



ESCOLA NAVAL



talant de biefaire

Antero Ribeiro Fraga

Desenvolvimento de um Modelo Laboratorial para
Provas de Estabilidade

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

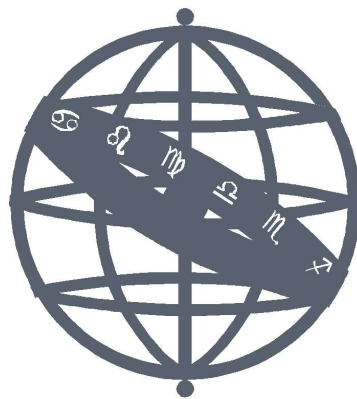


Alfeite
2020



ESCOLA NAVAL

talant de bi-faire



Antero Ribeiro Fraga

Desenvolvimento de um Modelo Laboratorial para Provas de Estabilidade

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

Orientação de: CFR EN-MEC ACN Paulo Alexandre Marques Pires da Silva

Co-orientação de: Professor Doutor Rui Pedro Chedas Sampaio

O Aluno Mestrando,

O Orientador,

Antero Fraga

Paulo Silva

Alfeite
2020

«Quer você acredite que consegue fazer uma coisa ou não, você está certo»

Henry Ford

Aos meus pais, Domingos e Clarisse

Agradecimentos

Agradeço aqui, por escrito, a todas as pessoas que de alguma forma contribuíram para a realização desta dissertação de mestrado.

Aos meus orientadores, Sr. Prof. Rui Chedas Sampaio e CFR EN-MEC Pires da Silva, por toda a dedicação e disponibilidade para me orientarem ao longo deste percurso.

Ao Sr. Engenheiro Andomarc Miranda, dos estaleiros navais da West Sea em Viana do Castelo, por me ter dado a excelente e muito proveitosa oportunidade de assistir e participar numa prova de estabilidade, e por todo o conhecimento transmitido.

Ao camarada Rocha Araújo, pelo empréstimo de uma impressora 3D que foi fundamental para terminar o modelo a tempo, tendo em conta a avaria que a minha tinha sofrido.

Aos militares e civis da oficina da Escola Naval pelos conselhos em alguns trabalhos, pela disponibilidade e vontade de ajudar.

A todos os meus camaradas, pela companhia, preocupação e troca de ideias durante toda a tese, em especial aos camaradas Martin Fedorchuk e Dias de Paiva, pelo tempo todo passado juntos a realizar a tese durante o estado de emergência implementado em Portugal.

E, por fim, gostaria de agradecer à minha família e amigos por todo o apoio incondicional dado ao longo destes meses.

Resumo

Atualmente, é sabido que o ensino através da prática tem um papel fundamental no processo de aprendizagem do aluno, fazendo com que o próprio reflita sobre os assuntos abordados teoricamente, preparando-o mais eficazmente para as suas futuras funções. Podemos encontrar, quer no mercado quer em instituições de ensino vários modelos para experimentação prática, desde os mais simples, apenas para representar algo em maior escala, até aos mais complexos, como por exemplo um motor ou um sistema de ar condicionado com diversos sensores e software dedicado.

Deste modo, projetou-se um modelo para realizar provas de estabilidade no laboratório de arquitetura naval da Escola Naval. A base da construção deste modelo, foi a impressão a três dimensões através de impressoras mais comuns que usam plástico como material de deposição.

Foram também realizados testes em vários sensores por forma a encontrar um que conseguisse medir a inclinação do navio. Com o sensor mais adequado disponível, em conjunto com um pêndulo, foi possível saber a inclinação do navio em tempo real e criar um programa em LabView capaz de realizar todos os cálculos necessários para se determinar o centro de gravidade na prova de estabilidade.

Por fim, obteve-se um modelo onde é possível realizar provas de estabilidade em laboratório, onde existe a opção de introduzir tanques para estudos de espelhos líquidos e onde existe um sistema para subir e descer o centro de gravidade do modelo.

Palavras-chave: Arquitetura Naval, Prova de Estabilidade, Modelo Laboratorial, Ensino, LabView

Abstract

Nowadays it is known that teaching through practice has a fundamental role in the student's learning process, making him reflecting on about the subjects learned in the theoretic classes and preparing him more effectively for his functions in the future. We can find in the market or in educational institutions several experimental models, from the simplest, that can just represent an object on a larger scale, to the most complex, such as, for example, an engine or an air conditioning system with several sensors and dedicated software.

In this dissertation, a model was designed to perform inclining experiments in the Escola Naval Architecture laboratory tank. The basis of the construction of this model was the 3D printing through the most common printers that use plastic as deposition material.

Tests were also carried on several sensors in order to find a sensor that could best measure the ship's inclination. With the most suitable sensor available in conjunction with a pendulum it was possible to know the ship's inclination in real time and create a LabView program capable of performing all the necessary calculations to determine the center of gravity in the inclining experiment.

Finally, a model where it is possible to carry out stability tests in the laboratory was obtained, where there is the option of introducing tanks for studies of the free-surface effects and where there is a system to raise and lower the model's center of gravity.

Keywords: Naval Architecture, Inclining Test, Laboratory Model, Teaching, Lab-View

Índice

Introdução	1
1 Estado da arte	3
1.1 Introdução	3
1.2 Modelos para provas de estabilidade	6
1.3 Simuladores e instrumentação de baixo custo	8
2 Enquadramento teórico	13
2.1 Estabilidade	13
2.2 Prova de estabilidade	14
3 Recolha de dados através de sensores	25
3.1 Sensor espacial da Phidhets	25
3.1.1 Giroscópio	26
3.1.2 Acelerómetro	30
3.1.3 Filtro complementar	31
3.2 Sensor de distância da Sharp	32
4 Projeto e construção do modelo	37
5 Cálculos e programação em LabVIEW	47
5.1 Cálculos do deslocamento e da altura metacêntrica	47
5.2 Programa em LabVIEW	48
6 Exequibilidade de uma prova de estabilidade no modelo	53
Conclusão	57
Bibliografia	59
Apêndices	63
A Programação no <i>LabView</i>	63
B Cálculos para a prova de estabilidade	67
C Possíveis exercícios com o modelo	69
D Programação para a prova de estabilidade	71

E	Excel de cálculos para prova de estabilidade	79
F	Enunciado e Resolução de um Trabalho com o Modelo	81
	Anexos	89
I	Especificações dos sensores	89
II	Erros típicos no gráfico traçado na prova de estabilidade	91
III	Registo de pesos	95
IV	Esquema de movimentação de pesos	97

Lista de Figuras

1.1	Modelo botânico. Fonte:(Laborial, 2020)	4
1.2	Experiência de física. Fonte:(Laborial, 2020)	4
1.3	Simulador de práticas clínicas. Fonte:(Laborial, 2020)	5
1.4	Modelo de engenharia de automóveis. Fonte:(Laborial, 2020)	5
1.5	Esquema do modelo da UCL. Fonte: Esquema cedido pelo Capitão de fragata Pires da Silva.	6
1.6	Modelo da UCL. Fonte: Imagem cedida pelo Primeiro Tenente Matos Filipe.	7
1.7	Modelo IST. Fonte: imagem cedida pelo Primeiro Tenente Duarte dos Santos.	8
1.8	Medição de vibrações através de câmera digital. Fonte:(Shiki, Franco & Watanabe, 2018)	9
1.9	Utilização de acelerômetros no estudo de vibrações. Fonte:(Shiki, Franco & Watanabe, 2018)	9
1.10	Aplicação de medição de vibrações. Fonte:(Ramos, 2019)	10
1.11	Teste de medidor de vibrações de baixo custo. Fonte:(Ramos, 2019)	10
1.12	Simulador de controle de corte. Fonte: (Direct Industry, 2020)	11
1.13	Simulador de vibrações. Fonte:(Sampaio, 2010)	12
1.14	Simulador de equilibragens. Fonte:(Sampaio, 2010)	12
2.1	As três condições de estabilidade. Fonte:(Rawson & Tupper, 2001)	13
2.2	Braço endireitante. Fonte:(Lewis, 1988)	14
2.3	Momento causado pela deslocação de um peso	15
2.4	Relação entre \overline{GM} , \overline{KM} e \overline{KG} . Fonte: (American Society For Testing And Materials, 1992)	16
2.5	Pesagem dos pesos inclinantes	17
2.6	Pêndulo por uma escotilha	18
2.7	Pêndulo mergulhado em detergente	18
2.8	Forma do pêndulo	19
2.9	Arranjo típico de um pêndulo. Fonte: (American Society For Testing And Materials, 1992)	20
2.10	suporte do pêndulo	20
2.11	Medição de calados	21
2.12	Densímetro	21
2.13	Instrumento de auxílio para medições de calados	22
2.14	Medição do ângulo de inclinação. Fonte: (American Society For Testing And Materials, 1992)	22

2.15 Gráfico típico de uma prova de estabilidade com três pêndulos. Fonte:(American Society For Testing And Materials, 1992)	23
3.1 Placa e cabo USB da Phidgets. Fonte:(Phidgets Inc., 2018)	26
3.2 Painel de controlo da placa	26
3.3 Giroscópio através do painel da Phidgets	27
3.4 Painel Frontal do exemplo da Phidgets do giroscópio	28
3.5 Teste ângulos do sensor	29
3.6 Gráfico de testes do sensor a 15 ^o	29
3.7 Acelerómetro através do painel da Phidgets	30
3.8 Gráfico de testes ao acelerómetro a 15 ^o	31
3.9 Exemplo da aplicação do filtro complementar. Fonte:(Islam et al., 2017)	32
3.10 Fluxograma do filtro complementar implementado	32
3.11 Teste da placa com 15 ^o	33
3.12 Sensor de distância. Fonte:(Phidgets Inc., 2016b)	33
3.13 Sensor de distância através do painel da Phidgets	34
3.14 Teste sensor de distância	35
3.15 Gráfico precisão do sensor de distância. Fonte:(Phidgets Inc., 2016b)	35
4.1 Perfil do modelo (dimensões em milímetros)	37
4.2 Área de colagem e furos de ligação	38
4.3 Suporte e barra do pêndulo	39
4.4 Suporte do pêndulo do meio	39
4.5 Suporte sensor de distância	40
4.6 Tanque e saliência para encaixe	40
4.7 Sistema de rosca para subir e descer o centro de gravidade	41
4.8 Estrutura para posicionamento de pesos	41
4.9 Pêndulo rígido com refletor	42
4.10 Evolução dos pinos de suporte do pêndulo rígido	42
4.11 Modelo com a configuração de 3 tanques	43
4.12 Modelo com a configuração de 2 tanques e sistema para subir e descer centro de gravidade	44
4.13 Marcas de calado	45
5.1 Divisão do perfil em zonas	48
5.2 Valores iniciais no LabVIEW	49
5.3 Registo dos valores da distância	50
5.4 Imagem em 3D do modelo no LabVIEW	51
5.5 Gráfico em LabView	51
6.1 Gráfico de regressão linear da 2 ^a prova de estabilidade	55
6.2 Modelo a realizar prova de estabilidade	56
A.1 Programa do giroscópio	63
A.2 Programa do acelerómetro	64
A.3 Programa de aplicação do filtro complementar	65
A.4 Programa do sensor de distância	66

B.1	Valores obtidos para cada imersão	68
D.1	Interpolação da voltagem para distância a partir de dados do sensor	71
D.2	Registo de valores da distância do pêndulo através de botões	72
D.3	Cálculos das tangentes	73
D.4	Cálculos dos momentos inclinantes	74
D.5	Cálculo da altura do centro de gravidade a partir do declive	75
D.6	Interpolação para obtenção dos valores do deslocamento e do \overline{KM} .	76
D.7	Introdução do modelo 3D com respetiva inclinação dada pelo sensor	77
E.1	Cálculos de prova de estabilidade em Excel	79
F.1	Configuração do modelo	82
F.2	Gráfico de carenas direitas	84
F.3	<i>Assembly</i> do modelo	85
F.4	Valores registados	86
F.5	Resultados da prova	87
I.1	Especificações da placa da Phidgets.Fonte:Phidgets Inc. (2016a) . .	89
I.2	Especificações do sensor de distância da SharpPhidgets Inc. (2016b)	90
II.1	Excesso de espelhos líquidos	91
II.2	Navio a tocar o fundo ou restringidos pelos cabos de amarração . .	92
II.3	Vento estável por bombordo após ponto inicial ter sido retirado . .	92
II.4	Rajadas de vento por bombordo	93
III.1	Exemplo de registo de pesos	95
IV.1	Esquema de movimentação de pesos. Fonte: Fornecido pelo Sr.Engenheiro Andomarc Miranda	97

Lista de Tabelas

3.1	Valores obtidos da deriva	28
3.2	Registo de valores ao longo da régua	35
6.1	Valores para determinar a deslocação dos pesos	53
6.2	Valores da distância percorrida pelo pêndulo a meio navio após cada movimentação na primeira prova de estabilidade	54
6.3	Valores da distância percorrida pelo pêndulo a meio navio após cada movimentação na segunda prova de estabilidade	54
F.1	Resultados da interpolação no GCD	85

Lista de Abreviaturas, Acrónimos e Símbolos

Acrónimos

3D	Três Dimensões
G	centro de gravidade
GCD	gráfico de carenas direitas
IST	Instituto Superior Técnico
M	metacentro
MEMS	Micro-Electro-Mechanical Systems
PLA	Plástico de Políácido Láctico
UCL	University College London
USB	Universal Serial Bus

Símbolos

δ	volume específico	[meter/ ³ kilogram]
∇	volume submerso	[m ³]
\overline{BM}	raio metacêntrico	[m]
\overline{GM}	altura metacêntrica	[m]
\overline{GZ}	braço endireitante	[m]
\overline{KB}	altura do centro de impulsão	[m]
\overline{KG}	altura do centro de gravidade	[m]
\overline{KM}	altura do metacentro	[m]

ϕ	ângulo de inclinação do navio	[°]
i_r	momento de inércia	[m ⁴]
M_C	Momento para mudar o caimento um metro	[kg · m]
TPC	Deslocamento unitário	[kg/m]
w	peso movimentado	[kg]
X_C	posição longitudinal do centro de impulsão	[m]
X_F	posição longitudinal do centro de flutuação	[m]
Z_F	altura do centro de flutuação	[m]
d	distância de deslocação do peso	[m]
g	aceleração	[g]
M	momento inclinante	[kg · m]
MCU	Momento de caimento unitário	[t.m/cm]
W	deslocamento do navio	[kg]

Introdução

Hoje em dia, no ensino de engenharia e outras ciências, a parte prática é um elemento e um alicerce importantíssimo para que o aluno possa compreender e interiorizar conceitos fundamentais teóricos. Esta parte prática é normalmente apoiada por equipamentos, e/ou software, por vezes bastante dispendiosos e, por este motivo, muitas das vezes, o ensino é feito apoiado em grande parte apenas na teoria. Torna-se portanto essencial arranjar formas de proporcionar aos discentes a parte prática.

Este projeto surge da necessidade de, na Escola Naval, criar modelos para trabalhos em laboratório e, complementarmente, aproveitar infraestruturas já presentes para a área curricular de Arquitetura Naval.

O objetivo principal deste trabalho é a construção de um modelo para efetuar provas de estabilidade em laboratório que seja o mais didático possível, económico e desperte o interesse dos alunos quer para a área de arquitetura naval, programação ou da utilização de sensores.

A prova de estabilidade é realizada em todos os navios após a sua construção ou após alterações que possam afetar significativamente o seu centro de gravidade ou o deslocamento. Esta prova é fundamental para obter dados acerca da estabilidade e, então, verificar se cumpre com os critérios definidos por forma a garantir a segurança do navio e da sua guarnição.

Os modelos para efetuar provas de estabilidade podem ser encontrados em várias instituições de ensino da área da engenharia naval. Estes modelos têm como principal funcionalidade permitirem ao aluno efetuar uma prova de estabilidade em laboratório.

Deste modo, no capítulo um, realizou-se uma pesquisa sobre os vários modelos e software de ensino existentes, mais particularmente, modelos para efetuar provas de estabilidade. Com isto, foi possível adquirir ideias para a construção de um para a Escola Naval. Seguiu-se, no capítulo dois, com uma introdução teórica sobre as provas de estabilidade, importante para a justificação de decisões na parte da construção do modelo e para a realização dos cálculos inerentes a este tipo de prova. No terceiro capítulo é feito um estudo sobre a possibilidade da utilização de sensores no modelo que, conectados a um computador, nos possibilitem a recolha e tratamento de dados automaticamente. No quarto capítulo, são mostrados os vários passos e considerações realizadas no processo de construção do modelo. Seguidamente, no quinto capítulo, é explicado como foram obtidos os valores necessários para a determinação do centro de gravidade na prova de estabilidade, e são também explicadas as capacidades de um programa desenvolvido em LabView que

realiza o tratamento de dados do sensor. No sexto e último capítulo são mostrados os resultados de provas de estabilidade experimentais efetuadas no modelo.

Capítulo 1

Estado da arte

1.1 Introdução

Atualmente, tendo em conta o objetivo deste trabalho, podemos encontrar várias definições de modelos ou de modelos didáticos:

«Os modelos didáticos de ensino são diferentes propostas de apreensão da realidade do professor, eles expressam as diferentes concepções sobre o conhecimento, o ensino, e sobre o mundo em que vive.»(Cavalcante & Silva, 2008)

«Modelo é um objecto modelado que incorpora a representação interpretativa, tridimensional, em escala, de um objecto, espécime natural ou teoria, com o objectivo de simular, demonstrar/mostrar, exemplificar ou postular uma situação real.»(Amaral, 2011)

A utilização de modelos didáticos no ensino é realizada em várias áreas e a vários níveis, como por exemplo, na biologia, na química e na física.

«A experimentação no ensino de Ciências, ou seja, de Química, Física ou Biologia, é componente indispensável para o processo de ensino-aprendizagem dos diversos conteúdos do conhecimento científico – conceituais, procedimentais e de atitudes – no sentido de favorecer a construção de inter-relações entre a teoria e a prática, bem como relações entre as concepções prévias do aluno e as novas idéias que serão trabalhadas.»(Cavalcante & Silva, 2008)

«As atividades experimentais favorecem o desenvolvimento da aprendizagem dos alunos, pois, podem propiciar meios de motivá-los e envolvê-los com os temas estudados, proporcionando a compreensão e a interpretação de fenómenos do seu dia-a-dia.»(Cavalcante & Silva, 2008)

«Pode-se notar que aprender ciência não é simplesmente introduzir conceitos, mas levar os alunos a refletirem sobre os conceitos usando as experiências como ferramenta para construção e reconstrução das ideias apresentadas pelos alunos.»(Alves de Lima & Marcondes, 2004)

Existem atualmente diversos equipamentos usados a nível escolar, vendidos por empresas como a Festo Didatic ou a Ley Bold, que ajudam os alunos a compreender melhor certos casos reais. Um exemplo de uma empresa que fornece esse tipo de equipamentos, para diversas áreas como a biologia, a física, a medicina, a

zoologia ou a botânica, é a Laboratorial Didática. A Laboratorial didática fornece desde equipamentos de aprendizagem simples como modelos botânicos (Figura 1.1) e pequenas experiências de física (Figura 1.2), até modelos mais complexos como simuladores de práticas clínicas (Figura 1.3) ou modelos de engenharia para automóveis (Figura 1.4).



FIGURA 1.1: Modelo botânico. Fonte:(Laborial, 2020)



FIGURA 1.2: Experiência de física. Fonte:(Laborial, 2020)



FIGURA 1.3: Simulador de práticas clínicas. Fonte:(Laborial, 2020)



FIGURA 1.4: Modelo de engenharia de automóveis. Fonte:(Laborial, 2020)

1.2 Modelos para provas de estabilidade

Escolas como o Instituto superior técnico (IST) ou a University College London (UCL) possuem cursos na área da engenharia naval. Como tal possuem instalações e equipamentos que possibilitam aos alunos a realização de provas de estabilidade em laboratório.

A UCL possui um modelo feito em madeira, pintado com tinta amarela impermeável à água, tem cerca de 1000mm de comprimento e 200mm de boca, de geometria simples, constituída por uma forma retangular a meio e forma triangular a vante e a ré, tal como podemos ver na Figura 1.5. O modelo também possui pesos auxiliares para servir de lastro e para fazer movimentações tanto transversais como longitudinais. Para medir o ângulo de inclinação possui um pêndulo rígido com um transferidor que permite obter diretamente o ângulo, tal como podemos ver na Figura 1.6.

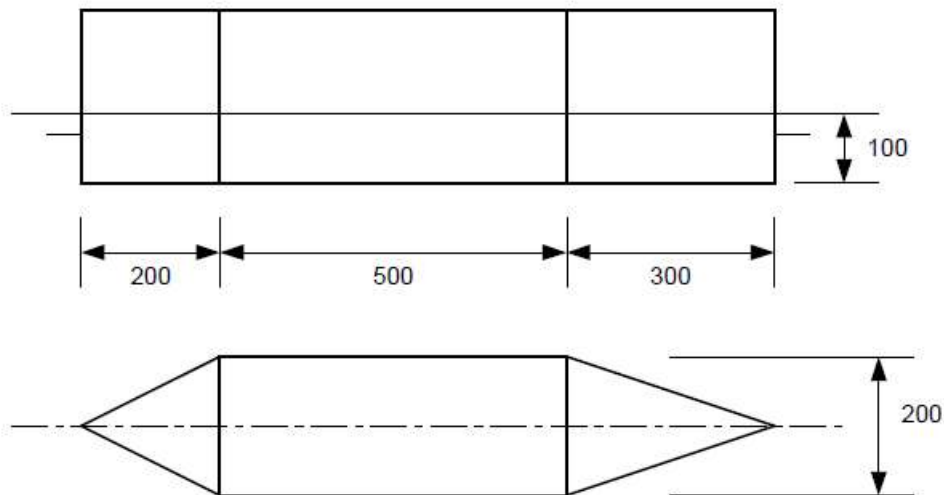


FIGURA 1.5: Esquema do modelo da UCL. Fonte: Esquema cedido pelo Capitão de fragata Pires da Silva.



FIGURA 1.6: Modelo da UCL. Fonte: Imagem cedida pelo Primeiro Tenente Matos Filipe.

Este modelo permite aos alunos efetuar provas de estabilidade, provas para o caimento e provas de estabilidade em avaria.

O IST possui três modelos, construídos em fibra de vidro, onde é possível realizar provas de estabilidade em laboratório. Estes modelos reproduzem navios porta-contentores e graneleiros, e têm um comprimento compreendido entre 1,2 e 1,8m. Com estes modelos também é possível avaliar efeitos de movimentação de pesos, espelhos líquidos e alagamento de compartimentos.

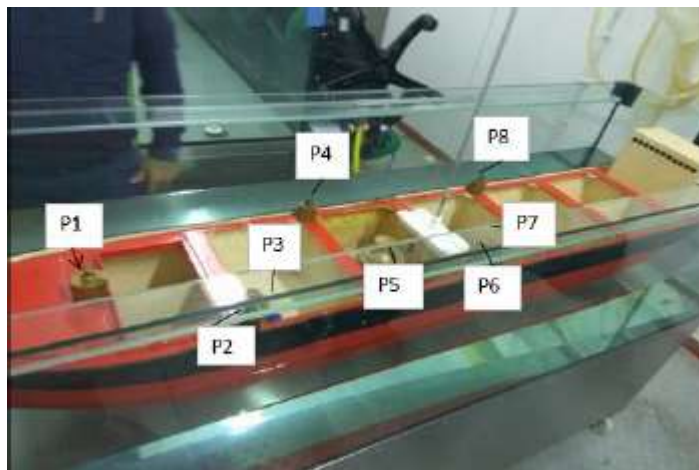


FIGURA 1.7: Modelo IST. Fonte: imagem cedida pelo Primeiro Tenente Duarte dos Santos.

Na figura 1.7 podemos ver uma imagem de um dos modelos do IST, um graneleiro, e uma distribuição de pesos para a realização de uma prova de estabilidade. O modelo possui um comprimento de cerca de 172mm, uma boca máxima de 24,8mm e um pontal de 13,3mm.

1.3 Simuladores e instrumentação de baixo custo

Nos dias de hoje com a evolução tecnológica é cada vez mais usual a procura e a utilização de simuladores e instrumentação de baixo custo quer para utilizações com a finalidade de ensino, investigação ou para outras utilizações de engenharia. Estes equipamentos apesar das limitações inerentes conseguem por vezes efetuar o trabalho de outros mais caros com qualidade suficiente para o fim a que se destinam.

«A procura de soluções de baixo custo é hoje em dia, uma exigência quando se fala em aquisição de equipamentos para empresas e instituições. Essa procura torna-se ainda mais premente quando as soluções disponíveis comercialmente são demasiado caras e não traduzem por completo os objetivos para as quais se destinam.»(Dinis, 2010)

Os equipamentos de alto custo, utilizados em laboratórios de ensino, estão cada vez mais a ser substituídos por equipamentos mais simples e baratos que, além de proporcionar ao estudante a aprendizagem dos conceitos envolvidos, o insere no cenário do mercado atual competitivo e dependente de novas tecnologias.(Shiki, Franco & Watanabe, 2018)

Dinis (2010) desenvolveu uma versão *low-cost* de um sistema de medição de deformações em estruturas, para ser usado pelo laboratório de Engenharia Civil da Universidade da Madeira, motivado pelo facto da universidade não possuir um sistema próprio.

Shiki, Franco e Watanabe (2018) estudaram a possibilidade da utilização de instrumentação de baixo custo, no ensino de vibrações mecânicas nos cursos de

engenharia, como uma forma alternativa e funcional de aprendizagem, sendo que os resultados, mostraram que essas ferramentas, apesar das limitações inerentes, cumprem os seus papéis e mostram-se como alternativas para continuar a proporcionar um ensino de qualidade. A experiência dos docentes que utilizaram essas metodologias de medição em aula mostrou que o uso de tecnologias alternativas baratas atrai muito a atenção dos alunos, embora os mesmos geralmente não tenham a noção de que os equipamentos comerciais têm um custo elevado. No entanto, os alunos vêm nessas formas de medição algo muito mais acessível e familiar do que seriam equipamentos caros presentes em laboratórios de engenharia. Neste estudo foram utilizadas câmaras digitais, sensores *micro-electro-mechanical systems* (MEMS), nomeadamente acelerómetros, e um Arduino Uno (Figura 1.8 e 1.9).

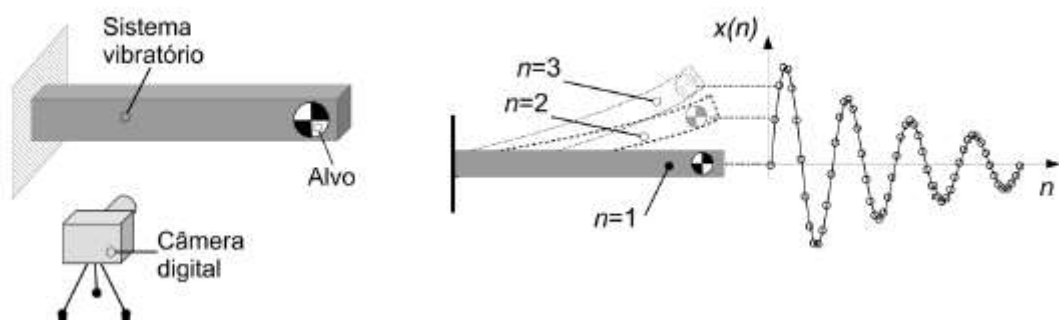


FIGURA 1.8: Medição de vibrações através de câmera digital.

Fonte:(Shiki, Franco & Watanabe, 2018)



FIGURA 1.9: Utilização de acelerómetros no estudo de vibrações.

Fonte:(Shiki, Franco & Watanabe, 2018)

Ramos (2019) desenvolveu um sistema de baixo custo para realizar um controlo regular de condição das máquinas a bordo dos navios da Marinha Portuguesa, constituído por um acelerómetro MEMS e um *smartphone* com uma aplicação para fazer a recolha e análise dos dados do sensor, motivado pelo insuficiente número de analisadores de vibrações existentes para todos os navios da Marinha. Segundo ele em 2019 a Marinha possuía três analisadores de vibrações, da marca SKF, que apresentam preços que rondam os 10 e os 30 mil euros, enquanto que o acelerómetro usado ronda valores abaixo dos 100 euros. Este equipamento revela-se útil quando não existe a possibilidade do uso dos equipamentos mais caros (Figura 1.10 e 1.11).



FIGURA 1.10: Aplicação de medição de vibrações. Fonte:(Ramos, 2019)



FIGURA 1.11: Teste de medidor de vibrações de baixo custo. Fonte:(Ramos, 2019)

Os simuladores e o *hardware* de baixo custo hoje são em dia uma excelente forma alternativa, ou complementar, às aulas de laboratório que nem sempre são possíveis devido aos recursos existentes em algumas unidades de ensino.

Existem diversos simuladores capazes de mostrar ao aluno situações que nem sempre são fáceis de representar em laboratório ou na vida real.

Os simuladores possibilitam estudar, num ambiente virtual, o comportamento estático e dinâmico da situação-problema permitindo, dessa forma, projetar e prever a resposta do sistema/processo sob investigação nas condições de trabalho que irão ocorrer no mundo real. A simulação, dessa forma, apresenta-se, muitas vezes, como uma alternativa para reproduzir virtualmente experiências que seriam ou muito onerosas, ou até mesmo perigosas para serem realizadas no ambiente de sala de aula.(Loder & Bender, 2007)

A simulação, pelo fato de suprimir uma série de não-linearidades do processo real: folgas, saturações de controle, estados e sensores, falhas nas operações, distorções dos sinais, ruídos, etc., não substitui a realidade, mas permite *insights* sobre o processo simulado uma vez que aspectos relevantes do comportamento encontram-se reproduzidos pelo modelo. A simulação, desse modo, permite um *preview* da operação do sistema real e nisso reside um valor inestimável para o projeto de sistemas. (Loder & Bender, 2007)

Existem imensos programas de simulação atualmente no mercado, como por exemplo o Motion Studio do Solidworks, o Algodo, o Working Model ou o Simulink do Matlab.

Podemos ver na Figura 1.12 um simulador de controle de corte.

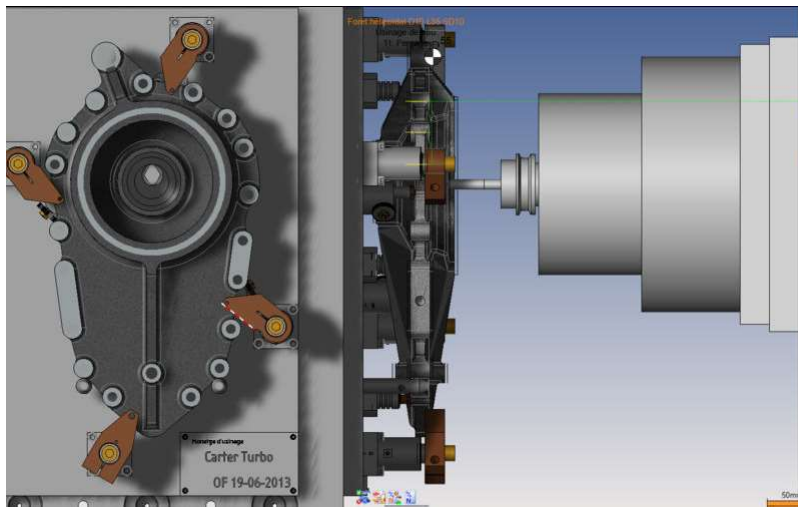


FIGURA 1.12: Simulador de controle de corte. Fonte: (Direct Industry, 2020)

Na Escola Naval também são utilizados simuladores em algumas unidades curriculares, como por exemplo um programa em LabView, utilizado em vibrações mecânicas, que permite fazer, por exemplo, estudos de sistemas de vários graus de liberdade, absorção e transmissibilidade de vibrações, tal como podemos ver na Figura 1.13, ou um programa utilizado na unidade curricular de gestão da manutenção onde é possível realizar equilibragens, tal como podemos observar na Figura 1.14.

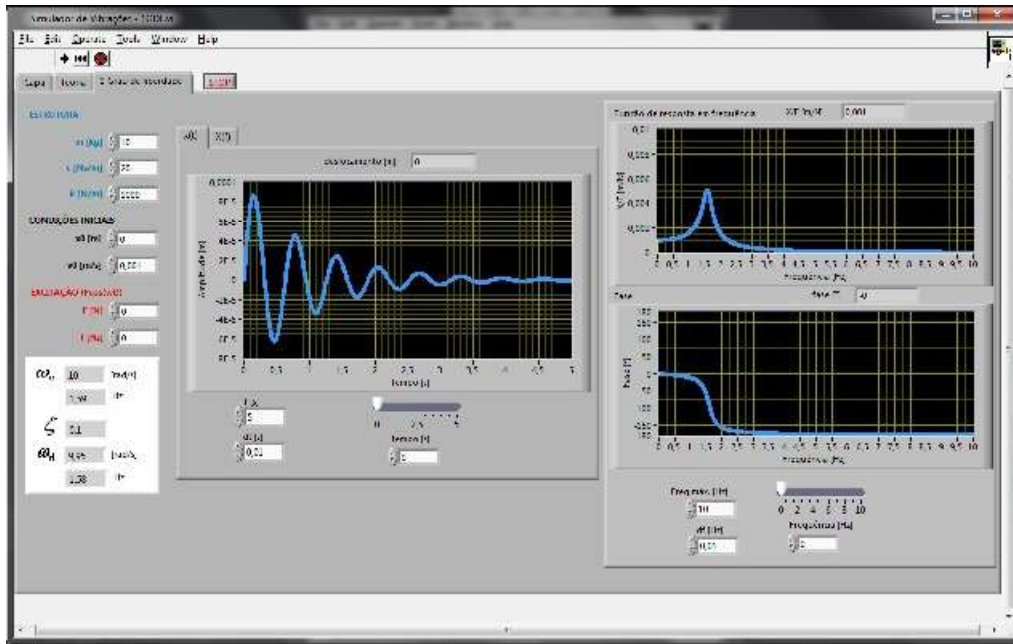


FIGURA 1.13: Simulador de vibrações. Fonte:(Sampaio, 2010)

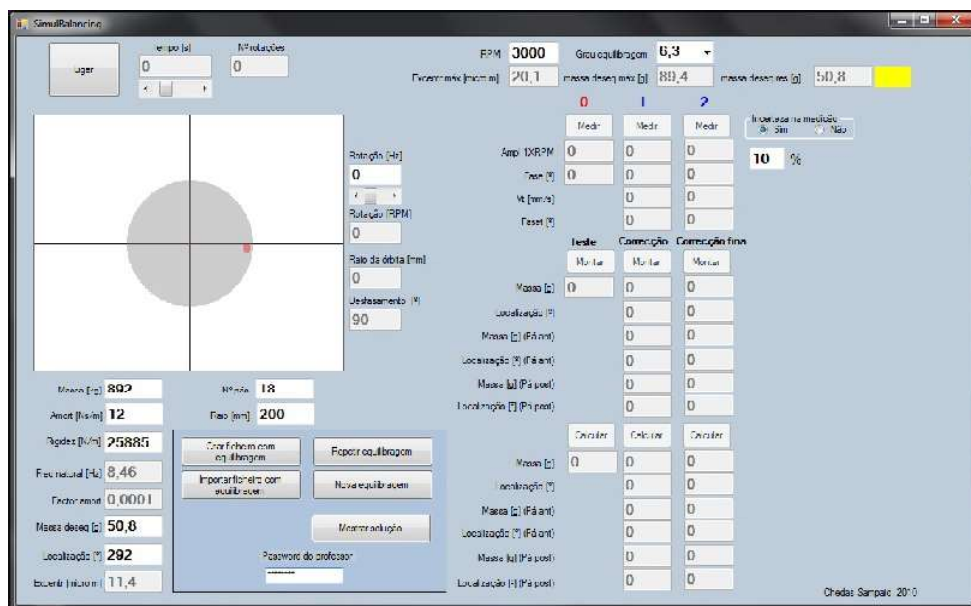


FIGURA 1.14: Simulador de equilibragens. Fonte:(Sampaio, 2010)

Estes programas e os equipamentos de baixo custo permitem aos alunos aplicar conhecimentos teóricos e até explorar as suas próprias ideias de maneira autónoma, através de meios acessíveis. Este tipo de aprendizagem é fundamental, não só pela questão da interatividade, que leva os alunos a terem um maior interesse, mas também porque lhes reforça um pilar importante da parte prática e prepara de uma maneira mais eficaz para as suas funções futuras.

Capítulo 2

Enquadramento teórico

2.1 Estabilidade

O termo estabilidade refere-se à tendência de um corpo ou sistema voltar à sua posição inicial após ter sofrido uma pequena perturbação. Se um corpo rígido sujeito a um pequeno distúrbio a partir da sua posição de equilíbrio tende a voltar para essa posição diz-se que possui estabilidade positiva. Caso se mantenha na sua nova posição diz-se que possui estabilidade neutra. Se o desvio relativamente à sua posição inicial aumentar, então, possui estabilidade negativa, tal como podemos ver na Figura 2.1 onde M é o metacentro e G o centro de gravidade. (Rawson & Tupper, 2001)

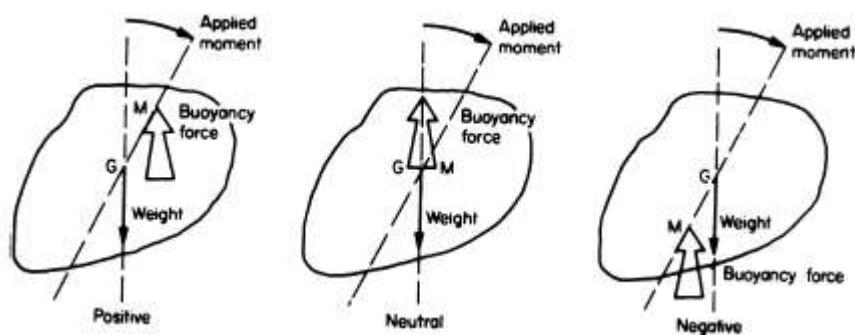


FIGURA 2.1: As três condições de estabilidade. Fonte: (Rawson & Tupper, 2001)

Um navio é uma estrutura complexa e matematicamente não é um corpo rígido. Apesar disso, para o propósito de estudos de estabilidade é considerado como tal. (Rawson & Tupper, 2001)

Para a posição de equilíbrio, a força de impulsão e o peso, devem ser iguais e atuar ao longo da mesma reta. Para um corpo flutuante esta linha deve ser vertical. (Rawson & Tupper, 2001)

Um navio deverá ter sempre estabilidade positiva para as condições para que foi construído, pois, quando é inclinado devido a perturbações do ambiente que

o rodeia como o vento ou a ondulação o navio deve voltar para a sua posição inicial de equilíbrio.

Considerando um navio simétrico inclinado a um pequeno ângulo, mostrado exagerado na Figura 2.2. O centro de impulsão moveu-se da linha central como resultado da inclinação, e as linhas representantes do peso e da impulsão estão separadas por uma distância, \overline{GZ} , o braço endireitante. A linha vertical do centro de flutuação irá intercetar a linha central do navio no ponto M, chamado de metacentro transversal.

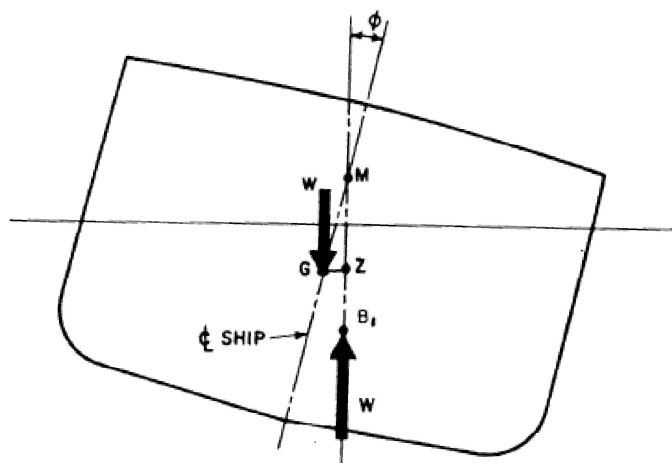


FIGURA 2.2: Braço endireitante. Fonte:(Lewis, 1988)

A não ser que haja uma mudança abrupta na forma de um navio, nas proximidades da linha de água, o metacentro irá praticamente manter-se estacionário para inclinações de pequenos ângulos até 7 ou, por vezes, 10 graus. É neste pressuposto que se baseia a teoria metacêntrica. (Lewis, 1988)

2.2 Prova de estabilidade

Uma prova de estabilidade consiste em inclinar um navio, através da movimentação de pesos perpendicularmente à linha de meia-nau e a uma distância defenida, de maneira a que o navio estabilize com um certo ângulo de inclinação igualando o momento endireitante com o momento inclinante. O processo é repetido a vários ângulos e para ambos os bordos. (Lewis, 1988)

As provas de estabilidade são realizadas no fim do período de construção de um navio para determinar, experimentalmente, o deslocamento do navio e o centro de gravidade. (Lewis, 1988)

Uma prova de estabilidade também pode ser realizada após um navio sofrer alterações significativas, ou após um período de serviço extenso em que a acumulação de pequenas alterações possam afetar o seu deslocamento ou o seu centro de gravidade.(Lewis, 1988)

2.2. Prova de estabilidade

Através desta prova é possível calcular as características de estabilidade de um navio e verificar se este satisfaz os critérios de estabilidade. (American Society For Testing And Materials, 1992)

Os ângulos de inclinação são normalmente mantidos pequenos para que sejam proporcionais ao momento inclinante. (Rawson & Tupper, 2001)

Sendo assim o braço endireitante pode ser dado pela Equação 2.1.

$$\overline{GZ} = \overline{GM} \times \sin \phi \quad (2.1)$$

Onde \overline{GM} é a altura metacêntrica (em m) e ϕ o ângulo de inclinação do navio (em $^{\circ}$).

E o momento endireitante é dado por:

$$W \times \overline{GZ} = W \times \overline{GM} \times \sin \phi \quad (2.2)$$

Onde W é o deslocamento do navio em quilogramas.

O cálculo para o momento inclinante M (em $kg \times m$) causado pelo movimento de um peso w (em kg) perpendicular à linha de meia-nau e a uma distância d (em m) é dado pela Equação 2.3 (ver Figura2.3).

$$M = w \times d \times \cos \phi \quad (2.3)$$

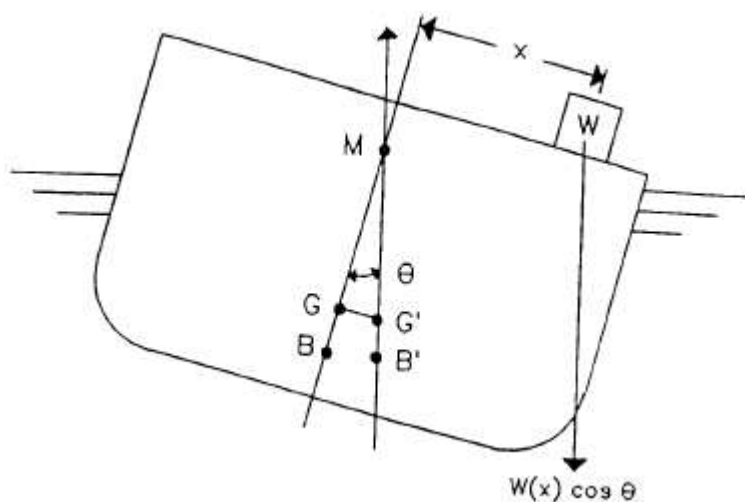


FIGURA 2.3: Momento causado pela deslocação de um peso

Como, com o navio estabilizado a um certo ângulo, o momento inclinante é igual ao momento endireitante, obtemos a equação 2.4.

$$W \times \overline{GM} \times \sin \phi = w \times d \times \cos \phi \iff \overline{GM} = \frac{w \times d}{W \times \tan \phi} \quad (2.4)$$

Obtendo \overline{GM} facilmente conseguimos obter a altura do centro de gravidade.

$$\overline{KG} = \overline{KM} - \overline{GM} \quad (2.5)$$

Onde \overline{KG} é a altura do centro de gravidade (em m) e \overline{KM} é a altura do metacentro (em m) que é obtida através do gráfico de carenas direitas.

Podemos ver na Figura 2.4 a relação entre os valores de \overline{GM} , \overline{KM} e \overline{KG} .

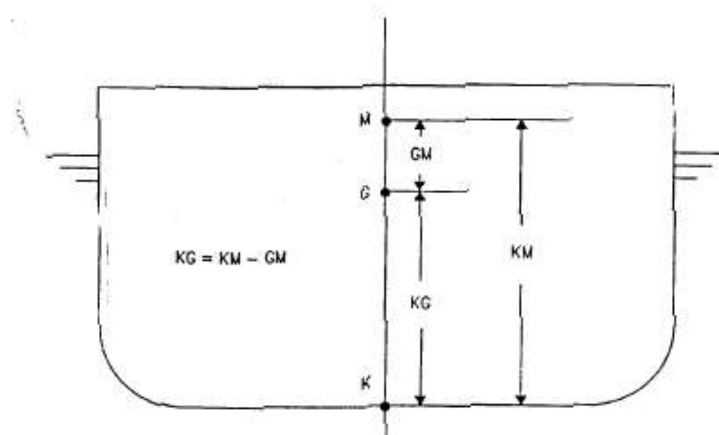


FIGURA 2.4: Relação entre \overline{GM} , \overline{KM} e \overline{KG} . Fonte: (American Society For Testing And Materials, 1992)

Caso existam tanques, num navio que efetua uma prova de estabilidade, que não estejam nem completamente vazios nem cheios, os espelhos líquidos desses tanques devem ser considerados.

$$\overline{KG} = \overline{KM} - \overline{GM} - \frac{1}{W} \sum \frac{i_r}{\delta} \quad (2.6)$$

Onde i_r é o momento de inércia (em m^4) da superfície livre e δ é o volume específico do líquido no tanque (em $\frac{m^3}{kg}$).

Como preparação para a prova, é necessário fazer uma estimativa do peso e dos momentos vertical e longitudinal de todos os itens que fazem parte do deslocamento leve do navio, e que ainda não estão a bordo, de todos os itens que não fazem parte do navio que serão removidos e de todos os itens de carga que estão a bordo e, então, aplicar esta estimativa ao deslocamento e aos momentos longitudinais e verticais determinados pela prova de estabilidade para obtermos a condição de deslocamento leve do navio. Se tivermos itens que fazem parte do deslocamento leve do navio e que ainda não estão na sua posição final, os momentos que irão resultar

2.2. Prova de estabilidade

da mudança de posição desses itens devem ser incluídos. Cada tanque e espaços vazios devem ser verificados sendo que os pesos inclinantes e restante equipamento não deve ser esquecido(Lewis, 1988).

Podemos ver um exemplo de registo dos pesos em Anexo III.

Os pesos para realizar a inclinação devem ser seleccionados de forma a que produzam um ângulo de inclinação suficiente para assegurar resultados precisos mas que não alcancem um ângulo a que \overline{GZ} já não corresponda a $\overline{GM} \times \sin \phi$. Na prática, é usual primeiramente estimar-se \overline{GM} para o momento em que irá ser realizada a prova de estabilidade, e então, é seleccionado um peso que irá dar cerca de 1° para cada lado para grandes navios, $1,5^\circ$ para navios de 30 metros e 2 a 3 graus para navios consideravelmente pequenos. A equação 2.7 dá-nos o peso pretendido(Lewis, 1988).

$$w = \frac{\overline{GM} \times W \times \tan \phi}{d} \quad (2.7)$$

Antes de serem colocados no navio deve-se medir rigorosamente a massa dos pesos inclinantes, tal como se pode observar na Figura 2.5.

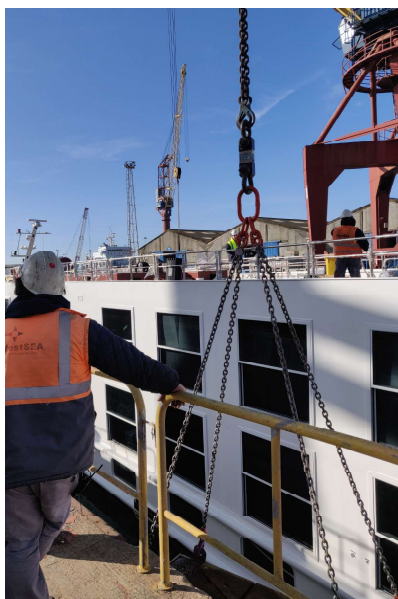


FIGURA 2.5: Pesagem dos pesos inclinantes

Os pesos inclinantes são normalmente movimentados por forma a produzir pelo menos duas inclinações para cada bordo, as inclinações intermediárias devem ser de cerca de metade do máximo. Os pesos devem ser movidos ou colocados suavemente de maneira a evitar o balanço do navio.(Lewis, 1988)

Existem várias formas de medir o ângulo de inclinação de um navio numa prova de estabilidade, sendo que a mais habitual é através de um pêndulo. Normalmente quanto mais longo for o pêndulo melhor será a precisão da prova, sendo

que, por vezes, pode ter que passar por uma ou mais escotilhas, tal como se pode observar na Figura 2.6. O pêndulo fica normalmente mergulhado num líquido viscoso, como por exemplo, óleo ou detergente, por forma a amortecer a sua oscilação (Figura 2.7).

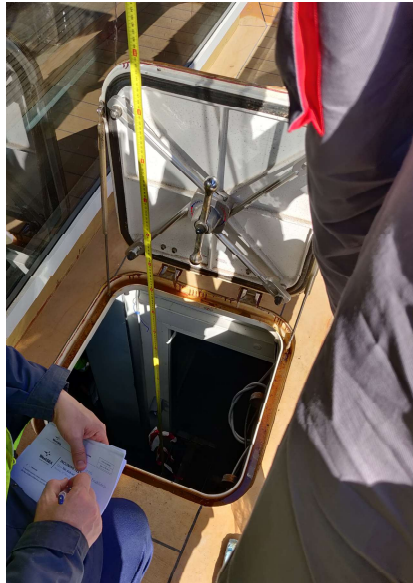


FIGURA 2.6: Pêndulo por uma escotilha



FIGURA 2.7: Pêndulo mergulhado em detergente

Deve ser usado um mínimo de três pêndulos para permitir a identificação de más leituras em qualquer pêndulo. (American Society For Testing And Materials, 1992)

As leituras da inclinação devem ser feitas simultaneamente após cada movimentação de pesos. O início das leituras deve ser efetuado depois de ser dado tempo suficiente para que o navio estabilize após a movimentação do peso. O navio deve estar safo do cais e os cabos de amarração bem folgados. Se o navio não estiver completamente estabilizado, a leitura deve ser feita na média do movimento residual. (Lewis, 1988)

O pêndulo por vezes também pode ter diferentes tipos de formatos por forma a amortecer a oscilação. Podemos ver na Figura 2.8 um pêndulo cilíndrico onde foram soldadas placas de metal à sua volta para esse efeito.



FIGURA 2.8: Forma do pêndulo

O fio do pêndulo deverá ser de um material monofilamentar. A conexão no topo não deverá restringir a sua rotação. Um exemplo disso poderá ser o fio ligado a uma anilha que por sua vez estará pendurada num prego, tal como podemos ver na Figura 2.9 ou de forma parecida na Figura 2.10.

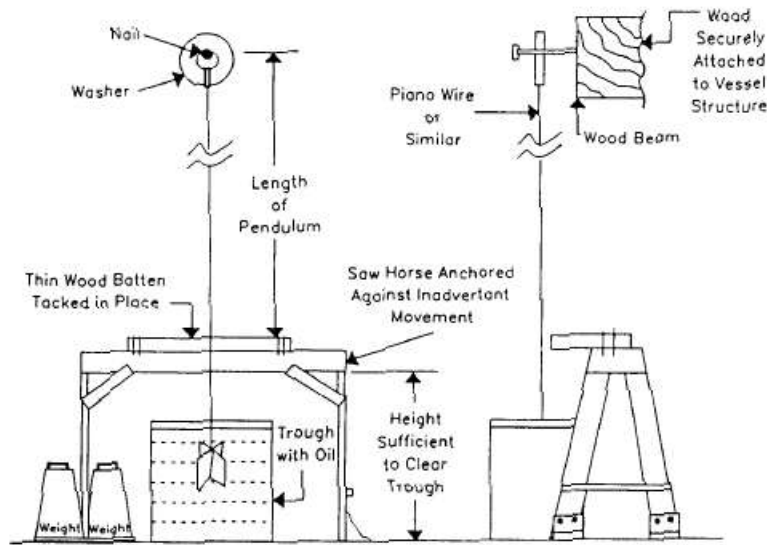


FIGURA 2.9: Arranjo típico de um pêndulo. Fonte: (American Society For Testing And Materials, 1992)



FIGURA 2.10: suporte do pêndulo

Para determinar o deslocamento do navio torna-se necessário fazer leituras de calados (Figura 2.11) e a medição da densidade da água. Podemos ver nas Figuras 2.12 e 2.13 exemplos de instrumentos usados para o efeito.

2.2. Prova de estabilidade

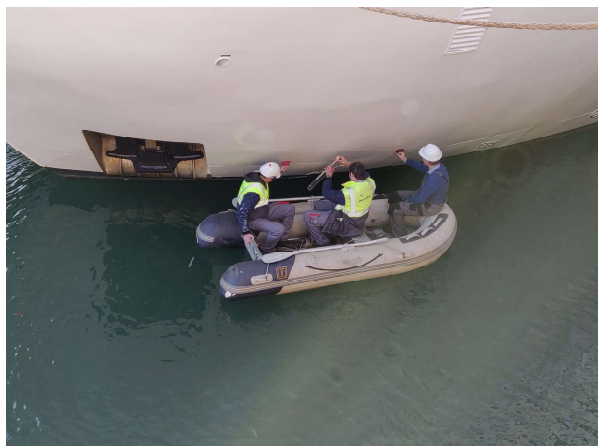


FIGURA 2.11: Medição de calados



FIGURA 2.12: Densímetro



FIGURA 2.13: Instrumento de auxílio para medições de calados

Durante as inclinações os pêndulos formam um triângulo (ver Figura 2.14), em que Y é o comprimento do pêndulo (cateto adjacente, em m) e Z é a deflexão do pêndulo (cateto oposto, em m), sendo que a deflexão (é normalmente medida com uma régua, fixada na parte superior da tina onde é colocado o líquido viscoso (Figura 2.7).

As tangentes dos ângulos de inclinação devem ser traçadas em função dos momentos dos pesos inclinantes. (Lewis, 1988) Para cada movimento de um peso é calculada a tangente do ângulo de inclinação conforme a Fórmula 2.8 .

$$\tan \phi = \frac{Z}{Y} \quad (2.8)$$

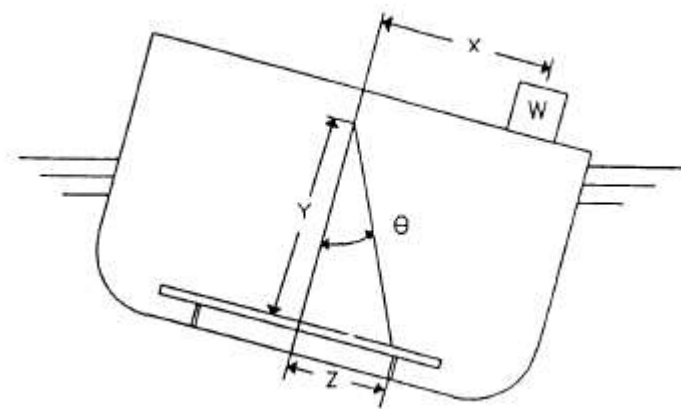


FIGURA 2.14: Medição do ângulo de inclinação. Fonte: (American Society For Testing And Materials, 1992)

Os desvios a uma linha reta no resultado traçado indica que as condições não estão favoráveis ou que foi cometido um erro. Caso isso aconteça deve-se determinar a causa. Os ensaios devem ser repetidos até obter bons resultados. As tangentes traçadas irão apenas indicar alguns tipos de erros. Por exemplo, um erro na medição do comprimento do pêndulo, pois a sua tangente iria ser consideravelmente maior ou menor em relação a outros pêndulos, ou se o movimento de um peso foi medido incorretamente, isso iria fazer com que o ponto correspondente não ficasse em linha com os outros, mas este tipo de erro também poderia ser causado por uma força exterior que atuou apenas naquela inclinação. Por outro lado, se apenas tivermos um peso, e esse for pesado incorretamente, e isso não iria ser notado no gráfico traçado. (Lewis, 1988) Podemos ver no Anexo II alguns exemplos de erros típicos que irão ter influência nos gráficos da prova de estabilidade.

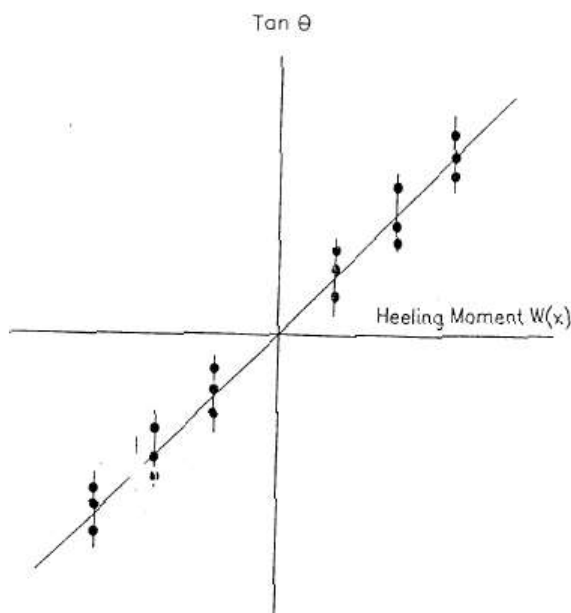


FIGURA 2.15: Gráfico típico de uma prova de estabilidade com três pêndulos. Fonte: (American Society For Testing And Materials, 1992)

Após obtido o gráfico representado na Figura 2.15, a prova de estabilidade fica concluída, restando apenas alguns ajustes a serem feitos tendo em conta os pesos que estão a mais, os que estão a menos e os que ainda não estão na sua posição final.

O declive da reta da Figura 2.15 dá-nos $\frac{\tan \phi}{w \times d}$ que multiplicando o inverso desse valor por $\frac{1}{W}$ nos dá \overline{GM} , tal como se pode deduzir da Equação 2.4. Tendo \overline{GM} facilmente chegamos ao resultado pretendido através da Equação 2.5.

Capítulo 3

Recolha de dados através de sensores

Os principais dados que se retiram de uma prova de estabilidade são os ângulos de inclinação, por isso, um dos objetivos seria fazer a sua recolha através de sensores. Com esta aquisição de dados seria possível uma maior automatização no processo de determinação do centro de gravidade e, por conseguinte, um modelo mais didático e apelativo.

Neste capítulo fala-se dos vários sensores que foram testados por forma a cumprir o objetivo descrito no parágrafo anterior, nomeadamente, o sensor espacial *PhidgetsSpatial 3/3/3 Basic 1042_0B* da marca Phidgets e o *Sharp Distance Sensor (4-30cm) GP2Y041SK0F* da marca Sharp. Podemos encontrar as suas especificações técnicas em Anexo I. A placa da Phidgets contém um acelerómetro, um giroscópio e um magnetómetro, todos com capacidade de fazer medições em 3 eixos. O sensor da Sharp é um sensor de distância que consegue medir distâncias entre 4 e 30cm.

Tanto a placa como o sensor de distância são vendidos pela Phidgets o que traz várias vantagens, como por exemplo:

- A Phidgets fornece um painel de controlo que se pode instalar num computador por forma a visualizar várias características dos sensores, como por exemplo, o tipo de dados que eles fornecem.
- São fornecidos pelas Phidgets vários exemplos de programação básica dos seus sensores em várias linguagens, incluindo o LabView, que será a *software* usado neste fase e o que facilita bastante o trabalho inicial do utilizador.
- Por último a Phidgets também fornece todos os cabos ou adaptadores necessários para ligar os sensores ao computador, tal como irá ser mostrado mais à frente com o sensor de distância.

3.1 Sensor espacial da Phidhets

Esta placa da Phidgets contém 3 sensores e conecta-se diretamente ao computador através de um cabo com ligação Universal Series Bus (USB) . Neste subcapítulo ir-se-á verificar a possível utilização desta placa, nomeadamente do giroscópio e do acelerómetro na obtenção dos ângulos de inclinação do modelo.



FIGURA 3.1: Placa e cabo USB da Phidgets. Fonte:(Phidgets Inc., 2018)

Conectando a placa ao computador podemos logo observar no painel de controlo da Phidgets algumas características, como por exemplo, o modelo do sensor, o número de série, que nos permitiria diferenciar dispositivos semelhantes, e a versão de *firmware* que o sensor possui, tal como podemos observar na Figura 3.2 .

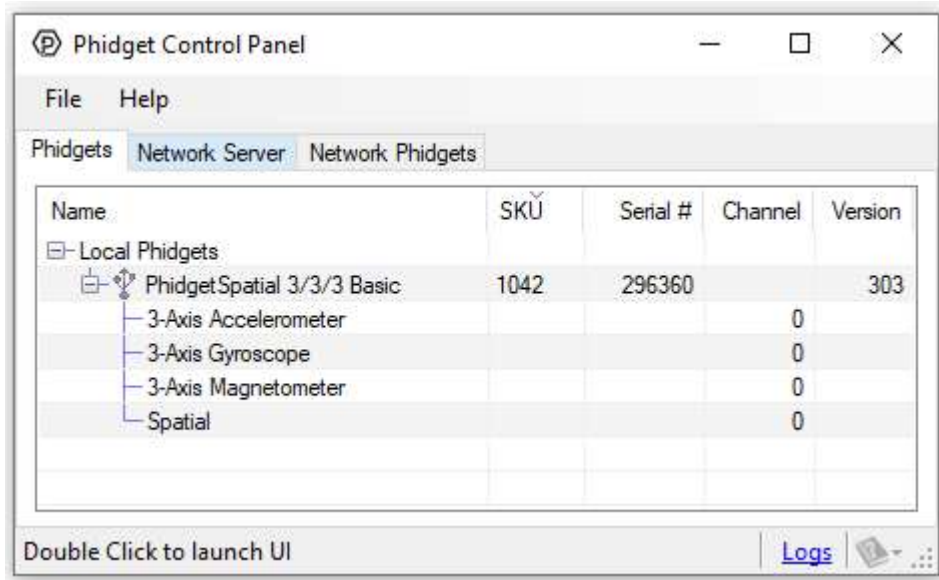


FIGURA 3.2: Painel de controlo da placa

3.1.1 Giroscópio

Inicialmente abriu-se o giroscópio no painel de controlo.

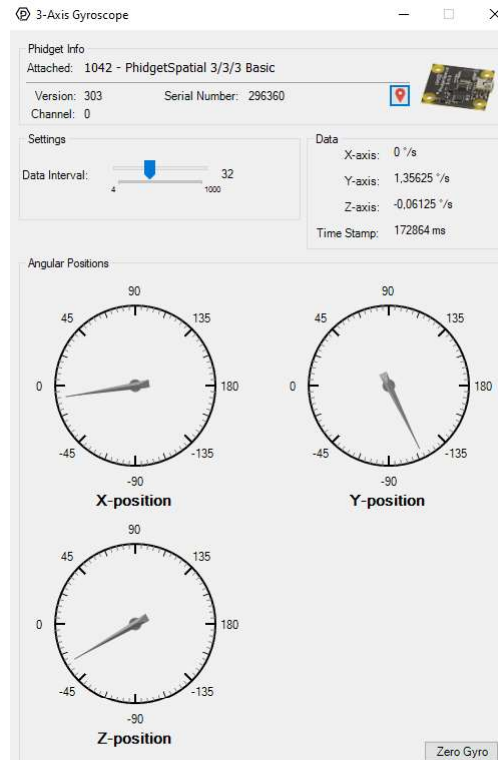


FIGURA 3.3: Giroscópio através do painel da Phidgets

Através da Figura 3.3 podemos observar a velocidade angular nos 3 eixos e a posição angular do giroscópio relativamente à sua posição inicial com a possibilidade de podermos mudar o número de medições por intervalo de tempo e de colocar a zero a posição angular através de um botão.

Tendo em conta que, numa prova de estabilidade os ângulos de inclinação de um navio são pequenos, torna-se difícil perceber através do painel de controlo do sensor se o sensor é suficientemente preciso para o fim destinado, sendo assim, decidiu-se criar um programa em *Labview* por forma a tentar perceber melhor a sua precisão.

Podemos observar na Figura 3.4 o painel frontal de um dos exemplos em *Labview* fornecidos pela Phidgets em que já nos é dado a velocidade angular do giroscópio.

Partindo deste exemplo foi criado um programa que realiza a integração da velocidade angular por forma a obtermos a posição angular da placa. Podemos encontrar este programa em Apêndice A.

Com este programa pode-se verificar que o sensor mesmo parado contém um erro que vai aumentando ao longo do tempo, a esse erro chamamos de deriva. Para combater este erro fez-se uma leitura dos sensores parados durante várias horas. Com os valores obtidos pode-se determinar o valor da deriva dividindo a posição angular pelo tempo decorrido e, assim, retirar esse valor na posição final do giroscópio.

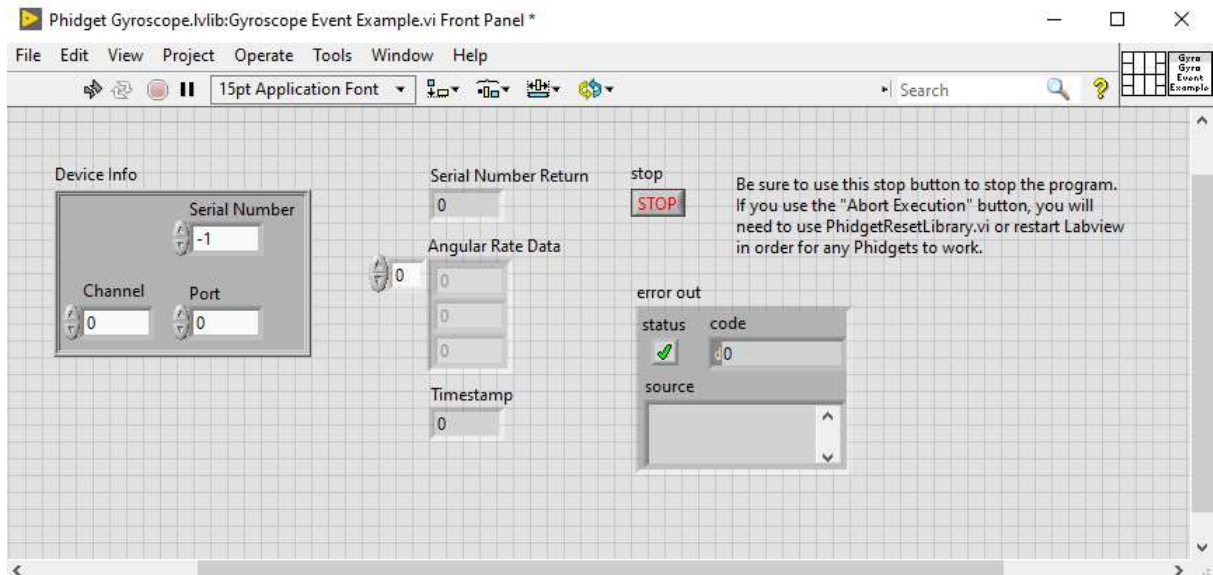


FIGURA 3.4: Painel Frontal do exemplo da Phidgets do giroscópio

TABELA 3.1: Valores obtidos da deriva

Eixo	Posição angular (graus)	Tempo (milisegundos)	Deriva (graus/milisegundo)
X	-1218,85	35705800	$-3,41359 \times 10^{-5}$
Y	33362,8	35705800	0,000934
Z	8322,16	35705800	-0,00023

3.1. Sensor espacial da Phidhets

Voltando a correr o programa com esta alteração acima referida nota-se uma grande diferença na deriva, tendo esta diminuído significativamente.

Chegando a esta fase resta testar o sensor para a medição de pequenos ângulos, para isso foi então impressa, através de uma impressora 3D, uma peça capaz de suportar o sensor e de se inclinar a vários ângulos, nomeadamente 2, 4 e 15 graus, tal como podemos ver na Figura 3.5.

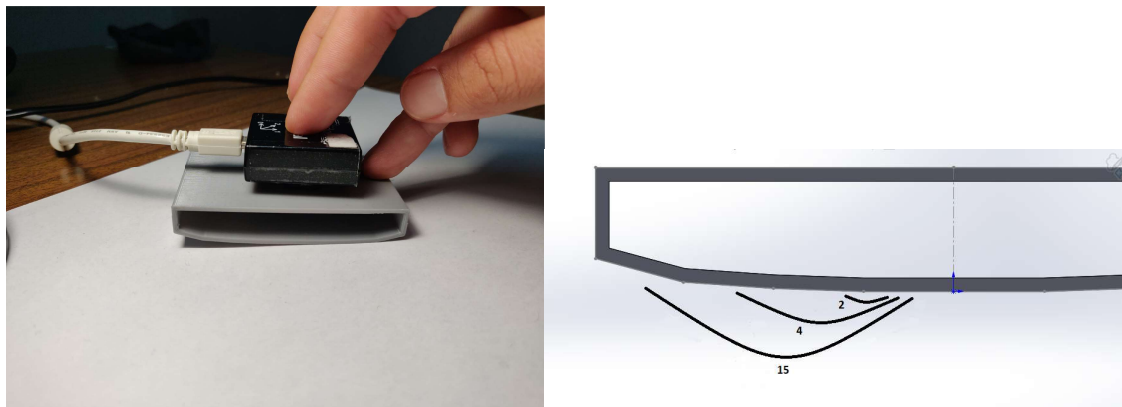


FIGURA 3.5: Teste ângulos do sensor

Após vários testes, os resultados não foram muito satisfatórios tal como podemos observar na Figura 3.6 .

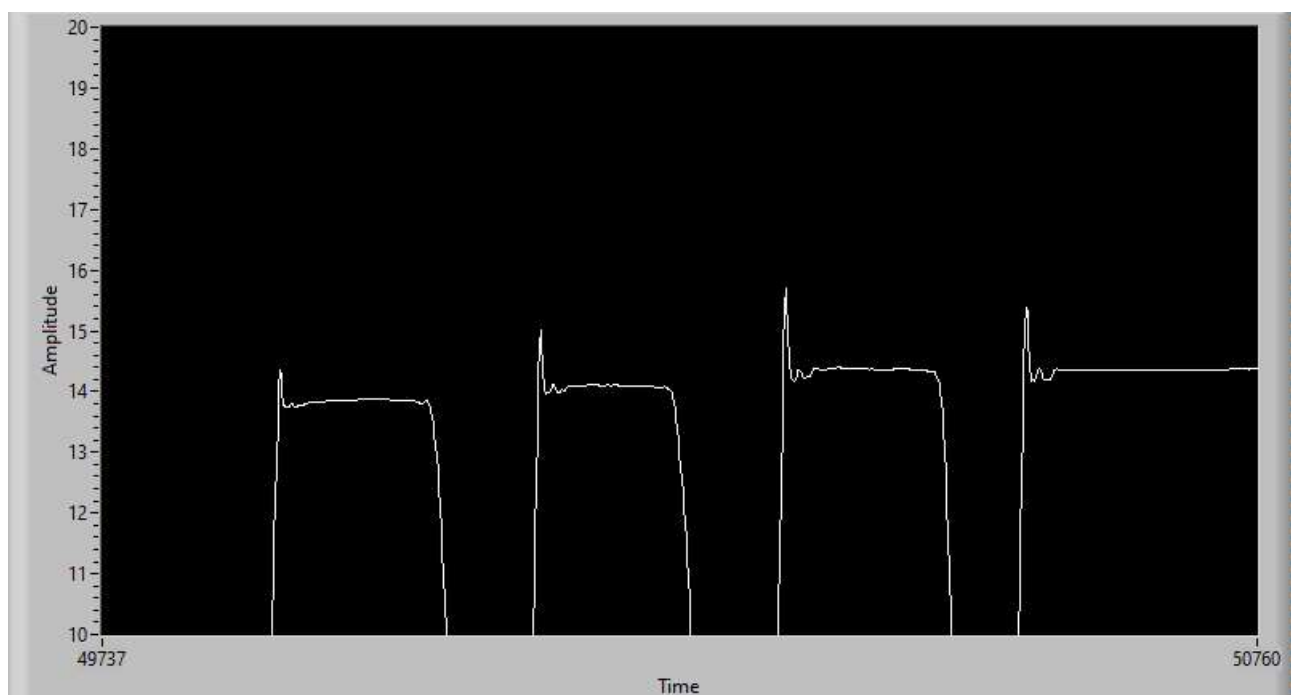


FIGURA 3.6: Gráfico de testes do sensor a 15°

Para obter uma melhor perceção da influência que um erro no ângulo tem na determinação do centro de gravidade fez-se os seguintes cálculos para um erro de 0.5°:

$$GM_e = \frac{p \times d}{\Delta \times \tan(x + 0,5)} \quad (3.1)$$

$$Erro = 1 - \frac{GM}{GM_e} = 1 - \frac{\tan(x)}{\tan(x + 0,5)} \quad (3.2)$$

Considerando que um navio numa prova de estabilidade inclina entre 1 e 4 graus, na melhor das hipóteses teremos $x = 4$ e com isso obteríamos um erro relativo de cerca de 11% o que é um erro bastante significativo.

3.1.2 Acelerómetro

O acelerómetro inserido na placa da Phidgets é capaz de medir acelerações nos 3 eixos.

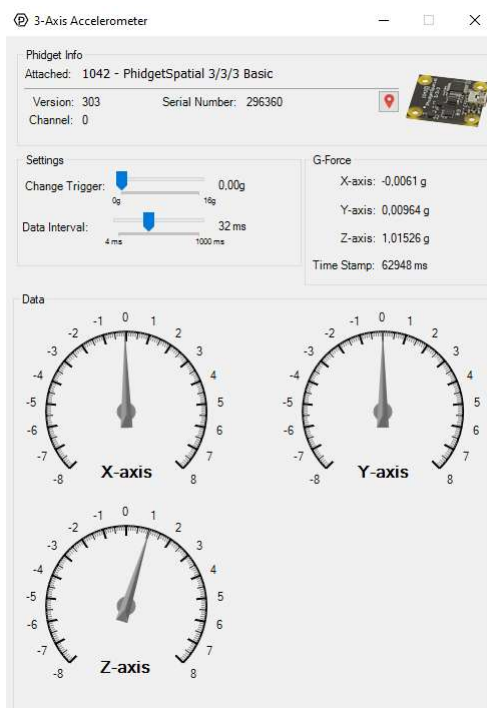


FIGURA 3.7: Acelerómetro através do painel da Phidgets

Podemos ver através da Figura 3.7 as acelerações nos 3 eixos do acelerómetro em repouso em cima de uma mesa. A aceleração é medida em força g que corresponde a aproximadamente 9.81 m/s^2 . A aceleração no eixo X e Y é aproximadamente 0 e no eixo Z é 1 devido à aceleração gravítica da Terra.

Este acelerómetro da Phidgets mede tanto a aceleração dinâmica (variação de velocidade) como a aceleração estática (vetor da gravidade). Phidgets Inc. (2016a)

Na ausência de vibração temos apenas uma componente de aceleração constante (aceleração gravítica) que nos permite obter o ângulo de inclinação através do acelerómetro. (Pedley, 2013)

Através da equação 3.3 podemos retirar o valor de x que corresponde ao valor de inclinação do acelerómetro.

$$\cos(x) = \frac{g_z}{\sqrt{g_x^2 + g_y^2 + g_z^2}} \quad (3.3)$$

Onde g representa o valor da aceleração no respetivo eixo (em unidades de força g).

Utilizando a equação 3.3 criou-se um programa para calcular o ângulo de inclinação do acelerómetro. Podemos encontrar este programa em Apêndice A. Esse programa foi criado, tal como no caso do giroscópio, a partir do exemplo da Phidhets que neste caso já nos dava os valores de aceleração dos 3 eixos.

Os testes foram efetuados de maneira semelhante à do giroscópio, sendo que, apesar do acelerómetro fornecer dados muito mais estáveis devido a não ter deriva a precisão foi igualmente pouco satisfatória. Podemos ver através da Figura 3.8 que temos erros superiores a $0,5^\circ$ (aproximadamente 1°) e portanto, tal como vimos no caso do giroscópio, estamos perante erros bastante significativos.

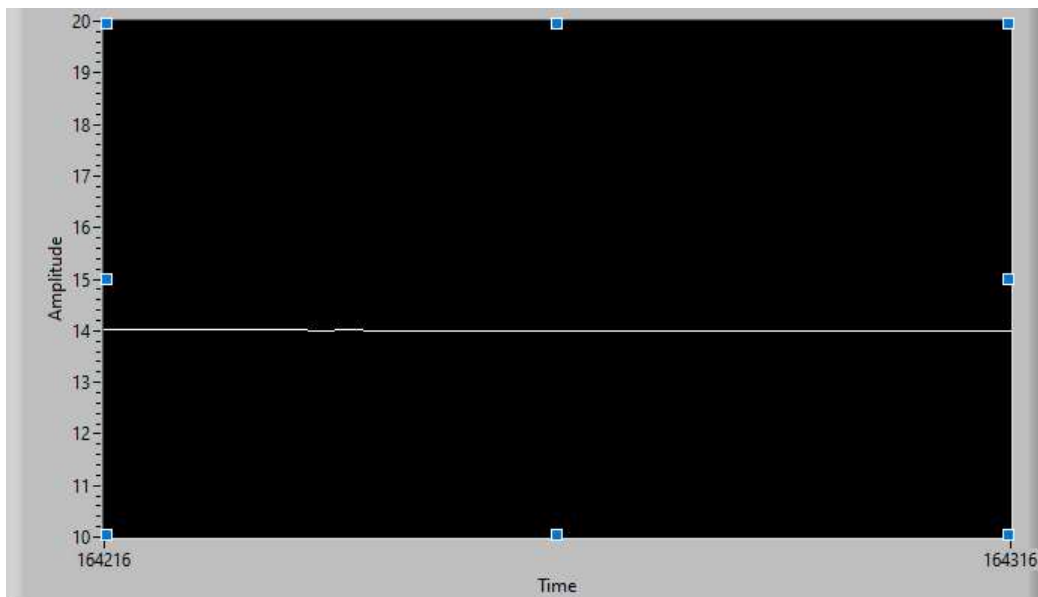


FIGURA 3.8: Gráfico de testes ao acelerómetro a 15°

3.1.3 Filtro complementar

As limitações de um *Micro-Electrical-Mechanical system* (MEMS) podem ser ultrapassadas através da fusão de sensores. O acelerómetro pode ser usado para reduzir a deriva do giroscópio e por outro lado os desvios e picos repentinos do acelerómetro podem ser reduzidos pelo giroscópio, no entanto são precisos filtros apropriados para a fusão dos sensores.. O filtro complementar é amplamente usado e é uma técnica menos complexa de fusão de sensores onde a complementaridade é

o resultado desejado.(Islam et al., 2017) Podemos ver na Figura 3.9 os resultados de uma aplicação do filtro complementar.

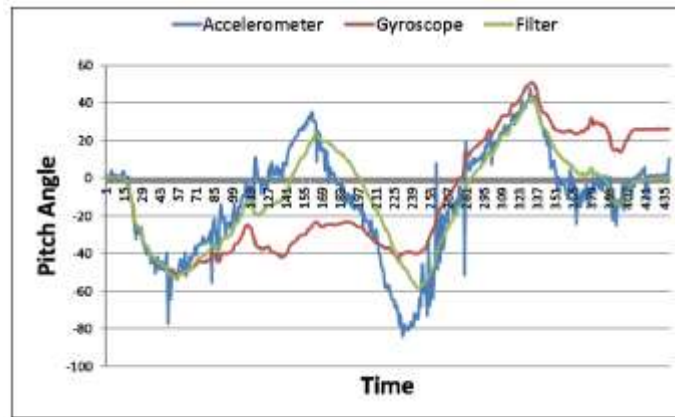


FIGURA 3.9: Exemplo da aplicação do filtro complementar.
Fonte:(Islam et al., 2017)

Com isto foi então criado um programa, que pode ser encontrado em Apêndice A, para fazer a reunião dos dois sensores com o filtro complementar e conseguir-se obter valores significativamente mais estáveis mas não significativamente mais precisos, continuando a haver erros significativos também acima dos 0.5° .

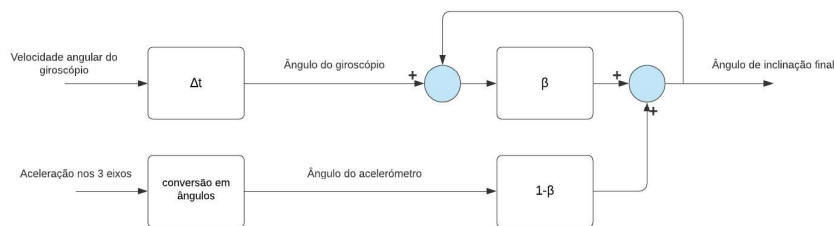


FIGURA 3.10: Fluxograma do filtro complementar implementado

Na Figura 3.10 podemos ver o princípio de funcionamento do filtro complementar onde Δt é o intervalo de tempo entre medições do giroscópio e β é o fator de confiança do giroscópio que varia entre 0 e 1. Este filtro basicamente conjuga as informações dos dois sensores de acordo com a confiança que queremos dar a cada um, podendo por vezes, conjugar o que cada um tem de melhor.

Podemos ver na Figura 3.11 o gráfico do teste efetuado com o sensor a 15° .

3.2 Sensor de distância da Sharp

O sensor de distância da Sharp permite-nos medir distâncias entre 4 e 30cm, e por isso, pode ser útil na medição da deslocação do pêndulo e com isso determinado o ângulo de inclinação do modelo.

3.2. Sensor de distância da Sharp

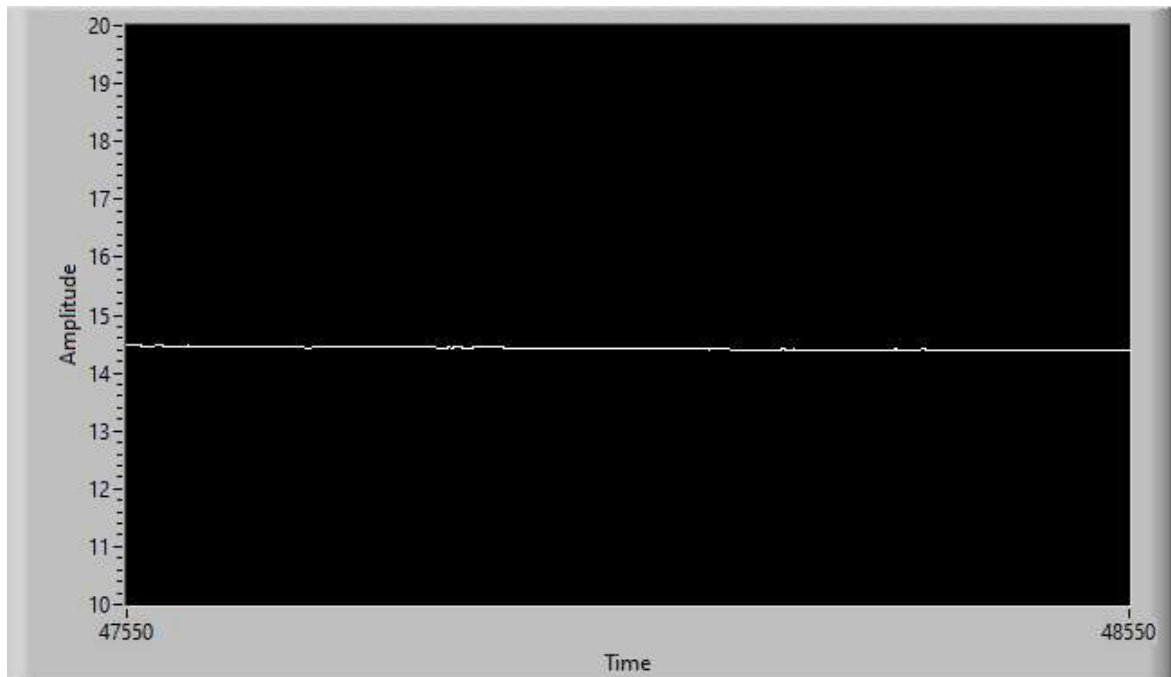


FIGURA 3.11: Teste da placa com 15°



FIGURA 3.12: Sensor de distância. Fonte:(Phidgets Inc., 2016b)

Este sensor é conectado a um adaptador que é ligado a um Vint Hub, ambos fornecidos pela Phidgets, que faz a conexão com o computador, tal como se pode observar na Figura 3.13.

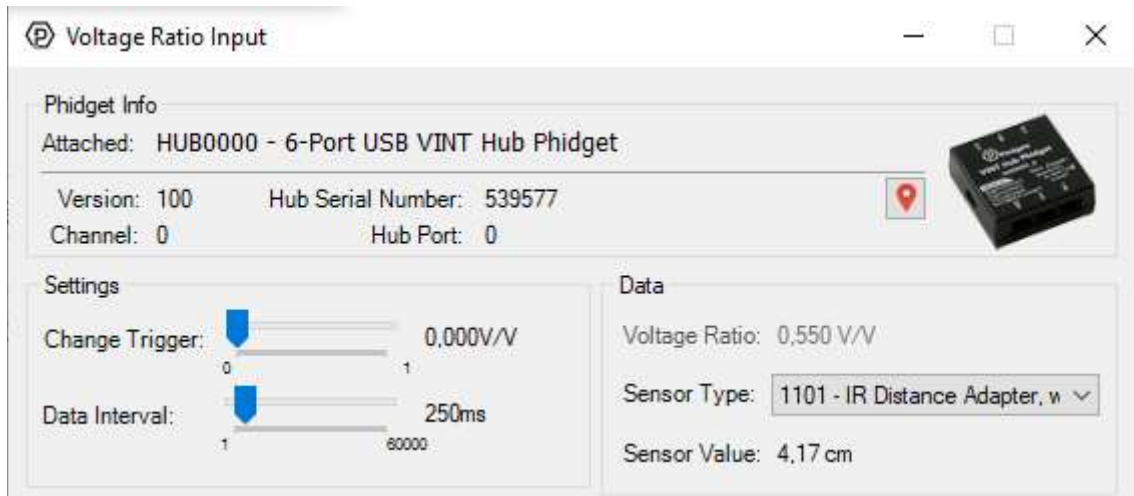


FIGURA 3.13: Sensor de distância através do painel da Phidgets

Através da Figura 3.13 podemos ver que através da voltagem recebida do sensor é calculada a distância ao objeto.

A Phidgets fornece a Equação 3.4 que converte a informação dada pelo sensor para distância.

$$D = 2,076 / (dV - 0,011) \quad (3.4)$$

Onde D é a distância em centímetros e dV a relação de voltagem.

Através do painel da Phidgets foi realizado um teste para perceber a precisão do sensor com o auxílio a uma régua e um objeto tal como mostra a Figura 3.14.

Facilmente foi perceptível uma discrepância entre os valores dados pelo computador e os valores da régua. Resolveu-se então fazer um registo de várias leituras da voltagem dada pelo sensor ao longo da régua. Podemos ver na Tabela 3.2 alguns desses valores.

Com estes valores foi então criado um programa em *LabView*, que pode ser encontrado em Apêndice A, para realizar a leitura dos dados pelo sensor e os transformar em distância. Essa distância foi determinada através da interpolação dos valores anteriormente registados. Com esta interpolação foi possível verificar, após efetuados novos testes, uma maior precisão do sensor, enquanto antes tínhamos erros normalmente superiores a $2mm$ agora foi possível reduzir esse erro para cerca de metade. Durante estes testes foi também verificado que à medida que aumentamos a distância de um objeto ao sensor a sua precisão diminui, o que era de prever tendo em conta que na Tabela 3.2 o intervalo de valores da coluna *Voltage Ratio* vai diminuindo com o aumento da distância. Também podemos ver a precisão do sensor ao longo da distância na Figura 3.15 fornecida pela Phidgets.

3.2. Sensor de distância da Sharp

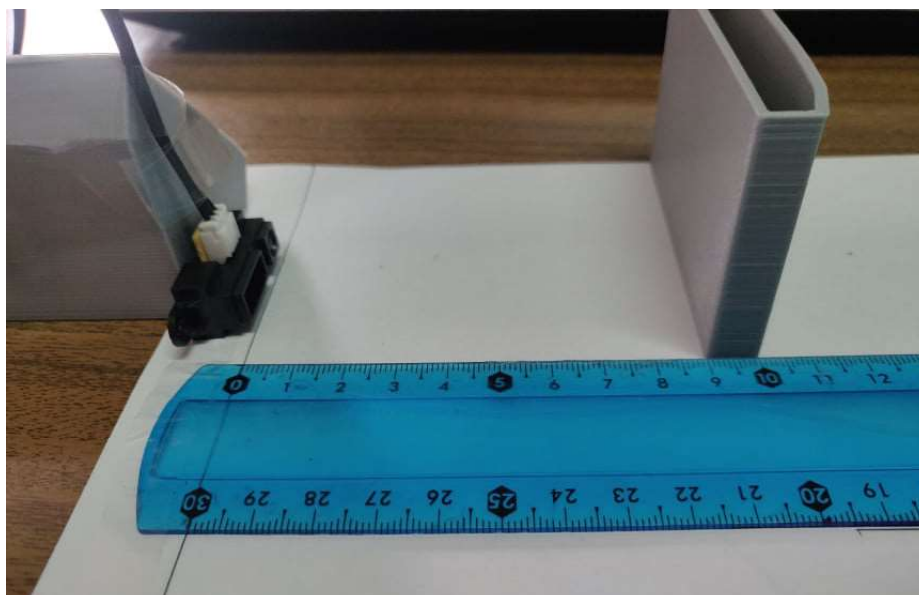


FIGURA 3.14: Teste sensor de distância

TABELA 3.2: Registo de valores ao longo da régua

Distância(cm)	<i>Voltage Ratio (V/V)</i>
4	0,515
4,5	0,459
5	0,430
5,5	0,401
6	0,365
...	...
28	0,081
29	0,077
30	0,075

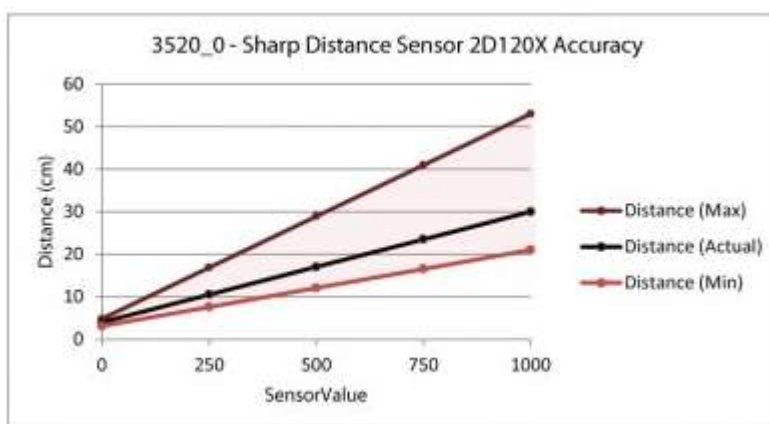


FIGURA 3.15: Gráfico precisão do sensor de distância. Fonte:(Phidgets Inc., 2016b)

Com os testes também foi possível verificar que o erro do sensor dos 4 aos 8cm eram menores que 1mm, o que poderá significar que este sensor poderá ser usado, sendo que, tanto o uso do sensor como o erro dependerá do comprimento do pêndulo.

Supondo que se usaria um pêndulo de 18cm e que, em cada movimentação de pesos, o pêndulo desloca-se um mínimo de 0.5cm, o que corresponde a aproximadamente 1.6° podemos calcular o erro máximo que poderá ser cometido tendo em conta um erro máximo de 1mm na leitura da deslocação do pêndulo.

$$\arctan\left(\frac{0.5}{18}\right) - \arctan\left(\frac{0.5 - 0.1}{18}\right) \approx 0.3 \quad (3.5)$$

Na Fórmula 3.5 é calculado aproximadamente o erro máximo resultante no ângulo de inclinação de um erro de medição da distância do pêndulo de 1mm. O resultado foi de 0.3° o que é menor que o erro mínimo dos outros sensores testados. Aplicando a Fórmula 3.2 obtém-se um erro de cerca de 7%.

Se por um lado aumentarmos o tamanho do pêndulo, diminuimos o efeito que um erro de 1mm pode ter no cálculo do ângulo de inclinação, por outro lado irá ocorrer um maior deslocamento do pêndulo, e como já foi visto anteriormente, quanto maior for a distância que o objeto tiver do sensor menos preciso ele irá ser.

Capítulo 4

Projeto e construção do modelo

Devido às diversas vantagens da tecnologia de impressão de objetos a três dimensões (3D), foi pensado, logo desde início, realizar a construção do modelo através desta tecnologia. A utilização da impressão 3D permite a independência de serviços especializados como carpintaria ou chaparia, utiliza um material barato e, para além disso, permite fazer um trabalho completamente personalizável e adaptado a cada situação específica num curto espaço de tempo. O material utilizado foi o plástico de poliácido láctico (PLA), pois é o material mais barato, menos flexível e um dos materiais mais usados devido também à facilidade de impressão.

Relativamente ao desenho do modelo, criado a partir do *software* SolidWorks, resolveu-se criar um modelo baseado no corpo médio de um navio mercante, evitando as variações de forma da proa e da popa, com um perfil simples, tal como podemos ver na Figura 4.1, de forma a possibilitar, também, a realização de cálculos do gráfico de carenas direitas por parte dos alunos.

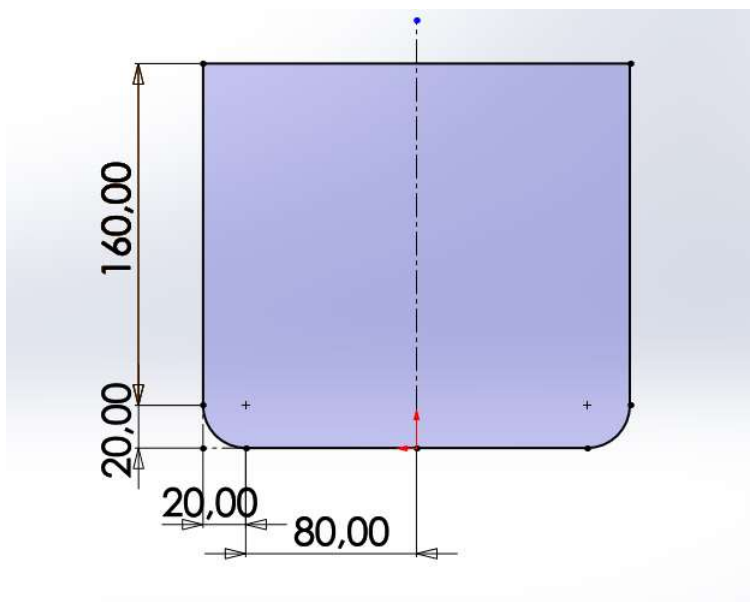


FIGURA 4.1: Perfil do modelo (dimensões em milímetros)

Para o desenho do modelo tiveram também que ser consideradas as capacidades das impressoras 3D disponíveis, nomeadamente uma Dremel 3D45 com uma área de impressão de $255mm \times 155mm \times 170mm$ e uma Artillery Sidewinder X1 com uma área de impressão de $300mm \times 300mm \times 400mm$ tendo mais tarde sido substituída, devido a uma avaria, por uma Anycubic Chiron com uma área de impressão de $400mm \times 400mm \times 450mm$. Decidiu-se então projetar o modelo para ser impresso em três partes, tendo ficado com um comprimento de cerca de $1000mm$, uma boca de $200mm$, um pontal de $180mm$ e um casco com uma espessura de cerca de $3mm$.

Logo no momento do desenho teve que ser pensada como se iria fazer a ligação entre as três partes constituintes do casco. Resolveu-se, assim, criar uma superfície de colagem entre as três partes por forma a não obter apenas os três milímetros da espessura do casco entre elas, para além disso, foram desenhadas furações com o objetivo de colocar parafusos para garantir uma boa ligação e alinhamento entre partes, tal como podemos ver na Figura 4.2.

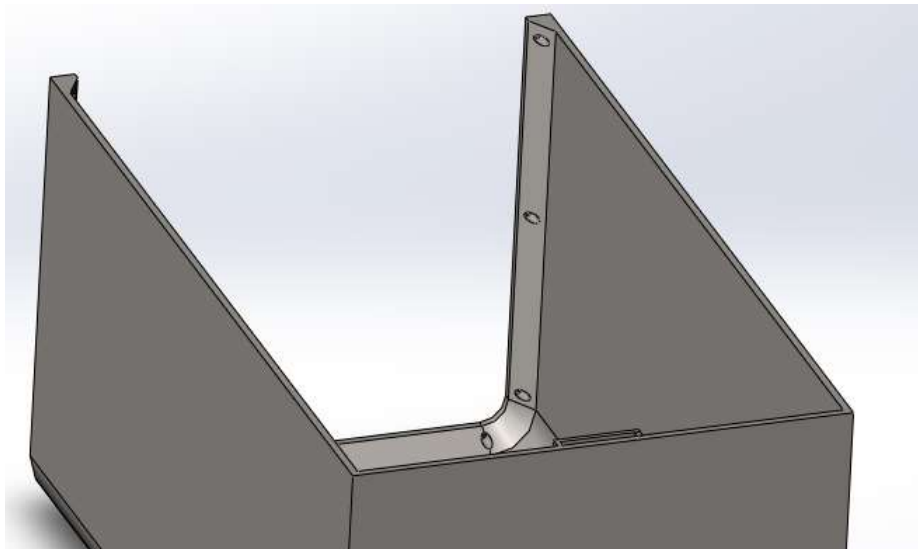


FIGURA 4.2: Área de colagem e furos de ligação

Para além do casco, fez-se o projeto de outras estruturas necessárias para completar o modelo, nomeadamente, os pêndulos, tanques para efetuar experiências com espelhos líquidos e uma estrutura roscada para poder subir e descer pesos no modelo, e conseqüentemente subir e descer o centro de gravidade. Resolveu-se ao todo colocar três pêndulos (na popa, na proa e a meio), por forma a identificar algum pêndulo com más leituras, e três tanques distribuídos de forma idêntica aos pêndulos.

Em paralelo, com o projeto do modelo, foi também pensado em possíveis exercícios a realizar, que podemos ver em Apêndice C, pois o projeto pode depender do tipo de exercícios que são pensados e vice-versa.

Para a colocação dos pêndulos na popa e na proa foi pensado um encaixe por forma a colocar uma barra vertical para os poder suportar, juntamente com um pequeno pino e uma tina para os mergulhar, tal como podemos ver na Figura 4.3.

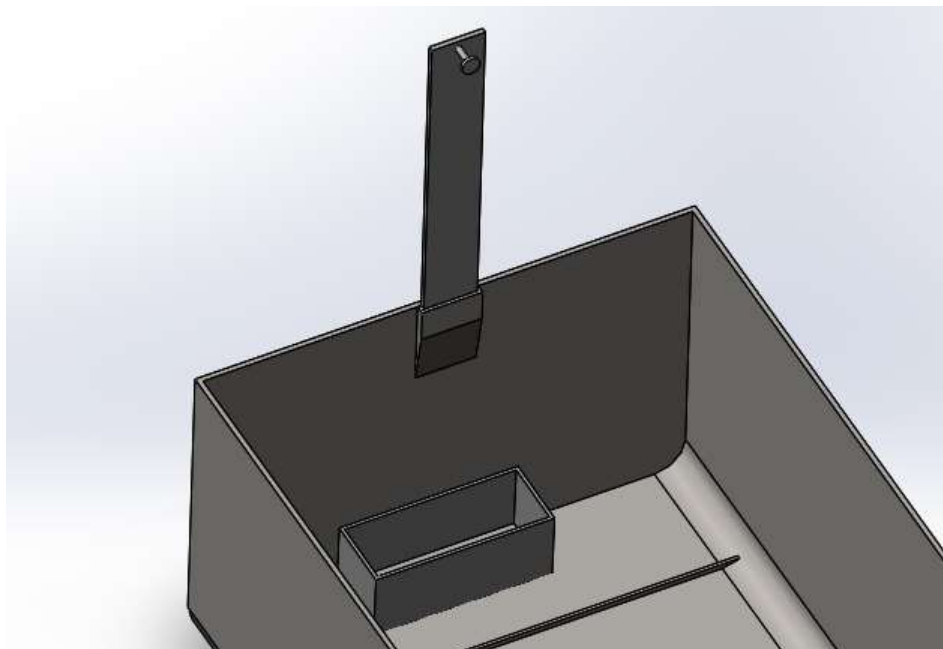


FIGURA 4.3: Suporte e barra do pêndulo

Para o pêndulo a meio navio foi colocado um encaixe na própria tina tal como podemos ver na Figura 4.4 .

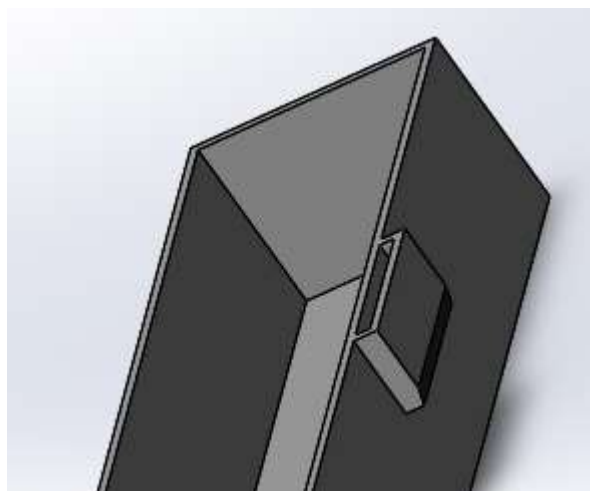


FIGURA 4.4: Suporte do pêndulo do meio

Por forma a fazer a colocação do sensor numa posição em que fosse possível a leitura da distância percorrida pelo pêndulo foi desenhada uma pequena peça onde é possível fixar o sensor, tal como podemos ver na Figura 4.5.

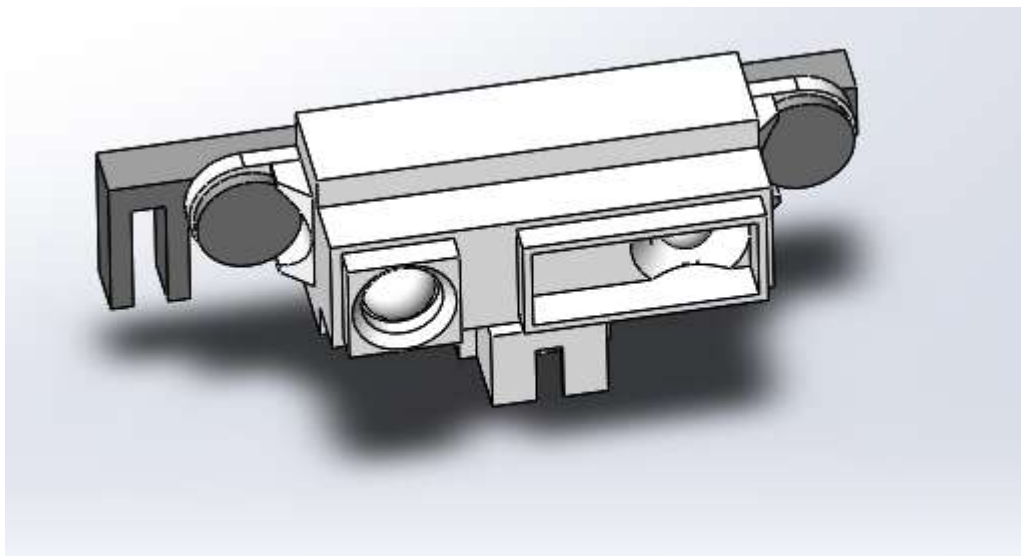


FIGURA 4.5: Suporte sensor de distância

Para a colocação dos tanques foi também desenhada uma pequena saliência no interior do casco de maneira a os imobilizar (Figura 4.6).



FIGURA 4.6: Tanque e saliência para encaixe

No mesmo local, onde é colocado o tanque a meio navio também pode ser colocado um sistema de rosca onde é possível colocar um peso para subir e descer o centro de gravidade do modelo, tal como podemos ver na Figura 4.7.

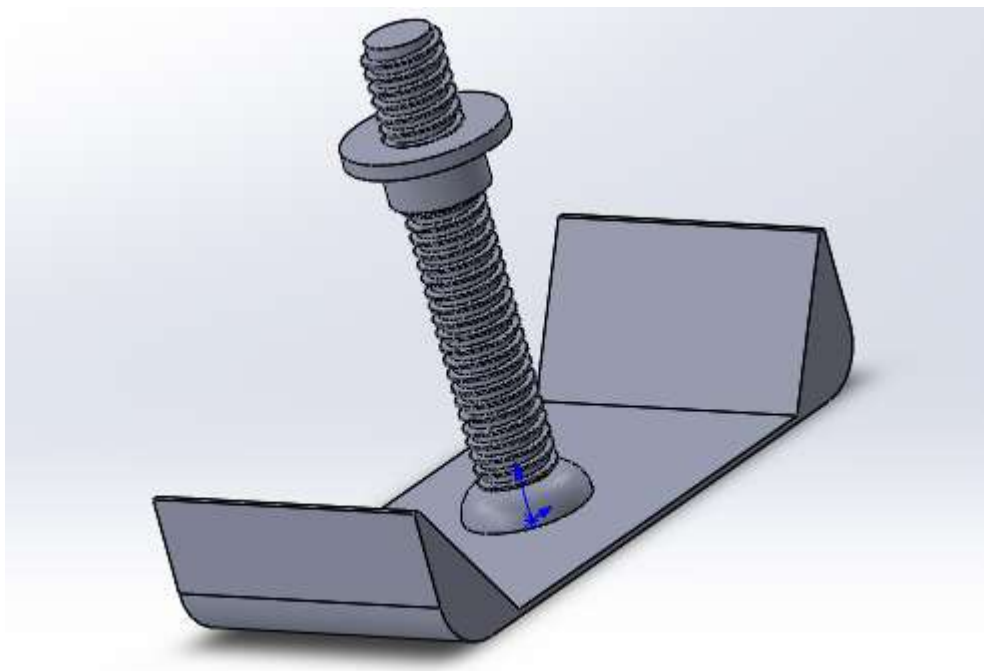


FIGURA 4.7: Sistema de rosca para subir e descer o centro de gravidade

Como forma de auxílio para posicionar e deslocar os pesos inclinantes foi desenhada e impressa uma estrutura com duas régua para o efeito, tal como podemos ver na Figura

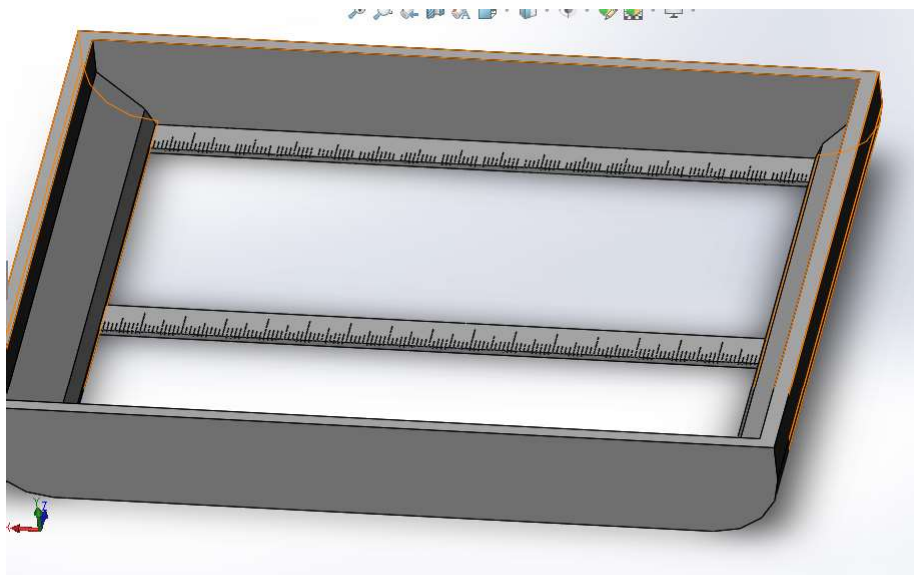


FIGURA 4.8: Estrutura para posicionamento de pesos

Após terem sido realizados os desenhos, procedeu-se à impressão das várias partes constituintes. Notou-se, após a impressão das primeiras peças, que, em todas

as zonas que envolvia encaixes se deveria deixar um pouco de folga por forma a encaixarem, sendo que, foi deixada uma folga de cerca de $0.4mm$ em todas estas peças.

Na impossibilidade do sensor da Phidgets conseguir obter leituras da distância de um simples fio (do pêndulo) resolveu-se este problema desenhando e imprimindo um pêndulo rígido onde foi possível montar um refletor para assim ser possível a leitura da distância pelo pêndulo, tal como podemos ver na Figura 4.9.



FIGURA 4.9: Pêndulo rígido com refletor

Ao efetuar-se um pequeno teste com o pêndulo rígido, notou-se que, para além do movimento oscilatório entre os bordos que deveria ter, também oscilava no sentido proa/popa. Para resolver este problema redesenhou-se o pequeno pino que suporta o pêndulo com uma pequena ranhura onde ele encaixa, tendo-se verificado que o movimento oscilatório melhorou bastante. Podemos ver na Figura 4.10 a diferença entre a primeira versão e a última.

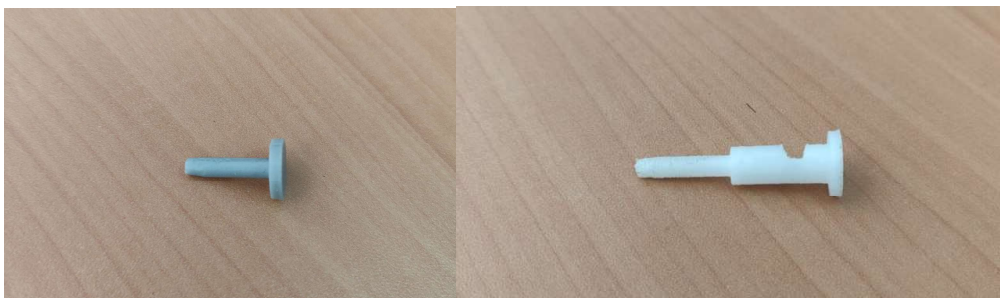


FIGURA 4.10: Evolução dos pinos de suporte do pêndulo rígido

Para a junção das três partes constituintes do casco foram utilizados parafusos $M1.6 \times 14mm$ com as respetivas porcas e cola Standard da Araldite. Esta cola é adequada para muitos tipos de materiais, incluindo plástico, e tem um tempo de trabalho de cerca de 90 minutos, o que foi bastante útil para poder colocar os

parafusos e deixar as três partes bem alinhadas. Para além da colagem da peças, esta cola foi utilizada para preencher alguns espaços entre camadas da impressão 3D, que nem sempre ficam perfeitas, e que podem comprometer a estanquidade do modelo. Finalmente, o casco foi pintado através de *sprays* de tinta e verniz para finalizar.

Podemos ver nas Figuras 4.11 e 4.12 2 configurações possíveis do modelo.

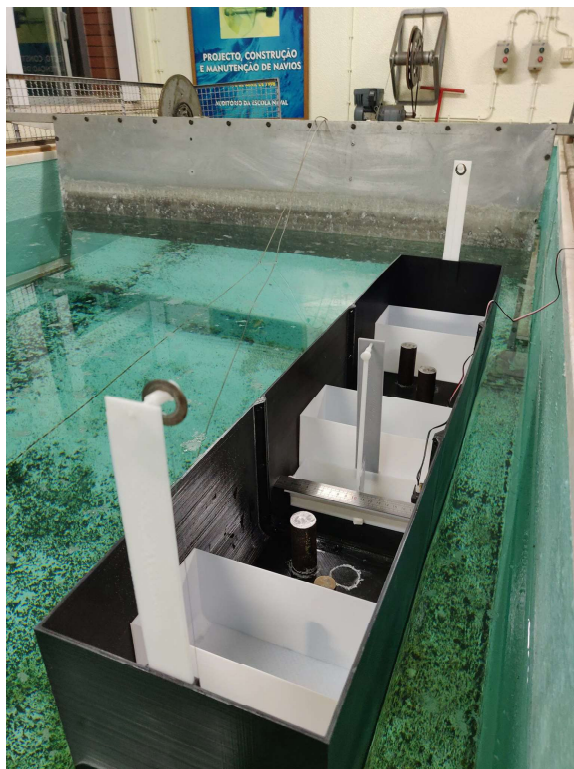


FIGURA 4.11: Modelo com a configuração de 3 tanques

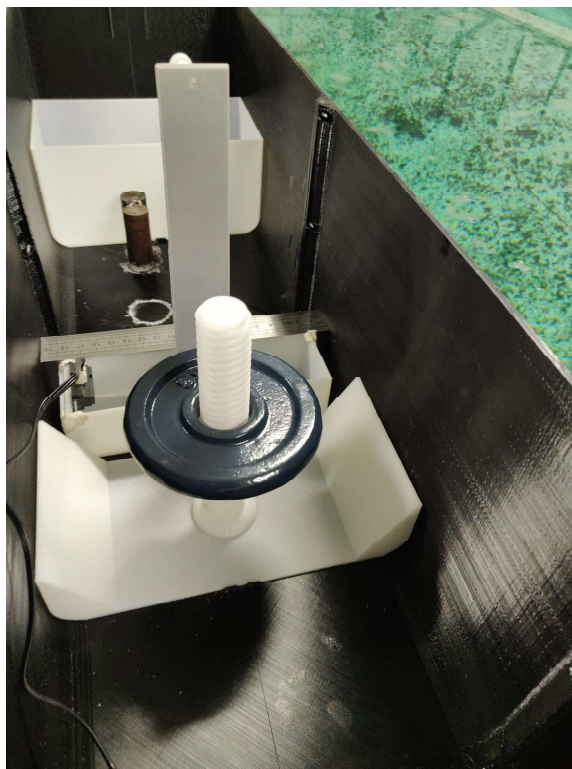


FIGURA 4.12: Modelo com a configuração de 2 tanques e sistema para subir e descer centro de gravidade

Por fim foram ainda impressas e coladas umas marcas de calado para auxiliar na medição (Figura 4.13). A escala destas marcas foi feita em centímetros.



FIGURA 4.13: Marcas de calado

Capítulo 5

Cálculos e programação em LabVIEW

Após a realização dos desenhos realizaram-se alguns cálculos necessários para a prova de estabilidade, nomeadamente o cálculo do deslocamento e da altura do metacentro. Realizou-se também um programa em LabVIEW, que através dos dados fornecidos pelo sensor realiza os cálculos necessários da prova de estabilidade e nos dá o centro de gravidade do modelo.

5.1 Cálculos do deslocamento e da altura metacêntrica

Para fazer os cálculos necessários para a prova de estabilidade utilizou-se uma folha de Excel. Através desta folha realizaram-se os vários cálculos necessários para obter o \overline{KM} e o deslocamento para várias imersões, nomeadamente de 0 a 6cm com intervalos de 0.2cm.

Começou-se por determinar o volume imerso para para cada imersão. Para as zona retangulares apenas foi necessário multiplicar pelas três dimensões, mas para a zona circular resolveu-se dividir em 100 partes e calcular a área com dependência da altura através da regra dos trapézios que multiplicada pelo comprimento nos dá o volume. Podemos ver na Figura 5.1 a divisão entre as zonas circulares e as zonas retangulares que foi realizada para este processo.

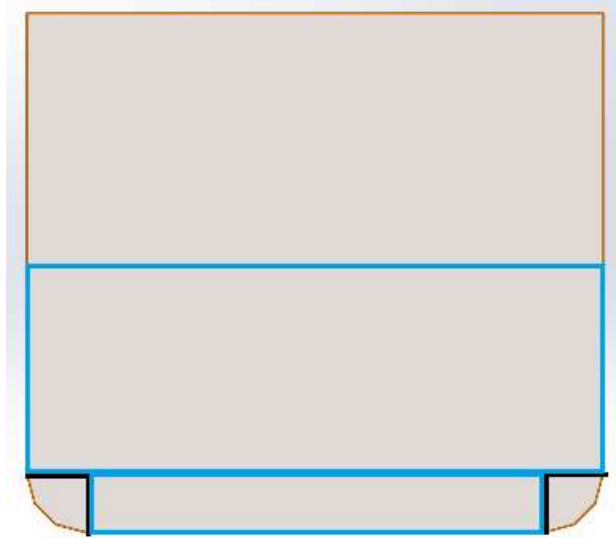


FIGURA 5.1: Divisão do perfil em zonas

Após obtermos o volume imerso facilmente se chega ao deslocamento multiplicando pela densidade da água, que foi considerada como $1000 \frac{Kg}{m^3}$. De seguida, foi necessário calcular o momento de 2^a ordem da área de flutuação em relação ao eixo de inclinação, por forma a obter o raio metacêntrico (\overline{BM}), tal como podemos ver na Equação 5.1.

$$\overline{BM} = \frac{i_r}{\nabla} \quad (5.1)$$

Onde ∇ é o volume de submerso.

Após se determinar os valores de \overline{BM} , apenas fica a faltar os valores da altura do centro de impulsão (\overline{KB}), ou seja, a altura do centroide do volume imerso. O centroide da parte submersa foi encontrado, para cada imersão, através da divisão por áreas compostas, tal como se fez para determinar a área, dividindo-se a parte circular em 100 retângulos. Após descoberto o \overline{KB} , basta somar \overline{BM} e obtemos \overline{KM} .

$$\overline{KB} + \overline{BM} = \overline{KM} \quad (5.2)$$

Podemos ver os valores obtidos no Apêndice B.

5.2 Programa em LabVIEW

Este programa desenvolvido em LabVIEW, tem a capacidade de adquirir os dados do sensor, registar os dados de cada movimentação de pesos, e com esses dados, calcular automaticamente o centro de gravidade. Para isso o utilizador deve introduzir o calado, a altura do pêndulo, as distâncias que os pesos vão ser

movimentados e o valor de cada peso (Figura 5.2). Automaticamente, com o valor do calado, o programa calcula o valor do \overline{KM} e do deslocamento. Estes cálculos são feitos através da interpolação dos valores calculados no subcapítulo 5.1, que são introduzidos através de um ficheiro de texto.

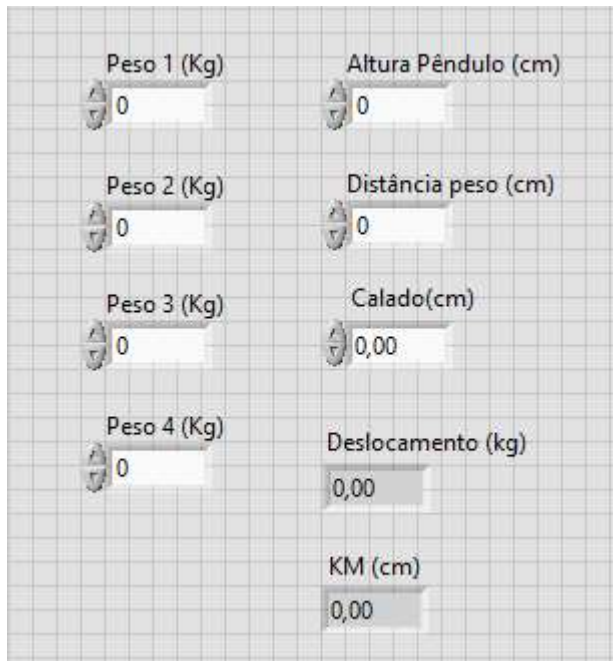


FIGURA 5.2: Valores iniciais no LabVIEW

Após a introdução dos valores iniciais, o utilizador terá botões para fazer os registos de distância do pêndulo, nomeadamente da distância inicial e das distâncias após cada movimentação de pesos (Figura 5.3) .

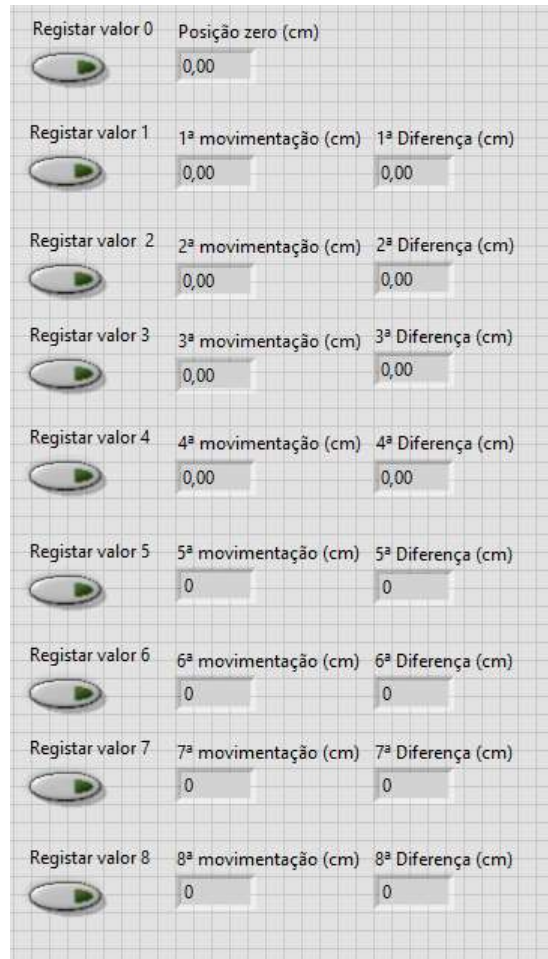


FIGURA 5.3: Registo dos valores da distância

O programa regista estes valores e faz a diferença da distância entre a posição inicial e de cada movimentação. Dividindo esta diferença pela altura do pêndulo obtemos a tangente do ângulo de inclinação do modelo. Através dos dados dos valores dos pesos e da distância que foram deslocados obtemos os vários valores dos momentos inclinantes. Para a construção deste programa foi considerado o esquema de movimentações de pesos presente no Anexo IV.

Com os dados das tangentes e dos momentos inclinantes é feita uma regressão linear de onde se retira o declive da reta final. Multiplicando o inverso do declive com o inverso do deslocamento obtemos o valor da altura metacêntrica que subtraindo ao valor da altura do metacentro se obtem a altura do centro de gravidade.

Para além de fazer os cálculos da prova de estabilidade, o programa apresenta também uma representação do modelo em 3D que automaticamente roda de acordo com o seu ângulo de inclinação em tempo real (Figura 5.4) e ainda o gráfico com os valores das tangentes e dos momentos inclinantes e a respetiva reta interpolada (Figura 5.5).

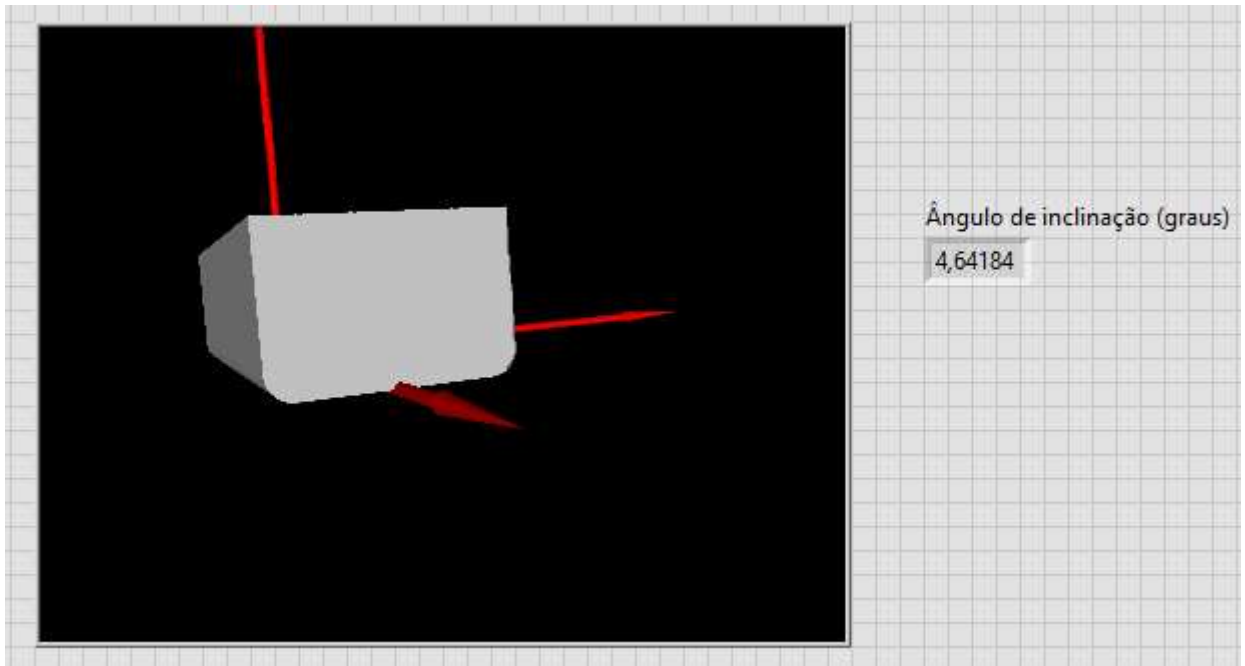


FIGURA 5.4: Imagem em 3D do modelo no LabVIEW

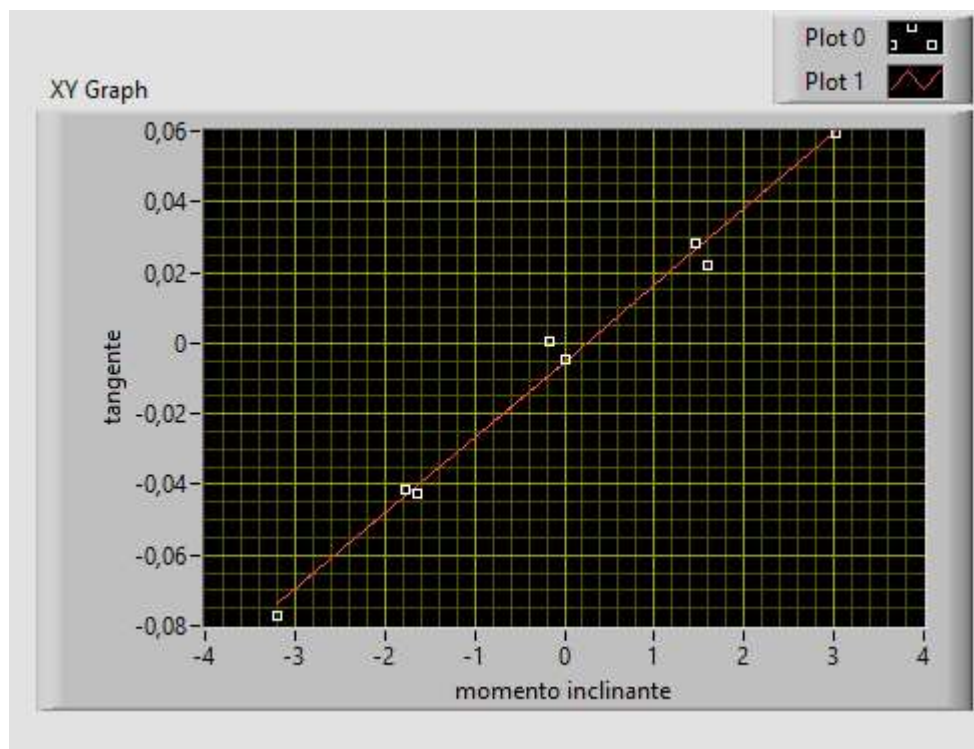


FIGURA 5.5: Gráfico em LabView

Podemos ver o código em LabView dividido por partes no Apêndice D.

Capítulo 6

Exequibilidade de uma prova de estabilidade no modelo

Com o objetivo de verificar a exequibilidade de uma prova de estabilidade no modelo e de testar a precisão do sensor na medição da deslocação do pêndulo realizaram-se várias provas de estabilidade.

Para a realização da prova foram cedidos pela oficina da Escola Naval alguns cilindros metálicos com um peso de cerca de 350g cada um. Sabendo o valor dos pesos para a prova realizaram-se alguns cálculos para prever a distância de deslocação dos pesos para obter cerca de dois graus de inclinação por cada movimentação. Para realizar a previsão da altura do centro de gravidade realizou-se a junção das várias partes do modelo no Solidworks. Cada parte colocada no modelo foi pesada através de uma balança digital e, fazendo a soma dos diversos componentes, obtemos o deslocamento. Para além disso, os valores obtidos foram introduzidos no Solidworks, e assim, foi calculada automaticamente uma estimativa da altura do centro de gravidade. O valor de \overline{KM} é obtido através de uma interpolação dos valores obtidos no subcapítulo 5.1 e \overline{GM} através da fórmula 2.5. Com estes dados facilmente se chega aos valor da distância que se deve mover os pesos para obter uma inclinação de dois graus através da equação 2.7. Podemos ver na tabela 6.1 os valores obtidos. Decidiu-se então usar uma distância de deslocação dos pesos de 4,5cm.

TABELA 6.1: Valores para determinar a deslocação dos pesos

Variáveis	Valores obtidos
$W(Kg)$	3,418
$\overline{KG}(mm)$	52,06
$\overline{KM}(mm)$	186,32
$w(Kg)$	0,350
$d(mm)$	45,79

Na realização da primeira prova de estabilidade constatou-se que os dados retirados pelo sensor eram claramente distantes dos dados retirados visualmente, tal como podemos ver na Tabela 6.2.

TABELA 6.2: Valores da distância percorrida pelo pêndulo a meio navio após cada movimentação na primeira prova de estabilidade

Movimentação	Distância visual (cm)	Distância retirada pelo sensor (cm)
1	0,5	0,1
2	1,05	0,56
3	0,6	0,14
4	-0,1	-0,06
5	-0,6	-1,83
6	-1,1	-2,0
7	-0,6	-1,97
8	0	-0,02

Constatou-se que um ligeiro balanço na direção proa/popa poderia alterar significativamente os valores lidos pelo sensor de distância, com isto, resolveu-se aumentar a área do refletor introduzido no pêndulo e realizar uma segunda prova de estabilidade. Nesta segunda prova obtiveram-se resultados bastante mais satisfatórios, tendo-se obtido um erro máximo de $1mm$ e um erro médio de cerca de $0,5mm$, podemos ver os valores registados na Tabela 6.3.

TABELA 6.3: Valores da distância percorrida pelo pêndulo a meio navio após cada movimentação na segunda prova de estabilidade

Movimentação	Distância visual (cm)	Distância retirada pelo sensor (cm)
1	0,4	0,39
2	0,95	1,03
3	0,45	0,49
4	-0,05	0,01
5	-0,75	-0,73
6	-1,25	-1,35
7	-0,8	-0,76
8	0	-0,08

Para tratamento dos dados elaborou-se uma folha Excel (que podemos ver em Apêndice E) onde são calculados os momentos inclinantes e feita a médias das tangentes dos três pêndulos a cada movimentação, com isto, é realizado um gráfico com os diversos pontos e através de uma regressão linear calculada a reta que melhor se aproxima aos dados calculados. Obtendo a reta é calculado o centro de gravidade.

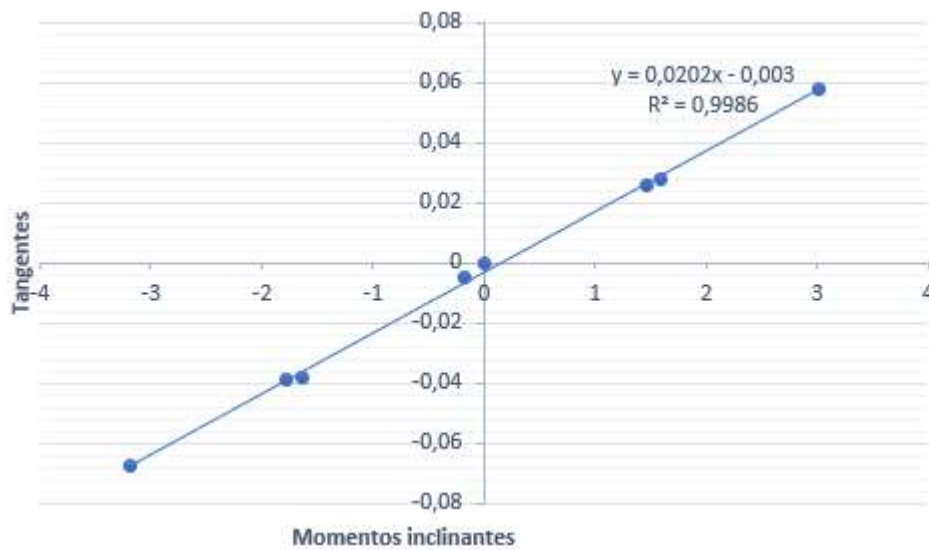


FIGURA 6.1: Gráfico de regressão linear da 2ª prova de estabilidade

Podemos ver que na Figura 6.1 que o fator de correlação da regressão linear é aproximadamente 1, o que poderá indicar a ausência de erros significativos na execução da prova de estabilidade. O valor final calculado do centro de gravidade do modelo na prova de estabilidade foi de aproximadamente $5,86\text{cm}$, o valor da previsão efetuada no Solidworks foi de cerca de $5,21\text{cm}$ e o valor calculado apenas com o sensor foi de cerca de $6,1\text{cm}$.

A diferença entre o resultado obtido nos três pêndulos e no sensor deve-se sobretudo ao facto do pêndulo central ser bastante mais curto do que os restantes, influenciando significativamente a precisão com que são encontradas as tangentes dos ângulos e não tanto relativamente à precisão do sensor, tendo em conta que já foi visto que a diferença entre as leituras visuais e do sensor é bastante pequena. Relativamente à diferença entre o valor da previsão no Solidworks está fortemente relacionada com o facto de o modelo não estar perfeitamente representado como na realidade, como por exemplo, no Solidworks foi considerado que todos os componentes têm um densidade constante, o que não é verdade, pois numa impressão 3D a densidade pode variar dentro de um só objeto e objetos idênticos podem ter densidades diferentes, principalmente se forem impressos em impressoras diferentes, que é o caso do casco deste modelo.

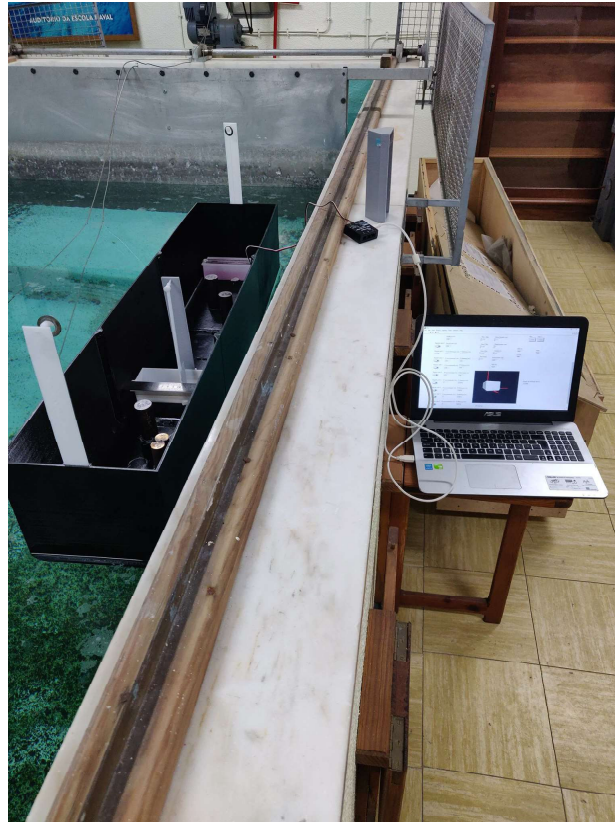


FIGURA 6.2: Modelo a realizar prova de estabilidade

Tendo em conta que o sensor foi calibrado visualmente e que a escala das réguas são de $1mm$ (logo o erro de leitura será metade desse valor), considera-se as leituras efetuadas através das réguas mais precisas, a não ser que exista um erro de leitura considerável por parte do utilizador do modelo. Caso isso aconteça, o erro pode ser detetado através da comparação das tangentes dos outros pêndulos ou dos dados registados pelo sensor.

Como forma de mostrar de uma forma um pouco mais prática a aplicação do modelo para o ensino foi realizado um enunciado e a respetiva resolução de um trabalho prático, que podemos encontrar no Apêndice F.

Conclusão

Conclusões gerais

Numa primeira fase foi feita uma pesquisa sobre o ensino de ciências através de experimentação e ficou evidenciado, através de várias referências, a elevada importância deste tipo de ensino na aprendizagem dos alunos. Seguidamente foi mostrado os vários modelos laboratoriais de arquitetura naval que foram possíveis encontrar com as funcionalidades idênticas ao desenvolvido nesta dissertação e que serviram como base para o desenvolvimento deste projeto.

O modelo foi construído através de ideias previamente definidas, sendo que foi sofrendo alterações à medida que novas ideias surgiam ou em caso de necessidade de correções.

A impressão 3D foi uma ferramenta extremamente útil que permitiu não só a construção em alguns dias do modelo como praticamente de todos os seus componentes. Para além da possibilidade de construção dos componentes mais específicos que de outra forma seriam difíceis de obter trata-se de uma ferramenta relativamente barata permitindo, em caso de falha, reimprimir facilmente outra peça melhorada.

Através da análise de vários sensores foi também possível encontrar um que se adequasse a recolher os dados de inclinação do modelo em tempo real. Com isto foi possível a criação de um programa que efetua, através da introdução de alguns dados e de cliques em alguns botões durante a prova de estabilidade, todos os cálculos necessários para achar o a altura do centro de gravidade mostrando ainda uma representação em 3D que inclina de acordo com o modelo real. Esta utilização de sensores e de software para além de tornar o modelo mais didático e apelativo, podendo também servir para comparar dados entre os cálculos efetuados pelos alunos e o programa, espera-se que suscite também o interesse dos alunos por estas áreas.

No final ficamos com um modelo funcional, onde é possível realizar provas de estabilidade, fazer análises com espelhos líquidos através de tanques e ainda é possível fazer a alteração do centro de gravidade, subindo e descendo um peso colocado a meio navio e portanto os objetivos da dissertação foram cumpridos.

Limitações

Durante a maior parte do tempo destinado à elaboração da dissertação de mestrado, Portugal e a maior parte da Europa, foi fortemente afetada pelo novo

coronavírus. Esta pandemia afetou o país tendo reduzido os seus serviços ao mínimo indispensável. Isto veio causar várias limitações na realização deste trabalho, nomeadamente:

- Atrasos de encomendas com material necessário para o trabalho, como por exemplo, o filamento para impressoras 3D que teve uma enorme procura durante a pandemia e que muitos locais de venda não conseguiram responder à procura.
- O serviços da Escola Naval encontraram-se fechados, durante bastante tempo, como por exemplo a oficina, locais por vezes necessários para a utilização de alguns equipamentos ou materiais.
- A comunicação entre aluno e orientadores teve de se adaptar drasticamente, ficando a funcionar uma comunicação à distância que não é tão eficaz como uma comunicação presencial.
- O facto de outras instituições estarem fechadas, nomeadamente o IST, no qual teria sido importante uma visita para conhecer os modelos que eles possuem, a qual não foi possível.

Trabalhos futuros

Em termos de trabalho futuro pode-se propor:

- A construção de cascos com diferentes formas para o mesmo efeito por forma a haver mais variedade para os trabalhos dos alunos.
- A criação de uma impressora 3D de grandes dimensões para a Escola Naval, para a construção, por exemplo, de modelos do mesmo género ou veículos autónomos.

Bibliografia

- Alves de Lima, V. & Marcondes, M. E. R. (2004). *Atividades experimentais no ensino de química. Reflexões de um grupo de professores a partir do tema eletroquímica*. São Paulo, Universidade de São Paulo USP.
- Amaral, R. F. d. A. (2011). *Modelos didáticos na museologia e ensino da botânica na Universidade de Coimbra*. Coimbra, FACULDADE DE LETRAS DA UNIVERSIDADE DE COIMBRA.
- American Society For Testing And Materials. (1992). Standard Guide for Conducting a Stability Teste (Lightweight Survey and Inclining Experiment) to Determine the Light Ship Displacement and Centers of Gravity of a Vessel (ASTM_F_1321_92). American Society For Testing; Materials.
- Américo, M. J. (2009). *Sistema de avaliação da estabilidade transversal de navios em tempo real*. Lisboa, Universidade Nova de Lisboa.
- Aparecida, L., Justina, D. & Ferla, M. R. (2006). A Utilização De Modelos Didáticos No Ensino De Genética - Exemplo De Representação De Compactação Do Dna Eucarioto. *Periodica*, 35–40.
- Bent, H. A. (1984). Uses (and abuses) of models in teaching chemistry. *Journal of Chemical Education*, 61(9), 774–777.
- Bureau Veritas Marine & Offshore Division. (2020). Part B - Hull and Stability. Em *Rules for the Classification of Steel Ships* (pp. 1–138). <http://www.veristar.com>
- Cavalcante, D. D. & Silva, A. D. F. A. D. (2008). Modelos didáticos de professores: concepções de ensino-aprendizagem e experimentação. <http://www.quimica.ufpr.br/eduquim/eneq2008/resumos/R0519-1.pdf>
- Chintakunta, S., Raghavendra Rao, K., Nkwari, P. K. & Ouahada, K. (2019). Low-cost sensor using a dsPIC for measuring a specific heat capacity of liquids. *2019 International Symposium on Networks, Computers and Communications, ISNCC 2019*, (2).
- Correia, P. L. (1989). A engenharia Naval em Portugal (C. G. Soares, Ed.). Em C. G. Soares (Ed.), *3ª Jornadas Técnicas de Engenharia Naval*, Lisboa.
- Det Norske Veritas. (2015). Rules For Classification - Inland navigation vessels.
- Det Norske Veritas. (2016). Class Guideline - Stability Documentation for Approval (DNVGL-CG-0157).
- Det norske Veritas Classification A/S. (1990). Lightweight Determination - Ships (Inclining Test and Lightweight Survey).
- Dinis, F. J. V. (2010). *Sistema de instrumentação de baixo custo compatível com o LabVIEW*. Universidade da Madeira.
- Direção de Navios. (1996). Critérios de Estabilidade das UN's e UAM's da Marinha Portuguesa. *Lisboa*.

- Direct Industry. (2020). No Title. Obtido 10 junho 2020, de <https://www.directindustry.com/pt/prod/topsolid/product-21412-1712554.html>
- Enseñanza, L. A. & Ciencias, D. E. L. A. S. (2006). *La enseñanza de ciencias basada en la elaboración de modelos* (N.º 2).
- Germanischer Lloyd. (2000). Guidelines and Approval Procedure for "In Service Inclining Test Systems"(ISITS). Germanischer Lloyd.
- Gonçalves, H. (2017). *Modelo de Calibração para Sensores "Low-Cost"na Cidade do Porto*. Universidade do Porto.
- Herickhoff, C., Lin, J. & Dahl, J. (2019). Low-cost Sensor-enabled Freehand 3D Ultrasound. *IEEE International Ultrasonics Symposium, IUS, 2019-October*, 498–501. <https://doi.org/10.1109/ULTSYM.2019.8925917>
- IMO. (1993). Critérios de Estabilidade Resolução A.749(18).
- IMO. (2008). Resolution MSC.267(85).
- Islam, M. S., Shajid-Ul-Mahmud, M., Islam, T., Amin, M. S. & Hossam-E-Haider, M. (2017). A low cost MEMS and complementary filter based attitude heading reference system (AHRS) for low speed aircraft. *2016 3rd International Conference on Electrical Engineering and Information and Communication Technology, iCEEiCT 2016*, 1–5.
- Laborial. (2020). Laborial Didática. Obtido 19 maio 2020, de <https://www.laborialdidatica.com>
- Lewis, E. V. (Ed.). (1988). *Principles of Naval Architecture* (Vol. 1). Jersey City, The society of Naval Architects; Marine Engineers.
- Loder, L. L. & Bender, F. A. (2007). O Uso De Programas De Simulação Em Cursos De Engenharia : Possibilidades E Necessidades.
- Luís Paulo Leopoldo Mercado. (2002). *Novas Tecnologias na Educação: Reflexões Sobre a Prática*. Maceió.
- Martinho, J. R. M. (2014). *Estudo da aplicabilidade de sensores de baixo custo para monitorização de dióxido de azoto no ar ambiente*. Instituto Politécnico de Viseu.
- Murrell, N., Bradley, R., Bajaj, N., Whitney, J. & Chiu, G. T. (2020). New calibration method for implementing machine learning in low-cost sensor applications. *IEEE Sensors Letters*, 4(2), 2–5.
- Norwegian Maritimr Authority. (2013). Procedures for determination of light ship displacement and centre of gravity of Norwegian ships.
- of defence, M. (2000). Stability Standards For Surface Ships. Sea Technology Group, Defence Procurement Agency STGSA Ash0,#95 MOD Abbey Wood Bristol BS34 8JH.
- Pedley, M. (2013). Tilt Sensing Using a Three-Axis Accelerometer. *Freescale semiconductor application notes*, 1–22.
- Phidgets Inc. (2016a). PhidgetSpatial 3/3/3 Basic. Obtido 15 abril 2020, de <https://www.phidgets.com/?tier=3%7B%5C%7Dcatid=10%7B%5C%7Dpcid=8%7B%5C%7Dprodid=1025>
- Phidgets Inc. (2016b). Sharp Distance Sensor. Obtido 19 abril 2020, de <https://www.phidgets.com/?tier=3%7B%5C%7Dcatid=5%7B%5C%7Dpcid=3%7B%5C%7Dprodid=394>

- Phidgets Inc. (2017). Gyroscope primer. Obtido 15 abril 2020, de https://www.phidgets.com/docs/Gyroscope%7B%5C_%7DPrimer
- Phidgets Inc. (2018). Accelerometer Primer. Obtido 15 abril 2020, de https://www.phidgets.com/docs/Accelerometer%7B%5C_%7DPrimer
- Pires, P. A. M. (2000). Flotation & Stability.
- Pricilla, A., Dantas, J., Aparecida, T., Dantas, V. & Rodrigues, I. (2016). IMPORTÂNCIA DO USO DE MODELOS DIDÁTICOS NO ENSINO DE CITOLOGIA.
- Ramos, B. F. P. (2019). *Sistema Low Cost para Análise de Vibrações a Bordo de Navios de Guerra Projeto e Desenvolvimento de uma Aplicação para Smartphone com Sistema Android*. Alfeite, Escola Naval.
- Rawson, K. J. & Tupper, E. C. (2001). *Basic Ship Theory Vol 1 - Hydrostatics and Strength* (fifth edit, Vol. 1). British Library Cataloguing in Publication Data Rawson, Library of Congress Cataloguing in Publication Data.
- Sampaio, R. P. C. (2010). Simuladores. Obtido, de <http://www.chedassampaio.net/simuladores>
- Santos, W. D. (2015). *Uso De Simuladores Como Ferramenta No Ensino-Aprendizagem De Redes De Computadores*. Belo Horizonte, Universidade FUMEC.
- Sarchin, T.H./Goldberg, L. (1962). Stability and Buoyancy Criteria for U.S.Naval Surface Ships.
- Shiki, S. B., Franco, V. R. & Watanabe, F. Y. (2018). Utilização de instrumentação de baixo custo no ensino de vibrações mecânicas para engenharia.
- Silva, T. G. & Morbeck, L. L. B. (2019). Utilização de Modelos Didáticos como Instrumento Pedagógico de Aprendizagem em Citologia. *ID on line REVISTA DE PSICOLOGIA*, 13(45), 594–608.
- Soares, A. R. (2018). *Desenvolvimento e teste de um protótipo móvel com sensores low cost*. Universidade de Ciências de Lisboa.
- Zhang, D., Kong, W., Kasai, R., Gu, Z., Shiguematsu, Y. M., Cosentino, S., Sessa, S. & Takanishi, A. (2018). Development of a low-cost smart home system using wireless environmental monitoring sensors for functionally independent elderly people. *2017 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, ROBIO 2017, 2018-Janua*, 153–158.

Apêndice A - Programação no *LabView*

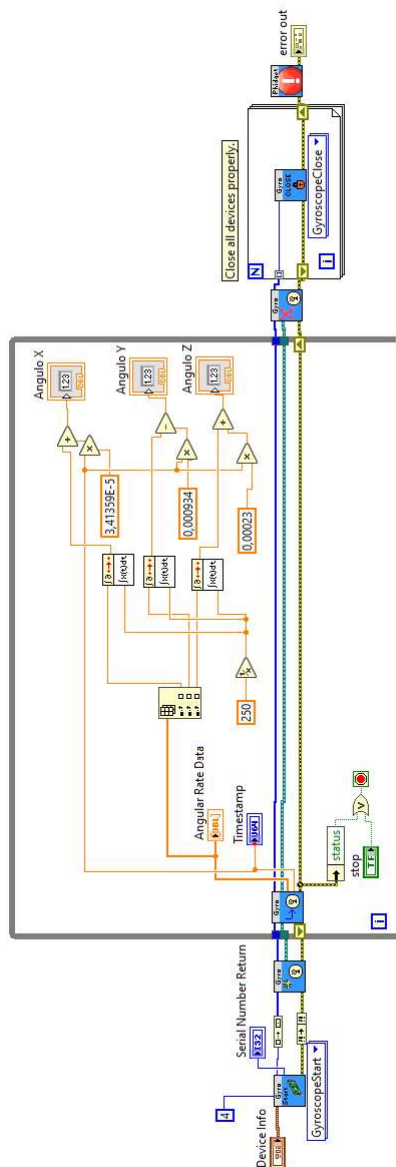


FIGURA A.1: Programa do giroscópio

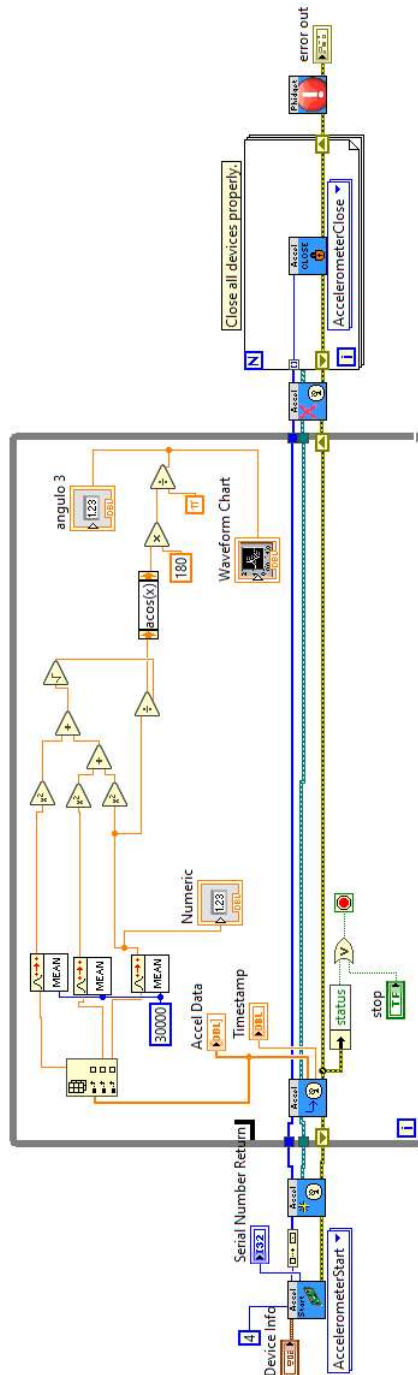


FIGURA A.2: Programa do acelerómetro

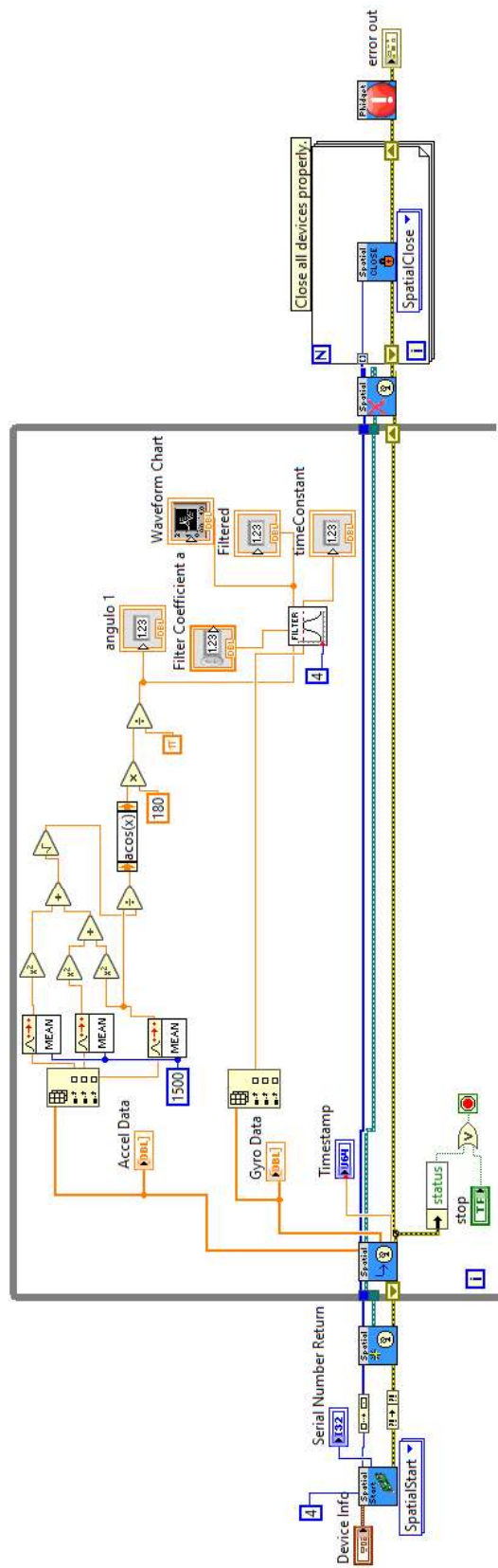


FIGURA A.3: Programa de aplicação do filtro complementar

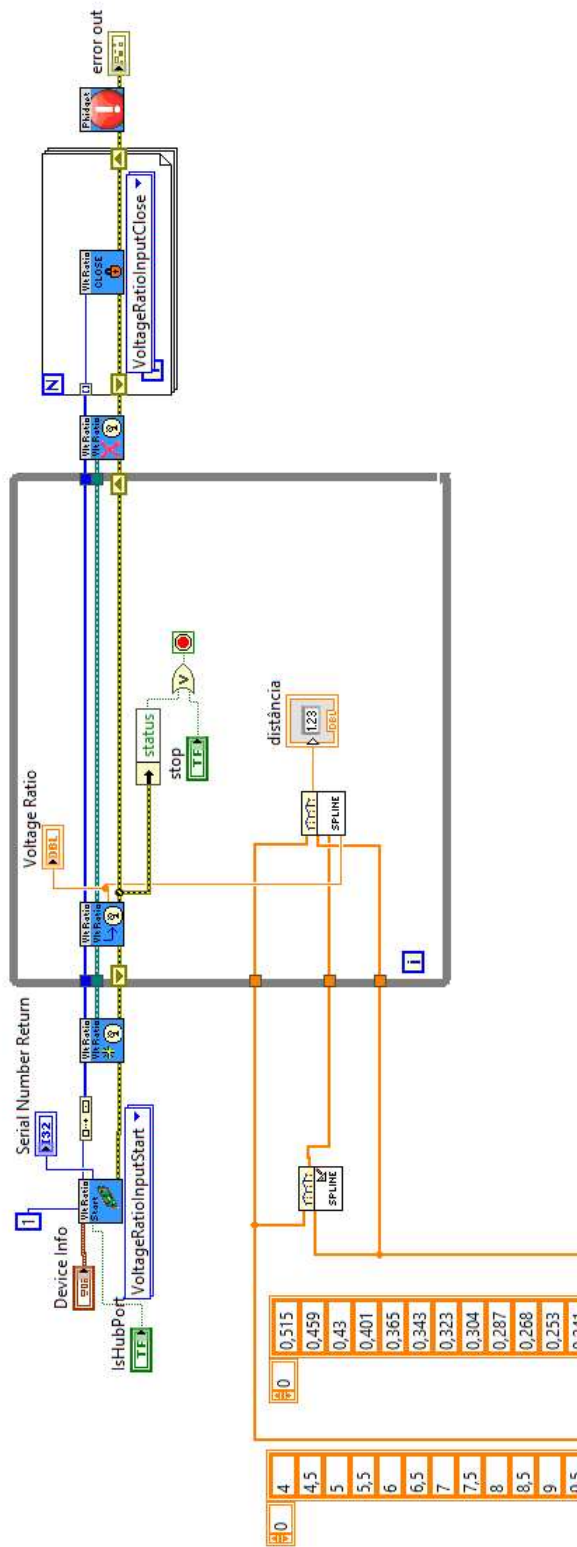


FIGURA A.4: Programa do sensor de distância

Apêndice B - Cálculos para a prova de estabilidade

Apêndice C - Possíveis exercícios com o modelo

Podemos ver aqui alguns dos exercícios pensados para utilização com o modelo:

- Realização do gráfico de carenas direitas do modelo.
- Realização de uma prova de estabilidade e respetivos cálculos.
- Comparação, análise e discussão dos dados retirados visualmente e através do sensor.
- Realização do gráfico de carenas inclinadas.
- Realização de novas provas de estabilidade e respetivos cálculo com novas variantes como água nos tanques, pesos adicionais a serem deduzidos nas contas finais do centro de gravidade ou subidas e descidas do peso a meio navio.
- Comparação e discussão dos resultados obtidos nas novas provas de estabilidade.
- Realização do gráfico de carenas inclinadas após prova de estabilidade com movimentação do peso a meio navio e comparação com o gráfico do peso na posição inicial.
- Comparação dos gráficos de carenas inclinadas com normas de estabilidade.

Apêndice D - Programação para a prova de estabilidade

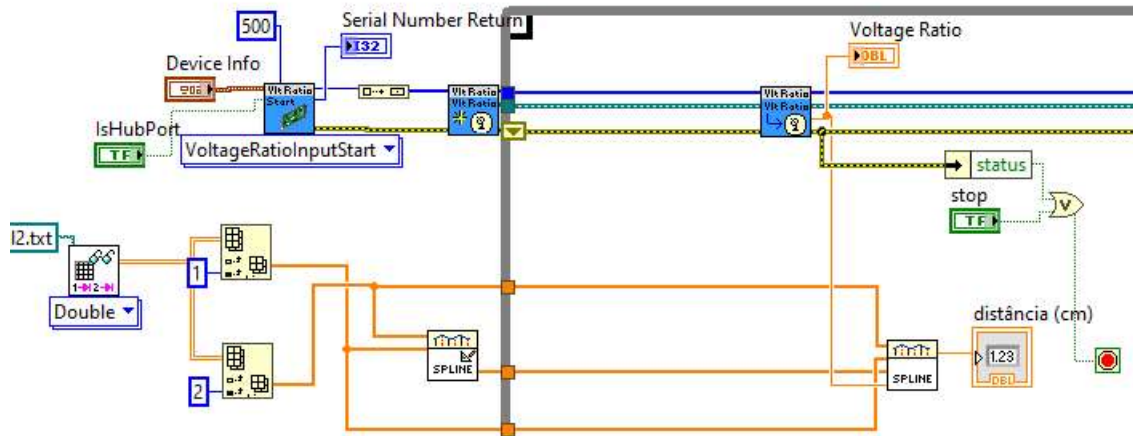


FIGURA D.1: Interpolação da voltagem para distância a partir de dados do sensor

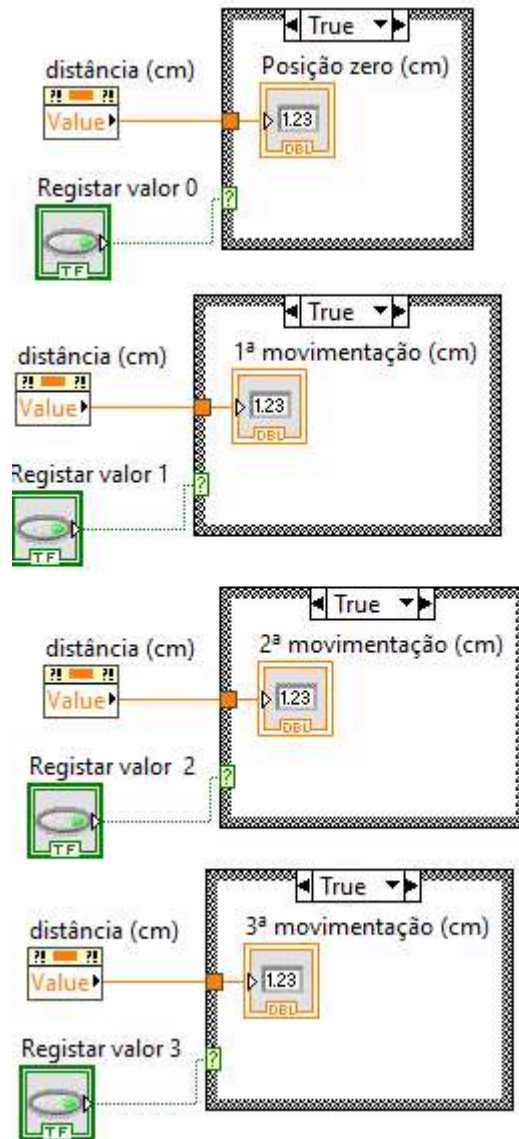


FIGURA D.2: Registo de valores da distância do pêndulo através de botões

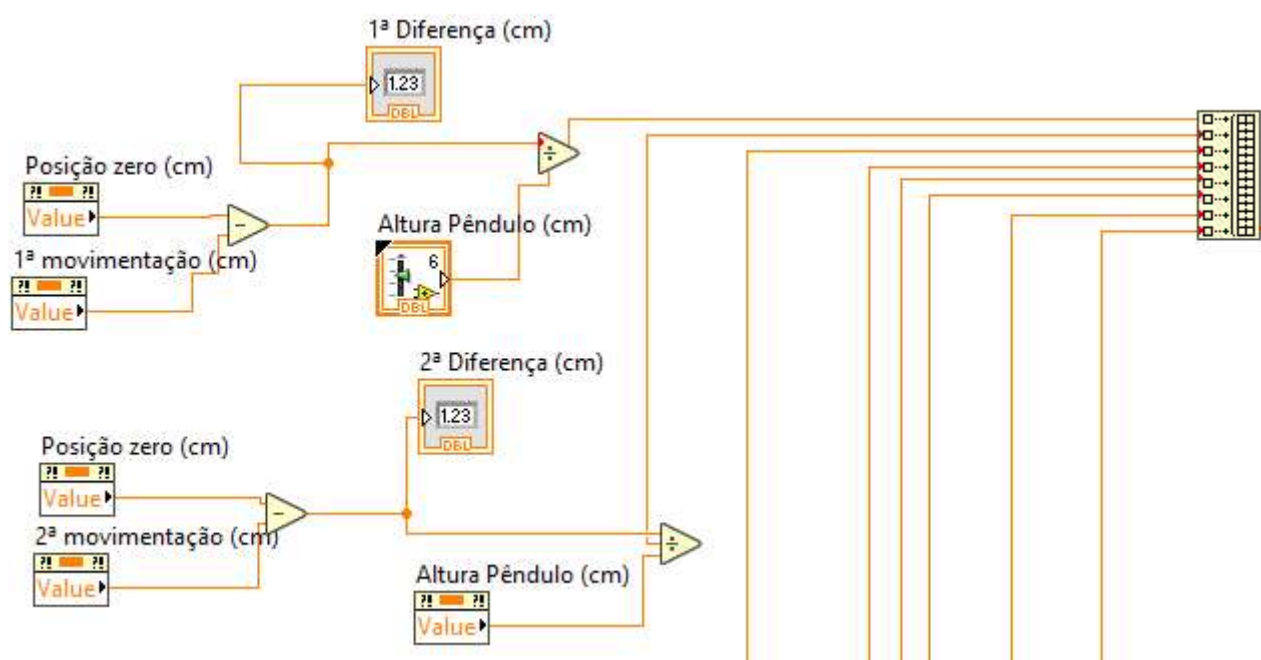


FIGURA D.3: Cálculos das tangentes

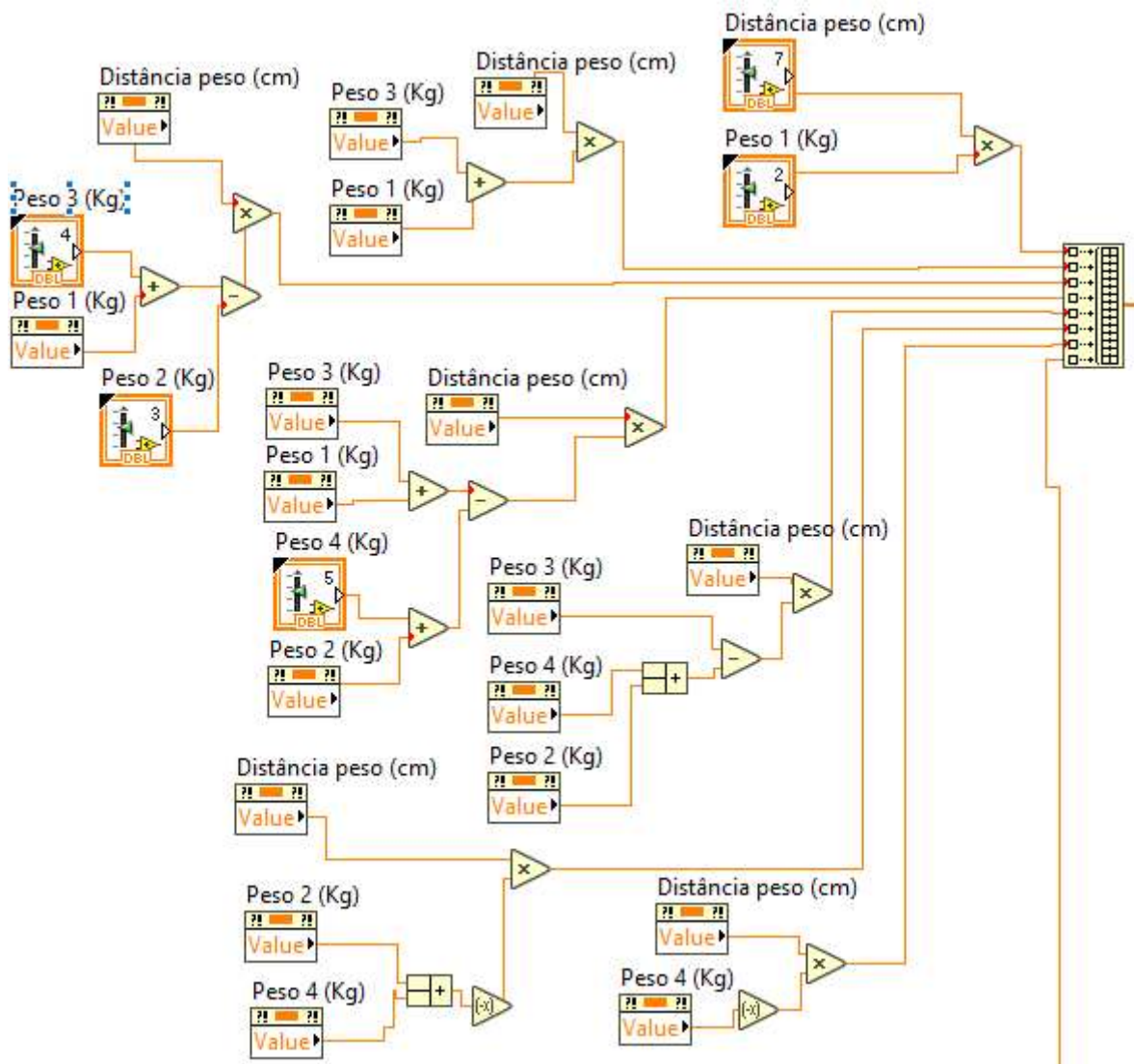


FIGURA D.4: Cálculos dos momentos inclinantes

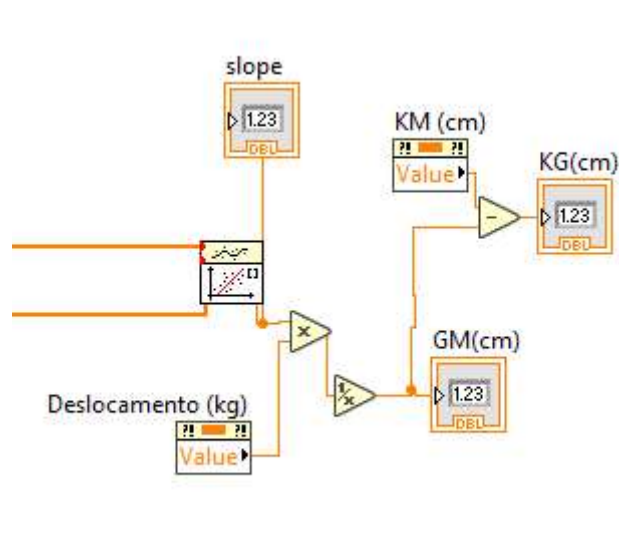


FIGURA D.5: Cálculo da altura do centro de gravidade a partir do declive

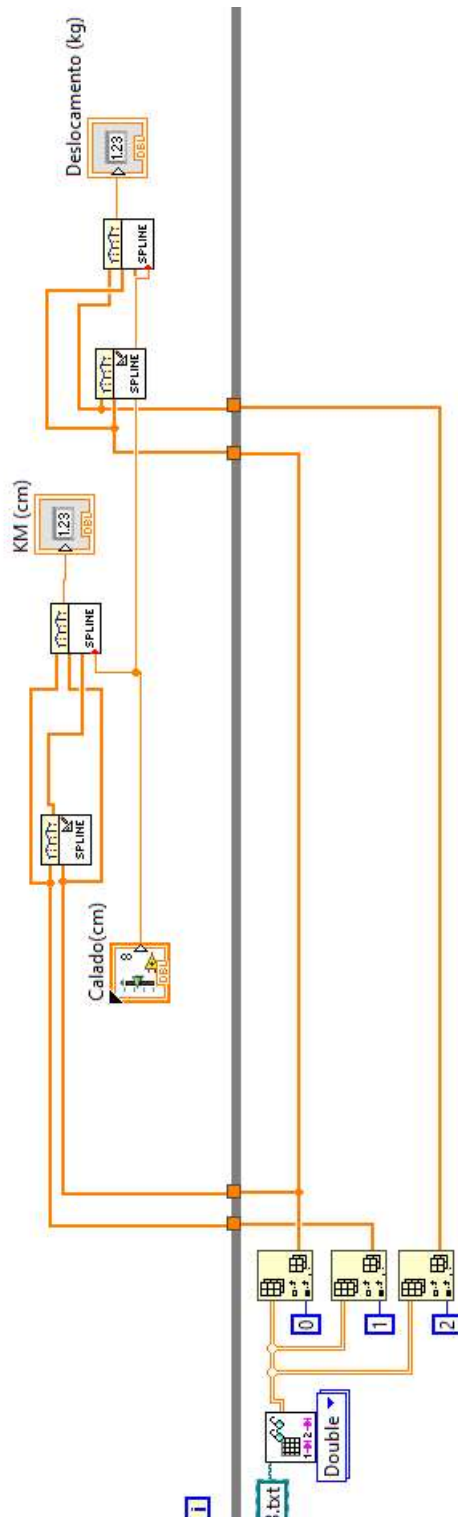


FIGURA D.6: Interpolação para obtenção dos valores do deslocamento e do KM

Apêndice E - Excel de cálculos para prova de estabilidade

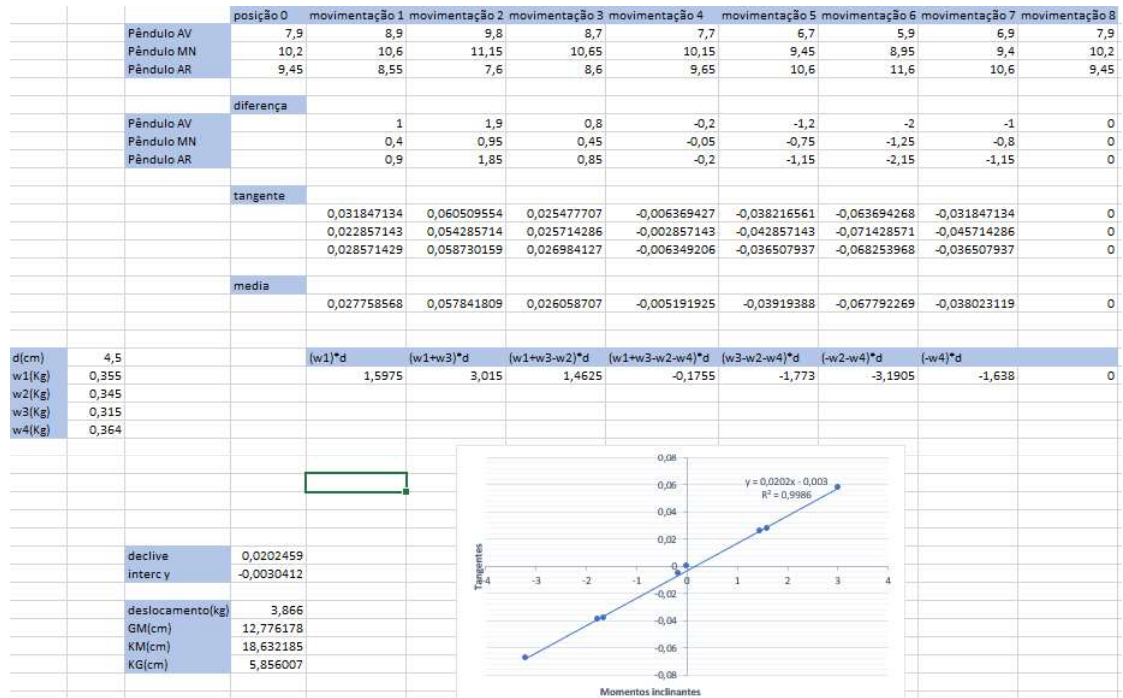


FIGURA E.1: Cálculos de prova de estabilidade em Excel

Apêndice F - Enunciado e Resolução de um Trabalho com o Modelo

Enunciado

1. Objetivos

- Efetuar o GCD do modelo para imersões de $0,2cm$ até $6cm$ com intervalos de $0,2cm$. Produzir, pelo menos, as seguintes curvas: volume submerso ∇m^3 , deslocamento $W(kg)$; altura do centro de flutuação $Z_F(m)$; posição longitudinal do centro de flutuação $X_F(m)$ relativamente à secção de meio-navio, altura do metacentro transversal $\overline{KM_T}(m)$, altura do centro de impulsão $\overline{KB}(m)$, posição longitudinal do centro de impulsão $X_C(m)$ relativamente à secção de meio-navio, altura do metacentro longitudinal $\overline{KM_L}(m)$, Tonelada por centímetro de imersão ou deslocamento unitário $TPC(Kg/m)$, Momento de caimento unitário $MCU(t \cdot m/cm)$ ou momento para mudar o caimento 1 metro e $M_C(Kg \cdot m)$;
- Estimar \overline{KG} ;
- Determinar o deslocamento do modelo;
- Estimar $\overline{KM_T}, \overline{KM_L}$ e \overline{KB} ;
- Estimar $\overline{GM_T}$ e $\overline{GM_L}$.
- Efetuar a prova de estabilidade.

2. Material e condições de prova

a) Condições do modelo:

- Modelo com a configuração dos três pêndulos, sistema de subida do centro de gravidade na posição mais baixa e 4 pesos com respectivas régua de posição tal como na Figura. Considere todos os elementos utilizados na prova como fazendo parte do deslocamento leve do modelo.
- Considere a densidade da água como $1000 \frac{m^3}{Kg}$.



FIGURA F.1: Configuração do modelo

b) Material para a prova:

- balança digital
- régua
- máquina fotográfica/ telemóvel
- Folha de registos
- giz

3. Execução da Prova

a) Colocar os pesos de acordo com imagem em Anexo IV a uma distância da meia-nau de 2.5cm .

b) fazer marcações com giz das posições dos pesos.

c) fazer a leitura dos pêndulos e registar.

- d) executar todas as movimentações de acordo com o anexo referido na alínea a) e respectivos registos dos pêndulos.
- e) efetuar gráfico tangente ϕ vs $w \times d$.
- f) cálculo do valor de \overline{KG} .

4. Análise e discussão de resultados

- a) Fazer a análise dos resultados obtidos referindo se existiram erros. Se sim, em que parâmetros? Porquê?
- b) Comparação do \overline{KG} obtido com o estimado inicialmente. Comentar as diferenças.

Resolução

Elaboração do gráfico de carenas direitas (GCD), ver Figura F.2.

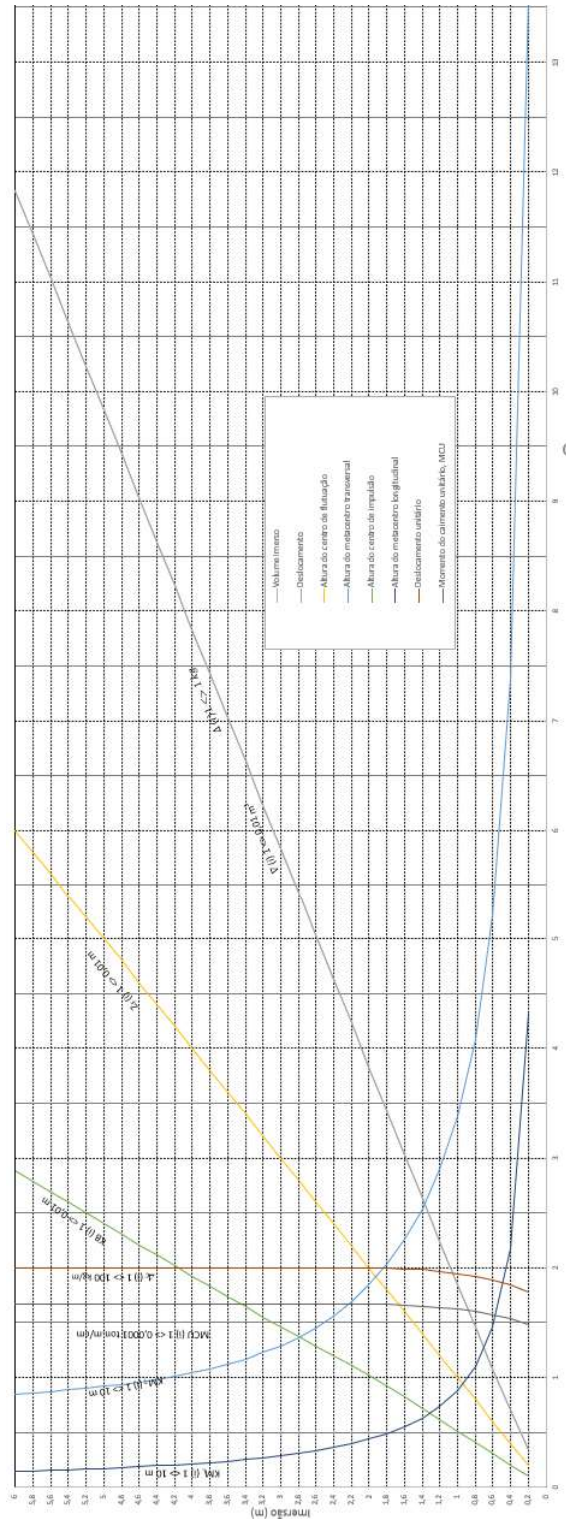


FIGURA F.2: Gráfico de carenas direitas

Através da balança digital o modelo e todos os seus componentes foram pesados para determinar o seu deslocamento, tendo-se obtido uma massa de 4382g. Alternativamente, poderia-se determinar o deslocamento através da leitura das marcas de calado e do GCD.

Uma das formas de estimar o valor de \overline{KG} é através da utilização do SolidWorks. Sabendo a massa e desenhando a maior parte dos componentes presentes no modelo, incluindo o casco, é possível fazer uma estima do centro de gravidade. Fez-se o *assembly* dos diversos componentes (Figura F.3) e, através da funcionalidade de *override mass properties*, introduziu-se a massa de cada parte tendo dado como resultado $\overline{KG} = 5.022cm$

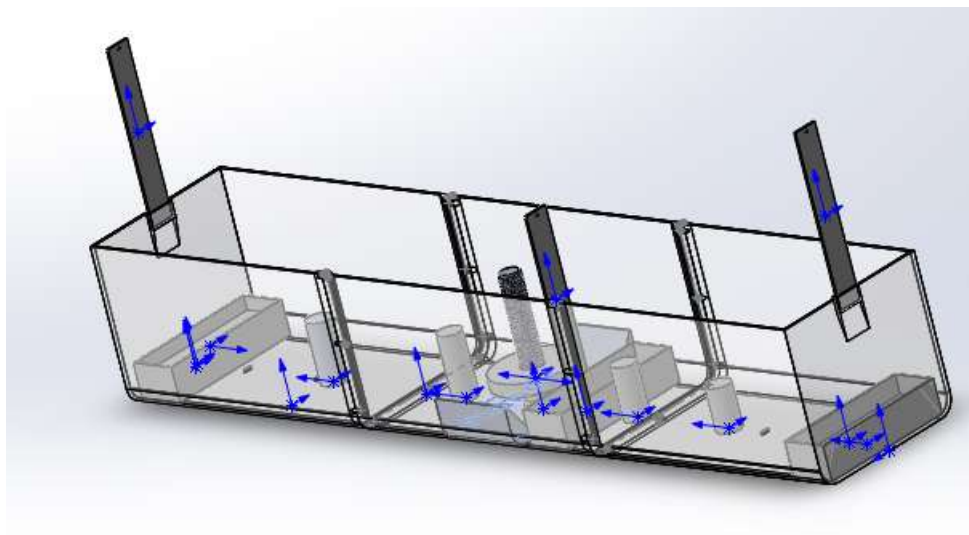


FIGURA F.3: *Assembly* do modelo

De seguida através de interpolações com os dados do GCD estimou-se os restantes valores necessários, tendo resultado nos valores que podemos ver na Tabela F.1. Estes dados também poderiam ter sido retirados diretamente do GCD.

TABELA F.1: Resultados da interpolação no GCD

Variáveis	Resultado
$\overline{KM}_T(cm)$	17,24
$\overline{KM}_L(cm)$	377,77
$\overline{KB}(cm)$	1,12
$\overline{GM}_T(cm)$	12,22
$\overline{GM}_L(cm)$	372,748

Por fim realizou-se a prova de estabilidade de acordo com os dados e esquema fornecido. Podemos ver os resultados nas Figuras F.4 e F.5.

	Valores em cm								
	posição 0	movimentação 1	movimentação 2	movimentação 3	movimentação 4	movimentação 5	movimentação 6	movimentação 7	movimentação 8
Pêndulo AV	7,4	8,5	9,5	8,45	7,3	6,2	5,3	6,4	7,4
Pêndulo MN	10,2	10,9	11,3	10,9	10,2	9,55	8,95	9,6	10,2
Pêndulo AR	9,1	8,5	7,4	8,4	9,6	10,65	11,7	10,7	9,1
diferença									
Pêndulo AV		1,1	2,1	1,05	-0,1	-1,2	-2,1	-1	0
Pêndulo MN		0,7	1,1	0,7	0	-0,65	-1,25	-0,6	0
Pêndulo AR		0,6	1,7	0,7	-0,5	-1,55	-2,6	-1,6	0
tangente									
		0,035031847	0,066878981	0,03343949	-0,003184713	-0,038216561	-0,066878981	-0,031847134	0
		0,04	0,062857143	0,04	0	-0,037142857	-0,071428571	-0,034285714	0
		0,019047619	0,053968254	0,022222222	-0,015873016	-0,049206349	-0,082539683	-0,050793651	0
media									
		0,031359822	0,061234793	0,031887238	-0,006352576	-0,041521922	-0,073615745	-0,0389755	0
d(cm)	5	(w1)*d	(w1+w3)*d	(w1+w3-w2)*d	(w1+w3-w2-w4)*d	(w3-w2-w4)*d	(-w2-w4)*d	(-w4)*d	
w1(Kg)	0,355	1,775	3,35	1,625	-0,195	-1,97	-3,545	-1,82	0
w2(Kg)	0,345								
w3(Kg)	0,315								
w4(Kg)	0,364								

FIGURA F.4: Valores registados

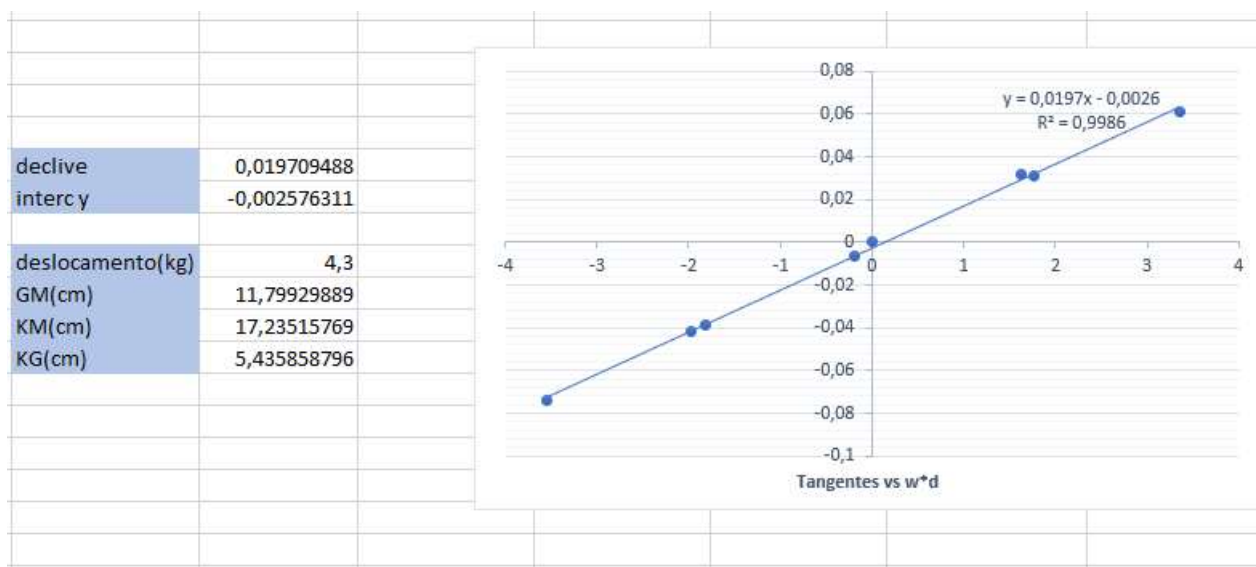


FIGURA F.5: Resultados da prova

Tendo em conta o gráfico final da prova de estabilidade não estão evidenciados erros significativos durante a sua execução, visto que, os pontos traçados terem uma correlação de quase um com a reta interpolada.

Comparando o valor estimado de \overline{KG} (5.022cm) com o calculado através da prova (5.436cm) vemos que a diferença é de cerca de 0.41cm, o que não parece ser um valor muito elevado tendo em conta que na estima pelo Solidworks podem existir pequenas diferenças com a realidade, como por exemplo, o facto de as várias partes serem consideradas como terem uma densidade constante, o que não acontece, quer devido à forma como foram impressas quer pela aplicação de tinta efetuada. Na parte da prova de estabilidade também podem acontecer alguns pequenos erros como erros de leitura da posição do pêndulo ou erros na deslocação dos vários pesos.

Anexo I - Especificações dos sensores

Product Specifications

Accelerometer	
Acceleration Measurement Max	± 8 g
Acceleration Measurement Resolution	976.7 µg
Accelerometer White Noise σ	2.8 mg
Accelerometer Minimum Drift σ	1.9 mg
Accelerometer Optimal Averaging Period	286 s
Gyroscope	
Gyroscope Speed Max	± 2000°/s
Gyroscope Resolution	0.07°/s
Gyroscope White Noise σ	0.59°/s
Gyroscope Minimum Drift σ	0.0019°/s
Gyroscope Optimal Averaging Period	8628 s
Magnetometer	
Magnetic Field Max	5.5 G
Magnetometer Resolution	3 mG
Magnetometer White Noise σ	1.2 mG
Magnetometer Minimum Drift σ	87 µG
Board	
Controlled By	USB (Mini-USB)
API Object Name	Accelerometer, Gyroscope, Magnetometer
Current Consumption Max	40 mA
Sampling Speed Min	1 s/sample
Sampling Speed Max	4 ms/sample
Sampling Speed Min (Webservice)	1 s/sample
Sampling Speed Max (Webservice)	12 ms/sample
USB Voltage Min	4.4 V DC
USB Voltage Max	5.3 V DC
USB Speed	Full Speed
Operating Temperature Min	-40 °C
Operating Temperature Max	85 °C

FIGURA I.1: Especificações da placa da Phidgets. Fonte: Phidgets Inc. (2016a)

Product Specifications

Sensor Properties	
Sensor Type	Distance (Infrared)
Controlled By	Sharp Adapter
Sensor Output Type	Ratiometric
Measurement Distance Min	40 mm
Measurement Distance Max	300 mm
Response Time Max	50 ms
Electrical Properties	
Supply Voltage Min	4.5 V DC
Supply Voltage Max	5.5 V DC
Current Consumption Max	50 mA
Physical Properties	
Weight	3.5 g
Operating Temperature Min	-10 °C
Operating Temperature Max	60 °C

FIGURA I.2: Especificações do sensor de distância da SharpPhidgets Inc. (2016b)

Anexo II - Erros típicos no gráfico traçado na prova de estabilidade

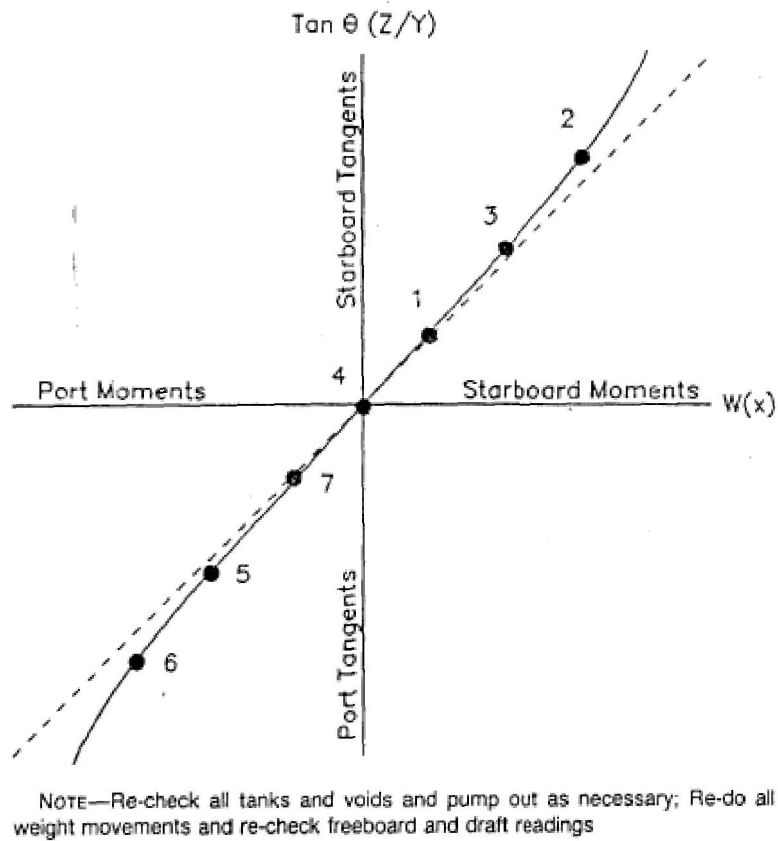


FIGURA II.1: Excesso de espelhos líquidos

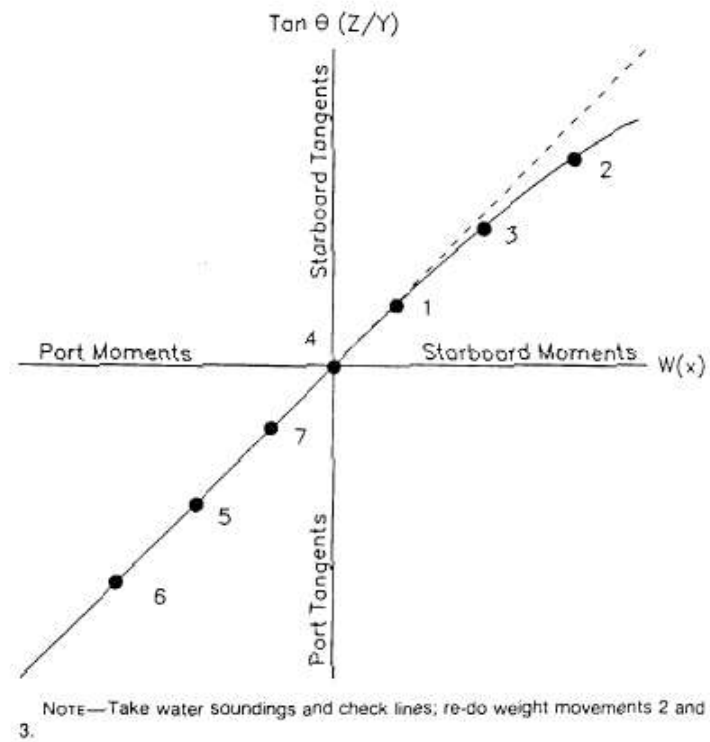


FIGURA II.2: Navio a tocar o fundo ou restringidos pelos cabos de amarração

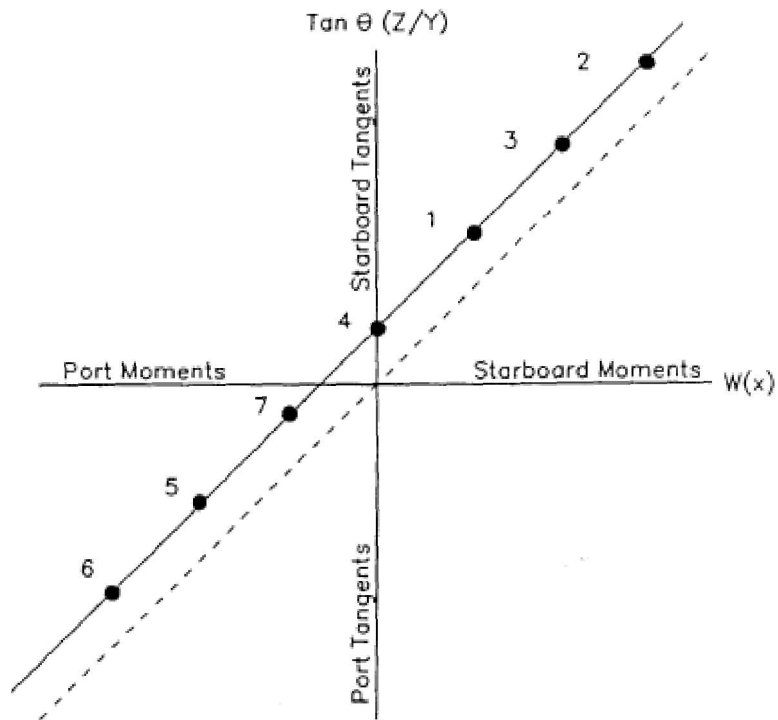


FIGURA II.3: Vento estável por bombordo após ponto inicial ter sido retirado

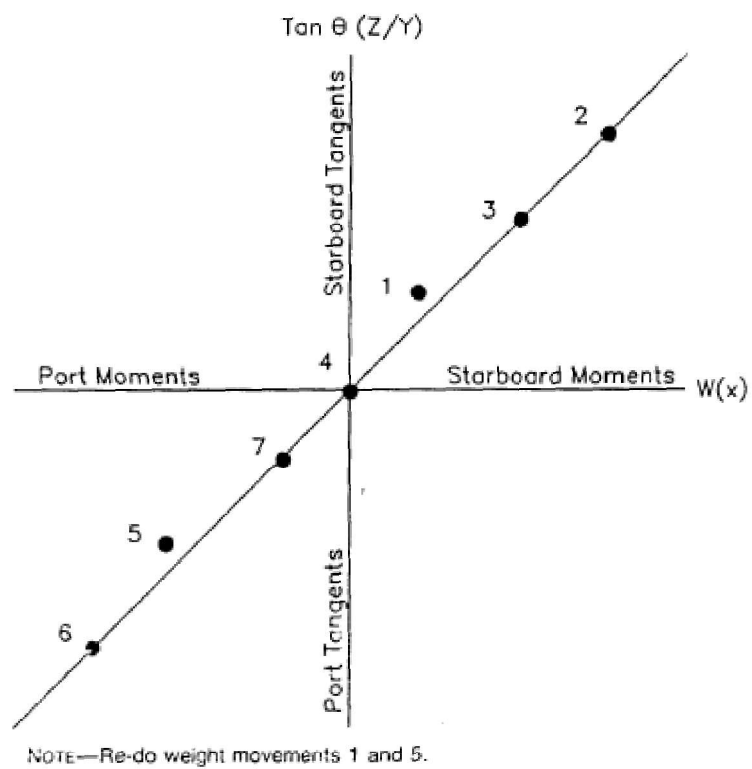


FIGURA II.4: Rajadas de vento por bombordo

Anexo III - Registro de pesos

TABLE 1 Typical Survey Entries

Items to Be Removed				
Item	Weight, lb			
Inclining weight No. 1	2400			
Inclining weight No. 2	2840			
Inclining weight No. 3	2500			
Inclining weight No. 4	2350			
Two men	370			
Two men	370			
Pendulum No. 1 (total setup and one man)	240			
Fuel oil tank No. 3P 8 ft 8 in. sounding	A			
Portable water tk No. 1C 9 ft 3 in. sounding	A			
Items to Be Added				
Item	Weight, lb			
Radio	200			
Antenna	85			
Towing cable	800			
Rescue boat	120			
Items to Be Relocated				
Item	Weight	From	To	
Liferraft	300	Vertical main deck	Longitudinal frame 50	Longitudinal frame 65
Fire pump	220	Vertical main deck	Longitudinal frame 65	Vertical 01 deck 2 ft above shell frame 40

^A Can be determined later by the naval architect from drawings or sounding tables, or both.

FIGURA III.1: Exemplo de registro de pesos

Anexo IV - Esquema de movimentação de pesos

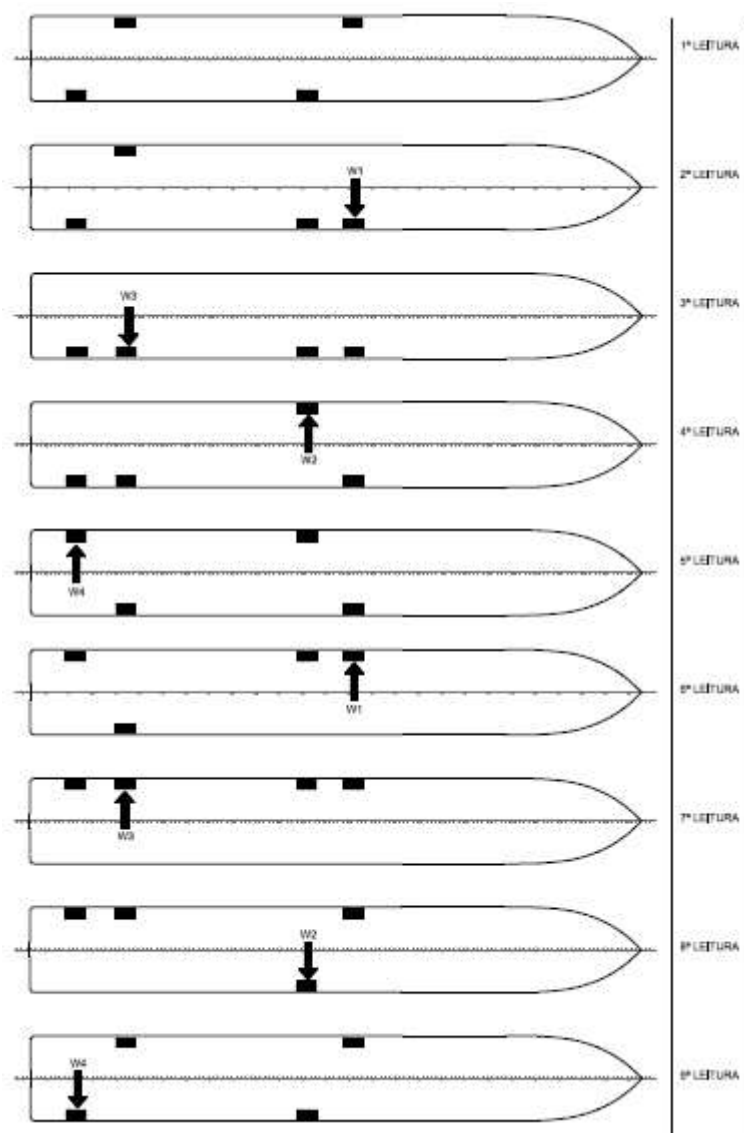


FIGURA IV.1: Esquema de movimentação de pesos. Fonte: Forne-
cido pelo Sr.Engenheiro Andomarc Miranda