{Ap-p}$	Max Gain $\mu\text{Ap-p}$
1	4	15
10	10	40
25	12	60

SENSOR SIDE (item #GOD04254)

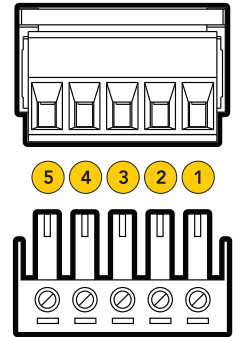
PIN	WIRING CODE	PIN FUNCTIONALITY	COLOR
1	+ E	+ Excitation	Red
2	+ S	+ Signal	Green
3	- S	- Signal	White
4	- E/GND	- Excitation	Black



For 6 wire sensors, connect +SENSE to +EXCITATION and -SENSE to -EXCITATION.

POWER/OUTPUT (item #GOD04255)

PIN	WIRING CODE	PIN FUNCTIONALITY	COLOR
1	+VIN	Power Supply	Red
2	GND	Power Ground	Black
3	SHUNT	Remote Connection	Orange
4	GND	Output Ground	Blue
5	IOUT	Output Signal	Green



General Notes:

- ¹ FSR = Full Scale Range
- ² Gain = 2 If all switches are in OFF position
- ³ $\pm 1\%$ Tolerance
- ⁴ The minimum differential input is determined based on a 10 V excitation and maximum gain to attain the maximum output range
- ⁵ A minimum offset of 0.05 mA is expected when the device is configured for a 0-20 mA output range
- ⁶ See "Noise" chart located in page 2 for detailed information

All Grounds are internally connected

Use Chassis for systems with cable Shield

All parameters specified on this drawing have been validated for default settings (2 mV/V and 1kHz bandwidth)

Sensor Solution Source

Load · Torque · Pressure · Multi-Axis · Calibration · Instruments · Software

www.futek.com



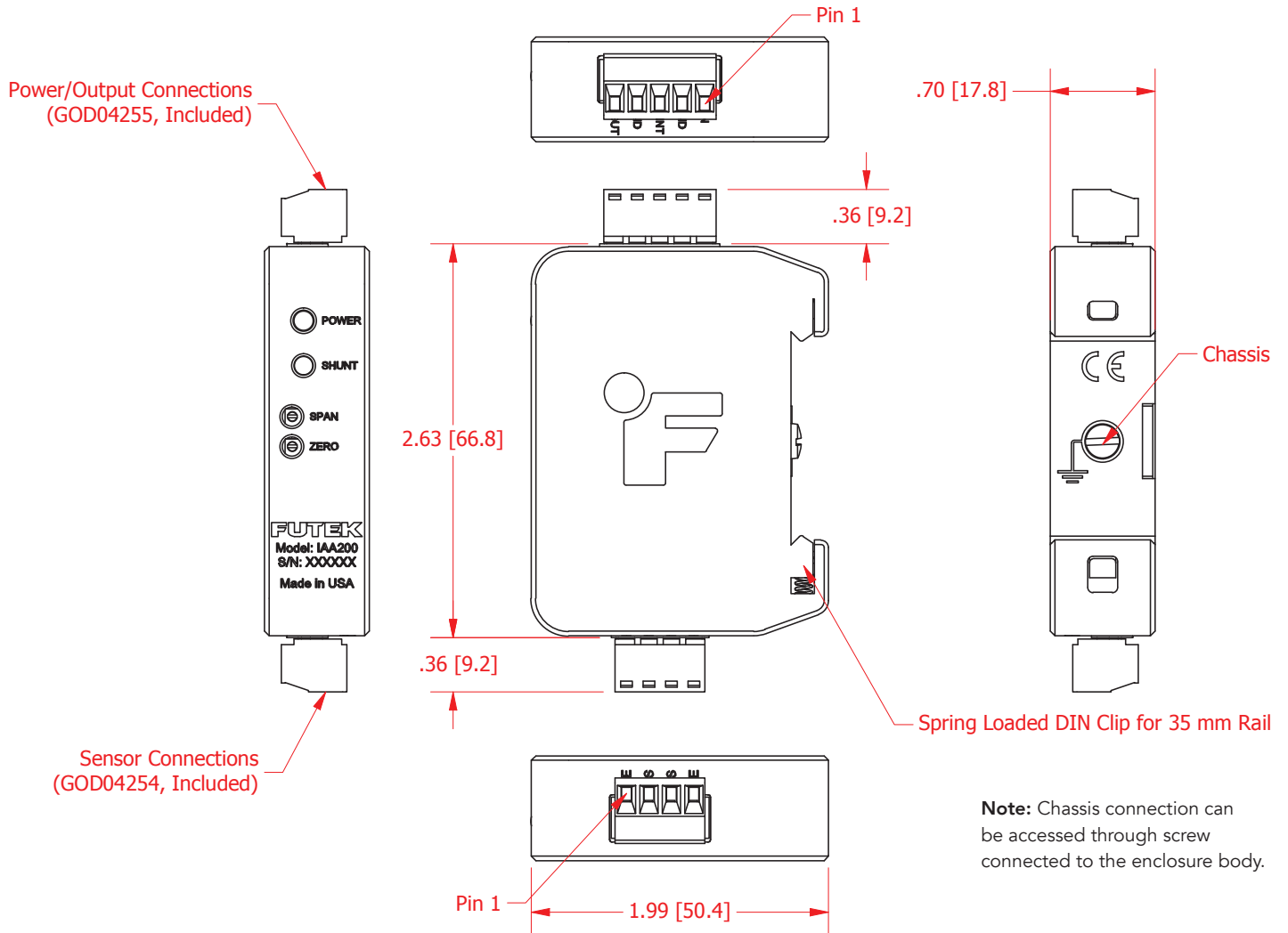
ROHS



U.S. Manufacturer

Model IAA200

DIMENSIONS inches [mm]



Note: Chassis connection can be accessed through screw connected to the enclosure body.

Drawing Number: FI1574

FUTEK reserves the right to modify its design and specifications without notice. Please visit <http://www.futek.com/salesterms> for complete terms and conditions.

The information provided herein was developed using FEA analysis, empirical data and multiple testing simulations. FUTEK presents the information in good faith and believes it is correct but makes no representations or warranties as to the completeness or accuracy of the information provided. User's application may produce different data and/or results. By using this information, you agree that you have read and understand this disclosure. Please contact us to discuss your particular application and needs.



Signal conditioner - MINI MCR-SL-UI-UI-NC - 2864150

Please be informed that the data shown in this PDF Document is generated from our Online Catalog. Please find the complete data in the user's documentation. Our General Terms of Use for Downloads are valid (<http://phoenixcontact.com/download>)



3-way isolating amplifier for the electrical isolation of analog signals, I/O can be configured via DIP switches, with screw connection, standard configuration

Why buy this product

- Power supply possible via the foot element (TBUS)
- Up to 36 signal combinations can be configured using DIP switches
- Low power consumption
- Highly-compact isolating amplifier for electrical isolation, conversion, amplification, and filtering of standard analog signals
- 3-way isolation



Key Commercial Data

Packing unit	1 STK
GTIN	 4 017918 956615
GTIN	4017918956615
Weight per Piece (excluding packing)	82.800 g
Custom tariff number	85437090
Country of origin	Germany

Technical data

Note

Utilization restriction	EMC: class A product, see manufacturer's declaration in the download area
-------------------------	---

Dimensions

Width	6.2 mm
Height	93.1 mm
Depth	102.5 mm

Ambient conditions

Signal conditioner - MINI MCR-SL-UI-UI-NC - 2864150

Technical data

Ambient conditions

Ambient temperature (operation)	-20 °C ... 65 °C
Ambient temperature (storage/transport)	-40 °C ... 85 °C
Degree of protection	IP20

Input data

Number of inputs	1
Configurable/programmable	Yes, unconfigured
Voltage input signal	0 V ... 10 V
	0 V ... 5 V
	1 V ... 5 V
	2 V ... 10 V
Current input signal	0 mA ... 20 mA
	4 mA ... 20 mA
Max. input voltage	30 V
Max. input current	50 mA
Input resistance of voltage input	approx. 100 kΩ
Input resistance current input	approx. 50 Ω

Output data

Number of outputs	1
Configurable/programmable	Yes, unconfigured
Voltage output signal	0 V ... 10 V
	0 V ... 5 V
	1 V ... 5 V
	2 V ... 10 V
Current output signal	0 mA ... 20 mA (please indicate if different setting when ordering)
	4 mA ... 20 mA
Max. output voltage	approx. 12.5 V
Max. output current	28 mA
Short-circuit current	approx. 22 mA
Load/output load voltage output	≥ 10 kΩ
Load/output load current output	< 500 Ω (at 20 mA)
Ripple	< 20 mV _{pp} (at 500 Ω)
	< 20 mV _{pp} (at 10 kΩ)

Power supply

Nominal supply voltage	24 V DC
Supply voltage range	19.2 V DC ... 30 V DC (The DIN rail bus connector (ME 6,2 TBUS-2 1,5/5-ST-3,81 GN, Order No. 2869728) can be used to bridge the supply voltage. It can be snapped onto a 35 mm DIN rail according to EN 60715))
Max. current consumption	< 19 mA (Current output, at 24 V DC incl. load)
	< 9 mA (Voltage output, at 24 V DC incl. load)

Signal conditioner - MINI MCR-SL-UI-UI-NC - 2864150

Technical data

Power supply

Power consumption	< 450 mW (Current output)
	< 200 mW (Voltage output)

Connection data

Connection method	Screw connection
Conductor cross section solid min.	0.2 mm ²
Conductor cross section solid max.	2.5 mm ²
Conductor cross section AWG min.	26
Conductor cross section AWG max.	12
Conductor cross section flexible min.	0.2 mm ²
Conductor cross section flexible max.	2.5 mm ²
Stripping length	12 mm
Screw thread	M3

General

No. of channels	1
Maximum transmission error	≤ 0.1 % (of final value)
	< 0.4 % (Without adjustment)
Maximum temperature coefficient	< 0.01 %/K
Temperature coefficient, typical	< 0.002 %/K
Limit frequency (3 dB)	approx. 100 Hz
Step response (10-90%)	approx. 3.2 ms
Protective circuit	Transient protection
Electrical isolation	Basic insulation according to EN 61010
Overvoltage category	II
Degree of pollution	2
Rated insulation voltage	50 V AC/DC
Test voltage, input/output/supply	1.5 kV (50 Hz, 1 min.)
Electromagnetic compatibility	Conformance with EMC directive
Noise emission	EN 61000-6-4
Noise immunity	EN 61000-6-2 When being exposed to interference, there may be minimal deviations.
Color	green
Housing material	PBT
Mounting position	any
Assembly instructions	The T connector can be used to bridge the supply voltage. It can be snapped onto a 35 mm DIN rail according to EN 60715.
Conformance	CE-compliant
ATEX	# II 3 G Ex nA IIC T4 Gc X
UL, USA/Canada	UL 508 Recognized
	Class I, Div. 2, Groups A, B, C, D T5
GL	GL EMC 2 D

Signal conditioner - MINI MCR-SL-UI-UI-NC - 2864150

Technical data

EMC data

Designation	Electromagnetic RF field
Standards/regulations	EN 61000-4-3
Typical deviation from the measuring range final value	5 %
Designation	Fast transients (burst)
Standards/regulations	EN 61000-4-4
Typical deviation from the measuring range final value	5 %
Designation	Conducted interferences
Standards/regulations	EN 61000-4-6
Typical deviation from the measuring range final value	5 %

Standards and Regulations

Electromagnetic compatibility	Conformance with EMC directive
Noise emission	EN 61000-6-4
Connection in acc. with standard	CUL
Standards/regulations	EN 61000-4-2
Designation	Electromagnetic RF field
Standards/regulations	EN 61000-4-3
	EN 61000-4-4
	EN 61000-4-5
Designation	Conducted interferences
Standards/regulations	EN 61000-4-6
Electrical isolation	Basic insulation according to EN 61010
Conformance	CE-compliant
ATEX	# II 3 G Ex nA IIC T4 Gc X
UL, USA/Canada	UL 508 Recognized
	Class I, Div. 2, Groups A, B, C, D T5
GL	GL EMC 2 D

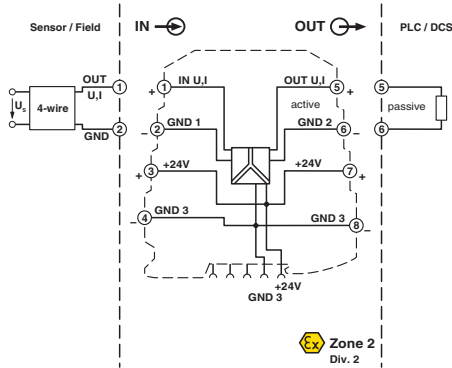
Environmental Product Compliance

China RoHS	Environmentally Friendly Use Period = 50
	For details about hazardous substances go to tab "Downloads", Category "Manufacturer's declaration"

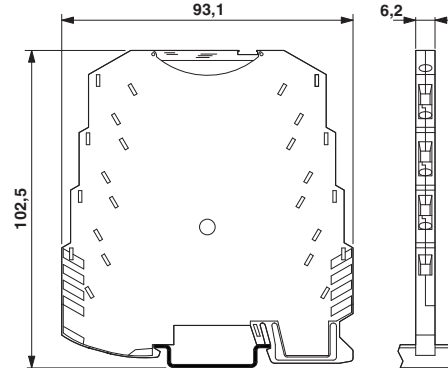
Drawings

Signal conditioner - MINI MCR-SL-UI-UI-NC - 2864150

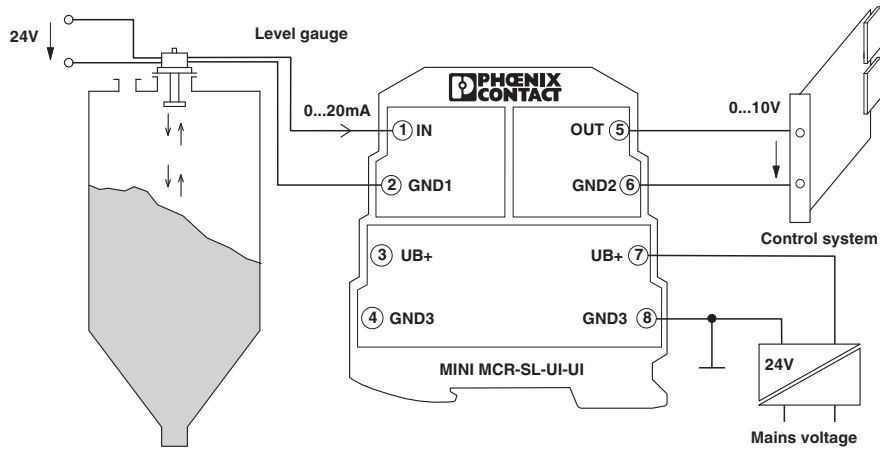
Block diagram



Dimensional drawing



Application drawing



Classifications

eCl@ss

eCl@ss 4.0	27210120
eCl@ss 4.1	27210120
eCl@ss 5.0	27210120
eCl@ss 5.1	27210120
eCl@ss 6.0	27210120
eCl@ss 7.0	27210120
eCl@ss 8.0	27210120
eCl@ss 9.0	27210120

ETIM

ETIM 4.0	EC002653
ETIM 5.0	EC002653
ETIM 6.0	EC002653

Signal conditioner - MINI MCR-SL-UI-UI-NC - 2864150

Classifications

UNSPSC

UNSPSC 6.01	30211506
UNSPSC 7.0901	39121008
UNSPSC 11	39121008
UNSPSC 12.01	39121008
UNSPSC 13.2	39121008

Approvals

Approvals

Approvals

UL Recognized / cUL Recognized / GL / EAC / cULus Recognized

Ex Approvals

UL Listed / cUL Listed / ATEX / cULus Listed

Approval details

UL Recognized		http://database.ul.com/cgi-bin/XYV/template/LISEXT/1FRAME/index.htm	FILE E 238705
---------------	--	---	---------------

cUL Recognized		http://database.ul.com/cgi-bin/XYV/template/LISEXT/1FRAME/index.htm	FILE E 238705
----------------	--	---	---------------

GL		http://www.gl-group.com/newbuilding/approvals/index.html	24916-05 HH
----	--	---	-------------

EAC			EAC-Zulassung
-----	--	--	---------------

cULus Recognized		http://database.ul.com/cgi-bin/XYV/template/LISEXT/1FRAME/index.htm	
------------------	--	---	--

Accessories

Accessories

Signal conditioner - MINI MCR-SL-UI-UI-NC - 2864150

Accessories

DIN rail connector

DIN rail bus connectors - ME 6,2 TBUS-2 1,5/5-ST-3,81 GN - 2869728



DIN rail connector for DIN rail mounting. Universal for TBUS housing. Gold-plated contacts, 5-pos.

Marking material

Transparent cover - MINI MCR DKL - 2308111



Fold up transparent cover for MINI MCR modules with additional labeling option using insert strips and flat Zack marker strip 6.2 mm

Marking label - MINI MCR-DKL-LABEL - 2810272



Label for extended marking of MINI MCR modules in connection with the MINI MCR-DKL

Power module

Power terminal block - MINI MCR-SL-PTB - 2864134



MCR power terminal block for supplying several MINI Analog modules via the DIN rail connector, with screw connection, maximum current consumption of up to 2 A

Power terminal block - MINI MCR-SL-PTB-SP - 2864147



MCR power terminal block for supplying several MINI Analog modules via the DIN rail connector, with spring-cage connection, maximum current consumption of up to 2 A

Power supply

Signal conditioner - MINI MCR-SL-UI-UI-NC - 2864150

Accessories

Power supply unit - MINI-SYS-PS-100-240AC/24DC/1.5 - 2866983



Primary-switched MINI POWER supply for DIN rail mounting, input: 1-phase, output: 24 V DC/1.5 A

Power supply unit - MINI-PS-100-240AC/24DC/1.5/EX - 2866653



Primary-switched power supply MINI POWER for DIN rail mounting, input: 1-phase, output: 24 V DC/1,5 A, for the potentially explosive area

System adapter

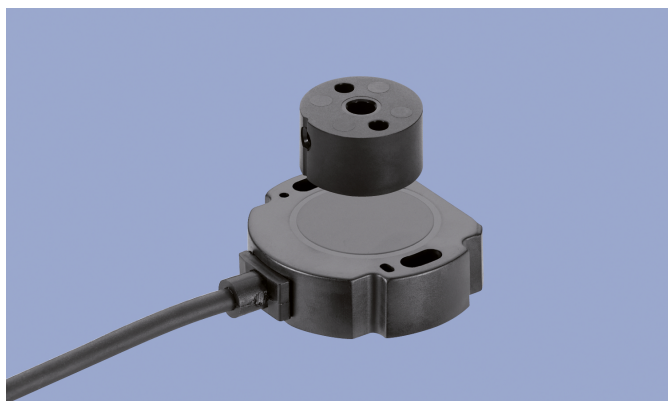
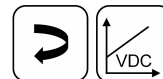
System adapter - MINI MCR-SL-V8-FLK 16-A - 2811268



Eight MINI analog signal converters with screw connection method can be connected to a control system using a system adapter and system cabling with a minimum of wiring and very low error risk.

**NOVOHALL
Rotary Sensor
Touchless**

**RFC-4800
Voltage
Industrial**



Special Features

- Touchless hall technology
- Electrical range up to 360°
- 2 part design, mechanically decoupled
- High protection class IP67, IP68, IP69
- Resolution 12 bit
- Wear-free
- Temperature range -40 °C to +105 °C
- Optimized for use in industrial applications
- Other configurations see separate data sheets

Applications

- Manufacturing Engineering (textile machinery, packaging machinery, sheet metal and wire machinery)
- Automation technology
- Medical Engineering

The 2 part design consisting of sensor and magnetic position marker offers great flexibility when mounting. The absence of shaft and bearing makes the assembly much less sensitive to axial and radial application tolerances - separate couplings are obsolete. Measurements can be made transmissively through any non-ferromagnetic material. The sensor is perfectly suitable for use in harsh environmental conditions through the completely encapsulated electronics.

Description

Material	Housing: high grade, temperature resistant plastic
Mounting	With 2 pan head screws M4x20 (included in delivery)
Fastening torque of mounting	250 Ncm
Electrical connection	Connector M12x1, A-coded with cable L = 0.15 m / Cable 4x 0.5 mm ² (AWG 20), TPE, unshielded

Mechanical Data

Dimensions	See dimension drawing
Mechanical travel	continuous
Weight (w/o connection)	approx. 50 g

Ordering Specifications

Ordering Specifications

Preferred types printed in bold

- Delivery time up to 25 pcs. within 10 working days EXW
- Best low-volume pricing

Supply voltage U_b

1: $U_b = 24$ VDC

Output signal

1: 0.1 ... 10 VDC

Output characteristic

1: **Rising output characteristic cw**

2: Rising output characteristic ccw

Other output characteristics on request

Electrical connection

201: Cable, 4-pole, shielded, L = 0.5 m

202: Cable, 4-pole, shielded, L = 1 m

206: Cable, 4-pole, shielded, L = 3 m

210: Cable, 4-pole, shielded, L = 5 m

220: Cable, 4-pole, shielded, L = 10 m

501: Connector M12x1, 4-pin, with cable, shielded, L = 0.15 m

Cable versions and assembled connectors on request

R F C - 4 8 5 1 - 6 3 6 - 1 1 1 - 2 0 2

Series

Mechanical version

4851: Elongated hole mounting for easy adjustment

4852: Round hole mounting

4853: Elongated hole mounting, without diagnostic function

4854: Round hole mounting, without diagnostic function

Other configurations e.g. with internal shielding against magnetic fields on request

Measuring range

03: Angle 0° ... 30° min.

...

06, 12, 18, 24, 36

...

36: Angle 0° ... 360° max.

Other angles on request

Number of channels

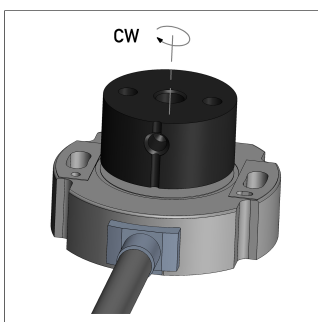
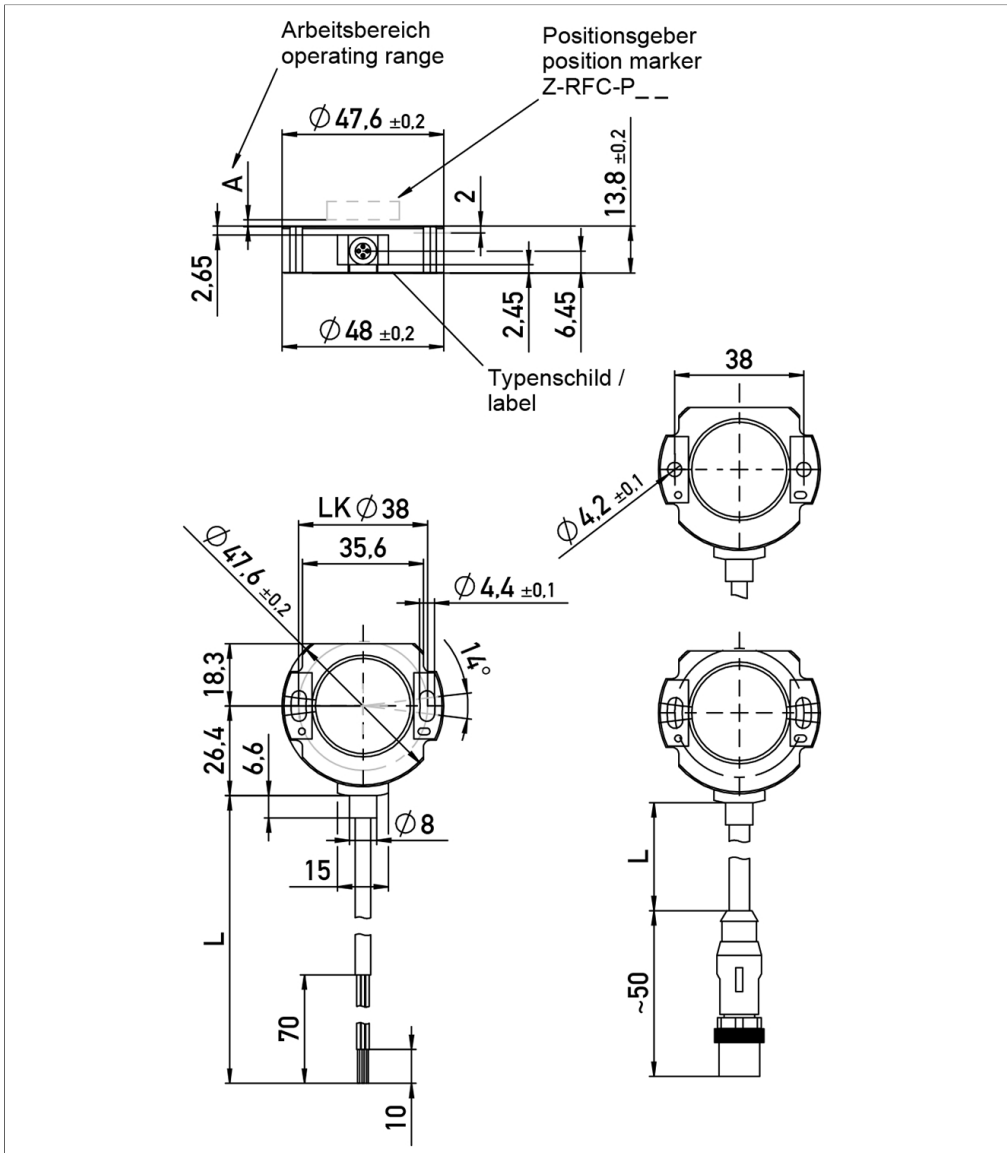
6: One-channel version (1x supply voltage U_b / 1x output)

Accessories included in delivery

- 2x Pan head screws M4x20

Drawing

CAD data see
www.novotechnik.de/en/download/cad-data/



When the marking of the position marker is pointing towards the cable, the sensor output is near the electrical center position.

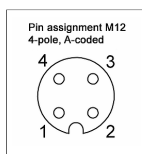
Technical Data

Type	RFC-48 _ _ _ _ -11 _ _ _ _
	Analog voltage
Output signal	0.1 ... 10 V
Load	≥ 10 kΩ
Diagnosis	activated (in case of error, output signal is outside of the plausible signal range)
Update rate	typ. 3.4 kHz
Measuring range	0 ... 30° up to 0 ... 360° in 10°-steps
Independent linearity	≤ ±0.5 %FS
Resolution	12 bits
Repeatability	typ. ≤ ±0.1°
Hysteresis	typ. < ±0.1°
	Only measuring range 360°: typ. < 0.25° (lower hysteresis on request)
Temperature error	Measuring range 30 ... 170°: typ. ±1.0 %FS, Measuring range ≥ 180°: typ. ±0.5 %FS
Supply voltage Ub	24 VDC (18 ... 30 VDC)
Current consumption w/o load	typ. 12 mA per channel
Polarity protection	yes (supply lines and outputs)
Short circuit protection	yes (vs. GND and supply voltage Ub)
Insulation resistance (500 VDC)	≥ 10 MΩ
Environmental Data	
Max. operational speed	Mechanically unlimited
Vibration IEC 60068-2-6	20 g, 5 ... 2000 Hz, Amax = 0.75 mm
Shock IEC 60068-2-27	50 g, 6 ms
Protection class DIN EN 60529	IP67 (connector M12), IP67 / IP68 / IP69
Operating temperature	-25 ... +85°C (connector M12), -40 ... +105°C*
	* The max. operating temperature depends on supply voltage Ub and load resp. burden (see temp.diagram)
Life	Mechanically unlimited
Functional safety	If you need assistance in using our products in safety-related systems, please contact us
MTTF (IEC 60050)	881 years
Traceability	Serial number on type labeling: production batch of the sensor assembly and relevant sensor components
EMC Compatibility	
EN 61000-4-2 ESD (contact/air discharge)	4 kV, 8 kV
EN 61000-4-3 Electromagnetic fields (RFI)	10 V/m
EN 61000-4-4 Fast transients (burst)	1 kV
EN 61000-4-6 Cond. disturbances (HF fields)	10 V eff.
EN 55016-2-3 Radiated disturbances	Industrial and residential area

FS = Full scale: Signal span according to electrical measuring range

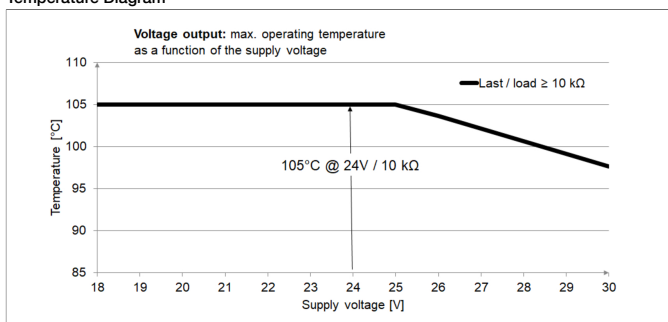
Connection Assignment

Signal	Connector	Cable
	code 5_ _	code 2_ _
Supply voltage Ub	Pin 1	GN
GND	Pin 3	BN
Signal output	Pin 2	WH
Not assigned	Pin 4	YE
Connect cable shielding to GND		

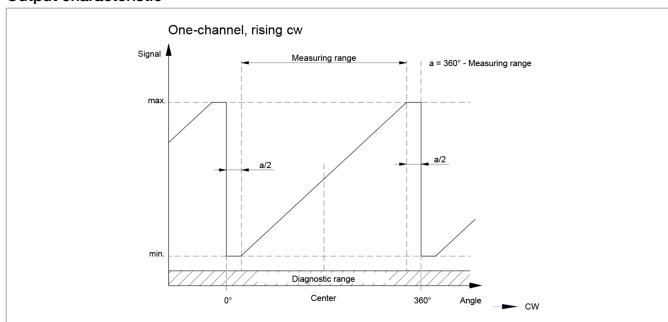


**Technical Data
Output
Characteristics**

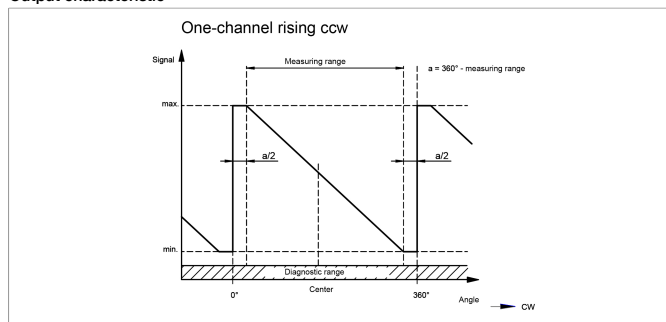
Temperature Diagram



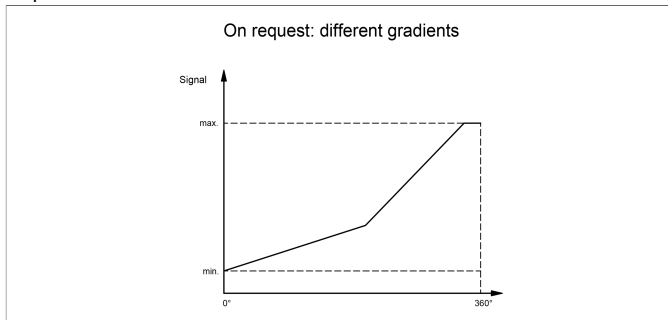
Output characteristic



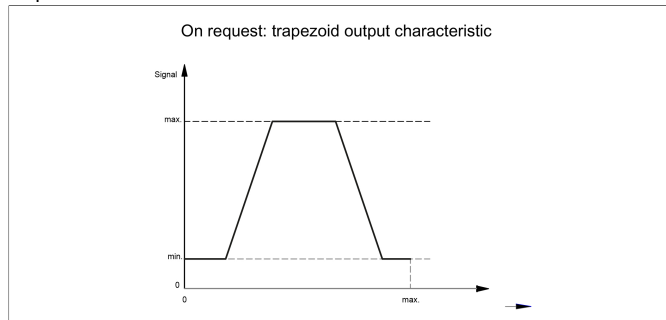
Output characteristic



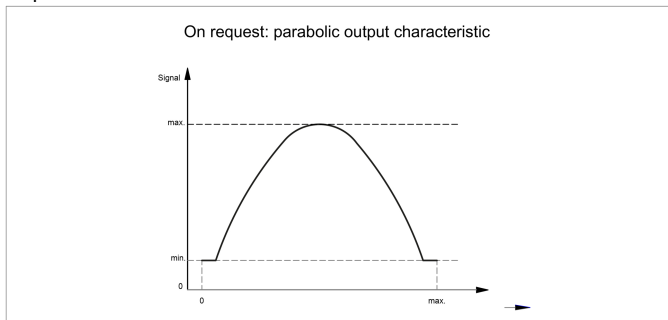
Output characteristic



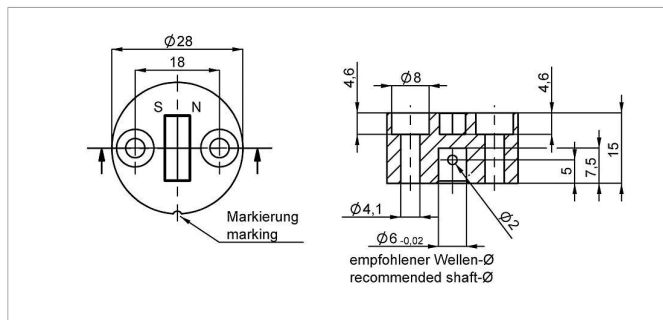
Output characteristic



Output characteristic



Position Markers

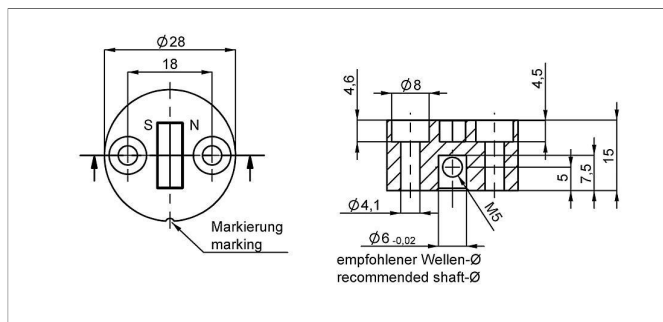


Z-RFC-P02

Position marker for frontal fixation with 2 cylinder head screws M4x20 (with microencapsulation) or with locking pin (both included in delivery).

Material PF
Max. permitted ± 3 mm
radial offset
Operating temp. $-40 \dots +125^{\circ}\text{C}$

P/N	Pack. unit [pcs]
40005661	1
400056080	25

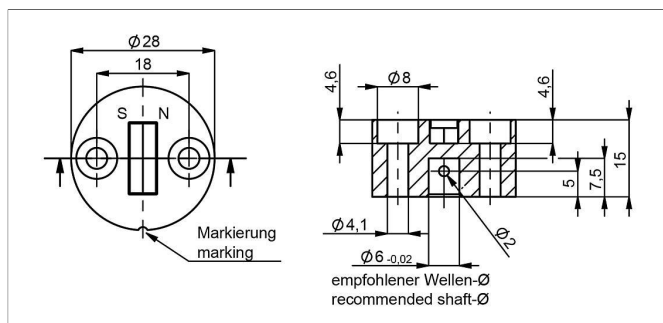


Z-RFC-P08

Position marker for fixation with threaded pin M5 (included in delivery).

Material PF
Max. permitted ± 3 mm
radial offset
Operating temp. $-40 \dots +125^{\circ}\text{C}$

P/N	Pack. unit [pcs]
400056070	1
400056084	25

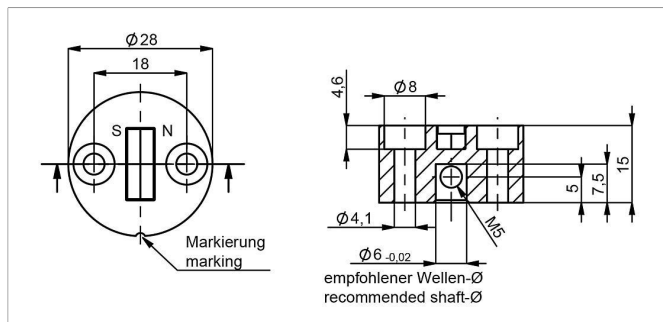


Z-RFC-P41

Position marker for frontal fixation with 2 cylinder head screws M4x20 (with microencapsulation) or with locking pin (both included in delivery).

Material PF
Max. permitted ± 3 mm
radial offset
Operating temp. $-40 \dots +125^{\circ}\text{C}$

P/N	Pack. unit [pcs]
400105037	1
400105038	25



Z-RFC-P47

Position marker for frontal fixation with 2 cylinder head screws M4x20 (with microencapsulation) or with threaded pin M5 (both included in delivery).

Material PF
Max. permitted ± 3 mm
radial offset
Operating temp. $-40 \dots +125^{\circ}\text{C}$

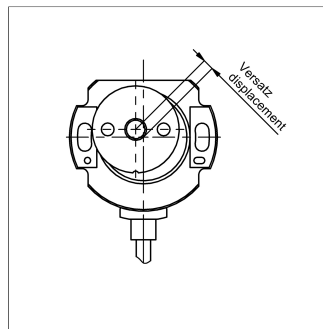
P/N	Pack. unit [pcs]
400105039	1
400105040	25

Position Markers

Working Distances Position Markers [mm] - One-channel Versions

	Z-RFC-P02 / P04 / P08 Z-RFC-P20 / P23 / P31	Z-RFC-P41 / P43 / P47	Z-RFC-P03 / P30	Z-RFC-P18	Z-RFC-P19	Z-RFC-P22
RFC-4851	2.3 ... 5	0 ... 2.7	0.7 ... 2.2	0 ... 4.5	0 ... 2.2	4.4 ... 9.2
RFC-4852 with diagnosis						
RFC-4853	0 ... 4	0 ... 2.7	0 ... 1.5	0 ... 4.5	0 ... 2.2	4.4 ... 9.2
RFC-4854 w/o diagnosis						

Lateral Magnet Offset



Lateral magnet offset will cause additional linearity error. The angle error, which is caused by radial displacement of sensor and position marker depends on the used position marker or magnet.

Additional Linearity Error at Radial Displacement - One-channel Versions

Z-RFC-P02 / P04 / P08 Z-RFC-P20 / P23 / P31	Z-RFC-P41 / P43 / P47	Z-RFC-P03 / P30	Z-RFC-P18	Z-RFC-P19	Z-RFC-P22
0.5 mm: $\pm 0.4^\circ$	0.5 mm: $\pm 0.4^\circ$	0.5 mm: $\pm 1.4^\circ$	0.5 mm: $\pm 0.7^\circ$	0.5 mm: $\pm 1.3^\circ$	1.0 mm: $\pm 0.8^\circ$
1.0 mm: $\pm 1.1^\circ$	1.0 mm: $\pm 1.1^\circ$	1.0 mm: $\pm 3.7^\circ$	1.0 mm: $\pm 1.3^\circ$	1.0 mm: $\pm 2.6^\circ$	2.0 mm: $\pm 1.8^\circ$
2.0 mm: $\pm 3.5^\circ$	2.0 mm: $\pm 3.5^\circ$	2.0 mm: -	2.0 mm: $\pm 3.3^\circ$	2.0 mm: -	4.0 mm: $\pm 5.4^\circ$