

Disseny i construcció d'un dron de navegació automàtica a vela

Treball Final de Grau



Facultat de Nàutica de Barcelona
Universitat Politècnica de Catalunya

Treball realitzat per:
Joan Antoni Sastre Caballol
Carles Manich Vallès

Dirigit per:
Rosa M. Fernández Cantí
Joan Nicolás Apruzzese

Grau en Enginyeria en Sistemes i Tecnologia Naval

Barcelona, 6 de juliol de 2020

Departament d'Enginyeria de Sistemes, Automàtica i Informàtica
Industrial. Departament d'Enginyeria Elèctrica



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH

Facultat de Nàutica de Barcelona



Agraïments

Aquest projecte s'ha pogut realitzar amb èxit gràcies al treball i la col·laboració de moltes persones. A totes elles, volem dirigir un agraïment d'una manera molt sincera.

A la **Rosa M. Fernández** i al **Joan Nicolas Apruzzese**, els tutors del projecte, per haver confiat en la proposta inicial, ambiciosa però decidida, i haver acceptat la tasca de direcció amb compromís i il·lusió. Pel temps dedicat a guiar, aconsellar i acompanyar el projecte. Per ajudar a acotar on ha calgut però també deixar llibertat per innovar i provar d'arribar més lluny.

A les famílies del Joan i del Carles (**Joan, Patricia, Emili, Salvador, Anna, Júlia, Roser i Elisabet**), pel suport donat durant tot aquest procés i el consell. Per celebrar les fites d'èxit i també per fer de recolzament fonamental en els moments més complicats viscuts a les darreres etapes del projecte, animant-nos sempre a seguir endavant.

Al **Pere Vallès** i a la **Rosa Maria Elizalde**, pel seu interès i el seu seguiment proper del projecte. Pel suport, els ànims i la disposició a ajudar. També per facilitar-nos l'accés a alguns dels patrocinadors.

A la **M^a Carme Manich** i al **Ramon Ferrerons**, per ser suport moral, font de consell, acompanyament personal i molt més, durant tot aquest temps.

A l'**Ignasi Baltà** per la seva atenció i disposició a ajudar. Per la seva preocupació i entrega, desinteressada i modesta. I per la seva aportació imprescindible al projecte.

Al **Norbert Gelardo**, per la seva entrega i suport durant tot el període de feina al taller. Per la seva disponibilitat i servei generós davant qualsevol necessitat, fins i tot en moments difícils com l'accident del temporal Glòria, i pel tracte proper i modest amb les persones.

A l'**Edgar Martinez**, per l'ajuda i consells durant el procés d'acabat superficial del buc, els apèndixs, i la construcció de la coberta. També per la dedicació i entrega desinteressada, i per procurar sempre que les hores de taller no siguin un temps de pas fins acabar la feina, sinó una oportunitat per ensenyar i transmetre el coneixement, compartir la seva experiència i fer que l'altre esdevingui millor treballador.

Al **Feliu López**, director de l'Institut de Nàutica de Barcelona, per permetre l'accés del SenSailor a la drassana del centre i col·laborar en l'etapa final de construcció del vaixell.

Al **Marc Nicolás**, pel temps dedicat a donar un cop de mà amb les proves de navegació. Per les estones de treball compartides al taller de l'Espai Vela de la Facultat i per ser exemple d'entrega i dedicació a la feina encomanada.

Al **Biel Martorell**, per aportar els seus coneixements de disseny gràfic i crear el logotip que representa actualment el projecte SenSailor.

Al **Joan Segura** i al **Miquel Postigo**, per l'ajuda oferta en temes de programació del Sensailor.

Al **Jordi Mateu**, per permetre l'accés a l'espai vela com a lloc de treball a la fase de construcció. Pel seu consell i ajuda amb temes d'administració, i per la seva col·laboració en etapes concretes del projecte.

Al **José Luis Rodríguez**, pel seu consell, opinió i aportació d'eines per realitzar el disseny del laminat i dimensionament de l'estructura de reforç del buc.

Al **Vicenç Parisi** i al **Juan Manuel Moreno**, per la seva disponibilitat i consell per resoldre qüestions sobre la implementació d'un sistema de transmissió de dades. Encara que finalment no s'hagi implementat el sistema en aquest primer prototip, s'ha recollit la informació de cara a futures millores.

Al **Jose**, de la botiga RCtecnic, per confiar en el projecte i esdevenir el primer patrocinador. Pels components cedits gratuïtament per l'empresa i per l'impuls que ha donat al projecte el fet de comptar amb un primer sponsor.

A la **Viviane Pelletier**, responsable del negoci Velas Fonduco, per proporcionar gratuïtament material per la construcció de la vela, així com consells per la col·locació del folre.

Al **Carlos Núñez** i a tot l'equip de Ventus Electrónica Náutica, per confiar en l'èxit del projecte SenSailor abans de veure els resultats finals i cedir gratuïtament material d'electrònica imprescindible pel vaixell, així com consells sobre aspectes relacionats amb el seu camp de treball.

Al **Valentín Pérez** i tot l'equip de Boat Security, per voler-se unir al projecte SenSailor i contribuir en la seva millora, tot proporcionant gratuïtament els seus productes i serveis de Boat Track, per a la seguretat i vigilància de l'embarcació en temps real.

A la **Maria**, a l'**Anna** i a tot l'equip de l'Ateneu Fàbrica del Sol, per la seva gran disponibilitat i ajuda en la fabricació de peces 3D i vinils, i també pel bon tracte i interès pel projecte.

A l'**Àngela** i la **Vanessa**, per la gestió econòmica d'atorgament de la beca per l'ajuda de TFGs, imprescindible pel finançament i l'avanç del projecte. Per la constància i rigor amb la feina malgrat les dificultats del moment.

Al **Jordi Torralbo**, per cedir el taller de mecànica i les seves eines com a espai de treball després de l'accident del temporal Glòria.

A l'**Alvaro Soriano**, pel seu interès i motivació pel projecte. Per donar un cop de mà amb els seus coneixements de mecatrònica, i per voler unir-se al projecte SenSailor per explorar noves possibilitats i metes de cara al futur.

Al **Joan Guerrer**, per donar-nos el seu consell de fuster en l'àmbit de la construcció naval i ajudar-nos amb la construcció d'una de les parts estructurals més crítiques de l'orsa.

A les moltes altres persones que han donat suport al projecte.

Resum

Aquest projecte es centra en el disseny i construcció d'un veler autònom de 2 m d'eslora, capaç d'incorporar equipament científic, amb l'objectiu de facilitar l'accés de la ciència als mars i oceans i millorar així el seu estudi.

Al prototip desenvolupat en aquest projecte se li ha donat el nom de SenSailor, un mot compost entre les paraules *Sensor* i *Sailor* (*mariner* en anglès) i es tracta d'un dron marí de navegació superficial que segueix una ruta preestablerta i pot ser observat a temps real des d'una base terrestre. En aquest treball es descriu el procés de disseny i construcció d'aquest vehicle autònom i es mostra el procés seguit des del desenvolupament de la idea inicial fins l'avarada del vaixell.

La memòria conté un recull de prototips similars al SenSailor. A la part de disseny es presenta el procés seguit per dimensionar el buc i els apèndixs. Pel que fa a la propulsió, es fa una comparació de diferents alternatives viables, conclouent amb un disseny innovador adaptat a aquest cas particular. A continuació es fa una explicació del procés de disseny del sistema elèctric d'alimentació i de senyal, i s'explica amb detall el sistema de control automàtic de l'embarcació.

Posteriorment es presenta el procés de fabricació de totes les parts del vaixell fins al muntatge final de tots els components. Per acabar, es mostren els resultats de les proves de navegació del vaixell. També es fa un càlcul de pressupost del projecte presentant les despeses reals que s'han fet de material i una estimació de costos que caldria tenir en compte si es comercialitzés el producte.

Abstract

This project is focused on the design and construction of a 2 m long, autonomous vessel with the capacity of incorporating scientific equipment and sensors. The purpose of this boat is facilitate the realization of scientific operations at sea and thus improve the quality of the investigation projects.

The prototype developed in this project has been given the name *SenSailor*, a word composed between the words *Sensor* and *Sailor*. This is a surface navigation marine drone that follows a pre-established route and can be observed at real time from a ground base. This paper describes the design and construction process of this autonomous vehicle and shows the process followed from the development of the initial idea to the launching of the ship.

The report contains a collection of prototypes similar to the *SenSailor*. The design part presents the process followed to size the hull and the appendages. With regard to propulsion, a comparison of different viable alternatives is made, concluding with an innovative design adapted to this particular case. The following is an explanation of the design process of the electrical power and signal system, and the automatic control system of the boat is explained in detail.

Subsequently, the manufacturing process of all parts of the ship is presented until the final assembly of all components. Finally, the results of the ship's navigation tests are shown. A project budget calculation is also made presenting the actual material costs incurred and a cost estimate that should be considered if the product is marketed.

Prefaci

Quatre anys de carrera, 216 crèdits superats i moltes hores d'estudi invertides. Arribat a aquest punt del grau, tot estudiant d'enginyeria es troba amb l'última prova, la recta final d'una etapa on ha de posar en pràctica els seus coneixements adquirits i demostrar que l'aprenentatge li ha servit d'alguna cosa. No és pas una tasca fàcil encetar un treball d'aquesta magnitud a tan poques milles de la línia de meta. Però per a un estudiant amb ganes de seguir creixent com a enginyer, aquesta pot ser la ocasió d'aprendre i guanyar experiència en un tema que el motivi, centrant-se amb el que l'apassiona. Aquest és el nostre cas, dos estudiants del grau en Enginyeria en Sistemes i Tecnologia Naval de la Facultat de Nàutica de Barcelona que, moguts pel desig de fer del treball de fi de grau una experiència per créixer, vam decidir iniciar un projecte comú.

Al llarg del grau ens vam adonar de la importància de les classes teòriques i també de la componen indispensable que aporten les activitats pràctiques. Aquestes complementen el coneixement teòric i ajuden a retenir-lo millor dins la memòria, aportant, a més, un extra de motivació i ganes d'aprendre. Sovint, la quantitat de matèria que es vol impartir a nivell teòric ocupa la major part d'hores de docència i desplaça l'oportunitat de tocar amb les mans, de poder-se equivocar i rectificar. Per això, vam decidir iniciar un projecte que, a banda d'aportar-nos a nosaltres aquest equilibri entre la part teòrica i la pràctica, deixés una porta oberta perquè altres estudiants poguessin reprendre la nostra tasca i seguir impulsant un projecte moguts per la motivació del fer i l'aprendre.

L'enfocament inicial del treball per part dels dos va ser el mateix: un projecte d'enginyeria que fos assolible però que ens pogués fer passar per totes les etapes del procés, des del desenvolupament inicial d'una solució que respongués a una necessitat, fins a la construcció i posada en funcionament d'un producte. Un treball d'aquestes característiques, a més, obliga a posar en pràctica de manera combinada les diferents matèries apreses a la carrera i entendre així la importància i relació de totes elles. Amb les preferències i gustos de cada un de nosaltres cap a una matèria o una altra, però amb un desig comú de col·laborar conjuntament, vam decidir desenvolupar una proposta que teníem a un estat molt inicial i estudiar-ne la seva viabilitat.

La idea era ambiciosa: dissenyar des de zero i construir un vaixell capaç de navegar a vela de manera autònoma pel mar, que es pogués fer servir com a plataforma per recollir dades marines i atmosfèriques. Un tema que, a part de ser engrescador i desafiant estava orientat a contribuir en la lluita contra el canvi climàtic, prenent dades per observar la qualitat de l'ecosistema del planeta. La compenetració entre els dos membres de l'equip, amb el suport dels dos tutors, Rosa M. Fernández Cantí i Joan Nicolás Apruzzese, ha fet que la feina s'hagi pogut desenvolupar amb èxit i eficàcia. A més, s'han aconseguit col·laboradors externs que també han cregut en el projecte i han volgut aportar el seu gra de sorra per ajudar-nos amb el seu desenvolupament.

Poc ens esperàvem que el projecte ens faria aprendre tant, a nivell acadèmic i personal. La superació del temporal Glòria i les restriccions pel confinament de la pandèmia del Covid-19 van ser la prova final per ensenyar-nos que, davant els reptes i les dificultats, les alegries i les penes, dos remen més que un de sol. És així com un mallorquí de la Serra de Tramuntana i un català de Barcelona, d'orígens tant diferents i gustos tant complementaris, vam decidir posar en marxa una iniciativa que acabaria sent més que un TFG, que es transformaria en el Projecte SenSailor.



Figura 1. Logotip del projecte SenSailor. Font: dissenyador gràfic Biel Martorell.

Joan Antoni Sastre Caballol i Carles Manich Vallès

Barcelona, 6 de juliol de 2020

Taula de continguts

AGRAÏMENTS	III
RESUM	VII
ABSTRACT	VIII
PREFACI	IX
TAULA DE CONTINGUTS	11
LLISTAT DE FIGURES	16
LLISTAT DE TAULES	23
TAULA DE SÍMBOLS	25
<u>CAPÍTOL 1. INTRODUCCIÓ</u>	<u>27</u>
1.1. MOTIVACIÓ I CONTEXT	27
1.2. OBJECTIUS	30
1.3. ESTRUCTURA I ORGANITZACIÓ DE LA MEMÒRIA	30
<u>CAPÍTOL 2. DEFINICIÓ DE LES ESPECIFICACIONS</u>	<u>35</u>
2.1. ESPECIFICACIONS GENERALS DEL SENSAILOR	35
2.2. VAIXELLS DE REFERÈNCIA	37
2.3. NORMATIVA	45
<u>CAPÍTOL 3. DISSENY DEL BUC</u>	<u>47</u>
3.1. PARAMETRITZACIÓ DEL BUC	47
3.2. DISSENY DE CARENA	50
3.2.1. RESISTÈNCIA A L'AVANÇ	50
3.2.2. ADAPTACIÓ I OPTIMITZACIÓ DE FORMES	53
3.2.3. ESTUDI D'ESTABILITAT INICIAL	56
3.2.4. ESTABILITAT A GRANS ANGLES	58
3.3. DISSENY ESTRUCTURAL	59
3.3.1. DISTRIBUCIÓ DE L'ESTRUCTURA DE REFORÇ	60
3.3.2. EQUACIONS D'ESCANTILLONATGE I CÀLCUL DE GRUIX	64
3.4. ESTANQUITAT DEL BUC	73
3.4.1. JUNTA PERIMETRAL COBERTA-BUC	74
3.4.2. ENFOGONAMENT I COBERTA	75
3.4.3. ENCAIX DEL PAL A L'ENFOGONAMENT	76
3.4.4. ORIFICIS D'ENTRADA DELS CABLES DINS EL PAL	77
3.4.5. POSICIÓ DE TAPES DE REGISTRE I ANGLE D'INUNDACIÓ	78

CAPÍTOL 4. DISSENY DEL SISTEMA PROPULSIU 81

4.1. ELECCIÓ DEL MÈTODE DE PROPULSIÓ	81
4.2. ELECCIÓ DEL TIPUS DE VELA	82
4.2.1. VELA TRADICIONAL	82
4.2.2. VELA SEMIRÍGIDA	83
4.2.3. VELA RÍGIDA AMB PERFIL ALAR	84
4.3. ELECCIÓ DEL MÈTODE D'ACCIONAMENT	85
4.3.1. ACCIONAMENT PER ESCOTA I SERVO ENROTLADOR	86
4.3.2. ACCIONAMENT PER ESCOTA I MECANISME D'AUTOBLOCATGE	87
4.3.3. ACCIONAMENT PER ALERÓ	87
4.4. ESTUDI DEL PERFIL ALAR	91
4.4.1. PROCEDIMENT DE L'ESTUDI	92
4.4.2. RESULTATS DE L'ESTUDI	96
4.5. ESTUDI DE L'ALERÓ	97
4.6. DISSENY ESTRUCTURAL DE L'APARELL	102
4.6.1. ESTRUCTURA	103
4.6.2. CONTRAPÈS	105
4.6.3. PUNT DE PIVOT	106
4.7. MECANISME MOTOR DE L'ALERÓ	107

CAPÍTOL 5. DISSENY DELS APÈNDIXS 109

5.1. DISSENY DELS TIMONS I SKEGS	109
5.2. SUBJECCIÓ DELS TIMONS	111
5.3. DISSENY DEL PLA ANTIDERIVA	113
5.4. DISSENY DEL BULB DE L'ORSA	114
5.5. SUBJECCIÓ DE L'ORSA	119
5.5.1. UNIÓ A TOPALL	119
5.5.2. UNIÓ A TOPALL AMB ENCAIX	120
5.5.3. UNIÓ AMB CALAIX	121
5.6. BALANÇ CV-CD	122

CAPÍTOL 6. DISSENY DEL SISTEMA ELÈCTRIC 127

6.1. SISTEMA D'ALIMENTACIÓ	128
6.1.1. CÀLCUL DE LA INSTAL·LACIÓ FOTOVOLTAICA	129
6.1.2. CIRCUIT D'ALIMENTACIÓ	132
6.2. SISTEMA DE NAVEGACIÓ AUTOMÀTICA	133
6.2.1. SENSORS DE NAVEGACIÓ	133
6.2.2. CONTROLADOR DEL PILOT AUTOMÀTIC	137
6.2.3. SERVOMOTORS	137

6.3. SISTEMA DE RADIO CONTROL (RC)	140
6.3.1. FUNCIONAMENT	141
6.3.2. PROGRAMACIÓ DE L'EMISSORA	141
6.3.3. SISTEMA DE COMMUTACIÓ DEL MODE MANUAL/AUTOMÀTIC	142
6.4. SISTEMA DE PRESA DE DADES	143
6.4.1. FOTORESISTOR	144
6.4.2. SENSOR DE RAIGS ULTRAVIOLATS	145
6.4.3. SENSOR DE TEMPERATURA	145
6.4.4. DESA DE DADES	146
6.4.5. SISTEMA D'IL·LUMINACIÓ	146
6.4.6. ALIMENTACIÓ	147
6.5. CABLEJAT I CONNECTORS	147
6.5.1. CABLEJAT	147
6.5.2. CONNECTORS	149
CAPÍTOL 7. DISSENY DEL SISTEMA DE CONTROL	151
7.1. SISTEMA DE REGULACIÓ I CONTROL	151
7.1.1. BASES DEL CONTROL DE LA NAVEGACIÓ A VELA	152
7.1.2. EXPLICACIÓ DEL SISTEMA DE REGULACIÓ I CONTROL	156
7.2. PROVES DE SENYAL I CONSUM DELS SERVOS	158
7.2.1. ESTUDI DEL SENYAL PWM	159
7.2.2. ESTUDI DEL CONSUM	160
7.3. PROGRAMACIÓ DEL SISTEMA DE CONTROL	161
7.3.1. SENSORS DE NAVEGACIÓ	162
7.3.2. UNIÓ DEL CODI I CÀLCUL DEL RUMB	173
7.4. PROGRAMACIÓ DEL SISTEMA DE MESURES	181
7.4.1. SENSORS DEL SISTEMA I LA SEVA PROGRAMACIÓ	182
CAPÍTOL 8. CONSTRUCCIÓ DE L'EMBARCACIÓ	187
8.1. CONSTRUCCIÓ DEL MOTLLE	187
8.2. CONSTRUCCIÓ DEL BUC	190
8.3. CONSTRUCCIÓ DELS TIMONS	193
8.4. CONSTRUCCIÓ DE LA COBERTA	196
8.5. CONSTRUCCIÓ DE LA VELA	197
8.6. CONSTRUCCIÓ DE L'ORSA	200
8.6.1. PLA ANTIDERIVA	201
8.6.2. PLA DE SUBJECCIÓ	201
8.6.3. BULB	202
8.6.4. ACABAT SUPERFICIAL	206

8.7. ELEMENTS ESTRUCTURALS	207
8.7.1. REFORÇOS ESTRUCTURALS DEL BUC	207
8.7.2. CALAIX DE L'ORSA	209
8.7.3. SUPORT DE LA BATERIA	211
8.8. SENSORS EXTERIORS	212
8.8.1. SUPORT DE SENSORS	212
8.8.2. SENSORS DE LLUM	212
CAPÍTOL 9. PROVES DE FUNCIONAMENT	215
9.1. PROVES DE MAR I SISTEMA RÀDIO CONTROL	216
9.1.1. ESTABILITAT I ESTANQUITAT	216
9.1.2. FUNCIONAMENT DE LA VELA	217
9.1.3. PROVES DE NAVEGACIÓ	218
9.2. PROVES EN SEC DEL SISTEMA DE NAVEGACIÓ AUTOMÀTICA	220
9.3. NAVEGACIÓ AUTOMÀTICA AL MAR I RECOL·LECCIÓ DE DADES	223
CAPÍTOL 10. PRESSUPOST I FINANÇAMENT	225
10.1. PRESSUPOST	225
10.1.1. PRESSUPOST DE MATERIAL	226
10.1.2. PRESSUPOST DE LICÈNCIES DE PROGRAMA	227
10.1.3. PRESSUPOST DE PERSONAL	227
10.2. PLA DE FINANÇAMENT	229
10.2.1. CONVOCATÒRIA D'AJUTS PER A LA REALITZACIÓ DE TFG I TFM INNOVADORS, ANY 2019	229
10.2.2. PATROCINADORS	230
10.2.3. MICROMCENATGE	233
10.3. BALANÇ ECONÒMIC	234
CAPÍTOL 11. CONCLUSIONS I LÍNIES FUTURES	235
11.1. CONCLUSIONS	235
11.2. LÍNIES FUTURES	237
11.2.1. FUTUR ENFOCAT A FER TRAVESSES PER AIGÜES PROPERES	238
11.2.2. FUTUR ENFOCAT A LA COMPETICIÓ	238
BIBLIOGRAFIA I REFERÈNCIES	241
ANNEX I. GUIA DE L'USUARI DEL SENSAILOR	247
A 1.1. OPERACIONS HABITUALS	247

A 1.1.1. PRÀCTIQUES A TENIR EN COMPTE PER LA SEGURETAT I LA CURA DELS SISTEMES	248
A 1.1.2. MANIPULACIÓ DELS DISPOSITIUS DE L'INTERIOR DEL BUC	249
A 1.1.3. POSTA A PUNT I ENCESA	252
A 1.1.4. POSAR EL VAIXELL A L'AIGUA	252
A 1.1.5. TREURE EL VAIXELL A L'AIGUA	253
A 1.2. PROCÉS DE DESMUNTATGE DEL SENSAILOR	253
A 1.2.1. SUPORT DELS SENSORS SUPERIORS	254
A 1.2.2. APARELL	254
A 1.2.3. ALERÓ	255
A 1.2.4. CONTRAPÈS DE LA VELA	255
A 1.2.5. TIJA TRANSMISSORA DEL MOVIMENT SERVO-ALERÓ	255
A 1.2.6. COBERTA	255
A 1.2.7. ORSA	256
A 1.2.8. TIMONS	256
A 1.3. PROCÉS DE MUNTATGE DEL SENSAILOR	256
A 1.4. OPERACIONS DE MANTENIMENT	257
ANNEX II. PLANIFICACIÓ	259
<hr/>	
A.2.1. ESPIRAL DE PROJECTE	259
A.2.2. HORES DE DEDICACIÓ	260
A.2.3. TASQUES DEL PROJECTE I CRONOGRAMA	261
ANNEX III. DIAGRAMES DE FLUX	270
<hr/>	

Llistat de Figures

Figura 1. Logotip del projecte SenSailor. Font: dissenyador gràfic Biel Martorell.....	x
Figura 2. Boia oceanogràfica de Ports de l'Estat. Font [13]	29
Figura 3. Vaixell A-Tirma. Font [16].....	38
Figura 4. Vaixell Sailbuoy. Font [17]	39
Figura 5. Vaixell Force 12 Xplorer. Font [18]	40
Figura 6. Vaixell FASt. Font [20]	41
Figura 7. Vaixell Beagle B. Font [20].....	42
Figura 8. Vaixell Maribot Vane. Font: [9]	43
Figura 9. Vaixell Saildrone. Font: [21]	44
Figura 10. Vista de perfil del model "SmallYacht_1Surface". Font: pròpia.....	53
Figura 11. Vista posterior del model "SmallYacht_1Surface". Font: pròpia.	53
Figura 12. Eina transformació paramètrica. Font: pròpia	54
Figura 13. Eina Surf.Net, malla de punts de control de superfície. Font: pròpia.....	54
Figura 14. Silueta de perfil del buc amb representació del metacentre (KM_t), centre de flotació (CF), centre de carena (CB) i centre de gravetat (CdG). Proa a la dreta. Popa a l'esquerra. Font: pròpia	58
Figura 15. Corba de parells adreçadors GZ. Font: pròpia.....	59
Figura 16. Divisions dels panells de babord (B) i d'estribord (E). Font: pròpia.....	61
Figura 17. Disseny de coberta inicial amb laminat tipus monolític (esquerra) i coberta construïda finalment amb laminat tipus "Sandwich" (dreta). Font: pròpia.....	70
Figura 18. Reducció d'alçada (h) a l'extrem del reforç transversal del buc. Font: [24].	73
Figura 19. Solapaments de les capes del laminat d'un reforç de barret de copa. Font: [24].	73
Figura 20. Espai hermètic. Font: pròpia.	74
Figura 21. Secció transversal de la junta perimetral coberta-buc. Font: pròpia.....	75
Figura 22. Vista general de les juntes del buc amb la coberta. Font: pròpia.....	76
Figura 23. Secció transversal de la junta entre l'enfognament i la coberta. Font: pròpia.....	76
Figura 24. Secció de la junta hermètica entre l'enfognament i el pal. Font: pròpia.....	76
Figura 25. Pas superior de cables al pal, indicat amb una fletxa. A l'esquerra, el suport de sensors en perspectiva. A la dreta, un tall transversal de la mateixa peça. Font: pròpia.....	77
Figura 26. Pas de cables a mig pal. Font: pròpia.....	77

Figura 27. Vista en perspectiva de la coberta amb les tapes de registre i els cargols de les juntes. Font: pròpia.....	78
Figura 28. Escora de 95°. Els accessos de coberta es mantenen fora l'aigua. Font: pròpia.....	79
Figura 29. Aparell de Marconi. Font: [31].	83
Figura 30. Vela de monofil i sabres forçats. Font: [32].	84
Figura 31. Disseny de vela rígida de l'empresa Bound4blue. Font: [30].	85
Figura 32. Vista en planta de l'aparell amb l'aleró a 0°. Font: pròpia.....	88
Figura 33. Vista en planta de l'aparell. Acció de l'aleró i reacció de la vela. Font: pròpia.....	89
Figura 34. Vista en planta de l'aparell. Equilibri de moments. Font: pròpia.....	89
Figura 35. Vistes del sistema de regulació de l'aleró. Font: pròpia.	90
Figura 36. Rumbs estudiats a l'experiment. Font: pròpia.	92
Figura 37. Angles de vela estudiats a l'experiment. Font: pròpia.....	92
Figura 38. Descomposició de la força resultant amb l'eix de referència del vent. Font: pròpia.	94
Figura 39. Descomposició de la força resultant amb l'eix de referència del vaixell. Font: pròpia.	94
Figura 40. Gràfica de la resistència a l'avanç en funció de la velocitat. Font: pròpia.	96
Figura 41. Variació del centre de pressions en funció de l'angle d'atac del perfil. Font: pròpia.	98
Figura 42. Variació del coeficient de moment d'un perfil NACA 0015 en funció de l'angle d'atac. Font: pròpia.....	98
Figura 43. Relació proporcional d'angles entre vela i aleró. Font: pròpia.	100
Figura 44. Moment generat per l'aleró. Font: pròpia.	101
Figura 45. Esquema d'angles de la vela i aleró. Font: pròpia.....	102
Figura 46. Vista en perspectiva de l'estructura de reforç de l'aparell. Font: pròpia.	104
Figura 47. Vista lateral de l'estructura de reforç de l'aparell, amb punteres de PVC. Font: pròpia.	104
Figura 48. Reforç transversal de l'aleró. Font: pròpia.....	104
Figura 49. Reforç transversal de la vela. Font: pròpia.....	104
Figura 50. Reforç transversal de la vela amb extensió de suport de l'aleró. Font: pròpia.	105
Figura 51. Unió desmuntable del contrapès. Font: pròpia.	106
Figura 52. Sistema de bloqueig de la unió. Font: pròpia.....	106
Figura 53. Secció lateral del punt de pivot de la vela. Font: pròpia.	106
Figura 54. Vista en perspectiva del punt de pivot de la vela. Font: pròpia.....	106

Figura 55. Vista de l'estructura dels timons i skegs a través del buc. Font: pròpia	111
Figura 56. Sistema d'accionament dels timons. Font: pròpia.....	111
Figura 57. Subjecció articulada inferior del timó. Font: pròpia.	112
Figura 58. Detalls interns de la pala del timó. Font: pròpia.....	113
Figura 59. Frontissa desmuntable inferior del timó. Font: pròpia.....	113
Figura 60. Perfil NACA 63A-010. Font: [7].....	115
Figura 61. Esquema de secció transversal d'unió d'orsa desmuntable a topall. Font: pròpia.	120
Figura 62. Esquema de secció transversal d'unió d'orsa desmuntable a topall amb encaix. Font: pròpia.	121
Figura 63. Vistes en perspectiva de la unió desmuntable amb calaix. Font: pròpia.....	122
Figura 64. Tres casos de posició relativa entre CV i CD, i el seu efecte sobre l'embarcació. Font: pròpia.	123
Figura 65. Estimació del CD a partir del centre d'àrea lateral projectada i el mètode de Nomoto. Font: pròpia.....	124
Figura 66. Vista lateral del vaixell amb la posició estimada del CV i CD. També visibles els elements estructurals del buc. Font: pròpia.	125
Figura 67. Anemòmetre del SenSailor. Font: pròpia.....	134
Figura 68. Esquema simplificat de l'anemòmetre i el seu filtre. Font: pròpia.	135
Figura 69. Penell. Font: pròpia.	136
Figura 70. Esquema elèctric del funcionament intern del penell. Font: [36].....	136
Figura 71. Placa Arduino Uno. Font: pròpia.	137
Figura 72. Estat inicial del canvi d'angle d'aleró, de 0° a 24°. Font: pròpia.	138
Figura 73. Mòdul receptor. Font: pròpia.....	141
Figura 74. Emissora de ràdio control. Font: pròpia.....	142
Figura 75. Programa d'ajustament dels paràmetres de control de l'emissora. Font: pròpia. ..	142
Figura 76. Esquema de connexió dels relés. Font: pròpia.....	143
Figura 77. Circuit divisor de tensió utilitzat per detectar la claror ambiental. Font: pròpia.....	144
Figura 78. Exterior de la capsula d'electrònica. Font: pròpia.....	149
Figura 79. Interior de la capsula d'electrònica. Font: pròpia.	149
Figura 80. Connectors aeris. Font: [33].	149
Figura 81. Connectors de la capsula d'electrònica. Font: [34].	150
Figura 82. Esquema simplificat d'entrades i sortides del sistema de control. Font: pròpia.	152

Figura 83. Descomposició de la força resultant de la vela a una navegació de cenyida. Font: pròpia.	153
Figura 84. Comparació de la descomposició de forces entre una vela convencional (esquerra) i una vela amb aleró (dreta), amb vent portant. Font: pròpia.....	154
Figura 85. Rang de vent no desitjable per a la navegació, fixat al programa de control (zona gris). Font: pròpia.....	156
Figura 86. Exemple de navegació evitant les zones mortes. Virades sempre per proa. Font: pròpia.	156
Figura 87. Esquema del sistema de regulació i control. Font: pròpia.	156
Figura 88. Esquema del llaç de realimentació del control de <i>at</i> (angle timons). Font: pròpia.	157
Figura 89. Esquema simplificat de les entrades i sortides del control de l'aleró. Font: pròpia.	158
Figura 90. Gràfica del senyal PWM de control dels servos. Font: pròpia.	159
Figura 91: Dades en format NMEA. Font[62].....	162
Figura 92. Procés de construcció del buc. 1- Disposició dels panells transversals del motlle. 2- Inserció d'espuma de poliuretà i acabat superficial. 3- Laminació del buc. 4- Separació del buc i el motlle. Font: pròpia.....	188
Figura 93. Plantilles del motlle. Font: pròpia.	188
Figura 94. Muntatge de l'esquelet del motlle. Font: pròpia.	188
Figura 95. Vistes del procés d'aplicació d'espuma al motlle. Font: pròpia.....	189
Figura 96. Retirant l'accés d'espuma del motlle. Font: pròpia.	189
Figura 97. Últimes passades de paper de vidre a l'espuma del motlle. Font: pròpia.	189
Figura 98. Massillat. Font: pròpia.....	190
Figura 99. Aplicació de resina de polièster. Font: pròpia.....	190
Figura 100. Procés de laminat del buc. Font: pròpia.	190
Figura 101. Destrucció del motlle. Font: pròpia.....	191
Figura 102. Buc amb restes de l'espuma del motlle a l'interior. Font: pròpia.....	191
Figura 103. Aplicació de massilla i llimat a la superfície. Font: pròpia.....	192
Figura 104. Buc en diferents etapes del procés de massillat. A dalt, anterior; a baix, posterior. Font: pròpia.....	192
Figura 105. Buc amb imprimació aplicada. Font: pròpia.....	193
Figura 106. Buc amb pintura aplicada. Font: pròpia.	193
Figura 107. Perforació del buc per muntar els skegs. Font: pròpia.	193
Figura 108. mecanització de la pala del timó. Font: pròpia.	194

Figura 109. Skeg (esquerra) i timó (dreta). Font: pròpia.....	194
Figura 110. Mecanisme de direcció dels timons. Font: pròpia.	195
Figura 111. Inserció dels perns a l'extrem de l'skeg. Font: pròpia.....	195
Figura 112. Muntatge de la frontissa inferior dels timons. Font: pròpia.....	195
Figura 113. vista lateral del timó i skeg. Font: pròpia.	196
Figura 114. Vista posterior dels timons i skegs. Font: pròpia.	196
Figura 115. Fabricació del motlle amb poliuretà extruït. Font: pròpia.....	197
Figura 116. 2n intent de coberta. Font: pròpia.....	197
Figura 117. Nucli de niu d'abella. Font: pròpia.	197
Figura 118. 3r intent de coberta. Formes simplificades i material sandwich. Font: pròpia.	197
Figura 119. Perfilant els reforços horitzontals de la vela. Font: pròpia.	198
Figura 120. Muntatge de l'estructura de la vela. Font: pròpia.	198
Figura 121. Encolat de les làmines de PVC al costat frontal de l'aleró (esquerra) i la vela (dreta). Font: pròpia.....	199
Figura 122. Estructura de l'aparell abans (esquerra) i després (dreta) de la instal·lació del folre. Font: pròpia.....	199
Figura 123. Unió dels medallons amb massilla. Font: pròpia.	200
Figura 124. Parts de l'orsa. Font: pròpia.	201
Figura 125. Mecanització del perfil al pla antideriva. Font: pròpia.	201
Figura 126. Pla antideriva. Font: pròpia.....	201
Figura 127. Sistema d'unió entre el pla antideriva i el pla de subjecció de l'orsa.	202
Figura 128. Model del bulb a escala 1:1 fabricat amb impressora 3D. Font: pròpia.	203
Figura 129. Modelat virtual del motlle per la fosa de plom.....	204
Figura 130. Contramotlle de la part superior. Font: pròpia.....	204
Figura 131. Passos de la construcció del motlle. 1- Elaboració de la 1a part del motlle. 2- Separació del contramotlle de la 1a part. 3- Elaboració de la 2a part calcant el relleu de la 1a. 4- Retirar el model de PLC i tancar el motlle per abocar-hi la fosa de plom. Font: pròpia.....	205
Figura 132. Bulb de plom fabricat a partir de fosa. Font: pròpia.....	206
Figura 133. vista frontal del llast. Font: pròpia.	206
Figura 134. Vista inferior del llast, on s'aprecien els cargols de subjecció. Font: pròpia.	206
Figura 135. Procés d'acabat superficial. 1- Laminat. 2- Massillat. 3- Imprimació. 4- Pintat. Font: pròpia.	207

Figura 136. Laminació dels reforços. Font: pròpia.....	208
Figura 137. Reforços estructurals del calaix i mampara de col·lisió. Font: pròpia.....	209
Figura 138. Construcció del calaix de l'orsa. Font: pròpia.	210
Figura 139. Instal·lació del calaix dins el buc. Font: pròpia.....	210
Figura 140. Instal·lació de l'enfognament soldat a popa del calaix de l'orsa. Font: pròpia....	211
Figura 141. Suport de la bateria. Font: pròpia.	211
Figura 142. Suport de l'electrònica de dalt del pal. Font: pròpia.....	212
Figura 143. Sensors de llum exteriors protegits dins un bloc de resina d'epòxid. Font: pròpia.	213
Figura 144. Avarada del SenSailor. Font: pròpia.....	215
Figura 145. Proves d'estabilitat i estanquitat. Font: pròpia.....	217
Figura 146. Proves de funcionament de la vela i l'aleró. Font: pròpia.	218
Figura 147. Proves de navegació amb el sistema de control remot. Font: pròpia.	219
Figura 148. Proves de navegació amb el sistema de control remot. Font: pròpia.	220
Figura 149. Vista superior de la placa electrònica base. Font: pròpia.	220
<i>Figura 150. Vista inferior de la placa electrònica base. Font pròpia.</i>	<i>220</i>
Figura 151. Taller afectat per l'impacte de les onades del temporal Glòria. Font: pròpia.	221
Figura 152. SenSailor recuperat del taller després del temporal Glòria. Font: pròpia.	221
Figura 153. Verificació de les funcions del programa de control al vestíbul de la Facultat de Nàutica de Barcelona. Font: pròpia.	222
Figura 154. Diagrama circular amb les despeses de material. Font: pròpia.	226
Figura 155. Diagrama circular del pressupost total. Font: pròpia.....	229
Figura 156. Logotip de l'Institut de Nàutica de Barcelona. Font: [39].	233
Figura 157. Logotip de l'empresa Boat Security. Font: [40].	233
Figura 158. Logotip de l'empresa Ventus Electrónica Náutica. Font: [41].	233
Figura 159. Logotip de l'empresa Velas Fonduco. Font: [42].	233
Figura 160. Logotip de l'empresa RCTecnic. Font: [43].	233
Figura 161. Logotip de l'Ateneu de Fabricació la Fàbrica del Sol. Font: [44].	233
Figura 162. Volum prismàtic necessari per al transport del buc. Font: pròpia.....	254
Figura 163: Codi del pilot automàtic	270
Figura 164: Vent local a global. Bloc 1	271

Figura 165: Diferència entre el rumb cap al waypoint (rumb directe) i el vent. Bloc 2	272
Figura 166: Diferència entre el rumb oposat cap el waypoint (rumb directe) i el vent. Bloc 4	273
Figura 167: Elecció del rumb referència. Bloc 5.....	274
Figura 168: Càlcul de l'error. Bloc 6	275
Figura 169 Càlcul de la diferència entre el rumb actual i el vent (oposat). Bloc 7.....	276
Figura 170: Definició de l'angle dels timons. Bloc 8.....	277
Figura 171: Elecció de l'angle del timó de vent. Bloc 9.....	278
Figura 172: Funció penell	279
Figura 173: Funció magnetòmetre.....	280
Figura 174: Funció lectura I ² C.....	281
Figura 175: Funció escriptura I ² C	282

Llistat de Taules

Taula 1 Comparativa de vaixells autònoms cercats. Font: pròpia.	44
Taula 2. Rang de valors necessaris per l'anàlisi de Rr mitjançant Delft. Font: [26]	55
Taula 3. Coeficients de la fórmula de Delft obtinguts. Font:[27].....	55
Taula 4. Valors obtinguts de Cp i LCB . Font: pròpia.	55
Taula 5. Dimensions principals del buc. Font: pròpia.	55
Taula 6. Paràmetres de Delft Font: pròpia.....	55
Taula 7. Comparació de R_{total} (resistència total a l'avanç) a diferents velocitats, entre el model escollit de Maxsurf (SmallYacht_1Surface) i el buc transformat (SenSailor). Font: pròpia.	56
Taula 8. Distribució general de pesos. Font: pròpia.....	57
Taula 9. Característiques hidrostàtiques en diferents calats. Font: pròpia.	58
Taula 10. Dimensions principals del vaixell. Font: pròpia.	61
Taula 11. Dimensions dels panells. Font: pròpia.....	62
Taula 12. Pressions en els panells. Font: pròpia.	63
Taula 13. Pressions de costat. Font: pròpia.	64
Taula 14. Contingut en massa de fibra de vidre. Font: [24].....	65
Taula 15. Continguts en massa i gruixos. Font: pròpia.	66
Taula 16. Factors k_2 i k_3 . Font: [24]	66
Taula 17. Factor k_c . Font: [24]	67
Taula 18. Gruix dels panells. Font: pròpia.....	67
Taula 19. Capes i gruix de la fibra. Font: pròpia.....	67
Taula 20. Factors de gruix mínim. Font: [24]	68
Taula 21. Massa de fibra per m^2 . Font: pròpia.....	68
Taula 22. Augment del gruix per complir amb la massa mínima per m^2 . Font: pròpia.	69
Taula 23. Combinació de fibra definitiva. Font: pròpia.....	69
Taula 24. Factor de reducció k_{CS} Font: [24]	71
Taula 25 Factor k_{SA} . Font: [24].....	71
Taula 26. Tensions de disseny del material Font: [24]	71
Taula 27. Resultats de les equacions (23)(24)(25). Font: [24].....	72
Taula 28. Propietats dels reforços de barret de copa. Font: [24].	72

Taula 29. Dades de l'aire considerades a l'estudi. Font: pròpia.	99
Taula 30. Resum de paràmetres principals de la vela i l'aleró. Font: pròpia.	99
Taula 31. Distribució de masses considerada a la 1a aproximació del dimensionament del llast. Font: pròpia.	116
Taula 32. Resultats del càlcul de la força resultant transversal (FRT) de la vela a un vent de 25 kn i una escora màxima desitjada de 40º. Font: pròpia.	116
Taula 33. Contribució del vent a l'escora. Font: pròpia.	116
Taula 34. Resultats del càlcul de moments de les masses considerades a la 1a aproximació del dimensionament del llast. Font: pròpia.	117
Taula 35. Resultat de la 1a aproximació del dimensionament del llast. Font: pròpia.	117
Taula 36. Distribució de pesos del vaixell considerada al darrer càlcul de dimensionament del llast. Font: pròpia.	118
Taula 37. Càlcul de consums estimats. Font: pròpia.	129
Taula 38. Informació referent a la radiació solar a Barcelona al llarg de l'any. Font: [29].	130
Taula 39: Càlcul de potència i superfície de panells fotovoltaics necessaris per subministrar l'energia necessària. Font: pròpia.	131
Taula 40. Tensions d'alimentació dels components electrònics. Font: pròpia.	132
Taula 41. Resultats de l'estudi de moments de l'aleró i servomotor en diverses situacions. ..	139
Taula 42. Resultats dels experiments. Informació del senyal PWM corresponent a diferents angles del braç del servo. Font: pròpia.	160
Taula 43: Resultats de l'experiment. Consum dels servos a diferents parells aplicats. Font: pròpia.	161
Taula 44. Despeses de material (en €). Font: pròpia.	226
Taula 45. Pressupost de llicències (en €). Font: pròpia.	227
Taula 46. Pressupost de personal. Font: pròpia.	228
Taula 47. Pressupost total (en €). Font: pròpia.	229
Taula 48. Balanç econòmic real del projecte (en €). Font: pròpia.	234
Taula 49. Llistat de tasques ordenades per categories. Font: pròpia.	263
Taula 50. Tasques del projecte ordenades cronològicament. Font: pròpia.	265

Taula de símbols

Coefficients i variables

R_t : resistència a l'avanç d'un vaixell, definida a l'equació (1).

R_f : resistència viscosa, definida a l'equació (1).

R_r : resistència residual, definida a l'equació (1).

C_f : coeficient adimensional de fricció, definit a l'equació (3).

WSA : superfície total mullada d'un vaixell.

ρ : densitat del fluid.

v : velocitat del vaixell.

Rn : número de Reynolds, definit a l'equació (4).

∇ : volum de carena.

C_p : coeficient prismàtic. Tant per 1 del volum ocupat per tros de buc submergit dins un prisma d'igual eslora calat i màniga.

LCB : posició longitudinal del centre de carena.

Bwl : màniga en línia de flotació.

Tc : calat.

Lwl : eslora en flotació.

Fn : número de Froude.

L_H : Eslora màxima

B_H : Màniga màxima

B_C : Màniga del pantoc

m_{LDC} : Desplaçament amb càrrega nominal

P_{BS} : pressió als panells de fons, calculada pel dimensionament del gruix del buc. Definida a l'equació (9).

P_{SS} : pressió als panells de costat, calculada pel dimensionament del gruix del buc. Definida a l'equació (13).

P_{DS} : pressió als panells de coberta, calculada pel dimensionament del gruix de la coberta. Definida a l'equació (16).

t : gruix del laminat. Definit a l'equació (19).

w : massa de la fibra per m^2 .

Ψ : massa del contingut de fibra de vidre en el laminat (massa seca de fibra dividit per la massa de fibra més resina).

A_w : superfície de cisalla o de l'àrea de secció transversal. Definida a l'equació (23).

SM : mòdul d'inèrcia. Definit a l'equació (24).

Paraules tècniques de programació

I²C: protocol de comunicació basat només en dos fils. Es configura un dispositiu com a *master* i la resta com *slaves*.

Adreça (Electrònica): es refereix al nom que es dona a dispositius, registres de memòria, etc. S'utilitza per poder identificar-los dins la programació.

Array: tipus de variable té com a característica el poder ajuntar més d'una posició de memòria, fent possible guardar més d'un valor dins.

Convertidor ADC: Convertidor que transforma una senyal analògica a una digital.

Bouncing: fenomen que ocorre sovint quan es canvia l'estat d'un interruptor. Quan es tanca o s'obre, durant uns instants, l'interruptor "rebota", creant una senyal fluctuant.

Interrupció externa: en electrònica, s'utilitza per a programar un esdeveniment mitjançant un canvi d'estat que prové de l'exterior del circuit i xip.

I/O pin: manera abreujada de nombrar un pin que pot funcionar com entrada o com sortida (Input/Output).

Uin8_t: variable on es pot guardar un nombre enter amb un màxim de 8 bits.

Uin16_t: variable on es pot guardar un nombre enter amb un màxim de 16 bits.

Capítol 1. Introducció

El primer capítol de la memòria té la finalitat de posar en context la temàtica d'aquest treball i descriure les bases sobre les que s'ha fonamentat el seu desenvolupament. El capítol s'estructura de la següent manera. A l'apartat 1.1 es descriu la motivació que ha conduït a desenvolupar aquest projecte. S'exposa una necessitat real existent en el sector de la investigació marina i s'explica la solució que es vol aportar. A la secció 1.2 es descriuen els objectius del projecte. Al punt 1.3 s'explica la metodologia que s'ha seguit i la planificació de les tasques de treball. Finalment, a l'apartat 1.4, es fa una breu descripció de l'estructura d'aquesta memòria resumint els capítols de cada capítol.

1.1. Motivació i context

Necessitat d'estudiar el medi marí

Durant els darreres dècades, s'ha fet evident que l'impacte de l'home sobre la Terra ha comportat canvis en l'equilibri que estava establert per la naturalesa. Per trobar la causa d'aquestes alteracions i preveure el seu comportament, ha sorgit la necessitat de recollir informació de l'estat de diferents ambients com són el marí i l'atmosfèric, dades que representen un bon indicador per mesurar la qualitat de l'ecosistema del planeta. Alguns d'aquests indicadors poden ser, per exemple, l'altura de les onades, la temperatura de l'aigua i de l'aire, la radiació solar que arriba a la superfície terrestre o el moviment d'espècies migratòries.

Un 71% de la superfície de la Terra està coberta d'aigua, mentre que el 29% restant representa massa continental. Aquesta dada explica que per conèixer els efectes que s'estan produint actualment degut al canvi climàtic s'hagi d'estudiar, per força, el medi aquàtic. Precisament aquest és l'entorn més inaccessible i desconegut per l'ésser humà, amb la qual cosa per prendre dades s'ha de recórrer a mitjans que tenen un cost elevat.

Pros i contres dels vaixells oceanogràfics tripulats

Un dels sistemes més útils per estudiar l'entorn marí són els vaixells oceanogràfics, equipats amb multitud de sensors, i instruments per estudiar una varietat molt gran d'aspectes relacionats tant amb el mar com amb l'atmosfera. A ells s'hi embarquen equips de científics experts en els diferents camps que es volen estudiar i es dediquen exclusivament a dur a terme les tasques de recerca pel que s'ha destinat la missió del vaixell. El govern de la nau va a càrrec

de la tripulació, un altre equip humà embarcat exclusivament per fer aquesta tasca. Les missions que es duen a terme són normalment de llarga durada amb la intenció d'amortitzar el viatge i la inversió econòmica realitzada.

Tots aquests aspectes fan que la opció dels vaixells oceanogràfics sigui probablement la més versàtil, ja que permet traslladar els laboratoris i els equips especialitzats al lloc físic on es vol realitzar la investigació. Malgrat això, aquesta opció representa una despesa econòmica molt important que pot representar limitacions en els estudis a realitzar. Per una banda, el cost d'una embarcació d'aquestes característiques representa una inversió inicial costosa. L'enginyer naval A. Rodríguez mostra al seu projecte *Buque oceanográfico de 7.000 T* [1] un pressupost desglossat de la construcció d'una embarcació d'aquest tipus, on s'indica una xifra total de 82.483.980 €, que es podria elevar fins a 140 milions, depenent del vaixell. Per preparar l'embarcació per a una missió s'hi haurien d'afegir altres despeses com el preu del combustible i el manteniment.

Un altre aspecte a tenir en compte és el cost que suposa mantenir persones a bord d'un vaixell. Els sou, les provisions, el confort i les mesures de seguretat i sanitat, entre altres, representen una part important de les despeses d'un projecte d'aquestes característiques. D'altra banda, cal considerar l'elevat risc que representa la vida a alta mar, i més si es tracta de llocs on les condicions climàtiques són adverses. S'estima que el cost per dia d'un vaixell oceanogràfic un cop en operació és de 90.600 €, aproximadament, segons la pàgina web oficial de Saildrone [2].

Pros i contres de les boies oceanogràfiques

Però els vaixells oceanogràfics no són l'única opció que existeix per estudiar els mars i oceans. Existeixen algunes alternatives, com per exemple les boies científiques (Figura 2). Aquestes, són artefactes flotant que estan fixats al fons marí per mitjà d'un cable i s'equipen amb una gran varietat de sensors que permeten prendre mesures com ara la direcció i intensitat del vent, la pressió i temperatura atmosfèrica, la temperatura de l'aigua, l'altura i direcció de les onades i la salinitat del mar, entre altres. Tenen la limitació de ser estàtiques i no poder-se dirigir a un punt en concret allunyat de la costa. A més, no permeten fer experiments tant complexos com els dels vaixells oceanogràfics. Tot i això, una flota de boies distribuïdes a una zona ampla del mar poden aportar una informació molt útil que complementa les mostres preses amb vaixells oceanogràfics.

Segons una notícia publicada a El País [3], a la xarxa de boies espanyoles desplegada entre 1998 i 1998, equiparable a la d'altres països, cada boia costa uns 300.000 €, i el manteniment anual de la xarxa, 2 milions a l'any. Aquest preu, molt més baix que el cost d'una sola expedició oceanogràfica, explica que la recollida d'algunes dades sigui molt més rendible prendre-les mitjançant boies que amb vaixells. Però la limitació més gran d'aquesta solució és el fet que la seva posició sigui estàtica i preferentment propera a la costa. Això implica que, degut a la dificultat que suposa prendre mesures de manera permanent a llocs remots dels oceans, es perdi una gran quantitat d'informació que seria essencial per estudiar el planeta.



Figura 2. Boia oceanogràfica de Ports de l'Estat. Font [13]

La solució dels vaixells oceanogràfics autònoms

La necessitat a la qual respon aquest treball és poder disposar d'un mitjà que faciliti al màxim la presa de mesures a alta mar i que, a la vegada no suposi un cost elevat i un perill per les persones. La opció ideal per cobrir aquesta demanda consistiria en un artefacte que, sense necessitat de dur persones a bord, fos capaç de navegar de manera autònoma fins el punt on es volgués fer l'estudi i romandre-hi el temps necessari per tal de prendre les mesures d'interès. En definitiva, la solució es basa en un dron marí de navegació superficial. De fet, estudiant la viabilitat d'aquesta solució s'ha trobat una empresa americana de nom *Saildrone* [2] ja avançada en aquest camp, que té el pla de distribuir una flota de més de 1000 drons per tot el planeta que recullin informació de manera simultània i que facilitin l'estudi de les zones més remotes.

La intenció d'aquest treball és aprofundir en la investigació d'aquesta solució i demostrar la seva viabilitat mitjançant la fabricació d'un prototip propi i econòmic. Es vol dissenyar una embarcació capaç de navegar autònomament amb un màxim de 60 milles nàutiques de terra i unes condicions meteorològiques de nivell 6 a l'escala de Beaufort. L'equipament electrònic d'aquest primer prototip no buscarà la màxima eficiència i precisió en la presa de dades sinó demostrar que es pot fer navegar una embarcació amb equips que no siguin d'última generació. Un cop es demostrï que el sistema és operatiu, s'acceptarà la millora dels seus sistemes per tal d'optimitzar les seves funcions.

1.2. Objectius

En plantejament d'aquest treball s'ha fet en base a quatre objectius principals que responen a la solució que es vol donar al la necessitat esmentada a l'apartat anterior. S'han desglossat els objectius principals en altres de més específics per encarar les diferents tasques que componen el treball.

- 1. Dissenyar i construir una embarcació capaç de navegar de manera autònoma a alta mar.**
 - Investigar les condicions de navegació i determinar les especificacions del vaixell vetllant per la seguretat, l'autonomia i el medi ambient.
 - Aconseguir una autonomia que garanteixi un temps de funcionament sense recàrrega superior a 24 hores.
 - Adaptar el disseny i el mètode de construcció a les possibilitats existents, tenint en compte l'experiència, el pressupost, el temps i el lloc de treball.
- 2. Capacitar l'embarcació per tal que pugui prendre mesures meteorològiques i marines útils per a la investigació.**
 - Fabricar un primer prototip utilitzant una tecnologia de sensors econòmicament assequible, sense buscar una alta qualitat, per demostrar el funcionament del sistema.
 - Capacitar l'embarcació per equipar-la amb dispositius de més precisió de cara a un futur.
- 3. Crear un primer prototip des d'on es pugui seguir la recerca i ampliar les seves funcions.**
 - Crear un prototip no ideal però sí funcional.
 - Deixar explicades futures millores que es podrien fer de cara a la següent volta de l'espiral de projecte per donar-li continuïtat i que serveixi perquè altres estudiants puguin experimentar un treball amb basant teòrica i pràctica.
- 4. Participació en regates**
 - Possibilitat de participar en regates de navegació autònoma en versions posteriors del prototip, el que significa construcció robusta i duradora.

1.3. Estructura i organització de la memòria

En aquest apartat es mostra un recull dels capítols en els quals s'ha dividit la memòria, juntament amb una breu descripció del contingut que es troba a cada un d'ells. D'aquesta manera, s'ofereix al lector la possibilitat d'assolir una visió global de la memòria amb poques línies.

Capítol 1. Introducció

Al capítol 1 s'introdueix la memòria. S'explica la raó d'aquest projecte i s'exposen els objectius que es volen assolir amb aquest treball. També es fa una breu descripció de la metodologia del projecte així com les seves fases i el temps de dedicació.

Capítol 2. Definició de les especificacions

Al capítol 2 es defineixen les especificacions del projecte. S'exposen les característiques bàsiques de funcionament que ha de tenir el vaixell per complir amb la tasca pel qual es dissenya, que seran les que, més endavant, serviran per orientar el disseny de cada part. També s'exposen una sèrie de vaixells dissenyats amb finalitats similars, els quals s'han pres com a referència per iniciar el disseny de la primera volta a l'espiral de projecte. Finalment s'explica la normativa utilitzada per fer els càlculs de dimensionament del buc i l'estructura de reforç.

Capítol 3. Disseny del buc

Al capítol 3 s'explica el procés de disseny del buc. S'inicia amb la definició dels paràmetres principals de forma del cos de l'embarcació, seguit del disseny de carena i la seva optimització. Posteriorment es parla de l'estudi d'estabilitat inicial del buc. A continuació explica el disseny de l'estructura de reforç i els seus càlculs de dimensionament i, finalment, detalla els mètodes que s'ha dissenyat per garantir la completa estanquitat a l'interior del buc.

Capítol 4. Disseny del sistema propulsiu

Al capítol 4 es parla del disseny del sistema propulsiu. S'inicia explicant els motius pel qual s'ha escollit la propulsió eòlica en front de l'elèctrica. A continuació s'exposen les diferents alternatives valorades per tal d'elegir el tipus de vela i el mètode d'accionament, i s'expliquen els motius de la decisió finalment optada. Seguidament es mostren els càlculs efectuats per escollir el perfil alar més idoni per la vela rígida i els realitzats per estudiar el comportament de l'aleró. Finalment s'explica el disseny estructural de l'aparell i el mecanisme encarregat d'accionar l'aleró.

Capítol 5. Disseny dels apèndixs

Al capítol 5 es parla del disseny dels apèndixs. En primer lloc s'explica el disseny dels timons i *skegs* i la subjecció d'aquests elements a l'estructura del buc. A continuació es mostra el disseny de l'orsa dividit en tres parts: el pla antideriva, el pla de subjecció i el bulb. Seguidament s'explica el mètode de subjecció desmuntable de l'orsa amb el buc i l'estructura de reforç disposada per repartir els esforços produïts en aquesta zona. Finalment s'explica la posició longitudinal dels apèndixs al buc que, en relació amb la posició de la vela, està pensada per garantir una bona estabilitat de rumb durant la navegació.

Capítol 6. Disseny del sistema elèctric (maquinari)

Al capítol 6 s'introdueix la part del disseny del sistema elèctric referent al maquinari. Presenta el dimensionament del sistema d'alimentació, pensat per garantir un subministrament elèctric autònom que permeti a l'embarcació tenir una autonomia suficient per dur a terme les tasques d'investigació. També s'expliquen els elements que formen el sistema elèctric de navegació autònoma i el de navegació a control remot, així com el sistema de commutació entre un mode l'altre, a distància.

Capítol 7. Disseny del sistema de control (programari)

El capítol 7 es centra en el disseny del controlador, a nivell de programari. S'explica el sistema de regulació i control i les condicions amb què es basa el programa per determinar l'angle dels diferents servos en funció de la situació instantània del vaixell. També s'explica el funcionament dels servos i es mostra un experiment realitzat per provar el corrent de consum i el senyal de control que utilitzen els servos digitals. Finalment s'explica detalladament el codi del programa de control.

Capítol 8. Construcció de l'embarcació

Al capítol 8 s'explica el procés constructiu del vaixell amb un ordre més o menys cronològic. S'estructura amb 8 seccions que separen les fases principals. Així doncs, s'explica la construcció del motlle, buc, timons, coberta, vela, orsa, elements estructurals i elements de suport del sistema de presa de dades. També s'expliquen les tècniques constructives i els materials de fabricació utilitzats.

Capítol 9. Proves de funcionament

El capítol 8 explica les proves que s'han realitzat per verificar el funcionament de l'embarcació. Algunes d'elles s'han dut a terme amb el vaixell fora de l'aigua i altres al mar. També s'expliquen algunes incidències que han ocorregut de manera externa al projecte i que han interromput inevitablement algunes de les tasques d'aquesta fase de manera temporal.

Capítol 10. Pressupost i finançament

El capítol 9 reuneix la part econòmica del projecte. Primerament, es fa un càlcul de pressupost del projecte. S'exposen les despeses de material que s'han realitzat i fa una predicció del cost total que tindria el projecte si es fes amb fins comercials, tenint en compte les llicències de programes i sous de treballadors. A continuació es mostra el pla de finançament que s'ha seguit per compensar les despeses de material del projecte, i finalment es mostra el balanç econòmic.

Capítol 11. Conclusions i línies futures

Al capítol 11 es fa un recull de les conclusions extretes del projecte. També s'explica, partint del punt on s'ha arribat amb aquest treball, quines són les possibles ampliacions que es poden realitzar per seguir desenvolupant el projecte i millorar les seves prestacions. Aquesta memòria ha sigut realitzada amb l'objectiu que tot el coneixement generat amb el projecte quedi documentat, de tal manera que, en un futur, serveixi com a guia per altres persones que el desitgin ampliar o que treballin en un projecte de característiques similars.

Annex I. Guia de l'usuari

L'annex I és un manual que reuneix tot el coneixement que requereix l'usuari per realitzar les labors bàsiques del vaixell. La lectura completa d'aquest manual és imprescindible per a tota persona que vulgui utilitzar l'embarcació, per tal de fer-ne un bon us i garantir-ne el manteniment. Les indicacions donades en aquest manual són solament a nivell d'usuari. Per conèixer detalls d'aspecte tècnic cal consultar la memòria.

En aquest annex s'especifica el mètode per realitzar algunes operacions habituals com l'encesa del sistema elèctric, la manipulació dels dispositius i les maniobres d'avarada entre altres. També detalla aspectes importants a tenir en compte a l'hora de fer servir l'embarcació, en diferents situacions. A continuació, s'explica el procediment de muntatge i desmuntatge de l'embarcació i les operacions bàsiques de manteniment.

Annex II. Planificació

L'annex II és una extensió de l'apartat 1.3 de la memòria (Metodologia i planificació). En ell s'hi mostra el llistat de tasques del projecte, ordenat per temàtiques i en ordre cronològic. A continuació es mostra un diagrama de Gantt que representa de manera gràfica la distribució d'aquestes tasques al llarg del temps.

Annex III. Diagrames de flux

L'annex III és un recull dels diagrames de flux d'algunes parts del programa, les quals necessiten una explicació més visual per a entendre millor el funcionament.

Annex IV. Plànols i esquemes

L'annex IV és un recull de plànols d'acotació i de muntatge de totes les parts que s'han considerat essencials explicar.

Capítol 2. Definició de les especificacions

El SenSailor és una embarcació única. Encara que no sigui el primer vaixell autònom que s'hagi concebut a la història, té una sèrie de característiques que el fan diferent a tots els altres, a nivell funcional, constructiu, d'ús i en altres àmbits. Cal destacar que no és una embarcació feta per l'encàrrec d'un client i, per tant, el seu disseny no segueix uns criteris marcats per unes pautes. Tot i estar orientat a uns objectius concrets, el marge de flexibilitat a l'hora de determinar els paràmetres constructius principals és immens. Per això, el primer pas que s'ha fet abans d'iniciar el seu disseny ha estat definir el conjunt d'especificacions bàsiques que ha de complir l'embarcació.

A banda d'aquestes especificacions, també s'ha fet una recerca d'altres factors que ajudin a acotar els paràmetres principals del vaixell a la primera volta del projecte. A partir d'aquí, s'han anat ajustant la resta de característiques que el componen en fases posteriors del disseny. Un d'aquests factors ha sigut, per exemple, l'experiència d'altres dissenyadors que s'hagin enfrontat amb problemes a resoldre similars als que planteja la construcció d'aquest prototip. Altres factors són les limitacions imposades o recomanades per les normatives, que acoten els paràmetres de disseny en base a un estudi previ i uns factors de seguretat.

Aquest capítol s'estructura de la següent manera. A la secció 2.1 s'exposen les especificacions del vaixell a diversos nivells, tant pel que fa a les funcions del prototip i la seva navegació com per la viabilitat, que permeti realitzar el projecte fins el final. En segon lloc, a 2.2, es mostren els vaixells que s'han pres com a referència, entre els quals s'ha fet una comparació per veure quines característiques s'ajusten més al dron del projecte. Finalment, l'apartat 2.3 explica la normativa que s'ha seguit per acotar el dimensionament de certes parts i assegurar-se que l'estructura és fiable.

2.1. Especificacions generals del SenSailor

El SenSailor és una embarcació concebuda per navegar automàticament impulsat per la força del vent, amb l'objectiu de recollir dades meteorològiques i marines a mar obert. Per dissenyar el vaixell s'han definit una sèrie d'especificacions que descriguin les característiques bàsiques necessàries per dur a terme la seva tasca principal. A continuació es mostra un llistat d'aquestes

especificacions, agrupades per les temàtiques *autonomia*, *condicions de navegació*, *prestacions*, *construcció* i *viabilitat*.

Autonomia

- **Navegació automàtica:** L'embarcació ha de ser capaç de navegar de manera automàtica sense rebre assistència externa. Per aquest motiu, és imprescindible garantir la fiabilitat de tots els sistemes del vaixell, així com de la pròpia estructura que conforma el buc, apèndixs i aparell.
- **Autosuficiència energètica:** El sistema d'alimentació ha de ser capaç de subministrar energia als altres sistemes del vaixell de manera permanent. És a dir, ha de tenir capacitat d'obtenir-la i emmagatzemar-la de manera autosuficient.

Condicions de navegació

- **Navegació a mar obert:** Les condicions del mar a les quals estarà sotmesa l'embarcació poden ser molt diverses, donat que varien en funció de la distància de navegació respecte la costa i les condicions meteorològiques. Aquesta primera versió del SenSailor està enfocada a la navegació pel Mediterrani, tant a prop de la costa com a alta mar. Al ser un prototip, es dissenya per a que pugui navegar a 60 milles nàutiques de la costa i pugui suportar unes condicions meteorològiques de categoria 6 en l'escala de Beaufort.
- **Insubmergibilitat:** La distribució de masses i la forma del buc han d'estar dissenyades de manera que el vaixell pugui recuperar la verticalitat en cas de bolcament. A més, el buc ha de constar d'un espai totalment estanc per conservar la flotabilitat en condicions de mar adverses.

Prestacions

- **Capacitat d'instal·lar sensors de mesura:** La forma i volum del vaixell ha d'estar dissenyat per tal que s'hi puguin instal·lar els sensors de mesura previstos i nous equipaments que permetin la obtenció d'altres dades d'interès en un futur.

Construcció

- **Espai per allotjar la bateria i panell solar:** Aquests dos elements, que són indispensables per la navegació autònoma, suposen una massa i volum important respecte el total del vaixell. La forma del buc i la coberta han de dissenyar-se tenint en compte on aniran disposats.
- **Fàcilment transportable:** Com que aquesta embarcació ha de ser transportada amb freqüència per fer proves, exposicions o treballs de manteniment al taller, les seves dimensions han de ser prou compactes per poder ser transportat a l'interior d'un cotxe gran o furgoneta, però que a la vegada han de ser aptes per enfrontar-se a les condicions de mar obert.
- **Fàcilment desmuntable:** L'embarcació ha de ser el més desmuntable possible per facilitar-ne el transport i els treballs de manteniment. Tot i això, totes les peces desmuntables han de garantir un bon funcionament, durabilitat i fiabilitat.

Viabilitat

- **Viabilitat constructiva:** L'embarcació i les diferents parts que la componen han de poder-se fabricar amb materials assequibles i tècniques que siguin viables a l'espai destinat per a la seva construcció, l'Espai Vela de la Facultat de Nàutica de Barcelona.
- **Viabilitat econòmica:** El projecte ha de tenir un cost assumible entre els dos estudiants autors per tal que es pugui dur a terme fins el final. Per altra banda, ha de comptar amb un pla estratègic de màrqueting per tal d'obtenir reputació, acords amb patrocinadors i subvencions de beques que permetin recuperar la inversió generada.

2.2. Vaixells de referència

Un cop determinades les especificacions del vaixell i les condicions de navegació, s'ha procedit a determinar les seves dimensions i característiques. Això ha consistit en un procés iteratiu on s'han anat ajustant els paràmetres en les diverses voltes de l'espiral del projecte. Per dimensionar algunes zones més crítiques, s'han seguit les pautes marcades per algunes normes (veure apartat 2.3. Normativa).

Per acotar algunes parts del vaixell a la primera iteració del procés de disseny, s'ha fet recerca d'embarcacions amb especificacions similars al vaixell que es vol construir i s'han seguit alguns criteris presos pels seus dissenyadors en base a la seva experiència. A la recerca, s'han trobat embarcacions que, tot i estar dissenyades per a finalitats similars, oferien solucions molt diverses per cobrir les necessitats bàsiques de la navegació autònoma a alta mar. A partir d'aquí, s'ha fet una primera elecció de les característiques principals del SenSailor per així iniciar el procés de disseny.

A l'hora d'escollir el mitjà de propulsió més adient s'ha considerat la màxima reducció del consum energètic i les especificacions de viabilitat econòmica i constructiva. Basant-se amb aquests criteris, s'ha optat per la vela com a mitjà de propulsió. En aquest primer prototip, s'ha descartat la opció d'un motor elèctric com a mitjà propulsor donat que aquest requeriria una gran superfície de panells solars, capacitat de bateria i espai interior per allotjar els equips. Això encarriria les despeses del projecte i dificultaria la realització completa del projecte.

A continuació, es mostren els vaixells que s'han fet servir com a referència per orientar el disseny del vaixell d'aquest projecte.

A-Tirma

Embarcació dissenyada per l'Equip Canari de Navegació Autònoma a Vela amb l'objectiu de poder navegar llargues travesses oceàniques de manera automàtica, amb possibles aplicacions en l'estudi oceanogràfic i climàtic, el control mediambiental i la investigació de la fauna marina (Figura 3). L'any 2016 va ser classificat en primera posició al Campionat del Món de Velers

Robòtics (WRSC) [14]. El prototip es troba en procés de millora per creuar l'Oceà Atlàntic a la Microtransat Challenge [15].

Consta d'un buc cilíndric totalment estanc, evitant la junta entre el buc i la coberta. El seu mitjà de propulsió es basa en dues veles rígides accionades per un servo enrotllador a través d'una escota. El govern de l'embarcació es realitza a través de dos timons ubicats a babord i estribord per garantir un sistema de control redundant.

Els apèndixs estan dissenyats per afavorir una navegació més estable. L'orsa, amb una gran superfície lateral impedeix la deriva a canvi d'un petit augment de resistència. El llast ubicat a la seva part inferior fa baixar el centre de gravetat de l'embarcació i així garantir la mínima escora possible. Els "skegs" són uns apèndixs situats a la part posterior de cada timó i tenen la funció de protegir-los contra els cops d'objectes flotants i reforçar la seva subjecció al cos de l'embarcació.

Característiques:

- **Eslora:** 2 m
- **Màniga:** 0,4 m
- **Calat:** 0,6 m
- **Desplaçament:** 40 kg
- **Superfície vèlica:** 0,5 m²
- **Tipus d'aparell:** Vela doble, rígida i trimatge d'angle per escota.



Figura 3. Vaixell A-Tirma. Font [16]

Sailbuoy

Embarcació dissenyada per la navegació oceànica amb una gran autonomia i fiabilitat. Disposa la capacitat per dur una gran varietat d'equips de mesura per fer recerca oceanogràfica i climàtica (Figura 4). El 7 de juny de 2018 es va convertir en la primera embarcació d'aquestes característiques en creuar l'Atlàntic, participant a la Microtransat Challenge.

Consta d'un buc robust i compacte a prova de col·lisions contra vaixells comercials. El seu mitjà de propulsió es basa amb una vela rígida petita en comparació a la seva eslora per tal de garantir un mínim desplaçament de la nau, però reduint el risc de ruptura amb condicions de vent adverses. Disposa d'una gran àrea lateral submergida per minimitzar l'abatiment. La coberta s'acobla al buc mitjançant una unió estanca desmuntable, per facilitar la instal·lació dels equips ubicats a l'interior, però evitant qualsevol via d'aigua.

Característiques:

- **Eslora:** 2 m
- **Màniga:** 0,52 m
- **Àrea vèlica:** 0,4 m² / 0,6 m²
- **Desplaçament:** 60 kg
- **Capacitat de càrrega:** 10 kg
- **Velocitat mitjana:** 1,5 kn
- **Velocitat màxima:** 3 kn
- **Velocitat de vent navegable:** 4 – 40 kn
- **Duració màxima de missió:** 12 mesos
- **Tecnologia de comunicació:** Iridium
- **Tipus d'aparell:** Singular, rígida, sense control d'angle de vela.



Figura 4. Vaixell Sailbuoy. Font [17]

Force 12 Xplorer

Vaixell concebut per l'empresa OpenOcean Robotics, que es dedica al disseny i la construcció de vaixells autònoms. En el cas del Force 12 Xplorer (Figura 5), té com a objectiu principal la recollida de dades marines. El seu disseny està pensat per maximitzar la fiabilitat, és per això que una de les seves característiques principals és la simplicitat dels seus mecanismes i la solidesa de tots els elements. L'orsa, situada al centre de l'embarcació, té una gran relació llargada/corda, amb un angle de llançament pronunciat i disposa de llast en forma de bulb a l'extrem inferior. El buc té una màniga poc variable en tota l'eslora, i les formes de proa acaben amb un mirall pla. Aquesta forma prismàtica millora l'estabilitat inicial de l'embarcació, i garanteix un adreçament ràpid. La coberta és estanca amb una brusca alta, per evacuar fàcilment l'aigua que s'hi pugui embarcar.

El seu mitjà de propulsió són dues veles rígides rectangulars situades a mitja eslora i a proa. Per tal de minimitzar la probabilitat de fallada, l'angle de les veles no es regula mitjançant l'accionament d'un servo motor. Cada vela té una escota unida sobre coberta amb una llargada fixa. Com que les escotes estan fermes sobre la línia de cruïxa, permeten que la vela es mogui a babord o a estribord sempre amb el mateix angle, al costat de sotavent. L'únic servo present al vaixell és l'encarregat d'accionar un únic timó situat a la línia de cruïxa.

Característiques:

- **Eslora:** 2,5 m
- **Desplaçament:** 50 kg
- **Capacitat de càrrega:** 30 kg
- **Tipus d'aparell:** Vela doble, rígida, sense control d'angle.



Figura 5. Vaixell Force 12 Xplorer. Font [18]

FAST

Veler creat per estudiants i investigadors de la Facultat d'Enginyeria de La universitat de Porto (FEUP) de Portugal i la Unitat de Robòtica i Sistemes Intel·ligents (ROBIS) de l'Institut d'Enginyeria de Sistemes i Informàtica, Tecnologia i Ciència (INESC TEC). Les formes del buc estan basades amb les d'un vaixell de regates classe 40, adaptant el disseny de la coberta per facilitar la instal·lació de panells solars i instruments i garantir-ne la completa estanquitat (Figura 6).

Un dels aspectes més remarcables d'aquest vaixell és el tipus d'aparell. A diferència d'altres vaixells trobats a la recerca, que fan servir veles rígides, el FAST, fa servir una disposició de veles convencionals com les que trobem a un veler esportiu. Aquest aparell consta de dues veles de tela situades a proa i popa d'un pal, que les sosté en posició vertical. Cada vela es controla a través d'una escota accionada per un servo. El pal es manté vertical gràcies al suport de l'eixàrcia ferma, un conjunt de cables tensats que subjecten l'extrem alt del pal a l'estructura del cos del vaixell. Aquest tipus d'aparell disminueix el pes a canvi d'un augment del risc de ruptura, ja que conté més elements febles.

Sota la línia de flotació, una orsa llastrada amb una gran relació llargada/corda evita la deriva i garanteix l'estabilitat. Degut a la gran màniga i el poc calat a popa de l'embarcació, dissenyat així per facilitar el planatge, un timó central perdria superfície mullada en situació d'escora i es reduiria la capacitat de govern. Per solucionar aquest inconvenient, el FAST disposa de dos timons separats a babord i estribord de la popa que treballen simultàniament.

Característiques:

- **Eslora:** 2,5 m
- **Màniga:** 0,67 m
- **Calat:** 1,25 m
- **Desplaçament:** 60 kg
- **Capacitat de càrrega:** 30 kg
- **Tipus d'aparell:** Marconi



Figura 6. Vaixell FAST. Font [20]

Beagle B

D'aquest vaixell no s'ha pogut trobar gaire informació quan a les seves dimensions i característiques numèriques, però s'han observat amb deteniment les fotografies trobades per estudiar-ne les solucions innovadores que se li han aplicat per resoldre alguns problemes relacionats amb les funcions del sistema i la navegació a alta mar.

El Beagle B (Figura 7) és una embarcació monobuc de 3,5 metres d'eslora màxima. Com altres embarcacions destinades al mateix fi, el seu mitjà de propulsió està basat en un perfil alar rígid per garantir-ne la màxima eficiència i robustesa. Malgrat aquesta semblança, hi ha un aspecte que el diferencia dels altres: el pal travessa la vela de punta a punta i sobresurt per la part superior, i enlloc de ser el pal, solidari a la vela, el que pivota sobre la seva base, és la vela la que gira al voltant del pal, que està fixat de manera solidària a l'estructura del buc. Aquest disseny permet que els sensors de vent estiguin ubicats a la part més alta del vaixell, l'extrem del pal, i com que aquest està fixat al buc i no gira, el senyal captat pel penell no es veu alterat per l'angle de vela. Si el pal fos solidari a la vela i pivotés a la seva base, el panell no es podria instal·lar a la mateixa ubicació perquè el seu punt de referència amb el vaixell seria mòbil.

El fet que part del pal sobresurti per sobre la vela i que aquest no giri, permet instal·lar una eixàrcia ferma que reforci el moment flector produït pel vent sobre la vela. A canvi, la secció del pal és més petita i el pes disminueix. Per altra banda, la presència dels cables de l'eixàrcia ferma, podria suposar un obstacle pel gir lliure d'una vela rígida rectangular. Per evitar-ho, la vela del Beagle B s'ha dissenyat amb una forma específica que eviti aquest problema. El control de la vela s'acciona a través d'un servo i una escota, imitant el funcionament tradicional dels velers esportius.

Característiques:

- **Eslora:** 3,5 m
- **Tipus d'aparell:** Vela singular, rígida, amb control d'angle per pal giratori.

No s'han trobat més dades tècniques publicades sobre aquest vaixell.



Figura 7. Vaixell Beagle B. Font [20]

Maribot Vane

Vaixell construït pel Real Institut de Tecnologia d'Estocolm (KTH) [9] per experimentar la navegació autònoma i especialitzant-se amb la optimització del rendiment de la vela (Figura 8). L'embarcació està fabricada partint del buc d'un vaixell de la classe Stradivari MK IV, amb els seus apèndixs originals. La banyera s'ha cobert amb una tapa estanca per allotjar-hi l'electrònica i s'han afegit reforços a l'interior per reforçar l'enfognament del pal.

Possiblement, l'aspecte més innovador d'aquesta embarcació és el tipus de vela emprada. La seva forma es basa en un perfil alar rígid que recorda l'ala d'un avió, la corda de la qual varia en funció de l'alçada. A la zona inferior de la vela, la corda és major que a la part superior per baixar el centre de pressions i reduir el parell escorant. L'accionament d'aquesta vela no es du a terme a través d'una escota, com en la majoria de veles convencionals, ni tampoc a través d'un pal giratori. A mitja alçada de la vora d'escapament del perfil, s'hi prolonga un apèndix que sosté un aleró d'angle variable. Aquest element desvia el flux de vent de tal manera que la vela, que pivota lliurement al voltant del pal, adopta un angle d'atac en concret i es genera una força de sustentació que fa avançar el vaixell.

Característiques:

- **Eslora:** 4,20 m
- **Màniga:** 0,8 m
- **Àrea vèlica:** 3 m²
- **Desplaçament:** 216 kg
- **Puntal aeri:** 4 m
- **Calat:** 1 m
- **Velocitat mitjana:** 3-4 kn
- **Velocitat màxima:** 5 kn
- **Tipus d'aparell:** Vela singular, rígida, amb control d'angle per aleró.



Figura 8. Vaixell Maribot Vane. Font: [9]

Saildrone

Al 2013, Richard Jeckins va crear la primera embarcació de la flota Saildrone, que va esdevenir la primera embarcació no tripulada en completar una ruta transoceànica, des de San Francisco fins a Hawaii. Posteriorment va crear una empresa amb el nom de Saildrone, destinada exclusivament a millorar l'embarcació i crear-ne una gran flota que oferís un servei de recerca i mesura de dades oceanogràfiques i climàtiques a nivell global d'alta qualitat. Actualment Saildrone (Figura 9) ja ha aconseguit fer la volta completa al planeta duent a terme una gran varietat d'experiments científics.

El disseny d'aquesta embarcació s'ha vist modificat lleugerament al llarg dels diferents prototips per tal de millorar la seva eficiència o per adaptar-lo a una finalitat en concret. El buc, generalment monobuc, presenta una forma esvelta i totalment estanca. En algunes versions s'ha optat per convertir el buc en trimarà afegint-hi dos patins a banda i banda del cos central per augmentar l'estabilitat.

A l'obra viva s'hi troben dos apèndixs l'orsa i un timó. Tots dos ubicats a la línia de cruixia. L'orsa, amb un gran calat i superfície lateral, evita la deriva. Generalment està llastrada sense bulb, tot i que en algunes versions se n'hi ha afegit un per fer baixar el centre de gravetat i ubicar-hi equips de batimetria o sensors de mesura. El timó està subjecte a un skeg que li ofereix una millor subjecció al buc i protecció contra impactes.

Com a mitjà de propulsió compta amb una vela rígida accionada per mitjà d'un aleró, com el Maribot Vane, explicat anteriorment. Amb aquest mitjà de propulsió, a l'any 2009 el propi creador de Saildrone va batre el rècord de velocitat de vehicles terrestres a vela al desert de Mojave, arribant als 203,1 km/h. Arrel d'aquest esdeveniment va decidir aprofitar aquest concepte de vela per propulsar els seus drons marins.

Característiques:

- **Eslora:** 7 m
- **Calat:** 2,5 m
- **Alçada de la vela:** 5m
- **Desplaçament:** 750 kg
- **Velocitat mitjana:** 2-3 kn
- **Velocitat màxima:** 8 kn
- **Duració màxima de la missió:** 12 mesos
- **Tipus d'aparell:** Vela singular, rígida, amb control d'angle per aleró.



Figura 9. Vaixell Saildrone. Font: [21]

A continuació es mostra una taula resum amb les característiques principals dels vaixells esmentats.

Nom del vaixell	Eslora (m)	Mànega (m)	Calat (m)	Desplaçament (kg)	Tipus de vela i aparell
A-Tirma	2	0,4	0,6	40	Doble, rígida, trimatge per escota
Sailbuoy	2	0,52	N/A	60	Rígida, sense control d'angle
Force 12 Xplorer	2,5	N/A	N/A	50	Doble, rígida, sense control d'angle
FAST	2,5	0,67	1,25	60	Aparell de Marconi
Beagle B	3,5	N/A	N/A	N/A	Rígida, pal giratori
Maribot Vane	4,2	0,8	1	216	Rígida, trimatge per aleró
Saildrone	7	N/A	2,5	750	Rígida, trimatge per aleró

(N/A: no es disposa de dades)

Taula 1 Comparativa de vaixells autònoms cercats. Font: pròpia.

2.3. Normativa

La normativa del marcat CE actualment en vigor és la Directiva 2013/53/UE [22], aplicable des del 18 de gener de 2016 i transposada a l'ordenament jurídic nacional al Real Decret 98/2016 [23]. Aquesta normativa és aplicable a embarcacions d'esbarjo entre 2,5 i 24 metres, i s'exclouen les embarcacions experimentals i les fabricades per ús personal, sempre que no s'introdueixin al mercat de la Unió Europea.

Amb les característiques de l'embarcació dissenyada, en aquest projecte no s'hi apliquen els requisits del marcat CE. Tot i això, durant el procés de disseny de la part estructural de l'embarcació s'han volgut tenir en compte els criteris de dimensionament aplicats a la categoria B establerta pel marcat CE, per tal de garantir una bona resistència en condicions de navegació adverses.

La categoria B de disseny es defineix per l'aptitud d'afrontar condicions de mar caracteritzades per una altura d'onades màxima de 4 metres (inclosos) i una força de vent màxima de magnitud 8 (inclòs) a l'Escala Beaufort.

Així doncs, el SenSailor és una embarcació destinada a la presa de mesures a totes les zones de navegació fins la zona 2 (60 milles de la costa) associada a la categoria B de disseny i apte per a la navegació a alta mar, segons la classificació establerta per a les embarcacions amb marcat CE.

Malgrat els límits marcats per la categoria B, les condicions de vent idònies pel bon funcionament de l'embarcació on es garanteix completament la seva seguretat i integritat, estan compreses entre els 5 i els 20 nusos de vent.

Per sota d'aquest rang, l'embarcació navega molt lentament i pot tenir problemes a l'hora de maniobrar. Per sobre els 20 nusos es preveu que l'embarcació podria seguir navegant amb risc de patir afectacions a la vela, però per ara no s'han dut a terme assajos a aquestes condicions per comprovar-ho.

Per altra banda, la normativa utilitzada per a la construcció del buc i de l'estudi de l'estabilitat és la UNE-EN ISO 12215 [24] i la UNE-EN ISO 12217 [25], respectivament. Amb aquestes normes es té una guia dels càlculs i les proves que s'han de fer al vaixell per validar la seva integritat tant estructural com d'estabilitat.

Capítol 3. Disseny del buc

Aquest capítol s'estructura de la següent manera. En primer lloc, la secció 3.1 explica les característiques principals del buc i els criteris amb què s'han definit. Seguidament, a 3.2, s'explica el procediment seguit per dissenyar les formes de carena per tal de reduir la resistència a l'avanç i augmentar l'estabilitat. Al punt 3.3 s'explica el disseny de l'estructura de reforç del buc, tant la seva disposició com el dimensionament. A l'apartat 3.4 s'exposa el sistema de tancament hermètic del buc a les juntes desmuntables.

3.1. Parametrització del buc

Amb l'estudi de les especificacions, capítol 2, es poden concebre les dimensions principals del buc, les quals seran optimitzades per l'ús concret d'aquest veler. Com ja s'ha esmentat anteriorment, les dimensions principals del SenSailor es troben d'una manera més heterodoxa de l'habitual, però no menys vàlida. En comptes de fer una regressió estadística de bucs similars (on en aquest cas el número de mostres és molt reduït), es passa a una comparació de característiques de velers i de restriccions físiques, tant per normativa com per infraestructura o pressupost.

Pel que fa al disseny de les dimensions principals, el baix nombre de bucs similars que es vol dissenyar no permet fer una regressió estadística. Per tant, la parametrització s'ha portat a terme per mitjà d'una comparació de vaixells de la mateixa funció. Aquesta metodologia ens permet reduir i acotar l'espai de disseny que es té, de tal manera que es van acostant a unes dimensions i formes similars a dits vaixells.

A continuació es detallen els paràmetres principals que defineixen l'embarcació i s'explica l'elecció feta per a les diferents característiques.

Nombre de bucs

La primera característica que s'ha definit ha sigut el nombre de bucs. El cos del vaixell és una de les parts més importants de qualsevol nau. És l'element que proporciona flotabilitat, però a ell també va lligada l'estabilitat, el comportament amb les onades, l'espai interior, l'espai de coberta, etc. També influeix en les funcions que posteriorment pugui realitzar l'embarcació. El nombre de bucs marca una diferència notable que influeix en el disseny de la resta d'elements del vaixell com són els apèndixs, l'aparell i la distribució del sistema elèctric entre altres. Per

aquest motiu s'ha dedicat una primera fase del procés de disseny exclusivament a valorar la opció de construir un vaixell monobuc o multibuc.

Pros i contres d'un multibuc

Per un banda, un multibuc permet disposar de més espai per instal·lar panells solars i sensors al descobert, ja que el trampolí ubicat entre els dos patins es pot dimensionar amb les mesures que es necessitin sense alterar la hidrodinàmica del vaixell. També ofereix una estabilitat major que un monobuc. Al tenir els patins separats, el vaixell escora menys i es pot disposar d'una superfície vèlica més gran i permet avançar a més velocitat que un monobuc. A més a més, el fet de ser més estable permetria, en un futur, instal·lar equips de batimetria per analitzar la fondària de l'entrada dels ports i planificar les operacions de dragatge.

Per altra banda, el fet de tenir dos o més bucs separats implica que en cas de bolcament resulti impossible recuperar la posició vertical sense assistència externa. Un altre desavantatge d'un multibuc rau en la dificultat constructiva. El fet d'haver de construir més d'un buc suposa un augment de feina i hores de treball. A més, aquest tipus d'embarcació requereix una estructura d'unió dels diversos bucs molt reforçada i de qualitat per tal de suportar els esforços deguts a l'onatge. Donat el cas que aquest és un primer prototip i els mitjans de construcció que es disposen no són d'alta qualitat, resulta complicat fabricar aquesta estructura de tal manera que sigui a la vegada robusta i desmuntable per al transport, tal i com s'ha definit a les especificacions.

Pros i contres d'un monobuc

Un monobuc, tot i tenir menys estabilitat garanteix que el vaixell pugui recuperar la seva posició vertical en cas de bolcament disposant els pesos de la manera correcta, i aquest és un criteri fonamental per una embarcació no tripulada. Un sol buc també permet fer una construcció més compacte i amb menys unions desmuntables. Això facilita la construcció i és més còmode de muntar i desmuntar a l'hora de realitzar el manteniment de l'embarcació. A més, una construcció compacta garanteix una durabilitat major, ja que s'eviten els esforços produïts a les unions entre els bucs durant la navegació, que poden acabar amb un trencament per fatiga. Un sol buc tancat hermèticament amb una bona estructura de reforç representa una càpsula segura que permetrà al sistema electrònic seguir funcionant i enviant a terra la seva localització a temps real en cas d'averia o condicions de mar adverses.

La instal·lació de panells solars fotovoltaics es veu limitada per l'espai de coberta, tenint en compte la seva forma afuada, ja que poc s'adapta a la geometria dels panells estàndards. El cas d'un monobuc requereix doncs un disseny de coberta que faciliti el màxim la instal·lació d'aquests panells. Per altra banda, cal optimitzar al màxim el consum elèctric a bord per requerir la mínima superfície de panells possible cosa que, a més, afavorirà a l'estabilitat.

La implementació d'un equip de batimetria es complica pel què fa al grau d'estabilitat que necessita, però potser aquest aparell necessita estar muntat a una embarcació que compleixi unes especificacions que es contraposen amb les del SenSailor. En primer lloc, un robot per fer batimetria als ports ha d'estar pensat per navegar en aigües més tranquil·les, amb la qual cosa no hi ha perill a bolcar. L'autonomia no resulta tant crítica, ja que el seu funcionament es limita

a unes hores i en lloc d'una vela es podria propulsar mitjançant un motor elèctric. Per aquest motiu, s'ha descartat la batimetria com una possible aplicació del SenSailor. Si es vulgués implementar, caldria fer algunes modificacions per adaptar el vaixell a aquesta aplicació concreta.

L'objectiu d'aquesta embarcació és que pugui navegar per mar obert, prioritzant sempre la seguretat abans que la velocitat. Per tant, s'ha optat com a millor alternativa el disseny i construcció d'una embarcació amb un sol buc. A partir d'aquí, la resta de característiques del vaixell s'orientaran segons aquesta condició.

Eslora

L'eslora d'un vaixell es podria dir que és la característica més important d'un buc. A partir de l'eslora es defineixen la majoria dels altres paràmetres. En el cas del SenSailor, es fixa una eslora de 2 metres. Aquesta elecció es basa essencialment en la seva capacitat de ser desmuntat i transportat amb facilitat. Alhora, aquesta eslora entra dins les dimensions estipulades per les regates de vaixells autònoms com per exemple la International Robotic Sailing Regatta [28], la World Robotic Sailing Championships [14] i la Microtransat Challenge [15]. D'aquesta manera, el vaixell podria presentar-se a aquestes competicions si es desitgés de cara al futur. També cal esmentar que per temes d'infraestructura i de pressupost, ha quedat descartada la opció de construir un buc de més eslora.

Màniga

La màniga del SenSailor està restringida, també, per la seva capacitat de ser transportat. Aquest paràmetre s'ha deixat lliure fins a l'optimització del buc, però s'ha fixat un límit de 0,8 metres. Al deixar aquest paràmetre lliure hi ha la possibilitat d'ajustar-lo depenent de l'estabilitat que es necessiti o de l'espai per a instrumentació i electrònica.

Calat

El calat del SenSailor també queda lliure dins un marge que serà definit pel puntal. Es podrà ajustar depenent de l'estabilitat que es necessiti i del desplaçament.

Puntal

Aquest paràmetre és definit per l'espai necessari per la bateria, l'electrònica de control i els circuits d'alimentació i condicionament. Com que inicialment no es coneix la distribució general exacta, s'ha acotat a un màxim de 0,4 metres. Per tant, dins aquest marge, còmode per al transport, s'ha variat depenent, altra vegada, de les necessitats d'espai i d'estabilitat.

Desplaçament

El desplaçament és molt important per definir les formes d'un buc. Amb una mínima variació de paràmetres com eslora o màniga (1 dimensió), aquest pot variar notablement. Per limitar-ho i que el buc pugui ser manipulat fàcilment, s'ha fixat a un límit aproximat de 50-55 Kg.

Amb aquests paràmetres i amb l'ajut del programa Bentley Maxsurf, s'ha passat ja a acotar unes formes bàsiques per al buc tot adaptant unes formes predeterminades del programari a les necessitats del SenSailor. Aquestes formes s'han anat comparant amb altres velers autònoms similars fent un procés de recerca previ, i alhora es fan uns estudis d'optimització de formes. S'utilitza tant les eines proporcionades pel programa com la transformació manual de les formes.

3.2. Disseny de carena

En aquest punt l'objectiu és fer unes formes polivalents, que no s'adaptin sols a una velocitat, sinó que serveixin com a plataforma per a proves i assajos. Per tant, l'estudi hidrodinàmic es fa simple i es posa com a principal fita tenir espai dins el buc per acomodar la instrumentació i l'electrònica de control. El buc també ha de presentar una forma simple, ja que la seva construcció es farà completament manual i es vol construir a partir d'un motlle d'una sola peça.

3.2.1. Resistència a l'avanç

El moviment d'un vaixell per l'aigua es troba entorpit per la resistència que genera tant l'aigua com l'aire. En el cas dels velers, com que les velocitats generalment no solen ser gaire elevades, el fregament de l'aire es pot ometre. És amb l'aigua on es troba la majoria de la resistència a l'avanç del veler.

La resistència a l'avanç d'un vaixell (R_T) es pot aproximar amb la següent fórmula:

$$R_T = R_f + R_r \quad (1)$$

on R_f és la resistència de fricció i R_r és la resistència residual.

Resistència viscosa (fricció)

La resistència de fricció R_f és deguda a la interacció del fluid amb el buc. Aquest fluid s'aferra al buc, de manera que les partícules d'aigua que es troben en contacte amb l'objecte en moviment

es mouen a la mateixa velocitat que el ell. Com més separades, les partícules van perdent velocitat fins a tendir a 0. Aquest fenomen és el causant de les forces contràries al moviment del vaixell.

Aquesta resistència depèn de les característiques del fluid, és a dir, de paràmetres com la densitat (per tant, també influeix la temperatura), velocitat o número de Reynolds. Es pot aproximar amb la següent fórmula[27]:

$$R_f = C_f \cdot \frac{1}{2} \cdot WSA \cdot \rho \cdot v^2 \quad (2)$$

On v és la velocitat del vaixell, ρ és la densitat del fluid, WSA és la superfície total mullada i C_f és el coeficient adimensional de fricció, que s'obté mitjançant la següent fórmula ITTC 57[55]:

$$C_f = \frac{0.075}{(\log(0,7Rn) - 2)^2} \quad (3)$$

on Rn és el número de Reynolds, que es calcula amb la següent fórmula:

$$Rn = \frac{\rho \cdot v \cdot L}{\mu} \quad (4)$$

on L és la llargada del cos i μ la viscositat dinàmica del fluid.

La fórmula utilitzada per aproximar el valor de la resistència viscosa és la que resulta de la relació entre R_f i C_f (2) i (3):

$$R_f = \left(\frac{1}{2} \rho V^2 WSA \right) \frac{0,075}{(\log(0,7R_n) - 2)^2} \quad (5)$$

Resistència residual

La resistència residual R_r té l'origen en el desprendiment de la capa límit format pel comportament viscos d'un fluid. Aquest efecte produeix un increment de la resistència que s'oposa al desplaçament del vaixell. En aquest treball, la resistència residual s'ha estudiat mitjançant la sèrie sistemàtica de Delft [27], creada a partir d'un estudi estadístic de models de vaixells. La sèrie de Delft és una regressió lineal que permet calcular la resistència residual de manera aproximada en funció dels paràmetres principals de forma del buc:

$$\begin{aligned} \left(\frac{R_r}{\Delta}\right) \cdot 10^3 = & a_0 + (a_1 \cdot C_P) + (a_2 \cdot LCB) + \left[a_3 \cdot \left(\frac{Bwl}{Tc}\right)\right] + \left[a_4 \cdot \left(\frac{Lwl}{\nabla^{1/3}}\right)\right] + (a_5 \cdot C_P^2) \\ & + \left[a_6 \cdot C_P \cdot \left(\frac{Lwl}{\nabla^{1/3}}\right)\right] + (a_7 \cdot LCB^2) + \left[a_8 \cdot \left(\frac{Lwl}{\nabla^{1/3}}\right)^2\right] + \left[a_9 \cdot \left(\frac{Lwl}{\nabla^{1/3}}\right)^3\right] \end{aligned} \quad (6)$$

on ∇ és el volum de carena, C_P és el coeficient prismàtic, LCB és la posició longitudinal del centre de carena, Bwl és la màniga en línia de flotació, Tc el calat i Lwl l'eslora en flotació. Els coeficients a_n depenen del número de Froude (Fn) i, per tant, de la velocitat a la qual es desplaça el buc. Per a cada número de Fn existeixen uns coeficients diferents.

A partir d'aquesta fórmula es poden fer alguns estudis d'optimització del buc per al Fn desitjat, sense canviar els paràmetres principals del vaixell. Per exemple:

C_P òptim: El coeficient prismàtic es pot aïllar de la fórmula anterior resultant en:

$$C_P = \frac{-\left(a_1 + \frac{a_6 \cdot Lwl}{\nabla^{1/3}}\right)}{2 \cdot a_5} \quad (7)$$

D'aquesta manera es pot obtenir el valor del coeficient prismàtic optimitzat per un determinat Fn.

LCB òptim: Aquest mateix procediment es pot fer amb la posició longitudinal del centre de carena del buc:

$$LCB_{opt} = \frac{-a_2}{2a_7} \quad (8)$$

Obtenint així un LCB òptim per a un Fn determinat.

Aquestes fórmules són utilitzades per a l'optimització del SenSailor pel què fa a la resistència a l'avanç. Com que l'objectiu és tenir una plataforma versàtil des d'on fer la recollida de dades i disposar tota la circuiteria del pilot automàtic, tenir un buc optimitzat al màxim no és un requeriment indispensable. Tot i això, s'han dissenyat les formes de tal manera que la navegació sigui bona i tingui un bon comportament al mar.

3.2.2. Adaptació i optimització de formes

L'adaptació i optimització de formes s'ha dut a terme amb el programa Bentley Maxsurf Modeler. Aquest programa s'ha utilitzat pel disseny de les formes del buc per la seva practicitat. S'ha fet servir el model matemàtic NURB (*Non Uniform Rational B-Splines*), molt utilitzat en la computació gràfica per generar i representar corbes i superfícies. Les superfícies creades pel modelatge 3D d'aquest programa contenen una sèrie de punts de control que permeten ajustar les formes al disseny desitjat. La quantitat de punts es tradueix en la magnitud de precisió en que un vol fer les formes del buc.

En el cas del SenSailor, s'ha utilitzat el model de buc de veler exemplar del programa anomenat *SmallYacht_1Surface* (Figura 10 i Figura 11), disponible a la carpeta *Sample Designs*, dels arxius de programa de Bentley, que ja compta amb unes formes de carena acceptables i suficients punts de control per adaptar la geometria a les necessitats del veler que es vol dissenyar. Mitjançant les eines del programa, com ara la transformació paramètrica (Figura 12) o el Surf.Net, una malla de punts de control de la superfície (Figura 13), es realitza es modifiquen les formes del buc amb l'objectiu d'aconseguir el desplaçament i calat òptim, però sense augmentar la superfície mullada ni la resistència a l'avanç. El model escollit té unes dimensions massa grans per al SenSailor, per tant, s'ajusten per complir amb els requisits d'eslora, calat, màniga, i desplaçament.

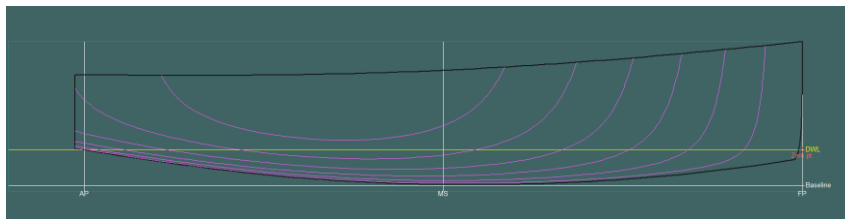


Figura 10. Vista de perfil del model "SmallYacht_1Surface". Font: pròpia.

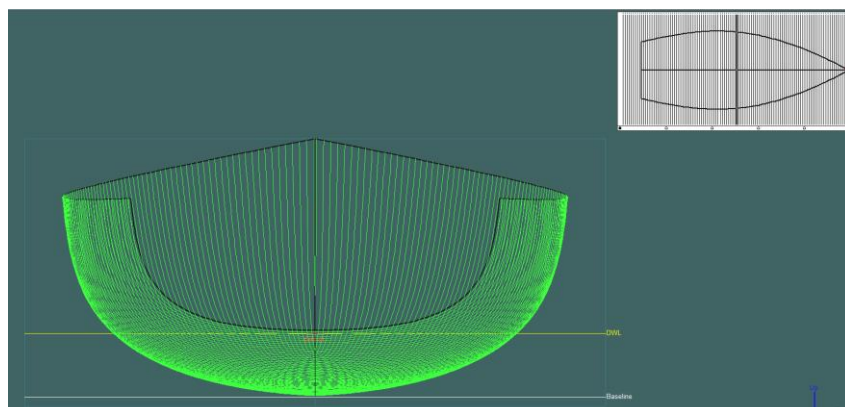


Figura 11. Vista posterior del model "SmallYacht_1Surface". Font: pròpia.

A partir d'aquest model es van adaptant les formes a les característiques necessàries utilitzant l'eina de transformació paramètrica i la manipulació dels punts de control de la superfície.

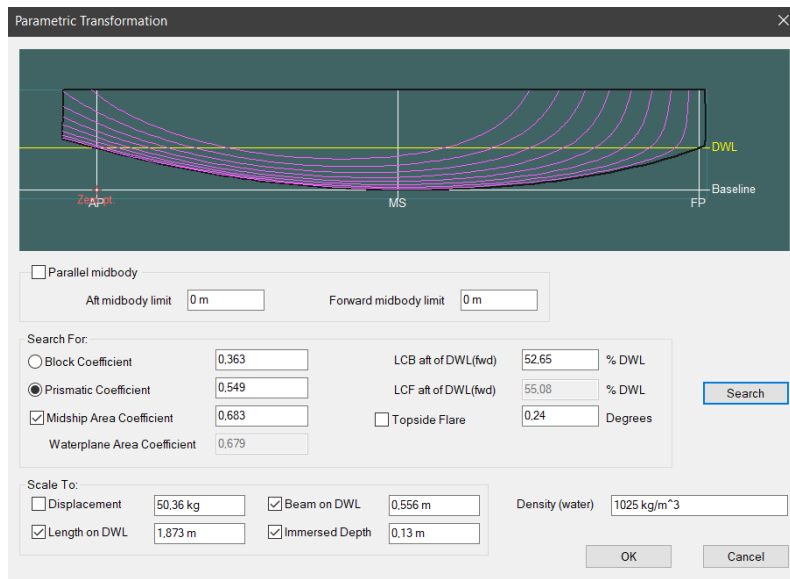


Figura 12. Eina transformació paramètrica. Font: pròpia

Amb aquest eina es poden modificar manualment tots els punts de control disponible des de la vista de front. Això permet generar les formes desitjades i mitjançant iteracions de prova i error es van modificant per obtenir la forma desitjada.

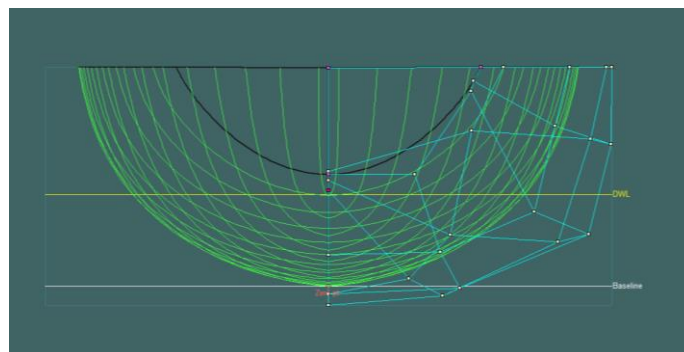


Figura 13. Eina Surf.Net, malla de punts de control de superfície. Font: pròpia.

Les formes s'han adaptat per a que s'acostin als valors obtinguts de C_p i LCB òptims per obtenir unes formes desitjades, sense augmentar significativament la resistència a l'avanç, fins i tot millorant les prestacions.

S'ha pres el valor de F_n de 0,35 per trobar aquests valors. Encara que aquest valor sigui bastant elevat, per una eslora de 2 metres el fet de baixar d'aquest nombre podria significar que dits valors no entressin al següent interval (necessari per poder analitzar la resistència residual mitjançant Delft):

L_{WL}/B_{WL}	2,76	5
B_{WL}/T_C	2,46	19,32
$L_{WL}/\nabla_C^{1/3}$	4,34	8,5
LCB	0	-6
C_P	0,52	0,6

Taula 2. Rang de valors necessaris per l'anàlisi de R_r mitjançant Delft. Font: [26]

Per tant, agafant el valor de Fn esmentat, els valors dels coeficients de la fórmula de Delft són els següents:

Fn	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8	a_9
0,35	212,679	-801,791	1,087	0,539	10,803	667,543	12,398	0,166	-3,026	0,165

Taula 3. Coeficients de la fórmula de Delft obtinguts. Font:[27].

I el valors obtinguts de C_P i LCB són:

C_P	0,5529
LCB	-3,2657

Taula 4. Valors obtinguts de C_P i LCB . Font: pròpia.

Aquests valors, juntament amb els paràmetres principals del vaixell, permeten saber on està situat el LCB i quines formes ha de tenir el buc per optimitzar la seva resistència a l'avanç. Per tant es procedeix a ajustar aquest valors per aproximar-los el màxim possible sense que les dimensions principals del buc canviïn massa i es tinguin les característiques que requereix l'objectiu d'aquest veler. Les dimensions del buc principals finalment son les següents:

Δ	50	kg
∇	0,049	m ³
LWL	1,873	m
T_C	0,13	m
BWL	0,556	m
C_P	0,549	
$LCB\%$	47,347	

Taula 5. Dimensions principals del buc. Font: pròpia.

L_{WL}/B_{WL}	3,369	Compleix
B_{WL}/T_C	4,277	Compleix
$L_{WL}/\nabla_C^{1/3}$	5,118	Compleix
LCB	-2,653	Compleix
C_P	0,549	Compleix

Taula 6. Paràmetres de Delft Font: pròpia.

Aquestes formes s'han anat adaptant mirant també el programa Maxsurf Resistance, el qual proporciona un ampli ventall de mètodes per a l'estudi de la resistència a l'avanç. Mitjançant

aquest programa es pot fer el càlcul de la resistència residual mitjançant Delft, de manera molt fàcil i ràpida.

Per tant, mitjançant aquest programa s'han anat calculat i mirant si la resistència variava. S'ha de tenir en compte que aquesta resistència és només una part de la total. Per aquest motiu la manera més ràpida de veure si la component viscosa augmenta o disminueix és vigilar la superfície mullada total del buc.

En el cas de les formes finals, s'ha aconseguit augmentar el calat (per tal de buscar un centre de gravetat més baix) i el desplaçament, disminuint alhora la superfície mullada i millorant una mica el rendiment a velocitats per sota dels 3 kn, que és el rang de velocitats a les que es desplaçarà el vaixell.

Els resultats finals són els següents:

Fn	R _{total} (N)	
	SmallYacht_1Surface	SenSailor
0,5	1,630	1,447
0,75	2,386	2,120
1	3,292	2,957
1,25	4,328	3,907
1,5	5,602	5,069
1,75	7,053	6,423
2	8,730	7,997
2,25	10,713	10,020
2,5	13,421	13,253
2,75	17,632	18,685

Taula 7. Comparació de R_{total} (resistència total a l'avanc) a diferents velocitats, entre el model escollit de Maxsurf (SmallYacht_1Surface) i el buc transformat (SenSailor). Font: pròpia.

3.2.3. Estudi d'estabilitat inicial

L'estabilitat del SenSailor és crítica per assegurar una navegació estable i fiable, i també per què el sistema automàtic tingui els mínims problemes de govern i els sensors puguin prendre mesures de manera més precisa. A les diferents voltes de l'espiral de projecte, a la part de disseny, s'ha estudiat l'estabilitat del buc per anar ajustant les formes i així obtenir el resultat esperat.

Per assegurar una bona estabilitat a l'embarcació i acotar els límits de disseny de les formes del buc, s'ha seguit la norma UNE-EN ISO 12215 [24] i la UNE-EN ISO 12217 [25]. Com s'explica a l'apartat 2.3 (Normativa), per les dimensions i característiques del vaixell aquesta norma no és aplicable en aquest projecte i degut a això, alguns criteris resulten d'inviàble compliment. De totes maneres, s'ha optat per fer servir la normativa com a guia aproximada i s'han complert amb el màxim número de requisits establerts.

La situació d'equilibri que es considera a l'estudi d'estabilitat inicial és aquella en què el vaixell es manté en flotació sobre aigües tranquil·les, de manera estàtica i sense perturbacions externes. Amb aquesta situació, es busca que el buc tingui l'escora i el trimat desitjats. En aquest estudi s'han considerat tots els pesos fixos del vaixell, és a dir, els associats a l'aparell, el buc, la coberta, els apèndixs, la bateria i l'electrònica bàsica de navegació.

Per fer l'estudi es fa servir el programa Bentley Maxsurf Stability. Aquest, ofereix moltes eines per determinar quins són els paràmetres principals d'estabilitat i presenta multitud d'anàlisi que poden ser útils alhora d'avaluar l'estabilitat del veler, i poder fer els canvis pertinents per assegurar una bona navegabilitat.

Per iniciar l'estudi, s'ha fet una distribució general dels pesos del vaixell. Com que no es sap amb precisió què pesarà tot el conjunt d'instruments fins una etapa més avançada del projecte, es fa una primera aproximació. Per això, després d'introduir el model dins el programa Bentley Maxsurf Stability, es procedeix a disposar el pesos:

	Item Name	Quantity	Unit Mass kg	Total Mass kg	Unit Volume m ³	Total Volume m ³	Long. Arm m	Trans. Arm m	Vert. Arm m
1	Lightship	1	0,0	0,0			-4,578	0,000	0,000
2	Vela	1	4,0	4,0			1,000	0,000	1,000
3	Timo+skeg 1	1	0,3	0,3			0,330	0,110	0,100
4	Electrònica	1	0,5	0,5			0,550	0,000	0,120
5	Màstil	1	0,7	0,7			1,040	0,000	0,800
6	Bateria	1	10,0	10,0			0,800	0,000	0,080
7	Timo+skeg 2	1	0,3	0,3			0,330	-0,110	0,100
8	Pesos (plom)	1	0,0	0,0			0,300	0,000	0,100
9	Panell solar	1	3,0	3,0			0,050	0,000	0,330
10	Orsa	1	2,0	2,0			1,115	0,000	-0,250
11	Llast	1	11,2	11,2			0,975	0,000	-0,620
12	Casc + cobe	1	18,0	18,0			0,900	0,000	0,120
13	Total Load			50,0	0,000	0,000	0,854	0,000	0,024

Taula 8. Distribució general de pesos. Font: pròpia.

Amb aquests pesos disposats al programa, es juga amb la seva posició dins del veler per aconseguir, en estat d'equilibri, l'angle de trimat el més proper a 0°, sempre tenint en compte l'espai ocupat per l'estructura de reforç. Òbviament, el buc ha de tenir una escora nul·la, cosa que ja es té en compte al disposar els pesos dins. El resultat final aconsegueix un trimat molt petit, però segueix sense ser nul. Tot i això, aquests càlculs serveixen per dissenyar el buc considerant una construcció ideal. Com que a la realitat la construcció serà manual i la distribució del pes pot variar, s'ha decidit procedir amb aquests resultats i acabar d'ajustar el trimat de manera empírica un cop hagi finalitzat la construcció. Pel mateix motiu, també es té en compte que el desplaçament pot variar en el model real i, per tant, s'haurà d'avaluar el pes del buc un cop construït per saber amb exactitud si ha variat el pes màxim d'equips que es pot disposar al seu interior.

A la Taula 9 es mostren les característiques hidrostàtiques del vaixell per a diferents calats, és a dir, per a diferents desplaçaments.

	Draft Amidships m	0,115	0,118	0,121	0,124	0,127	0,130	0,132	0,135	0,138	0,140	0,143
1	Displacement kg	40,00	42,00	43,99	46,00	48,01	50,00	52,00	54,01	56,00	57,99	59,99
2	Heel deg	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3	Draft at FP m	0,115	0,118	0,121	0,124	0,127	0,130	0,132	0,135	0,138	0,140	0,143
4	Draft at AP m	0,115	0,118	0,121	0,124	0,127	0,130	0,132	0,135	0,138	0,140	0,143
5	Draft at LCF m	0,115	0,118	0,121	0,124	0,127	0,130	0,132	0,135	0,138	0,140	0,143
6	Trim (+ve by stern)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
7	WL Length m	1,772	1,793	1,813	1,832	1,851	1,870	1,888	1,905	1,919	1,929	1,940
8	Beam max extents	0,528	0,534	0,539	0,545	0,550	0,555	0,559	0,564	0,568	0,572	0,576
9	Wetted Area m ²	0,721	0,738	0,755	0,772	0,788	0,804	0,820	0,835	0,850	0,865	0,879
10	Waterpl. Area m ²	0,645	0,658	0,670	0,683	0,694	0,705	0,716	0,727	0,737	0,747	0,756
11	Prismatic coeff. (Cp)	0,553	0,552	0,551	0,551	0,550	0,549	0,548	0,547	0,547	0,548	0,549
12	Block coeff. (Cb)	0,362	0,363	0,363	0,363	0,363	0,363	0,363	0,363	0,364	0,365	0,366
13	Max Sect. area coef	0,675	0,677	0,678	0,680	0,681	0,682	0,684	0,685	0,686	0,687	0,689
14	Waterpl. area coeff.	0,690	0,688	0,685	0,684	0,682	0,680	0,678	0,676	0,676	0,676	0,676
15	LCB from zero pt. (0,897	0,895	0,893	0,891	0,889	0,887	0,885	0,883	0,882	0,880	0,878
16	LCF from zero pt. (+	0,857	0,854	0,851	0,848	0,844	0,841	0,838	0,834	0,831	0,828	0,825
17	KB m	0,076	0,078	0,080	0,082	0,084	0,086	0,087	0,089	0,091	0,092	0,094
18	KG m	0,130	0,130	0,130	0,130	0,130	0,130	0,130	0,130	0,130	0,130	0,130
19	BMt m	0,265	0,263	0,261	0,259	0,257	0,255	0,253	0,251	0,250	0,248	0,246
20	BML m	2,798	2,768	2,737	2,712	2,683	2,654	2,630	2,605	2,576	2,552	2,524
21	GMt m	0,212	0,211	0,211	0,211	0,211	0,211	0,211	0,210	0,210	0,210	0,210
22	GML m	2,744	2,716	2,687	2,664	2,637	2,610	2,587	2,564	2,537	2,514	2,488
23	KMt m	0,342	0,341	0,341	0,341	0,341	0,341	0,341	0,340	0,340	0,340	0,340
24	KML m	2,874	2,846	2,817	2,794	2,767	2,740	2,717	2,694	2,667	2,644	2,618

Taula 9. Característiques hidrostàtiques en diferents calats. Font: pròpia.

A continuació es mostra un dibuix esquemàtic del buc de perfil on es representa la posició del metacentre (KM_t), el centre de flotació (CF), el centre de carena (CB) i el centre de gravetat (CdG) del vaixell en el calat de disseny (0,130 m).

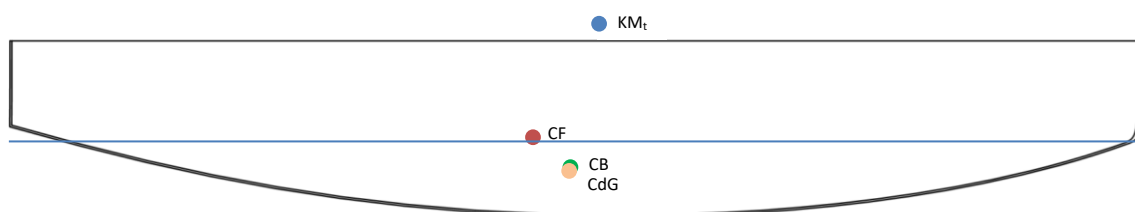


Figura 14. Silueta de perfil del buc amb representació del metacentre (KM_t), centre de flotació (CF), centre de carena (CB) i centre de gravetat (CdG). Proa a la dreta. Popa a l'esquerra. Font: pròpia

3.2.4. Estabilitat a grans angles

Aquest estudi d'estabilitat es centra a analitzar com reacciona el buc davant les pertorbacions que forcen el vaixell a escorar, com per exemple el vent o les onades. Aquí s'estudia l'equilibri de moments que fan que el veler es mantingui en una posició estable o, per contra, l'obligui a quedar bolcat de manera permanent. En aquest estudi s'ha fet servir el programa Maxsurf Stability, introduint-hi les formes del buc definitives i la posició de cada un dels pesos del vaixell.

A la Figura 15 es mostra la corba de braços adreçadors (GZ). Com es pot observar, el GZ es manté positiu des de 0° fins a 130° d'escora. Això vol dir que en tot aquest rang el vaixell té tendència a recuperar la seva verticalitat. Per a angles superiors, el GZ es fa negatiu, i això es tradueix en què el vaixell tindrà tendència a quedar-se bolcat, amb la quilla cap amunt.

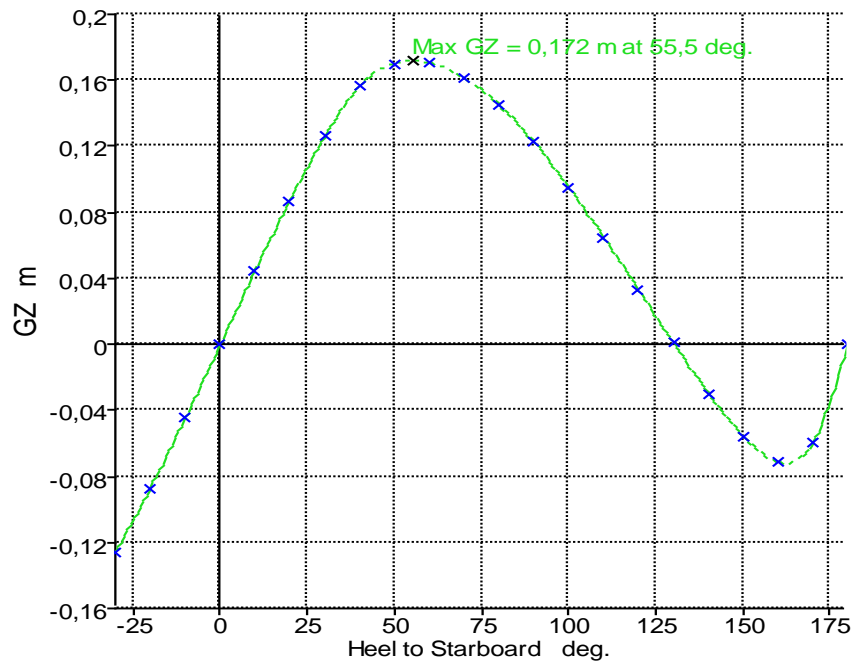


Figura 15. Corba de parells adreçadors GZ. Font: pròpia.

3.3. Disseny estructural

Després de calcular els paràmetres principals del buc i optimitzar les seves formes, es procedeix a dissenyar la seva estructura de reforç. Per fer-ho, s'elabora una distribució general dels elements de reforç d'acord amb els punts d'esforç màxim i els elements interns del buc, com són l'enfognament i la subjecció dels timons. Paral·lelament es dissenyen els apèndixs i es calculen les seves posicions, que resulten importants a l'hora de planificar la disposició estructural. D'acord la norma UNE-EN ISO 12215 [24], el gruix de la paret del buc es dimensiona en funció de l'espai entre reforços. Així doncs, una estructura de reforç més espaciada implicarà un gruix de buc major en front d'una disposició amb una clara inferior.

Aquests càlculs estan degudament explicats a la norma on, a més, s'apliquen factors de seguretat per augmentar-ne la fiabilitat. La norma es refereix a embarcacions tripulades de més de 2,5 metres, per tant el SenSailor en queda exclòs. Tot i això, d'acord amb l'explicat al capítol 1, s'ha optat seguir-ne les recomanacions de càlcul per garantir una bona resistència estructural.

3.3.1. Distribució de l'estructura de reforç

A la normativa UNE-EN ISO 11215 hi ha dos apartats que es refereixen a l'estructura del buc: el número 5 (Escantillonatge) i el número 6 (Estructura i Disposició). Mitjançant aquests dos documents s'ha anat acotant la posició dels reforços i les dimensions del panells.

Per fer la disposició dels reforços s'ha utilitzat tant el criteri propi, avaluant les necessitats, com els consells presents a l'apartat 6 de la normativa. Així s'ha creat un primer model als programes AutoCad i Rhinoceros, des d'on posteriorment s'ha fet l'estudi de pressions i gruixos del material del buc.

Els plànols es troben a l'Annex IV. *Plànols i esquemes*

Càlcul de Pressions

Seguidament es procedeix al càlcul de pressions que estaran presents als panells del buc. La normativa els divideix en tres: panells de fons, panells de costat i panells de coberta.

Per a cada posició hi ha un càlcul de pressions diferent. Cal esmentar que aquestes pressions donades per la normativa solen estar sobredimensionades i es refereixen a casos extrems, sempre apel·lant a la màxima seguretat i resistència del buc. En el cas del SenSailor, la normativa només s'aplica com a guia, i per tant no s'està obligat a complir estrictament els resultats d'aquests càlculs.

Per procedir amb el càlcul, cal saber certes dades numèriques del buc que es presentaran més endavant (Taula 10), i la disposició dels panells i reforços. Segons la normativa, degut al radi petit de la curvatura transversal del buc, es considera la línia de cruïxa com un element de reforç natural sense necessitat de disposar-hi cap element extra. També es considera element de reforç natural la junta entre la coberta i el buc. En el cas del SenSailor, al ser un veler de dimensions petites i sense un pantoc marcat, no s'han diferenciat els panells de fons i els de costat. Com s'aprecia a la Figura 16, el buc compta amb 5 panells a cada costat, cada un d'ells comprès entre dos reforços transversals (marcats amb color vermell), la línia de cruïxa i el límit superior del buc (punt d'unió amb la coberta).



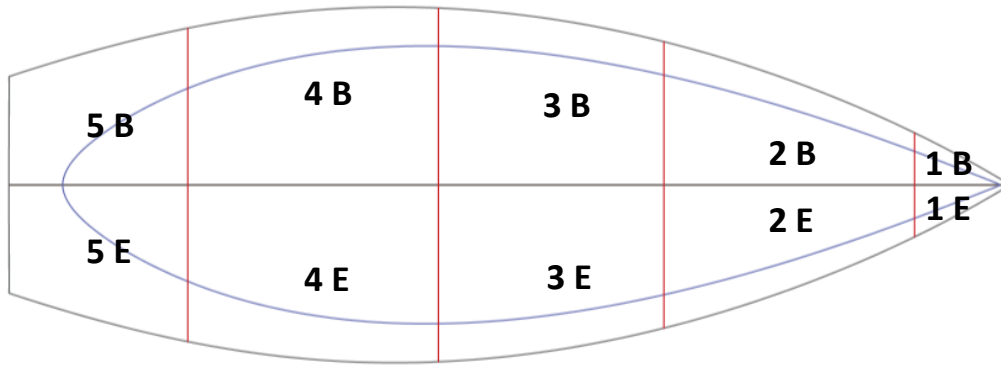


Figura 16. Divisions dels panells de babord (B) i d'estribord (E). Font: pròpia.

La normativa ja contempla els casos on no es diferencien els panells de fons i els de costat, i proporciona les instruccions necessàries per poder realitzar els càlculs si es dona aquesta situació. La norma UNE-EN ISO 11215 especifica que en aquest cas, s'han d'analitzar les pressions d'aquests panells en els dos casos, considerant-los panells de fons i panells de costat. Quan ja es té les dues pressions calculades s'aplica un factor de reducció que correspon al % de l'àrea que es considera de fons o de costat. Després d'aplicar aquest factor, es sumen les dues pressions per obtenir una pressió mixta que és la utilitzada posteriorment per al càlcul del gruix.

En el cas del SenSailor, aquesta metodologia s'ha aplicat d'una manera diferent. Enlloc d'aplicar un factor de reducció al càlcul de pressió, s'ha escollit el resultat més alt. D'aquesta manera s'assegura un panell resistent. Els càlculs s'han realitzat pels panells d'un costat, ja que el vaixell és simètric per la línia de cruïa.

Les dades necessàries del buc es mostren en les següents taules:

L_H	2	m
L_{WL}	1,873	m
B_H	0,71	m
B_{WL}	0,556	m
B_C	0,556	m
v	3,23	kn
m_{LDC}	50,36	kg

Taula 10. Dimensions principals del vaixell. Font: pròpia.

Dimensions panells (m)	x	h	b	l	c
1	0,103	0,072	0,33	0,357	0,053
2	0,461	0,017	0,431	0,5	0,081
3	0,922	-0,013	0,442	0,45	0,085
4	1,386	0	0,336	0,5	0,06
5	1,809	0,052	0,193	0,254	0,04

Taula 11. Dimensions dels panells. Font: pròpia.

On x és la posició horitzontal del centre del panell respecte proa, h és l'altura del centre del panell des de la respecte la línia de flotació, b és la dimensió menor del panell, l és la dimensió major i c és la curvatura del panell respecte un panell pla.

Pressions en els panells del fons

La pressió present als panells del fons (P_{BS}) és:

$$P_{BS} = P_{BS\,BASE} \cdot k_{AR} \cdot k_{DC} \cdot k_L \quad [kN/m^2] \quad (9)$$

i la pressió mínima ($P_{BS\,MÍN}$) és

$$P_{BS\,MÍN} = 0,35 \cdot m_{LDC}^{0,33} + 1,4 \cdot L_{WL} \cdot k_{DC} \quad [kN/m^2] \quad (10)$$

La pressió $P_{BS\,BASE}$ ve donada per

$$P_{BS\,BASE} = (2m_{LDC}^{0,33} + 18) \cdot k_{SLS} \quad [kN/m^2] \quad (11)$$

on m_{LDC} és el desplaçament en càrrega i k_{SLS} és el factor de correcció per l'efecte de "slamming" tenint en compte que $k_{SLS} = 1$ si $m_{LDC} > 5 L_{WL}^3$.

k_{AR} és el factor de reducció per superfície (els valor han d'estar entre 0,25 i 1), on k_R és $k_R = 3 \cdot 10^{-4} \cdot b$, on b és la dimensió menor del panell. A_D és l'àrea de disseny del panell en m^2 que pren el valor de $A_D = (l \cdot b) \cdot 10^{-6}$ per a les xapes de costat, però no es pot prendre major de $2,5 \cdot b^2 \cdot 10^{-6}$

$$k_{AR} = \frac{k_R \cdot 0,1 \cdot m_{LDC}^{0,15}}{A_D^{0,3}} \quad (12)$$

k_L pot prendre dos valors:

$$k_L = \frac{1-0,167 \cdot n_{CG}}{0,6} \frac{x}{L_{WL}} + 0,167 \cdot n_{CG} \text{ però sense ser } > 1 \text{ per a } \frac{x}{L_{WL}} \leq 0,6$$

$$k_L = 1 \text{ per a } \frac{x}{L_{WL}} > 0,6$$

on k_L és el factor longitudinal de distribució de pressió, on $\frac{x}{L_{WL}}$ és la posició del centre del panell analitzat de manera proporcional amb l'eslora de flotació L_{WL} . El valors són entre 0 i 1, proa i popa, respectivament. n_{CG} és el factor de carga dinàmica, en velers aquest és 3.

A la fórmula $P_{BS \text{ MÍN}}$ hi trobem que k_{DC} que és el factor de correcció per categoria de disseny, que en aquest cas és 0,8.

Els valors obtinguts en cada panell es mostren a la següent taula:

kN/m ²	P_{BS}	$P_{BS \text{ MÍN.}}$	$P_{BS \text{ FINAL}}$
Panell 1	0,889	3,373	3,373
Panell 2	3,235	3,373	3,373
Panell 3	6,603	3,373	6,603
Panell 4	8,706	3,373	8,706
Panell 5	12,981	3,373	12,981

Taula 12. Pressions en els panells. Font: pròpia.

Pressions en els panells de costat

La pressió que es troba en els panells de costat s'aproxima com:

$$P_{SS} = [(P_{DS \text{ BASE}} + k_Z) \cdot (P_{BS \text{ BASE}} - P_{DS \text{ BASE}})] \cdot k_{AR} \cdot k_{DC} \cdot k_L \quad [kN/m^2] \quad (13)$$

on el factor de reducció de pressió k_Z ve donat per l'equació

$$k_Z = \frac{Z - h}{Z} \quad (14)$$

on Z és l'altura entre la línia de flotació i la línia de coberta i h l'altura entre la línia de flotació i el centre d'àrea del panell, amb el calat de disseny.

El resultat de l'equació (13) és vàlid sempre que no sigui inferior que el valor resultant de la següent equació:

$$P_{SS \text{ MÍN}} = 1,4L_{WL} \cdot k_{DC} \quad (15)$$

En cas de ser inferior el resultat de l'equació (13) que la (15), es pren el valor de l'equació (15). Però si aquesta dona un resultat inferior a 5 kN/m^2 , es pren aquest últim valor com a $P_{SS \text{ MÍN}}$.

El valor d'aquestes pressions per a cada panell són:

kN/m ²	P _{SS}	P _{SS MÍN.}	P _{SS FINAL}
Panell 1	0,696	5,0	5,0
Panell 2	3,099	5,0	5,0
Panell 3	6,861	5,0	6,861
Panell 4	8,705	5,0	8,705
Panell 5	10,956	5,0	10,956

Taula 13. Pressions de costat. Font: pròpia.

Pressions a coberta

Les pressions en els panells de coberta (P_{DS}) són:

$$P_{DS} = P_{DS\text{ BASE}} \cdot k_{DC} \cdot k_{AR} \cdot k_L \quad \text{kN/m}^2 \quad (16)$$

on la pressió mínima P_{DS} és

$$P_{DS\text{ MÍN.}} = 5 \quad \text{kN/m}^2 \quad (17)$$

on $P_{DS\text{ BASE}}$ és

$$P_{DS\text{ BASE}} = 0,5 m_{LDC}^{0,33} + 12 \quad \text{kN/m}^2 \quad (18)$$

El cas de la coberta és diferent al del buc. Al principi es realitza el mateix procediment, dividint-la en diferent panells mitjançant uns reforços. Aquesta normativa contempla que la coberta ha d'aguantar els esforços produïts pel pes d'una persona i per tots els accessoris que s'hi puguin instal·lar, com passamans, winches, etc. La coberta del SenSailor, en canvi, només ha de garantir l'estanqueïtat del veler i la possibilitat d'instal·lar panells solars.

Més endavant, l'apartat 8.4 (Construcció de la coberta) s'expliquen les característiques de la coberta i la seva construcció.

3.3.2. Equacions d'escantillonatge i càlcul de gruix

Al següent pas, després d'obtenir totes les pressions presents en els panells, es procedeix a elegir el tipus de laminat i el mètode de construcció per fabricar el buc. Aquesta informació, juntament amb el càlcul de propietats mecàniques nominals, es troba també a la norma UNE-EN ISO 12215, en concret en l'annex C, *Propietats i càlcul dels laminats de FRP*.

Mètode d'avaluació del laminat

Aquest annex compta amb 3 tipus d'avaluacions de característiques mecàniques del laminat. En el cas del SenSailor, el mètode utilitzat és el EL-c. Aquest mètode implica que després de fer el laminat, aquest no es sotmet a les proves estipulades en el mètode EL-a, amb la qual cosa només es poden saber les característiques del laminat mitjançant càlculs teòrics, que poden diferir bastant dels valors reals. Per aquest motiu, la solució que proporciona la normativa és multiplicar tots els valors de les característiques mecàniques per un factor de reducció de 0,8. D'aquesta manera s'assegura que el laminat podrà suportar els esforços aplicats.

Càlcul de característiques mecàniques nominals i gruixos

El primer pas és saber quin tipus de fibra s'utilitzarà en la construcció del veler. El cas d'aquest buc s'elegeix fer tota la construcció del buc amb fibra de vidre de tipus *mat*, amb una matriu de resina de polièster. El tipus de fibra *mat* es basa en moltes fibres curtes disposades amb orientació aleatòria formant una manta no teixida però que es manté unida mitjançant un producte lligant. El mat, un cop se li ha aplicat la matriu de resina forma un material isotròpic, però és menys resistent en comparació amb altres tipus de disposició de fibres, com per exemple les teixides. S'ha escollit fibra de vidre tipus *mat* i resina de polièster per l'alta relació qualitat/preu.

Sabent això, ja es pot procedir al càlcul del gruix del laminat del buc (*t*). Aquest es calcula amb la següent fórmula:

$$t = \frac{w}{3,072} \left(\frac{2,56}{\Psi} - 1,36 \right) \quad (19)$$

on *w* és la massa de la fibra per m², en Kg/m², *Ψ* és la massa del contingut de fibra de vidre en el laminat (massa seca de fibra dividit per la massa de fibra més resina). El valor de *w* s'obté de les característiques de la fibra de vidre que són estàndards, donats pel fabricant, i el valor de *Ψ* s'obté de la següent taula:

Tipus de capa de reforç	Laminat de fibra de vidre. Contingut en massa de vidre <i>Ψ</i>		
	Modelat obert		Bossa de buit
	Superfície simple	Superfície complexa	
Mat projectat (CSM)	0,3	0,25	0,36
Mat estratificat (WR) a mà per contacte	0,3	0,25	0,36
Roving teixit (WR)	0,48	0,36	0,58
Combinació roving-mat	0,46-0,18R	0,35-0,11R	0,56-0,22R
Teixits multidireccionals	0,5	0,38	0,6
Teixits unidireccionals	0,55	0,41	0,66

Taula 14. Contingut en massa de fibra de vidre. Font: [24].

Com es pot veure a la Taula 14. Contingut en massa de fibra de vidre, si s'utilitza una fibra tipus mat i a més el mètode d'estratificat a mà (mètode de construcció del SenSailor), el valor proporcional de massa de la fibra respecte al total de la massa del laminat (amb la resina) és de 0,30.

Per tant, sabent aquests valors ja es pot calcular quin gruix té cada capa de laminat:

MAT	w (kg/m ²)	ψ	t (mm)
30	0,030	0,300	0,070
200	0,200	0,300	0,467
300	0,300	0,300	0,701
400	0,450	0,300	1,051

Taula 15. Continguts en massa i gruixos. Font: pròpia.

El següent pas consisteix a calcular el gruix necessari per al buc. Aquest gruix es calcula tenint en compte les pressions obtingudes anteriorment, amb la següent fórmula:

$$t = b \cdot k_c \cdot \sqrt{\frac{P \cdot k_2}{1000 \cdot \sigma_d}} \text{ mm} \quad (20)$$

on b és la dimensió menor del panell en mm, k_c és el factor de correcció de curvatura dels panells que ve donat per la Taula 17, P és la pressió aplicada al panell en kN/m², calculada anteriorment, k_2 és el factor d'allargament del panell per resistència a la flexió, donat per la Taula 16 i σ_d és la tensió de disseny de la capa de fibra de vidre, en N/mm².

Allargament del panell l/b	Factor K2	Factor k3
> 2,0	0,500	0,028
2,0	0,497	0,028
1,9	0,493	0,027
1,8	0,487	0,027
1,7	0,479	0,026
1,6	0,468	0,025
1,5	0,454	0,024
1,4	0,436	0,023
1,3	0,412	0,021
1,2	0,383	0,019
1,1	0,349	0,016
1,0	0,308	0,014

Taula 16. Factors k_2 i k_3 . Font: [24]

c/b	k_c
0 a 0,03	1,0
0,03 a 0,18	$1,1-3,33c/b$
> 0,18	0,5

Taula 17. Factor k_c . Font: [24]

Per obtenir aquest valor s’ha de recórrer altra vegada a l’Annex C de la normativa, on s’explica i es mostra quins són els càlculs per avaluar el valor de resistències mínimes de disseny que poden suportar cada capa de fibra de vidre. El valor utilitzat per fer aquests càlculs és la tensió de ruptura de la capa, anomenat σ_{uf} , i s’obté de la següent manera:

$$\sigma_{uf} = 502 \cdot \Psi^2 + 107 \quad (21)$$

El valor obtingut s’ha de multiplicar pel factor de seguretat anteriorment esmentat. Aquest factor és aplicat donat que el mètode de construcció utilitzat és el EL-c, el qual descriu que no es fan cap tipus de proves de resistència al material. D’aquesta manera es sobredimensiona el gruix del buc per tal d’assegurar la integritat estructural.

Llavors, aquest valor és multiplicat altra vegada per un factor de 0,5 per obtenir σ_d , la tensió de disseny de les capes dels panells.

D’aquesta manera ja es tenen totes les dades necessàries per al càlcul dels gruixos mínims del buc, els quals són:

t_{min} (mm)	Gruix al fons	Gruix al costat	Gruix a la coberta
Panell 1	0,81	0,99	N/A
Panell 2	0,97	1,19	N/A
Panell 3	1,29	1,29	N/A
Panell 4	1,39	1,38	N/A
Panell 5	0,91	0,85	N/A

Taula 18. Gruix dels panells. Font: pròpia.

Per fer la disposició de les capes i fer la construcció més fàcil i ràpida, s’agafa el valor més gran i s’aplica a tot el buc. D’aquesta manera cada capa és uniforme i fàcil de laminar. El resultat és el següent:

Combinació MAT	w (Kg/m ²)	t (mm)
MAT 300	0,300	0,70
MAT 300	0,300	0,70
SUMA	0,600	1,40

Taula 19. Capes i gruix de la fibra. Font: pròpia.

Pel que es pot veure, segons els càlculs de pressió de la normativa, el buc només caldria tenir dues capes de MAT 300, cosa que és lògica per a les dimensions reduïdes que té.

Gruixos mínims

La normativa especifica també uns gruixos mínims que s'han de complir. Els gruixos calculats anteriorment aguanten les forces del mar que s'apliquen al buc, ja siguin provocades per la pressió hidrostàtica o per l'onatge. A diferència dels gruixos calculats per suportar l'acció del mar, aquests gruixos mínims tenen com objectiu que l'estructura del buc aguantí cops, varades o caigudes d'objectes. La massa de fibra per m² mínima ($w_{MÍN}$) es calcula de la següent manera:

$$w_{MÍN} = 0,43 \cdot k_5 \cdot (A + k_7 \cdot V + k_8 \cdot m_{LDC}^{0,33}) \quad [\text{kg/m}^2] \quad (22)$$

on V s'agafa com $2,36 \cdot \sqrt{L_{WL}}$ i els factors k_5 , k_7 i k_8 estan definits en la següent taula:

Material	Situació	A	k_5	k_7	k_8
FRP	Fons	1,5	1	0.03	0,15
	Costat	1,5	1	0	0,15

Taula 20. Factors de gruix mínim. Font: [24]

Tots els càlculs anteriors s'ha obtingut només tenint en compte les accions del mar sobre el buc. El següent pas és veure si el càlcul de la normativa per al gruix mínim és inferior o superior al calculat mitjançant les pressions de disseny. Per obtenir això, la normativa dona la fórmula de massa mínima per m² que han de tenir els panells (fórmula (22)). Els resultats son els següents:

Massa mínima per avarades, caigudes o cops	0,9212 kg/m ²
Massa del gruix calculat amb les pressions	0,6000 kg/m ²

Taula 21. Massa de fibra per m². Font: pròpia.

Per tant, com es pot apreciar, la massa mínima per m² de fibra a un panell és superior a la calculada amb les pressions de disseny. La solució és afegir una capa més de fibra per a que el valor de la massa sigui igual o superior:

Combinació MAT buc	w (Kg/m ²)	t (mm)
MAT 300	0,3000	0,70
MAT 450	0,4500	1,05
MAT 300	0,3000	0,70
SUMA	1,3500	3,15

Taula 22. Augment del gruix per complir amb la massa mínima per m². Font: pròpia.

Amb aquesta combinació de gramatges, ja s'assoleix el mínim de fibra segons la normativa i per tant ja és suficient per assegurar que els panells poden aguantar tant les forces provinents de l'acció dels mar com cops d'objectes flotants, varades, caigudes, etc.

Tot i això, es decideix afegir una capa més de MAT 300, ja que la construcció es durà a terme de manera totalment artesanal i manual i es vol aportar una mica més de resistència a l'estructura, assumint l'augment de pes. S'ha afegit una capa de mat 300 a la cara interior del buc. Finalment, la distribució de capes del laminat és la següent:

Combinació MAT buc	w (Kg/m ²)	t (mm)
MAT 300	0,3	0,70052083
MAT 300	0,3	0,70052083
MAT 450	0,45	1,05078125
MAT 300	0,3	0,70052083
SUMA	1,35	3,15234375

Taula 23. Combinació de fibra definitiva. Font: pròpia.

El cas de la coberta

La coberta del SenSailor és pot diferenciar en molts aspectes d'una coberta d'una embarcació tripulada. Aquest, al ser un veler no tripulat, no ha de suportar el pes de persones sobre la coberta i tampoc existeix la necessitat d'instal·lar accessoris típics de velers d'esbarjo com els *winch*s, bites, candelers, etc. Aquesta coberta està dissenyada simplement per a què el vaixell sigui estanc i pugui suportar els panells solars.

Per aquesta raó, el càlcul de pressions de disseny que s'ha fet amb al buc no es té en compte en el cas de la coberta. Com ja s'ha esmentat, la normativa no és aplicable al cas d'aquest veler, només s'utilitza com a guia per fer l'estructura i assegurar la seva integritat.

El disseny de la coberta ha sofert algunes modificacions per raons de construcció i complicacions alhora de fabricar-la, com s'aprecia a la Figura 17. Inicialment, es projecta una coberta amb certa brusca per augmentar l'espai interior del buc i facilitar l'evacuació de l'aigua embarcada durant la navegació. La construcció es preveu realitzar amb un laminat monolític de poc gruix, amb elements de reforç a la cara inferior per augmentar la seva rigidesa.

Malgrat això, finalment s'ha optat per una coberta plana que faciliti el procés de construcció i la instal·lació de panells solars. Amb la col·laboració de l'Institut de Nàutica de Barcelona, s'ha

dissenyat una coberta amb un laminat de tipus *Sandwich*, amb un nucli de niu d'abella de polipropilè d'un centímetre de gruix per augmentar la seva rigidesa disminuint el pes de la peça.

Aquesta construcció assegura la estanqueïtat del veler, i proporciona la resistència suficient per a instal·lar panells solar i de tapes de registre per accedir a l'interior del buc.

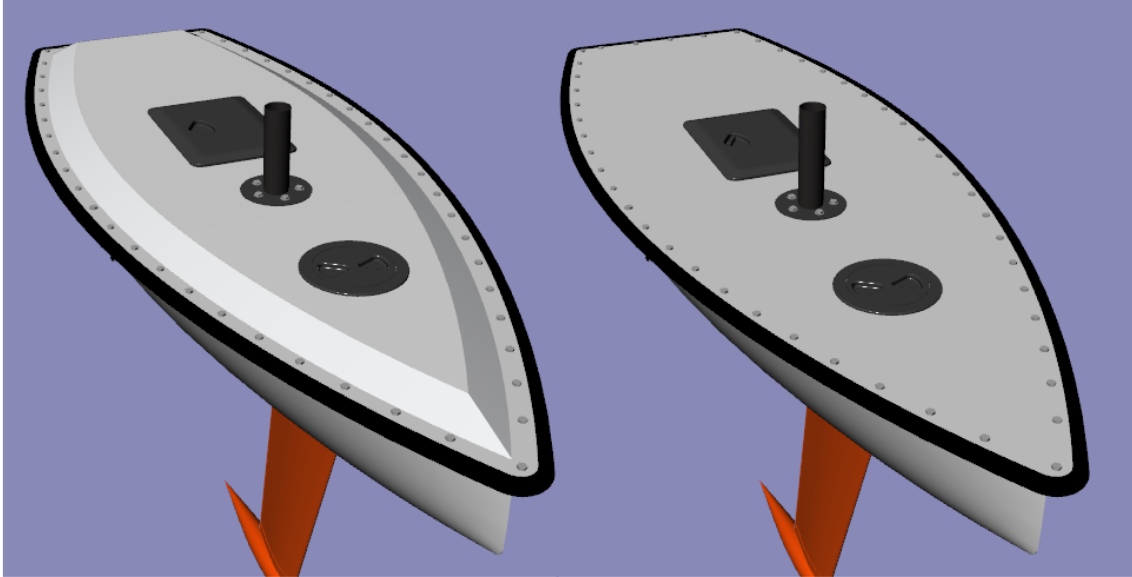


Figura 17. Disseny de coberta inicial amb laminat tipus monolític (esquerra) i coberta construïda finalment amb laminat tipus "Sandwich" (dreta). Font: pròpia.

Disseny de reforços

El buc està dividit en 5 panells en total, amb un gruix ja definit pensant en què a cada divisió hi correspon un element de reforç (Figura 16). Aquests reforços són imprescindibles per a la transferència dels esforços que el buc sofrirà en la seva operació al mar. Per trobar la geometria, les dimensions i el mètode de construcció d'aquests reforços cal recórrer de nou a la normativa UNE-EN ISO 11215-5, a l'Annex G. També s'ha tingut en compte la normativa UNE-EN ISO 11215-6, on s'expliquen els mètodes i les bones pràctiques de construcció.

Els reforços del buc s'han fabricat amb el mateix tipus de material compost que el buc, fibra de vidre tipus mat, amb matriu de resina de polièster. Tot i això, s'ha utilitzat fibra de vidre biaxial (més resistent a la tracció) en alguns punts en concret de l'estructura de reforç per suportar tensions altes, com per exemple l'enfognament i el calaix de l'orsa. Pels reforços del buc s'han calculat els esforços i les característiques de forma seguint el procediment que es mostra a continuació.

Aquests reforços no poden tenir una superfície de cisalla o àrea de secció transversal (A_w) i un mòdul d'inèrcia (SM) inferior als següents valors:

$$A_w = \frac{k_{SA} \cdot P \cdot s \cdot l_u}{\tau_d} 10^{-6} \text{ cm}^2 \quad (23)$$

$$SM = \frac{83,33 \cdot k_{CS} \cdot P \cdot s \cdot l_u^2}{\sigma_d} 10^{-9} \text{ cm}^3 \quad (24)$$

on k_{CS} és el factor de curvatura del reforç que es dona a la Taula 24, C_u és el bombament del reforç corbat, en mm, k_{SA} és el factor de superfície de cisalla del reforç que es dona a la Taula 25, P és la pressió de disseny en kN/m², s és la separació entre reforços en mm, l_u és la longitud del reforç en mm, σ_d és la tensió de disseny del reforç en N/mm², A_w és la superfície de cisalla (àrea de la secció transversal del reforç) en cm², τ_d és la tensió de disseny de cisalla de l'anima del reforç donada per la Taula 26 en N/mm² i finalment σ_d (46,8 N/mm²) i τ_d (24,8 N/mm²) són obtinguts amb els valors calculats de les característiques nominals del material i mètode de laminat utilitzat.

C_u/l_u	k_{CS}
0 a 0,03	1
0,03 a 0,18	1,1 - 3,33(Cu/lu)
> 0,18	0,5

Taula 24. Factor de reducció k_{CS} Font: [24]

Disposició del reforç	k_{SA}
Unit al costat	5
Altres disposicions (flotant)	7,5

Taula 25 Factor k_{SA} . Font: [24]

Material	Tensió de disseny en tracció i compressió (N ² /mm ²)	Tensió de disseny a la cissalla (N ² /mm ²)
Laminat FRP	0,5 σ_{UT} i 0,5 σ_{UC}	0,5 τ_U

Taula 26. Tensions de disseny del material Font: [24]

En el cas dels reforços fets de fibra de vidre, aquests també han de complir amb el mínim del segon moment d'àrea (I):

$$I = \frac{26 \cdot k_{CS}^{1,5} \cdot P \cdot s \cdot l_u^3}{k_{1S} \cdot E_{tc}} 10^{-11} \text{ cm}^4 \quad (25)$$

on k_{1s} és el factor de deflexió per als reforços, amb el valor de 0,05 i E_{tc} és la mesura dels mòduls d'elasticitat en tracció/compressió del material en N/mm².

Aquestes característiques dels reforços calculats per al reforç entre els dos panells que suporten més pressió i esforços, i tenen els següents valors:

Superfície de l'ànima A_w (cm ²)	Mòdul d'inèrcia SM (cm ³)	Segon moment d'àrea I (cm ⁴)
0,328	0,675	0,127

Taula 27. Resultats de les equacions (23)(24)(25). Font: [24]

Aquests valors mínims es comparen amb les taules dels diferents tipus de reforços que es poden trobar a l'annex G de la normativa. S'elegeix el tipus de reforç *barret de copa*, ja que la forma del nucli és molt fàcil de fer mitjançant espuma de poliuretà extruït:

1	2	3	4	5	6	7 8 9		
Dimensions de les formes			Gruix del costat	Xapa associada	Pes del vidre de reforç	Propietats Geomètriques		
h (mm)	b_b (mm)	b_c (mm)	t_p (mm)	$20 t_p + b_b$ (mm)	W_f (mm)	$SM_{min.}$ (cm ³)	A_w (cm ²)	I (cm ⁴)
25	36	30	5	136	0,600	1,8	0,7	5
			10	236	0,600	2,7	0,7	8
			15	336	0,600	5,1	0,7	17

Taula 28. Propietats dels reforços de barret de copa. Font: [24].

Pel que es pot veure, amb els valors que s'han calculat, les dimensions que més s'acosten que tinguin aquestes característiques són les primeres, encara que es podria reduir. Igualment s'agafen aquestes, ja que així s'assegura que el buc tindrà uns reforços suficientment resistents com per aguantar tot tipus d'esforços.

A la Figura 18 es mostra la reducció d'alçada a l'extrem del reforç, que té per objectiu reduir la concentració de tensions a la paret del buc just en el punt on acaba el reforç. També es pot apreciar una imatge en perspectiva d'aquest detall a la Figura 24, en segon pla. A la Figura 19 es mostra l'amplada del solapament que ha de tenir cada capa del laminat del reforç (en mm). L'interior del reforç està omplert amb espuma de poliuretà extruït, el qual no aporta propietats mecàniques però ajuda a donar la forma apropiada al laminat.

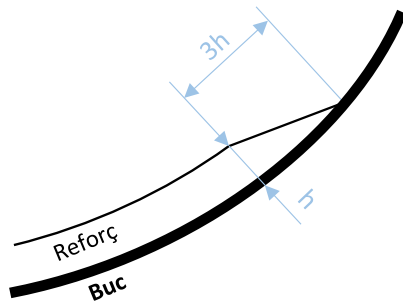


Figura 18. Reducció d'alçada (h) a l'extrem del reforç transversal del buc. Font: [24].

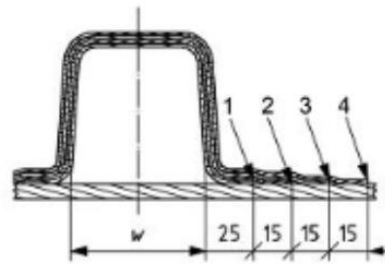


Figura 19. Solapaments de les capes del laminat d'un reforç de barret de copa. Font: [24].

3.4. Estanquitat del buc

L'estanquitat del buc és un requeriment essencial per aquest tipus de vaixell. Qualsevol petita via d'aigua podria posar en perill la navegació. Per aquest motiu, és necessari un buc totalment hermètic. Per altra banda, el SenSailor ha d'estar dissenyat de manera que es pugui desmuntar completament pel seu transport, i això suposa un repte per l'estanquitat.

Els cables que baixen per l'interior del pal entren a l'interior del vaixell a través d'un orifici practicat a la base de l'enfognament (al costat de popa), a l'interior del buc. Per tant, l'espai d'aire de l'interior del buc es comunica amb el de l'interior del pal a través d'aquest orifici. Així doncs, la cavitat hermètica haurà d'incloure l'espai de dins el buc i el de dins el pal. La Figura 20 mostra una secció lateral del vaixell pel pla de cruixia on s'indiquen de color verd els espais hermètics, comunicats entre ells.

Per evitar la inundació de tot l'espai hermètic en cas de via d'aigua i l'enfonsament del vaixell, és necessari disposar de reserves de flotabilitat. Aquestes reserves no s'han construït de manera estructural. S'ha considerat més adequat disposar reserves de flotabilitat inflables als espais que quedin lliures a l'interior del buc, no ocupats per equips del sistema elèctric o elements de reforç. D'aquesta manera la manipulació dels equips pel seu us o pel manteniment resulta molt més pràctic i es manté la possibilitat d'afegir nous equips o variar-ne la distribució, disposant les reserves de flotabilitat segons la necessitat del moment. Les reserves inflables no s'han disposat a l'interior del buc de moment, ja que el vaixell està en fase de proves. Caldria adquirir-les al moment que s'hagi de sotmetre el vaixell a alguna missió en concret o travessa on es perdi el seu control visual.

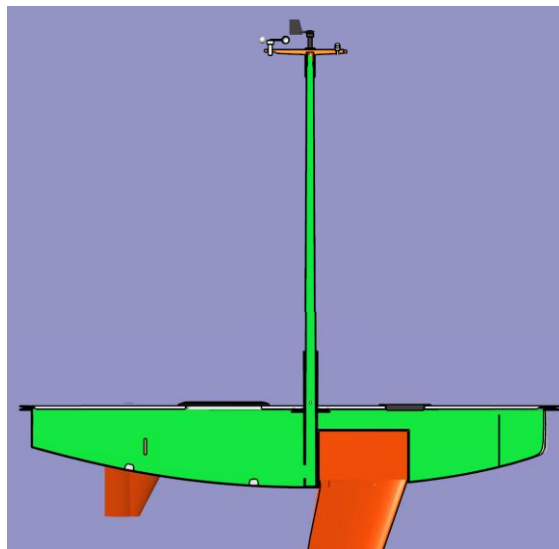


Figura 20. Espai hermètic. Font: pròpia.

Deixant de banda l'estanquitat a les llimeres i al calaix de l'orsa, a la qual ja s'ha dedicat una explicació als corresponents apartats, hi ha en concret 4 punts crítics per on poden sorgir vies d'aigua. Aquests són:

- Junta perimetral de la coberta amb el buc.
- Escletxa entre el tub de l'enfognament i el forat de la coberta per on hi passa.
- Escletxa entre l'enfognament i el pal de la vela que s'hi encaixa.
- Forats per on s'introdueixen els cables dels components electrònics exteriors, cap a l'interior del pal.

A continuació, s'explica amb detall el sistema de tancament hermètic desmuntable a cada un d'aquests punts.

3.4.1. Junta perimetral coberta-buc

Per realitzar segons quines operacions rutinàries del SenSailor a l'interior del buc, no és necessari desmuntar la coberta. El muntatge i desmuntatge de l'electrònica, la càrrega de bateria i l'encesa del vaixell es pot fer a través de les tapes de registre ubicades sobre coberta. Per altra banda, hi ha altres operacions que no es poden realitzar a través d'aquests accessos i cal retirar la coberta per poder treballar amb comoditat. Aquestes son, per exemple, desmuntar els apèndixs, lubricar les llimeres o accedir als engranatges de transmissió dels servomotors dels timons.

Per facilitar al màxim aquestes operacions, s'ha dissenyat un sistema d'unió que no requereixi trencar la junta herètica, sinó que es pugui fer afluixant cargols i desmuntant de manera no destructiva. Aquest sistema es basa amb una solapa construïda tant al buc com a la coberta, que sobresurt lateralment al llarg de tot el perímetre de l'embarcació. Quan es munta la coberta les dues solapes coincideixen i entre elles s'hi ubica un material que n'assegura el tancament

hermètic, basat amb dos cilindres de goma de 10 mm de diàmetre que recorren paral·lelament tot el perímetre.

La subjecció del conjunt es realitza mitjançant cargols amb rosca, que travessen les dues solapes i, aplicant-hi pressió, comprimeixen les gomes fins a assegurar el tancament estanc. Al llarg de tota la vora exterior de les solapes, una altra goma de secció en forma de U mossega el cantell del conjunt. Això proporciona una altra barrera estanca a la junta i protegeix les solapes de petits cops durant les maniobres de varada (Figura 21).

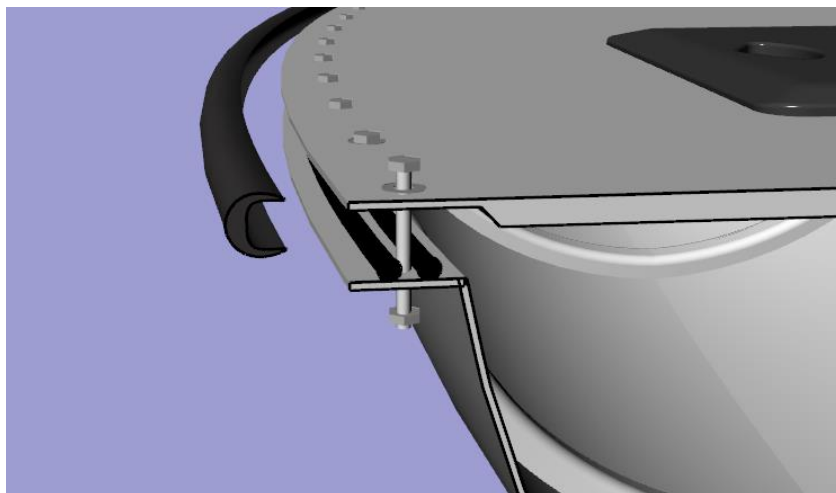


Figura 21. Secció transversal de la junta perimetral coberta-buc. Font: pròpia.

3.4.2. Enfogonament i coberta

L'enfogonament està soldat a l'interior del buc i es prolonga cap amunt per sobre el nivell de coberta. Per poder desmuntar la coberta, aquesta ha de tenir un orifici obert per on pugui passar el tub. Per molt ben ajustat que estigui el diàmetre de l'orifici amb el de l'enfogonament, aquest punt sempre serà una possible via d'aigua. Per això, s'ha dissenyat un sistema semblant al descrit anteriorment per tancar el buc i la coberta.

Tal i com es pot apreciar a la Figura 22, a l'enfogonament s'hi solda un disc paral·lel al pla horitzontal, just per sota el nivell de coberta. Quan es tanqui la coberta, aquesta quedarà recolzada sobre aquest disc. Sobre la superfície de contacte del disc amb la coberta, s'hi col·loquen els mateixos cilindres de goma utilitzats en el cas anterior, disposats en forma d'anells concèntrics. Aquestes gomes doncs, queden pressionades entre el disc i la coberta, evitant que l'aigua que es pugui filtrar per l'esclatxa de l'enfogonament entri a l'interior del buc.

Tot el conjunt queda fixat i comprimit mitjançant 5 cargols, que travessen la coberta, les gomes i el disc (Figura 23). Com que aquesta zona de la coberta està fabricada amb *sandwich* i la pressió puntual dels cargols la podria malmetre, s'ha col·locat un disc de PVC rígid que ajudi a repartir els esforços de compressió.

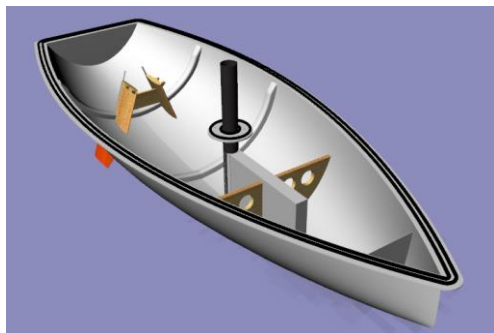


Figura 22. Vista general de les juntes del buc amb la coberta. Font: pròpia.

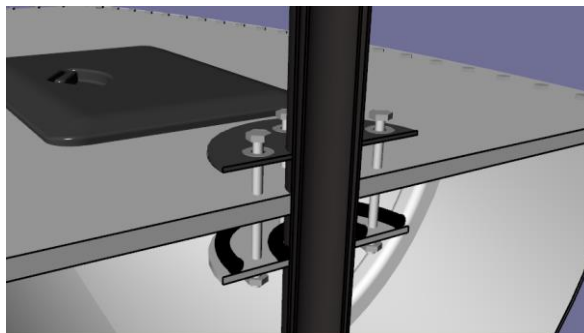


Figura 23. Secció transversal de la junta entre l'enfognament i la coberta. Font: pròpia.

3.4.3. Encaix del pal a l'enfognament

Tant el pal com l'enfognament tenen una lleugera forma cònica. Això vol dir que tenen el diàmetre d'un extrem lleugerament superior a l'altre. En el cas del pal, el diàmetre gran es troba a l'extrem inferior, i en el cas de l'enfognament, a l'extrem superior. Quan s'encaixen ambdues peces i el pal toca al fons del buc, el seu diàmetre inferior queda perfectament ajustat amb el de l'enfognament, però queda una petita escletxa entre l'extrem superior de l'enfognament i el pal.

Aquest espai no és desitjable, ja que produeix joc entre les peces i és un punt per on pot entrar aigua a l'interior del buc. El problema es soluciona tapant l'espai mitjançant 2 anells de goma del gruix i diàmetre exacte perquè quedin comprimits quan es faci el muntatge Figura 24. Aquests anells tenen una elasticitat prou baixa com per què s'eviti el joc del pal, però suficient perquè quedin comprimides proporcionant un tancament hermètic.



Figura 24. Secció de la junta hermètica entre l'enfognament i el pal. Font: pròpia.

3.4.4. Orificis d'entrada dels cables dins el pal

A la part superior del pal s'hi ubiquen alguns components electrònics necessaris per la navegació i la presa de dades. Per altra banda, a l'interior del perfil de la vela s'hi ubica el servo que acciona l'aleró. Tots aquests components van connectats amb el sistema de control a través d'uns cables que passen per l'interior del pal. Així doncs, tant a la part superior del pal (Figura 25) com a mitja alçada (Figura 26) hi ha uns petits orificis que permeten l'accés d'aquests cables i, com a conseqüència, representen fuites del conjunt hermètic.

Cal dir que aquests punts estan allunyats de la superfície de l'aigua del mar i protegits dels esquitxos i de la pluja, ja sigui pel suport dels sensors o pel propi folre de la vela. Això fa que no sigui totalment imprescindible garantir el perfecte tancament d'aquests punts si es volen realitzar proves i navegades de curta durada. Tot i això, si es vol sotmetre el vaixell a una travessa llarga o a condicions adverses on el risc de bolcar sigui més elevat, és recomanable taponar aquestes vies d'accés amb cola segellant. Es recomana la marca *Sikaflex*, usada per aplicacions nàutiques i del sector de la construcció, ja que ofereix confiança i seguretat en aplicacions d'aquests tipus.

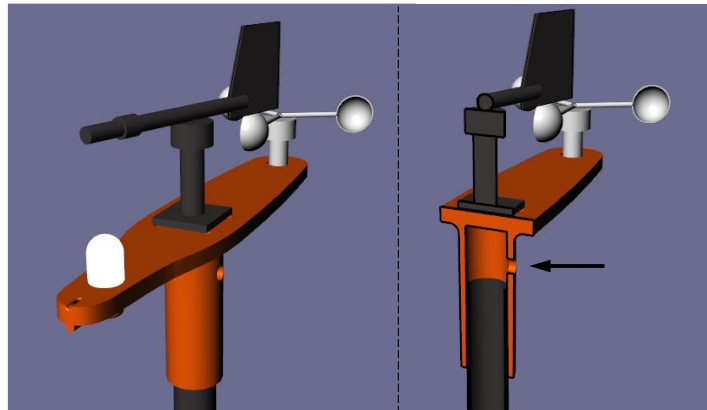


Figura 25. Pas superior de cables al pal, indicat amb una fletxa. A l'esquerra, el suport de sensors en perspectiva. A la dreta, un tall transversal de la mateixa peça. Font: pròpia.

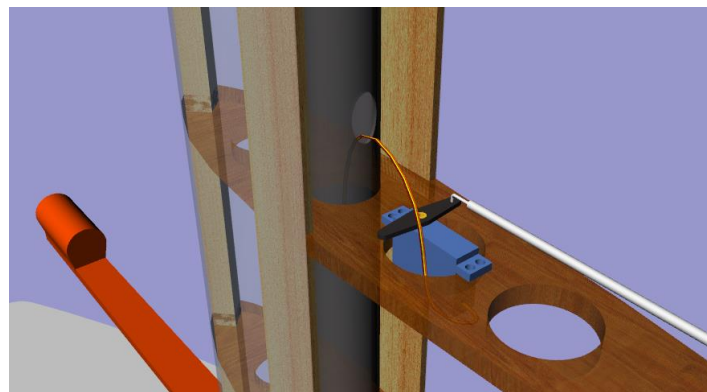


Figura 26. Pas de cables a mig pal. Font: pròpia.

3.4.5. Posició de tapes de registre i angle d'inundació

La normativa utilitzada per fer l'estudi d'estabilitat del vaixell també especifica com han d'estar distribuïdes les zones inundables (possibles punts d'accés d'aigua a l'interior del buc) en funció de la classe d'embarcació. En el cas del SenSailor, és necessari disposar dues tapes de registre sobre la coberta per tal de poder accedir al seu interior sense desmuntar l'embarcació (Figura 27). Aquestes tapes són estanques als esquitxos i l'aigua que pugui embarcar sobre la coberta, però el fabricant no garanteix la completa hermeticitat en cas d'immersió. Per seguretat, s'han considerat aquestes vies d'accés com possibles zones inundables, i s'ha estudiat l'angle d'escora màxim a partir del qual tocarien la línia de flotació. S'han posicionat de manera que el vaixell pugui assolir com a mínim un angle d'escora de 95° sense perill d'inundació (Figura 28).

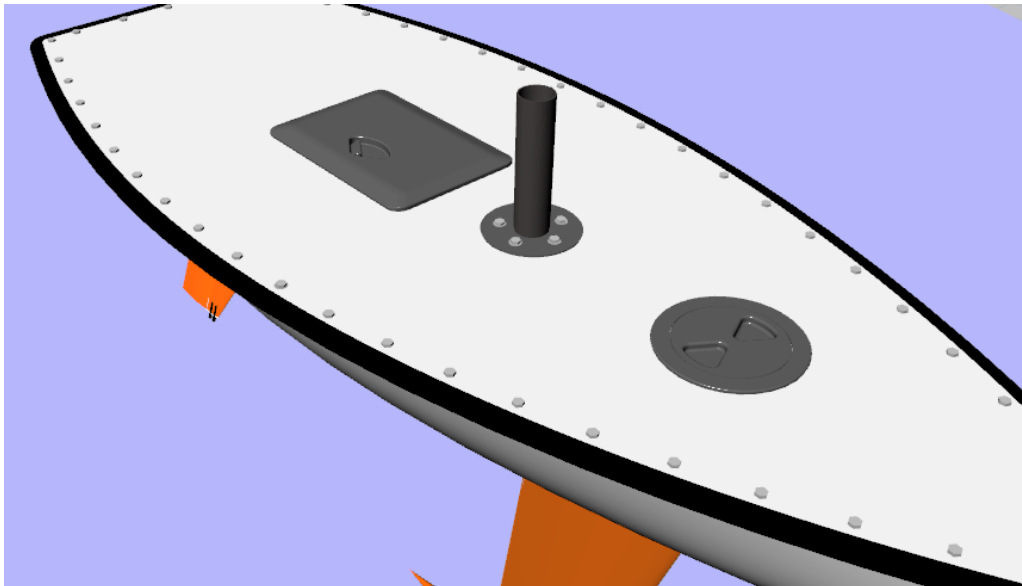


Figura 27. Vista en perspectiva de la coberta amb les tapes de registre i els cargols de les juntes.
Font: pròpia.

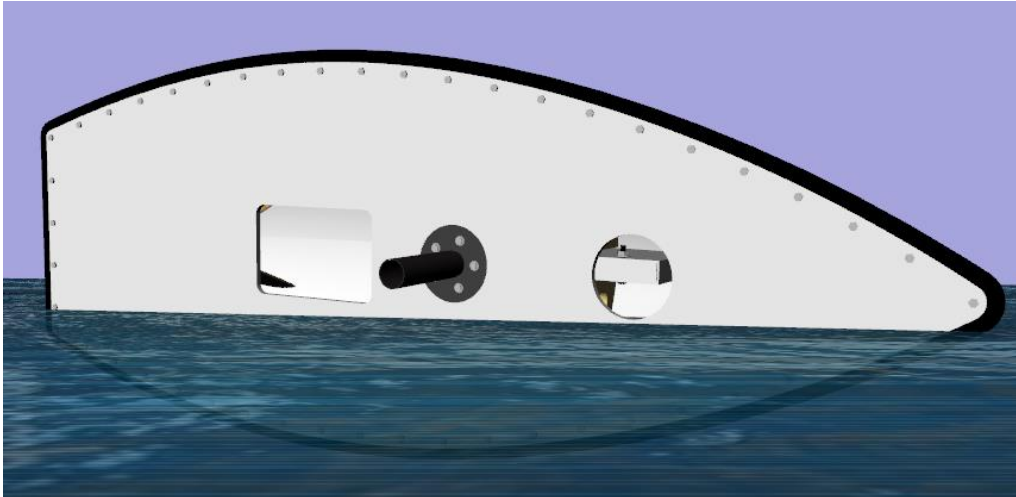


Figura 28. Escora de 95°. Els accessos de coberta es mantenen fora l'aigua. Font: pròpia.

Capítol 4. Disseny del sistema propulsiu

En aquest capítol s'explica la fase de disseny del sistema propulsiu. Possiblement, un dels elements que desperta més curiositat del vaixell és el mètode propulsiu que utilitza, tant per la seva forma com pel seu funcionament. Per tal de justificar el motiu d'aquesta opció, pel cas concret del SenSailor, aquest capítol exposa les opcions considerades al llarg d'aquest procés i el discerniment realitzat fins a trobar la millor alternativa.

El capítol s'estructura de la següent manera. A l'apartat 4.1 s'expliquen els motius pels quals s'ha elegit un sistema de propulsió eòlica enlloc d'elèctrica. A la secció 4.2 s'exposen les opcions de tipus de vela analitzades, amb els seus avantatges i inconvenients enfront l'aplicació que es vol donar al vaixell en qüestió. Tot seguit, a 4.3, s'exposen les opcions de mètodes d'accionament de la vela analitzades. A l'apartat 4.4 s'explica l'estudi realitzat per escollir el perfil aerodinàmic més idoni per la vela rígida. A continuació, a 4.5, es mostren els càlculs per estudiar el comportament de l'aleró. A la secció 4.6 s'exposa el disseny estructural de l'aparell. Finalment, a 4.7, s'explica el mecanisme que fa moure l'aleró.

4.1. Elecció del mètode de propulsió

Des de la fase inicial del projecte s'ha considerat el mitjà de propulsió com una de les característiques més decisives del projecte, ja que al voltant d'ella gira la resta del disseny. La instal·lació d'un motor elèctric per fer avançar el vaixell comportaria certs desavantatges relacionats amb l'augment del consum energètic. La bateria s'hauria de dimensionar per tal de poder emmagatzemar una quantitat molt superior d'energia que pogués alimentar el sistema de propulsió en hores nocturnes o sense llum solar. A més, es necessitaria una major superfície de panells solars per poder garantir el subministrament elèctric en hores de llum i la càrrega completa de les bateries, i això comportaria canvis desfavorables en les dimensions del vaixell.

Per una banda, l'espai interior del buc i la superfície de la coberta s'haurien d'augmentar per poder-hi allotjar els equips d'alimentació. Per altra banda, l'augment del desplaçament del vaixell s'hauria de compensar amb un increment en l'eslora total per mantenir el calat idoni. Aquest augment en les dimensions del vaixell requeriria un consum més alt de material, tant per la fabricació del buc com per la construcció del seu motlle. A part de l'augment del temps de

treball, tot plegat afegiria un cost considerable al pressupost del projecte, tant pel que fa al material de construcció com a l'equipament elèctric necessari.

Si la construcció d'aquesta embarcació es tractés d'un projecte amb fins comercials i es disposés d'un fons econòmic capaç de cobrir les despeses, es faria un estudi per contemplar la viabilitat d'un sistema de propulsió elèctric. La realitat del projecte SenSailor, en canvi, és una altra. Es tracta d'un treball impulsat per dos estudiants des de zero, elaborat de manera artesanal i inicialment sense suport econòmic. Per aquest motiu, algunes de les especificacions del projecte contempnen aquestes limitacions i posen com a requeriment la viabilitat constructiva i econòmica amb l'objectiu que el projecte es pugui dur a terme de cap a fi amb garantia.

Prenent doncs la propulsió eòlica com el mitjà més viable per l'embarcació del projecte, s'ha procedit a elegir les característiques principals de l'aparell i fer-ne els càlculs de dimensionament. S'ha optat per instal·lar una sola vela per simplificar el procés constructiu i deixar més espai a coberta per instal·lar-hi portells, panells solars i equips de mesura.

A continuació s'explica el procés de disseny i dimensionament de la vela. S'informa que la explicació es fa de manera lineal, però a la realitat el procés ha sigut iteratiu. Per aquest motiu, en alguns apartats és possible que hi hagi paràmetres de la vela que es donin per decidits abans d'explicar el seu motiu.

4.2. Elecció del tipus de vela

En funció de l'embarcació, el concepte de vela pot adoptar moltes formes, mides i característiques diferents que s'adapten a les condicions o requeriments de la navegació. La majoria de velers d'esbarjo, per exemple, utilitzen veles basades en superfícies de teixit flexibles. D'altres utilitzen materials semirígidis que adopten la curvatura idònia per generar sustentació. Fins i tot, en embarcacions modernes, s'han arribat a fer servir perfils alars rígids imitant la forma de les ales d'avió però en posició vertical. Aquests són alguns dels conceptes de vela que existeixen a l'actualitat, però donat que la vela és un dels mitjans de propulsió més antics en el mar, s'han arribat a inventar moltes variacions a fi d'aprofitar el millor possible l'energia del vent.

En el procés d'elecció del tipus de vela pel SenSailor, s'ha fet un estudi qualitatiu entre tres opcions per tal de buscar la solució més òptima per les seves necessitats. A continuació es mostra la comparació entre les característiques dels tipus valorats.

4.2.1. Vela tradicional

Descripció: El tipus *tradicional* es refereix al concepte més habitual quan es parla de veles. Es basa en un o diversos trossos de tela forta cosits entre si que, fermats a una arboradura, és a dir, un conjunt de pals, antenes o varengues, tenen la funció de transmetre l'energia del vent a

l'embarcació i impulsar-la. Seguint aquest principi, existeixen moltes formes de disposar les veles a una embarcació. La més usada actualment en vaixells esportius i de lleure és l'anomenat Aparell de Marconi (Figura 29), format per una vela Major de forma aproximadament triangular, hissada a un pal pel costat del gràtil i en alguns casos fixada a una botavara pel costat inferior. A més, pot portar una o varies veles de proa hissades als estais [4]. L'opció de vela tradicional plantejada pel SenSailor ha estat un aparell de Marconi únicament amb la vela Major.

Avantatges: Aquesta tipus presenta l'avantatge d'una construcció senzilla, utilitzant materials relativament econòmics. A més, al ser una vela composta únicament per un teixit fermat a l'arboradura, resulta ser l'opció més lleugera i ajuda a fer baixar el centre de gravetat de l'embarcació i, per tant, aconseguir una millor estabilitat.

Inconvenients: Els punts d'unió entre la vela i l'arboradura resulten punts febles que poden fallar fàcilment davant la presència de temporal o condicions adverses. A part d'això, un dels aspectes importants pel rendiment eficient d'una vela tradicional és el bon trimat de la vela. Amb altres paraules, l'ajustament correcte de la tensió del teixit per cada un dels seus costats. Als velers tripulats, el trimat es té en compte constantment, però a un vaixell autònom esdevé una tasca molt complexa que augmenta les probabilitats de fallada.



Figura 29. Aparell de Marconi. Font: [31].

4.2.2. Vela semirígida

Descripció: Algunes embarcacions de vela modernes destinades a la competició utilitzen veles fetes d'un material conegut com *monofilm*, com per exemple els windsurfs moderns [5]. Aquest material substitueix els teixits utilitzats a les veles tradicionals per làmines de material plàstic reforçades amb fibres, que s'orienten segons els esforços. Sovint aquest tipus de vela es combina amb sabres forçats, per donar rigidesa al material. Aquests elements es tracten d'uns llistons semirígids fets amb fibra de vidre i materials plàstics que s'introdueixen a través de la baluma dins unes butxaques cosides a la vela, paral·leles a la botavara. Els sabres tenen la funció de donar rigidesa a la vela i evitar el flameig. En alguns casos, els sabres poden prolongar-se des de la baluma fins el gràtil i, aplicant-los compressió, s'aconsegueix que aquests flexionin donant

una curvatura concreta a la vela que afavoreixi la sustentació. Aquests tipus de sabres se'ls anomena *forçats*, ja que obliguen la vela a adoptar una forma concreta (Figura 30).

Avantatges: El material utilitzat aporta una major resistència amb un pes menor. Al ser un material impermeable, no reté l'aigua dels esquitxos i la pluja i el seu pes es manté constant. A més, els sabres forçats permeten que la vela adopti un perfil més aerodinàmic que afavoreixi la sustentació i millori el rendiment de la vela.

Inconvenients: Aquest tipus de vela no garanteix una bona fiabilitat en un vaixell no tripulat. Com al tipus anterior, els punts de fixació entre la vela i l'arboradura segueixen sent elements febles amb probabilitats de fallada altes. A més s'afegeix la dificultat de la instal·lació dels sabres i el sistema d'ajust de tensió per regular la curvatura. Pel què fa al desgast, tot i ser un material més resistent a la tracció i menys elàstic, les propietats mecàniques del *monofilm* es veuen afectades sota la radiació dels rajos ultravioletes del sol i, per tant, la seva vida útil és més curta.



Figura 30. Vela de monofilm i sabres forçats. Font: [32].

4.2.3. Vela rígida amb perfil alar

Descripció Actualment aquest tipus de vela es fa servir molt poc a l'àmbit naval. La seva utilització es limita a velers d'alta competició que busquen la màxima eficiència, vaixells comercials amb sistemes de propulsió alternatius per reduir emissions (Figura 31), o altres aplicacions concretes relacionades amb experiments científics. Les veles rígides es basen en un sistema molt similar a les ales dels avions però posades en posició vertical sobre coberta. Una estructura rígida dissenyada amb un perfil aerodinàmic simètric, pivota sobre un punt que fa de unió amb la coberta del vaixell i s'orienta amb aquella posició que generi la màxima empenta endavant. Donades les seves característiques, l'aparell no disposa d'eixàrcia ferma ni arboradura, ja que el perfil alar es dissenya amb una estructura interna capaç de suportar tots els esforços produïts per l'acció del vent i el moviment del vaixell.

Avantatges: Aquest sistema, encara que físicament presenti moltes diferències respecte els anteriors, funciona amb el mateix principi aerodinàmic. Tot i això, donat que el perfil de la vela

es dissenya amb uns paràmetres aerodinàmics concrets i aquests es mantenen fixos de manera constant, el comportament de la vela és molt més eficient i previsible. Al ser un sistema més compacte i robust, es redueixen el número d'unions mòbils i mecanismes d'ajustament, i això disminueix el risc de fallada. A més, els materials usats són més resistents als impactes i a les condicions atmosfèriques adverses. En conjunt, un perfil alar resulta ser la opció més fiable.

Inconvenients: A nivell constructiu, la fabricació artesanal de la vela implica una dificultat superior, ja que requereix un procés llarg de varies etapes, l'ús de tècniques manuals avançades i una precisió rigorosa. Quan als materials, el ventall de possibilitats és molt extens. Per tant, és necessari un estudi per identificar aquells que facilitin al màxim el procés constructiu amb el mínim cost econòmic possible.

Veient els avantatges i inconvenients de cada un dels tipus de vela considerats, s'ha optat per l'ús d'una vela rígida. S'han considerat els desavantatges relacionats amb la dificultat constructiva i econòmica, i s'ha buscat un disseny de vela senzill però que conservi la robustesa i fiabilitat que caracteritza aquest sistema de propulsió.



Figura 31. Disseny de vela rígida de l'empresa Bound4blue. Font: [30].

4.3. Elecció del mètode d'accionament

Quan una vela s'enfronta al vent, la força generada a la seva superfície es divideix en dues components, una longitudinal a la direcció d'avanç i l'altre transversal. Ajustant l'angle de la vela respecte el vent, s'aconsegueix variar la magnitud d'aquestes dues components. L'angle més òptim serà aquell en què, donat un rumb determinat, es maximitza la component longitudinal i es minimitza la transversal. D'aquesta manera s'aconsegueix orientar la força resultant de la vela per a que proporcioni el màxim impuls endavant i el mínim abatiment. De fet, encara que no es trobi aquest angle més òptim, el vaixell avançarà si s'aconsegueix una component longitudinal prou gran com per vèncer el fregament de l'embarcació.

Utilitzant aquest principi, alguns velers autònoms trobats a la recerca inicial del projecte no disposen de cap sistema de regulació d'angle de la vela. Simplement deixen que la vela es posi a un angle fix a babord o a estribord, en funció d'on vingui el vent, i no es belluga d'aquesta

orientació navegui amb el rumb que navegui. Amb això no aconseguen avançar a la màxima velocitat possible, però eviten haver d'implementar sistemes de motors i engranatges que augmentarien la probabilitat de fallada del sistema de propulsió. En el cas concret del SenSailor, s'ha preferit utilitzar un sistema dinàmic que ajusti el millor angle de vela per cada rumb i que també pugui posar-se paral·lela al vent en cas que es donin condicions extremes per anul·lar la força de sustentació i reduir el risc de ruptura. A la vegada, però, s'ha fet un estudi per valorar el sistema d'accionament de la vela més fiable i oportú.

4.3.1. Accionament per escota i servo enrotllador

Funcionament: Com a la majoria de velers esportius i d'esbarjo, l'angle de la vela es regula mitjançant un cap anomenat escota, que va fixat a la botavara i a la coberta. Ja sigui de manera directa o amb un sistema de politges reductores, tot regulant la longitud de l'escota s'aconsegueix que la botavara s'allunyi o s'apropi a la línia de cruïxa del vaixell, fent que tota la superfície vèlica es vegi afectada per aquest canvi d'angle. Aplicant aquest sistema a un vaixell no tripulat, de 2 metres d'eslora i amb una vela rígida, un servo amb control digital de voltes s'encarregaria de caçar o amollar escota per variar-ne la seva llargada. El servo estaria ubicat sota coberta per protegir l'electrònica de la intempèrie, i l'escota sortiria a l'exterior passant per la coberta a través d'un orifici. L'altre extrem de l'escota estaria fixat al costat inferior de la vela rígida. El controlador del sistema electrònic enviaria un senyal al servo perquè anés ajustant l'angle de la vela al més òptim.

Avantatges: Amb aquest sistema s'aconseguiria un control directe i precís sobre la vela, garantint sempre el funcionament més òptim. Al tenir un controlador digital, el servo coneixeria en tot moment la posició del seu capsal enrotllador i, de manera indirecta, la posició de la vela respecte el vaixell. Per tant, no seria necessària la instal·lació extra d'un potenciòmetre per conèixer l'angle de la vela i això reduiria la probabilitat de fallada.

Inconvenients: Per contra, també implicaria una sèrie d'inconvenients que comprometrien el bon funcionament. Aquest sistema implicaria una via d'aigua a través de l'orifici passant de l'escota a través de la coberta. Per evitar-ho caldria dissenyar un sistema molt fiable per minimitzar l'entrada d'aigua a l'interior del buc, tot i que mai garantiria la completa estanquitat. A més, el sistema de politges que caldria instal·lar per guiar l'escota de la vela a l'enrotllador del servo representaria una dificultat constructiva afegida i una sèrie de punts febles que podrien acabar fallant amb el pas del temps.

Un altre inconvenient d'aquest sistema està lligat amb el consum elèctric i l'autonomia del vaixell. Els servos digitals funcionen de la següent manera: un senyal digital de control envia al servo la informació de l'angle desitjat, i a continuació el motor gira fins que el potenciòmetre intern detecta que ha arribat a la posició ordenada. Llavors, el servo proporciona el parell necessari perquè el rotor es quedi clavat a la mateixa posició. En aquesta aplicació concreta, la força exercida pel vent sobre la vela faria treballar el servo consumint corrent de manera permanent per mantenir l'angle. Tenint en compte que la força exercida pel vent sobre la vela augmenta de manera quadràtica en funció de la velocitat, el seu consum augmentaria d'una

manera semblant i les dimensions de la bateria i del panell solar haurien de dimensionar-se per cobrir aquest alt consum.

4.3.2. Accionament per escota i mecanisme d'autoblocatge

Funcionament: El funcionament d'aquest sistema és molt semblant a l'anterior: un tambor enrotlla o desenrotlla una escota per acurtar-ne o allargar-ne la seva longitud i així fer variar l'angle de la vela. La presència d'un motor amb un mecanisme d'autoblocatge, però, és una variant que busca minimitzar el consum del motor enrotllador. En el cas anterior, el servo digital havia de consumir un corrent proporcional al parell necessari per mantenir el rotor a la posició desitjada i, per tant, el consum acumulat al llarg del temps era alt. L'alternativa per superar aquest inconvenient es tractaria de trobar un engranatge reductor que de manera mecànica aconseguís bloquejar el moviment produït pel contra parell de la càrrega (tensió de l'escota) però permetés el gir produït pel motor. D'aquesta manera, el motor només consumiria quan hagués de fer un canvi d'angle i no tota l'estona, per mantenir la posició. La solució és una reductora de cargol sense fi, on un engranatge en forma d'espiral va solidari a l'eix del rotor i una roda dentada s'engrana a aquest espiral amb el seu eix orientat de manera perpendicular a l'eix motriu.

Avantatges: Els avantatges d'aquest sistema són els mateixos que en el cas anterior, afegint-hi una reducció notable del consum elèctric i una gran reductora de força gràcies al nou engranatge.

Inconvenients: Tot i això, aquesta alternativa té alguns inconvenients que posen en dubte la seva viabilitat. Al mercat, els motors acoblats a aquest tipus d'engranatge estan destinats a aplicacions més industrials i és molt difícil trobar-ne amb les dimensions i potència requerides per aquesta aplicació. Es podria estudiar la possibilitat d'adquirir el motor i l'engranatge per separat seleccionant les dimensions ideals i posteriorment fer el muntatge del mecanisme, però suposaria una dificultat afegida al projecte que es podria mirar d'evitar ideant un altre sistema, més senzill i més robust. De totes maneres, tant si el mecanisme vingués muntat de fàbrica com si es muntés posteriorment, el motor no disposaria d'un controlador per saber la posició del rotor i s'hauria de muntar un sistema de realimentació que mesurés l'angle de la vela i tanqués el llaç amb el controlador general. Per aquest motiu, tornaria a aparèixer una complicació en el muntatge del sistema. A més, la instal·lació manual d'un potenciòmetre a la vela podria comprometre el bon funcionament de tot el sistema, ja que augmentarien les probabilitats de fallada.

4.3.3. Accionament per aleró

L'explicació del funcionament i els avantatges d'aquest tipus d'accionament, explicat a continuació, es pot consultar en format de vídeo al compte de Twitter del projecte, de nom

@SenSailor_drone, a la publicació feta el 15/10/2019, font pròpia. Consultar l'enllaç a la referència [35].

Funcionament: La vela, en aquest cas un perfil alar, gira lliurement al voltant del pal els 360° i no hi ha cap escota que la mantingui fixa a una posició concreta. A la vora d'escapament del perfil, és a dir, el costat on s'ajunten les línies de vent després de fluir pels dos costats del perfil, es prolonguen 2 braços que suporten un segon perfil alar de dimensions més reduïdes, anomenat aleró. Aquest aleró està articulat, i es pot orientar en posició neutre, és a dir alineat amb el perfil alar que fa de vela, o girar-lo uns graus cap a un costat o cap a l'altre. Mitjançant el control de l'angle de l'aleró, s'aconsegueix que la vela roti fins a aconseguir l'angle d'atac desitjat.

En aquest conjunt vela-aleró hi intervé un equilibri de forces que és interessant conèixer per entendre el comportament del sistema. Imaginem una situació on l'aleró està orientat en la posició neutra, és a dir, alineat amb la vela. Quan bufi el vent, el sistema vela-aleró pivotarà lliurement fins a orientar-se en direcció flux, com si es tractés d'un penell o una bandera. En aquest moment no es generaran forces de sustentació sobre cap dels dos perfils (Figura 32). En el cas que el vent canviés de direcció, el sistema tornaria a orientar-se en la seva direcció per recuperar l'estat d'equilibri.

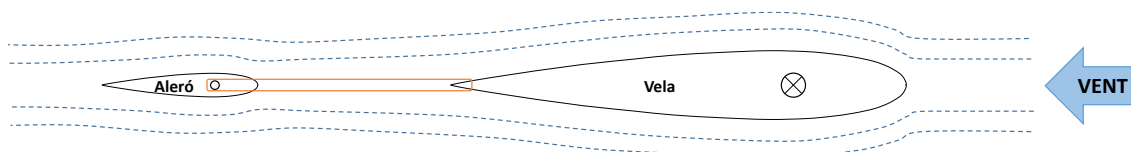


Figura 32. Vista en planta de l'aparell amb l'aleró a 0°. Font: pròpia.

A continuació, si es gira l'aleró uns graus cap un costat, les línies de vent, que fins ara circulaven simètricament pels dos costats del conjunt vela-aleró, es veuran obligades a desviar-se quan hagin de passar per l'aleró (Figura 33). Aquesta desviació crearà una petita força de sustentació sobre l'aleró (f) que, com que es trobarà a una distància gran (D) del centre de gir del sistema vela-aleró, es traduirà en un moment que obligarà a tot el sistema a pivotar al voltant del pal. Aquesta inclinació del sistema vela-aleró farà que el vent comenci a incidir a la vela amb un angle d'atac cada vegada més gran.

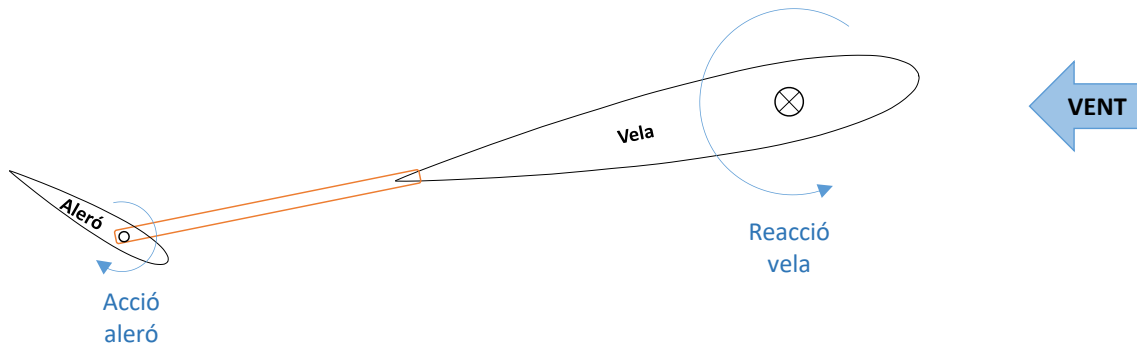


Figura 33. Vista en planta de l'aparell. Acció de l'aleró i reacció de la vela. Font: pròpia.

En augmentar l'angle d'atac es crearà una força de sustentació a la vela en direcció contrària a la de l'aleró, que s'anirà fent gran a mida que augmenti l'angle (Figura 34). Com que la vela té més superfície que l'aleró, la força produïda en ella també serà més gran (F), però la distància respecte el centre de gir serà més petita (d). Arribarà un punt on els moments produïts per les dues forces quedaran anul·lats, perquè seran iguals en magnitud i contraris en sentit. Arribat aquest punt, el conjunt vela-aleró deixarà de girar i es quedarà en aquesta posició on es compleix l'equilibri de moments: $f \cdot D = F \cdot d$. En el cas que el vent canviés de direcció, el sistema tornaria a ajustar-se fins a recuperar l'equilibri de moments. Així doncs, cada angle d'inclinació d'aleró anirà associat a un angle determinat de la vela respecte el vent, i aquest angle es mantindrà sempre mentre no es canviï la posició de l'aleró. A la Figura 34 es mostra un esquema de l'equilibri de moments. El vector petit de color vermell que actua sobre l'aleró, representa la component de la força f perpendicular a D , que contribueix a fer moment. L'altra component (paral·lela a D) no contribueix al moment, per tant, no s'ha representat a l'esquema.

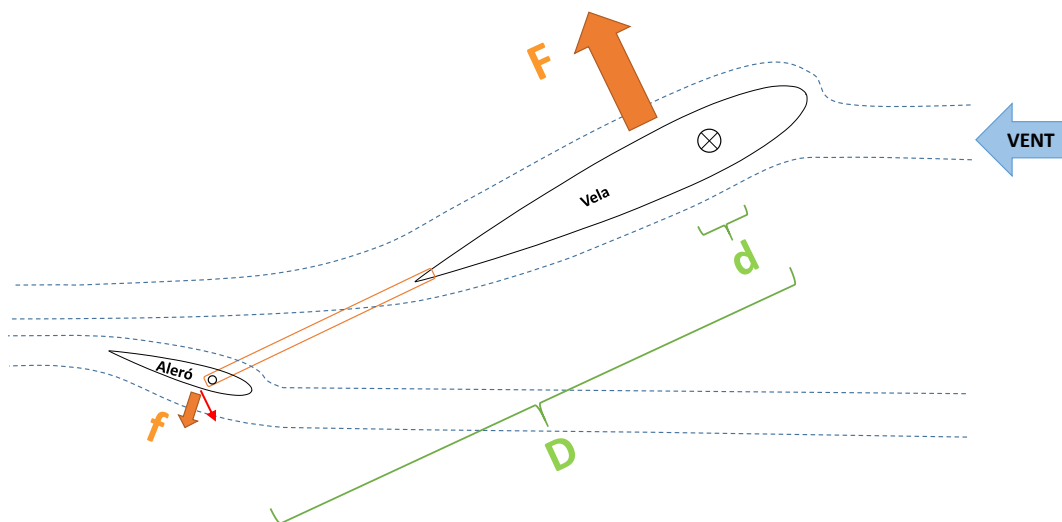


Figura 34. Vista en planta de l'aparell. Equilibri de moments. Font: pròpia.

És així com, sense la necessitat de fer servir una escota, s'aconsegueix donar un angle a la vela perquè generi una força que faci avançar el vaixell. És cert que la força generada a l'aleró actuarà

en contra del sentit d'avanç. Tot i això, aquesta força és tant petita que es considerarà un inconvenient menyspreable davant tots els avantatges que aporta el sistema.

El moviment de l'aleró es controla a través d'un servo situat dins la vela que li transmet el moviment a través d'una tija (Figura 35). A diferència dels sistemes amb escota, on el servo de l'escota ha de treballar constantment per buscar la orientació òptima de la vela respecte el vent, el sistema amb aleró s'autoregula sense que el servo hagi d'actuar. Com s'ha explicat anteriorment, l'equilibri de moments provoca que el conjunt vela-aleró sempre es mantingui amb el mateix angle respecte el vent. Per això, si canvia la direcció del vent o el vaixell varia el seu rumb, la vela seguirà mantenint aquell angle d'atac que li generi més força de sustentació. La única funció del servo en aquest cas és mantenir l'aleró a una posició fixa, aquella que provoqui a la vela l'angle d'atac més òptim. Evidentment, en funció de si el vaixell rep el vent per babord o per estribord, el servo haurà de moure l'aleró a la dreta o a l'esquerra perquè l'equilibri de moments faci que la força de sustentació de la vela es generi a un costat o a l'altre del perfil alar.

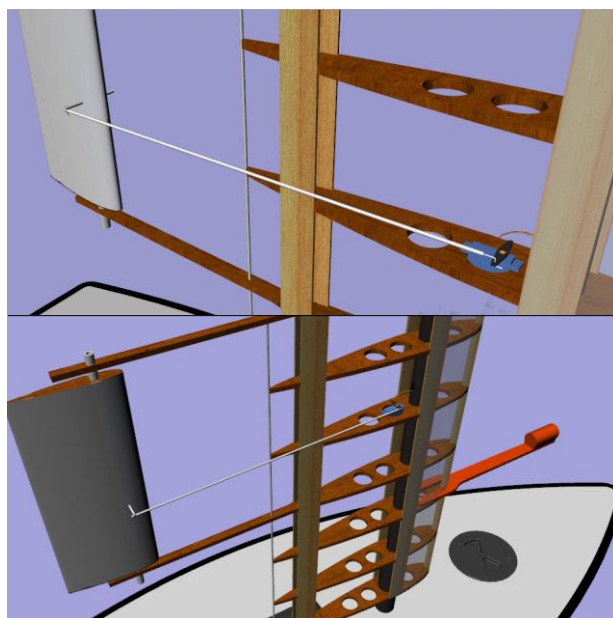


Figura 35. Vistes del sistema de regulació de l'aleró. Font: pròpia.

Avantatges: En el cas dels sistemes amb escota, el servo actua directament sobre la vela. Com que aquesta té una gran superfície, la força que ha de vèncer el servo és elevada i el consum, considerable. En canvi, en el sistema accionat per aleró, el servo ha d'actuar sobre l'aleró que, al ser una superfície molt més petita, la força generada en ell és menor i el consum elèctric resulta ínfim. A més, el servo no ha de variar el seu angle constantment per ajustar la vela ja que el sistema vela-aleró s'autoregula davant el mínim canvi de direcció del vent. Aquest sistema tant simple i precís no només fa que la vela treballi de manera més eficaç sinó que, a més, simplifica molt el programa de control.

Un altre punt a favor és la reducció d'elements crítics en el sistema. Les politges, engranatges i escota són elements amb altes probabilitats de fallar degut al desgast, els cops de vent i les

estrebades. En canvi, un sistema de gir lliure de la vela evita els moviments bruscos i estrebades, i es comporta amb suavitat davant les ràfegues de vent i les onades. A més, s'evita la via d'aigua produïda pel pas de l'escota a través de la coberta i es garanteix la completa estanquitat del buc.

Inconvenients: Per què el sistema treballi correctament, és necessari posar un contrapès al costat anterior de la vela per compensar el pes de l'aleró i aconseguir que el centre de gravetat del conjunt vela-aleró quedi centrat a la posició del centre de gir, és a dir el pal. Això fa augmentar el pes de la vela i eleva el centre de gravetat del vaixell. Per compensar-ho, cal augmentar lleugerament la longitud de l'orsa o la massa del llast i això afegeix pes al vaixell. Pel què fa al disseny i dimensionament del sistema de propulsió, es complica una mica. Al tractar-se d'un sistema poc conegut, es requereix un estudi numèric una mica més complex. La instal·lació de l'aleró i el contrapès de la vela també dificulta una mica la part constructiva, tot i que evita les complicacions que podria portar el muntatge del sistema de politges, engranatges i escota.

Després de considerar les tres alternatives d'accionament de la vela, s'ha optat pel sistema d'aleró pels múltiples avantatges que aporta respecte les altres. Inevitablement, aquest sistema implica certs inconvenients, però s'han assumit a canvi d'evitar altres problemes pitjors derivats de la instal·lació d'un sistema per escota.

4.4. Estudi del perfil alar

En el procés de selecció de les característiques principals de la vela s'ha decidit utilitzar un perfil alar com a mitjà de propulsió. Observant les ales dels avions o els apèndixs submergits dels vaixells és fàcil apreciar que actualment existeixen molts perfils aerodinàmics diferents en funció de la velocitat del fluid, la sustentació necessària, etc. Els perfils NACA [7] són formes creades pel Comitè Nacional Assessor d'Aeronàutica utilitzades a la indústria aeronàutica pel disseny d'ales. Cada perfil està registrat amb una sèrie de números que descriuen els diferents paràmetres de la forma. Aquestes xifres es poden utilitzar introduint-les dins algunes fórmules matemàtiques per calcular les propietats aerodinàmiques del perfil.

En aquest apartat s'explica l'estudi realitzat per triar el perfil més adequat per la vela i l'aleró. D'entrada s'ha fet una selecció de 9 perfils NACA mitjançant uns criteris generals. A continuació s'ha utilitzat el programa JavaFoil [6] per observar el comportament aerodinàmic de cada un d'ells en diferents situacions de vent i seguidament s'ha fet una selecció del perfil més idoni en funció de la força útil generada a la vela per en diferents rumbos. Aquest estudi també ha servit per determinar l'angle d'atac més idoni de la vela per cada rumb i predir la velocitat aproximada del vaixell amb diferents estats de vent i condicions ideals.

Segons el rumb, el vaixell rebrà el vent per babord o per estribord i la vela treballarà rebent el flux per un costat o per l'altre. Com que es necessita que la sustentació generada a la vela sigui la mateixa independentment del costat on es rebí el vent, la característica més important del

perfil alar és que tingui simetria. Per fer una primera selecció de perfils, s'ha fet una recerca a la base de dades oberta de NACA anomenada *Airfoil Tools* [7] i s'han triat els següents perfils simètrics: NACA 0006, NACA 0008, NACA 0009, NACA 0010, NACA 0012, NACA 0015, NACA 0018, NACA 0021 i NACA 0024.

4.4.1. Procediment de l'estudi

Aquest experiment ha consistit a calcular de manera ideal la descomposició de forces generades a la vela per cada un dels rumbos de navegació i determinar l'angle més òptim de vela per cada cas. S'entén per angle més òptim aquell capaç de generar la màxima component de força de propulsió i la mínima d'abatiment. Cal remarcar que aquest experiment s'ha dut a terme a una fase prèvia del projecte on es considerava com a mitjà d'accionament de la vela una escota com en els vaixells convencionals. Ha sigut posteriorment que s'ha decidit implementar el sistema de l'aleró que permetria el gir lliure de la vela al voltant del pal. Per aquest motiu, l'estudi s'ha dissenyat pensant que el moviment de la vela respecte el vaixell no seria de 180° a cada costat sinó de 90° . Tot i això, les conclusions tretes de l'estudi són vàlides i aplicables als dos casos, per tant, el canvi de disseny de la vela no ha implicat repetir l'estudi i s'han donat els càlculs fets com a vàlids.

A la primera part de l'experiment s'han posat a prova tots els perfils amb una velocitat de vent de 10 kn o 5,144 m/s. Per cada perfil s'ha dividit l'experiment en 8 fraccions, cada una d'elles simulant un rumb diferent, des d'una navegació en cenyida tancada on es rep el vent amb $22,5^\circ$ respecte la proa, fins a un rumb d'empopada on es rep amb un angle de 180° , passant pels 6 angles restants separats equidistantment (Figura 36). Per cada un d'aquests rumbos, s'ha calculat la descomposició de forces en 18 posicions de la vela diferents, des de la posició quasi paral·lela a la línia de cruïxa, amb un angle de 5° , fins a una posició perpendicular, és a dir 90° , passant per tots els angles de 5 en 5 unitats (Figura 37).

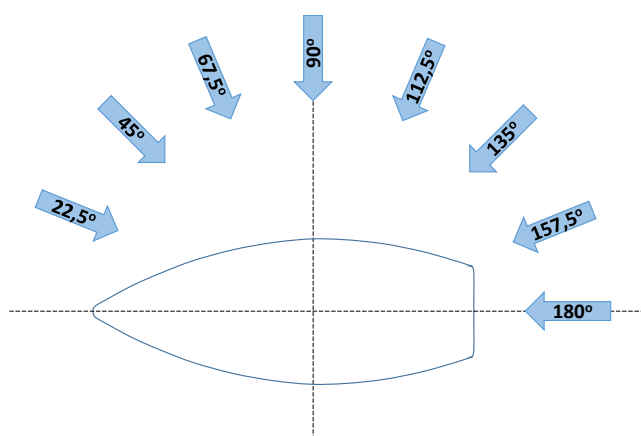


Figura 36. Rumbos estudiats a l'experiment. Font: pròpia.

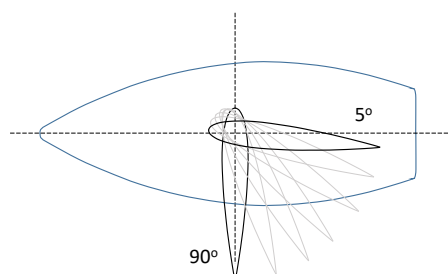


Figura 37. Angles de vela estudiats a l'experiment. Font: pròpia.

Per estudiar el comportament aerodinàmic de cada perfil, s'ha utilitzat el programa JavaFoil. Com que aquesta és una eina dissenyada per l'estudi de perfils d'ala d'avió i no de veles de vaixell, s'ha hagut de fer una transformació d'angles per determinar l'angle d'atac a partir de l'angle de vent respecte el vaixell i l'angle de vela respecte la línia de cruixia. Aquest és l'angle d'incidència del vent sobre el perfil, que s'utilitza en aerodinàmica per estudiar el comportament d'una ala. La transformació s'ha fet utilitzant aquest càlcul:

$$\alpha = \beta - \gamma \quad (26)$$

On α és l'angle d'atac o d'incidència del vent sobre el perfil alar, β és l'angle del vent respecte el vaixell (a 0° el vaixell rep el vent per la proa i a 180° , per la popa), i γ és l'angle de la vela respecte la línia de cruixia (a 0° és paral·lela a ella i a 90° , perpendicular).

Al programa JavaFoil, s'hi ha introduït la geometria del perfil a estudiar mitjançant punts de coordenades cartesianes, proporcionats per la base de dades de Airfoil Tools. Seguidament, s'ha calculat el número de Reynolds mitjançant l'equació:

$$Rn = \frac{\nu l}{u} \quad (27)$$

On ν és la velocitat del flux (5,14 m/s), l la corda del perfil (0,5 m) i u la viscositat de l'aire ($1.5111E-5$ m²/s, considerant una temperatura de 20°C).

Un cop introduïda la geometria del perfil i el número de Reynolds obtingut del càlcul (70.000), s'han obtingut els coeficients de sustentació (C_s) i de fregament (C_f), que descriuen de manera adimensional la component de força generada perpendicular al flux i paral·lela respectivament. A partir d'aquests valors, s'ha calculat la força de sustentació (F_s) i la de fregament (F_f) creades en tota la superfície alar mitjançant les fórmules següents:

$$F_s = C_s \frac{1}{2} \rho \nu^2 S \quad (28)$$

$$F_f = C_f \frac{1}{2} \rho \nu^2 S \quad (29)$$

On ρ és la densitat de l'aire (1,204 kg/m³), ν la velocitat del vent (5,14 m/s a la 1a part de l'estudi) i S la superfície lateral de la vela (0,6 m², la justificació es dona més endavant).

Aquesta descomposició de la força resultant generada a la vela té com a eix de referència la direcció del vent (Figura 38). Per completar l'estudi, però, és necessària la descomposició

respecte l'eix de cruïxa del vaixell (Figura 39). D'aquesta manera es podrà determinar la contribució longitudinal (la que propulsa el vaixell endavant) i la transversal (la que abat i produeix escora) de la força resultant generada a la vela. Aquesta translació d'eixos s'ha dut a terme mitjançant equacions trigonomètriques. S'ha sumat la contribució de F_s i F_f a l'eix longitudinal per trobar la força resultant longitudinal (F_{rl}) i la contribució de F_s i F_f a l'eix transversal per trobar la força resultant transversal (F_{rt}). A partir d'aquí, també s'ha pogut calcular la força resultant de la vela (F_r), fent la composició de F_{rl} i F_{rt} .

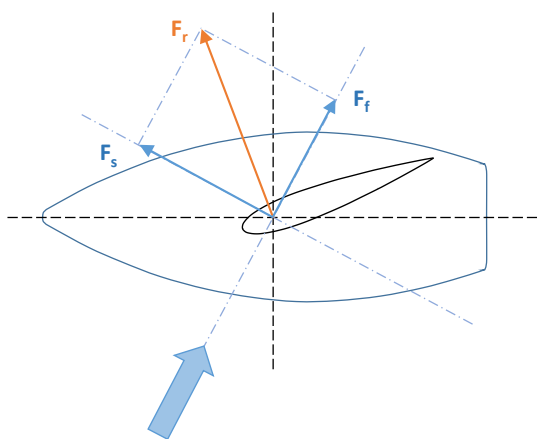


Figura 38. Descomposició de la força resultant amb l'eix de referència del vent. Font: pròpia.

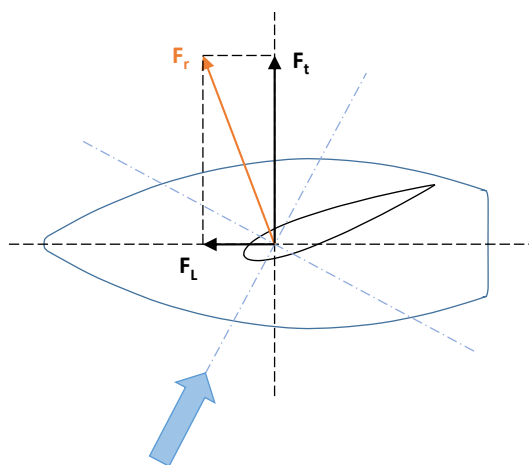


Figura 39. Descomposició de la força resultant amb l'eix de referència del vaixell. Font: pròpia.

És així com s'ha aconseguit obtenir una taula amb la F_{rl} i la F_{rt} per cada un dels angles de vela de cada un dels possibles rumbos navegables. Però realment per cada rumb hi ha 1 angle de vela que és el que genera la màxima F_{rl} , és a dir, aquell angle que fa avançar el vaixell més de pressa. A continuació, s'ha fet una taula resum seleccionant l'angle més òptim per a cada rumb i s'ha repetit el procediment explicat per tots els perfils. Amb les taules resum dels 9 perfils s'ha pogut fer una comparativa per veure quin d'ells genera més impuls en tots els rumbos.

Els perfils més amples, amb més corvatura, són capaços de transmetre més potència que els plans. Per aquest motiu, les avionetes o avions lents que els costa aixecar el vol fan servir perfils molt corvats, mentre que els ràpids n'utilitzen de més plans. Com és d'esperar, la conclusió d'aquesta primera part de l'estudi és que els perfils més amples generen més impuls endavant que els més plans. Tot i això, també generen més força transversal i, al ser més grans, el seu pes augmenta i això es tradueix a una menor estabilitat en el vaixell. A més, a diferència d'un avió, que està dissenyat per volar a una velocitat de creuer determinada, un vaixell es pot trobar amb velocitats de vent molt diverses i ha de ser capaç de navegar tant amb vents suaus mantenint una arrencada, com vents forts sense comprometre la integritat estructural de la vela.

Fetes aquestes conclusions, s'ha dut a terme una segona part de l'estudi on s'han tornat a calcular les forces F_{rl} i F_{rt} per velocitats de vent diferents: 20 kn, 30 kn i 40 kn. Aquest cop, s'ha repetit el procediment de càlcul explicat anteriorment però centrant-se només amb els angles de treball més òptims de la vela per a cada rumb. Les velocitats de vent estudiades són poc habituals al Mediterrani però existents, i s'ha considerat que el vaixell hauria de seguir navegant

de forma normal com a mínim fins a 25 kn de vent. Per sobre aquest límit, s'aplicarien mesures de seguretat des del sistema de control per evitar perjudicis. Aquestes mesures de seguretat s'explicaran més endavant. Seguidament, s'ha fet un estudi de velocitat i resistència del buc per conèixer la força propulsora.

La velocitat d'un vaixell navegant sense planatge està limitada per l'eslora del buc. Quan el vaixell s'acosta a aquesta velocitat, la resistència de les onades creades pel propi vaixell impedeixen que aquest segueixi accelerant. Per seguir augmentant la velocitat per sobre aquest límit és necessari un aport d'energia que augmenta exponencialment fins que s'entra a la fase de planatge, si les formes del vaixell ho permeten. El buc del SenSailor està dissenyat per velocitats petites, i la seva velocitat límit es pot extreure de manera aproximada a partir d'aquesta fórmula, que dona el resultat en nusos:

$$V_{max} = 2,4\sqrt{L} \quad (30)$$

on L és l'eslora del vaixell en metres (2 m en aquest cas). La velocitat límit aproximada del SenSailor són 3,34 nusos.

Per saber la força necessària per fer avançar el vaixell s'ha utilitzat el programa Maxsurf Resistance. Com s'ha explicat a l'apartat 3.2, *Disseny de carena*, s'ha calculat la resistència a l'avanç a partir de la suma entre la resistència residual i la viscosa. De totes maneres, aquesta resistència obtinguda s'ha prè com a valor orientatiu, ja que les característiques de l'estudi no han permès obtenir un resultat d'alta precisió. Per un costat, degut a complicacions amb el programa, no s'ha pogut introduir correctament el modelatge dels apèndixs i a conseqüència d'això no s'ha pogut obtenir un valor exacte de la resistència. Per altra banda, el programa no ha tingut en compte la resistència per onades externes, ja que al ser un fenomen que depèn de la meteorologia, és imprevisible.

Malgrat les limitacions, s'ha considerat el resultat obtingut de l'estudi com una aproximació vàlida per fer el disseny de la vela. D'aquest estudi s'ha extret que la força propulsora produïda per la vela necessària per fer avançar el vaixell a la seva màxima velocitat permesa per l'eslora (3,34 kn) són 15,78 N. Com que la força de resistència augmenta exponencialment en funció de la velocitat, si per les condicions de vent es supera aquesta força, el vaixell difícilment podrà superar els 3,34 kn. En canvi, si la força propulsora cau a la meitat, 7,89 N, la velocitat del vaixell tansols disminuirà fins a 3 kn. Aquest comportament es pot apreciar a la gràfica de la Figura 40.

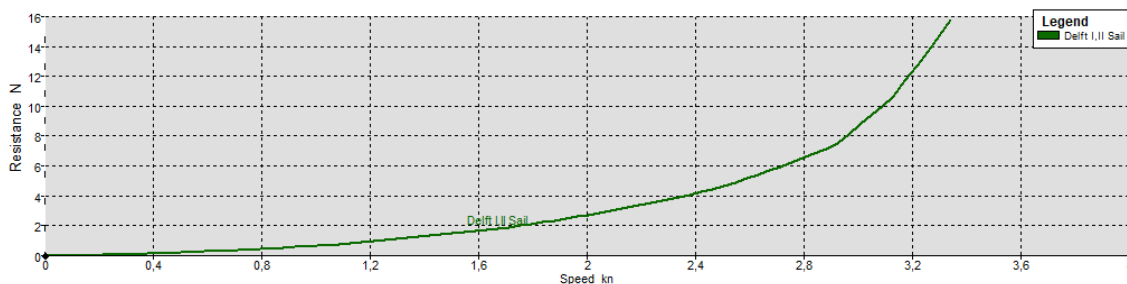


Figura 40. Gràfica de la resistència a l'avanç en funció de la velocitat. Font: pròpia.

Un cop coneguda la força propulsora necessària, s'ha procedit a fer una comparació de la força proporcionada pels diferents tipus de perfil i per les diferents velocitats de vent per seleccionar la geometria més adient. Com que la força longitudinal proporcionada la vela varia en funció del rumb que es prengui, s'ha fet una mitjana aritmètica entre tots per facilitar la comparació. S'ha vist que per 10 kn de vent els perfils capaços de proporcionar una força mitjana més propera als 15 N són els més amples. Concretament, el NACA 0024 proporciona una força de 15,62 N i els altres s'acosten cada vegada menys com més prim, donant 4,76 N el més estret, NACA 0012. A 20 kn de vent, la força en tots els casos augmenta significativament. Cal recordar que la força generada augmenta de manera quadràtica en funció de la velocitat del flux. En aquest cas, el NACA 0024 proporciona 63,78 N i el NACA 0012 en dona 39,05 N. A 30 kn, el vent ja sobrepassa el límit proposat, però també s'ha tingut en compte per observar-ne la progressió dels resultats. En aquest cas, el NACA 0024 proporciona 145,23 N i el NACA 0012 en dona 88,13 N.

4.4.2. Resultats de l'estudi

El cas de 40 kn ha sigut descartat, ja que davant d'una situació de vent intens, el sistema de control entrarà a un mode de seguretat i orientarà la vela en direcció paral·lela al vent per minimitzar la força produïda sobre l'estructura, disminuint així el risc de roptures. Un cop feta la comparació dels perfils entre les diferents condicions de vent s'ha considerat el NACA 0015 com la geometria més versàtil. Amb vents suaus és capaç de proporcionar impuls per fer avançar el vaixell. A 20 kn, la força generada amb l'angle més òptim de vela supera gairebé 3 vegades la necessària per impulsar el vaixell a la velocitat màxima, però se sap que a la realitat no serà així perquè l'escora produïda per la força transversal farà disminuir el rendiment de la vela. A més, el sistema de control es pot programar de tal manera que amb vents més forts es disminueixi l'angle d'atac per mantenir la força propulsora òptima. Per l'aleró s'ha escollit la mateixa geometria de perfil.

Durant la utilització del programa JavaFoil, s'ha trobat una limitació que no ha permès estudiar el 100% dels casos planificats. El fet és que el programa està pensat per estudiar els perfils de la manera com habitualment s'utilitzen en aerodinàmica, és a dir, orientant el perfil de manera que el vent entri per la vora d'atac i surti per la vora d'escapament, i no al revés. En alguns casos de l'estudi que s'ha volgut fer es pretenia estudiar el comportament del perfil fent circular el

vent de manera inversa a la descrita. Per exemple, quan es navega amb vent de popa (180°) i la vela està orientada a menys de 90° respecte la línia de cruïxa del vaixell, el vent incideix amb el perfil pel costat d'escapament i circula en el sentit contrari a l'habitual. Per aquest motiu, el programa no permet introduir angles superiors a 90° .

4.5. Estudi de l'aleró

L'aleró com a mitja d'accionament de l'angle d'una vela en un vaixell és un sistema poc habitual. S'han fet estudis per determinar les formes i proporcions més òptimes del sistema vela-aleró, però ni hi ha gaire informació accessible que detalli amb precisió la obtenció d'aquests paràmetres. En el cas del vaixell dissenyat en aquest projecte, l'objectiu principal no és obtenir el sistema propulsiu amb el millor rendiment possible. Per tant, s'ha decidit fer el disseny i la construcció d'una primera versió de vela que sigui funcional per observar la seva resposta i efectivitat. S'ha fet una recerca d'informació referent a aquest estudi per determinar les dimensions principals de l'aleró i posteriorment s'han fet una sèrie de càlculs per predir de manera aproximada el comportament de la vela mitjançant l'efecte de l'aleró.

El primer paràmetre a determinat ha sigut el centre de gir de la vela, és a dir, la posició del pal respecte el perfil alar. Aquesta dada és important perquè d'ella depèn l'equilibri de moments que es dona entre la vela i l'aleró i condiona el comportament del sistema. Per explicar bé això cal, tenir en compte alguns conceptes bàsics d'aerodinàmica referents a l'equilibri de forces i de moments d'una ala [8].

La força de sustentació d'una ala s'aplica sobre un punt anomenat "centre de pressions". Coneixent la magnitud d'aquesta força i la distància horitzontal entre el centre de pressions i el centre de gir de la vela, es pot calcular el moment que s'està exercint a un angle d'atac concret fent el producte d'aquests dos valors. Però la posició del centre de pressions no és fix, ja que es desplaça més endavant de la corda o més enrere en funció de l'angle d'atac, fet que dificulta el càlcul del moment (Figura 41). Tot i això, hi ha un punt concret de la corda que si es pren com a referència a l'hora de calcular el moment, el resultat dona aproximadament el mateix per tots els angles d'atac. Aquest punt s'anomena "centre aerodinàmic" i es troba aproximadament a $\frac{1}{4}$ de la corda respecte la vora d'atac. Aquest punt també té la propietat que en perfils simètrics el centre de pressions coincideix amb el centre aerodinàmic en angles d'atac petits i per tant el moment produït és aproximadament nul. A mida que s'augmenta a angles superiors, el moment comença a augmentar de manera significativa.

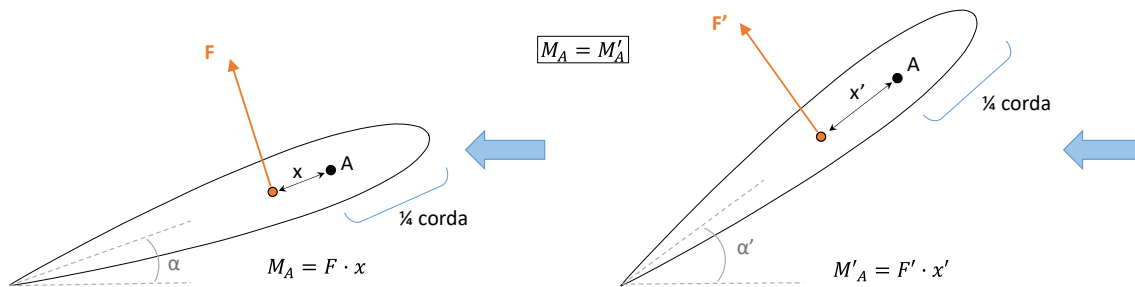


Figura 41. Variació del centre de pressions en funció de l'angle d'atac del perfil. Font: pròpia.

Coneixent aquesta informació, s'ha decidit situar el centre de gir de la vela a la posició del centre aerodinàmic. Dels càlculs que s'han utilitzat per escollir el perfil alar, s'ha determinat que l'angle d'atac més òptim són aproximadament 22° per la majoria de rumbos. Tot i que el perfil alar escollit sigui simètric, a 22° el centre aerodinàmic ja no està situat juntament amb el centre de gir, i per tant el moment produït no és nul. Però a la vegada és un angle prou petit com per que el moment no sigui excessiu i, per tant, la força que haurà de fer l'aleró per mantenir la vela amb aquesta posició respecte el vent, serà menor. El coeficient de moment (C_m) és una magnitud adimensional que es fa servir en aerodinàmica per comparar perfils. A la gràfica de la Figura 42 es mostra l'evolució del C_m d'un perfil NACA 0015 en funció de l'angle d'atac i es pot apreciar com per angles petits el coeficient es manté pràcticament a 0.

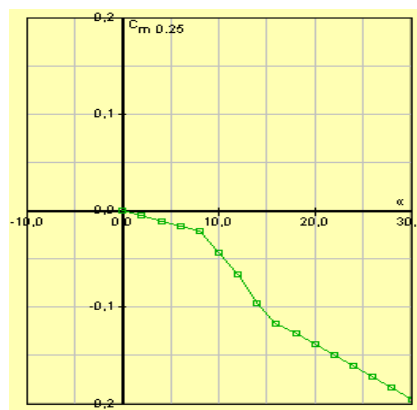


Figura 42. Variació del coeficient de moment d'un perfil NACA 0015 en funció de l'angle d'atac. Font: pròpia.

Un cop determinat el centre de gir de la vela, s'ha procedit dimensionar els paràmetres principals de l'aleró. Un estudi aerodinàmic complet sobre aquest tema podria ser matèria per un altre projecte d'investigació sencer. De fet, existeix un projecte de fi de grau del Royal Institut of Tecnology, de títol "Design of a free rotating wing sail for an autonomous sailboat" [9], que fa un estudi aerodinàmic complet orientat al disseny d'una vela rígida amb aleró per l'embarcació autònoma Maribot Vane, semblant a la del SenSailor. En aquest estudi, després d'un extens procediment utilitzant eines de càlcul especialitzades, es determina, entre altres, que la superfície lateral de l'aleró més òptima és d'un 12% de la superfície de la vela i que la distància de l'eix de gir de l'aleró respecte el pal és de 1/2 de l'alçada de la vela. Pel disseny de

l'aleró del SenSailor s'han pres aquestes dues proporcions i s'han ajustat al seu cas particular. La distància entre eixos s'ha establert a 0,64 m i l'àrea de l'aleró s'ha a 0,072 m² amb una relació alçada/corda igual a la de la vela. L'eix de gir de l'aleró s'ha fixat a un ¼ de la corda i el perfil escollit ha sigut el NACA 0015 escalat a la corda corresponent.

A partir d'aquí s'han fet una sèrie de càlculs per tal de predir de manera aproximada l'efecte de l'aleró sobre la vela. Per fer-ho, s'ha fet un estudi d'equilibri de moments per determinar l'angle d'aleró necessari per fer girar la vela a una posició determinada. Concretament, s'ha fet l'estudi contemplat l'angle d'atac de la vela més òptim (22°) i, a més, s'ha calculat el moment produït per l'aleró respecte el seu eix de gir per, més endavant, dimensionar el servo accionador y predir-ne el consum elèctric aproximat. A la Figura 43 es representa la relació proporcional d'angles que existeix entre la vela i l'aleró, on α és l'angle d'atac de la vela, B és una constant i γ és l'angle d'aleró (respecte la posició de la vela).

Per fer l'estudi s'han tingut en compte les mesures i característiques calculades anteriorment. S'ha fet l'anàlisi per una situació de vent de 10 kn i posteriorment de 20 kn per comparar els resultats.

Densitat	1,204 kg/m ³
Viscositat	1,5111E-5 m ² /s
Temperatura	20°C

Taula 29. Dades de l'aire considerades a l'estudi. Font: pròpia.

	Vela	Aleró
Perfil alar	NACA 0015	NACA 0015
Àrea ala	0,600 m ²	0,072 m ²
Alçada ala	1,200 m	0,416 m
Corda	0,500 m	0,173 m
Posició eix respecte corda	25%	25%
Reynolds a 10 kn	170222	58965
Reynolds a 20 kn	340000	114600
Distància entre eixos	0,641 m	

Taula 30. Resum de paràmetres principals de la vela i l'aleró. Font: pròpia.

En una situació on l'aleró està accionat cap un costat i la vela es manté estàtica amb un cert angle respecte el vent diem que el sistema es manté en equilibri de moments (Figura 34). Coneixent l'angle de funcionament òptim de la vela (22°), cal determinar el moment que s'exerceix amb aquest angle d'atac per després buscar aquell angle d'aleró que proporcioni un moment igual en magnitud però en sentit contrari. És important remarcar que quan es parla de "angle de vela" es refereix a l'angle comprès entre la corda de la vela i la línia de cruïxa del vaixell, mentre que quan es parla de "angle d'aleró" es refereix a l'angle respecte el sistema vela-aleró, és a dir, l'angle comprès entre la corda de l'aleró i la de la vela. Quan es parla de

“angle d’atac” es refereix, tant per la vela com per l’aleró a l’angle entre la corda del perfil i la direcció del vent.

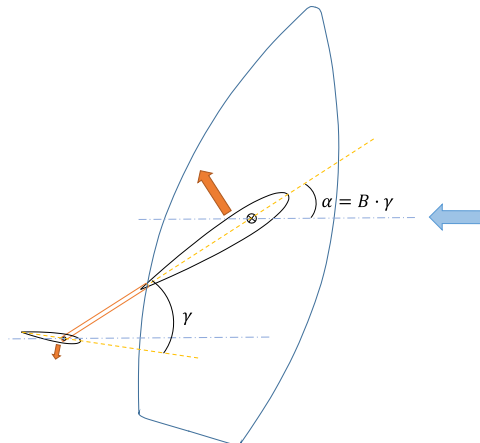


Figura 43. Relació proporcional d’angles entre vela i aleró. Font: pròpia.

El programa JavaFoil permet conèixer el coeficient de moment C_m en un angle concret. Coneixent les equacions

$$M = q \cdot C_m \cdot S \cdot c \quad (31)$$

$$q = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \quad (32)$$

on S és la superfície de l’ala, c la corda del perfil, ρ la densitat de l’aire i v la velocitat de l’aire, es pot calcular el moment M que exerceix la força de sustentació de la vela sobre el centre aerodinàmic, que és el punt de gir. Les mateixes equacions ens permeten calcular el moment produït a l’aleró sobre el seu centre aerodinàmic, però per trobar l’equilibri de moments s’ha de prendre com a referència el centre de gir del sistema, que és el punt de pivot de la vela. Així doncs, s’utilitzen unes altres equacions.

El programa JavaFoil també ens permet conèixer el coeficient de sustentació C_s i el de fregament C_f de qualsevol perfil, així com la posició del centre de pressions CP donat un angle d’atac concret. Intruduint al programa la geometria del perfil de l’aleró (NACA 0015) i fixant un angle d’atac concret, es poden obtenir els coeficients esmentats corresponents al perfil orientat d’una manera concreta. Amb aquests coeficients es poden calcular la força de sustentació F_s i la de fregament F_f de l’aleró utilitzant les equacions (28) i (29), i sabent la distància entre el centre de pressions de l’aleró i el centre de gir del sistema és possible calcular la contribució de cada una d’aquestes forces en el moment generat per l’aleró (Figura 44).

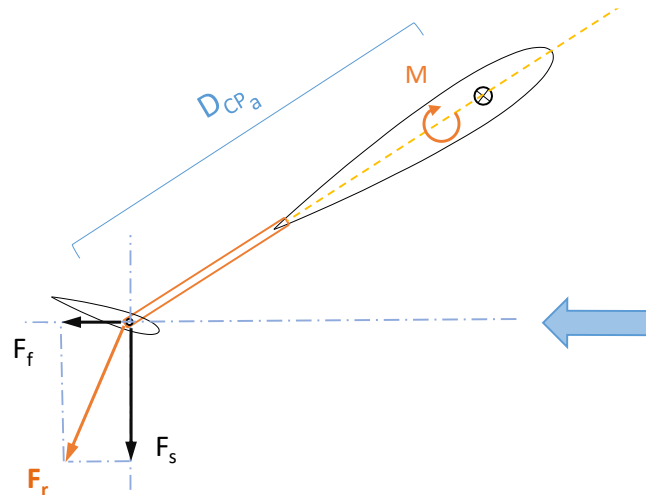


Figura 44. Moment generat per l'aleró. Font: pròpia.

A continuació es mostra l'equació utilitzada per calcular la distància del centre de pressions de l'aleró (Dcp_a) a partir de les dades obtingudes del programa:

$$Dcp_a = d_{ee} + c_a \cdot CP - c_a \cdot 0,25 \quad (33)$$

on d_{ee} és la distància entre eixos, c_a la corda de l'aleró, CP el tant per u de la posició del centre de pressions respecte la corda i el 0,25 el tant per u de la posició de l'eix de l'aleró respecte la corda.

Tenint present aquest procediment, només falta iterar els càlculs del moment de l'aleró per diferents angles fins a trobar l'angle que iguali la magnitud del moment de l'aleró amb el de la vela, però en sentit contrari. És important tenir en compte que aquest angle amb el que es juga per anar iterant amb el programa és l'angle d'atac de l'aleró.

Com a resultat de l'estudi, per aconseguir un angle d'atac de la vela de 22° cal orientar l'aleró amb un angle d'atac de 2° . Però com que el servo que controla l'aleró està fixat dins la vela (i es mou solidari amb ella) l'angle que realment interessa per controlar l'aleró és el que pren com a eix de referència la direcció de la vela. Per tant, cal fer una transformació d'angles:

$$\gamma = \alpha_v + \alpha_a \quad (34)$$

on γ és l'angle d'aleró (respecte la direcció de la vela), α_v l'angle d'atac de la vela i α_a l'angle d'atac de l'aleró (Figura 45).

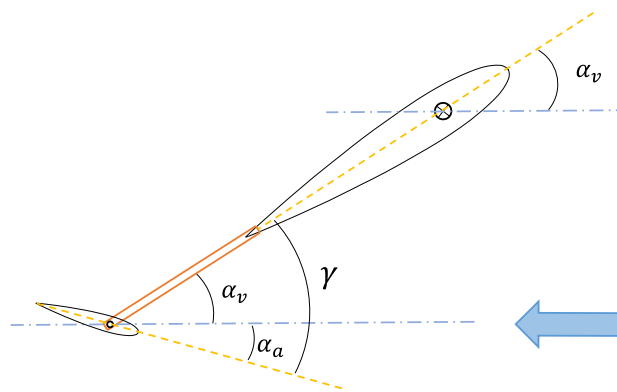


Figura 45. Esquema d'angles de la vela i aleró. Font: pròpia.

Sabent amb quin angle d'atac treballarà l'aleró es pot determinar, ara sí, el moment local de l'aleró, és a dir, el moment que farà la força de sustentació del perfil sobre el seu centre aerodinàmic. Per calcular-ho s'utilitzen les equacions (31) i (32) obtenint el C_m del programa. Aquest moment que és a la vegada el parell que haurà d'exercir el servo per mantenir l'aleró a aquesta posició. A partir d'aquí ja es pot dimensionar el servo i fer una estimació de consum consultant-ne la fitxa tècnica.

En aquest estudi s'ha pogut determinar que per aconseguir un angle d'atac de la vela de 22° cal inclinar l'aleró un angle de 24° . S'ha obtingut el mateix resultat tant en l'estudi de 10 kn de vent com el de 20 kn, ja amb l'augment de vent totes les forces del sistema es veuen afectades per igual i l'equilibri es manté. També s'ha observat que amb un vent de 20 kn, el servo hauria d'exercir un parell de $3,97 \cdot 10^{-3}$ N·m o, amb les unitats estàndard dels servos de modelisme, 0,04 kg·cm. Amb un sistema d'accionament de vela mitjançant una escota fixada a la meitat de la corda, el servo hauria d'exercir, amb 20 kn de vent, un parell d'aproximadament 114 kg·cm. Veient aquests resultats es pot afirmar que el sistema d'accionament de la vela mitjançant l'aleró és clarament millor enfront del sistema amb escota pel què fa a la dimensió del servo i el seu consum.

4.6. Disseny estructural de l'aparell

Un dels primers criteris que s'han valorat a l'hora de dissenyar l'estructura de l'aparell ha sigut la unió de la vela amb el pal. D'entrada s'han plantejat dues alternatives:

1. **Pal solidari a la vela:** el pal s'uneix solidàriament a la vela i tot el conjunt pivota sobre una unió mòbil situada a la base del pal, fixada a l'estructura del buc. Aquesta opció comporta l'avantatge que el pal suposa un element de reforç més sòlid per la vela i evita la torsió d'aquesta en l'eix vertical. Per altra banda, la unió mòbil a la base del pal implica una dificultat constructiva gran i una possible via d'aigua a través de la coberta. A més, el fet que el pal roti amb la vela impedeix que es pugui ubicar el penell al seu extrem

superior, ja que aquest necessita una base estàtica que tingui com a referència l'eix longitudinal del vaixell.

2. **Pal solidari al buc:** El pal s'uneix de manera solidària a l'estructura del buc. La vela va encaixada a ell i pivota al seu voltant. Aquesta opció permet ubicar el penell i altres sensors de navegació a l'extrem més alt del pal i així aconseguir un vent més laminar i una millor cobertura. A més, la unió del pal amb l'estructura del vaixell és més sòlida i resistent, i s'eviten les possibles vies d'aigua. Per altra banda, els cables del servo de l'aleró, que es troba ubicat dins la vela, han de passar per un orifici mecanitzat a mig pal i baixar fins l'interior del buc, i això implica que quan la vela roti els cables s'enroscaran al voltant del pal.

El fet de garantir una bona unió del pal amb el buc és fonamental en aquesta embarcació ja que degut a les característiques de la vela, l'aparell no es pot sostenir mitjançant una eixàrcia ferma, i tots els esforços de la vela es transmeten al vaixell a través de la base del pal. Entre les dues opcions s'ha optat per la opció 2, ja que aporta més avantatges pel que fa a punts crítics com són la resistència estructural a la base del pal, l'estanquitat a la coberta i la facilitat de muntatge. El problema dels cables del servo s'ha solucionat posant un límit físic que impedeixi a la vela girar més de 360° i s'ha deixat un tram de cable sobrant perquè tingui llibertat de moviment. El programa de control de navegació també s'ha dissenyat de manera que el vaixell eviti les virades per popa i així garantir una doble seguretat. Més endavant s'explicarà amb més deteniment aquest límit físic i de control.

4.6.1. Estructura

S'ha fet una recerca per conèixer diferents mètodes de construcció d'ales rígides, i finalment s'ha optat per fabricar una estructura interna amb fusta semblant a les ales dels avions i folrar-la amb tela de Dacron® per donar-li el perfil aerodinàmic. Pel disseny estructural s'han buscat diverses formes de disposar els reforços ja estudiades i s'ha escollit l'alternativa més adient per la vela del SenSailor. El dimensionament dels reforços s'ha calculat mitjançant una fulla de càlcul proporcionada a l'article *Cálculo de larguero de pino sencillo* de Eduardo Núñez [10].

Estructuralment la vela està dividida en 2 tipus de reforços:

- **Reforços transversals:** al llarg de l'alçada de la vela es distribueixen 9 costelles de reforç transversal. Aquestes costelles estan fetes amb tauler laminat de pi, tallades amb la forma aerodinàmica del NACA 0015. A $\frac{1}{4}$ de la corda tenen mecanitzat un orifici per deixar passar el pal. A part del pas del pal, s'han disposat altres orificis per eliminar pes de l'estructura sense comprometre la seva resistència (Figura 49).
- **Reforços longitudinals:** paral·lelament a l'eix vertical, dues parelles de llistons de fusta de pi massissa anomenats "llarguers" uneixen les costelles per les dues cares de l'ala. Una parella està situada a $\frac{1}{4}$ de la corda, a la mateixa posició que el pal, i l'altre a l'extrem final del perfil. Un cinquè llistó de fusta uneix les costelles per la vora d'atac.

Aquests 5 llistons longitudinals, juntament amb les costelles transversals formen una estructura rígida que resisteix els esforços de flexió tant en l'eix transversal com el longitudinal del vaixell, i de torsió en l'eix vertical de la vela (Figura 46).

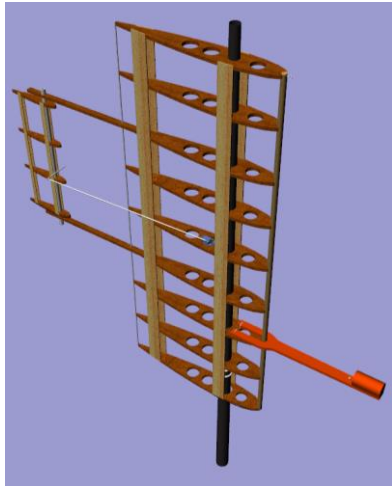


Figura 46. Vista en perspectiva de l'estructura de reforç de l'aparell. Font: pròpia.

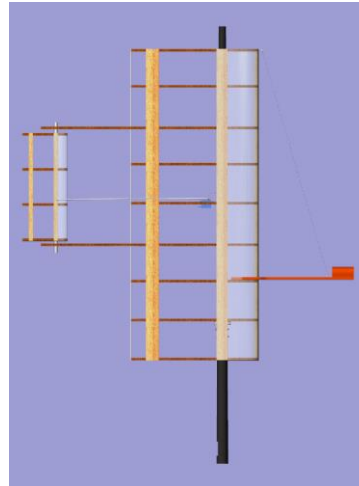


Figura 47. Vista lateral de l'estructura de reforç de l'aparell, amb punteres de PVC. Font: pròpia.

El teixit de Dacron® va acomodat sobre l'estructura seguint el perfil marcat per les costelles i els llarguers. Per garantir la correcta adaptació a les formes als punts més crítics, s'han recobert certes parts de l'estructura amb un material semirígid. A la vora d'atac s'ha disposat una làmina de PVC que recobreix tota la zona del primer quart del perfil. A la vora d'escapament, s'han unit tots els extrems dels reforços amb una barnilla de fibra de vidre unidireccional de 4 mm de diàmetre (Figura 47).

Les costelles número 4 i 7, començant per la més baixa, s'utilitzen com a suport de l'aleró. Aquestes no s'acaben a la vora d'escapament del perfil, sinó que es prolonguen 34 cm formant cada una un llistó horitzontal que serveixen com a suport superior i inferior de l'aleró (Figura 50). A una distància de 28,14 cm de la vora d'escapament de la vela es disposa l'eix de gir de l'aleró, un tub vertical d'alumini fixat entre les costelles de suport. L'aleró està format per una estructura similar a la de la vela. Al ser una ala més petita sotmesa a menys esforços, només disposa de 4 costelles i 4 reforços longitudinals (Figura 48). Amb l'objectiu de reduir pes i allunyar al mínim el centre de masses del sistema vela-aleró del centre de gir, s'ha omès el reforç longitudinal de la vora d'atac i la barnilla d'acomodació del folre de la vora d'escapament.

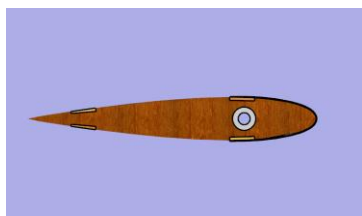


Figura 48. Reforç transversal de l'aleró. Font: pròpia.

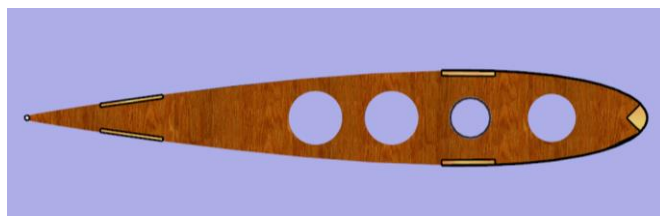


Figura 49. Reforç transversal de la vela. Font: pròpia.

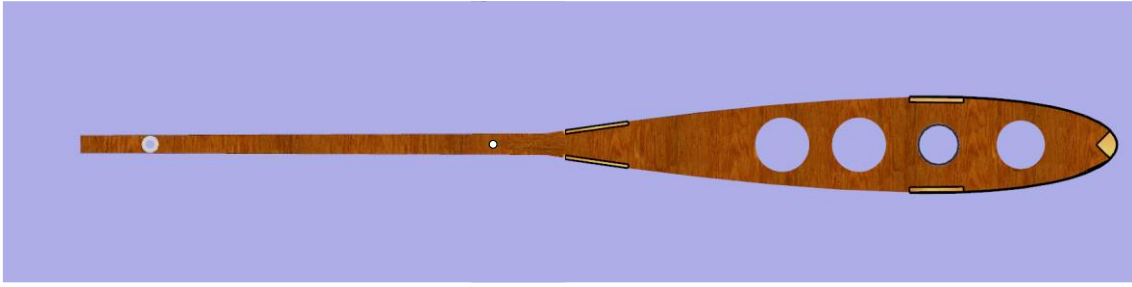


Figura 50. Reforç transversal de la vela amb extensió de suport de l'aleró. Font: pròpia.

4.6.2. Contrapès

Perquè l'aparell funcioni adequadament, el centre de masses de la vela i l'aleró ha d'estar alineat amb l'eix de gir, és a dir, amb el pal. Tot i això, s'ha definit el centre de gir a $\frac{1}{4}$ de la corda de la vela, per tant, la massa està distribuïda per força més a popa del pal. Per desplaçar el centre de masses fins el lloc correcte, és necessari disposar un contrapès al costat oposat de l'eix de gir que iguali el moment exercit pel pes de l'aleró i tres quartes parts de la vela. Aquest contrapès s'ha dissenyat en forma de prolongació que sobresurt pel costat de proa de la vela, unit a una de les costelles estructurals.

L'alçada del centre de masses un cop posat el contrapès no afecta el bon funcionament de la vela, però sí que influeix a l'estabilitat del vaixell. Per aquest motiu, s'ha posat el més avall possible per perdre el mínim d'estabilitat, però deixant una distància suficient amb la coberta perquè cap equip que s'hi pugui col·locar en un futur impedeixi el moviment de la vela. Concretament, s'ha unit a la costella número 3 començant per la més baixa.

Seguint amb l'objectiu de fabricar les parts del vaixell pensant en la facilitat de transport, s'ha dissenyat un sistema de fixació per tal que l'apèndix del contrapès pugui ser desmuntat amb facilitat. A l'extrem més proper a la vela, se li ha donat una forma de forquilla amb dues puntes perquè es puguin introduir dins el cos de l'ala sense interferir amb l'element estructural vertical situat a la vora d'atac. La inserció de les puntes es fa a través de dos orificis practicats al folre i la puntera de PVC, just per sobre el nivell de la 3a costella. A l'interior de la vela, les puntes s'encaixen sota dues peces metàl·liques en forma de L, que impedeixen el moviment vertical lateral (Figura 51).

Per impedir el desacoblament indesitjat del contrapès, s'ha cargolat una anella a la part inferior de l'extensió i l'altre a la vora d'atac de la vela de manera que, un cop encaixada la peça, els orificis de les anelles s'alineen (Figura 52). Aquest sistema permet fermar una brida i deixar la unió assegurada. L'extensió del contrapès s'ha reforçat amb un cable d'acer que uneix el seu extrem amb la part superior de la vela. La tensió d'aquest cable ajuda a sostenir la massa disposada a la punta del braç i descarrega esforç a la zona de fixació.

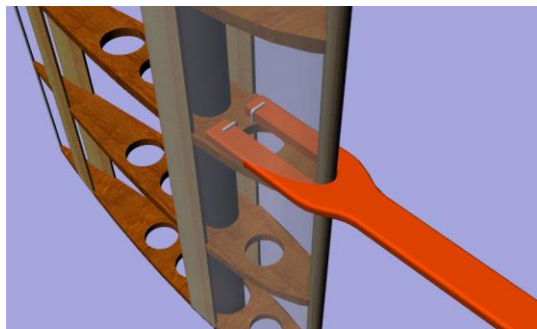


Figura 51. Unió desmuntable del contrapès.
Font: pròpia.

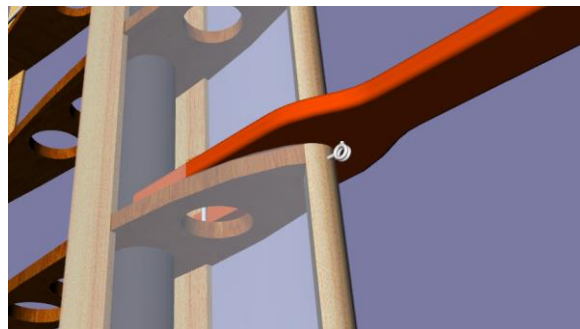


Figura 52. Sistema de bloqueig de la unió. Font: pròpia.

4.6.3. Punt de pivot

Considerant l'enfognament i el pal un bloc conjunt, units per un passador i uns anells de goma, aquest és l'eix que utilitza la vela per girar. A l'extrem superior de l'enfognament, aquest eix experimenta un canvi secció sobtat degut a que el pal té un diàmetre inferior a l'enfognament. Aquest esglaó és el que fa servir la vela com a punt de recolzament (Figura 53). El diàmetre de l'eix mecanitzat a la 1a costella correspon a l'amplada de l'enfognament. Per altra banda, a partir de la 2a costella cap a munt, el diàmetre per on passa l'eix correspon a l'amplada del pal a les respectives alçades. És així com, a l'encaixar l'estructura de la vela a l'eix des de la part superior, aquesta va baixant fins que la 2a costella queda recolzada a l'extrem superior de l'enfognament. Així doncs, aquesta és la costella on recau el pes de l'estructura, i les altres serveixen com a guia per aguantar els esforços laterals.

La zona on es recolza la 2a costella amb el topall de l'enfognament és especialment crític pel seu fregament i desgast. Per aquest motiu, s'ha disposat un rodament axial de boles que permet un gir lliure de fregament, evitant el desgast. S'ha triat un rodament amb un diàmetre interior lleugerament superior a la secció del pal en aquesta alçada i un diàmetre exterior superior a la secció de l'enfognament, però inferior a l'espai disponible entre els reforços verticals de l'estructura. Concretament, s'ha escollit el rodament amb número de referència: 51108. S'ha hagut d'eixamplar lleugerament el diàmetre interior per tal que no es quedés travat amb pal, donat que la mida és molt ajustada.

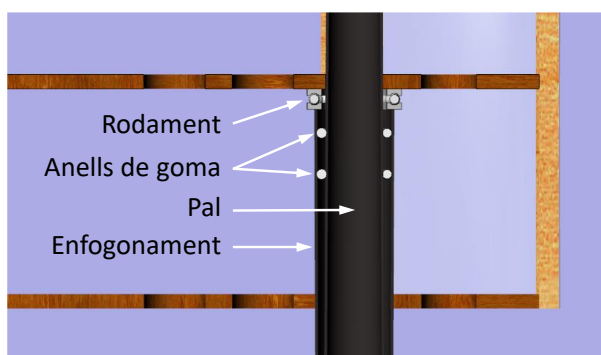


Figura 53. Secció lateral del punt de pivot de la vela.
Font: pròpia.

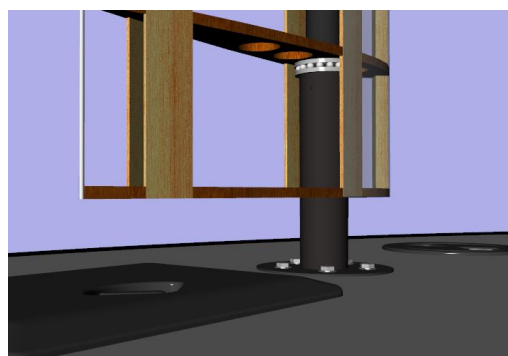


Figura 54. Vista en perspectiva del punt de pivot de la vela. Font: pròpia.

El fet d'ubicar el punt de pivot a la segona quaderna enlloc de la primera, comporta dos avantatges. En primer lloc, es minimitza la possibilitat que entri aigua per la junta entre el pal i l'enfognament. Tot i que l'esclotxa entre aquestes dues peces està tapada amb dos anells de goma, a l'estar dins el cos de la vela queda menys exposada als esquitxos del mar. També suposa un avantatge pel què fa a la durabilitat del rodament. El fet d'estar més protegit fa que trigui més a oxidar-se i que, per tant, s'allargui la seva vida útil (Figura 54).

4.7. Mecanisme motor de l'aleró

L'aleró es mou gràcies a un servo ubicat dins el cos de la vela (Figura 35). La transmissió del moviment es dona gràcies a una tija cilíndrica de fibra de vidre d'un diàmetre de 4 mm. Aquesta tija està unida de manera mòbil pels dos extrems, un al braç del servo i l'altre al de l'aleró. La llargada d'aquests dos braços no és igual, el del servo és més curt que el de l'aleró. Això provoca que l'engranatge de transmissió sigui reductor i permeti al servo actuar aplicant un parell de força menor. Com que la força que exerceix el vent sobre l'aleró és petita, el mecanisme només actua per un costat. És a dir, el moviment es transmet a través d'una sola tija, que treballa a tracció i compressió.

El servo s'ubica sobre la 5a costella de la vela, i es falca sobre l'estructura de fusta. La tija transmissora passa a través del folre per una obertura practicada al costat d'estribord. A l'altre costat, el folre disposa d'una obertura més gran per poder accedir al servo i fer-ne el manteniment. Aquest accés s'obra i es tanca amb una cremallera de plàstic, especialment dissenyada per suportar la humitat i l'ambient marí. Els cables de senyal i alimentació del servo s'introdueixen al pal a través d'un orifici, descendeixen pel seu interior i entren a l'interior del buc, on es connecten amb el sistema de control.

Capítol 5. Disseny dels apèndixs

En aquest capítol s'explica el procés de disseny dels apèndixs submergits a l'obra viva. No s'ha trobat cap mètode numèric per calcular el dimensionament dels timons per a una embarcació tant petita. Tots els mètodes trobats han sigut a base de regressions fetes a partir de velers esportius de creuer. Sí que s'ha trobat, però, informació sobre l'efecte de diferents formes d'apèndixs sobre la navegació del vaixell i petits càlculs per definir els paràmetres principals. Així doncs, el disseny dels apèndixs s'ha basat en el coneixement teòric d'aquestes formes i en la inspiració amb vaixells de característiques similars. També s'ha fet us d'eines informàtiques per determinar la posició òptima d'aquests apèndixs i garantir l'estabilitat de rumb.

Una de les característiques del SenSailor és la capacitat de poder ser desmuntat per facilitar-ne el transport. Aquest avantatge resulta un repte a l'hora de dissenyar apèndixs submergits sota la línia de flotació, ja que cal garantir una bona estanquitat i resistència a les unions desmuntables. El disseny d'aquests apèndixs no ha estat orientat a optimitzar el màxim rendiment hidrodinàmic de l'embarcació, però sí que s'ha centrat molt en fer que compleixin la seves funcions bàsiques en la navegació i les característiques esmentades a les unions desmuntables.

El capítol s'estructura de la següent manera. A l'apartat 5.1 s'explica el disseny dels timons i *skegs*. A continuació, a 5.2, s'explica la subjecció d'aquests elements amb el buc. A la secció 5.3 s'explica el disseny del pla antideriva, és a dir, la superfície encarregada d'evitar l'abatiment de l'embarcació. Tot seguit, a 5.4 s'explica el disseny del bulb de l'orsa, és a dir, el llast encarregat d'estabilitzar l'embarcació. A l'apartat 5.5 s'exposen els diferents mètodes que s'han considerat per subjectar l'orsa al buc i la decisió presa finalment. Per acabar, a 5.6, s'explica l'estudi fet per determinar la posició longitudinal dels apèndixs, amb l'objectiu d'obtenir una bona estabilitat de rumb.

5.1. Disseny dels timons i *skegs*

A una embarcació no tripulada la fiabilitat dels sistemes és fonamental. Un dels sistemes més importants d'un vaixell és el de control de rumb. Sense ell, el vaixell navega a la deriva i perd la seva funció principal, que és arribar al destí proposat. Un plàstic surant a la superfície, la col·lisió amb un objecte contundent o una averia elèctrica al servo poden suposar la pèrdua de governabilitat de l'embarcació. Amb l'objectiu de millorar la redundància d'aquest sistema, s'ha

optat per equipar el SenSailor amb dos timons controlats de manera coordinada per dos servos independents.

Un altre factor que pot afectar a la capacitat de govern és l'escora produïda per l'acció del vent sobre la vela o el balanceig de les onades. El fet de tenir dos timons ajuda a mantenir el control davant aquestes situacions. Amb aquest objectiu, s'han disposat els dos timons amb una inclinació de 20° respecte la vertical. D'aquesta manera, s'assegura que hi hagi en tot moment almenys una pala de timó submergida, amb un grau de verticalitat prou correcte perquè tingui un bon efecte sobre el control del rumb.

Una opció per transmetre el moviment al timó sense haver de perforar el buc per sota la línia de flotació podria ser fixar l'eix del timó al mirall de popa i accionar-lo mitjançant un braç que travessi el buc o la coberta per algun punt de l'obra morta. Tot i això, com que el vaixell ha de garantir la completa estanquitat, aquest sistema no estalviaria una possible via d'aigua en cas de gran escora o bolcament. Per aquest motiu, s'ha preferit ubicar cada un dels timons a sota el buc, amb una llimera que permeti el pas de la metxa cap a l'interior del vaixell de manera estanca. Aquest mecanisme també permet que la transmissió del moviment del servo sigui més directa i compacta.

Algunes embarcacions tenen el timó integrat al codast. Aquesta disposició permet fixar la pala per almenys dos punts, l'extrem superior i l'inferior. Altres embarcacions disposen de timons suspesos o d'espada, fixats solament per l'extrem superior de la pala, donat que no tenen un taló de codast on poder-lo encaixar. Una alternativa per donar més reforç a aquest tipus de timons és l'ús de *skegs*. Aquest element es tracta d'un apèndix fixat al buc situat a proa del timó que serveix per oferir un punt de recolzament més reforçat a la pala. La traducció del mot *skeg* en català és aleró, però al llarg d'aquesta memòria s'utilitzarà el terme en anglès per evitar la confusió amb l'aleró de la vela.

A l'embarcació d'aquest projecte s'ha optat per implementar el sistema dels *skegs* a cada timó. S'han dissenyat de tal manera que els *skegs* siguin els elements estructurals que suportin els esforços laterals generats per les pales dels timons. A diferència de la resta d'apèndixs del vaixell, que són tots desmuntables, els *skegs* són solidaris al buc i estan subjectes a l'estructura de reforç de l'embarcació. A l'interior del buc, es prolonguen fins una alçada de 10,5 cm per sobre la línia de flotació, i a ells estan subjectes les llimeres, per on passen les metxes dels timons (Figura 56 i Figura 55). A l'interior del buc, els *skegs* estan units entre ells amb una peça de tauler de fusta per mantenir l'angle relatiu entre ells dos. Per altra banda, estan soldats amb un laminat de fibra de vidre a la quaderna de més a popa i a la paret del buc. Aquesta unió amb l'estructura del vaixell garanteix una alta resistència als esforços transmesos pels timons.

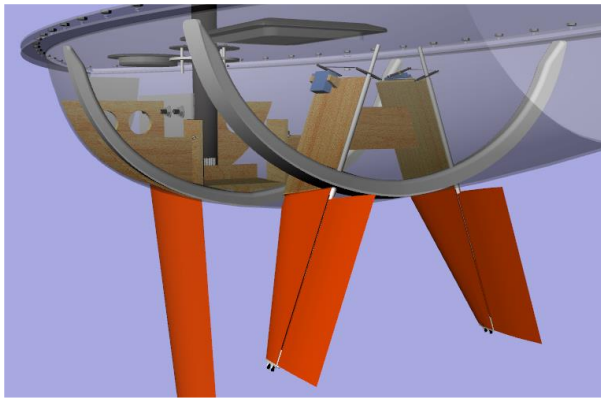


Figura 55. Vista de l'estructura dels timons i skegs a través del buc. Font: pròpia.

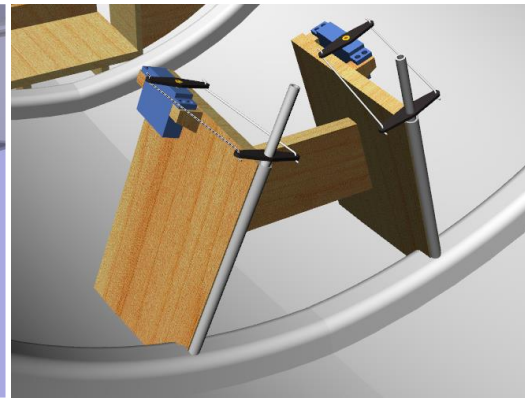


Figura 56. Sistema d'accionament dels timons. Font: pròpia.

A part de millorar la subjecció de les pales dels timons, els *skegs* també representen elements de protecció per evitar que objectes flotants puguin malmetre el sistema de govern de l'embarcació. S'han dissenyat amb un angle d'escombrat gran per facilitar l'evacuació d'algues, plàstics o objectes que es puguin quedar enganxats a l'apèndix. L'angle d'escombrat, en anglès *sweep angle*, és l'angle comprès entre la vertical i la línia creada pel 25% de la corda a l'extrem superior i el 25% de la corda a l'extrem inferior de l'apèndix.

Per la fabricació dels timons i *skegs* s'ha utilitzat tauler de fusta fenòlica de 10 mm de gruix. S'han recobert amb una capa de mat 30 de fibra de vidre amb resina de polièster per millorar la resistència superficial i la impermeabilitat.

A la tesis de l'enginyer naval A. Valios indicada a la bibliografia [11] es recomana que l'àrea projectada dels timons equivalgui entre l'1% i el 2% de la superfície vèlica. Tenint en compte que la navegació del vaixell serà lenta, és convenient disposar d'una àrea gran que proporcioni una força de sustentació suficient per governar l'embarcació amb vents febles, és a dir un 2% de la superfície vèlica. En cas de tenir 2 timons, l'àrea calculada cal repartir-la de manera simètrica a babord i estribord. En el cas del veler autònom d'aquest projecte, però, s'ha optat per assignar a cada timó l'àrea total calculada, proporcionant així el doble d'àrea projectada de la recomanada. D'aquesta manera, s'augmenta lleugerament la resistència a l'avanç a canvi de guanyar fiabilitat en el sistema de govern. Si un dels dos servos falla, un sol timó és suficient per seguir governant l'embarcació. Als *skegs* se'ls ha donat una mida òptima per poder muntar un sistema de connexió articulada amb els timons pel seu extrem inferior, amb una resistència suficient per suportar impactes i esforços deguts a la navegació i al transport.

A l'Annex IV. *Plànols i esquemes* es poden trobar les cotes i dimensions dels apèndixs.

5.2. Subjecció dels timons

A l'extrem inferior dels *skegs*, una peça d'acer inoxidable que fa d'element de subjecció articulada a la pala del timó (Figura 57). Aquesta peça s'ha dissenyat de tal manera que es pugui

desmuntar per deixar lliure l'extrem inferior dels timons i que aquests es puguin desencaixar del buc per fer el manteniment i engreixat de les llimeres.

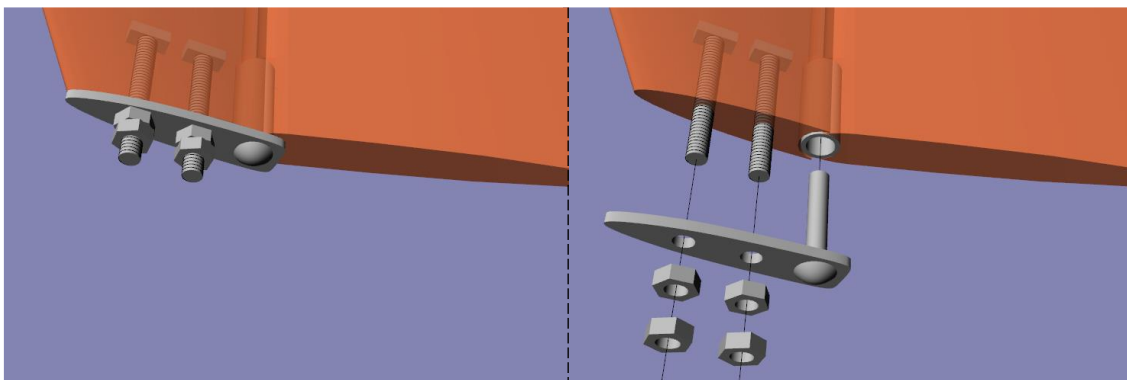


Figura 57. Subjecció articulada inferior del timó. Font: pròpia.

Un dels punts més crítics a cada timó és l'estanquitat a la llimera. Aquest punt ha de garantir un fregament mínim amb la metxa del timó però a la vegada una completa estanquitat en qualsevol situació d'escora. Les llimeres estan fabricades amb dos tubs d'alumini amb un radi exterior de 8 mm i interior de 6mm. Aquests tubs estan sòlidament units al costat de popa dels *skegs*, a la part que queda dins el buc, de manera que l'orifici superior queda obert a l'interior del buc per sobre la línia de flotació i l'altre queda enrassat al costat exterior del buc, estant en contacte amb l'aigua. La superfície interior de la llimera i l'exterior de la metxa del timó s'han mecanitzat i polit de manera que quedin ajustades proporcionant un tancament hermètic de contacte metall-metall. Per acabar de garantir l'estanquitat i el bon lliscament d'ambdues peces s'ha lubricat la unió amb un greix per engranatges amb base de liti, amb propietats hidròfobes.

La metxa dels timons està fabricada amb un tub recte d'alumini, amb un diàmetre exterior de 6 mm i interior de 4 mm. El tram inferior d'aquest tub està doblegat formant un colze d'uns 45° (Figura 58 i Figura 59). La metxa s'uneix al costat anterior de la pala del timó i el tram doblegat del cilindre queda encaixat a un orifici practicat a mitja alçada de la pala del timó. Aquest muntatge garanteix una unió solidària entre l'eix i la pala del timó.

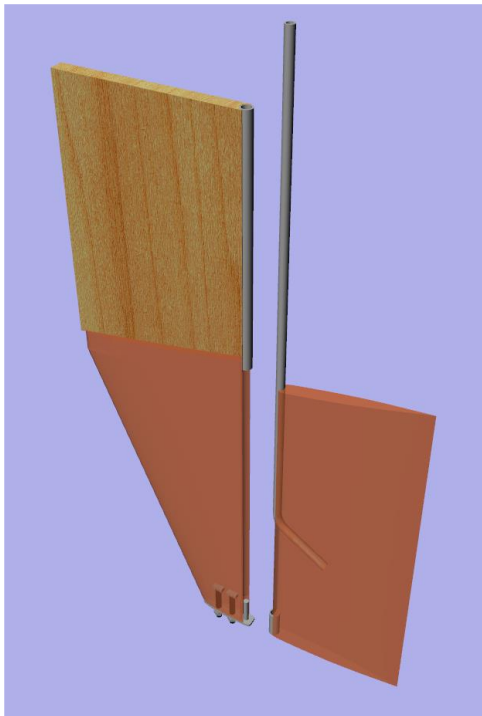


Figura 58. Detalls interns de la pala del timó. Font: pròpia.

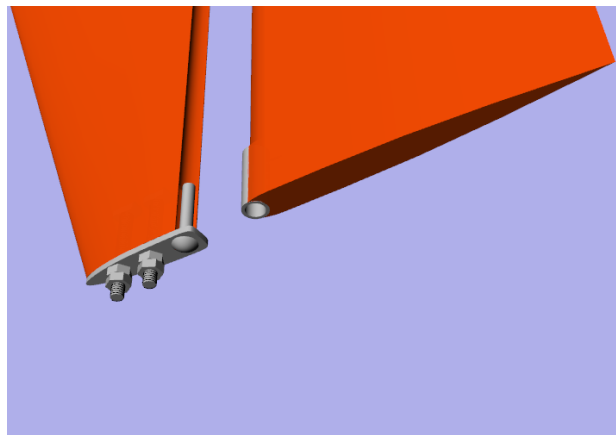


Figura 59. Frontissa desmuntable inferior del timó. Font: pròpia.

5.3. Disseny del pla antideriva

La navegació d'un dron marí de superfície destinat a la presa de mesures no necessita una gran velocitat, però sí una bona estabilitat i la capacitat d'avançar en línia recta amb el mínim d'abatiment. L'apèndix encarregat d'aportar aquestes característiques a l'embarcació és l'orsa. Al llarg de la història aquest apèndix ha anat evolucionant i adoptant formes molt diverses en base al tipus de navegació de l'embarcació, de l'experiència del dissenyador i els materials usats. Les quilles corregudes, les orses d'aleta, les orses dobles i les orses amb bulb o ales, són algunes de les variants que s'utilitzen a les embarcacions d'avui en dia, cada una amb els seus avantatges i inconvenients.

El SenSailor necessita un pla d'orsa prou gran per evitar la deriva de l'embarcació, però que a la vegada pugui ser desmuntat amb facilitat del buc per permetre el transport. Aquesta segona característica porta directament a descartar la quilla correguda o qualsevol variant on l'orsa estigui integrada a l'estructura del buc i convida a fer servir un disseny d'aleta on l'apèndix estigui acoblat a l'estructura del buc mitjançant una unió desmuntable, però que no hi estigui integrat.

La **superfície projectada** és una característica que es defineix habitualment en funció de la velocitat del vaixell. Com més velocitat, menys superfície d'orsa cal per compensar la força d'abatiment produïda per la vela. Alguns vaixells de vela lleugera disposen d'orses retràctils i

són capaços d'ajustar-ne la superfície en funció de la seva velocitat. També va lligada a l'àrea del pla vèlic que disposa el vaixell. Segons el llibre *Principles of Yacht Designs [11]*, la superfície projectada de l'orsa ronda el 3,5% de la superfície de vela en vaixells de creuer i pot arribar a l'extrem de l'1,5% en vaixells de competició. Però donades les peculiaritats del vaixell en qüestió no s'han seguit aquests valors orientatius.

El SenSailor disposa d'una vela fora del comú. La seva superfície vèlica respecte l'eslora total és molt més petita del normal per poder avançar en vents suaus i navegar en condicions dures. A més, el concepte de vela utilitzat no s'ajusta al tipus de veles tradicionals, i resulta difícil utilitzar valors de dimensionament dels apèndixs trets de regressions fetes a partir de vaixells tant diferents. Per escollir la superfície projectada de l'orsa s'ha tingut en compte l'efecte d'abatiment que tindrà l'embarcació a causa de les onades, donada la seva petita eslora. S'ha volgut dissenyar una orsa que ajudi a mantenir la posició del vaixell malgrat les perturbacions del mar i que l'ajudi a guanyar vent ràpidament durant la navegació en cenyida. A més, malgrat que el dimensionament del bulb es calculi a una fase posterior, s'ha previst que, per tal d'aconseguir una embarcació estable i imbolcable, el llast fixat a l'extrem inferior de l'apèndix requerirà una bona resistència del pla antideriva. Si es vol construir aquest pla amb tauler de fusta i laminat de fibra de vidre de manera artesanal, caldrà una quantitat de material suficient per suportar aquesta càrrega. Finalment s'ha optat per una superfície projectada de 0,18 m².

Un altre paràmetre important és el seu **calat de l'orsa**, és a dir, la distància entre el costat on s'uneix al buc i el costat inferior. Aquest paràmetre és bastant lliure i es defineix en funció del criteri del dissenyador o de les característiques de navegació. Per exemple, la profunditat de les aigües per on ha de navegar. En el cas del vaixell que es vol dissenyar no hi ha restriccions de calat, ja que la posada i recollida del vaixell a l'aigua es farà mitjançant una grua instal·lada a un moll, on la profunditat ja és suficientment gran. La navegació està pensada perquè sigui per mar, lluny de la costa, on no hi ha perill de quedar-se embarrancat.

Per altra banda, en el càlcul de dimensionament del bulb de l'orsa, s'haurà de mirar que el braç adreçant produït pel llast pugui compensar el braç escorant màxim de l'embarcació. Al moment adreçador hi intervenen dues variables, el pes del llast i la llargada de l'orsa. Per tant, com més llarga sigui l'orsa, menys pes s'haurà de posar al bulb. En els càlculs de dimensionament del bulb, explicats més endavant, s'ha anat ajustant la llargada de l'orsa amb l'objectiu d'aconseguir un equilibri entre el calat i el volum del bulb que sigui raonable. Una orsa massa llarga podria donar problemes d'espai a l'hora de guardar l'embarcació. Un bulb massa gran implicaria una quantitat de plom massa alta per poder fer la fundació de plom artesanal d'una sola colada. Finalment s'ha optat per un calat de l'orsa de 0,60 m, sense comptar el bulb.

5.4. Disseny del bulb de l'orsa

Es vol dissenyar un vaixell estable, que navegui amb el mínim d'escora i que pugui recuperar la seva verticalitat en cas de bolcament. Per aquest motiu, s'ha optat per baixar al màxim el centre

de masses fixant un bulb llastrat a l'extrem inferior de l'orsa. Per aconseguir el màxim de massa amb el mínim volum, s'ha decidit fabricar el llast amb plom. Aquest material, a part de tenir una alta densitat, 11.340 kg/m^3 , és un metall fàcil de mecanitzar i amb un punt de fusió baix, 327°C , amb la qual cosa es podrà fabricar mitjançant fosa de manera artesanal.

En aquest projecte s'ha prescindit d'optimitzar les formes del bulb. L'elecció del perfil hidrodinàmic s'ha fet escollint un dels recomanats pel disseny d'apèndixs a la pàgina web de *Airfoil Tools*. El perfil escollit ha sigut un NACA 63A-010 (Figura 60).

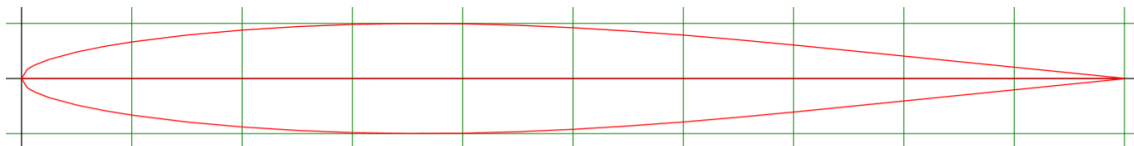


Figura 60. Perfil NACA 63A-010. Font: [7]

El dimensionament del bulb, juntament amb el calat de l'orsa, ha sigut un procés que s'ha anat corregint amb el temps a mida que s'han anat dissenyant la resta de característiques del vaixell. És clar que el pes del bulb va directament lligat amb el calat de l'orsa i la superfície vèlica, i aquesta està lligada a la potència requerida per fer desplaçar l'embarcació. El disseny de l'orsa també va lligat a la distribució de pesos a l'interior del buc, i això depèn dels equips electrònics que s'utilitzin, com per exemple, els servos, la bateria i el panell solar. En resum, el dimensionament del bulb i l'orsa ha seguit un procés iteratiu on s'han fixat uns valors inicials i s'han anat ajustant segons les necessitats. Dit d'una altra forma, s'ha seguit un procés en forma d'espiral, tot i que a continuació s'ha intentat resumir el procediment fent una descripció lineal.

Per dimensionar el bulb s'ha començat fent un càlcul orientatiu sense tenir en compte el braç adreçador associat amb les formes del vaixell. És a dir, s'ha fet un càlcul de moments prenent com a punt de referència el centre de carena del vaixell en posició vertical. Sumant la contribució a l'escora de totes les masses del vaixell, s'ha calculat la massa del bulb necessària per assolir l'equilibri de moments a una situació d'escora màxima desitjada. Les masses considerades en el primer càlcul han sigut valors orientatius i s'han anat corregint en fases posteriors del projecte. S'ha agafat com a escora màxima desitjada un angle de 40° amb una ràfega de vent de 25 kn. En el cas que el vent es mantingui amb aquesta intensitat de manera continuada, el sistema de control automàtic disminuirà l'angle d'atac de la vela per reduir-ne la força generada.

A la taula que es mostra a continuació es pot veure la massa de cada part del vaixell, l'alçada del centre de gravetat (CG) de cada massa i la distància del CG respecte el centre de carena (CB).

Part del vaixell	Massa [kg]	Froça [N]	Alçada CG	Distància CG a CB [m]
Contribuents a l'escora				
Vela, aleró i pal	5	49,05	0,984	0,898
Sensors vent	0,5	4,905	1,743	1,657
Suport sensors	0,135	1,324	1,694	1,608

Buc i coberta	20	196,2	0,174	0,088
Bateria	9,6	94,176	0,11	0,025
Panell solar	4,1	40,221	0,334	0,248
Contribuents a l'adreçament				
Electrònica	0,7	6,867	0,08	0,006
Apèndixs	3	29,43	-0,193	0,279

Taula 31. Distribució de masses considerada a la 1a aproximació del dimensionament del llast. Font: pròpia.

A partir d'aquí, s'ha calculat el parell exercit per cada massa sobre el sistema amb un angle d'escora de 40°, fixant com a punt de referència el CB. Als parells escorants s'hi ha sumat la contribució de la força lateral del vent exercida sobre la vela, a una velocitat de 25 kn. Per calcular aquesta força s'han obtingut els coeficients C_f i C_s del NACA 0015 del programa *Javafoil* per un angle d'atac de 22° (angle més òptim segons l'estudi aerodinàmic de la vela) i a partir d'aquí s'han calculat la component de força transversal per diferents angles de vent respecte el vaixell. Dels valors obtinguts s'ha escollit el més gran, que correspon a la navegació de cenyida a 45°. A aquest valor s'hi ha aplicat un factor reductor per tenir en compte la pèrdua d'àrea efectiva donada una escora de 40°.

Càlculs de F_{RT} per diferents rumbos							
Angle vent respecte LC	Angle vela respecte LC	Angle d'atac [graus]	C_S	C_F	F_S	F_F	F_{RT}
45	25	22	1,274	0,137	76,116	8,193	59,616
67,5	45	22	1,274	0,137	76,116	8,193	36,698
90	70	22	1,274	0,137	76,116	8,193	8,193
112,5	90	22	1,274	0,137	76,116	8,193	-21,558

Taula 32. Resultats del càlcul de la força resultant transversal (FRT) de la vela a un vent de 25 kn i una escora màxima desitjada de 40°. Font: pròpia.

Contribució vent	Força sense escora [nm]	Força amb factor reducció [N]	Alçada CP [m]	Distància CP a CB [m]
Vent sobre vela	59,616	45,668	0,983	0,897

Taula 33. Contribució del vent a l'escora. Font: pròpia.

Tenint ja una aproximació de les forces principals que actuen sobre el sistema, s'ha fet el càlcul de moments multiplicant la força de cada massa o la contribució del vent per la distància perpendicular a la força, des del punt d'aplicació de la força al punt CB.

A continuació, s'ha fet el sumatori dels moments. Els parells escorants sumen i els adreçadors resten. El valor obtingut resulta el moment que ha de fer el llast de l'orsa en sentit contrari per equilibrar el sistema a la situació d'escora màxima desitjada.

	CONTRIBUCIÓ	MOMENT [N·m]
PARELLS ESCORANTS	Vela, aleró i pal	26,602
	Sensors vent	5,224
	Suport sensors	1,369
	Buc i coberta	11,098
	Bateria	1,513
	Panell solar	6,412
	Vent sobre vela	31,381
PARELLS ADREÇADORS	Electrònica	0,026
	Apèndixs	5,262
PARELL ESCORANT TOTAL		78,310

Taula 34. Resultats del càlcul de moments de les masses considerades a la 1a aproximació del dimensionament del llast. Font: pròpia.

Finalment, sabent la distància on es vol col·locar el bulb, s’ha determinat la massa del llast per tal de generar el moment necessari.

$$M = F \cdot d \cdot \sin(\alpha); \tag{35}$$

$$M = m \cdot g \cdot d \cdot \sin(\alpha); \tag{36}$$

$$m = \frac{M}{g \cdot d \cdot \sin(\alpha)} \tag{37}$$

Parell adreçador necessari (N·m)	Distància CG a CB (m)	Massa bulb (kg)
78,310	0,741	16,762

Taula 35. Resultat de la 1a aproximació del dimensionament del llast. Font: pròpia.

Aquest procés s’ha anat iterant al llarg del disseny del vaixell i s’ha anat ajustant el calat de l’orsa i la massa del bulb per obtenir el parell adreçador desitjat amb unes proporcions de l’apèndix òptimes per a la construcció. Com s’ha explicat al subapartat 5.3, *Disseny del pla antideriva*, un calat massa llarg pot suposar un problema a l’hora de transportar i guardar el vaixell. Per altra

banda, una orsa massa curta implica tenir un bulb més gran per aconseguir l'estabilitat desitjada, i això dificulta el procés de fundació del plom.

Aquest procediment s'ha utilitzat com a guia orientativa per anar dimensionant el vaixell, però no resulta el millor mètode per calcular el llast necessari. En aquests càlculs s'ha donat per suposat que quan el vaixell escora ho fa girant pel centre de carena *CB*. Si fos així, els moments s'aplicarien sobre aquest punt en qualsevol situació d'escora i el mètode seria totalment vàlid. Però a la realitat, quan el vaixell escora es recolza sobre un costat del buc i la posició del centre de carena es desvia. D'aquesta manera, el càlcul de moments deixa de ser tant evident, ja que la variació d'aquest punt depèn de les formes del buc.

Per calcular la massa idònia del bulb, s'ha utilitzat el programa *Maxsurf Stability*. Mitjançant el modelat exacte del buc i la distribució de pesos, l'eina és capaç de calcular la corba de braços adreçadors per a diferents angles d'escora. Amb l'equació que es mostra a continuació es pot calcular el moment adreçador que exerceix el vaixell a una situació d'escora determinada, produïda per una pertorbació com pot ser el vent.

$$M = \Delta \cdot g \cdot GZ \quad (38)$$

on Δ és el desplaçament del vaixell en kg, g l'acceleració de la gravetat i GZ la llargada del braç adreçador.

Al programa s'ha fet la distribució precisa dels pesos del vaixell i s'ha assignat a cada component la seva massa exacta (Taula 36). Després de fer varies iteracions amb aquesta eina s'ha observat que la contribució de les formes del buc per adreçar el vaixell no és rebutjable, i els resultats s'han vist força alterats degut a aquest efecte. Com a conseqüència, s'ha pogut disminuir considerablement la massa del llast, i s'ha optat per dimensionar un bulb de 10 kg.

	Item Name	Quantity	Unit Mass kg	Total Mass kg	Long. Arm m	Trans. Arm m	Vert. Arm m
1	Lightship	1	0,0	0,0	-4,578	0,000	0,000
2	Vela + aleró + contrapes	1	4,0	4,0	0,978	0,000	0,909
3	Timo+skag 1	1	0,3	0,3	0,298	0,110	0,060
4	Electrònica	1	0,5	0,5	0,671	0,000	0,120
5	Pal	1	0,7	0,7	0,978	0,000	0,842
6	Bateria	1	10,0	10,0	0,824	0,000	0,111
7	Timo+skag 2	1	0,3	0,3	0,298	-0,110	0,060
8	Panell solar	1	4,1	4,1	0,188	0,000	0,335
9	Orsa	1	2,4	2,4	1,143	0,000	-0,138
10	Llast	1	10,0	10,0	0,971	0,000	-0,654
11	Buc + coberta	1	20,0	20,0	0,936	0,000	0,174
12	Sensors pal	1	0,5	0,5	0,947	0,000	1,743
13	Suport sensors	1	0,1	0,1	0,960	0,000	1,694
14	Total Loadcase			52,9	0,867	0,000	0,085
15	FS correction						0,000
16	VCG fluid						0,085

Taula 36. Distribució de pesos del vaixell considerada al darrer càlcul de dimensionament del llast. Font: pròpia.

Aquesta massa permet dotar a l'embarcació d'una bona estabilitat per compensar l'efecte del vent i de les onades durant la navegació a alta mar i redueix notablement el risc de bolcament. A la vegada, la quantitat de plom necessària per poder fer la fosa més assolible i maniobrable. Un llast de 8 kg hauria sigut suficient per garantir l'estabilitat desitjada, però s'ha preferit sobredimensionar aquesta peça per augmentar la seguretat d'aquest primer prototip. Per altra banda, una quantitat superior a 10 kg hauria suposat un risc a l'hora de fabricar la peça i el desplaçament del vaixell hauria augmentat per sobre el marge desitjat.

5.5. Subjecció de l'orsa

Un dels punts més crítics del buc és la inserció de l'orsa i la seva sujecció. Aquest punt ha de complir una sèrie de característiques que són imprescindibles per garantir la seguretat de l'embarcació. Un dels requeriments d'aquesta orsa que influeix en gran mesura el seu disseny és la capacitat de poder ser desmuntada. Com s'ha explicat a l'inici del capítol, aquesta característica afavoreix el transport i la substitució de components, però alhora resulta un repte afegit el fet de garantir una bona estanquitat i resistència a la unió. Al llarg del procés de disseny s'han considerat diverses opcions per enfrontar aquesta dificultat.

5.5.1. Unió a topall

Amb aquesta solució es proposa unir l'orsa al buc a topall, sense mecanitzar cap orifici ni encaix al cos de l'embarcació per on s'introdueixi l'apèndix (Figura 61). L'orsa es fixa al buc mitjançant unes solapes metàl·liques de secció en "L". A cada banda del pla antideriva es fixa una solapa per un dels dos costats de la "L", deixant l'altre costat lliure mirant cap amunt (posant la "L" de cap per avall). De la part inferior del buc, sobresurten els espàrrecs roscats d'uns pern subjectats i soldats solidàriament al buc, amb el cap situat a l'interior. L'orsa es colla a aquests espàrrecs a través de les solapes metàl·liques, amb rosques autoblocadores o dobles rosques.

La zona del buc on va instal·lat aquest sistema disposa d'un gruix superior gràcies a les de capes de reforç de fibra de vidre. A la part interior del buc, els caps dels pern que subjecten l'orsa es recolzen sobre una base metàl·lica situada al fons. Aquesta base també té secció en L, i el costat que queda en posició vertical es subjecta a un reforç longitudinal del buc ubicat a la línia de cruïxa. Per garantir una sujecció sòlida, els caps dels pern van soldats a la base de la peça metàl·lica. Aquesta s'uneix a l'estructura del vaixell amb cola bicomponent de resina d'epòxid i es recobreix amb un cicle de laminat de fibra de vidre que reforci l'estructura a les direccions dels esforços principals.

Aquest mètode de sujecció evita haver de mecanitzar un orifici per introduir l'orsa a través del buc i fabricar un calaix per evitar l'entrada d'aigua. Suposa una fabricació més senzilla i un

muntatge i desmuntatge de l'orsa més còmode, donat que no s'ha d'accedir a l'interior del vaixell. A més, permet disposar de més espai interior per la instal·lació de sistemes elèctrics. Per altra banda, una fixació tant petita produeix tensions locals molt elevades que posen en risc de ruptura tant el buc com el pla antideriva en els punts de subjecció.

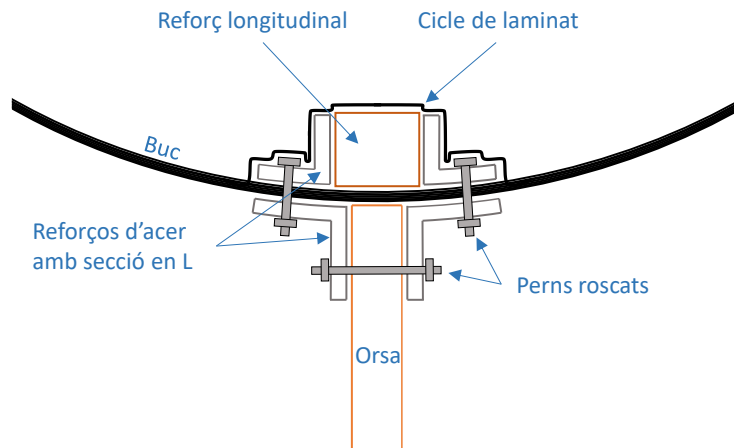


Figura 61. Esquema de secció transversal d'unió d'orsa desmuntable a topall. Font: pròpia.

5.5.2. Unió a topall amb encaix

Aquest sistema és molt semblant a l'anterior. A diferència, el pla antideriva s'introdueix al buc a partir d'un petit calaix de pocs centímetres d'alçada. Respecte el sistema anterior, el mecanisme de subjecció de l'orsa és el mateix, però el reforç longitudinal ubicat a la línia de cruïxa per la part interior del buc queda substituït per un petit encaix al fons del buc (Figura 62).

Aquest sistema permet mantenir la comoditat de muntatge i desmuntatge des de l'exterior del buc. La fabricació es complica una mica, ja que implica la fabricació d'un calaix estanc, però aquest encaix permet que les tensions locals produïdes a l'extrem superior de l'orsa quedin més repartides i el material no pateix tant desgast. Malgrat aquesta millora, encara s'ha considerat un sistema de fixació massa petit i localitzat, i s'ha preferit dissenyar una alternativa que reparteixi els esforços a l'estructura del vaixell d'una manera més uniforme, a canvi de reduir l'espai interior del buc aprofitable.

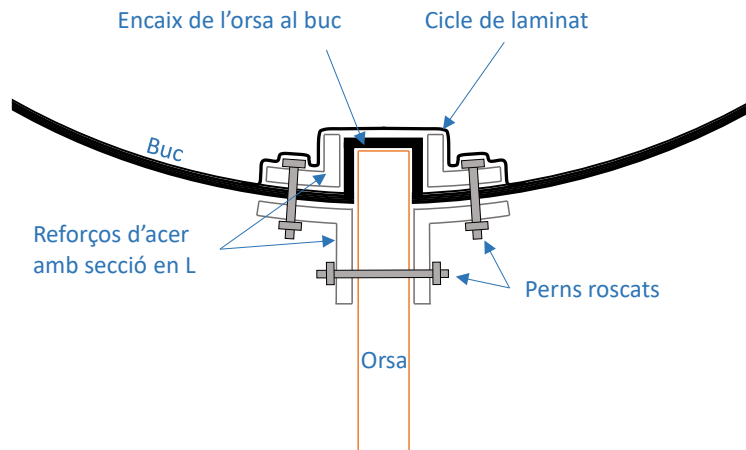


Figura 62. Esquema de secció transversal d'unió d'orsa desmuntable a topall amb encaix. Font: pròpia.

5.5.3. Unió amb calaix

Moltes embarcacions de vela lleugera amb orsa extraïble disposen d'un calaix obert per la cara superior i inferior que s'uneix al fons del buc i es prolonga fins una alçada superior a la línia de flotació. Aquesta cavitat permet introduir i retirar l'orsa des de l'interior del vaivell, a través de la part superior del calaix. Aquest sistema està dissenyat de manera que l'orsa quedi perfectament falcada dins aquest espai i, per tant, no és necessari l'ús de cargols per assegurar la subjecció.

Basant-se amb aquest sistema, s'ha dissenyat un sistema de calaix on l'orsa s'hagi d'introduir a l'interior del buc. Per això, s'ha hagut de redissenyar la forma de l'apèndix i afegir-li una extensió al seu extrem superior perquè s'encaixi dins el calaix. A diferència de la majoria de vaivells de vela lleugera, el SenSailor disposa d'un bulb a l'extrem inferior de l'orsa que li impediria ser introduïda per la part superior del calaix. A més, no és desitjable tenir una obertura que comuniqui l'interior del buc amb l'obra viva. Encara que estigués situada per sobre la línia de flotació, podria suposar una via d'aigua amb el moviment del vaivell. Així doncs, l'orsa s'introdueix per la part inferior del buc i es subjecta al calaix amb 3 passadors transversals, situats per sobre la línia de flotació i segellats amb cola estanca per evitar vies d'aigua (Figura 63).

El calaix està soldat al buc amb un cicle de laminat de 3 capes de teixit biaxial de fibra de vidre amb resina de polièster. La subjecció amb el buc està reforçada mitjançant una mampara a cada costat, situades a mitja eslora del calaix. Quan el vaivell escora, aquestes mampares distribueixen cap als costats del buc les forces generades per la palanca de l'orsa.

Per altra banda, s'ha fet un estudi per determinar la posició relativa entre la vela i l'orsa, i s'ha dissenyat de tal manera que el pal coincideixi amb el costat de popa del calaix de l'orsa. El procediment d'aquest estudi s'explica al proper apartat. Per facilitar el muntatge i desmuntatge de l'aparell, s'ha dissenyat un suport unit a l'estructura del vaivell on s'hi encaixi el pal. Aquest

suport, anomenat enfogonament, està format per un tub d'un diàmetre lleugerament superior al del pal, que sobresurt 22 cm per sobre la coberta. A l'interior del buc, l'enfogonament està soldat al calaix de l'orsa mitjançant un cicle de laminat de 3 capes de teixit biaxial de fibra de vidre amb resina de polièster.

A la vegada, l'enfogonament està unit de manera subjecta a la coberta. D'aquesta manera, els esforços laterals generats per la vela no es transmeten només al calaix de l'orsa sinó que també es reparteixen per la unió amb la coberta. Aquesta subjecció és desmuntable amb l'objectiu de poder aixecar la coberta i accedir a l'interior del buc. A l'apartat 3.4, *Estanquitat del buc*, es detalla aquesta unió desmuntable a l'enfogonament i s'explica el sistema de tancament hermètic.

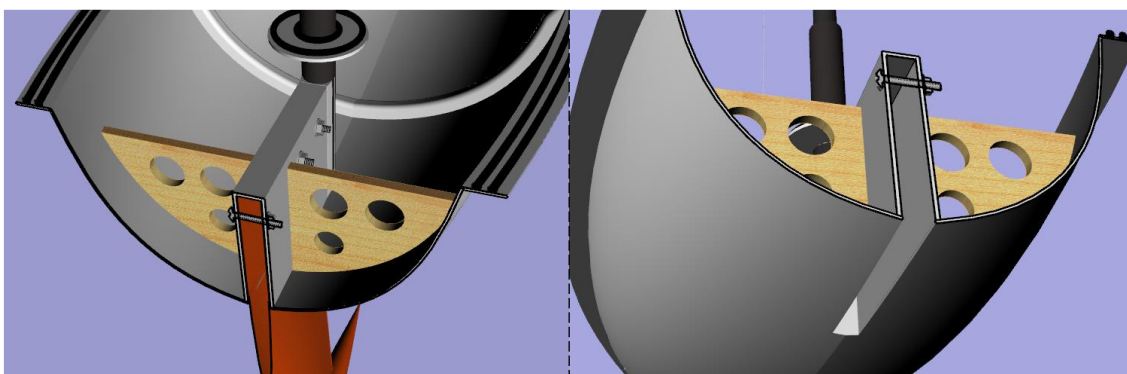


Figura 63. Vistes en perspectiva de la unió desmuntable amb calaix. Font: pròpia.

5.6. Balanç CV-CD

Quan un veler navega, la component transversal de la força exercida sobre la vela tendeix a fer derivar l'embarcació de costat. Per evitar-ho, tot vaixell propulsat a vela navega amb la proa desviada un cert angle cap a sobrevent. Aquesta petita desviació permet que la part submergida del vaixell adquireixi un cert angle d'atac i actuï com una ala d'avió sota l'aigua. Evidentment, una ala de formes més complexes. Com a conseqüència, es crea una força de sustentació que, descomposta sobre l'eix de referència del vaixell, es pot separar entre la component longitudinal, que s'oposa a la força propulsiva del vaixell, i la transversal, que s'anul·la amb la component transversal de la vela. De fet, tot i que tota la superfície mullada contribueix amb aquest efecte, l'element principal n'és l'orsa, que es dissenya expressament per complir aquesta funció.

S'anomena a Centre de Deriva (CD) o Centre de Resistència Lateral (CRL) el punt on s'aplica la força de sustentació generada a l'obra viva. Li diem Centre Vèlic (CV) al punt on s'aplica la força de sustentació generada sobre la vela. En altres punts de la memòria, s'ha anomenat aquest segon punt Centre de Pressions (CP), però s'evitarà usar aquest nom en aquest apartat per no crear confusió entre el CP de la vela i el de l'obra morta.

L'objectiu principal de l'orsa és generar la component lateral de força que s'oposi a la component transversal de la vela i així aconseguir que el vaixell navegui cap endavant i de manera rectilínia. Per què això sigui possible és important dissenyar el pla vàlic i el de resistència a la deriva de tal manera que el CV i el CD quedin alineats a la mateixa vertical respecte el pla lateral. Si, per contra, aquests dos punts queden desviats de la mateixa vertical, les components de força lateral crearan un parell que tendirà a fer girar el vaixell, desviant la proa de la trajectòria desitjada.

Així doncs, es poden donar dos casos de desalineament. Si el CV es troba més avançat que el CD, la proa tendirà a caure a sotavent. En aquest cas es diu que el vaixell és tou o amb tendència a arribar. Contràriament, si el CD es troba més avançat que el CV, la proa tendirà a girar cap al vent. En aquest cas es diu que el vaixell és ardent o amb tendència a orsar. Aquest desalineament es pot donar de manera involuntària, per un mal disseny de l'embarcació, o de manera voluntària, desplegant la vela de proa i de popa de manera descompensada. Algunes embarcacions de vela lleugera no disposen de timó i alteren el rumb variant la posició del CV (cas del windsurf) o el CD (cas del patí català).

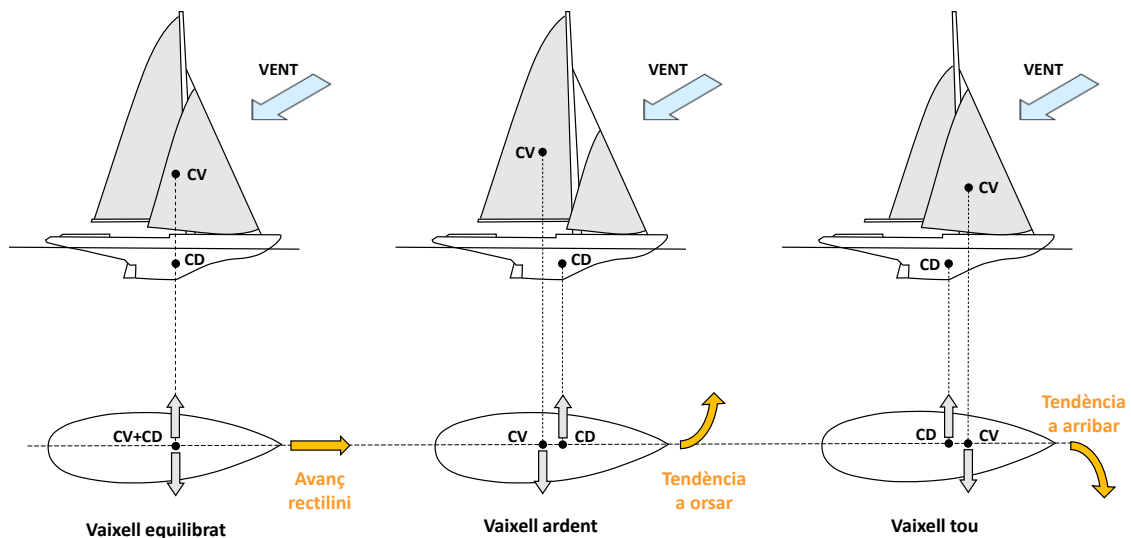


Figura 64. Tres casos de posició relativa entre CV i CD, i el seu efecte sobre l'embarcació. Font: pròpia.

Una de les dificultats del disseny d'una embarcació a vela és la determinació del CD. Tota la part submergida de l'embarcació contribueix a la resistència lateral, incloent el buc, el timó i l'orsa. Una aproximació per saber la posició d'aquest punt és ubicant-lo al centre d'àrea de l'obra viva projectada sobre el pla lateral, obtenint així el CD geomètric. Però quan un vaixell avança, les formes de la carena i els apèndix actuen com una ala de formes complexes, i no hi ha cap motiu per assegurar que el CD del vaixell en moviment sigui el mateix que el centre d'àrea del perfil de la part submergida. De fet, sabem que el centre de pressió d'una ala se situa aproximadament al 25% de la seva corda, i no al 50%. En el cas de l'obra viva d'un vaixell resulta més complex fer-ne una aproximació, ja que les formes de cada vaixell són força diferents i irregulars.

Varies persones han dissenyat mètodes aproximats per determinar la posició d'aquest punt, però la localització exacta no deixa de ser una incògnita si no es passen a utilitzar eines informàtiques que ho calculin a partir d'un anàlisi hidrodinàmic. Entre diferents mètodes, s'ha seguit una simplificació del mètode del Professor Nomoto [11], on es considera que l'efecte de resistència lateral del timó es pot compensar amb l'efecte de la superfície del buc submergida a proa del CD. Per aquest motiu considera nul d'efecte de la resistència lateral del timó i del buc i ho aproxima a partir d'un anàlisi simple de l'orsa.

Per fer aquesta aproximació es pren una vista de perfil del vaixell. En primer lloc traça una prolongació de la vora d'atac i la d'escapament del perfil de l'orsa fins a topar amb la línia de flotació. Sobre la geometria de l'orsa prolongada obtinguda, es traça una línia que connecti els punts ubicats a un 25% de la corda. Segons Nomoto, el CD estarà ubicat aproximadament sobre aquesta línia, a una profunditat d'un 45% del calat. Aquesta aproximació sol donar com a resultat una ubicació lleugerament més a proa que el CD real.

A l'hora d'aplicar aquest mètode al SenSailor, cal tenir en compte una consideració. El mètode simplificat de Nomoto ha estat comprovat a partir de vaixells amb unes dimensions i proporcions habituals en el disseny d'embarcacions d'esbarjo i esportives. Amb aquestes proves s'ha considerat vàlida la suposició que la contribució del timó i del buc es compensen i que, per tant, no afecten a la ubicació longitudinal del CD. Al SenSailor, però, les proporcions no són habituals. La suma de l'àrea lateral dels dos timons i *skegs* resulta ser superior a l'habitual, en proporció a l'eslora del vaixell.

Això implica que, per força, el mètode explicat dona com a resultat una ubicació del CD més a proa que el Real. Per altra banda, se sap que el CD real es troba més a proa que el CD geomètric. A partir d'aquestes conclusions es pot deduir que el CD real es situa a una posició intermèdia entre el CD geomètric i el CD calculat pel mètode simplificat de Nomoto. La posició exacte és molt difícil de determinar, però aquest raonament en restringeix l'error. Amb aquest error, el desequilibri que pugui donar quan el balanç de l'embarcació és compensable mantenint un petit angle de timó. Fetes aquestes consideracions, s'ha estimat la posició del CD al punt mig de la línia que uneix el CD geomètric i el calculat a partir de mètode explicat.

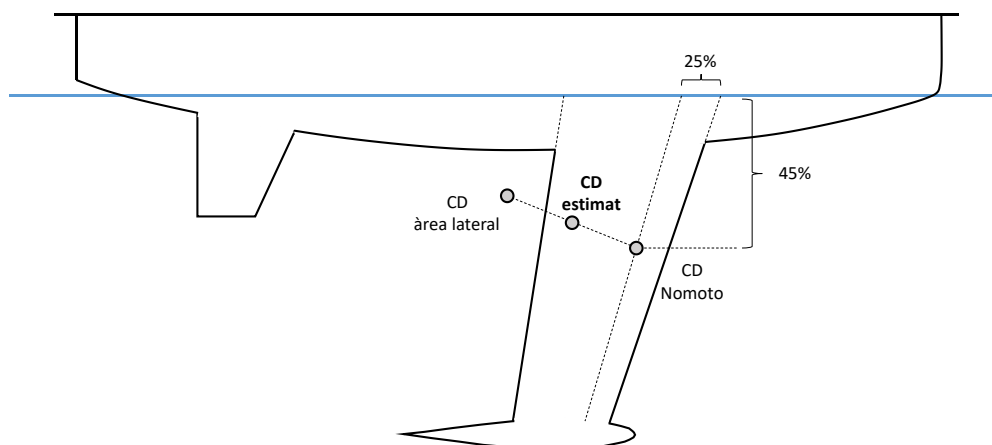


Figura 65. Estimació del CD a partir del centre d'àrea lateral projectada i el mètode de Nomoto. Font: pròpia.

L'altre punt a tenir en compte per garantir un bon balanç és el CV. A una vela convencional, aquest punt s'ubica aproximadament al centre d'àrea de la superfície vèlica, i la força generada a aquest punt es transmet a l'embarcació a través del pal i l'escota. El cas del SenSailor, però és diferent. La vela d'aquesta embarcació gira lliurement al voltant del pal, i al punt d'unió entre aquests dos elements no s'exerceix cap moment. Tampoc hi ha una escota que uneixi l'extrem lliure de la vela amb el vaixell. La força que compensa el moment exercit des del centre de pressions de la vela al voltant del pal és la que exerceix el vent sobre a l'aleró. Per això, estigui on estigui ubicat el centre de pressions de la vela, la força només es transmetrà a l'embarcació a través del pal i, per conseqüència, la component transversal de la vela es transmetrà en aquest punt. A l'estudi del balanç de les forces transversals, doncs, no s'analitza la posició del centre de pressions de la vela, sinó el punt on es transmeten les forces de la vela al vaixell, i és en aquest punt on situarem el CV. Per tant, resulta molt senzill localitzar la línia vertical on han de coincidir el CV i el CD per obtenir un bon balanç: l'eix vertical del pal.

A l'hora de posicionar l'orsa s'ha tingut en compte el balanç de tal manera que el CV i el CD quedin alineats a la mateixa vertical respecte el pla lateral. Observant la posició estimada del CD, s'ha procurat alinear el pal de la vela sobre aquest punt. La posició d'aquesta línia vertical es situa pràcticament al costat de popa del calaix de l'orsa, desplaçat lleugerament cap a proa. Per simplificar la construcció, s'ha decidit ubicar l'enfognament al costat de popa del calaix, soldat a ell mitjançant un cicle de laminat de 3 capes de teixit biaxial de fibra de vidre. Aquesta simplificació ha fet que el CV quedi lleugerament més desplaçat a popa que el CD i, per tant, no s'obtingui el balanç ideal. Per altra banda, s'ha aconseguit construir un enfognament que arribi fins el fons del buc i que garanteixi una bona subjecció del pal. A més, l'enfognament, que està subjecte al fons del buc i a coberta, suposa un element de reforç addicional al calaix, on també hi està unit. Les limitacions constructives, doncs, han fet que s'obtingui un vaixell amb una certa tendència a orsar, però prou petita perquè es pugui compensar amb un lleuger angle de timó.

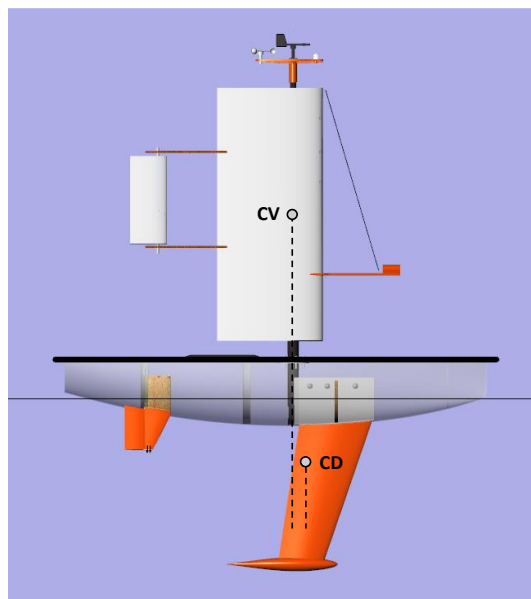


Figura 66. Vista lateral del vaixell amb la posició estimada del CV i CD. També visibles els elements estructurals del buc. Font: pròpia.

Capítol 6. Disseny del sistema elèctric

Si l'energia eòlica és la que s'utilitza únicament per propulsar el SenSailor en aquest primer prototip, l'energia elèctrica és la que controla el moviment dels elements del vaixell. Per dins el cos de l'embarcació, el pal i la vela es distribueix una xarxa de cables que enllacen el controlador principal amb tots els components electrònics necessaris per la navegació. Una sèrie de sensors ubicats a diferents punts capten informació externa per permetre al controlador analitzar la situació en cada moment i enviar l'ordre necessària als servos per portar el vaixell a l'estat desitjat.

D'altra banda, el vaixell també disposa d'una sèrie de sensors destinats a captar informació d'interès per al projecte d'investigació pel qual s'ha destinat la missió del dron. Aquests sensors funcionen amb un controlador independent al sistema de navegació, i són substituïbles pels equips que es necessitin depenent del propòsit de cada missió.

Aquest primer prototip del SenSailor no s'ha dut a terme amb la finalitat de captar mesures de gran precisió, sinó de posar a prova la funcionalitat del sistema. Per tant, s'ha decidit implementar equips i sensors de baix cost però que donin resultats prou fiables per governar el vaixell de manera autònoma. La circuiteria i els components electrònics de la placa base s'han soldat de manera manual per tal de provar el seu funcionament i facilitar-ne les correccions. Una placa de circuit imprès facilita el muntatge de la part electrònica, però no permet fer canvis.

El capítol 6 explica la composició i el funcionament del sistema elèctric del vaixell a nivell de hardware. No és fins el capítol 7 que s'entren en detalls de programació i tractament de senyal. Aquest capítol s'estructura de la següent manera. A la secció 6.1 es presenta el sistema d'alimentació i l'adaptació de la tensió de la font als diferents subsistemes. A l'apartat 6.2 s'expliquen els components que intervenen en la navegació en mode automàtic, i es classifica en 3 subapartats: els sensors de navegació, el controlador i els servos. Al 6.3, s'expliquen els components que intervenen en la navegació en mode manual i, posteriorment, al 6.4, el sistema de commutació entre els 2 modes de navegació. A la secció 6.5 s'explica el sistema de presa de dades, centrant-se amb els sensors que s'han posat de prova. I finalment, l'apartat 6.6 es centra en el cablejat i connectors emprats dins l'embarcació.

6.1. Sistema d'alimentació

Un aspecte molt important d'una embarcació destinada a navegar de manera autònoma al mar és la capacitat d'obtenir l'energia necessària per funcionar, de manera autosuficient. Existeixen actualment diferents mètodes per resoldre aquesta necessitat, aplicats a la nàutica esportiva i d'esbarjo, com per exemple els generadors eòlics, els generadors hidràulics i els panells solars. Són equips senzills, amb un cost moderat i que permeten obtenir l'energia elèctrica necessària per a l'embarcació. Aquesta energia normalment s'emmagatzema en bateries per a un consum posterior. L'inconvenient d'aquests sistemes és que el seu funcionament depèn de les condicions meteorològiques i no sempre són operatius quan es necessiten.

És evident que el SenSailor requereix d'algun sistema d'obtenció energètica autosuficient, però degut a les característiques de l'embarcació existeixen algunes limitacions que redueixen el ventall de possibilitats. Degut a les dimensions de l'embarcació, resulta complicat trobar un generador eòlic prou gran per proporcionar la potència necessària, i a la vegada prou petit perquè el seu fregament amb l'aire no alteri el rumb de navegació. A més, el fet d'estar ubicat a tant poca distància de la vela implica treballar amb un vent brut i poc laminar que afecta el rendiment del generador. Un generador hidràulic seria una variant d'aquest sistema. També consta d'una hèlix, però en aquest cas submergit a l'aigua. Com que el fluid és més dens, el sistema és més eficient, però per una embarcació de dimensions reduïdes suposa una resistència a l'avanç massa gran.

Alguns sistemes sofisticats s'han fet servir en embarcacions autònomes com generadors elèctrics a partir del moviment de les onades. Aquest seria possiblement un dels sistemes més òptims per aquest tipus de vaixell, ja que no altera el rumb ni la velocitat. A més, al ser un vaixell de poca eslora, les onades petites ja són suficients per fer moure l'embarcació i es podria generar energia gairebé de manera constant les 24 hores del dia. Tot i això, el disseny i instal·lació d'aquest equip resulta una feina costosa i complexa, i s'ha preferit buscar una alternativa més senzilla per fer proves amb el primer prototip. La idea d'instal·lar aquest tipus de generador es deixa recollida al llistat de possibles avenços (al final d'aquesta memòria) com a proposta per seguir millorant l'embarcació.

Els panells fotovoltaics són una solució força usada en el mar, tant en vaixells com en plataformes marines o boies de recerca. El seu gran desavantatge és que actualment l'eficiència d'aquests equips, ja que les tecnologies comercialitzades en l'actualitat difícilment superen el 20% amb condicions òptimes de radiació i temperatura. A més, és un sistema que només funciona durant el dia, i la seva potència generada es veu reduïda si hi ha núvols o ombres generades per elements del propi vaixell. Malgrat això, la radiació solar mitjana a la zona on es preveu fer les primeres proves i travesses és bona, i resulta suficient per compensar el consum elèctric del vaixell. A més, és un equip que no afecta a la navegació i la seva instal·lació és molt senzilla. Considerant aquests avantatges i inconvenients, s'ha fer un estudi orientatiu per estimar el consum elèctric a bord i dimensionar el panell.

Així doncs, s’ha definit que el mètode d’obtenció d’energia serà un panell solar. Aquest, alimentarà els sistemes electrònics i elèctrics de l’embarcació, i a la vegada carregarà una bateria que permetrà el sistema seguir funcionant sense necessitat de llum solar.

6.1.1. Càlcul de la instal·lació fotovoltaica

Per fer l’elecció del panell solar i la bateria, són necessaris una sèrie de càlculs de dimensionament basats en el consum elèctric dels sistemes i l’energia solar mitjana irradiada a la zona de navegació pel qual està dissenyat el vaixell. Aquests càlculs es mostren a continuació ordenats en funció del procés que s’ha seguit per obtenir el resultat final.

1) Càlcul de consums estimats

En primer lloc, s’ha fet un llistat dels components consumidors d’energia de bord associant a cada un d’ells un consum mitjà (potència consumida), marcat pel fabricant o estimat. A la Taula 37 es mostra un resum dels resultats de procediment que s’explica a continuació.

Seguidament, s’ha fet una predicció orientativa del temps total d’operació de cada component al llarg de 24 hores i s’ha calculat el Consum Diari Estimat (*CDE*). Alguns components estan en operació de manera constant i, per tant, consumeixen les 24 hores del dia. Altres, com per exemple alguns sensors de mesura, tenen un període de temps d’operació determinat. S’encenen i s’apaguen quan es necessiten. Per tant, el temps d’operació al llarg d’un dia és la suma del temps en operació acumulat al llarg de les 24 hores. El *CDE* s’ha calculat multiplicant la potència consumida de cada component i multiplicant-la pel seu temps d’operació en un dia. Un cop sumat el *CDE* total, s’ha aplicat un 90% de rendiment de la instal·lació per calcular el Total d’Energia Necessària (*TEN*), l’energia necessària per a abastir la demanda.

Component	Unitats	Tensió [V]	Corrent [A]	Potència [W]	Hores/dia [h]			CDE [Wh/dia]
					temps operació	Interval d'activació	total	
Arduino Mega	1	5,15	0,053	0,2706		Act. constant	24	6,4939
Sensor UV	1	5,00	0,007	0,0350	0,083	1	2	0,0700
Termòmetre	3	5,00	0,0015	0,0225	0,083	1	2	0,0450
Penell	1	12,00	0,060	0,7200		Act. constant	24	17,2800
Anamòmetre	1		0,00025	0,0000		Act. constant	24	0,0000
GPS	1	3,60	0,067	0,2412		Act. constant	24	5,7888
Lora RX	1	5,00	0,012	0,0600	0,083	4	0	0,0300
Lora TX	1	5,00	0,12	0,6000	0,083	1	2	1,2000
Llum	1	12,00	0,008	0,0960	0,000	0,0008333	0	0,0288
Servo aleró	1	6,00	0,03	0,1800			24	4,3200
Servo timons	2	6,00	0,45	5,4000			24	129,6000
Càmera	1	1,80	0,018	0,0324	0,008	1	0	0,0065
Magnetòmetre	1	2,50	0,00028	0,0007		Act. constant	24	0,0168
Acceleròmetre	1	2,50	0,00045	0,0011	0,083	1	2	0,0022
Giroscopi	1	2,50	0,0032	0,0080	0,083	1	2	0,0160
Suma CDE:								164,8980
Suma TEN:								183,2200

Taula 37. Càlcul de consums estimats. Font: pròpia.

La càmera i el mòdul de Lora (transmissor per enviar informació a terra per ràdio) no s'han incorporat a l'embarcació, ja que les proves que s'han fet s'han centrat a comprovar el control de navegació i la dinàmica del vaixell. Tot i això, com que més endavant podran ser incorporades com a millores de l'embarcació, s'han tingut en compte al càlcul de consums.

2) Radiació solar disponible

Per determinar les dimensions del panell és necessari saber la radiació solar disponible a la zona on es vol navegar. Aquesta informació s'ha consultat a la pàgina web del Sistema d'Informació Geogràfica Fotovoltaica de la Comissió Europea [29]. A partir de la ubicació desitjada, el sistema proporciona uns valors mitjans calculats a partir d'una base de dades. El primer prototip del SenSailor està previst que navegui per aigües mediterrànies pròximes a la costa catalana, amb la qual cosa, s'ha consultat la informació de la coordenada 41°18'9"N, 2°15'53"E, corresponent a la ubicació de Barcelona. S'ha obtingut una taula de resultats mitjans classificats segons el mes de l'any i s'ha procedit amb els càlculs de dimensionament a partir de

la informació del mes amb menys radiació solar de l'any, el desembre, per assegurar el correcte funcionament en les condicions més desfavorables. El valor H_d indica la quantitat d'energia diària rebuda per metre quadrat, expressat en kWh/m².

Les Hores Sol Pic HSP representa el nombre equivalent d'hores al dia en què es rep una potència radiant del Sol de 1000 kW/m². El seu càlcul es determina a l'equació (39).

$$HSP = \frac{H_d}{1kW/m^2} \quad (39)$$

Com es veu a la taula, el valor mitjà de H_d al mes de desembre és 1810 Wh/m², per tant, el valor de HSP correspon a 1,81 h/dia. Amb altres paraules, a la latitud indicada corresponent a la ciutat

Location: 41°18'9" North, 2°15'53" East, Elevation: 0 m a.s.l.,

Solar radiation database used: PVGIS-CMSAF

Nominal power of the PV system: 1.0 kW (crystalline silicon)
 Estimated losses due to temperature and low irradiance: 8.5% (using local ambient temperature)
 Estimated loss due to angular reflectance effects: 3.8%
 Other losses (cables, inverter etc.): 15.0%
 Combined PV system losses: 25.2%

Fixed system: inclination=0°, orientation=0°				
Month	E_d	E_m	H_d	H_m
Jan	1.56	48.3	2.08	64.4
Feb	2.34	65.4	3.02	84.6
Mar	3.54	110	4.58	142
Apr	4.14	124	5.41	162
May	4.99	155	6.62	205
Jun	5.44	163	7.38	221
Jul	5.35	166	7.34	228
Aug	4.59	142	6.30	195
Sep	3.55	107	4.82	145
Oct	2.57	79.6	3.45	107
Nov	1.67	50.2	2.25	67.5
Dec	1.33	41.1	1.81	56.1
Yearly average	3.43	104	4.60	140
Total for year		1250		1680

E_d : Average daily electricity production from the given system (kWh)
 E_m : Average monthly electricity production from the given system (kWh)
 H_d : Average daily sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m²)
 H_m : Average sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m²)

Taula 38. Informació referent a la radiació solar a Barcelona al llarg de l'any. Font: [29].

de Barcelona es reben, en valor mitjà, l'equivalent a 1,81 hores de sol al dia a màxima irradiància (1 kW/m²) durant el mes de desembre, a una superfície amb una inclinació de 0°.

3) Dimensionament de panell solar

En funció de les *HPS* i del *TEN*, es determina la superfície de panells necessària per tal de poder subministrar l'energia que requereix el sistema. Es pot calcular la potència necessària del panell solar (P_{ps}) mitjançant el següent càlcul:

$$P_{ps} = \frac{TEN}{HSP \cdot \eta} \quad (40)$$

on η és el rendiment de treball considerant un valor de 0,5, tenint en compte l'acumulació de brutícia a la superfície del panell i les ombres produïdes per la vela.

La potència calculada del panell és 202,45 W. Amb aquesta dada ja es pot consultar la oferta de panells fotovoltaics disponibles al mercat i escollir el més adient. Tot i això, l'espai a coberta és una de les limitacions que cal considerar a l'hora de fer-ne l'elecció. Per aquest motiu, s'ha vist convenient calcular la superfície mínima de panell necessària per obtenir la potència calculada i buscar-ne un que compleixi aquestes característiques, sense sobrepassar les dimensions límit. Per fer aquest càlcul, s'ha considerat un rendiment de panell del 15%, un valor habitual en aquest tipus de productes. Aquest rendiment implica que 1 m² de panell proporciona 150 W de potència quan rep 1000 W de potència solar. A partir d'aquí, s'ha calculat de manera proporcional la superfície necessària per obtenir la potència calculada.

	Mes més crític	Mes més favorable
Mes	Desembre	Juny
Irradiació 24h (Hd):	1810 Wh/m ² /dia	7380 Wh/m ² /dia
HSP:	1,81 h/dia	7,38 h
Factor reductor ombres veles	0,5	0,5
Potència necessaria:	202,45 W	49,65 W
Superfície panell:	1,35 m ²	0,33 m ²

Taula 39: Càlcul de potència i superfície de panells fotovoltaics necessaris per subministrar l'energia necessària. Font: pròpia.

4) Dimensionament de bateria

La capacitat de la bateria s'ha calculat mitjançant la fórmula

$$C_{bat} = \frac{TEN \cdot D_{aut}}{V \cdot P_d}; \quad (41)$$

on D_{aut} són els dies d'autonomia i P_d la profunditat de descàrrega. Els dies d'autonomia representa el temps que la bateria pot seguir alimentant el sistema sense rebre càrrega del panell solar. S'ha definit en aquest cas una autonomia de 1 dia (24 hores), tenint en compte que els càlculs s'han fet per les pitjors condicions (mes de desembre). La profunditat de descàrrega és el marge de seguretat que garanteix el correcte funcionament de la bateria, consistent en seleccionar una capacitat lleugerament major que la requerida. Així s'evita una descàrrega profunda en condicions límit. En aquest cas s'aplica un factor de 0,8 que és estàndard. Cal tenir en compte que els fabricants també inclouen aquests marges de seguretat en els seus catàlegs d'especificacions i que per tant aquest factor de 0,8 no és determinant.

El càlcul ha donat com a resultat que per proporcionar energia al sistema durant 24 hores seguides sense recàrrega, la bateria ha de tenir una capacitat de 19 Ah. Tot i això, la capacitat de la bateria cedida finalment pel patrocinador del projecte, *Ventus Electrónica Naval*, ha sigut de 25 Ah. Aquesta capacitat superior augmenta l'autonomia del vaixell fins unes 31 hores seguides sense recàrrega, aproximadament.

6.1.2. Circuit d'alimentació

Al sistema elèctric del vaixell hi intervenen equips que treballen a tensions diferents. La bateria proporciona un voltatge de 12 V, per tant, és necessari adaptar la tensió per les diferents demandes del circuit.

Component	Tensió alimentació placa/componen
Sensor UV	5 V
Termòmetre	5 V
Anamòmetre	5 V
GPS	5 V
Lora RX	5 V
Lora TX	5 V
Càmera	5 V
Magnetòmetre	5 V
Acceleròmetre	5 V
Giroscopi	5 V
Servo aleró	6 V
Servo timons	6 V
Arduino Mega	7 a 12 V
Penell	12 V
Llum	12 V

Taula 40. Tensions d'alimentació dels components electrònics. Font: pròpia.

Com es veu a la taula, els components del sistema elèctric es divideixen en 3 tensions diferents. Els que treballen a 12 V es poden alimentar directament de la bateria, mentre que els que ho fan a 5 V i 6 V necessiten reguladors que baixin la tensió. L'Arduino UNO (que es farà servir per implementar el control de l'embarcació) disposa d'un regulador de 5 V incorporat, amb la qual cosa s'ha aprofitat per alimentar alguns dels dispositius que treballen a aquesta tensió. Tot i això, s'ha optat per instal·lar un altre regulador de 5V per alimentar dispositius de més potència i així evitar una sobrecàrrega. A més, s'ha instal·lat un regulador de 6V per alimentar els components que treballen a aquesta tensió. A continuació es mostra un esquema bàsic que mostra la distribució de la tensió.

A l'Annex IV. *Plànols i esquemes* es pot consultar l'esquema general del sistema elèctric.

6.2. Sistema de navegació automàtica

El mode principal de funcionament del SenSailor és la navegació mitjançant el sistema automàtic. Amb aquest sistema, el vaixell ha de ser capaç de comportar-se de manera independent, reaccionant davant els fets de la situació que l'envolta en cada moment. Per poder-ho fer, l'automatisme consta d'un procés que es divideix en 3 fases. Aquestes es van iterant per tal d'actualitzar la informació a cada moment i actuar d'acord amb el què passa a cada instant:

1. Captació d'informació de l'exterior
2. Processat de la informació i presa de decisions
3. Execució d'ordres

Les 3 fases són imprescindibles per dur a terme el procés de control. Si en falla una, es perd el control. Cada fase es du a terme gràcies a una sèrie de components que es troben presents físicament al vaixell i que es comuniquen entre si per intercanviar informació:

1. Els sensors de navegació per la fase 1.
2. El controlador del pilot automàtic per la fase 2.
3. Els servomotors per la fase 3.

A continuació s'expliquen els components de cada fase i les seves característiques a nivell de hardware. En el capítol 7 s'explica el disseny del control a nivell de software.

6.2.1. Sensors de navegació

El dron està equipat amb una sèrie de sensors. Alguns d'ells serveixen solament per captar dades i aportar informació d'interès per la missió d'investigació pel qual ha estat enviat. Els sensors de navegació, en canvi, són els elements que utilitza el sistema de navegació automàtica per captar

el que passa a l'exterior i analitzar la situació en cada moment. Són els encarregats d'aportar al controlador la informació necessària per prendre les decisions.

Anemòmetre

La seva funció és mesurar la velocitat del vent (Figura 67). Si el vent es manté dins un marge segur per la navegació, el vaixell navegarà de manera normal, orientant la vela de manera que s'assoleixi el màxim impuls endavant. Si supera un límit de risc, el sistema decidirà reduir l'angle d'atac per, a la vegada, reduir l'escora. En cas d'alt risc, s'orientarà la vela paral·lela al vent per oferir la mínima resistència i reduir el risc de ruptura. El número de referència del producte adquirit és el següent: 194724712568.

El seu funcionament és molt simple. L'aparell està basat en dues peces principals: una part fixa (estator) i una part mòbil (rotor), que gira accionat pel vent gràcies a 3 paletes en forma de mitja esfera. A l'interior de l'estator s'allotja un interruptor *reed* (o interruptor magnètic), que consisteix en una peça metàl·lica que sota l'acció d'un camp magnètic es doblega i obre o tanca un contacte elèctric. Al rotor s'hi troba un petit imant permanent. Quan aquest gira, l'imant passa cíclicament per sobre l'interruptor *reed* i el fa obrir i tancar 2 cops a cada volta. El senyal elèctric binària generat per l'interruptor es porta al controlador, que s'encarrega de processar-lo i traduir-lo a un valor de velocitat de vent en funció de la freqüència.



Figura 67. Anemòmetre del SenSailor. Font: pròpia.

Malgrat la simplicitat del sistema, la transmissió del senyal de l'interruptor al controlador no pot ser directe. Mitjançant l'oscil·loscopi s'ha observat que quan es produeix el tancament de l'interruptor es generen rebots que obren i tanquen el circuit varies vegades abans que quedi tancat permanentment fins que torni a passar l'imant. Els rebots també són captats pel controlador com un senyal binari, i això fa que el càlcul de voltes per segon sigui erroni. Per resoldre aquest inconvenient s'ha connectat un petit circuit de filtratge basat amb un condensador, un díode i dues resistències amb l'objectiu d'atenuar el senyal al tancament de l'interruptor i filtrar els rebots perquè no siguin percebuts pel controlador (Figura 68).

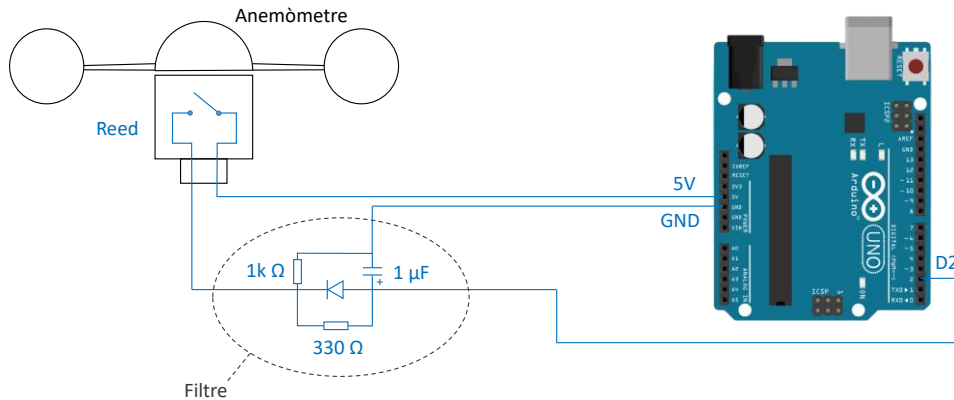


Figura 68. Esquema simplificat de l'anemòmetre i el seu filtre. Font: pròpia.

El filtre, mostrat a la imatge anterior, funciona de la següent manera. Quan l'interruptor de l'anemòmetre es tanca, la major part del corrent passa per la resistència de $330\ \Omega$ i es carrega el condensador. Mentre això passa, la tensió a la sortida del filtre augmenta progressivament de $0\ \text{V}$ a $5\ \text{V}$. Aquesta pujada suau esmorteix el soroll produït pels rebots de l'interruptor i el controlador rep una única pujada que interpreta com un canvi de 0 a 1 . Quan l'interruptor s'obre, el condensador es descarrega a través del díode i la resistència de $1\text{k}\Omega$, i el controlador rep una caiguda de $5\ \text{V}$ a $0\ \text{V}$ que interpreta com un canvi de 1 a 0 .

Donat que l'anemòmetre no és un sensor en si mateix, sinó un mecanisme per generar impulsos tallant el corrent, no hi ha especificada una tensió a la qual s'hagi de connectar. Com que els pins de senyal digital de l'Arduino treballen a una tensió d'entre 0 i $5\ \text{V}$, s'han realitzat les connexions de manera que el circuit de l'anemòmetre i el filtre treballin amb aquest rang de tensions. Per tant, com s'aprecia a la Figura 68, els 3 terminals del circuit s'han connectat al pin d'alimentació de $5\ \text{V}$, al pin GND (terra) i al pin digital D2.

Penell

El penell és un sensor de direcció de vent (Figura 69). La seva informació permet conèixer directament l'angle del vent respecte el vaixell. Mitjançant un càlcul amb la informació del magnetòmetre s'aconsegueix determinar la direcció de vent respecte l'eix de referència terrestre. A partir d'aquesta informació, el controlador pot saber quina és la situació de vent en cada instant i determinar quina ruta cal prendre per arribar fins el següent punt de ruta marcat per coordenades.

El producte adquirit amb el qual s'han realitzat les proves ha sigut el penell disponible al següent enllaç: <https://nl.aliexpress.com/item/1172854902.html> (no s'ha trobat número de referència del producte). Degut a l'accident del temporal Glòria, aquest penell s'ha espatllat i se n'ha adquirit un altre amb el següent número ASIN (Amazin Standard Identification Number): B07S6N8N6M. A causa del confinament de la pandèmia del COVID-19, no s'han pogut realitzar proves amb aquest penell, però segons les especificacions el funcionament és el mateix o molt similar que l'anterior.

El penell disposa de 3 terminals: terra, alimentació (12 V) i senyal (5 V). El 4t terminal del connector no és funcional. Igual que l'anemòmetre, està format per dues parts: un cos estàtic, fix a la base i un capsal que gira fins a quedar-se orientat a la direcció del vent. A la part estàtica de l'aparell hi ha un circuit divisor de tensió que varia el senyal de sortida en funció de la direcció del vent. 16 interruptors *reed* estan disposats de manera radial a l'eix del penell, i connectats cada un d'ells a una resistència d'un valor diferent. A la Figura 70 es mostra un circuit similar però en aquest cas amb 8 divisions enlloc de 16. Al capsal giratori hi ha solidàriament unit un imant permanent que, al girar, tanca un dels interruptors *reed* del circuit. En funció de quin interruptor s'hagi tancat, el corrent passa per una resistència o una altra i la tensió a la sortida varia esglaonadament de 0 V a 5 V, amb un total de 16 valors diferents (esglaons) per tota la circumferència de 360°. Per tant, el penell té un error màxim del 6,25%. Malgrat això, aquest error és tolerable perquè com el sistema de control és realimentat, s'acaba corregint de manera automàtica.



Figura 69. Penell. Font: pròpia.

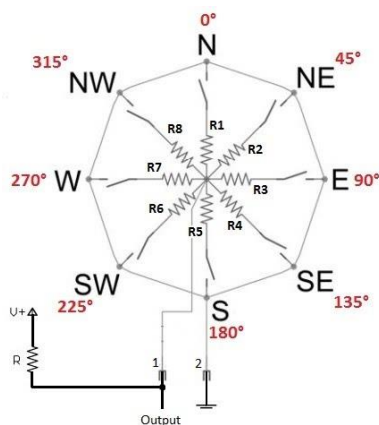


Figura 70. Esquema elèctric del funcionament intern del penell. Font: [36]

Mòdul GPS

Aquest dispositiu permet informar al controlador de la posició geolocalitzada del vaixell en cada instant. És un sensor construït amb un sistema electrònic més complex que l'anemòmetre i el penell, però proporciona una informació obtinguda de la xarxa de satèl·lits GPS, GLONASS i GALILEO, que es pot llegir de manera directa fent us de llibreries en el codi de programació. En aquest cas, s'ha fet servir el mòdul de la marca *RCmall*, amb número de referència FZ2922 que proporciona informació sobre l'hora, la posició en coordenades terrestres, el número de satèl·lits captats i el rumb (calculat a partir de la direcció del moviment). Envia la informació amb un protocol sèrie RS232. Tot i això, pel sistema de control del SenSailor només és necessària la informació sobre la posició. La resta d'informació s'omet, encara que pot ser aprofitada més endavant per millorar el sistema o implementar noves funcions. L'alimentació d'aquest dispositiu és de 5 V.

Veure l'Annex IV. Plànols i esquemes per consultar la connexió d'aquest sensor.

Mòdul d'orientació

Aquest dispositiu permet informar al controlador del rumb actual en cada moment respecte el Nord magnètic de la Terra. Aquesta informació és imprescindible per determinar la direcció cap a la qual han de girar els timons per mantenir la proa alineada amb el rumb determinat pel sistema. En aquest cas s'ha fet servir el mòdul model MPU-9250, que porta integrats 3 sensors: un magnetòmetre de 3 eixos, un giroscopi de 3 eixos i un acceleròmetre de 3 eixos. Tot i això, pel sistema de control del SenSailor només és necessària la informació del magnetòmetre (referència: AK8963), que és una brúixola electrònica. La resta d'informació s'omet, encara que pot ser aprofitada més endavant per millorar el sistema o implementar noves funcions. L'alimentació d'aquest dispositiu és de 5 V.

Veure l'Annex IV. Plànols i esquemes per consultar la connexió d'aquest sensor.

6.2.2. Controlador del pilot automàtic

Per tal d'implementar el control automàtic s'ha seleccionat un microcontrolador ATMEGA328P-PU. Aquest, permet automatitzar la gestió de navegació a partir de l'escriptura d'un programa en llenguatge C. En concret s'ha emprat una placa Arduino UNO (Figura 71), que incorpora aquest microcontrolador més altres circuits auxiliars com són: regulació per l'alimentació, *drivers* USB per poder programar el microcontrolador des d'un PC i altres tipus de característiques. En la placa, una sèrie de pins permeten accedir als diferents ports del microcontrolador a fi de connectar els sensors i actuadors que intervenen les diferents parts de l'embarcació. En aquest primer disseny, la placa Arduino UNO dona molta flexibilitat gràcies al seu disseny pensat en el desenvolupament.



Figura 71. Placa Arduino Uno. Font: pròpia.

6.2.3. Servomotors

Els servomotors representen la sortida del sistema de control. Són els que responen a les ordres del controlador per fer que el vaixell es comporti de la manera desitjada. Aquestes dues sortides s'encarreguen de regular l'angle de la vela i l'angle dels timons. L'angle de la vela es controla de

manera indirecta per l'aleró, que està accionat per un únic servomotor. L'angle dels timons està regulat per dos servomotors independents que responen a un senyal de control simultani. Aquesta separació entre els mecanismes que controlen els timons s'ha fet per millorar la redundància del sistema de govern de l'embarcació. Si un servo s'espantia, l'altre pot seguir accionant una pala de timó per mantenir el vaixell al rumb desitjat. Com s'ha explicat a la secció 5.1, *Disseny dels timons i skegs*, la suma de l'àrea dels dos timons és el doble de la que es necessitaria realment per governar l'embarcació. D'aquesta manera, un sol timó seria suficient per mantenir el rumb en cas d'averia d'un servo.

Dimensionament del servomotor de la vela

A una fase prèvia del projecte es va considerar implementar una vela convencional accionada per un servo enrotllador. Després de fer un estudi comparatiu entre els avantatges i inconvenients del mètode convencional i el mètode de vela amb aleró, es va fer evident que un sistema amb aleró reduiria dràsticament el consum i la mida del servo. Es poden veure més detalls de la comparativa a la secció 4.3.3, *Accionament per aleró*. A continuació es mostra el procediment seguit per dimensionar el servo del concepte de vela escollida.

Càlcul del parell necessari

Anteriorment s'ha calculat que l'angle de d'aleró necessari per orientar la vela a l'angle d'atac de 22° respecte el vent, era de 24° . Recordem que quan es parla d'angle de l'aleró es refereix a l'angle que hi ha entre l'aleró i la direcció de la corda de la vela. L'angle d'atac de l'aleró, en canvi es refereix a l'angle entre l'aleró i la direcció del vent. Ens interessa parlar de l'angle de l'aleró perquè és l'angle sobre el qual treballarà el servo, que està solidàriament fixat a l'estructura de la vela.

Per dimensionar el servo s'ha considerat una situació desfavorable on, amb presència d'un vent de 10 kn, el servo acaba de canviar la posició de 0° a 24° (Figura 72). En aquest precís instant on l'aleró ha adoptat la nova posició però la vela encara no ha girat fins la situació d'equilibri, la vela està alineada amb el vent (degut a la situació de l'estat anterior) i l'aleró es troba amb un angle d'atac de 24° (**estat inicial**). Aquesta situació és poc habitual i dura un instant molt curt de temps, ja que ràpidament s'estableix l'equilibri de moments i l'angle d'atac de l'aleró disminueix fins que el sistema assoleix la **posició d'equilibri**. A continuació s'explica, a mode d'exemple, el procediment de càlcul del parell del servomotor per l'estat inicial amb 10kn de vent.

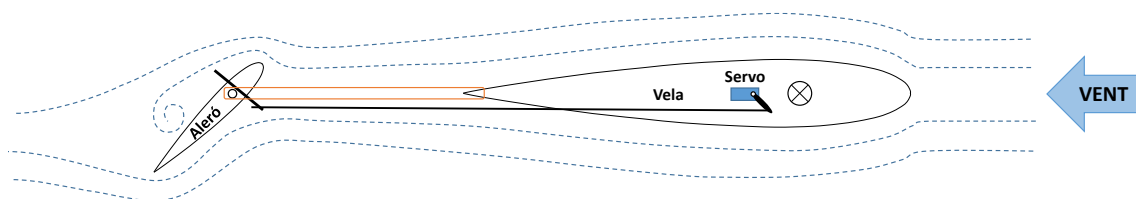


Figura 72. Estat inicial del canvi d'angle d'aleró, de 0° a 24° . Font: pròpia.

Amb el programa JavaFoil s'ha calculat el C_m del perfil de l'aleró en aquesta situació concreta i s'ha obtingut un valor de 0,161. Mitjançant les fórmules (31) (32), s'ha calculat el moment generat a la superfície de l'aleró respecte l'eix de gir, ubicat al centre aerodinàmic. D'aquest càlcul s'ha obtingut un moment de 0,032 N·m, per un vent de 10 kn.

La transmissió del moviment entre el servomotor i l'aleró es du a terme a través d'una tija que treballa a tracció i compressió. Un extrem de la tija està unit a la punta del braç del servo, i l'altre a un allargador que sobresurt pel costat de la vela unit solidàriament a ella de manera perpendicular. La distància del braç allargador de l'aleró és el doble que la distància del braç del servomotor, amb la qual cosa el mecanisme de transmissió suposa una reducció del parell del 50%. Així doncs, el parell que ha de fer el servo per mantenir l'aleró a la seva posició és de 0,016 N·m. Aquesta situació, però, durarà l'instant de temps que trigui la vela a orientar-se amb la posició d'equilibri de moments. Un cop establitzada, l'angle d'atac de l'aleró ja no serà de 24°, sinó de 2° i, per tant, el parell del servomotor decaurà a un valor molt reduït.

Seguint el mateix procediment, s'ha calculat el parell del servomotor per les dues situacions esmentades (estat inicial i posició d'equilibri), per una intensitat de vent de 10 kn i de 20 kn. Els resultats dels càlculs es mostren a la Taula 41. Resultats de l'estudi de moments de l'aleró i servomotor en diverses situacions.

	10 kn		20 kn	
	Estat inicial	Posició equilibri	Estat inicial	Posició equilibri
Moment aleró [N·m]	0,032	0,001	0,128	0,004
Moment servo [N·m]	0,016	0,0005	0,064	0,002

Taula 41. Resultats de l'estudi de moments de l'aleró i servomotor en diverses situacions.

Font: pròpia.

Elecció del model

Per les dimensions del vaixell i la potència requerida dels servomotors, s'ha optat per investigar la oferta de servos destinats a modelisme, ja que solen ser compactes, fàcils de programar i amb un cost relativament baix. Pel cas del servomotor de la vela, se n'ha buscat un resistent a l'aigua, ja que estarà exposat a la humitat de l'aire, la pluja i els esquitxos de l'aigua. Segons els càlculs, el parell mínim necessari que permeti al servo funcionar en la condició més desfavorable estudiada (estat inicial amb vent de 20 kn) és de 0,128 N·m. A l'industria de modelisme, les unitats de parell es solen expressar en kg·cm, per tant, s'ha buscat un servomotor amb un parell mínim de 1,304 kg·cm. Com que no s'ha trobat cap servomotor impermeable amb un parell nominal tant baix, s'ha escollit el model DS-561WP de la marca Corona, resistent a l'aigua i amb un parell de 10 kg·cm a 6V, molt per sobre del requerit, però prou lleuger i compacte per ser instal·lat dins l'estructura de la vela.

Dimensionament dels servomotors dels timons

Com al càlcul de la vela, s'ha fet un càlcul per determinar el parell requerit per mantenir el timó fix a un angle concret, considerant una situació desfavorable.

Càlcul del parell necessari

El càlcul pel dimensionament dels timons ha sigut més aproximat. A l'estar fabricats a mà, no és fàcil estudiar el comportament del seu perfil hidrodinàmic. A més, el flux que reben els timons està afectat pels *skags*, fet que dificulta la precisió dels càlculs. Per aquest motiu, s'ha preferit fer-ne una aproximació considerant una placa plana immers en un fluid i aplicant la fórmula

$$F = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot S \cdot \cos(\alpha) \quad (42)$$

on s'ha considerat una densitat de l'aigua de mar $\rho = 1028 \text{ kg} \cdot \text{m}^3$, una velocitat del fluid $V = 1,543 \frac{\text{m}}{\text{s}}$, una superfície $S = 0,0245 \text{ m}^2$ i un angle de timó $\alpha = 45^\circ$.

S'ha obtingut del càlcul que la força resultant exercida sobre la pala del timó és de 21 N. Considerant que la força s'aplica sobre el centre d'àrea del timó, la distància d'aquest punt amb l'eix de gir és de 0,05 m, amb la qual cosa s'obté un moment de 1,06 N·m o 10,8 kg·cm. En aquest cas, la tija que transmet el moviment del servo a la metxa del timó està unida a la mateixa distància respecte els dos eixos de gir. Per tant, el mecanisme no fa cap reductora i el parell que ha de fer el servo és el mateix que es transmet a la metxa del timó.

Elecció del model

S'han obtingut 2 servos model RCTecnic-S0150 de 15 kg·cm alimentats a 6V, cedits per la botiga de modelisme RCTecnic, patrocinadora del projecte.

6.3. Sistema de Radio Control (RC)

Les raons per les quals s'ha instal·lat un sistema de ràdio control auxiliar a bord són varies. Poder controlar el vaixell de manera manual ha resultat imprescindible per provar la navegació i observar la dinàmica real del vaixell i el seu comportament al mar. També ha servit per fer les proves de navegació necessàries per assegurar que el vaixell és hermètic i compleix l'estabilitat requerida.

El sistema de ràdio control consta de 3 components principals: un comandament emissor (Figura 74), un mòdul receptor amb un controlador integrat (Figura 73) i una bateria per alimentar de

forma independent el mòdul receptor. És un kit pensat per ser instal·lat en vehicles d'aeromodelisme, tot i això ofereix les funcionalitats necessàries per poder ser utilitzat en el projecte. Al veler, el sistema de radio control ha de disposar de 2 canals com a mínim: un pel domini de l'aleró i l'altre pels dos timons.

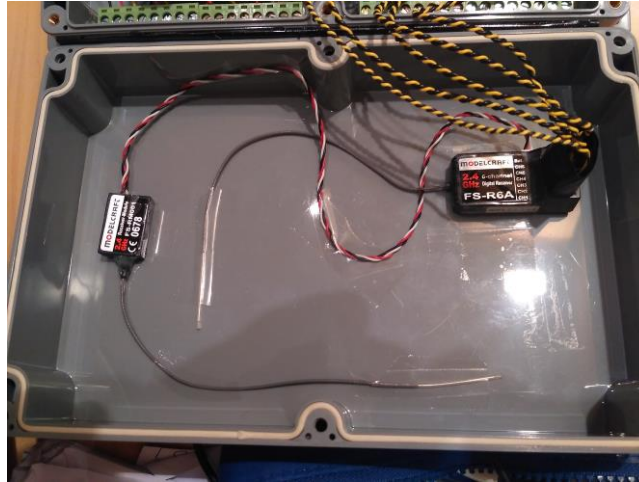


Figura 73. Mòdul receptor. Font: pròpia.

6.3.1. Funcionament

El funcionament d'aquest sistema de radio control està pensat per ser de fàcil utilització i programació per a l'usuari. Aquest sistema disposa de 6 canals, on s'hi pot connectar un servo a cada un. L'alimentació ve donada a través d'un port a 6V, que és a la vegada la tensió a la qual pot alimentar els servos.

El mòdul receptor presenta dues antenes, les quals es recomana que es posin a 90° una respecte l'altre, per evitar pèrdues de senyal. El mòdul funciona a una freqüència de 2.4 GHz, típica en aplicacions similars. Mitjançant aquest senyal, el mòdul receptor i el comandament a distància es poden enviar ordres des de una distància determinada. Aquesta distància varia per molts factors, ja siguin per obstacles físics com interferències de freqüències similars.

6.3.2. Programació de l'emissora

El kit pot ser programat per complir amb diferents tasques. De sèrie, només presenta perfils predeterminats per a avions i helicòpters. Per això, s'ha fet l'ús del programa que incloïa el kit per determinar els canals utilitzats i aconseguir que responguin de la forma desitjada. D'aquesta manera es poden controlar els dos timons amb un sol joystick i el timó de la vela amb un potenciòmetre. Els dos servos dels timons s'han connectat a canals separats, però s'han sincronitzat perquè funcionin sota les ordres del mateix joystick. A més, s'ha utilitzat un 4t canal associat a un 2n potenciòmetre per commutar a distància el mode de navegació automàtic o

manual, en funció de les necessitats de cada prova de navegació. A la Figura 74 es mostren els comandaments utilitzats de l'emissora. A la Figura 75, la pantalla principal de l'aplicació d'ordinador per programar l'emissora.

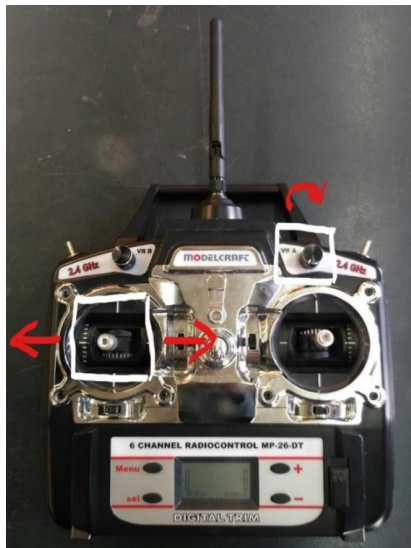


Figura 74. Emissora de ràdio control. Font: pròpia.

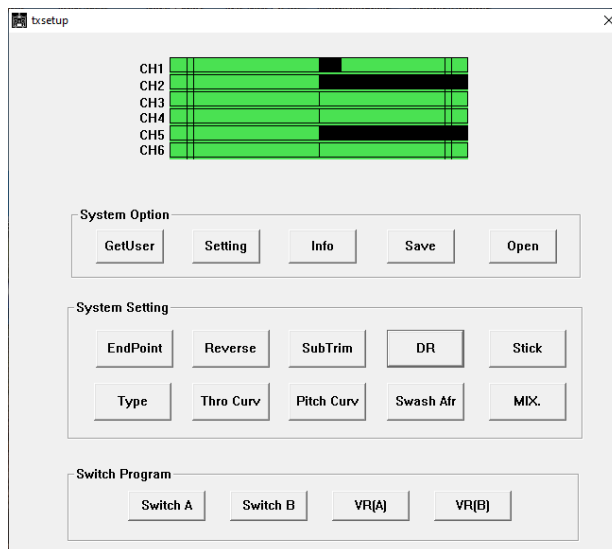


Figura 75. Programa d'ajustament dels paràmetres de control de l'emissora. Font: pròpia.

6.3.3. Sistema de commutació del mode manual/automàtic

Aquest sistema de radio control s'ha d'implementar al circuit del veler per a que el seu funcionament estigui completament integrat dins el paquet. Per això s'ideja un sistema que pugui ser accionat a distància amb el mateix comandament del kit per poder canviar el mode manual a l'automàtic quan es desitgi, tenint així un control fiable sobre el veler en casos on es necessiti el control humà. Per aconseguir això es necessitarà un sistema de commutació accionat a distància.

Com s'ha explicat anteriorment, el sistema de control del veler necessita poder commutar entre el mode automàtic i el mode manual a distància. Aquest punt és crític, ja que si no hi ha cap possibilitat d'un control manual, en el cas de que s'estiguin fent proves i el sistema automàtic falli pot dur a grans problemes, com col·lisions amb objectes o varades no desitjades.

Tot això es tradueix a qui envia el senyal als servos: l'emissora RC o l'Arduino. Per commutar entre els dos modes de control es fan servir tres relés. A la placa electrònica es poden trobar aquests relés integrats en 2 mòduls: un mòdul relé de 1 canal, amb 1 relé destinat al servo de la vela i un mòdul de 2 relés destinats als timons. Els 3 relés amb referència SRD-05VDC-SL-C. Tots ells estaran excitats coordinadament per un mateix pin de l'Arduino. Un dels canals de l'emissora RC està únicament destinat a commutar els relés. La sortida del mòdul receptor té aquest canal connectat a un pin de l'Arduino. Aquest, tradueix el senyal PWM rebut a una tensió binària de 0V o 5V, que és enviat al terminal de control dels relés per fixar el seu estat. D'aquesta manera, mitjançant una palanca del comandament RC es pot commutar a distància entre el mode de

navegació automàtica o el manual. A la Figura 76 es mostra l'esquema del circuit de commutació.

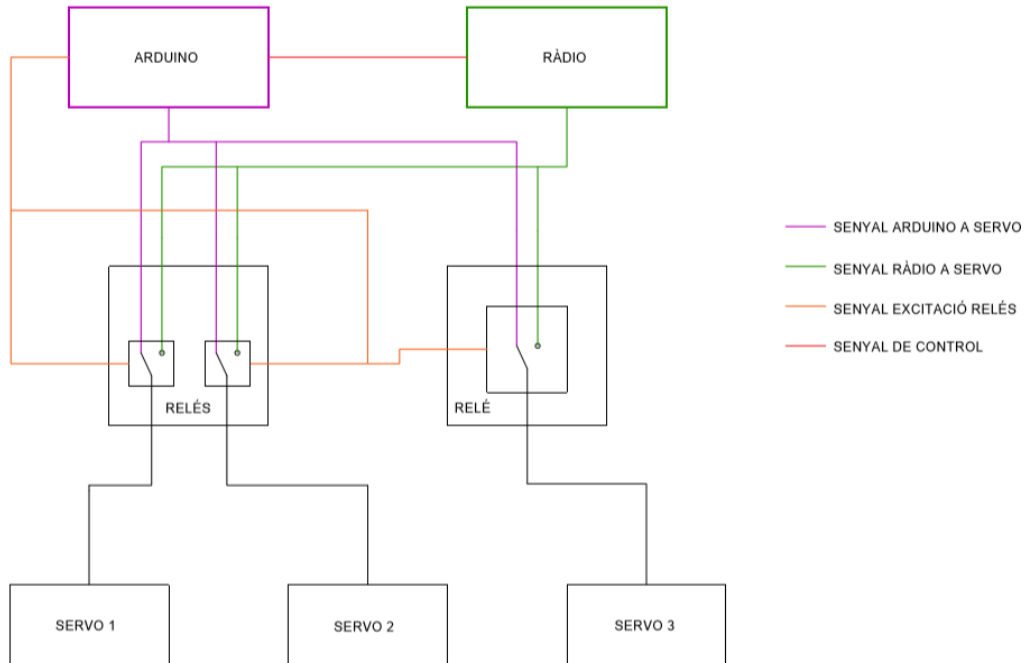


Figura 76. Esquema de connexió dels relés. Font: pròpia.

Com es pot veure, cada servo té dos llocs per on poden venir les ordres: l'Arduino o el mòdul de ràdio. Es pot apreciar a la imatge que el servo motors reben normalment el senyal de l'Arduino. Però, quan amb el comandament s'acciona el potenciòmetre al màxim, l'Arduino, a través de la connexió de control, decideix enviar un senyal d'excitació a les bobines internes dels relés, accionant els interruptors i canviant el camí per on els servos reben les ordres. D'aquesta manera, es pot controlar el veler a distància i alhora, amb el mateix comandament, decidir si s'utilitza el pilot automàtic o el manual. Tot això està programat amb l'ús de l'Arduino IDE, on a l'apartat 7.3.2 *Unió del codi i càlcul del rumb*, se n'explica la programació. L'esquema complet del sistema de ràdio control amb l'alimentació i tot el cablejat es troba a l'annex

Veure l'Annex IV. Plànols i esquemes per consultar l'esquema d'aquest mòdul.

6.4. Sistema de presa de dades

El SenSailor compta amb un subsistema que es dedica a recollir dades interessants per a l'estudi del mar. Aquest sistema està pensat per demostrar que es poden recollir aquestes dades i assegurar la utilitat del dron.

Aquest subsistema és simple i pensat per a una fàcil expansió i modificació, permetent així l'adició de nous components al vaixell de tal manera que es pogués adaptar a una determinada missió. Per això s'ha fet ús del microcontrolador Arduino Nano, per raons econòmiques i de potència de processament. Aquest Arduino és molt més petit que l'original (Arduino Uno) però manté tota la funcionalitat i connectivitat d'aquest.

A l'Arduino Nano s'hi troben connectats 3 sensors: un sensor de raig ultraviolats, un fotoresistor i un sensor de temperatura. Amb aquests sensors es pot recol·lectar informació que pot ésser útil per a la investigació marina, però també per a la mateixa navegació automàtica i distribució d'energia.

La programació de cada un d'aquests sensors es pot consultar a l'apartat 7.4 *Programació del sistema de mesures*. La connexió dels mòduls amb el sistema elèctric es pot consultar a l'annex

Veure l'Annex IV. *Plànols i esquemes* per consultar la connexió d'aquest sistema

6.4.1. Fotoresistor

El fotoresistor o LDR (light dependent resistor) és una resistència, formada per un material semiconductor, que varia depenent de la intensitat de la llum que hi incideix. Si incideix molta llum la resistència serà baixa, a l'ordre de 100 Ω , però si hi ha foscor pot arribar als 10 M Ω . Connectant aquesta resistència variable a un divisor de tensió com s'indica a la Figura 77, es genera un senyal analògic (V_{out}) que el controlador converteix a un valor numèric mitjançant un convertidor analògic-digital de 10 bits (Figura 77) per poder ser processat pel programa.

En el cas del SenSailor s'utilitza el fotoresistor per encendre el llum de posició quan baixa la intensitat de llum ambiental. Aquest llum es tracta d'una bombeta de LED's d'alt rendiment que il·lumina a 360° que, quan es posa en funcionament, emet un senyal lumínic intermitent. La bombeta s'encén quan la resistència del LDR és més alta que un nivell establert, coincidint amb una intensitat de llum calibrada manualment.

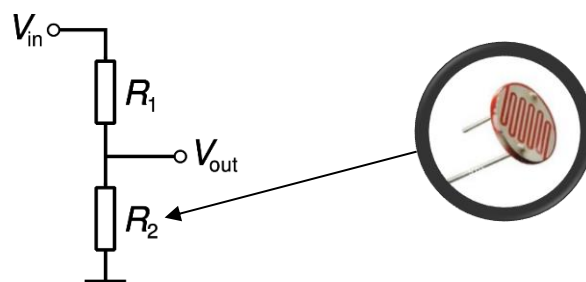


Figura 77. Circuit divisor de tensió utilitzat per detectar la claror ambiental. Font: pròpia.

Com podem veure a l'esquema anterior, el divisor de tensió fa que el voltatge total (V_{in}) es divideixi en una tensió més petita (V_{out}), que depèn de les dues resistències. Per tant, es mira

quina és la resistència del LDR (R_2) en la intensitat de llum que es vulgui, calibrant l'altre (R_1) per a que el voltatge quedi a la meitat, que aquest cas serien 2,5 V.

Aquest divisor de tensió es pot regular mitjançant la llei d'Ohm:

$$V_{out} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{in} \quad (43)$$

Per tant, si el que es vol és que el límit de lluminositat que coincideix amb la del crepuscle estigui a la meitat del voltatge total (5 V) primer s'ha de comprovar quina resistència s'obté amb el fotoresistor. Al tenir-la, ja es pot fer el càlcul de l'altra resistència. S'ha donat un valor a R_1 de 1 k Ω i s'ha calibrat el controlador de manera que el llum s'encengui quan R_2 sigui superior a 22 k Ω .

Aquest voltatge (V_{out}) és rebut per un pin de l'Arduino que compta amb un convertidor analògic-digital d'una resolució de 10 bits. Això el que fa és traduir el voltatge de referència (per defecte 5V a l'Arduino) a un nombre enter comprès entre 0 i 1023. Aquest nombre és útil ja que es pot utilitzar per fer programes i accionar dispositius depenent de la lluminositat que hi hagi present.

Veure l'Annex IV. Plànols i esquemes per consultar la connexió d'aquest sensor

6.4.2. Sensor de raigs ultraviolats

Aquest sensor, com el seu nom indica, detecta la intensitat dels raigs ultraviolats provinents del Sol. El senyal que genera és analògic, és a dir, genera una tensió de 0 V a 5 V que és convertida a un valor numèric mitjançant un convertidor analògic-digital de 10 bits per poder ser processat pel programa del controlador. S'ha utilitzat el mòdul que conté integrat el sensor amb número de referència GUV-A-S12SD. Segons la fitxa de tècnica del sensor, l'índex de UV es pot calcular dividint el voltatge de sortida per 0,1. La connexió que es requereix per funcionar amb una placa Arduino és molt simple, fet que facilita la seva utilització per a aplicacions bàsiques.

Veure l'Annex IV. Plànols i esquemes per consultar la connexió d'aquest sensor.

6.4.3. Sensor de temperatura

La sonda de temperatura està situada a la part frontal de l'skeg d'estribord, submergit a aigua. Aquesta sonda disposa internament del sensor de temperatura amb número de referència DS18B20, el qual en permet mesurar temperatura d'aigua, ja que es troba dins una càpsula cilíndrica, metàl·lica, impermeable. La ubicació d'aquest sensor a l'obra viva es pot variar en

funció de les necessitats de l'estudi. Es pot instal·lar a un lloc proper al buc o a l'extrem inferior de l'orsa, per arribar a més fondària. De totes maneres, les mesures de temperatura d'aigua que es poden prendre amb aquest vaixell són a nivell superficial, ja que el calat màxim de l'embarcació és de 0,817 m. Aquest sensor, juntament amb el de raigs ultraviolats, s'han disposat al veler per demostrar la viabilitat del SenSailor com a plataforma d'estudi del mar, però aquest primer prototip no pretén captar informació d'alta precisió.

El funcionament d'aquest sensor és simple però eficaç i de baix cost. Utilitza el protocol de comunicació I2C, disponible a l'Arduino. Aquest bus de informació faria possible la connexió de desenes d'aquests sensors alhora, tenint així una mostra bastant exacte.

Veure l'Annex IV. *Plànols i esquemes* per consultar la connexió d'aquest sensor.

6.4.4. Desa de dades

Tota la informació recol·lectada per els sensors ha d'anar a algun lloc. En aquest prototip, les dades es guarden en format de text en una tarja micro SD. Aquesta tarja després es podrà extreure del veler de tal manera que es podrà visualitzar la informació en qualsevol ordinador. Aquest sistema es basa en el protocol de comunicació SPI, un dels tres busos disponibles a l'Arduino.

El format en que es guarda és .txt. Aquest format és bàsic però funciona per al registre de les dades. Quan es passa a l'ordinador hi ha la possibilitat de passar-ho a una fulla de càlcul i generar gràfiques dels resultats.

Veure l'Annex IV. *Plànols i esquemes* per consultar la connexió d'aquest sensor.

6.4.5. Sistema d'il·luminació

Per la navegació nocturna o amb poca llum, el SenSailor disposa d'un llum intermitent a tot horitzó que té la finalitat d'alertar a altres vaixells de la seva posició i així evitar col·lisions. La bombeta, ubicada al punt més elevat del vaixell, està composta per diversos LEDs d'alt rendiment disposats radialment. D'aquesta manera, d'il·luminació es dona cap a totes direccions i permet ser captada des de qualsevol punt a la rodona.

Aquest sistema es basa en la utilització del fotoresistor per saber quan s'ha d'encendre el llum de posició. Aquesta bombeta és de 12V, per tant l'Arduino no pot alimentar-la directament. Per això, s'utilitza un transistor TIP120 que, accionat des de l'Arduino, actua a mode d'interruptor. Això es fa enviant un senyal HIGH (que es tradueix a 5V) quan l'Arduino detecta, mitjançant el fotoresistor, que hi ha poca llum ambiental. D'aquesta manera es permet el pas del corrent pel transistor, connectant així el terra de la bombeta i tancant el circuit amb la bateria de 12V. Per reduir el consum per l'ús de la bombeta, es fa que s'encengui de manera intermitent, fent alhora

que sigui més visible per al possible tràfic marítim que estigui al voltant. La programació d'aquest sistema es troba també a l'apartat de programació.

Veure l'Annex IV. Plànols i esquemes per consultar la connexió d'aquest sensor.

6.4.6. Alimentació

Tot aquest subsistema està alimentat pel mateix Arduino Nano, ja que compta amb un regulador ja inclòs dins la placa. Com que la font d'alimentació principal del veler és una bateria de 12V i l'Arduino suporta fins a 20V de tensió, no es necessita cap regulador que adapti la tensió. Cal esmentar que el llum de posició obté el corrent directament de la bateria. Com bé s'ha explicat, s'utilitza un transistor que, a partir d'un senyal proporcionat per l'Arduino a 5V, actua com un interruptor.

Veure l'Annex IV. Plànols i esquemes per consultar la connexió de l'alimentació.

6.5. Cablejat i connectors

Per assegurar que tots els sistemes elèctrics i electrònics funcionin, s'han hagut de pensar i disposar els components d'una manera determinada. Com que el medi en que treballa el SenSailor és molt hostil a dits components, s'ha distribuït i protegit tot circuit per a que sigui resistent a l'aigua del mar i tingui una segona barrera de protecció després de l'estanquitat del buc. Això s'ha aconseguit utilitzant una combinació de connectors, disposicions determinades i capses i tapes estanques. Veure esquema de la distribució del cablejat a l'annex.

Veure l'Annex IV. Plànols i esquemes per consultar la disposició del cablejat.

6.5.1. Cablejat

El cablejat és l'equivalent al sistema nerviós del veler. Mitjançant aquesta xarxa, es distribueix de corrent a tots els components electrònics per proporcionar-los l'alimentació i senyal de control. S'han utilitzat bàsicament dos tipus de cables en aquest conjunt de circuits:

- **Cables semirígids unifilars**

Aquests cables són essencials per a la soldadura dels circuits electrònics. Són utilitzats en les plaques per fer ponts i connexions, ja que són molt mal·leables i per tan permeten la fàcil manipulació del seu recorregut i posició. Tenen, però, l'inconvenient de ser més

difícils de soldar que els cables multifilars, ja que tenen menys superfície de contacte amb el material de soldar (estany) i la unió sol ser més fràgil.

- **Cables flexibles multifilars**

Aquests són utilitzats per qualsevol connexió que es trobi a l'exterior de les plaques electròniques, ja sigui per alimentació com per senyal. Per l'alimentació i senyal dels mòduls electrònics s'han fet servir cables de 0,5 mm de diàmetre. Per l'alimentació de la placa electrònica general (connexió amb la bateria de 12 V del vaixell) s'han utilitzat cables de 1mm.

Els components electrònics que es distribueixen per l'interior del vaixell necessiten entre 2 i 4 conductors per funcionar. Els cables connectats a un mateix component s'han trenat amb l'objectiu d'ordenar la xarxa distribuïda per l'interior del buc i disminuir l'efecte de possibles interferències electromagnètiques.

El circuit electrònic principal del vaixell s'ha integrat dins una capsa ubicada sota la tapa de registre de popa. A l'interior, una placa de baquelita amb el format *through-hole* de 10 X 16 cm reuneix totes les connexions del circuit d'alimentació i senyal: convertidors, relés, filtres, transistors, targetes de memòria, controladors i receptors del sistema de ràdio control . Les connexions entre la placa base i els components electrònics distribuïts pel vaixell es realitzen per mitjà d'uns ports ubicats a la paret de la capsa on s'hi connecten els conductors que distribueixen l'alimentació i senyal a tot el vaixell (Figura 78). Aquestes connexions amb la capsa són desmuntables, d'aquesta manera la capsa pot ser extreta de l'embarcació amb facilitat per fer operacions de manteniment.

A l'interior de la capsa (Figura 79), uns petits conductors fan el vincle entre els terminals de sortida i entrada de la placa i els ports ubicats a la paret de la capsa. Aquestes connexions també són desmuntables per tal de poder retirar la placa de l'interior de la capsa amb facilitat. Donat que aquest és el primer prototip i se sap que serà sotmès a moltes proves i rectificacions de la placa base, s'ha donat molta importància a la facilitat de desmuntatge dels components principals. També per aquest motiu s'ha optat per soldar les connexions de la placa base a mà enlloc d'utilitzar una placa de circuit imprès, preferint en aquest cas la facilitat de correcció que la qualitat final.



Figura 78. Exterior de la capsa d'electrònica. Font: pròpia.

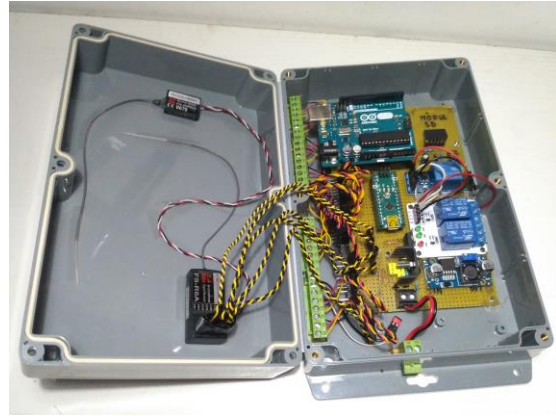


Figura 79. Interior de la capsa d'electrònica. Font: pròpia.

6.5.2. Connectors

En la distribució d'energia i cablejat s'han utilitzat dos tipus de connector. Aquest connectos tenen la funció de fer que les connexions no siguin fixes i es pugui desmuntar, fent al veler més versàtil i útil per fer proves i experiments. Aquests dos tipus són:

- **Connectors aeris de 2 i 3 pins**

Aquests connectors són els utilitzats a l'exterior de la caixa hermètica on estan tots el circuits. La seva manipulació és senzilla, però no són hermètics. Per aquesta raó són connectors temporals, utilitzats per fer les proves i facilitar les correccions del circuit. Aquests connectors venen amb els respectius mascles i femelles, amb els pins corresponents, que s'han de soldar als conductors i inserir dins el connector. Referència: SMP02VBC.



Figura 80. Connectors aeris. Font: [33].

- **Connectors de pas de 8 i 2 pins**

Aquests són utilitzats per a les connexions del cablejat que va a la placa electrònica, dins la capsa. Són connectors més robustos que els anteriors, però mantenen la facilitat de manipulació. Aquests són els que permeten les connexions desmuntables del cablejat

del buc amb la capsa d'electrònica perquè pugui ser extreta del veler amb facilitat per a modificacions o manteniment. A la Figura 81 es mostra un connector de 10 pins, però se n'han utilitzat 4 de 8 pins i 1 de 2 pins. Referència: 1754481.



Figura 81. Connectors de la capsa d'electrònica. Font: [34].

Capítol 7. Disseny del sistema de control

En el capítol anterior s'han presentat les diferents parts que componen el sistema elèctric. Cadascuna d'elles contribueix amb una funció concreta relacionada amb el subministrament energètic, la presa de dades, el càlcul de ruta o l'accionament de parts mecàniques. Totes elles estan coordinades entre si mitjançant senyals de tipus analògic o digital, transmesos entre ells a través d'una sèrie de connexions. En aquest capítol s'explica tot el que fa referència al control dels diferents components de l'embarcació a nivell de *software*, al sistema de regulació del sistema automàtic i a la programació dels controladors.

El capítol s'estructura de la següent manera. A la secció 7.1, es fa una explicació del sistema de regulació i control del pilot automàtic. En primer lloc s'expliquen les maniobres que ha de realitzar el vaixell per navegar correctament a vela i posteriorment s'especifiquen les condicions que ha de seguir el programa per executar aquestes maniobres. Posteriorment, a la secció 7.2 s'expliquen les proves que s'han fet per estudiar el comportament i el senyal dels servos adquirits. A l'apartat 7.3 es mostra la programació del sistema de control explicant punt a punt els diferents apartats del codi. Finalment, a 7.4, s'explica el codi de programació del sistema de presa de dades.

7.1. Sistema de regulació i control

La navegació automàtica del SenSailor es port a terme amb el controlador ATMEGA328P-PU, integrat dins la placa d'Arduino UNO. Aquest controlador es dedica a observar la informació proporcionada dels sensors de navegació i donar una ordre als servos de la vela i dels timons perquè responguin segons una sèrie de criteris establerts. Internament té unes comandes programades que permeten determinar quin moviment dels servos és més indicat per portar el vaixell des del punt on es troba fins el punt final, fixat per coordenades prèviament en el programa, en funció de la situació del vaixell i l'entorn en cada instant.

Així doncs, el sistema capta com a entrades el senyal del mòdul GPS, del magnetòmetre (MAG), del penell (β_P), de l'anemòmetre (V_{vent}) i les coordenades dels waypoints introduïdes en el programa (WP). Com a sortida proporciona un senyal PWM per cada servo. Al gràfic de la Figura 82 es mostra un esquema de les entrades i les sortides. A dins la caixa s'engloba tot el sistema que tracta els senyals, controlat per l'ATMEGA328P-PU.

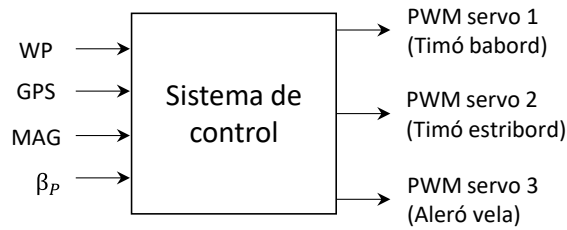


Figura 82. Esquema simplificat d'entrades i sortides del sistema de control. Font: pròpia.

7.1.1. Bases del control de la navegació a vela

A les seccions 4.4 i 4.5 s'ha explicat el sistema de forces que intervenen a l'aparell quan el vent incideix a la vela i l'aleró. Donat un angle d'atac, a la vela es genera una força resultant que té una component propulsora, en direcció longitudinal al vaixell. Depenent del rumb respecte el vent que es porti, l'angle de la vela respecte el vaixell varia. Això també fa canviar la direcció de la força propulsora i, per tant, la magnitud de la component propulsora. Per aquest motiu, encara que la intensitat del vent i l'angle d'atac de la vela es mantinguin, la força propulsora varia en funció del rumb.

Guanyar vent

Antigament els velers podien navegar només amb vents portants però la modernització de les veles ha fet que actualment es pugui arribar al destí navegant amb vent de pràcticament qualsevol direcció. L'única limitació es troba amb els rumbos on l'angle entre la proa i el vent és massa tancat. En aquests casos, la component propulsora es torna molt petita o nul·la, i resulta impossible impulsar l'embarcació endavant. Depenent del vaixell i el tipus de vela, hi ha un angle mínim per sota del qual ja no es pot navegar. Als criteris de càlcul de ruta fixats al controlador del SenSailor, s'ha posat aquest límit a 45° a babord i estribord. Fent proves amb el mode manual, controlat per control remot, s'ha comprovat que el vaixell pot navegar més cenyit al vent, però s'ha decidit posar aquest angle per les primeres proves per tal de donar un marge de seguretat i evitar que es quedi parat.

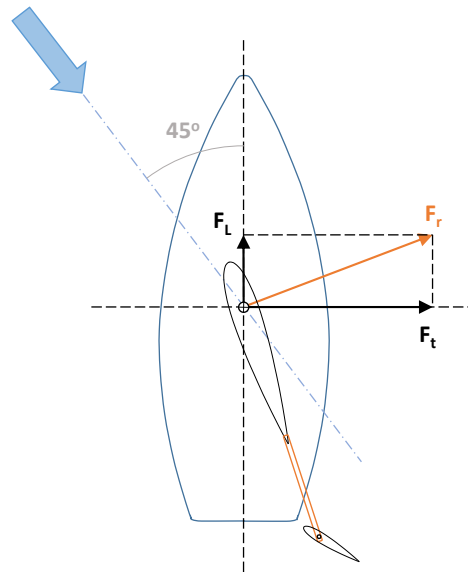


Figura 83. Descomposició de la força resultant de la vela a una navegació de cenyida. Font: pròpia.

Si el punt de destí està ubicat a la direcció d'on ve el vent, el vaixell no hi pot arribar de manera directa. Ha de navegar fent ziga-zagues amb un angle respecte al vent adequat per la navegació. D'això se'n diu *guanyar vent*. Donat aquest cas, cada vegada que el vaixell ha de fer un canvi de rumb per iniciar un nou tram del camí en Z, el vent i les veles passen d'un costat a l'altre i es diu que el vaixell *ha virat*. A una virada per proa, hi ha un instant on el vent queda alineat amb la proa i no es genera força d'avanç. Tot i això, la inèrcia del vaixell permet que aquest segueixi girant i es posi amb el rumb desitjat. Una virada també pot ser per popa. Aquest cas es dona si el vaixell navega amb un vent portant entrant per l'aleta i vol fer un canvi de rumb de manera que el vent passi per la popa i es situï a l'altre costat. Aquest tipus de virada també s'anomena *trabujada*.

Amb vents portants, les veles convencionals accionades amb escota no treballen com a perfil aerodinàmic sinó a mode de paracaigudes. Això vol dir que, com que a aquests rumbos la vela s'orienta a angles pròxims a 90° respecte el vent, no existeix un flux laminar que passi a banda i banda de la vela i generi una força de sustentació a partir de l'efecte Bernoulli, sinó que el vent impacta sobre una cara de la vela i genera una gran turbulència a l'altra banda. És així com en vents portants es pot aprofitar tota la superfície de la vela per crear impuls endavant. En el cas del SenSailor, en canvi, no és així. Recordem que la vela gira lliurement al voltant del pal i l'aleró permet fer-la adoptar un petit angle d'atac perquè generi sustentació (Figura 84). Això implica que, amb qualsevol rumb, la vela es mantindrà amb el mateix angle d'atac respecte el vent, fins i tot si el vaixell navega amb vents portants.

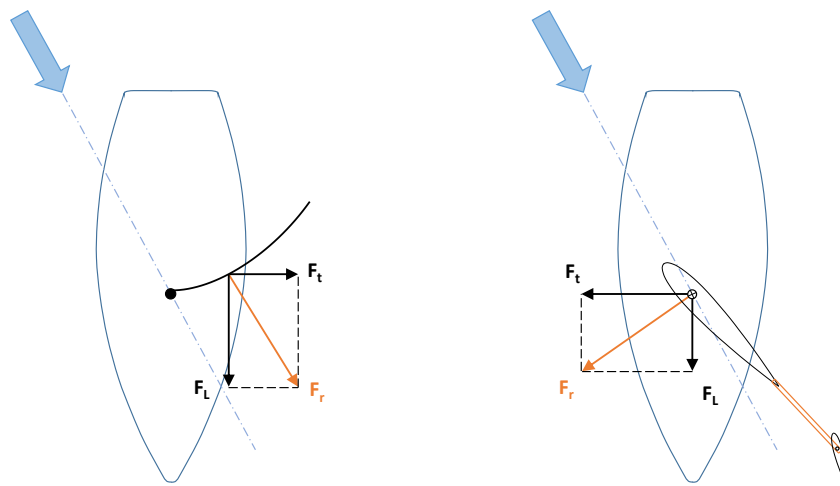


Figura 84. Comparació de la descomposició de forces entre una vela convencional (esquerra) i una vela amb aleró (dreta), amb vent portant. Font: pròpia.

Limitacions del sistema

Malgrat els avantatges que comporta el disseny de vela de gir lliure, el mètode amb el que s'ha construït la del SenSailor té algunes limitacions.

Limitació 1:

Alguns sensors s'han volgut ubicar sobre la vela per tenir-los el més elevats possible i captar mesures més fiables. Per altra banda, interessa que el suport d'aquests sensors estigui fix respecte el vaixell i no giri amb la vela per evitar la fatiga dels cables. A més, perquè el penell proporcioni una informació correcta, és necessari que la seva base estigui unida a un punt de referència fix respecte el vaixell. Aquest suport dels sensors s'ha fixat a l'extrem superior del pal que travessa la vela i que, a la vegada, està unit de manera solerària al vaixell. L'inconvenient d'aquest sistema es troba amb el cable del servomotor que acciona l'aleró.

El servomotor està ubicat a dins el cos de la vela, i els cables d'alimentació, terra i senyal baixen per dins el pal fins a l'interior del buc, on es connecten a la placa electrònica. El punt crític és l'orifici per on s'introdueixen els cables, que van del servomotor cap a dins el pal (Figura 26). Aquest forat està ubicat a la mateixa alçada que el servomotor, a la banda de popa del pal. Quan la vela gira, el servomotor ho fa juntament amb ella, però el pal es queda fix. Si la vela gira grans angles, el tros de cable que hi ha entre el servomotor i el forat, s'enrotlla al pal. Quan s'ha instal·lat el servomotor, ja s'ha deixat un sobrant de cable lliure perquè ho pugui fer sense problemes, però el perill rau en si la vela arriba a fer la volta completa. En aquest cas, el cable quedaria fent una volta al pal i la tensió podria arribar a arrencar els cables del servomotor.

Solució a la limitació 1:

Per evitar que això passi s'han pres dues mesures de seguretat: una a **nivell físic** i l'altre a **nivell de programa**. La primera consisteix en la instal·lació d'un cable d'acer inoxidable fixat a l'extrem de proa del suport dels sensors de dalt del pal i a una anella enroscada al cargol de la junta de

la coberta ubicat més a proa. Aquest cable recorda l'estai d'un veler amb eixàrcia ferma, però la seva funció no és subjectar el pal sinó fer de límit físic per impedir que la vela arribi a donar tota la volta. Està posat de manera que, si el vaixell nevega amb vents portants i la vela s'orienta cap a proa, l'extensió que suporta l'aleró topa amb el cable i impedeix que aquesta segueixi girant i travessi la línia de cruixia per proa.

Aquest límit físic impedeix que es puguin fer virades per popa o trabujades. Sí passés, la vela quedaria travada amb el límit físic i no passaria al costat de sotavent, impedint així un navegació bona i segura. Així doncs, s'ha posat una mesura de seguretat a nivell de programa que evita aquestes situacions i **planifica sempre les virades per proa** (Figura 86). Aquesta mesura fa que les virades quan es navega amb rumbos portants siguin força més lentes, però permet superar el problema del cable del servomotor i navegar amb seguretat.

Limitació 2:

Per altra banda, fent les proves de navegació amb el mode manual s'ha observat que navegant amb rumb de popa rodona (quan el vent entra exactament per la popa) es corre el perill que una ona faci girar lleugerament la proa fins el punt que arribi a trabujar. En aquest instant, la vela queda travada amb el límit físic i el vaixell comença a escorar. Per norma general, quan un vaixell escora, el centre de pressions de la vela queda desplaçat a sotavent i el centre de resistència de l'obra viva, a sobrevent. Si l'escora és massa pronunciada, es crea un parell de forces en el pla transversal del vaixell que obliga a la proa a girar cap el vent. Tornant al cas del SenSailor, si en aquesta situació el vent s'intensifica pot passar que la força que obliga el vaixell a orsar sigui més gran que la generada pels timons per intentar recuperar el rumb inicial, i el vaixell pot quedar clavat a un rumb no desitjat on s'equilibrin aquestes dues forces. Aquesta situació es pot prolongar de manera indefinida, fins que l'escora disminueixi o fins que una onada aleatòria torni a fer girar la proa cap a la posició inicial.

Solució a la limitació 2:

Per evitar que això passi s'ha fixat una altra limitació a nivell de programa que eviti navegar amb rumbos on la popa quedi orientada a menys de 20° respecte el vent. D'aquesta manera, si el moviment del mar fa oscilar lleugerament el rumb es redueix el risc de trabujar de manera involuntària. Així doncs tenim dos intervals d'angles de vent amb els quals el vaixell no podrà navegar, també anomenades *zones mortes*. La zona morta de proa es comprèn entre els 45° a una banda i a l'altra de la proa, i la de popa, entre els 20° a una banda i a l'altra de la popa. A la Figura 86 es mostra un exemple dels rumbos que hauria de prendre el SenSailor per completar un circuit tancat, amb un vent continu d'una direcció determinada, per tal d'evitar la direcció relativa del vent no desitjable.

A la Figura 85 es mostra un esquema de les zones mortes del veler, ombrejades en color gris, on les direccions del vent van de la circumferència exterior cap al centre. Aquestes són les direccions no òptimes per a la navegació. Si el vent entra per la zona morta de proa, el vaixell perd força propulsiva i es queda parat. Si el vent entra per la zona morta de popa hi ha el perill que accidentalment el vaixell trabutgi i la vela quedi enganxada amb cable del límit físic. La zona morta més crítica per la navegació és la de popa, així doncs, cal evitar a nivell de programa que

el vaixell quedi orientat amb aquesta posició. Tot i això, el vaixell podrà encarar-se al vent de manera puntual sense perill per realitzar les virades. Aquestes maniobres caldrà realitzar-les amb celeritat per tal que la pròpia inèrcia del vaixell mantingui certa velocitat durant el gir per proa, ja que momentàniament s'anul·larà la força propulsiva.

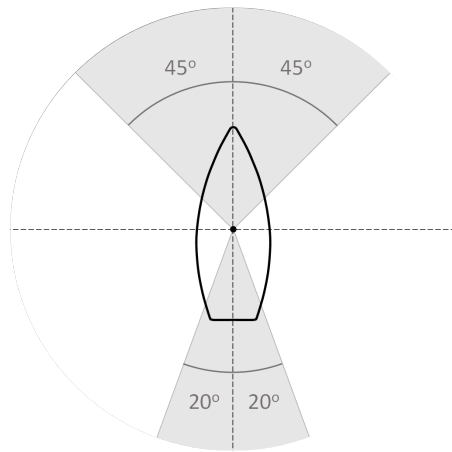


Figura 85. Rang de vent no desitjable per a la navegació, fixat al programa de control (zona gris). Font: pròpia.

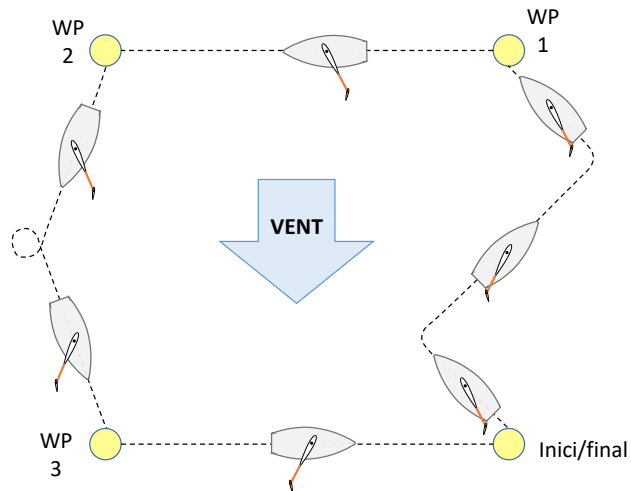


Figura 86. Exemple de navegació evitant les zones mortes. Virades sempre per proa. Font: pròpia.

7.1.2. Explicació del sistema de regulació i control

La funció del mode de navegació automàtica del SenSailor és escollir la ruta òptima a partir de les consideracions fetes anteriorment sobre la navegació a vela i donar una ordre als servomotors dels timons i de la vela per fer reaccionar l'embarcació.

Sistema de control dels timons

A la Figura 87 i Figura 88 es mostra l'esquema del sistema de regulació que controla l'angle dels timons.

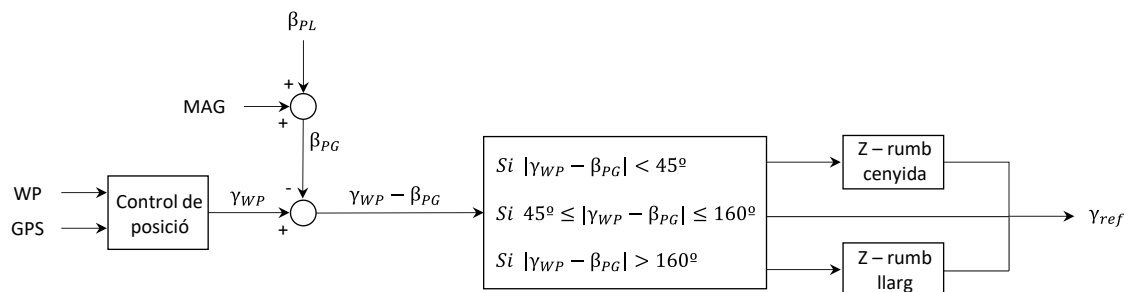


Figura 87. Esquema del sistema de regulació i control. Font: pròpia.

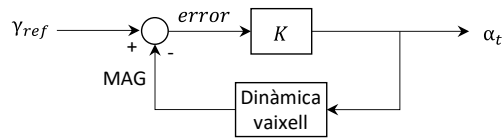


Figura 88. Esquema del llaç de realimentació del control de α_t (angle timons). Font: pròpia.

Abans d'iniciar la navegació, es selecciona la ruta de navegació i s'introdueix al programa un llistat de punts indicats per coordenades per on es vol que passi el vaixell. Aquests punts de ruta s'anomenen *waypoints* (WP). Quan el programa s'executa, pren el primer WP de la llista i el compara amb la posició actual del vaixell proporcionada pel GPS. A partir d'aquestes dues coordenades crea un vector de direcció anomenat *rumb a waypoint* (γ_{WP}). Per saber si pot navegar de manera directa fins el WP o si ha de fer ziga-zagues, ha d'observar la direcció del vent. El penell proporciona un angle del vent respecte la proa del vaixell, l'*angle de penell local* (β_{PL}). Per passar aquest angle al sistema de coordenades terrestres, es suma β_{PL} amb el rumb del vaixell respecte el Nord magnètic, que és l'angle proporcionat pel magnetòmetre (MAG). El resultat d'aquesta operació s'anomena *angle de penell global* (β_{PG}). Un cop té el γ_{WP} i el β_{PG} al mateix sistema de coordenades, analitza l'angle diferència entre els dos i determina quina ruta cal prendre per arribar fins el següent WP.

- Si $|\gamma_{WP} - \beta_{PG}|$ és més petit que 45° , vol dir que la direcció del vent és massa propera a la direcció del WP, i el vaixell no hi pot arribar de manera directa. En aquest cas, el controlador tria un nou camí a seguir per arribar al WP fent ziga-zagues amb rumb de cenyida. Aquest nou rumb que seguirà l'embarcació és el *rumb referència* (γ_{ref}).
- Si $|\gamma_{WP} - \beta_{PG}|$ està entre els 45° i 160° , vol dir que l'embarcació pot navegar directament cap al WP en línia recta. En aquest cas, el γ_{ref} serà igual al γ_{WP} .
- Si $|\gamma_{WP} - \beta_{PG}|$ és més gran que 160° , vol dir que per arribar al WP de manera directa, el vaixell hauria de navegar amb un rumb massa empopat i correria el perill de trabujar. Per respectar el marge de seguretat explicat anteriorment, el vaixell navegarà fent ziga-zagues però amb un γ_{ref} de llarg de 160° respecte el vent. En el moment de fer la virada, enlloc de virar per popa, que seria la manera més lògica, es virarà per proa fent tota la volta.

Un cop decidit el rumb més òptim que ha d'agafar l'embarcació per arribar al WP, el sistema compara el γ_{ref} amb el rumb actual de l'embarcació (MAG) i orienta els timons α_t a un angle proporcional a γ_{ref} (Figura 88). Aquesta constant de proporcionalitat es pot variar per ajustar la velocitat de reacció de l'embarcació, però inicialment s'ha fixat un valor de 1. Com que els timons tenen un límit físic de 45° a babord i estribord, si el γ_{ref} és més gran que 45° , α_t no superarà aquest angle. En el moment que els timons actuen, el vaixell comença a variar la seva orientació. La dinàmica del gir de l'embarcació ve determinada per múltiples factors, com són la velocitat lineal del vaixell, la viscositat de l'aigua, l'estat del mar, les formes de carena i la massa del vaixell entre altres. Aquest rumb canviant és detectat pel magnetòmetre i el seu senyal, MAG, retroalimenta el sistema per tancar el llaç de control. Quan el vaixell arriba a la

coordenada del primer WP, el sistema passarà a calcular el γ_{WP} pel següent punt de la ruta, i així successivament fins que arribi al seu destí.

Encara que no s'hagi calculat la funció de transferència, se sap que el sistema és molt lent i per tant molt estable. Per aquest motiu, la freqüència de mostreig del sistema no ha de ser necessàriament ràpida. Concretament s'ha fixat una freqüència de mostreig de 1 Hz, que és la velocitat amb què el mòdul GPS proporciona informació nova. L'ajust d'aquesta freqüència i de la constant de proporcionalitat es fa de manera heurística observant el comportament del sistema en la mar.

Sistema de control de la vela

El sistema de control de la vela és molt més senzill. Té com a senyals d'entrada el senyal del penell local, β_{PL} , i la velocitat del vent, V_{vent} , i com a sortida l'angle de l'aleró α_a (Figura 89). Si β_{PL} indica un angle de vent comprès dins l'interval $[0, 108)$, vol dir que el vent entra per estribord i, per tant, el servo ha de fer girar l'aleró cap a babord 24° . Aquest és l'angle que s'ha calculat més òptim per fer girar la vela un angle d'atac de 22° . Si β_{PL} indica un angle comprès dins l'interval $[180, 360)$, el vent entra per babord, amb la qual cosa el servo ha de fer girar l'aleró el mateix angle però cap a l'altre costat, a estribord. Es pot dir en aquest cas que el servo de la vela té un comportament binari, cosa que fa molt senzilla la seva programació. Els angles calculats a nivell teòric s'han anat ajustant a mà per obtenir els més òptims a la realitat.

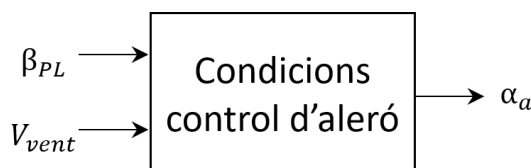


Figura 89. Esquema simplificat de les entrades i sortides del control de l'aleró. Font: pròpia.

Com a mesura de seguretat, s'ha afegit una condició que disminueixi l'angle de l'aleró si la intensitat del vent arriba a un nivell que compromet la navegació. D'aquesta manera, la força generada a la vela disminueix i a la vegada es redueix l'escora. Si el vent supera un límit que resulta crític per a la integritat del vaixell, l'aleró es posa a la via per anular l'angle d'atac de la vela i minimitzar les forces generades a l'aparell. En aquest cas, el vaixell queda a la deriva fins que el vent disminueixi, i es pot controlar la seva posició en temps real gràcies al dispositiu *Boat Track*, cedit per l'empresa *Boat Security*, patrocinadora del projecte.

7.2. Proves de senyal i consum dels servos

A l'hora de dimensionar la bateria i el panell solar ha resultat difícil establir un consum mitjà dels servos al llarg de tot un dia, ja que és molt irregular i depèn de diversos factors com són el temps

de resposta del vaixell, la velocitat de navegació i la freqüència de càlcul del sistema de control. Aquests factors impliquen un parell i una freqüència de rectificació de l'angle que és difícil de predir, amb la qual cosa es decideix, a una primera iteració del càlcul, prendre com a consum mitjà orientatiu un 75% del consum indicat pel fabricant, considerant que el servo no estarà sempre exercint el parell màxim. Aquesta aproximació permet fer-se una idea orientativa de la mida de la bateria per seguir dissenyant altres paràmetres del vaixell.

Posteriorment, un cop adquirits els servos, s'han realitzat 2 estudis per tal d'observar el seu funcionament real i poder predir amb menys error el consum i comportament. Aquests estudis s'han realitzat fora el vaixell i s'han usat equips com ara el generador de tensió, el generador d'ones, i l'oscil·loscopi per observar els resultats.

7.2.1. Estudi del senyal PWM

La finalitat de l'estudi consisteix a conèixer el funcionament del senyal PWM (*Pulse Width Modulation*) de control de cada servo.

Material utilitzat

Per dur a terme aquest estudi s'han fet servir els següents equips i material:

- Corona DS-561WP (servo vela)
- RCTecnic-S0150 (servo timó)
- Generador de tensió
- Generador d'ones
- Oscil·loscopi

Procediment

Aquest estudi s'ha realitzat sense parell de càrrega. S'han alimentat els servos a 6V amb el generador de tensió i posteriorment se'ls ha aplicat un senyal PWM amb el generador d'ones. S'ha connectat l'oscil·loscopi al terminal del senyal per observar gràficament l'ona aplicada.

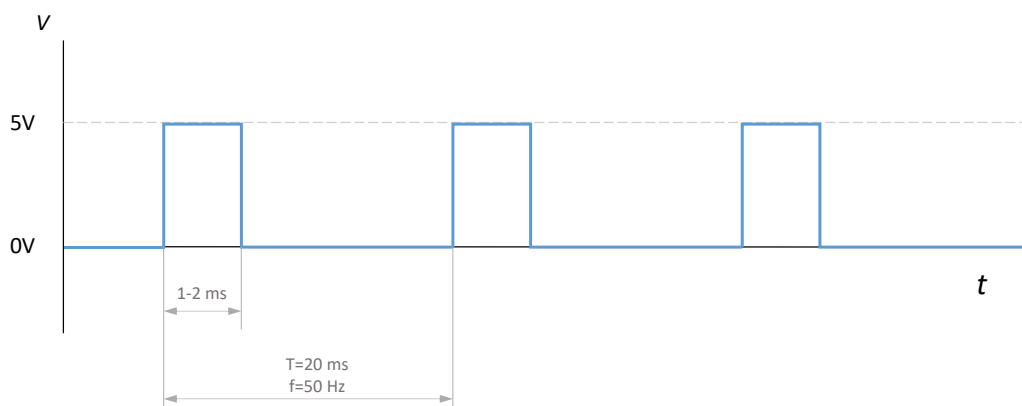


Figura 90. Gràfica del senyal PWM de control dels servos. Font: pròpia.

Coneixent la freqüència del senyal per la qual està dissenyat el servo, 50 Hz, se sap que el període del pols és de 20 ms. A partir d'aquí, s'ha generat un senyal d'ona quadrada amb un límit inferior a 0V i un límit superior a 5V. S'han fet diverses proves variant la duració del pols (variant el cicle de treball, *duty cycle*) a 5V respecte el període de 20 ms i s'ha observat la posició del braç del servo adoptada davant de cada senyal d'entrada. S'ha fet una taula d'associació entre el senyal PWM d'entrada i l'angle del servo i posteriorment s'ha interpolat per conèixer les posicions intermèdies.

Resultats

A la taula Taula 42 es recullen els resultats de l'experiment. Com es pot observar, el senyal d'entrada del servo de la vela i el del timó no son iguals però sí proporcionals. Això s'haurà de tenir en compte més endavant a la programació.

	Angle servo	Temps a HIGH [ms]	Temps a LOW [ms]	% a HIGH	% a LOW
Servo vela	0°	0,7	19,3	3,5	96,5
	45°	1,1	18,9	5,5	94,5
	90°	1,5	18,5	7,5	92,5
	135°	1,9	18,1	9,5	90,5
	180°	2,3	17,7	11,5	88,5
Servo timó	0°	0,5	19,5	2,5	97,5
	45°	1	19	5	95
	90°	1,5	18,5	7,5	92,5
	135°	2	18	10	90
	180°	2,5	17,5	12,5	87,5

Taula 42. Resultats dels experiments. Informació del senyal PWM corresponent a diferents angles del braç del servo. Font: pròpia.

7.2.2. Estudi del consum

La finalitat d'aquest estudi és aproximar d'una manera més acurada el consum dels servos, respecte l'estimació feta a la primera volta de disseny.

Material utilitzat

Per dur a terme aquest estudi s'han fet servir els següents equips i material:

- Corona DS-561WP (servo vela)
- RCTecnic-S0150 (servo timó)
- Generador de tensió
- Generador d'ones
- Masses de 0,5 kg, 1,5 kg i 2 kg

Procediment

Per fer aquest estudi s'ha alimentat cada servo a 5V amb el generador de tensió i s'ha generat un senyal PWM qualsevol per fixar una posició del rotor. Amb el servo girat 90°, és a dir, amb la l'eix de gir en posició horitzontal, s'ha muntat el braç del servo sobre l'eix de tal manera que ha

quedat a 90° respecte la vertical. A partir d'aquí, s'ha penjat una massa de 0,5 kg de l'extrem del braç del servo, a una distància de 2 cm respecte l'eix de gir. Aquesta càrrega genera un parell de 1 kg·cm que el servo ha de suportar subministrant un corrent determinat. A continuació, s'ha canviat la massa per una de 1,5 kg, generant així un parell de 3 kg·cm i posteriorment s'ha canviat per una de 3 kg, generant un parell de 6 kg·cm. Com més parell, més corrent consumeix el motor. Per acabar l'experiment, s'ha repetit el procés alimentant el servo a 6V i s'han anotat els resultats obtinguts en totes les proves.

Resultats

A continuació es mostra la taula d'associació entre la tensió d'alimentació, la càrrega aplicada i el corrent de consum de cada servo. La prova de 1 kg·cm s'ha realitzat només al servo de la vela.

	Prell aplicat [kg·cm]	Consum [A]	
		Alimentació a 5V	Alimentació a 6V
Servo vela	6	0,38	0,33
	3	0,33	0,35
	1	0,03	0,03
Servo timó	6	0,45	0,42
	3	0,13	0,10

Taula 43: Resultats de l'experiment. Consum dels servos a diferents parells aplicats. Font: pròpia.

Veient els resultats, s'ha decidit alimentar els servos a 6V per disminuir el corrent i així les pèrdues. S'han refet els càlculs de consum estimat considerant un nou consum per cada servo, més ajustat a la realitat. S'ha suposat un consum aproximat constant en el temps de 0,03 A pel servo de la vela i 0,9 A pels dos servos dels timons (0,45 A cada un).

7.3. Programació del sistema de control

El SenSailor ha de ser capaç de poder navegar de manera autònoma sense la intervenció humana, per facilitar la tasca de recollida de dades. Això s'aconsegueix mitjançant la descripció de totes les possibilitats de navegació en què es pot trobar el veler d'una manera simplificada, utilitzant els sensor per a que funcionin com els sentits del veler. Per tant, abans de tot, és important descriure com es programa i com funciona cada un dels sensors de navegació.

7.3.1. Sensors de navegació

Per complir aquesta tasca es necessiten 3 sensors principals, que seran els sentits principals per al SenSailor. Sense ells és impossible qualsevol tipus de navegació autònoma de llarga duració.

GPS

El GPS és el responsable proporcionar informació sobre la posició. Aquest mòdul compta amb un processador integrat, la seva memòria i una antena integrada, bàsicament un microcontrolador amb l'única tasca (gens simple) de rebre dades dels satèl·lits en òrbita. Aquest mòdul utilitza el protocol de comunicació Serial [59] per comunicar-se amb altres dispositius, en el nostre cas l'Arduino.

Cal esmentar, que l'Arduino utilitzat és el model UNO, el qual només compta amb un bus Serial a més, compartit amb el UART [57] de l'Arduino per a la comunicació amb l'ordinador a través del port USB. Per tant, al principi s'ha utilitzat la llibreria SoftwareSerial [60] que simula la comunicació Serial mitjançant software i dos I/O pins. Aquesta llibreria funciona, però implica molta càrrega de processament per al microcontrolador, fet que genera falles als altres components. Més endavant, s'ha optat per la utilització de l'únic bus Serial, encara que fa menys pràctica la pujada de noves versions del programa a l'Arduino, ja que s'ha de desconnectar físicament el GPS cada vegada que es vol fer l'operació

El funcionament és molt simple i d'alt nivell. El GPS el que farà al tenir l'alimentació de 5V és buscar constantment el senyal de satèl·lits en òrbita visibles. Al tenir-ne un fixat, començarà a enviar dades a una freqüència d'1 Hz, és a dir, més o menys cada segon. Les dades enviades tenen el format NMEA (*National Marine Electronics Association*) [61], codi utilitzat per a molts GPS, que fa possible l'enviament de dades de manera més comprimida.

```
#GPRMC,100747.000,A,3754.9976,S,14507.0283,E,0.00,263.36,140114,,,A*7F
#GPGGA,100748.000,3754.9976,S,14507.0283,E,1,8,0.90,92.5,M,-4.2,M,,*65
#GPGSA,A,3,16,21,22,05,26,29,18,15,,,,,1.21,0.90,0.81*03
#GPGSV,3,1,11,21,64,230,33,29,62,066,32,18,46,331,38,50,46,359,*7C
#GPGSV,3,2,11,15,29,065,28,26,21,107,26,05,19,135,32,25,18,353,*7B
```

Figura 91: Dades en format NMEA. Font[62]

Com es pot veure a la imatge, aquestes dades es poden considerar a com a dades crues (*raw data*), que s'han de tractar d'alguna manera per fer que siguin llegibles per a l'Arduino i per a càlculs posteriors. Per això s'utilitza la llibreria d'Arduino TinyGPS++ [53], la qual ens facilita molt tot el càlcul de posició i de rumb. Aquesta llibreria és bastant pesada, però amb raó. Com s'ha vist anteriorment, el GPS envia la informació en format NMEA, i a més, envia una gran quantitat de dades. El que fa la llibreria és passar caràcter per caràcter per trobar les lletres clau que coincideixen amb les frases NMEA que s'han sol·licitat. Quan es troba la informació, es descodifica a nombres enters o decimals per a la utilització en càlculs de rumb.

```
#include "TinyGPS++.h"
```

```
TinyGPSPPlus gps;
```



```

//-----Array dels waypoints; variable i per utilitzar com
index-----
float waypoints [10][2];
int i;
//-----
-----

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  waypoints [0][0] = 42.380359;
  waypoints [0][1] = 2.184730;

  i = 0;
}

void loop() {
  float rumb_a_wp, diferAbs_rumbRef_magVar, errorAbs, error,
  penellGlobal, diferAbs_wp_v, difer_wp_v, rumbRef, wpop, vent_op,
  diferAbs_wpop_v, difer_wpop_v, magVar, difer_magVar_vop,
  diferAbs_magVar_vop;
  unsigned long temps;
  magVar = MAG();
  if (millis() - temps > 10000) {
    while (Serial.available() > 0) {
      gps.encode(Serial.read());
      rumb_a_wp = gps.courseTo(gps.location.lat(), gps.location.lng(),
      waypoints[0][0], waypoints[0][1]);
    }
    temps = millis();
  }
}

```

Aquesta part del codi és l'encarregada de fer funcionar el GPS. Com es pot veure, no es tracta d'un codi molt extens pel fet de que s'utilitza la llibreria TinyGPS++ per a facilitar la tasca. Al principi del codi es pot veure que s'inclou la llibreria i a més es genera un objecte *gps* el qual és necessari per al funcionament de la llibreria. Més avall es troba la declaració d'una variable matriu, la qual serà la responsable de guardar els diferents waypoints del trajecte. També es declara la variable *i* (índex) la qual serviria per a anar passant d'un waypoint a un altre quan s'ha arribat al destí desitjat.

Dins el *void.setup()* es troba la inicialització del bus Serial per a que l'Arduino pugui rebre les dades del GPS. També es pot veure com es guarda el primer i únic waypoint d'aquesta versió del codi.

Finalment dins el bucle principal *void.loop()* el primer que es veu es la declaració de totes les variables necessàries per als càlculs posteriors al dins el programa. Aquest segment del codi està separat expressament per a facilitar la seva explicació. També es declara una variable *temps* que s'utilitza per a programar un temporitzador. Aquest temporitzador farà que l'Arduino

només llegeixi dades del GPS cada 10 segons, evitant la sobrecarrega del microcontrolador. Quan entra a l'*if* el programa executa un bucle *while* del qual no surt fins que es verifica que totes les dades del GPS han estat rebudes de manera íntegra.

Dins el bucle *while* hi ha les funcions principals d'aquest segment del codi. Les funcions *gps.encode()* i *gps.courseTo()* són les encarregades de descodificar i calcular el rumb al destí desitjat, respectivament. A dins la funció *gps.courseTo()* també es pot veure les dues funcions *gps.location.lat()* i *gps.location.lng()* les quals busquen dins tot el paquet de dades descodificades anteriorment la línia que correspon a la latitud i a la longitud actuals. Al comparar aquesta posició amb la del waypoint es calcula un rumb actual. Finalment, al sortir de bucle *while*, es reinicia la variable *temps* per a que el temporitzador torni a esperar 10 segons.

Magnetòmetre

El magnetòmetre és també indispensable per a la navegació, ja que sense aquest sensor és impossible saber la direcció de la proa. Amb aquest sensor es detectarà el Nord magnètic de la terra. Per conèixer el Nord real, cal aplicar un factor de correcció en funció de la ubicació terrestre, però per fer les proves del SenSailor no s'ha tingut en compte. Com que el sistema de control és retro alimentat aquest petit error queda compensat amb el temps. El mòdul utilitzat conté el xip MPU-9250 de la empresa Invensense [51]. Aquest chip té integrat 3 sensors: una acceleròmetre, un giroscopi i un magnetòmetre [52]

. En aquest cas només és utilitzat per a l'ús del magnetòmetre, però sempre es pot programar per utilitzar totes les prestacions del xip.

Per fer ús del magnetòmetre, desactivant els altres dos sensors integrats, s'ha de jugar amb els registres de memòria [63] interns del xip. A més, no existeix actualment una llibreria que faciliti la tasca de la programació d'aquest sensor, així que tot s'ha fet manualment, registre per registre. El mòdul utilitza el protocol de comunicació I²C [64] per la qual cosa és compatible amb Arduino, que suporta dit bus de dades. Per facilitar la programació, s'utilitza la llibreria oficial d'Arduino anomenada Wire [50]. Aquesta llibreria conté totes les funcions necessàries per treballar amb la comunicació a través del bus I²C.

A continuació es detalla com s'ha programat el sensor MPU-9250 per al seu ús com a magnetòmetre. La programació té 3 parts: (1) inclusió de les llibreries, (2) definició de les funcions de lectura i escriptura i (3) descodificació de la informació.

- **Part 1:** incloure la llibreria Wire i definició de l'adreça al bus I2C.

```
#include <Wire.h>

#define MPU9250_address 0x68
#define MAG_address     0x0C
```

Com es pot veure al segment de codi, simplement s'inclou la llibreria tal i com es mostra, i després es defineix l'adreça del xip MPU-9250 i del magnetòmetre integrat en

hexadecimal. Aquestes adreces no són qualsevol, sinó que estan definides en la fulla de dades del xip.

En el cas de l'adreça del xip MPU-9250, aquesta pot tenir dues possibilitats que depenen de l'estat d'un dels pins (AD0) del xip: si l'estat és 1 (HIGH) l'adreça és 0x69; si l'estat és 0 (LOW) l'adreça és 0x68. El magnetòmetre, per altra banda, té l'adreça fixa de 0x0c.

- **Part 2:** creació de dues funcions: escriptura i lectura a través del bus I²C

```
void I2C_lectura(uint8_t Address, uint8_t Registre, uint8_t N_bytes,
uint8_t* Dades)
{
    Wire.beginTransmission(Address);
    Wire.write(Registre);
    Wire.endTransmission();

    Wire.requestFrom(Address, N_bytes);
    uint8_t index = 0;
    while (Wire.available())
        Dades[index++] = Wire.read();
}

void I2C_escriptura(uint8_t Address, uint8_t Registre, uint8_t Dades)
{
    Wire.beginTransmission(Address);
    Wire.write(Registre);
    Wire.write(Dades);
    Wire.endTransmission();
}
```

Com es pot veure, aquestes dues funcions tenen la paraula *void* al principi, que significa que no retornen cap valor. Això denota que aquestes funcions són de comunicació i no generen cap dada per si mateixes. Són utilitzades per a la comunicació entre l'Arduino i el xip MPU-9250.

Funció Lectura (I2C lectura)

La funció I2C lectura té 4 arguments d'entrada de tipus `uint8_t`, que són:

- **Address:** guarda l'adreça del xip al qual es farà la lectura.
- **Registre:** guarda l'adreça del registre al qual es vol sol·licitar la informació.

- **N_bytes:** guarda el nombre de bytes que es vol sol·licitar.
- **Dades:** guarda els bytes sol·licitats (N-bytes).

Dins la funció es pot veure on és que s'utilitza la llibreria Wire. A continuació, s'anirà línia per línia explicant cada funció utilitzada de dita llibreria i de la resta de la funció I2C_lectura:

Wire.beginTransmission(Address): Aquesta funció l'únic que fa és inicialitzar la comunicació del bus I2C amb el dispositiu amb l'adreça *Address*.

Wire.write(Registre): envia al dispositiu seleccionat l'adreça del registre del qual es sol·licitarà la informació.

Wire.endTransmission(): Acaba la comunicació amb qualsevol dispositiu connectat mitjançant el bus I²C.

Wire.requestFrom(Adress, N_bytes): Sol·licita al dispositiu amb la adreça *Address* un nombre de bytes *N_bytes*.

UInt8_t index = 0: aquí es declara la variable *index* i s'igual a 0.

While (Wire.available()): mentre la comunicació en el bus sigui possible (HIGH o TRUE) fes el següent.

Dades[index++] = Wire.read(): l'array *Dades* anirà llegint del bus I²C gràcies a la funció *Wire.read()*. Aquest array serà tan llarg com bits de informació li arribi del magnetòmetre, utilitzant el sumatori de la variable *index* anteriorment declarada com a índex de l'array.

A l'Annex III. Diagrames de flux s'hi troba el diagrama de flux Figura 174.

Funció Escriptura

La funció d'escriptura és bastant similar a la de lectura, l'única diferència resta en que no es demana cap informació al dispositiu connectat al bus I²C, sinó que només s'escriu. Això s'aconsegueix utilitzant la funció *Wire.write*, anteriorment explicada. Aquesta funció també conté paràmetres, exactament els mateixos portant la variable *N_bytes*.

A l'Annex III. Diagrames de flux s'hi troba el diagrama de flux Figura 175.

- **Part 3:** declaració de variables per mitjana mòbil i decodificació de la informació

Per fer les lectures de la direcció del Nord magnètic més fiables i eliminar el soroll que pugui haver, es fa una mitjana mòbil amb 5 mostres, fent així que el resultat sigui més fiable i estable. Per fer això, s'han de declarar les variables necessàries per fer dit càlcul.

```

const int numReadingsMAG = 5;
int readingsMAG[numReadingsMAG];
int readIndexMAG = 0;
int totalMAG = 0;
int averageMAG = 0;

```

Aquestes variables seran les responsables d'anar guardant els càlculs per fer la mitjana mòbil. El càlcul en si es troba dins la part de la descodificació, després d'obtenir la lectura del magnetòmetre.

Ara ve la part final i més important de la programació del magnetòmetre. En aquest punt és on es demana la informació al magnetòmetre i és on es munten els diferents bytes de informació per generar el resultat. Però abans d'això, s'ha de configurar el xip i dir-li en quin mètode ha de funcionar. Aquesta configuració es realitza dins la part del programa anomenada *void setup()*, que és on normalment s'escriuen les parts del codi que són de configuració, ja que només s'executen una vegada:

```

void setup() {
  Wire.begin();
  I2C_escriptura(MPU9250_address, 0x37, 0x02);
  I2C_escriptura(MAG_address, 0x0A, 0x02);
}

```

Després es pot veure que s'inicialitza la llibreria Wire per poder tenir comunicació a través del bus I²C. Seguidament, com s'havia esmentat anteriorment, es pot apreciar la utilització de la funció d'escriptura per enviar les dades de configuració al xip MPU-9250.

D'aquesta manera, mirant la fulla de dades, es configura el xip al mode Pass-Through, que permet rebre les dades del magnetòmetre fent un pont o "bypass" a l'acceleròmetre i al giroscopi. Això s'aconsegueix accedint al registre amb l'adreça 0x37 i enviant el byte de configuració 0x02.

Per configurar el magnetòmetre AK8963 s'han d'accedir a altres registres. Per configurar-ho al mode continu (és a dir, que vagi actualitzant el registre amb nova informació) primer s'ha de seleccionar el registre 0x0A i escriure el byte 0x02. Aquest byte significa que el magnetòmetre funcionarà en el MODE 1, mesurament continu.

Ara està tot llest per llegir les dades dels registres on es guarda la informació de les lectures del magnetòmetre. La informació està guardada en 6 registres diferents, cada parell d'ells referint-se a un dels tres eixos espacials. Aquesta informació està guardada en el format de complement a dos [65]. En el cas d'aquest magnetòmetre es té una resolució de 16 bits, per tant el per cada eix hi ha dos registres que guarden 1 byte cada un (8 bits), un és el byte superior i l'altre el byte inferior.

```
float MAG() {
    uint8_t ST1;
    do
    {
        I2C_lectura(MAG_address, 0x02, 1, &ST1);
    } while (!(ST1 & 0x01));

    uint8_t Mag[7];
    I2C_lectura(MAG_address, 0x03, 7, Mag);
    int16_t x = (Mag[1] << 8 | Mag[0]);
    int16_t y = (Mag[3] << 8 | Mag[2]);
    int16_t z = (Mag[5] << 8 | Mag[4]);
    float az = atan2(x, y) * 180.0 / M_PI;
    if (az < 0) {
        az = az + 360;
    }
    totalMAG = totalMAG - readingsMAG[readIndexMAG];
    readingsMAG[readIndexMAG] = az;
    totalMAG = totalMAG + readingsMAG[readIndexMAG];
    readIndexMAG = readIndexMAG + 1;
    if (readIndexMAG >= numReadingsMAG) {
        readIndexMAG = 0;
    }
    averageMAG = totalMAG / numReadingsMAG;
    delay(1);
    return averageMAG;
}
```

Aquesta part del codi és la principal, on es realitza la lectura del magnetòmetre i es s'ordena la informació per què tingui significat. Tot aquest segment està confinada dins la funció MAG() que té el tipus de variable *float*. Aquesta funció, doncs, al tenir un format de variable, haurà de retornar algun valor amb dit format. Dins aquesta funció s'hi pot trobar la declaració de sis variables locals, les quals són:

- uint8_t ST1: Aquesta variable guarda el byte de configuració del registre 0x02 del magnetòmetre

- `uint8_t Mag[7]`: Aquesta array guarda els bytes que es llegeixen dels registres de mesures. Té 7 posicions de memòria amb 8 bits cada una, és a dir, un total de 7 bytes (es necessiten 6 per guardar la lectura del magnetòmetre).
- `Int16_t x, y, z`: Aquestes tres variables són utilitzades per guardar la informació de cada eix.
- `float az`: aquí és on es guarda el resultat final de la lectura i la descodificació. Més tard és utilitzada per fer la mitjana mòbil i tenir una lectura més estable.

La primera part de la funció és la que mira quan la informació estigui llesta o no. Aquí es llegeix un byte al registre de configuració `0x02` i es guarda la informació rebuda a la variable `ST1`. En el full es descriu que vol dir cada bit del byte que hi ha al registre. El bit 0 del registre és el que ens interessa. Aquest bit té el nom de `DRDY` i pren el valor de 1 quan la informació està llesta en el mode d'una sola mesura i 0 si s'està llegint qualsevol dels registres de mesures. Per tant aquí l'estructura del *do while* només deixa passar a la resta del codi si la comparació entre `ST1` i `0x01` és falsa, és a dir, que el bit `DRDY` sigui 0.

La següent part del programa ja és la lectura dels registres `HXL`, `HXH`, `HYL`, `HYH`, `HZL`, `HZH`. El nom d'aquests registres són descriptius, ja que els dos caràcters finals diuen a quin eix correspon la informació (`HXL`) i a quin byte pertany (`HXL`). Aquí s'utilitzen operacions de bits, en concret, desplaçaments de bits, per ordenar la informació dels registres a les corresponents variables `x`, `y` i `z`.

Quan ja es té la lectura feta, aquesta només representa la intensitat del camp magnètic en cada eix, una informació que ha de ser tractada amb un simple càlcul, com es pot veure al codi. Aquest càlcul fa l'arc tangent de x/y per després passar-ho a graus, tenint així la direcció del nord del camp magnètic de la terra. Aquest càlcul es guarda a la variable `az` i passa pel filtre de la mitjana mòbil, fent el resultat més estable. D'aquesta manera, disposant el magnetòmetre per tal que l'eix `x` estigui alineat amb la proa, es pot saber quina direcció té aquesta.

A l'Annex III. Diagrames de flux s'hi troba el diagrama de flux Figura 173.

Penell

Aquest sensor és el responsable de mesurar la direcció del vent que incideix al veler. És essencial ja que es necessari saber la direcció del vent per fer el càlcul del rumb i per com orientar la vela per generar força d'avanç. Es tracta d'un sensor analògic, així que les mesures, en aquest cas, es tracten de voltatge compresos entre 0 i 5V. Dit voltatge serà convertit a un valor enter per l'Arduino, mitjançant el convertidor ADC, el qual podrà ser utilitzat per fer la conversió a graus. Amb aquest sensor es podrà tenir una lectura de direcció local i aparent del vent, però juntament amb el magnetòmetre, també es pot saber quina és la direcció respecte el nord de la terra.

```
const int numReadings = 5;
int readings[numReadings];
int readIndex = 0;
int total = 0;
int average = 0;

float funcioPenell()
{
    int valor = analogRead(pinPenell);
    valor = map(valor, 0, 1023, 0, 16);
    float angle = (360.0 / 16) * valor;
    total = total - readings[readIndex];
    readings[readIndex] = angle;
    total = total + readings[readIndex];
    readIndex = readIndex + 1;
    if (readIndex >= numReadings) {
        readIndex = 0;
    }
    average = total / numReadings;
    delay(1);
    return average;
}
```

Com es veu, utilitza el mateix sistema de mitjana mòbil per tenir uns resultants més fiables, com una histèresi. Es pot apreciar que el codi no és molt difícil i no és necessari la utilització de cap llibreria per al seu funcionament. La funció, altra vegada, es tracta d'un format *float*, és a dir que el seu valor serà un nombre amb decimals. Aquí no seria necessari que fos un *float*, però per fer càlculs posteriors al programa si que ho serà.

Primer de tot es declara la variable *valor*, que tindrà el valor de la lectura del pin on està connectat el penell. Aquest valor, com ja s'ha esmentat abans, estarà en un interval de 0 a 1023, ja que la resolució del convertidor és de 10 bits. Per fer les coses més simples, es fa una conversió per a que aquest interval sigui de 0 a 16, coincidint amb les posicions que pit tenir el penell. Així, amb un càlcul simple, s'obté l'angle de la direcció del vent respecta la proa del vaixell.

Aquests són els sensors essencials per a la navegació autònoma dels veler. Sense ells és completament impossible, però sempre es podria millor el sistema. Per això es presenta també l'adició d'un anemòmetre, que podrà detectar la velocitat del vent, útil per detectar vent perillós i massa ràpids per poder navegar.

Per a una explicació més visual, a l'Annex III. Diagrames de flux es troba el diagrama d'aquesta funció Figura 172.

Anemòmetre

Aquest sensor també és analògic i per tant es programa de manera similar al penell. L'anemòmetre juga el paper de sensor d'alarma, és a dir, quan detecti una mitja de vent superior a cert valor aquest farà que la vela es posi de cara al vent, fent que no hi hagi generació de força d'avanç i eliminant el risc de bolcament.

La connexió d'aquest sensor és molt simple, però es necessita un filtre per eliminar el "bouncig" de l'interruptor que hi ha dins. A part d'això, el sensor simplement genera dos polsos cada vegada que fa una revolució, per tant, el programa simplement ha de detectar aquests polsos i tenir una mostra de temps per poder saber la velocitat. Aquí el problema resideix en com detectar els polsos, ja que són molt ràpids i com més vent fa menys interval hi ha entre ells. La solució és crear una funció que es cridi cada vegada que hi ha un canvi de senyal, i aquest canvi serà detectat mitjançant un interruptió externa. Aquest interruptió aturarà el programa allà on estigui, anirà a la funció interrupció i l'executarà. Quan aquesta funció hagi acabat, el programa tornarà al punt on ho havia deixat, i així per a totes les interrupcions. Com es pot intuir, aquesta funció interrupció ha de ser breu i ràpida d'executar, ja que sinó el programa es torna lent i pot generar errors.

```
volatile int nombre_polsos = 0 // Comptador de polsos.
unsigned long Temporitzador = 0 // Variable utilitzada per a tenir un
temporitzador.
float polsos_seg = 0;
float voltes_seg;
float velocitat_ms = 0;
float velocitat_kn = 0;
float constant_calibracio = 0.705; //posar aquí la constant
float constant_conversio = 1.943; //conversió de m/s a kn

void setup() {
  pinMode(2, INPUT_PULLUP);
  attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(2), anemometre, RISING);
}

void loop() {

  unsigned long temps = millis();
```

```
if ((temps - Temporitzador) > 2000) {
  detachInterrupt(digitalPinToInterrupt(2));
  polsos_seg = (float) 1000 * nombre_polsos / (temps-Temporitzador);
  voltes_seg = polsos_seg / 2;
  velocitat_ms = polsos_seg * constant_calibracio;
  velocitat_kn = velocitat_ms * constant_conversio;
  nombre_polsos = 0;
  Temporitzador = millis();
  attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(2), anemometre, RISING);
}
}

void anemometre () {
  nombre_polsos ++;
}
```

Aquest és el codi per fer funcionar l'anemòmetre de manera individual. Per poder ficar-lo dins el codi principal només cal ordenar-ho perquè no es confongui amb la resta. Aquest codi conté bastantes declaracions de variables, ja que són necessàries per calcular la velocitat. En la part del *setup* hi podem trobar la declaració del pin on està connectat l'anemòmetre i també la inserció de la funció interrupció a aquest pin. Com es pot veure, la funció generarà una interrupció quan es detecti un canvi de senyal de LOW a HIGH (per això el paràmetre RISING). Si això passa, el que es fa seguidament és parar el programa i anar a executar la funció *anemometre*, la qual es troba al final el codi i que simplement conté un comptador que es guarda a la variable *nombre_polsos*. Quan ha acabat d'executar-la, el programa torna allà on ho havia deixat.

En el *loop* principal s'hi troba la declaració d'una variable que serà utilitzada pel bucle *if* perquè entri dins quan passin 2 segons. Quan s'entra dins el bucle *if*, es desactiva la funció interrupció per evitar que el programa es pari al mig d'un càlcul i hi hagi errors. Aquí es fa el càlcul de polsos per segon i es multiplica per una constant de calibratge per obtenir la velocitat en nusos. Aquesta constant s'obté de manera experimental, mirant el nombre de polsos per segon indicat per l'anemòmetre i comparant-lo amb el valor de velocitat marcat per un altre anemòmetre sotmès sota el mateix flux de vent. Un cop obtinguda la constant de calibratge, s'introdueix al programa perquè pugui conèixer la velocitat real de vent i reduir l'angle d'atac de la vela si la intensitat supera un límit de risc per a la navegació.

7.3.2. Unió del codi i càlcul del rumb

Amb l'explicació de com es programa cada sensor, ara és l'hora de ajuntar-ho tot per crear el que serà el programa del pilot automàtic. Aquest programa comptarà amb tot el que s'ha explicat en el punt anterior més tot el tractament de les dades que s'han generat amb les sensors, per aconseguir que el veler navegui de manera autònoma. Aquest objectiu no és fàcil, ja que del que es tracta és de simplificar al màxim totes les possibles situacions de vent i posicions en que es pot trobar el veler en un sol codi. Cal esmentar que dit codi no és ni el final ni és completament funcional. Aquest codi es pot torbar a l'annex x.

El següent pas seria, a part d'ajuntar tot el codi dels sensors, fer tots els càlculs necessaris per poder calcular el rumb i la posició de la vela. Per fer això s'utilitzen les dades generades per els sensors per fer dits càlculs. També s'inclou la llibreria Servo [45], oficial de l'equip Arduino i que facilita molt l'ús dels servomotors que estan instal·lats en el veler. També cal esmentar que aquest codi té una petita part que està dedicada al sistema de canvi de control manual/automàtic.

El primer de tot és preparar els timons per donar-los ordres més tard. Això es fa incloent la llibreria Servo, com s'ha esmentat abans. A part d'això, simplement s'han de crear els objectes per a cada servo. Aquesta part quedaria d'aquesta manera:

```
#include <Servo.h>
```

```
Servo TimoE;
```

```
Servo TimoB;
```

```
Servo Vela;
```

D'aquesta manera les funcions de la llibreria es sol·licitaran utilitzant el nom de cada servo seguit de la funció que es vol utilitzar. El següent pas és assignar un pin digital a cada servo i posar l'angle que toca per tal que si no reben cap ordre els timons es posin a la via. Per raons de construcció, aquest no coincideix exactament amb la posició nominal dels servos (90°) sinó que s'hauran d'ajustar manualment amb la funció *Servo.write()* així:

```
void setup() {
  TimoE.attach(6);
  TimoB.attach(5);
  Vela.attach(3);

  TimoE.write(101);
  TimoB.write(105);
  Vela.write(86);
}
```

Amb això fet, ara toca el torn del sistema de commutació entre el sistema de control manual i automàtic. Com ja s'ha explicat a l'apartat 6.3 *Sistema de Radio Control (RC)*, aquest sistema permet activar o desactivar el control a distància a través d'un comandament de ràdio control. La programació per aconseguir aquest fi és el següent:

```
double Reles;

void setup() {
  pinMode(9, INPUT);
  pinMode(8, OUTPUT);
}

void loop() {
  Reles = pulseIn(9, HIGH);
  if (Reles < 1200) {
    digitalWrite(8, LOW);
  }
  if (Reles > 1900) {
    digitalWrite(8, HIGH);
  }
}
```

Com es veu, primer de tot és declarar una variable que s'utilitzarà més tard per guardar el temps entre polsos que es rep del comandament a distància. Després, al *setup()*, es troba la definició dels pins 9 i 8, que en aquest cas funcionen com a entrada i sortida, respectivament. Al següent pas, dins el *loop()* es troba la funció *pulseIn*. Aquesta funció llegeix del pin 9 el temps que hi ha entre els polsos de PWM que són rebuts del mòdul de ràdio control, del canal associat a la commutació de control manual/automàtic. Els servos utilitzen un estàndard en el qual l'angle que donen depèn del temps que hi ha entre dits polsos. Normalment aquest estàndard es troba entre els 1000 i els 2000 microsegons (100 i 200 µs). Com es pot veure al segment del programa, quan el temps entre polsos sigui menor de 1200 microsegons, el mode de pilot automàtic té el control del veler. Però quan aquest valor és més gran de 1900 microsegons, es passa al mode manual i el veler es pot controlar a través del comandament a distància.

La part final del programa i la qual depèn de que tot el sistema funcioni és la creació dels càlculs per trobar el rumb i la direcció que ha d'escollir el veler per aprofitar el vent. El diagrama de flux que explica de manera visual aquest part és Figura 163. A continuació s'anirà punt per punt explicant el programa:

```

if (funcioPenell() > 0 && funcioPenell() < 180) {
    penellGlobal = magVar + funcioPenell();
} else if (funcioPenell() > 180) {
    penellGlobal = magVar - funcioPenell();
}

```

Diagrama de flux : *Figura 164: Vent local a global. Bloc 1*

Al segment anterior es fa el càlcul per passar la direcció del vent que s'obté del penell (local) a una direcció de vent global i que té el 0 al nord terrestre. D'aquesta manera es poden fer els càlculs posteriors de manera més fàcil i ràpida.

```

// Càlcul de difer_wp_v

// (Magnitud de difer_wp_v)
diferAbs_wp_v = abs(rumb_a_wp - penellGlobal);
if (diferAbs_wp_v < 180) {
    diferAbs_wp_v = diferAbs_wp_v;
}
else {
    diferAbs_wp_v = 360 - diferAbs_wp_v;
}

// (Signe de difer_wp_v)
if (rumb_a_wp >= 180){
    if (rumb_a_wp - 180 < penellGlobal && penellGlobal < rumb_a_wp){
        difer_wp_v = diferAbs_wp_v;
    }
    else{
        difer_wp_v = - diferAbs_wp_v;
    }
}
else {
    if (rumb_a_wp + 180 > penellGlobal && penellGlobal > rumb_a_wp){
        difer_wp_v = - diferAbs_wp_v;
    }
    else {
        difer_wp_v = diferAbs_wp_v;
    }
}

```

```
}  
}
```

Diagrama de flux: *Figura 165: Diferència entre el rumb cap al waypoint (rumb directe) i el vent. Bloc 2*

Aquest altre segment de codi és el reposable de calcular la diferència entre l'angle del rumb (obtingut gràcies amb la llibreria TinyGPS++) i l'angle de vent global calculat anteriorment. Com es pot apreciar, té dues parts. Una calcula la magnitud de la diferència, sempre agafant l'angle petit i l'altre part calcula el signe d'aquest angle. D'aquesta manera es té un càlcul més exacte i els signes no interfereixen a la suma o resta d'angles i s'elimina la possibilitat de càlculs erronis. Per a entendre millor aquesta part, a l'Annex III. Diagrames de flux es troba el diagrama de flux.

Per tant, per al càlcul de tots els altres valors el sistema són el mateix canviant simplement les variables. Com que tots els valors són angles, i aquests són respecte al nord terrestre, els càlculs són molt similars i el procediment de cada un d'aquests segments és similar.

Seguidament trobem el càlcul de valors oposats del vent i del rumb. Aquest valors són necessaris per a càlculs posteriors i solament es tracta de capgirar el valor de l'angle per a que es trobi al quadrant contrari.

```
if (rumb_a_wp < 180) {  
    wpop = rumb_a_wp + 180;  
} else {  
    wpop = rumb_a_wp - 180;  
}  
  
if (penellGlobal < 180) {  
    vent_op = penellGlobal + 180;  
} else {  
    vent_op = penellGlobal - 180;  
}
```

El següent segment de codi es fa càrrec del mateix càlcul que abans, obtenir la diferència entre el rumb desitjat i el vent. En aquesta part però, es calcula el valor utilitzant els angles oposats. Aquest angle calculat serveix més endavant al programa per al càlcul del rumb.

```
// Càlcul de difer_wpop_v  
  
// (Magnitud de difer_wpop_v)
```

```

diferAbs_wpop_v = abs(wpop - penellGlobal);
if (diferAbs_wpop_v < 180) {
    diferAbs_wpop_v = diferAbs_wpop_v;
}
else {
    diferAbs_wpop_v = 360 - diferAbs_wpop_v;
}

// (Signe de difer_wpop_v)
if (wpop >= 180){
    if (wpop - 180 < penellGlobal && penellGlobal < wpop){
        diferAbs_wpop_v = diferAbs_wpop_v;
    }
    else{
        diferAbs_wpop_v = - diferAbs_wpop_v;
    }
}
else {
    if (wpop + 180 > penellGlobal && penellGlobal > wpop){
        diferAbs_wpop_v = - diferAbs_wpop_v;
    }
    else {
        diferAbs_wpop_v = diferAbs_wpop_v;
    }
}
}

```

Diagrama de flux :*Figura 166: Diferència entre el rumb oposat cap el waypoint (rumb directe) i el vent. Bloc 4*

Amb aquesta informació ja és possible calcular el rumb que es desitja que el veler tingui. Aquest rumb de referència és amb el qual es farà la resta amb el rumb actual (mesurat amb el magnetòmetre, és a dir, el rumb real). Per poder tenir el rumb de referència que es desitja, s'ha de definir per quins angles de vent el veler no pot navegar. Aquests s'han definit com a un ventall de 90° a proa del vaixell (45 a cada banda) i 40° a popa (20° a cada banda). D'aquesta manera es pot trobar l'interval de vents pel qual el veler pot navegar i de la mateixa manera és com s'introdueix al codi. Com es pot veure, mitjançant aquests intervals d'angles de vents es decideix

sumar o restar un determinat angle al rumb, obtenint així el rumb més navegable per a la situació de vent que es troba el veler en aquell moment concret.

```
// Elecció del rumb referència

if (difer_wp_v > 0 && difer_wp_v < 45) {
    rumbRef = penellGlobal + 45;
} else if (difer_wp_v <= 0 && difer_wp_v > -45) {
    rumbRef = penellGlobal - 45;
} else if (difer_wp_v >= 45 && difer_wp_v <= 160) {
    rumbRef = rumb_a_wp;
} else if (difer_wp_v <= -45 && difer_wp_v >= -160) {
    rumbRef = rumb_a_wp;
} else if (difer_wp_v > 160 && difer_wp_v <= 180) {
    rumbRef = rumb_a_wp - 20;
} else {
    rumbRef = rumb_a_wp + 20;
}

if (rumbRef >= 360) {
    rumbRef = rumbRef - 360;
} else if (rumbRef < 0) {
    rumbRef = 360 + rumbRef;
}
```

Diagrama de flux: *Figura 167: Elecció del rumb referència. Bloc 5*

Al tenir el rumb de referència ja es pot passar al càlcul de l'error. Aquest error és la diferència entre el rumb que es vol agafar i el rumb que està duent aquell moment el veler. Aquest valor de l'error és crític, ja que és bàsicament la traducció d'un controlador proporcional. Al tenir el valor calculat (mitjançant el mètode de calcular el signe i la magnitud per separat), ja es poden donar les ordres als servo motors. Abans d'això però, es fa el càlcul de la diferència entre el valor del magnetòmetre i el vent oposat, necessari per donar aquestes ordres de manera correcta.

```
// Càlcul de l'error

// (Magnitud de l'error)
diferAbs_rumbRef_magVar = abs(rumbRef - magVar);
```



```

if (diferAbs_rumbRef_magVar < 180) {
  errorAbs = diferAbs_rumbRef_magVar;
}
else {
  errorAbs = 360 - diferAbs_rumbRef_magVar;
}

// (Signe de l'error)
if (rumbRef > 180){
  if (rumbRef - 180 < magVar && magVar < rumbRef){
    error = errorAbs;
  }
  else{
    error = - errorAbs;
  }
}
else {
  if (rumbRef + 180 > magVar && magVar > rumbRef){
    error = - errorAbs;
  }
  else {
    error = errorAbs;
  }
}
}

```

Diagrama de flux: *Figura 168: Càlcul de l'error. Bloc 6*

El codi següent es necessari per a veure si el vent entra massa per la banda de popa, i per això es necessari tenir els dos angles al mateix quadrant, fent un càlcul més senzill. Amb aquest codi el programa podrà actuar quan el vent vengui de popa:

```

// Càlcul de difer_magVar_vop

// (Magnitud de difer_magVar_vop)
diferAbs_magVar_vop = abs(magVar - vent_op);
if (diferAbs_magVar_vop < 180) {
  diferAbs_magVar_vop = diferAbs_magVar_vop
}
else {
  diferAbs_magVar_vop = 360 - diferAbs_magVar_vop
}

// (Signe de difer_magVar_vop)
if (magVar >= 180){
  if (magVar - 180 < vent_op && vent_op < magVar){
    difer_magVar_vop = diferAbs_magVar_vop
  }
  else{

```

```
        difer_magVar_vop = - diferAbs_magVar_vop;
    }
}
else {
    if (magVar + 180 > vent_op && vent_op > magVar){
        difer_magVar_vop = - diferAbs_magVar_vop;
    }
    else {
        difer_magVar_vop = diferAbs_magVar_vop;
    }
}
}
```

Diagrama de flux: *Figura 169 Càlcul de la diferència entre el rumb actual i el vent (oposat).* Bloc 7

I per acabar està el segment del servo de la vela que agafa la direcció del vent coma única informació per actuar, ja que només necessita saber si el vent ve de babord o d'estribord.

```
if (funcioPenell() >= 0 && funcioPenell() < 180) {
    Vela.write(86+35);
} else if (funcioPenell() >= 180 && funcioPenell() < 360) {
    Vela.write(86-35);
}
}
```

Diagrama de flux: *Figura 171: Elecció de l'angle del timó de vent.* Bloc 9

Tots els càlculs anteriors tenen l'única missió de proporcionar al informació necessària per generar unes ordres als timons que dirigeixin el veler cap a la destinació desitjada. Aquestes ordres es poden dividir en dos casos: situació de gir en que la virada implica una virada per popa i una altra que no implica una virada per popa. Pe raons de construcció, si el es fa una virada per popa, la vela es quedaria parada i no es podria navegar fins que les corrents o el mateix vent poses la vela en una posició diferent. També s'han de tenir en compte els ventalls de vent pels quals el veler no pot navegar, ja que no genera força d'avanç. Quan s'està dins aquest ventall es fan girar els timons al màxim (45°) fins que el veler detecta que està fora d'aquest rang i per tant l'angle dels timons s'anirà igualant a l'error calculat, tenint aquí la component del controlador proporcional.

```
// Definició de l'angle dels timons segons diverses situacions
```

```
// A) Situació on el gir cap al waypoint NO implica una virada per popa (cas desitjat)
```

```

if (errorAbs < diferAbs_magVar_vop) {
  if (error > 45) {
    TimoE.write(101 + 45);
    TimoB.write(105 + 45);
  } else if (error < -45) {
    TimoE.write(101 - 45);
    TimoB.write(105 - 45);
  } else {
    TimoE.write(101 + error);
    TimoB.write(105 + error);
  }
}

// B) Situació on el gir cap al waypoint SÍ que implica una virada
per popa (cas no desitjat)
} else {
  if (error < 0) {
    TimoE.write(101 - 45);
    TimoB.write(105 - 45);
  } else {
    TimoE.write(101 + 45);
    TimoB.write(105 + 45);
  }
}
}

```

Diagrama de flux: Figura 170: *Definició de l'angle dels timons. Bloc 8*

7.4. Programació del sistema de mesures

Aquest subsistema, pensat per poder ser adaptat per qualsevol sensors que es vulgui posar al veler, es basa amb el mateix xip que l'Arduino de control, però en un format molt més reduït, l'Arduino Nano. Aquest sistema compta amb alguns sensors per demostrar la viabilitat del veler en la recollida de dades.

Aquest sistema està equipat amb uns sensors bàsics però funcionals i útils. Compta amb un sensors de temperatura, un sensor de raigs ultra violats i una fotoresistència. Aquest sensors

poden ser utilitzats per obtenir dades de manera constant per allà on vagi el veler. També poden ser utilitzats per ajudar a la navegació del veler, ja que poden ser clau per tal que el sistema d'il·luminació o la placa fotovoltaica funcioni bé.

7.4.1. Sensors del sistema i la seva programació

En aquest apartat s'expliquen els sensors instal·lats i la seva programació. També s'explica les possibles aplicacions i millores que aquest sistema podria tenir en una aplicació més ideal, com afegir més sensors del mateix tipus per afegir redundància de dades.

Sensor de temperatura

El sensor de temperatura instal·lat és el DS18B20. Aquest sensor en concret està dins una sonda metàl·lica, amb un cable totalment estanc, que fa possible la mesura de la temperatura de l'aigua. Aquest sensor fa l'ús del protocol de comunicació OneWire de la empresa Dallas, el qual s'ha de programar mitjançant dues llibreries. Aquestes són OneWire [46] i DallasTemperature [47], utilitzades per facilitar el funcionament del sensor. La programació del sensor és la següent:

```
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>

const int pin = 9

OneWire oneWireObjecte(pin);
DallasTemperature sensorDS18B20(&oneWireObjecte);

void setup() {
    sensorDS18B20.begin();
}

void loop() {
    sensorDS18B20.requestTemperatures();
    float temperatura = sensorDS18B20.getTempCByIndex(0);
}
```

El que es pot veure en el codi és que les dues llibreries faciliten molt la feina que s'ha de fer. Com es pot apreciar el que s'ha de fer es influeixen i després crear l'objecte de cada una d'elles, especificant a la llibreria OneWire quin és el pin on està connectat el sensor. El següent pas és inicialitzar la llibreria DallasTemperature en el *void setup* per després, en el *loop*, fer una

sol·licitud de lectura de temperatura mitjançant la funció *requestTemperatures()* de la llibreria *DallasTemperature*. Finalment es sol·licita del sensor 0 (només n'hi ha un) la temperatura i es guarda a la variable *temperatura* per a la utilització posterior.

Sensor de raigs ultraviolats

Aquest sensor està situat a dalt del pal del vel, on tindrà la major incidència del sol possible. Les dades d'aquest sensor poden ser útils, fins i tot per calcular la irradiància del sol per calcular l'energia que pot extreure un panell solar. Aquest sensor és també de senyal analògic, la qual cosa simplifica el seu us. El codi de programació del sensor *GUVA-S12SD* [48] és la següent:

```
void setup() {
}

void loop() {
  int  sensorValor = analogRead(A0);
  float voltatge = sensorValor* (5.0 / 1023.0);
  float indexValor = voltatge/0.1 ;
  delay(100);
}
```

Aquest codi, com es pot veure, és molt simple, ja que es tracta d'un sensor analògic. El que fa el codi és llegir el pin on està connectat el sensor, convertir el senyal analògic a digital mitjançant el convertidor ADC per obtenir una valor dins l'interval de 0 a 1023 (10 bits). D'aquesta manera i mirant les especificacions del sensor, es calcula l'índex de radiació ultraviolada dividint el voltatge pel valor de 0.1. .

Fotoresistència

La fotoresistència és un sensor molt simple, el qual varia la resistència al pas de la corrent amb la intensitat de llum que rep. Aquest sensor és útil per varis fins, però al *SenSailor* és utilitzat per engegar el sistema de il·luminació quan es fa fosc. Això es fa calibrant la intensitat de llum a la qual es vol encendre el sistema. La programació d'aquest sistema és així:

```
unsigned long millisAnterior = 0;
unsigned long millisActual = 0;

void setup() {
  pinMode(2, OUTPUT);
  pinMode(A0, INPUT);
}
```

```
}

void loop() {
  millisActual = millis();

  if (analogRead(A0) > 980 && millisActual - millisAnterior >= 5000) {
    Bombeta();
  }
}

void Bombeta () {
  digitalWrite(2, HIGH);
  delay(25);
  digitalWrite(2, LOW);
  delay(200);
  digitalWrite(2, HIGH);
  delay(25);
  digitalWrite(2, LOW);

  millisAnterior = millisActual;
}
```

Aquí es veu el codi necessari per encendre el LED de posicionament del veler. Aquest LED s'encendrà quan hi hagi una intensitat de llum predeterminada, que es pot calibrar segons la necessitat de l'usuari. Això es fa mitjançant la fotoresistència. Com es pot veure, el que fa el codi és inicialitzar els pins necessaris com entrades o sortides en el *void setup*. El següent pas és declarar una variable que guarda un registre del temps que passa, que s'utilitza per tal que la lectura de la fotoresistència es faci cada 5 segons, el qual serà l'interval en que el LED s'encendrà. S'ha creat una funció que encén el LED de manera intermitent quan la llum ambiental és baixa. Un llum intermitent crida més l'atenció que un estàtic i va el vaixell més visible. A més, disminueix el consum elèctric i augmenta l'autonomia de la bateria.

Recol·lecció de les dades

La recol·lecció i la desa de dades és un punt encara no explorat, ja que hi ha infinitat de maneres d'aconseguir la informació que recull el veler. Una de les més fàcils és la de proporcionar als Arduinos amb un sistema de emmagatzematge, format per mòduls SD, en els quals s'anirien guardant la informació necessària fins que el veler acabés la missió i es pogués extreure la tarja.

Aquest sistema és el que s'ha implementat, però només fins a certa mesura. La programació del protocol de comunicació amb l'Arduino i els mòduls SD no s'han fet ja que no s'han pogut realitzar les proves de recollida de dades per motius diversos, explicats a la secció 9.3. Tot això, s'han connectat i disposat els mòduls SD a la placa electrònica que en cas de voler-se fer servir només calgui incloure al programa aquesta part de codi.

Capítol 8. Construcció de l'embarcació

Al capítol 8 s'explica el procés de construcció del veler i de tots els detalls i dificultats que han ocorregut. Aquest procés s'explica de manera més o menys cronològica, tot i que algunes tasques, a l'haver-se realitzat en paral·lel, s'ha estructurat la seva explicació buscant un ordre lògic que faciliti la lectura. Es mostren també fotografies que ajuden a visualitzar el procés de manera detallada.

Aquest capítol s'estructura de la següent manera. A l'apartat 8.1 s'explica l'elaboració del motlle. Al 8.2, la construcció del buc, tant el procés de laminat com l'acabat superficial. Al 8.3, la construcció dels timons. Al 8.4 la construcció de la coberta. A la secció 8.5 s'explica el procés de construcció de la vela. El punt 8.6 es centra amb la construcció de l'orsa, passant per les 4 fases següents: pla antideriva, pla de subjecció, bulb i acabat superficial. A l'apartat 8.7 s'explica l'elaboració dels reforços estructurals del buc, del calaix de l'orsa i el suport de la bateria. Finalment, al punt 8.8 es detallen alguns aspectes referents a elements del sistema elèctric, com són la construcció del suport dels sensors i la impermeabilització dels sensors de llum.

8.1. Construcció del motlle

Després de tot el procés de disseny i de totes les iteracions, s'ha procedit a començar la construcció del SenSailor. Per fer el motlle, s'ha dividit l'eslora del vaixell en 10 seccions equidistants. Mitjançant el programa de modelatge virtual, s'han extret les plantilles de cada divisió a escala 1:1. Com que el motlle serà de tipus mascle, se li ha restat el gruix del laminat perquè el volum exterior del buc un cop fabricat sigui el de disseny. A la Figura 92 es mostra de manera esquemàtica el procés de fabricació del buc.

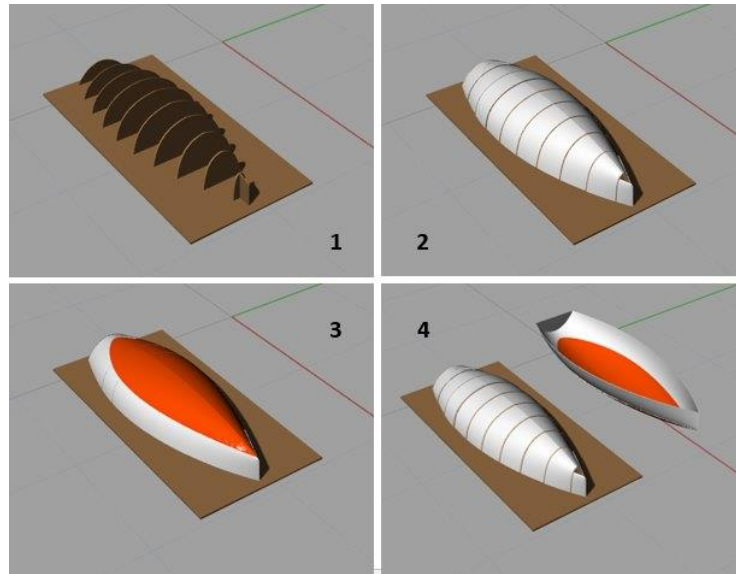


Figura 92. Procés de construcció del buc. 1- Disposició dels panells transversals del motlle. 2- Inserció d'espuma de poliuretà i acabat superficial. 3- Laminació del buc. 4- Separació del buc i el motlle. Font: pròpia.

Les plantilles obtingudes s'han imprès en paper (Figura 93) i s'ha traslladat la silueta a panells de fusta, que formaran l'esquelet del motlle (Figura 94). A continuació, s'han tallat els panells i s'han fixat sobre d'un tauler base, a la distància corresponent. El cantell lliure dels panells s'ha llimat de tal manera que la seva inclinació segueixi la curvatura longitudinal del buc.

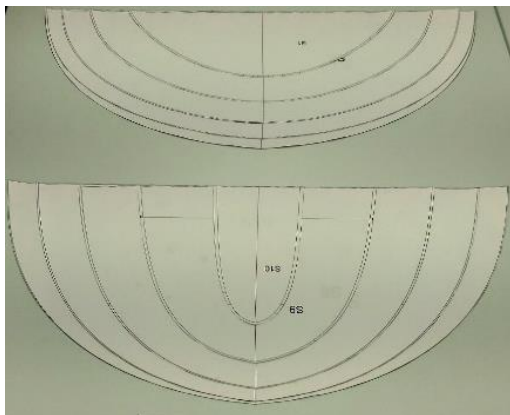


Figura 93. Plantilles del motlle. Font: pròpia.



Figura 94. Muntatge de l'esquelet del motlle. Font: pròpia.

A continuació, s'ha procedit amb la inserció d'espuma de poliuretà expansiva per conformar el cos del motlle (Figura 95). Per estalviar material, s'han utilitzat globus que ocupin espais grans entre les diferents seccions. També s'ha dispostat un encofrat als laterals del motlle per limitar l'expansió de l'espuma i fer que flueixi cap els espais desitjats. Amb aquesta metodologia s'ha aconseguit omplir tot l'espai del motlle mascle en un temps reduït.



Figura 95. Vistes del procés d'aplicació d'espuma al motlle. Font: pròpia.

Seguidament, s'ha procedit a donar forma a l'espuma. S'ha començat traient l'excés més important amb eines de tall (Figura 96) i s'ha modelat la forma amb paper de vidre de gra cada vegada més fi. Per aconseguir la curvatura de l'espuma entre els panells de l'estructura, s'ha utilitzat una fullola llarga de fusta mitjanament flexible coberta amb paper de vidre, com es veu a la Figura 97.



Figura 96. Retirant l'excés d'espuma del motlle. Font: pròpia.



Figura 97. Últimes passades de paper de vidre a l'espuma del motlle. Font: pròpia.

Com que l'expansió de l'espuma no és del tot homogènia, la superfície presenta algunes irregularitats produïdes per bombolles excessivament grans. Per assolir un acabat uniforme, s'ha massillat tota la superfície amb *massilla d'aguaplast*. Aquest producte no és el més indicat per aquesta aplicació, però és més econòmic i igualment funcional. A continuació, s'ha llimat la superfície per eliminar la rugositat. En acabar el procés de llimat, s'ha aplicat una fina capa de resina per deixar la superfície llisa i sense porositats.



Figura 98. Massillat. Font: pròpia.



Figura 99. Aplicació de resina de polièster. Font: pròpia.

8.2. Construcció del buc

En primer lloc, s'ha cobert el motlle amb producte desemmotllant per facilitar la separació de la peça un cop fabricada. A continuació, s'ha iniciat el procés de laminat seguint el disseny explicat al capítol 3. S'ha utilitzat resina de polièster i fibra de vidre. Les capes del laminat s'han anat disposant de manera que el solapament ubicat a la línia de cruïxa augmenti lleugerament el gruix d'aquesta zona, buscant un major reforç (Figura 100). Els cicles del laminat s'han separat per jornades per garantir el correcte curat de la resina i evitar augments de temperatura de la reacció que puguin afectar les propietats mecàniques del material.



Figura 100. Procés de laminat del buc. Font: pròpia.

Al procés de laminat s'ha fet us de paletines i de rodets compactació per garantir una bona impregnació de la fibra. S'ha prestat especial atenció als punts de motlle amb angles pronunciats i petits radis, per evitar bombolles d'aire entre les capes del laminat. També s'han pres les precaucions necessàries per la manipulació d'aquests materials. S'ha realitzat el procés sempre en un lloc ventilat i amb mascaretes per evitar la inhalació de fibres de vidre.

La separació del motlle i el buc ha sigut la tasca més difícil d'aquest procés. Degut a la falta d'experiència, no s'ha realitzat un correcte acabat superficial del motlle. Això ha produït que el laminat quedi totalment adherit a la seva superfície. Per extreure el buc s'ha hagut de trencar el motlle i retirar l'espuma adherida a la cara interior del laminat (Figura 101). Posteriorment s'han eliminat les restes del motlle adherides a la cara interior del buc (Figura 102). D'aquest error s'ha arribat a les següents conclusions:

- 1- L'acabat superficial del motlle ha de ser completament llis. La falta de capes de massilla i el llimat insuficient ha fet que quedin zones rugoses. La massilla s'ha d'aplicar en abundància de manera que quedi una superfície totalment regular, sense esclatxes ni porositats.
- 2- El producte desemmotllant ha de ser de qualitat. En aquest cas s'ha utilitzat un producte en esprai que no ha donat els resultats que descrivia el fabricant. Per garantir la bona separació del motlle i la peça es recomana aplicar varies capes de cera desemmotllant, retirant-ne l'accés amb un drap sec fins que quedi un acabat llis i brillant.



Figura 101. Destrucció del motlle. Font: pròpia.



Figura 102. Buc amb restes de l'espuma del motlle a l'interior. Font: pròpia.

Habitualment, la construcció de bucs es realitza mitjançant motlles femella. Això vol dir que el motlle té la forma del buc en negatiu i el laminat es disposa a l'espai interior. El procediment d'aquest mètode consisteix en aplicar el desemmotllant i, posteriorment una capa de gelcoat, seguit de les capes de laminat que toqui. D'aquesta manera, com que la cara del laminat que toca el motlle és la que posteriorment serà visible des de l'exterior del vaixell, no és necessari fer cap tractament superficial a la peça. El buc s'extreu del motlle amb l'acabat desitjat, a punt per ficar a l'aigua.

Aquest procediment és molt útil per elaborar vaixells en sèrie, ja que l'elaboració del motlle és costosa, però la inversió es recupera ràpidament. Primer cal fabricar un model del buc i a partir d'aquí el motlle en negatiu. En el cas del vaixell d'aquesta memòria s'ha optat per treballar

directament amb un motlle mascle, la que només es vol fabricar una peça. Com a conseqüència, l'acabat de l'exterior no és l'idoni i cal tractar-lo.

Aquest procés no és senzill i requereix temps. Per sort s'ha disposat amb l'ajuda i les recomanacions de docents de l'Institut de Nàutica de Barcelona experts en aquesta matèria i s'ha pogut realitzar l'acabat superficial amb èxit.

Degut als solapaments de les capes del laminat i el mètode de construcció manual, la superfície exterior del buc és irregular i s'aprecien algunes ondulacions. Per aquest motiu, el primer pas seguit ha sigut resoldre aquests defectes. Això s'ha realitzat tot aplicant capes de massilla de polièster, seguides d'un llimat amb un taco llarg per buscar la curvatura desitjada (Figura 103). El procés s'ha realitzat varies vegades fins a aconseguir emplenar de massilla els punts baixos ubicats entre les crestes de les ondulacions i obtenir una superfície regular (Figura 104).



Figura 103. Aplicació de massilla i llimat a la superfície. Font: pròpia.



Figura 104. Buc en diferents etapes del procés de massillat. A dalt, anterior; a baix, posterior. Font: pròpia.

Seguidament, s'ha procedit a aplicar la imprimació, un producte bicomponent que garanteix la bona adherència de la pintura a la peça. S'hi ha aplicat varies capes intercalant cicles de llimat per acabar d'allisar la superfície. L'última capa s'ha polit amb un paper de vidre de gra molt fi, per obrir porus però evitant rallades visibles. Un cop allisada la superfície, s'ha tallat el forat de l'orsa i s'ha encaixat el calaix i l'enfognament a l'interior del buc. Aquesta fase s'explica a l'apartat 8.7, *Elements estructurals*, en aquest mateix capítol.

Posteriorment, s'ha netejat bé la superfície del buc eliminant qualsevol residu de pols i s'ha portat a una cabina de pintura per fer-hi l'acabat final. L'últim pas ha consistit en l'aplicació de la pintura mitjançant una pistola polvoritzadora. El producte utilitzat ha sigut pintura bicomponent d'ús nàutic de color blanc, de la marca *Perfection*. A continuació es mostren imatges d'aquest pas. A l'esquerra, dues vistes del buc amb la imprimació aplicada i llimada. A la dreta, dues vistes del buc un cop aplicada la pintura on s'aprecia l'acabat final.



Figura 105. Buc amb imprimació aplicada. Font: pròpia.



Figura 106. Buc amb pintura aplicada. Font: pròpia.

8.3. Construcció dels timons

La subjecció amb el buc del sistema de direcció es fa a través dels *skegs*. Aquests apèndixs travessen la paret del buc i es solden directament a la seva estructura de reforç. Mitjançant eines de mesura i molta cura s'ha marcat la posició exacta dels *skegs* i s'han fet les perforacions pertinents (Figura 107).



Figura 107. Perforació del buc per muntar els *skegs*. Font: pròpia.

Per construir els skegs i els timons s'ha utilitzat tauler de fusta fenòlica de 10 mm de gruix. La forma hidrodinàmica s'ha aconseguit llimat amb paper de vidre fins obtenir un perfil simètric per les dues cares. Per altra banda, s'han preparat les llimeres i les metxes. Aquestes s'han fabricat amb dos tubs de diàmetres immediatament consecutius. Això vol dir que el diàmetre exterior del tub de les metxes és igual a l'interior de de les llimeres. Mitjançant un torn s'ha polit la superfície del tub prim fins aconseguir un diàmetre que entri el més ajustat possible a l'interior de l'altre. Per acabar d'obtenir un ajustament exacte entre ambdós tubs, s'han fet girar l'un dins l'altre a altes revolucions. El resultat és un contacte metall-metall hermètic a l'aigua però que permet el moviment.

Posteriorment s'han tallat els tubs amb dos (un per cada timó) i es doblega un colze a uns 45° a l'extrem de cada metxa, que servirà per garantir una unió ferma amb la pala. A cada timó s'ha mecanitzat un forat amb el mateix angle per inserir el colze de la metxa. A l'interior del buc s'hi ha fixat les llimeres de manera que mostrin una obertura per la part inferior, d'es d'on s'hi encaixaran els timons. El contacte metall-metall podria produir l'efecte de capil·laritat i produir una petita via d'aigua a l'interior del buc. Per evitar això s'ha utilitzat grassa de liti (hidròfuga), que també serveix per lubricar el mecanisme.



Figura 108. mecanització de la pala del timó. Font: pròpia.

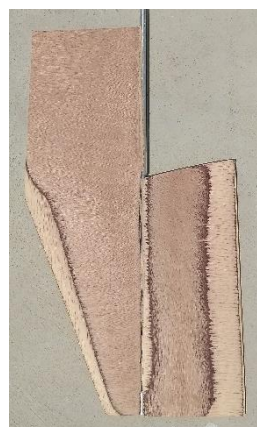


Figura 109. Skeg (esquerra) i timó (dreta). Font: pròpia.

Els timons i els skegs, com ja s'ha esmentat abans, s'han elaborat amb tauler de fusta. Per evitar el contacte amb l'aigua i fer-los impermeables s'ha aplicat una petita capa de fibra de vidre (vel de superfície) de molt poc gruix (MAT 30). Posteriorment s'ha llimat la superfície per eliminar estelles i obrir porus de cara a la posterior aplicació de massilla.

Posteriorment s'ha muntat el mecanisme de direcció dels timons (Figura 110). S'han utilitzat dues tiges d'acer a cada timó per transmetre

el moviment del braç del servo al braç unit a la metxa del timó. Aquestes tiges són prou rígides per transmetre l'esforç adequadament però tenen certa flexibilitat per cedir el moviment si la pala del timó colpeja algun objecte amb força.

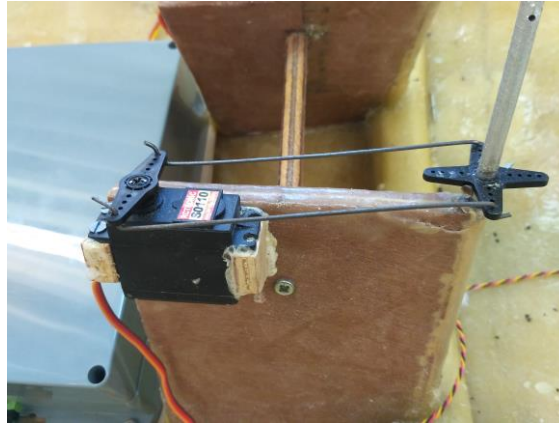


Figura 110. Mecanisme de direcció dels timons.
Font: pròpia.

Per altra banda, s'ha fabricat la subjecció articulada de la pala dels timons, ubicades a l'extrem inferior dels l'skegs. Aquesta peça consta d'una part plana amb dos orificis i un eix cilíndric vertical soldat a ella. Per muntar-la, s'encaixa la peça a dos espàrrecs roscats que surten pel costat inferior de l'skeg i es fixa mitjançant rosques femella. D'aquesta manera, a al muntar aquesta peça, l'eix vertical soldat a ella queda introduït dins un orifici metàl·lic ubicat al costat de proa del timó, alineat amb el centre de gir. Aquest encaix fa de frontissa i ofereix un punt de recolzament al timó. A la vegada, el mecanisme és desmuntable per poder extreure els timons de les llimeres i realitzar el manteniment. L'acabat superficial dels timons i skegs s'ha realitzat seguint el mateix procediment que l'orsa, descrit més endavant.



Figura 111. Inserció dels pernys a l'extrem de l'skeg. Font: pròpia.

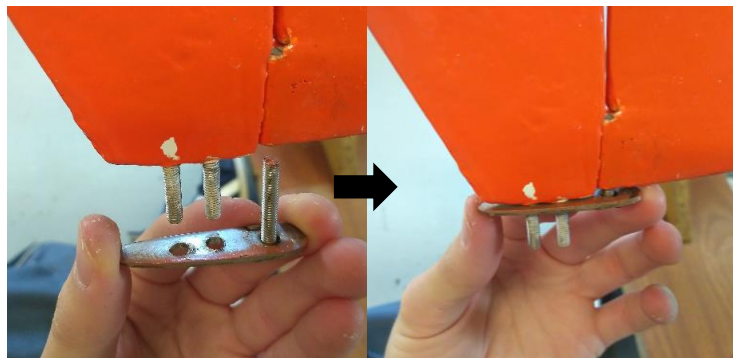


Figura 112. Muntatge de la frontissa inferior dels timons. Font: pròpia.



Figura 113. Vista lateral del timó i skeg. Font: pròpia.



Figura 114. Vista posterior dels timons i skegs. Font: pròpia.

8.4. Construcció de la coberta

Al llarg de la construcció de la coberta s'han presentat una sèrie de dificultats relacionades amb la falta d'experiència dels autors del projecte pel què fa al procés de fabricació. Per aquest motiu, s'ha hagut de repetir la construcció 3 vegades fins a obtenir el resultat desitjat. Per les 2 primeres s'ha seguit un disseny que comportaria certs avantatges a la navegació però té unes formes més complexes. Veient les dificultats, s'ha optat per simplificar el disseny per la coberta definitiva.

La construcció s'ha fet de tal manera que la coberta pesi el menys possible però alhora tingui la integritat estructural necessària per poder aguantar els esforços que es pot trobar durant la navegació. Al primer intent de fabricació, s'han utilitzat blocs rectangulars d'espuma de poliuretà extruït per l'elaboració del motlle (Figura 115). L'acabat superficial d'aquest motlle no s'ha realitzat de la manera adequada, amb la qual cosa la peça ha quedat unida al motlle i s'ha hagut de rebutjar.

Al segon intent es repeteix el procés de construcció del motlle. Aquesta vegada, s'opta per evitar la unió de la peça cobrint el motlle amb film de plàstic. El problema es presenta amb el lliscament i l'acumulació de bombolles d'aire entre el plàstic i el motlle. El resultat de la peça no és el desitjat, ja que presenta irregularitats importants a la seva superfície. Per arreglar aquest desperfecte es requeriria una gran quantitat de massilla i, com a conseqüència, un augment del cost i del pes.



Figura 115. Fabricació del motlle amb poliuretà extruït. Font: pròpia.

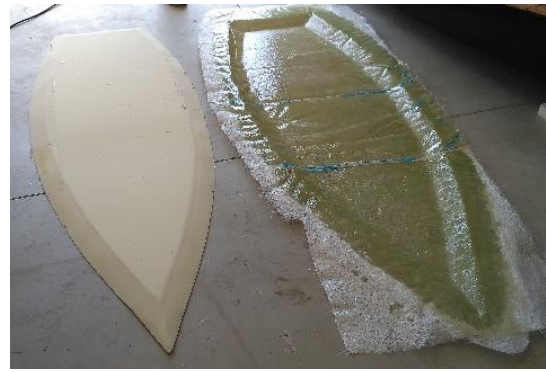


Figura 116. 2n intent de coberta. Font: pròpia.

Finalment s'opta per fer un 3r intent amb un disseny simplificat que no requereixi motlle, amb el suport i consell de l'Institut de Nàutica de Barcelona. El nou disseny es basa en un laminat tipus *Sandwich*, que combina capes de fibra de vidre a les cares externes de la peça i un nucli de panell d'abella (Figura 117). En aquest darrer intent s'ha optat per fabricar una coberta plana, i així estalviar pes i material (Figura 118).



Figura 117. Nucli de niu d'abella. Font: pròpia.



Figura 118. 3r intent de coberta. Formes simplificades i material sandwich. Font: pròpia.

8.5. Construcció de la vela

La vela és la part propulsiva del vaixell. El seu funcionament ha de ser precís i a la vegada ha de disposar la resistència suficient per suportar les forces que hi intervenen. Per tant, s'hi ha prestat especial atenció per obtenir els millors resultats. Després de bastantes iteracions en el seu disseny i mètode de construcció més òptim (descrits al capítol 4), s'ha elaborat una vela molt semblat a les ales dels avions: una estructura de fusta sòlida però lleugera, recoberta amb un material tèxtil per aconseguir la forma aerodinàmica desitjada. Aquest mètode de construcció és simple però relativament eficaç, idoni per una construcció senzilla d'un primer prototip.

La construcció s'ha iniciat amb el calcat del perfil aerodinàmic a un tauler de contraxapat. Fent un model del perfil aerodinàmic, es procedeix a fabricar totes les costelles de la vela. Mitjançant llimes manuals i orbitals, s'ha polit la forma de les peces per obtenir la forma exacta del disseny (Figura 119).

Posteriorment, s'ha procedit a elaborar els llarguers (o reforços verticals) de la vela, els quals tenen com a objectiu mantenir les quadernes al seu lloc i proporcionar resistència a tot el conjunt. D'acord amb el disseny, se n'han fabricat 5 per la vela i 4 per l'aleró utilitzant llistons de pi. A continuació, s'han mecanitzat una sèrie de forats a les costelles per alliberar pes a l'estructura, i per deixar pas per encaixar-hi el pal (Figura 120).



Figura 119. Perfilant els reforços horitzontals de la vela. Font: pròpia.

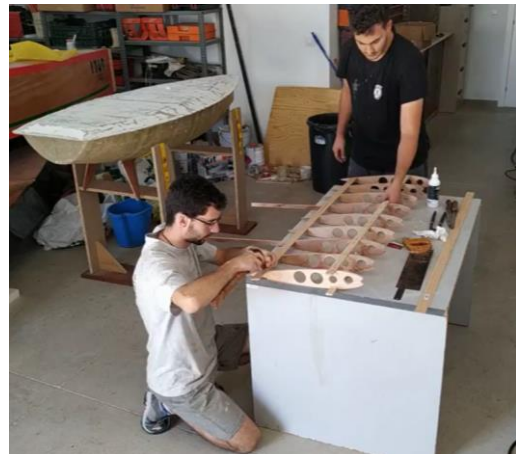


Figura 120. Muntatge de l'estructura de la vela. Font: pròpia.

Després d'aquest procés, s'han unit totes les peces de l'estructura mitjançant claus i cola polièster expansiva, sempre anant en compte de tenir les quadernes alineades. Un cop muntada l'estructura s'ha unit la cobertura de PVC a la part frontal dels dos perfils. Per mantenir la forma de la làmina mentre s'espera l'enduriment de la cola, s'ha utilitzat utilitza un cordill tensat com s'aprecia a la Figura 121.



Figura 121. Encolat de les làmines de PVC al costat frontal de l'aleró (esquerra) i la vela (dreta).
Font: pròpia.

L'aleró s'ha construït seguint el mateix procediment que la vela. S'ha deixat un forat pel pas de l'eix d'alumini a través de les costelles, que representa el punt de pivot del timó. També es disposa una tija de fibra de vidre transversal al timó, que servirà més endavant per unir el mecanisme de transmissió del moviment del servo. S'ha envernissat tota l'estructura per protegir la fusta de la humitat.

Quan està tot llest s'ha procedit a muntar el folre. A ell s'hi escriu el missatge *Keep Clear, Unmanned Vessel* mitjançant teixit de *Dacron* adhesiu. El recobriment es talla d'una sola peça per facilitar el seu muntatge, fet a mida perquè hi encaixin tots els apèndix que sobresurten de l'estructura com el suport de l'aleró i el braç del contrapès.



Figura 122. Estructura de l'aparell abans (esquerra) i després (dreta) de la instal·lació del folre. Font: pròpia.

Finalment s'ha elaborat el contrapès utilitzant tauler fenòlic de fusta i medallons d'acer. La funció d'aquesta peça és equilibrar el pes de l'aleró i desplaçar el centre de masses a l'eix de gir de la vela. Per tant, s'ha calculat el pes i la distància dels medallons perquè aquest equilibri sigui exacte. Els medallons d'acer s'han unit amb la fusta mitjançant massilla polièster amb càrrega de pèls de fibra de vidre (. També s'ha construït la unió desmuntable d'aquest element amb l'estructura de la vela.



Figura 123. Unió dels medallons amb massilla.
Font: pròpia.

8.6. Construcció de l'orsa

La fabricació de l'orsa s'ha dut a terme a partir de tres parts, que posteriorment s'han acoblat entre si per formar un objecte massís i sòlid. A la part central es troba el pla antideriva, fabricat amb tauler de fusta. Al costat superior d'aquesta peça s'hi uneix el pla de subjecció de l'orsa, que és la part que entra dins el buc i queda fixada entre les parets del calaix de l'orsa. Al costat inferior es troba el bulb, un llast de plom de 10 kg que serveix per baixar el centre de gravetat del vaixell i augmentar l'estabilitat.

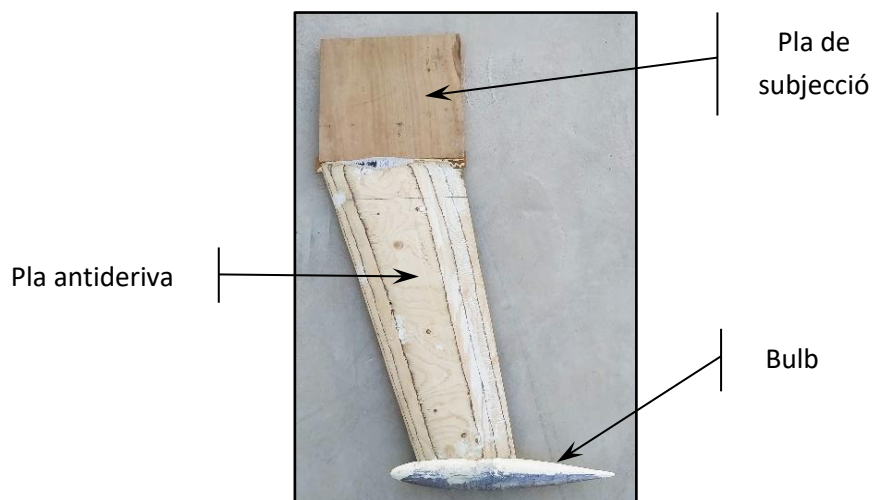


Figura 124. Parts de l'orsa. Font: pròpia.

A continuació s'explica el procés de construcció de les tres parts per separat i, posteriorment, l'acoblament del conjunt i l'acabat superficial.

8.6.1. Pla antideriva

El pla antideriva s'ha fabricat amb tauler fenòlic de fusta de 25 mm de gruix. En primer lloc s'ha tallat d'una sola peça la forma del pla. Mitjançant un ribot elèctric s'ha mecanitzat la superfície de la peça per tal d'obtenir un perfil hidrodinàmic similar al NACA 63A-010 (Figura 125). La curvatura de la superfície s'ha controlat gràcies a les línies dels estrats del tauler que apareixen al rebaixar la fusta. Aquesta tècnica ha servit per verificar la simetria del perfil a ambdós costats de l'orsa i no ha calgut fer us de cap galga per fer de guia.

Posteriorment s'han tapat amb massilla de polièster algunes irregularitats puntuals i s'han retocat els dos extrems del perfil. Per acabar el procés, s'ha fregat la superfície amb paper de vidre per obtenir un acabat més regular i eliminar el repèl de les fibres de la fusta. S'han fet varies passades a mà utilitzant un gra cada vegada més fi fins aconseguir un acabat llis i sense estelles (Figura 126).



Figura 125. Mecanització del perfil al pla antideriva. Font: pròpia.



Figura 126. Pla antideriva. Font: pròpia.

8.6.2. Pla de subjecció

El pla de subjecció és la part que té per funció mantenir ferma l'orsa solidàriament a l'estructura del buc. Per què aquesta unió sigui desmuntable, s'introdueix el pla de subjecció a través d'un orifici practicat sota el buc que comunica amb el calaix de l'orsa. Un cop dins, l'orsa queda totalment ajustada a les parets del calaix i tres passadors transversals ubicats per sobre la línia de flotació n'asseguren la unió solidària.

Amb aquest sistema, és important que l'orsa i el calaix quedin ajustats de la millor manera possible per evitar que hi hagi joc. Per aconseguir-ho, cal que la cavitat interna del calaix tingui la forma i dimensions exactes per allotjar el pla de subjecció de l'orsa deixant el mínim espai imprescindible perquè es pugui desacoblar la unió amb facilitat quan calgui. La manera més fàcil de fabricar el calaix és fer-lo en forma prismàtica, tallant 5 panells plans de fibra de vidre i unir-los entre si formant les quatre parets i la tapa superior. Partint d'aquí, la millor manera d'aconseguir un bon ajustament de l'orsa al seu interior és construir el pla de subjecció també en forma prismàtica, amb les dimensions de l'espai interior del calaix.

La zona que pateix més esforç de flexió de l'orsa és el punt on s'uneixen el pla antideriva i el de subjecció. Per aquest motiu, l'ideal seria que les dues parts estiguessin tallades d'una sola peça utilitzant el mateix tauler de fusta. Tot i això, s'han hagut de fabricar les dues peces per separat perquè les dimensions del tauler de fusta disponible no permetien tallar la peça sencera. La unió entre les dues peces és un punt crític. La flexió en aquest punt és elevada i el moment d'inèrcia petit, amb la qual cosa és important garantir que les dues testes de la fusta quedin unides mitjançant un bon encadellat.

La tècnica usada per fer aquesta subjecció ha sigut un ranurat amb llengüeta, que consisteix en mecanitzar un canal longitudinal a les dues testes que es volen unir i fer passar una metxa contínua, que subjecti tot el conjunt mitjançant un bon encolat. Concretament s'ha utilitzat cola fenòlica, que és resistent a l'aigua i d'alta adherència. A la Figura 127 es mostra un esquema de la unió encadellada.

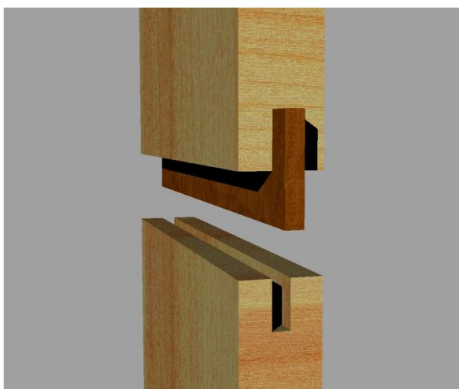


Figura 127. Sistema d'unió entre el pla antideriva i el pla de subjecció de l'orsa.

8.6.3. Bulb

La fabricació del bulb ha sigut la fase més costosa de les tres. Per fer-ho, s'ha utilitzat la tècnica de la fosa de plom, un procés de certa complexitat que requereix una alta precaució degut als materials que es manipulen.

Per fabricar una peça sòlida de plom mitjançant la fosa, és necessari fabricar un motlle que resisteixi els 327 °C, la temperatura de fusió d'aquest metall. En aquesta aplicació concreta, es vol obtenir un bulb amb un perfil revolucionat del tipus NACA 63A-010. Per obtenir un motlle

amb aquesta forma exacta és necessari l'ús de màquines de control numèric. Una opció relativament econòmica i accessible és la impressió 3D, però el material (plàstic PLA) no és apte per suportar altes temperatures. El material adient hauria de ser de tipus ceràmic, fàcil de modelar i amb el cost més baix possible. Una opció viable és el guix, que es ven en pols per aplicacions de construcció, a un preu molt assequible.

El procés per l'elaboració del motlle amb aquest material és el següent. En primer lloc s'imprimeix en 3D un model a escala real del bulb que es vol construir (Figura 128). Seguidament es fabrica un motlle de dues parts de guix utilitzant el model de plàstic per obtenir la forma en negatiu de la peça que es vol construir (Figura 129). Un cop s'ha endurit el guix, es retira el model de plàstic i es tanquen les dues parts del motlle. Finalment es fon el plom i s'aboca a l'interior del motlle a través d'un orifici d'entrada. A continuació s'explica amb més detall aquest procés.

Model de PLA

La forma del bulb s'ha modelat amb el programa Rhinoceros fent revolucionar el contorn del perfil escollit, el qual s'ha obtingut de la llibreria de perfils del programa Maxsurf Modeler. Un cop obtingut el sòlid, s'ha definit un gruix de paret per aconseguir una peça tancada però buida per dins i així estalviar material d'impressió. Com que la impressora 3D té unes dimensions limitades, s'ha partit la peça en 4 segments i s'han imprès per separat.



*Figura 128. Model del bulb a escala 1:1 fabricat amb impressora 3D.
Font: pròpia.*

Motlle de guix

El motlle consta de dues parts, i es parteix pel pla longitudinal de la peça obtenint dues meitats simètriques (Figura 129). S'ha dissenyat que la posició del motlle al moment d'abocar-hi la fosa sigui en posició horitzontal, quedant les dues parts del motlle encaixades una sobre l'altre. El plom s'introdueix dins el motlle a través d'un orifici practicat a la part central de la tapa superior del motlle, just en el punt més elevat de la cavitat interior del motlle. Al costat del conducte d'entrada es situa un altre conducte més estret per permetre la sortida de l'aire.



Figura 129. Modelat virtual del motlle per la fosa de plom.

L'elaboració de cada part s'ha fet per separat, començant per la meitat superior del motlle. S'ha utilitzat una capsa d'uns 50 X 25 X 15 cm per fer l'encofrat on s'abocarà el guix líquid i el retindrà fins que endureixi. Abans de tot, s'ha cobert la base de la capsa amb una capa uniforme de plastilina, d'uns 5 cm. Al centre de la capsa s'ha disposat el model del bulb en posició horitzontal, enfonsat a la plastilina fins la meitat. Quan més endavant s'aboqui el guix a damunt i s'endureixi, la forma de la superfície de la plastilina i el model quedarà copiada en negatiu al la meitat superior del motlle. A la Figura 131 es mostra un resum dels passos seguits.

Però abans d'afegir el guix, cal destacar alguns detalls. A les quatre cantonades de la capsa, sobre la superfície de plastilina, s'hi ha col·locat 4 mitges esferes (també de plastilina) per tal que la seva forma quedi copiada en negatiu a la cara interior del motlle (Figura 130). L'altre meitat del motlle tindrà les mateixes 4 mitges esferes però sobresortint enfora, i serviran de guia per fer encaixar les dues parts exactament alineades. Per altra banda, sobre el model del bulb col·locat dins la capsa, s'hi ha unit dos cilindres verticals de plastilina (un més gruixut que l'altre) que, un cop s'afegeixi el guix, marcaran el camí pels conductes d'inserció de la fosa i de ventilació. Després de preparar l'encofrat, s'ha fet la barreja de pols de guix amb aigua i s'ha abocat dins la capsa, cobrint del tot el model del bulb fins gairebé tancar els dos cilindres dels conductes.

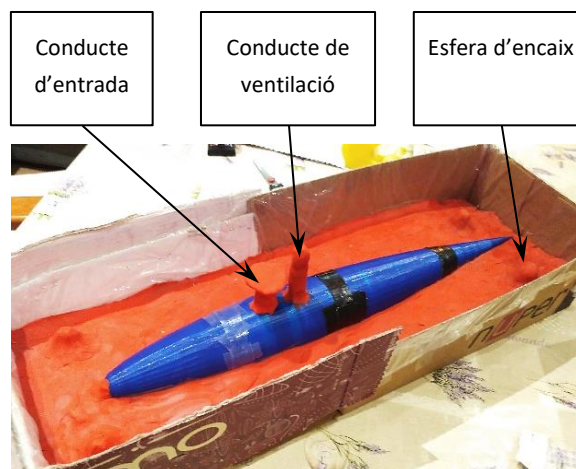


Figura 130. Contramotlle de la part superior. Font: pròpia.

Un cop endurit el guix, s'ha tret el bloc de la capsa, s'ha retirat tota la plastilina, se li ha donat la volta i s'ha tornat a encaixar dins l'encofrat. El model del bulb s'ha deixat encastat al bloc de guix. Ara la meitat visible del model és la que abans estava submergida dins la plastilina. Per fer l'altre meitat del motlle, s'ha tornat a abocar guix a l'encofrat. Ara, el relleu en negatiu de la primera meitat del motlle quedarà copiat en positiu a la cara interior de la segona meitat, i el model del bulb formarà la cavitat interna. Abans d'abocar el guix, però, cal destacar que s'ha recobert la cara de contacte dels dos blocs de guix amb oli lubricant, per evitar que quedin units.

És així com s'ha aconseguit un motlle resistent a la temperatura de la fosa amb dues parts que encaixen a la perfecció entre elles, que eviten la fuga del material fos a través de la junta d'unió.



Figura 131. Passos de la construcció del motlle. 1- Elaboració de la 1a part del motlle. 2- Separació del contramotlle de la 1a part. 3- Elaboració de la 2a part calcant el relleu de la 1a. 4- Retirar el model de PLC i tancar el motlle per abocar-hi la fosa de plom. Font: pròpia.

Fosa de plom

Mitjançant un fogó de butà i una cassola d'acer, s'han escalfat les peces de plom fins assolir el punt de fusió. S'han tancat les dues parts del motlle aplicant pressió amb serjants. A continuació s'ha abocat la fosa a l'interior del motlle a través de l'orifici d'entrada. Aquest procés s'ha fet amb sola colada de 10 kg de plom per tal d'obtenir una peça sòlida sense estrats. L'operació s'ha dut a terme amb els equips de protecció adequats a les altres temperatures i als vapors generats pel plom.

Un cop refredat, s'ha obert el motlle i s'ha extret la peça (Figura 132). S'ha observat que la part superior del bulb ha quedat irregular degut a algunes cavitats d'aire atrapades dins el motlle al moment d'avocar la fosa. Per solucionar-ho, s'ha cobert aquesta part de la peça amb massilla de polièster i s'ha tornat a introduir dins el motlle aplicant-hi pressió fins a l'enduriment. El resultat ha sigut satisfactori i s'ha obtingut la peça amb el pes i la forma desitjada.



Figura 132. Bulb de plom fabricat a partir de fosa. Font: pròpia.

Per subjectar el bulb al costat inferior del pla antideriva, s'ha mecanitzat un encaix al costat massillat de la peça de plom (Figura 133). S'han unit les dues peces mitjançant dos cargols llargs introduïts per la part inferior del bulb i roscats directament al pla antideriva (Figura 134).



Figura 133. Vista frontal del llast. Font: pròpia.



Figura 134. Vista inferior del llast, on s'aprecien els cargols de subjecció. Font: pròpia.

8.6.4. Acabat superficial

Per assegurar la bona subjecció entre les tres peces de l'orsa, s'ha recobert tota la superfície amb una capa de fibra de vidre de mat 300 amb resina de polièster. Aquest recobriment, a més, augmenta la resistència a la flexió i millora la impermeabilitat.

Posteriorment, s'ha procedit al tractament d'acabat superficial. En primer lloc, s'han alternat diversos cicles de massillat i llimat, per allisar la superfície i tancar les irregularitats, acabant amb una capa molt comprimida i un llimat amb gra molt fi. A continuació, s'ha recobert la superfície

amb dues capes d'imprimació, seguit d'un llimat molt fi. Per acabar, s'ha pintat la superfície amb varies capes d'esmalt en esprai de color taronja. A la Figura 135 es mostra el procés d'acabat superficial de l'orsa.

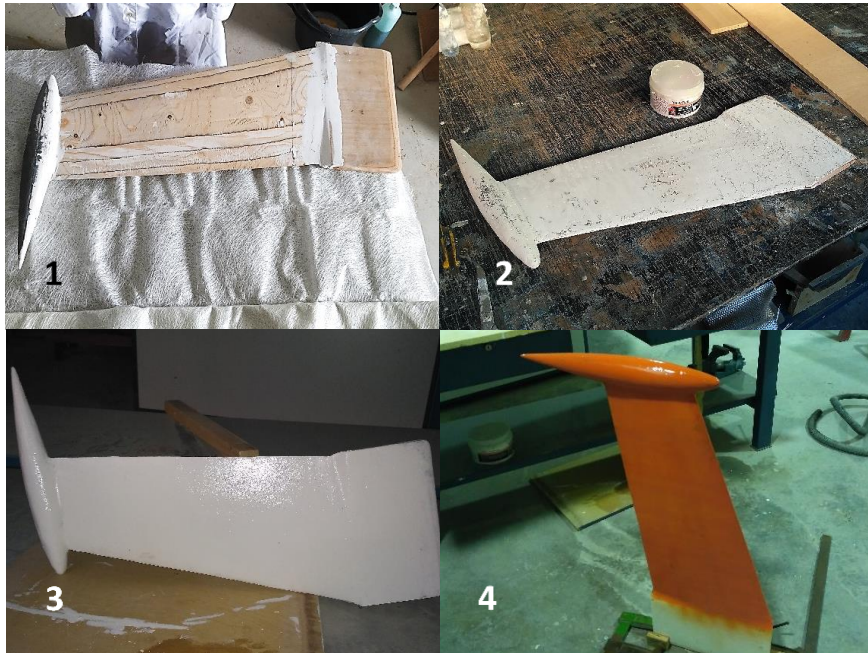


Figura 135. Procés d'acabat superficial. 1- Laminat. 2- Massillat. 3- Imprimació. 4- Pintat. Font: pròpia.

8.7. Elements estructurals

El buc s'ha fabricat d'una sola peça a partir d'un motlle. Això vol dir que la peça obtinguda representa només el folre exterior de l'embarcació sense elements de reforç. Posteriorment a la fabricació del buc, s'ha procedit a construcció dels elements estructurals que, soldats al costat interior del laminat, tenen la funció de donar-li rigidesa i suportar elements del vaixell.

L'ordre cronològic de construcció ha sigut el següent. En primer lloc, s'han fabricat les quadernes per donar rigidesa al buc. Seguidament s'ha col·locat la mampara de col·lisió. En tercer lloc s'ha instal·lat el calaix de l'orsa, amb l'enfognament i els seus reforços laterals. Per acabar s'ha construït el suport de la bateria. A continuació s'expliquen detalladament els passos de construcció seguint un ordre lògic, no cronològic.

8.7.1. Reforços estructurals del buc

El SenSailor disposa de 3 tipus de reforços estructurals a l'interior del seu buc: quadernes, reforços del calaix i mampara de col·lisió. A l'Annex IV. *Plànols i esquemes* es mostren els plànols de la disposició d'aquests reforços. A continuació s'explica el procés de fabricació de cada un.

Quadernes

Al ser un vaixell petit i tenir altres elements de reforç, el SenSailor disposa de només dues quadernes. La quaderna 1 passa exactament per la posició de les llimeres. Això fa que, a part de donar rigidesa al buc, reforci la subjecció dels timons i es distribueixin millor els esforços generats a aquesta zona. La quaderna 2 està ubicada aproximadament a mitja eslora, a la posició on s'allotja la bateria.

Com s'explica a l'apartat 3.3. *Disseny estructural* les quadernes s'han dissenyat amb un perfil en forma de barret de copa, seguint la norma ISO de dimensionament. La seva fabricació s'ha fet amb un nucli de poliuretà extruït, recobert amb el cicle de laminat indicat a l'apartat esmentat. A la Figura 136 es poden observar les quadernes 1 i 2 acabades de laminar i, més al fons, un nucli de poliuretà com els que s'han utilitzat (col·locat a aquesta posició només a mode d'exemple).



Figura 136. Laminació dels reforços.
Font: pròpia.

Reforços del calaix

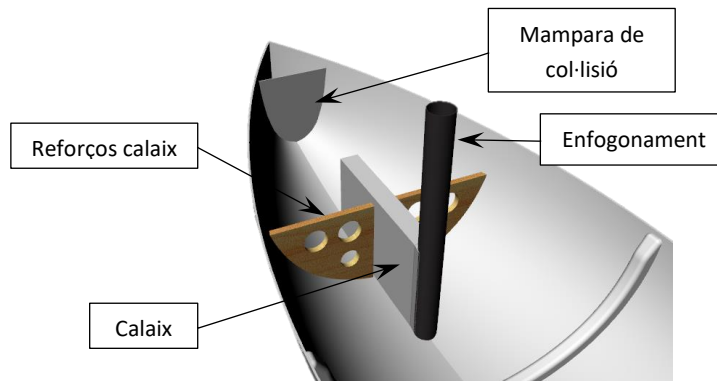
La zona del calaix de l'orsa és on es produeixen els majors esforços, sobretot en situació d'escora. El calaix s'ha soldat al buc mitjançant un cicle de laminat a la seva base, però aquesta unió no és suficient per garantir una bona transmissió dels esforços. Quan el vaixell escora, el moment produït per l'orsa és elevat i les tensions generades a la unió del calaix amb el buc podrien produir una ruptura amb la conseqüent via d'aigua. Per millorar la distribució de les forces s'ha reforçat el calaix amb dues mampares ubicades a banda i banda del mateix i centrades a la seva eslora (Figura 137). Aquestes mampares serveixen de recolzament quan el vaixell escora i l'orsa empeny el calaix cap a un costat. D'aquesta manera, l'esforç es reparteix entre la unió del calaix amb el fons del buc i els costats.

Les mampares estan fabricades amb tauler de fusta de 15 mm de gruix i soldades al buc i el calaix mitjançant un cicle de laminat que combina mat i teixit biaxial. Donat el gruix d'aquestes mampares, s'han perforat orificis amb l'objectiu d'extreure material i reduir-ne el pes. A més,

aquests orificis permeten el pas del cablejat que connecta els diferents equips elèctrics del vaixell.

Mampara de col·lisió

La mampara de col·lisió és una paret transversal estanca ubicada a proa, una mica més enrere de la roda (Figura 137). Aquest element té la funció de reforçar aquesta zona del buc i separar de manera estanca l'extrem de proa de la resta del vaixell. Així, si el vaixell col·lideix contra un objecte flotant contundent i es produeix una via d'aigua a proa, la resta del buc es conserva sec i es manté la flotabilitat. Cal dir, però, que el laminat del buc a la zona de proa s'ha reforçat amb un gruix extra de fibra de vidre, igual que la línia de cruixia al fons del buc i les solapes de la junta de la coberta. La mampara de col·lisió s'ha fabricat amb un laminat de fibra de vidre i posteriorment s'ha soldat a l'interior del buc.



*Figura 137. Reforços estructurals del calaix i mampara de col·lisió.
Font: pròpia.*

8.7.2. Calaix de l'orsa

El calaix de l'orsa és l'estructura on s'encaixa el pla de subjecció de l'orsa. És el mètode que s'ha utilitzat per permetre una unió desmuntable de l'orsa, robusta i estanca. Per això, un requeriment important d'aquest element consisteix en què les parets interiors del calaix quedin el màxim ajustades possible al pla de subjecció de l'orsa, un cop acoblada al seu interior. Això permet que la unió sigui solidària i que no hi hagi joc entre les dues peces. Però a la vegada, l'ajustament i la rugositat de les parets en contacte, han de permetre el fàcil desacoblament de les dues peces. Donades aquestes característiques, s'ha decidit dissenyar un calaix que la seva forma interior sigui prismàtica, amb les mateixes mesures que la part de l'orsa que s'hi introduirà.

Per la seva elaboració, s'ha seguit el següent procediment. En primer lloc, s'ha disposat d'un tauler pla d'un laminat de fibra de vidre de 4,5 mm de gruix, cedit per l'Institut de Nàutica de Barcelona. A continuació, s'ha dissenyat el prisma del calaix, fet a mida segons les dimensions del pla de subjecció de l'orsa. En tercer lloc, s'ha serrat el tauler de fibra de vidre per obtenir les diferents cares del prisma. Tot seguit, s'ha muntat el prisma sobre el pla de subjecció, encolant

les parets amb punts de cola calenta de silicona, per assegurar l'encaix perfecte entre ambdues peces. Per garantir l'espai mínim que permeti el lliscament entre les parets, s'han posat 2 folis DIN A4 entre les dues peces i després s'han encolat les parets del calaix agafant el gruix de l'orsa més el dels dos folis.

Un cop seca la cola, s'ha posat massilla de polièster per tapar les esclatxes de les unions i s'han llimat i arrodonit les arestes. Seguidament s'han soldat les cares del prisma cobrint totes les arestes amb un cicle de laminat. Aquest procés s'ha dut a terme fora del buc. És a dir, s'ha construït el calaix per una banda i posteriorment s'ha acoblat a l'estructura del vaixell (Figura 138).



Figura 138. Construcció del calaix de l'orsa. Font: pròpia.

Mentre cura el laminat, s'ha procedit a tallar l'orifici passant de l'orsa al buc, a la posició correcta i amb les dimensions interiors del calaix. A continuació, s'ha col·locat el buc sobre uns cavallets amb l'orsa passada, anivellant la línia de coberta amb el la horitzontal i l'orsa amb el pla vertical. Amb cura, s'ha encaixat el calaix sobre el pla de subjecció de l'orsa i s'ha soldat a l'interior del buc mitjançant un cicle de laminat (Figura 139).

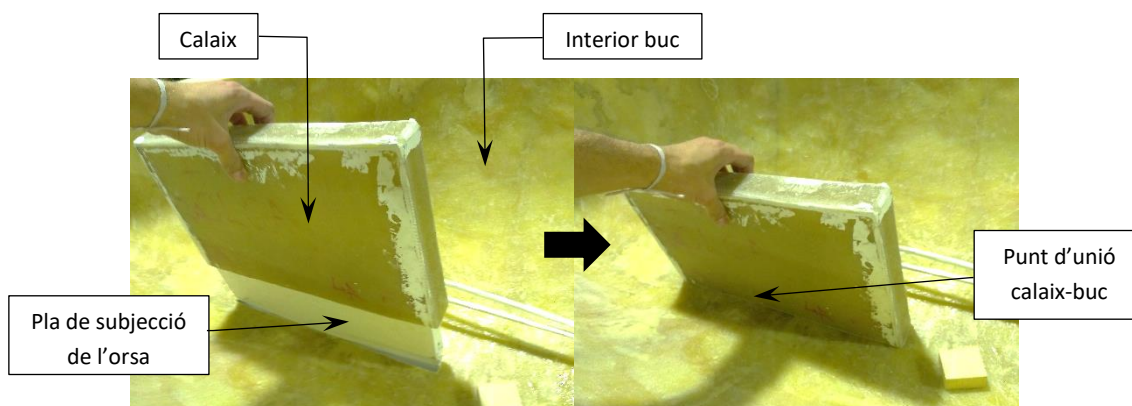


Figura 139. Instal·lació del calaix dins el buc. Font: pròpia.

A l'endurir-se la resina, s'ha soldat l'enfognament al costat de popa del calaix amb un cicle de laminat combinant mat i teixit biaxial (Figura 140). Per fer-ho, s'ha mantingut el vaixell anivellat amb el pla horitzontal i s'ha posat el tub de l'enfognament alineat amb la vertical, fixant-ho de manera provisional amb cola calenta de silicona. S'ha tapat l'espai entre el calaix i el tub amb

resina de polièster amb càrrega de microesferes, per garantir una major subjecció i una bona adaptació del laminat a les formes.



Figura 140. Instal·lació de l'enfognament soldat a popa del calaix de l'orsa. Font: pròpia.

8.7.3. Suport de la bateria

L'equip més pesat instal·lat a bord és la bateria. Aquest element, fabricat amb base a plom, pesa 9,6 kg i representa un 18% del desplaçament total del vaixell. Aquesta massa es concentra en un lloc puntual a l'interior del buc i, per tant cal tenir ben en compte la seva posició per obtenir el trimat correcte. Al ser un element substituïble, cal poder ser extret de l'embarcació amb facilitat, però a la vegada ha de poder quedar ben falcat per evitar que es bellugui durant la navegació.

La solució dissenyada consisteix en un suport fet a mida que pugui allotjar la bateria i pugui quedar fixa a l'estructura del vaixell. A la vegada, s'ha fet que el pes recaigui sobre la quaderna 2 i el fons del buc, especialment reforçat, i s'ha falcat lateralment amb dos reforços que distribueixen les forces a l'estructura del vaixell. El suport està pensat perquè la bateria es mantingui fixa fins i tot en cas de grans angles d'escora o bolcament.

La fabricació del suport s'ha realitzat mitjançant tauler de fusta de 10 mm i 4 mm de gruix i s'ha unit al buc mitjançant una cola d'ús nàutic d'alta adherència en base epòxid. Se n'ha impermeabilitzat la superfície aplicant una capa de resina de polièster.

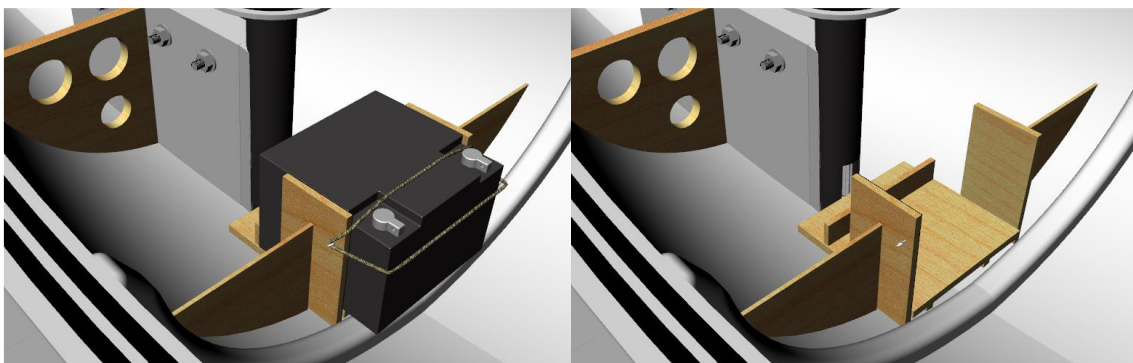


Figura 141. Suport de la bateria. Font: pròpia.

8.8. Sensors exteriors

Aquest primer prototip de SenSailor s'ha equipat amb una sèrie de sensors, alguns imprescindibles per la navegació i altres per fer proves de recollida de dades marines i atmosfèriques. Els sensors ubicats a l'exterior del vaixell s'han hagut d'instal·lar tenint en compte especialment la seva protecció contra la humitat i la intempèrie. A continuació s'expliquen els detalls més importants de la instal·lació d'aquests sensors.

8.8.1. Suport de sensors

Alguns components electrònics cal que estiguin ubicats al punt més alt de l'embarcació pel seu bon funcionament. El penell, l'anemòmetre necessiten el vent més laminar possible, que millora a mida que s'allunya de la superfície de l'aigua. Els sensors de llum (sensor de rajos UV i fotoresistència) necessiten rebre la radiació directa del sol sense ombres. El llum de posició cal que estigui ubicat a un lloc on tingui una bona visibilitat. Per diferents motius, aquests components electrònics necessiten estar ubicats a la part superior del pal.

Per fixar-los correctament i que no interfereixin entre ells, s'ha fabricat un suport en forma de plataforma amb impressió 3D (Figura 142). La forma de la plataforma s'ha dissenyat per tal de muntar-hi els components electrònics específics requerits. Es pot consultar el plànol de la peça a l'Annex IV. Plànols i esquemes.



Figura 142. Suport de l'electrònica de dalt del pal. Font: pròpia.

8.8.2. Sensors de llum

Els sensors de llum adquirits no estan preparats per treballar directament a la intempèrie. Són components electrònics dissenyats per ser muntats sobre una placa. Així doncs, s'ha preparat una càpsula transparent amb resina d'epòxid per protegir-los de la intempèrie i a la vegada permetre el seu correcte funcionament (Figura 143).

Aquesta càpsula consisteix en un bloc massís de resina d'epòxid transparent on s'hi han submergit els dos components electrònics i, a l'endurir, han quedat permanentment integrats a ell. Per fer-ho, s'ha utilitzat una petita capsa de plàstic com a motlle, i s'han muntat els dos components de manera que les potes dels seus terminals quedin a l'exterior del bloc, per poder soldar-hi els cables.

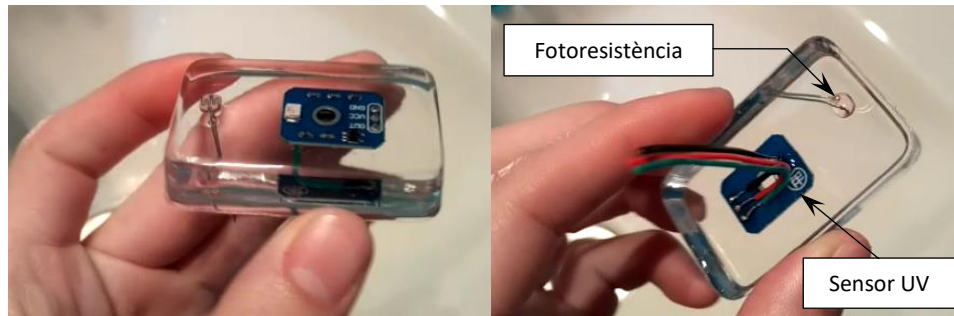


Figura 143. Sensors de llum exteriors protegits dins un bloc de resina d'epòxid. Font: pròpia.

Capítol 9. Proves de funcionament

A les fases més avançades del projecte s'han realitzat varies proves per observar la navegació del vaixell i el funcionament dels seus equips. S'han realitzat algunes proves en sec i algunes a mar obert. Malauradament, degut als impediments ocasionats pel temporal Glòria (del 20 al 23 de gener de 2020) i la pandèmia del Covid-19 (amb inici de confinament al març de 2020), no s'han pogut realitzar totes les proves que estaven planificades i ha resultat inviable acabar de posar a punt algunes de les funcions del SenSailor abans de la data d'entrega de la memòria del projecte. Tot i això, s'han realitzat les proves necessàries per poder afirmar que el vaixell navega i pot dur a terme tasques de recollida de dades a mar obert.

El capítol s'estructura de la següent manera. A la secció 9.1 s'expliquen les proves realitzades a mar obert mitjançant el sistema de ràdio control, per observar la dinàmica del vaixell. A 9.2 es fa una descripció de les proves que s'han dut a terme a terra per comprovar el funcionament del pilot automàtic i depurar el codi de programació. A l'apartat 9.3 s'expliquen les proves que es volien fer a mar obert per comprovar el comportament del pilot automàtic en una navegació real i realitzar una mostra de recollida de dades per demostrar el funcionament. Malauradament, aquesta part no s'ha pogut dur a terme i a aquest apartat se n'expliquen els motius.

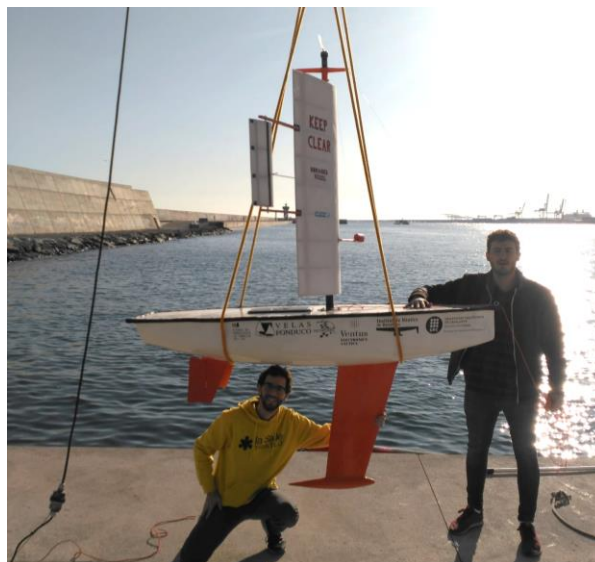


Figura 144. Avarada del SenSailor. Font: pròpia.

9.1. Proves de mar i sistema ràdio control

Les primeres proves que s'han realitzat al SenSailor s'han dut a terme abans d'iniciar la fase de programació del sistema automàtic i la instal·lació del sistema elèctric definitiu. Amb aquestes proves s'ha volgut observar la dinàmica del vaixell, la resposta davant de pertorbacions i el funcionament real de la vela (entre altres aspectes) per, més endavant, poder definir les característiques principals del programa de control.

S'han fet algunes proves d'aigua estàtiques, posant el vaixell a l'aigua del port un dia sense onatge. També s'han fet proves en moviment, remolcant el vaixell fins a fora el port i fent-lo navegar en aigües obertes. Per fer aquest segon tipus de proves, s'ha instal·lat el sistema ràdio control, havent programat prèviament els paràmetres del comandament, assignant un canal per cada servo. La instal·lació del sistema elèctric necessari per realitzar aquestes proves ha sigut provisional. Senzillament s'ha disposat dins el buc l'antena receptora, el controlador i els 3 servos, tot alimentat a 6V amb 4 piles de 1,5V. No s'ha instal·lat cap altre dispositiu elèctric del sistema definitiu. Tan sols s'ha fixat el penell a la part superior del pal (desconnectat) per poder visualitzar la direcció del vent i contemplar la resposta de la vela. Per assolir el desplaçament de disseny, s'han repartit pesos per dins el buc aproximant el centre de masses al que tocaria segons el previst. Cal tenir en compte que el sistema elèctric definitiu suposa una massa important respecte el desplaçament total, sobretot el pes de la bateria (9,6 kg).

9.1.1. Estabilitat i estanquitat

La primera prova d'aigua que s'ha realitzat s'ha fet de manera estàtica al moll proper a l'edifici NT-2 de la Facultat de Nàutica de Barcelona, un dia sense onatge. Mitjançant una grua, s'ha posat el vaixell a l'aigua i se l'ha fet escorar uns 60° fins a submergir bona part de la junta entre el buc i la coberta durant uns segons. Seguidament, s'ha deixat anar de cop el vaixell i s'ha observat la seva capacitat de retornar a la posició vertical.

Els resultats d'aquesta primera prova han sigut totalment satisfactoris. A través de la tapa de registre s'ha mirat l'interior del buc i no s'ha observat cap rastre d'aigua al costat interior de la junta. Amb les proves posteriors, on s'ha sotmès el vaixell a fort onatge, s'ha pogut acabar de comprovar l'estanquitat de tot el perímetre i de la inserció del pal a la coberta. Quan a l'estabilitat, s'ha observat que la seva velocitat de retorn a la posició vertical després d'una pertorbació puntual és ràpida. Des de la posició d'escora donada, el vaixell ha fet tan sols 3 oscil·lacions fins a quedar-se estàtic en posició vertical. Es poden veure filmacions i imatges de les proves a les publicacions dels dies 19, 21 i 26 de novembre de 2019 al compte de Twitter @SenSailor_drone [37][35].

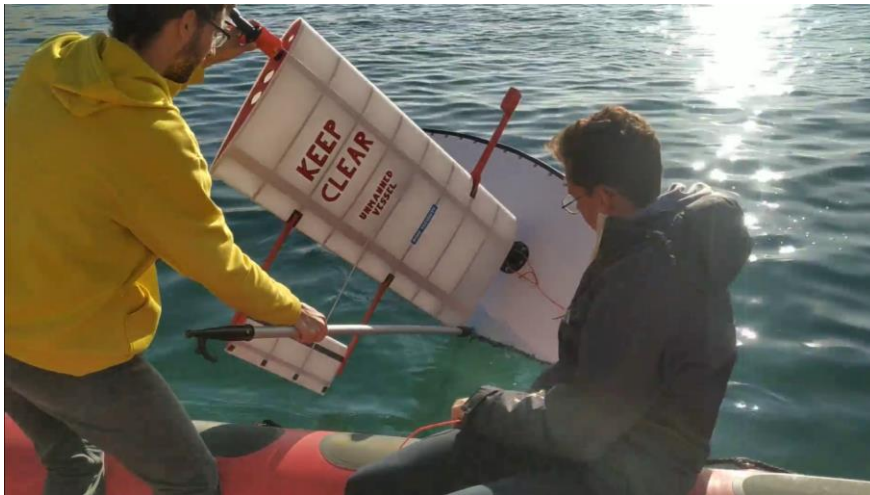


Figura 145. Proves d'estabilitat i estanquitat. Font: pròpia.

9.1.2. Funcionament de la vela

Abans de posar el vaixell a navegar, s'ha fet una prova per observar si el comportament de la vela era l'esperat. Durant l'estudi, s'havien fet càlculs predictius i una maqueta simplificada a petita escala, però no s'havia pogut adquirir experiència pràctica de cap tipus sobre aquest tipus de veles. Tot i que les prediccions apuntaven a que el sistema funcionaria, s'han volgut fer comprovacions abans de posar-la a prova definitivament. Amb el vaixell posat sobre el carro de varada, s'ha buscat un lloc obert amb un flux de vent més o menys laminar. Amb el sistema ràdio control provisional instal·la a bord, s'ha fet variar l'angle de l'aleró a diverses posicions i s'ha observat la resposta de l'aparell (Figura 146).

Amb l'aleró orientat a la posició neutre (0°), la vela s'ha mantingut alineada amb la direcció de vent de manera estable, sense flamejar. Davant una variació d'angle del servo, la vela ha variat el seu angle d'atac de manera proporcional. La seva velocitat de resposta ha sigut pràcticament instantània davant l'estímul del servo, i ha reaccionat de manera efectiva davant els petits canvis d'angle de vent, reorientant automàticament la seva posició per mantenir l'angle d'atac determinat per l'aleró. S'ha repetit la prova amb diferents intensitats de vent. Com és d'esperar, la velocitat de la resposta ha sigut més ràpida amb vents més forts, però la seva precisió s'ha mantingut fins i tot amb vents molt febles. Amb aquesta prova s'ha observat, fins i tot, la capacitat de generar impuls ja que, tot i estar sobre el carro de varada, en certes ocasions aquest ha tingut tendència a avançar desplaçant-se sobre les rodes. Veient els resultats, doncs, s'ha pogut afirmar que la vela és efectiva i respon tal i com s'havia previst.

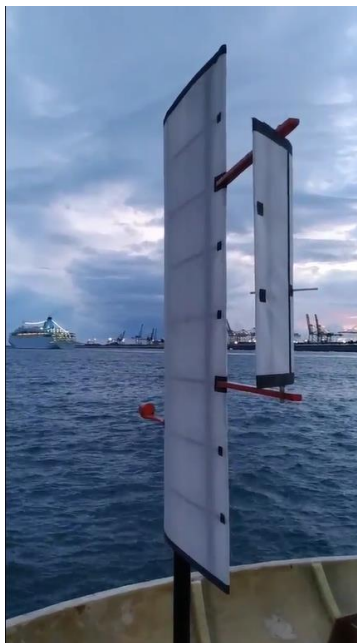


Figura 146. Proves de funcionament de la vela i l'aleró. Font: pròpia.

9.1.3. Proves de navegació

Aquest tipus de proves s'han realitzat a mar obert, a una zona propera a la bocana del port esportiu de Barcelona. S'han repetit en dos dies diferents no consecutius, amb un estat de mar i de vent diferent. La primera prova s'ha fet amb una intensitat de vent d'uns 4 nusos i mar plana (Figura 147 i Figura 148), i la segona, amb uns 15 nusos de vent i un estat de mar més agitat, amb onades d'uns 0,6 m creixent a 1 m. Ocasionalment s'ha pogut experimentar el comportament davant les onades produïdes pels vaixells de pesca entrant a port que, degut a les característiques d'aquestes embarcacions solen ser de molta amplitud i alta freqüència. Aquest fet, aparentment anecdòtic, ha sigut clau per posar a prova el SenSailor amb un tipus d'onada molt agressiva, fent-lo navegar de través de proa i de popa a elles. En les dues proves també s'ha observat la tendència natural del vaixell a orsar o arribar deguda a petits desalineaments del CV i el CD (veure capítol 5, *Disseny dels apèndix*).

A la prova de navegació amb vents suaus s'ha pogut comprovar que, malgrat tenir una superfície vèlica reduïda, el vaixell és capaç de mantenir una velocitat suficient com per què els timons tinguin capacitat de maniobra. A la segona prova el vaixell ha navegat a una velocitat mitjana d'aproximada de 1,5 nusos, un valor pròxim a l'estimat donada l'eslora del vaixell. Pel què fa al comportament enfront l'onatge, s'ha observat que el vaixell és capaç de superar amb facilitat el mar de fons i resisteix les pertorbacions de l'ona curta. La gran superfície lateral disposada a l'orsa permet que el vaixell pugui navegar de través i cenyida sense abatre lateralment i esmorteix pràcticament en la totalitat el moviment de balanceig. Inevitablement, l'ona curta provoca moviment de capcineig, però les formes de proa permeten que, en condicions normals, aquesta recuperi la flotabilitat amb rapidesa i no es clavi sota l'aigua. En el cas de les onades

produïdes pels vaixells de pesca la proa s'ha arribat a submergir, però l'aigua s'ha evacuat amb rapidesa de la coberta i la junta perimètrica s'ha mantingut totalment estanca.

Mentre que amb vents suaus el SenSailor ha sigut capaç de mantenir un rumb totalment rectilini deixant els timons a la via, amb més intensitat el vaixell ha presentat una lleugera tendència a orsar, és a dir, a girar cap el vent. Això es deu a una petita desalineació entre el CV i el CD. Tenint en compte que la localització del CD no resulta una tasca fàcil i que s'ha fet a partir de mètodes aproximats, es pot considerar que el resultat obtingut és força bo, ja que no impedeix navegar de manera estable i segura. Aquesta tendència a girar cap a sobrevent pot ser compensada amb un lleuger angle de timó en sentit contrari per mantenir un rumb estable, i no impedeix realitzar les maniobres de govern.

Les virades s'han pogut realitzar en ambdues proves de manera satisfactòria. Amb vents suaus, moderats l'embarcació ha reaccionat adequadament a les ordres indicades per fer la maniobra. Tot i això, amb vent excessivament fluix (per sota els 3 nusos aproximadament), la governabilitat s'ha vist afectada. En aquests casos, la traça del pilot ha sigut indispensable per poder assolir la velocitat suficient per realitzar el gir, però no s'ha pogut assegurar que un sistema automàtic bàsic ho pugui arribar a fer. S'ha comprovat que, com s'havia previst, les trabujades suposen una maniobra inviable per aquesta embarcació i que, per tant, s'han d'evitar. Tot això s'ha tingut en compte posteriorment al disseny del sistema de control automàtic.



Figura 147. Proves de navegació amb el sistema de control remot. Font: pròpia.

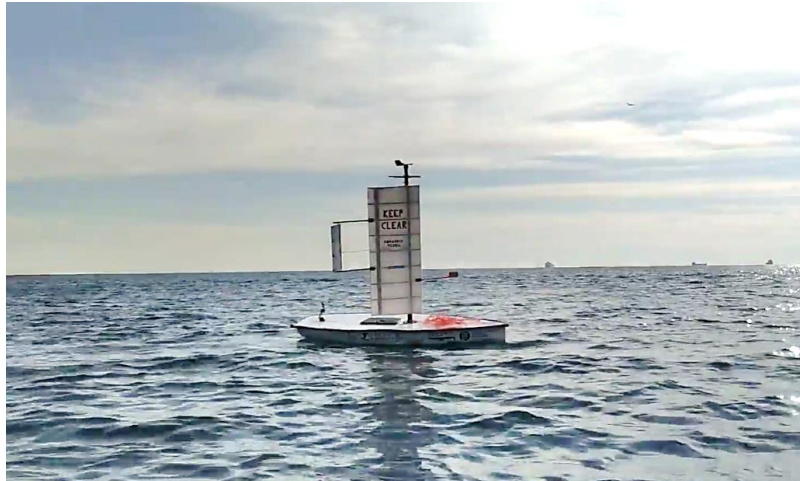


Figura 148. Proves de navegació amb el sistema de control remot. Font: pròpia.

9.2. Proves en sec del sistema de navegació automàtica

Un cop verificat el funcionament del vaixell i estudiada la seva dinàmica, s'ha procedit a instal·lar el sistema elèctric definitiu i programar el sistema de control automàtic. Durant la programació s'han fet diverses proves per separat de cada un dels sensors i servos per verificar les diferents funcions del programa. Paral·lelament, s'ha fet la construcció de la placa base, on es realitzen les connexions de tots els elements del circuit amb el controlador principal i els relés, i es reuneixen els diferents reguladors de tensió (Figura 149 i Figura 150). Abans de connectar els elements a aquesta placa, s'han fet proves per comprovar la correcta connexió de tots els pins de senyal i d'alimentació mitjançant una font d'alimentació a 12V, un oscil·loscopi i un multímetre.

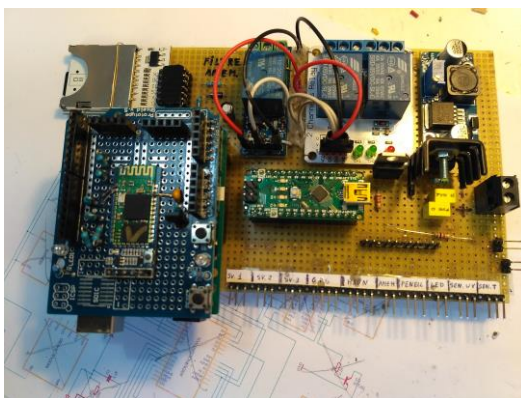


Figura 149. Vista superior de la placa electrònica base. Font: pròpia.

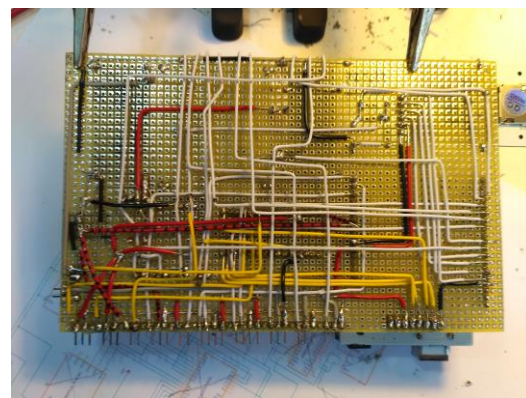


Figura 150. Vista inferior de la placa electrònica base. Font pròpia.

Arribats en aquesta fase del projecte, s'ha produït un fet catastròfic que ha posat serioses traves al projecte i ha alentit l'avanç de les etapes finals. El temporal Glòria, una tempesta on s'han registrat xifres rècord en el Mediterrani, ha aixecat onades per sobre el dic de l'escullera del port Marina Vela Barcelona i ha deixat totalment fora de servei les instal·lacions de l'edifici NT-2 de la Facultat de Nàutica de Barcelona, que és el lloc on s'ha estat duent a terme el projecte SenSailor fins el moment (Figura 151). Una sort impossible d'explicar, però, ha fet que gairebé tot el material del projecte SenSailor quedi intacte i protegit de les destrosses (Figura 152). Passat el temporal, s'ha traslladat tot el material del projecte a l'edifici seu de la facultat per reparar els imperfectes i seguir avançant.



Figura 151. Taller afectat per l'impacte de les onades del temporal Glòria. Font: pròpia.



Figura 152. SenSailor recuperat del taller després del temporal Glòria. Font: pròpia.

Al taller de mecànica, el nou espai utilitzat, s'han realitzat les següents proves començant per la del sistema de commutació entre el mode de navegació manual i l'automàtic. Amb el vaixell ubicat dins el taller i l'electrònica disposada dins el buc, s'ha carregat un programa al controlador principal amb una funció exclusivament destinada a fer aquesta funció. S'ha anat corregint el programa de per eliminar errors fins que s'ha aconseguit fer commutar els relés amb l'ordre generada des del comandament a distància.

A partir d'aquí, s'ha carregat a l'Arduino principal el programa de control complet i s'han anat fent proves per corregir errors. Un dels problemes que han sorgit està relacionat amb la incompatibilitat entre algunes de les llibreries utilitzades per fer funcionar sensors. Aquest problema s'ha resolt connectant el GPS als pins RX i TX del perifèric USART de l'Arduino, permetent que la llibreria de funcions GPS no generi conflictes amb altres llibreries del programa.

A continuació, s'han seguit fent proves al sistema de control principal per depurar la part del mode de navegació automàtica. Durant la realització d'aquestes proves s'han donat diversos inconvenients pràctics derivats del Glòria que, com s'ha dit anteriorment, han alentit el procés. Per un costat, el penell ha quedat malmès per l'aigua salada, ja que va quedar submergit quan les onades van inundar el taller. Per solucionar aquest problema, al programa de control

automàtic s'ha comentat la funció del penell i s'ha fixat una variable estàtica per simular un vent provinent d'una direcció constant.

Per altra banda, s'han tingut problemes pel què fa la cobertura del senyal GPS. Dins el taller de mecànica resulta impossible detectar satèl·lits, amb la qual cosa s'han hagut de fer les proves al vestíbul de la facultat, sota la claraboia (Figura 153). Aquesta solució ha permès millorar la cobertura, encara que obtenint un senyal feble. Tot i això, el fet d'estar a un lloc tant concorregut ha fet que el SenSailor sigut centre d'atenció i de preguntes, i les repetides interrupcions han suposat un gran fre per la correcta revisió del programa i la realització proves.

Posteriorment, el projecte s'ha trobat amb un altre impediment de causa externa d'una dimensió major. La pandèmia del COVID-19 (coronavirus) ha fet que s'hagin de prendre mesures dràstiques per evitar propagació de la infecció fins el punt de tancar de manera indefinida tots els centres universitaris, incloent la Facultat de Nàutica de Barcelona. Donada aquesta situació, ha sigut totalment inviable seguir amb les correccions del programa i no se n'ha pogut obtenir la versió definitiva. Tot i això, s'ha aconseguit obtenir una versió del codi molt avançada que només necessita alguns retocs per ser totalment funcional. Aquestes millores es duran a terme passada l'entrega de la memòria del projecte.



Figura 153. Verificació de les funcions del programa de control al vestíbul de la Facultat de Nàutica de Barcelona. Font: pròpia.

9.3. Navegació automàtica al mar i recollida de dades

Com s'ha explicat en els apartats anteriors, els imprevistos del temporal Glòria i la pandèmia del COVID-19 han impedit la finalització total del programa de control automàtic. Com a conseqüència, no s'han pogut realitzar les proves de mar d'aquest mode de navegació abans de la data d'entrega del treball. El sistema de recollida de dades s'ha pogut provar en sec i funciona, però no s'ha pogut posar en pràctica al mar pel mateix motiu.

Capítol 10. Pressupost i finançament

Una part molt important de tot projecte d'enginyeria consisteix en analitzar les despeses del projecte i considerar quins mètodes s'utilitzaran per finançar-lo. Un projecte no és viable si el balanç entre les despeses i els ingressos no és assumible per l'equip. Tenint present això, s'ha fixat des d'un inici una especificació que contemplava la viabilitat econòmica, i s'ha tingut en compte al llarg de tot el procés de disseny i construcció. A l'hora de prendre decisions sobre com realitzar una part del projecte, s'han estudiat les alternatives i s'ha considerat aquesta especificació com un factor més a tenir en compte. Donada la importància que té l'aspecte econòmic per culminar el projecte amb èxit, s'ha portat un control rigorós de totes les despeses del projecte. També s'ha establert un pla estratègic de finançament tot buscant diverses fonts d'ingressos.

El capítol s'estructura de la següent manera. A l'apartat 10.1 es fa el càlcul de pressupost del projecte suposant que es dugués a terme amb fins comercials, separant les despeses de material, els costos de llicències de programes informàtics i els sous dels treballadors. A la secció 10.2 s'explica el pla de finançament que s'ha seguit al llarg del projecte per cobrir les despeses de material de la fase constructiva. Finalment, al punt 10.3 es mostra el balanç econòmic real del projecte.

10.1. Pressupost

El pressupost total d'aquest projecte d'enginyeria s'ha desglossat en 3 parts principals. En primer lloc es troba el pressupost material, que consisteix en la compra física de la matèria utilitzada per la construcció del producte. En segon lloc es classifica el pressupost de llicències per la utilització dels programes informàtics de disseny. Per últim, es troba el pressupost de personal, que engloba els sous dels treballadors.

A la realitat, aquest projecte només ha implicat despeses de material, donat que al ser un projecte acadèmic les llicències venen donades gratuïtament i els treballadors no reben cap retribució econòmica. De totes maneres, s'ha calculat el pressupost total del projecte per donar una idea del pes econòmic que implicaria la realització d'aquest projecte a nivell comercial. Cal destacar que no s'han tingut en compte les despeses de lloguer de local ni d'eines utilitzades, ja

que s'ha considerat que aquest cos s'inclouria amb el pressupost general de l'empresa en qüestió, no del projecte.

10.1.1. Pressupost de material

Les despeses de material inclouen totes les matèries primeres i utensilis adquirits amb la finalitat de construir el vaixell. Alguns tenen l'objectiu de passar a formar part del producte final per constituir la seva estructura o sistemes, mentre que uns altres s'utilitzen com a material d'ajuda a la fabricació però que no s'integren a l'objecte construït. Així doncs, s'ha classificat el pressupost de material en les següents parts:

- **Material de construcció:** tot aquell material o matèria primera que en el procés de fabricació passin a formar part del vaixell.
- **Material fungible:** tot aquell material o matèria primera utilitzada en el procés de construcció del vaixell però que no passa a formar part del producte final. Aquí s'inclouen, per exemple, els materials utilitzats per fabricar el motlle, pots de mescla, espàtules, recanvis de discs abrasius per la llimadora i paletines, entre altres.
- **Electrònica:** tots els equips electrònics i elèctrics necessaris per la navegació autònoma. S'inclou la bateria, panell solar, sensors, equips de localització, connectors, cables i petits components electrònics de la placa base, entre altres.
- **Equips de Protecció Individual (EPIs):** material de protecció utilitzat pels treballadors durant la construcció del vaixell.

Cada una d'aquestes parts representa un pes diferent dins el pressupost de material. A la Taula 44. Despeses de material (en €). Font: pròpia. es mostra el cost real de cada una d'elles (indicat en €) i a la Figura 154 un diagrama circular que representa gràficament la distribució proporcional.

Material de construcció	1307,16
EPI	144,67
Material fungible	262,56
Electrònica	1281,89
PRESSUPOST DE MATERIAL	2996,28

Taula 44. Despeses de material (en €).
Font: pròpia.

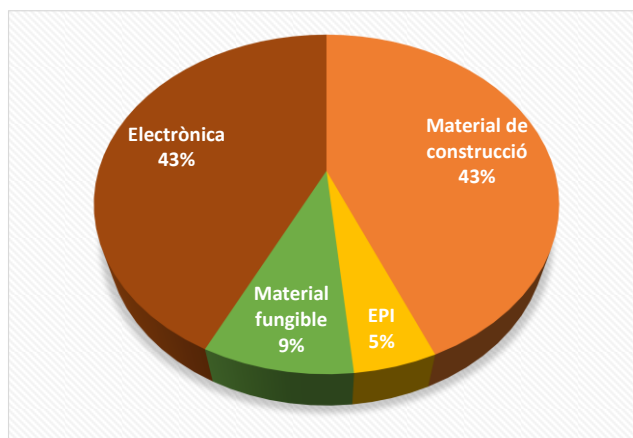


Figura 154. Diagrama circular amb les despeses de material. Font: pròpia.

A l'Annex II. Planificació es mostra una taula amb el desglossament complet del pressupost de material. Es mostren totes les despeses que s'han realitzat en el projecte i s'estima el preu d'aquells components que finalment no s'han adquirit però que serien necessaris per una

navegació autònoma de llarga durada, com ara el panell solar o el Sistema d'Identificació Automàtica (AIS).

10.1.2. Pressupost de llicències de programa

Al llarg del desenvolupament d'aquest projecte s'han utilitzat diversos programes informàtics com a suport per les diferents tasques de càlcul i disseny:

- **Maxsurf Modeler:** Disseny i parametrització de les formes del buc.
- **Maxsurf Stability:** Càlculs d'estabilitat i determinació de la distribució de les masses dins el buc.
- **Maxsurf Resistance:** Càlcul de resistència a l'avanç per optimitzar les formes i dissenyar el sistema propulsiu.
- **Rhinoceros:** Disseny i modelatge 3D del vaixell.
- **AutoCAD:** Confecció de plànols.
- **Microsoft Excel:** Realització de càlculs pel disseny de diferents parts del vaixell i la gestió econòmica.
- **Microsoft Word:** Redacció de la memòria del treball, registrar el seguiment del projecte i elaboració de la *Guia de l'usuari* explicat a l'*Annex I. Guia de l'usuari del SenSailor*.
- **Microsoft Project:** Planificació de les etapes del projecte i les seves fites.
- **JavaFoil:** Disseny del perfil alar de la vela i l'aleró i estudi del seu rendiment.
- **IDE Arduino:** Programació del sistema de control del vaixell.

A la Taula 45. Pressupost de llicències (en €). Font: pròpia. s'exposa el cost de la llicència d'ús comercial de cada un d'aquests programes (indicat en €) excepte el dels dos últims, que són de lliure disposició.

Paquet Maxsurf	800,00
Rhinoceros	995,00
AutoCAD	1116,00
Microsoft Word	89,99
Microsoft Excel	135,00
Microsoft Project	199,99
PRESSUPOST DE LLICÈNCIES	3335,98

Taula 45. Pressupost de llicències (en €). Font: pròpia.

10.1.3. Pressupost de personal

A les despeses de personal s'han inclòs els sous aproximats que cobrarien les persones que han estat implicades en aquest projecte si tingués una finalitat comercial. Es diferencien 2 càrrecs

diferents segons la seva funció en el projecte. Per calcular el cost total de cada treballador al llarg de tot el projecte s'ha tingut en compte les hores treballades i l'experiència laboral.

A aquest projecte s'hi ha dedicat un número d'hores força superior a la mitjana de treballs de fi de grau. Concretament es calcula que cada un dels estudiants autors del projecte hi ha dedicat unes 2.000 hores en total. Tot i això, gran part d'aquestes hores es deuen a la inexperiència a la part de construcció, que ha requerit seguir un procés d'autoaprenentatge a base de fer i desfer, allargant així la durada del projecte. Es preveu que la realització del projecte per segona vegada, amb experiència prèvia, podria reduir un 40% el temps de treball aproximadament, suposant una càrrega de temps d'un 1.200 hores per cada estudiant.

És evident que les 2.000 hores no reflecteixen la durada real del projecte. Per aquest motiu, el cost del personal implicat s'ha calculat en base a la durada del projecte aplicant un factor de reducció del 40%. Així doncs, es considera que la durada total del projecte no ha sigut de 64 setmanes sinó de 38. A continuació s'expliquen els 2 càrrecs diferenciats entre el personal.

- **Enginyers en formació:** Es tracta dels 2 estudiants autors del projecte que han desenvolupat el disseny i construcció de l'embarcació autònoma. Aplicant el factor de reducció de temps per inexperiència, s'ha calculat que el temps treballat és de 1.200 hores cada un. El preu per hora s'ha ajustat al salari aproximat d'un estudiant d'enginyeria. Concretament s'ha considerat un cost de 35 €/h.
- **Enginyers amb experiència:** Es tracta dels 2 enginyers que han dut a terme la tasca d'assessorament al llarg del projecte. Les hores treballades s'han calculat considerant 1 hora d'assessorament setmanal durant 34 setmanes (descomptant el període de vacances del mes d'agost). El preu per hora s'ha ajustat al salari aproximat d'un enginyer amb experiència. Concretament s'ha considerat un cost de 60 €/h.

A continuació es mostra el càlcul del pressupost de personal del projecte.

	Número de treballadors	Hores de treball	Sou per hora [€/h]	Cost [€]
Enginyers en formació	2	1201,8	35	84126
Enginyers amb experiència	2	38,4	60	4608
PRESSUPOST DE PERSONAL				88734

Taula 46. Pressupost de personal. Font: pròpia.

Així doncs el pressupost total del projecte es desglossa en les 3 parts esmentades. A continuació es mostra una taula resum amb cost de les tres parts i la suma de la quantitat total (indicat en €). També es mostra un diagrama circular on es mostra gràficament el pes proporcional de cada part dins el total.

Pressupost de llicències	3335,98
Pressupost material	2996,28
Pressupost de personal	88734,00
PRESSUPOST TOTAL	95066,26

Taula 47. Pressupost total (en €). Font: pròpia.

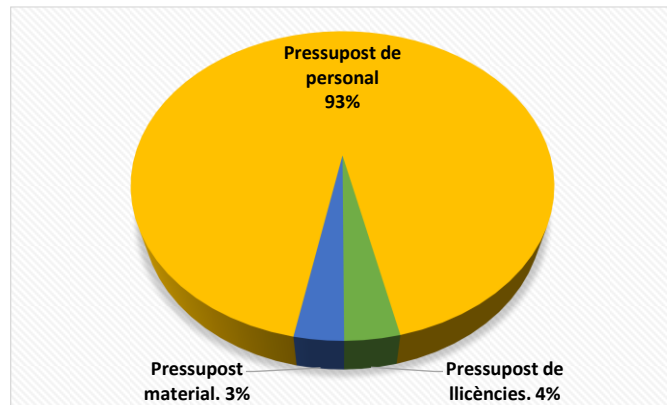


Figura 155. Diagrama circular del pressupost total. Font: pròpia.

10.2. Pla de finançament

Com s'ha explicat anteriorment, a la pràctica els costos d'aquest projecte han sigut solament els de l'adquisició de material. Tot i això, el valor d'aquesta despesa és considerable, tenint en compte que el projecte es tracta d'un treball de fi de grau sense retribucions econòmiques. Per aquest motiu, des de l'inici del projecte s'ha establert un pla de finançament per compensar els costos i acabar obtenint una despesa neta el més reduïda possible.

Per fer-ho possible, s'han buscat alternatives per obtenir beneficis de més d'una font i així augmentar la fiabilitat del flux econòmic d'entrada. Un dels punts clau que ha contribuït a l'èxit del pla ha sigut la creació d'un compte d'usuari a la xarxa social Twitter sota el nom de **@SenSailor_drone**. El compte s'ha creat a l'inici de la fase de construcció i durant el transcurs del projecte s'han anat actualitzant notícies, fotografies i vídeos sobre el seu progrés. Aquesta idea sorgeix a partir del desig de donar visibilitat del projecte entre els estudiants de la facultat i també al sector d'empreses nàutiques, amb l'objectiu d'aconseguir col·laboració i suport econòmic.

També s'ha aconseguit donar visibilitat al projecte gràcies al Saló Nàutic 2019, on s'ha exposat el SenSailor a l'estand de la Facultat, i a una entrevista de ràdio al programa *El Far*, on s'ha explicat la finalitat del dron i el desenvolupament del projecte. A continuació s'exposen les vies d'ingrés establertes en el pla de finançament.

10.2.1. Convocatòria d'ajuts per a la realització de TFG i TFM innovadors, any 2019

Cada any, la Facultat de Nàutica de Barcelona destina una quantitat de diners a l'ajuda de TFGs i TFM amb l'objectiu d'incentivar la realització de projectes innovadors i amb criteris

mediambientals. L'adjudicació de la quantitat específica pels treballs candidats que hagin sigut seleccionats resta a criteri del jurat.

La candidatura a la beca es presenta mitjançant una memòria resum del projecte que ressalti els punts més innovadors, un pressupost desglossat i informació addicional complementària en format digital. En el cas del projecte SenSailor, s'ha sol·licitat la beca entregant la documentació corresponent i, a més, s'ha adjuntat informació complementària en format fotogràfic i audiovisual per destacar altres punts innovadors d'una manera original i atractiva.

S'ha portat un control rigorós de les factures de cada compra per tal de justificar el pressupost de la manera més acurada possible. A la vegada, aquest hàbit ha permès, posteriorment, conèixer les despeses de material del projecte amb precisió. Després de tot el procés de sol·licitud, aprovació i justificació de la beca, s'ha atorgat al projecte SenSailor una quantitat de **1.164,92 €**.

10.2.2. Patrocinadors

La segona via del pla de finançament es basa en la recerca d'empreses que estiguin disposades a col·laborar amb el projecte mitjançant aportacions econòmiques o de material. No ha sigut una via fàcil, ja que no hi ha un procediment establert, com en l'obtenció de beques, ni garanties d'èxit. Aconseguir patrocinadors depèn de l'habilitat de negoci del projectista, del grau de difusió del projecte i de l'impacte que pugui representar el resultat final en el sector. Tractant-se d'un projecte de fi de grau, també influeix molt la bona voluntat de l'empresa de contacte i les ganes de donar pensant en el bé dels estudiants, sense esperar una gran recompensa.

El procés ha sigut llarg i ha requerit un aprenentatge constant per saber dirigir-se a les empreses i acordar un benefici mutu. En aquest procés també s'ha mantingut un control rigorós del contacte amb cada una. En tot moment s'ha portat un registre de les empreses amb les quals s'ha intentat contactar, les que han donat resposta i les que han accedit a pactar un acord de patrocini. També s'han realitzat reunions presencials i converses virtuals per donar a conèixer el projecte i exposar la necessitat a diferents empreses.

S'ha creat un pòster per sintetitzar de manera gràfica i entenedora els detalls del projecte. Això ha servit en moltes ocasions com a carta de presentació amb els nous contactes. El compte de Twitter del projecte (esmentat anteriorment) també ha resultat molt útil per poder mostrar el projecte d'una manera fàcil i atractiva, i també per fer publicitat de les empreses patrocinadores.

Finalment, s'ha obtingut la col·laboració de 6 patrocinadors, els quals han accedit a aportar material pel projecte a canvi de fer visible el seu logotip tant al perfil de Twitter com a l'exterior del buc del SenSailor. S'estima que el valor econòmic de l'aportació en forma de material suma un total de **880 €**. A continuació s'esmenten els patrocinadors del projecte i la seva contribució.

Institut de Nàutica de Barcelona

L'institut de Nàutica de Barcelona és un centre docent on s'imparteixen cicles formatius de grau mitjà i superior relacionats amb l'àmbit del mar (veure logotip a la Figura 156). Amb aquesta entitat s'ha tingut un tracte diferent a les altres. L'acord de patrocini no ha sigut a nivell comercial sinó acadèmic. Ha donat la casualitat que, a l'inici del curs 2019-2020, un dels dos estudiants del projecte, el Carles Manich Vallès, ha començat els estudis de grau mitjà de manteniment d'embarcacions d'esbarjo a aquest centre de manera simultània a la realització del TFG. A l'institut, on s'imparteixen assignatures pràctiques de fabricació i manteniment d'embarcacions, s'intenta treballar a partir de projectes d'embarcacions reals per tal d'enriquir l'ensenyament.

Quan s'exposa al professorat els dubtes referents a l'acabat superficial del SenSailor, l'institut es mostra obert a acceptar el projecte SenSailor com una oportunitat per formar a l'alumne amb l'especialitat de materials compostos. Així doncs, durant el mes de setembre es trasllada el buc a la drassana de l'Institut de Nàutica de Barcelona i, amb l'ajuda del professorat, es realitzen les tasques de massillat i pintat. Cal ressaltar que aquesta fase del projecte resultava, en aquell moment, la part menys intuïtiva de tot el procés de construcció, i l'ajuda de l'Institut va ser absolutament imprescindible per finalitzar el buc i els apèndixs amb èxit.

A les tasques realitzades a la nova drassana, l'Institut de Nàutica de Barcelona no només ha aportat ajuda i consell pràctic, sinó també formació en la matèria i una dedicació i atenció personal que agraïm profundament. També ha cedit material per acabar algunes parts del vaixell i eines especialitzades en la manipulació de materials compostos.

Boat Security

Boat Security és una empresa que ofereix diversos serveis destinats al sector de la nàutica d'esbarjo, especialment als vaixells de lloguer (veure logotip a la Figura 157). Entre els diversos serveis que disposa, com ara videovigilància i internet a bord, n'ofereix un anomenat Boat Track. Aquest sistema permet localitzar i vigilar el vaixell des de terra a temps real, a través d'un compte d'usuari a la pàgina web de l'empresa. El mateix dispositiu ofereix la possibilitat d'informar de l'estat de bateria del vaixell, la velocitat, i donar alerta via SMS davant certs perills com col·lisions, nivell alt de sentina, entre altres.

Durant el Saló Nàutic 2019, on s'exposa el SenSailor a l'estand de la Facultat de Nàutica de Barcelona, sorgeix l'oportunitat d'intercanviar idees entre diferents empreses i *Boat Security* es mostra oberta a establir un acord de patrocini cedint-nos un dispositiu de *Boat Track* de manera gratuïta a canvi de fer difusió de la seva marca. El servei que ofereix aquest dispositiu s'ajusta perfectament a les necessitats del projecte, amb la qual cosa s'accedeix a tancar l'acord. A més, el dispositiu consta d'una bateria pròpia d'emergència pròpia amb una autonomia de 16 hores, que permetria localitzar el vaixell en cas d'avaria elèctrica.

Ventus Electrónica Náutica

Ventus Electrónica Náutica és una empresa amb seu a Barcelona dedicada a la distribució d'equips de telecomunicacions, electrònica, electricitat i informàtica d'aplicació nàutica (veure logotip a la Figura 158). En el moment que s'estableix el primer contacte amb aquesta empresa, es convoca una reunió presencial per exposar el projecte i demanar consell sobre alguns aspectes relacionats amb l'autonomia i la visibilitat enmig del mar.

La rebuda és molt bona, i es mostra oberta a resoldre qualsevol tipus d'ajuda que estigui relacionada amb la seva especialitat. El consell de la persona amb qui es parla, capità de professió, resulta essencial per entendre que per donar visibilitat a un vaixell tant petit com el SenSailor no n'hi ha prou amb un reflector de radar, sinó que es necessita un equip actiu com ara un Sistema d'Identificació Automàtica (AIS). Amb aquesta acollida, l'empresa cedeix al projecte SenSailor una bateria de 25 Ah i es mostra disponible per qualsevol altra necessitat.

Velas Fonduco

Velas Fonduco és un negoci de veleria ubicat al polígon industrial de la Ciutat de Maó, Menorca, dedicat a l'elaboració i reparació de tot tipus de veles i elements tèxtils relacionats amb el sector nàutic (veure logotip a la Figura 159). Aprofitant les vacances del mes d'agost a l'illa de Menorca, es contacta amb la propietària del negoci i es visita el taller per explicar el projecte i demanar consell per l'elaboració del folre de la vela.

La resposta rebuda és molt positiva. Es mostra un gran interès pel projecte i es resolen aspectes pràctics de la construcció de la vela. A més d'aquesta ajuda, cedeixen gratuïtament diferents tipus de materials útils per l'aplicació del projecte, com ara teixit Dacron, teixit adhesiu per veles, cinta adhesiva tèxtil resistent a l'aigua i una cremallera resistent a l'ambient marí, entre altres.

RC Tecnic

RC Tecnic és una botiga especialitzada en robòtica i modelisme ràdio control ubicada a la ciutat de Barcelona (veure logotip a la Figura 160). De tots els intents fets per trobar patrocinadors, RC Tecnic és la primera marca que confia en el projecte i accepta un acord de patrocini. Donada la seva especialitat, cedeix de manera gratuïta els dos servos dels timons i es mostra obert a qualsevol altre necessitat o dubte. Malgrat que l'aportació d'aquest patrocinador és menor que en altres casos, el seu paper resulta fonamental ja que, al donar-hi suport, reforça la credibilitat del projecte i esdevé la guspira que permetrà que més entitats hi vulguin col·laborar.

Ateneu de Fabricació La Fàbrica del Sol

L'Ateneu de Fabricació La Fàbrica del Sol és un espai públic impulsat per l'Ajuntament de Barcelona (veure logotip a la Figura 161). És un centre que treballen a favor de la sostenibilitat i es mostren oberts a aconsellar i acompanyar projectes que beneficiïn el medi ambient.

Ensenyen a utilitzar la tecnologia digital aplicant criteris d'ecodiseny, estalvi energètic i economia circular.

La seva forma de treballar es basa en l'intercanvi de coneixements. Seguint aquesta metodologia, es pacta amb ells un acord per poder gaudir del seu servei d'impressió 3D i de vinils a canvi d'una formació per part nostra sobre programació i aplicacions de d'Arduino. La seva col·laboració ha sigut imprescindible per poder complir l'acord de patrocini amb la resta de col·laboradors ja que, gràcies a ells, s'han pogut fabricar els vinils dels diversos logotips per poder-los disposar al costat del vaixell.



Figura 156. Logotip de l'Institut de Nàutica de Barcelona. Font: [39].



Figura 157. Logotip de l'empresa Boat Security. Font: [40].



Figura 158. Logotip de l'empresa Ventus Electrónica Náutica. Font: [41].



Figura 159. Logotip de l'empresa Velas Fonduco. Font: [42].



Figura 160. Logotip de l'empresa RCTecnic. Font: [43].



Figura 161. Logotip de l'Ateneu de Fabricació la Fàbrica del Sol. Font: [44].

10.2.3. Micromecenatge

El micromecenatge és un mètode d'obtenir finançament per impulsar projectes. Es basa en la col·laboració d'un col·lectiu de persones per donar suport econòmic als esforços d'altres persones per iniciar projectes. Les quantitats aportades són petites, però s'intenta fer arribar la campanya a un número prou gran de donants per assolir la fita econòmica plantejada. A canvi,

el beneficiari sol aportar algun tipus de recompensa als donants, que varia normalment amb la quantitat aportada.

Verkami és una plataforma de micromecenatge creada a Catalunya que facilita aquest mètode de finançament. El projectista que llença una campanya de finançament compta amb el suport d'un equip que l'acompanya, guia i aconsella per augmentar les probabilitats d'èxit. Des de l'inici de la campanya, el projectista disposa de 40 dies per assolir l'objectiu de diners establert. Passat aquest temps, si s'ha superat la fita el projectista ingressa la quantitat obtinguda i els donants la seva recompensa. En cas contrari, es retornen totes les donacions als mecenes i el projectista no obté cap benefici.

Al mes de setembre de 2019, s'inicia la preparació d'una campanya de micromecenatge pel projecte SenSailor. Abans d'iniciar els 40 dies de la campanya, tot projectista disposa d'un temps per preparar una pàgina web de presentació del projecte i planificar les recompenses. En el cas de la campanya SenSailor, s'inicia aquest període de preparació. Tot i això, just abans d'iniciar la campanya es rep una donació gran de diners per una altra via que fa replantejar l'estratègia del micromecenatge i finalment es decideix anul·lar la campanya.

10.3. Balanç econòmic

Aquest apartat mostra el balanç econòmic entre els ingressos i les despeses del projecte. Amb el pla de finançament exposat a l'apartat anterior s'ha buscat ingressar una certa quantitat de diners, no amb l'objectiu d'obtenir beneficis econòmics del projecte sinó de minimitzar la despesa generada. El balanç que es mostra continuació només té en compte les despeses de material ja que, a la pràctica, són les úniques que s'han realitzat. Juntament amb aquestes despeses, exposades a l'apartat 10.1.1, s'ha sumat una altra quantitat que pertany a les pèrdues econòmiques degudes a l'incident del temporal Glòria, on es va haver de comprar material nou.

Als beneficis s'inclouen els obtinguts a través de les 3 vies de finançament exposades a l'apartat anterior. Juntament amb aquesta quantitat, també es suma el valor econòmic d'alguns equips electrònics considerats essencials per la navegació autònoma, però que finalment no s'han adquirit donat que el prototip encara està en fase de proves.

A continuació es mostra una taula amb les despeses generades, els ingressos obtinguts i el balanç econòmic final.

DESPESES	Pressupost material	2996,28
	Desperfectes del Glòria	70,20
INGRESSOS	Material no adquirit	500,21
	Beca TFG	1165,92
	Patrocinadors	877,24
	Altres aportacions	500,00
BALANÇ		-23,11

Taula 48. Balanç econòmic real del projecte (en €). Font: pròpia.

Capítol 11. Conclusions i línies futures

11.1. Conclusions

A l'inici d'aquest projecte s'ha establert com a primer objectiu dissenyar i construir una embarcació capaç de navegar de manera autònoma a alta mar. Després d'investigar les condicions de navegació i determinar les especificacions del vaixell s'ha optat per un vaixell de 2 metres d'eslora, propulsat a vela i alimentat amb energia solar, el qual se n'ha assolit la seva construcció i avarada.

A l'hora de fixar les especificacions del vaixell, s'han pres com a condicions imprescindibles la viabilitat constructiva i econòmica. Per aquest motiu s'ha fet ús de tècniques constructives i materials amb una relació qualitat/preu alta, prioritzant un preu baix. Això ha fet que certes parts del vaixell s'hagin deixat amb un resultat funcional però que donin peu a ser millorades de cara a una segona volta al projecte per obtenir millors prestacions.

El funcionament de l'embarcació s'ha posat a prova en diverses condicions i s'ha verificat que el vaixell navega a vela de manera estable, d'acord amb el previst segons l'aplicació que se li vol donar. Degut a temes pràctics de la construcció el centre vàlic ha quedat lleugerament endarrerit respecte el centre de deriva. Això fa que el vaixell sigui lleugerament ardent (amb tendència natural a girar cap al vent), però es pot solucionar disposant més superfície antideriva a la part de popa (per endarrerir el centre de deriva) o bé mantenint els timons amb un cert angle (molt petit) cap a sotavent perquè corregeixi aquest efecte i el vaixell navegui en línia recta.

En aquest treball s'ha dissenyat una vela amb un sistema de regulació d'angle d'atac innovador basat amb una ala rígida en vertical que pivota lliurement al voltant d'un pal, i un aleró que li fixa l'orientació respecte el vent. Aquest sistema permet regular l'angle d'atac de manera més exacta, amb un codi de programació més simple i amb un consum elèctric molt més baix, respecte una vela de tipus convencional. També és més robusta i fiable de cara a la navegació autònoma.

Encara que la vela hagi estat dissenyada per poder afrontar les condicions de la zona 2 de navegació, el procés de construcció manual emprat no garanteix que pugui resistir el vent màxim associat a la categoria B de disseny, navegació a alta mar, que arriba fins la força 8 a l'escala de Beaufort. Possiblement amb aquestes condicions de vent la integritat de la vela quedaria

afectada. Tot i això, es preveu que es mantindria l'estanquitat i la flotabilitat del buc i els apèndixs, conservant en funcionament els sistemes electrònics i el sistema de localització, que permetria recuperar l'embarcació.

Les proves de navegació s'han realitzat mitjançant el mode de control manual (amb control remot). Malauradament, degut al temporal Glòria primer i al confinament de la pandèmia del COVID-19 després, no s'han pogut realitzar totes les proves del sistema automàtic necessàries planificades a l'iniciar el projecte. Tot i això, s'ha realitzat el disseny del sistema de control i la programació, s'han fet els assajos en sec, simulant diverses condicions de vent i coordenades de way-points. També s'ha deixat constància dels diagrames de flux del programa per tal que el sistema es pugui implementar a través d'altres controladors o llenguatges de programació, diferents als utilitzats en aquest treball.

Pel mateix motiu, no s'ha posat a prova el vaixell a travesses llargues per verificar l'autonomia al llarg de 24h, però s'han realitzat els càlculs de dimensionament necessaris per preveure que ho pugui fer. El panell solar escollit dins l'oferta disponible al mercat per alimentar el sistema elèctric, d'acord amb els càlculs realitzats, és el de la marca UNITECK amb número de referència L54231, per la seva bona relació qualitat/preu i per les seves prestacions. Aquest producte no s'ha adquirit de moment perquè no s'ha previst cap navegada de llarga durada. En cas de necessitat de cara al futur es pot considerar aquesta recomanació. Cal tenir en compte, però, que si es fan modificacions al sistema elèctric s'ha de realitzar altre cop el procediment de dimensionament dels panells solars per comprovar que puguin subministrar l'energia elèctrica necessària.

El segon objectiu establert és capacitar l'embarcació per tal que pugui prendre mesures meteorològiques i marines d'interès científic. Per fer-ho possible, s'han instal·lat una sèrie de sensors senzills però funcionals que permetin fer les primeres proves de recollida de dades. Més endavant aquests sensors poden ser substituïts per d'altres més precisos o amb prestacions diferents. També s'han implementat a la placa electrònica 2 mòduls SD per tal d'emmagatzemar les dades de navegació i de les mesures dels sensors.

El tercer objectiu establert és crear un primer prototip des d'on es pugui seguir la recerca i ampliar les seves funcions. Amb els resultats assolits d'aquest projecte, el vaixell queda a disposició de la Facultat de Nàutica de Barcelona perquè a través d'ell es puguin motivar als alumnes a posar en pràctica els coneixements de classe per tal d'implementar-hi millores. Els possibles treballs futurs poden incloure matèries molt diferents, fet que permetrà que l'alumnat sàpiga concordar els diversos coneixements en un projecte comú.

Aquesta memòria s'ha redactat amb la intenció de recollir tot el coneixement après i, d'aquesta manera, facilitar la continuació del projecte a mans d'un nou equip d'estudiants d'enginyeria. Els treballs futurs queden recollits al proper apartat.

El quart objectiu d'aquest projecte és dissenyar l'embarcació per tal que, a part de l'aplicació científica donada, es pugui adaptar per participar en regates de vaixells autònoms com per exemple la International Robotic Sailing Regatta [28], la World Robotic Sailing Championships [14] i la Microtransat Challenge [15]. En aquest cas, certes parts del vaixell i del sistema de control s'haurien d'adaptar a les noves necessitats, però el buc podria mantenir-se intacte, ja que la seva eslora entra dins el marge permès per la normativa d'aquestes competicions.

El cost del material adquirit pel projecte ha sigut de 2.566,27€, considerant també les despeses ocasionades pel temporal Glòria. Gràcies a les aportacions de patrocinadors i de la beca de la facultat per a TFGs innovadors, s'ha recuperat un 99,9% de la inversió.

El projecte SenSailor ha disposat de diverses vies de difusió que han sigut molt importants a l'hora de donar-li visibilitat i trobar col·laboradors i patrocinadors. En primer lloc, s'ha mantingut actiu el compte de Twitter *@SenSailor_drone* [37], on s'ha anat fent un seguiment fotogràfic i explicatiu de l'avanç dels processos de construcció i proves de funcionament. També s'ha exposat el vaixell a l'estand de la Facultat de Nàutica de Barcelona al Saló Nàutic-2019. S'ha participat a una entrevista de ràdio al programa El Far, on s'ha explicat el projecte i la seva finalitat [56]. Finalment, s'han escrit publicacions sobre el projecte a l'apartat de notícies de la web de la UPC [57] i de l'empresa Ventus Electrónica Náutica, un dels patrocinadors del projecte.

Veient el projecte amb perspectiva, un cop superades totes les fases, els autors d'aquest projecte podem afirmar que un dels reptes més grans d'un treball teòric i pràctic és el fet de traslladar a la realitat els resultats del disseny o l'estudi numèric. Alhora, representa una activitat molt interessant de cara al procés de formació d'un estudiant d'enginyeria, donat que requereix posar en pràctica de manera conjunta els coneixements d'una gran quantitat de matèries diferents i ensenya a tenir una visió global d'un projecte així com desenvolupar moltes habilitats de manera simultània.

11.2. Línies futures

El projecte SenSailor va més enllà dels resultats obtinguts en aquest treball. Durant el procés que s'ha seguit fins el moment s'ha concebut el primer prototip d'una embarcació que, esperem, sigui només el primer pas a projectes més ambiciosos.

El desenvolupament de projectes aplicats a casos reals son una oportunitat immensa per aprendre. Són ocasions on cal aplicar el coneixement adquirit de moltes matèries diferents d'una manera conjunta, i això dona una visió global que ajuda a planificar els projectes de manera molt més eficient. Amb el desig que altres persones vulguin reprendre el projecte, a continuació s'apunten dues possibles ampliacions que es poden dur a terme de cara al futur.

11.2.1. Futur enfocat a fer travesses per aigües properes

Amb les traves del confinament del COVID-19 es va aturar el projecte en el punt en què es podrien començar a plantejar reptes més ambiciosos.

Aquest vaixell està preparat per navegar grans distàncies sense assistència. Un repte que es plantejaven els creadors del projecte de cara al futur era realitzar travesses de diferents distàncies per posar a prova l'embarcació, anar-la millorant i així anar augmentant la dificultat de l'objectiu. Així doncs, es podrien organitzar unes primeres rutes per la costa catalana, acompanyant el SenSailor amb una embarcació per observar el seu comportament i vigilar el trànsit. Després de comprovar la fiabilitat de l'embarcació, es podria plantejar augmentar el repte i programar una ruta fins a Balears, amb bona predicció de temps.

Abans d'això, però, cal treballar amb diversos aspectes del vaixell per fer-lo fiable i segur:

- Retocar el programa del pilot automàtic per eliminar qualsevol error i provar-lo amb diferents situacions de navegació.
- Comprovar la fiabilitat de la vela després de moltes hores d'ús i, si cal, construir-ne una de nova més robusta (veure més avall la proposta).
- Dotar el vaixell d'algun sistema per evitar col·lisions amb objectes fixos i mòbils, com a mínim instal·lar un sistema AIS (Automatic Identification System) per fer-lo visible a altres vaixells.
- Instal·lar panells solars que puguin abastir la demanda del sistema elèctric.
- Investigar altres necessitats que calgui cobrir per fer l'embarcació fiable i segura.

Aquest és un repte a llarg termini. Potser calen diversos treballs que tractin diferents aspectes i anar deixant registre del progrés perquè futurs projectistes puguin reprendre la feina. Aquests treballs poden ser tractats com a tema de TFG o TFM, però amb l'experiència de la feina feta fins el moment, els autors del projecte recomanem que el treball es faci en equip. Podria sortir així la iniciativa estudiantil de formar un equip SenSailor que es dediqui a treballar de manera constant amb el projecte, organitzar-se per especialitats segons les feines que s'hagin de fer i anar donant el relleu a les noves incorporacions.

11.2.2. Futur enfocat a la competició

Una altra sortida que podria donar molta empenta al projecte consisteix en adaptar el vaixell i equipar-lo amb els mitjans necessaris per participar a regates de velers autònoms, com per exemple la International Robotic Sailing Regatta [28], la World Robotic Sailing Championships [14] o la Microtransat Challenge [15]. La durada i el tipus de prova varia en funció de la competició.

Algunes d'aquestes regates consisteixen en petites proves que posen en joc les diferents capacitats dels velers. Per als prototips més experimentats existeixen modalitats que consisteixen en fer travesses llargues. La prova més ambiciosa d'aquesta modalitat és la

Microtransat Challenge, que consisteix en creuar l'Atlàntic. Depenent de la competició que es plantegi com a meta s'haurien de concentrar els esforços en millorar més un aspecte del vaixell o un altre. Consultar els requisits, normativa i detalls de les proves a les referències de les competicions.

Les adaptacions de l'embarcació han d'estar orientades a millorar al màxim el funcionament i la fiabilitat de l'embarcació i per complir amb els requisits que es requereixin a cada prova. Cal fer una avaluació de les necessitats i definir les modificacions més prioritàries, tant a nivell de construcció com de programació.

Seguint la línia de l'apartat anterior, els autors d'aquest projecte recomanem que el treball es faci en equip per poder cobrir millor les especialitats de les diferents tasques. Treballar acompanyat també és fonamental per assolir l'èxit dels projectes més ambiciosos.

Bibliografia i referències

- [1] Rodríguez Rodríguez, A., *Proyecto Nº 252. Buque oceanográfico de 7.000 T.* Escuela tècnica superior de Ingenieros Navales, Universidad Politècnica de Madrid (Disponible a: http://oa.upm.es/35835/7/PFC_Alejandro_Rodriguez_Rodriguez.pdf)
- [2] Pàgina web de Saildrone. <https://www.saildrone.com/news/saildrone-fleet-study-planet> (Data de consulta: gener de 2019).
- [3] Notícia sobre les boies oceanogràfiques espanyoles. Diari El País. https://elpais.com/sociedad/2014/02/04/actualidad/1391531931_466850.html (Data de publicació: 5 de febrer de 2014).
- [4] Torralbo Gavilán, J., apunts de l'assignatura *Inspecció Tècnica d'Embarcacions d'Esbarjo*. Facultat de Nàutica de Barcelona, Universitat Politècnica de Catalunya. (Disponible a: https://ocw.upc.edu/sites/all/modules/ocw/estadistiques/download.php?file=280692/2016/1/apuntes_primera_parte_nomenclatura_nautica_seguridad.pdf).
- [5] Álvarez París, A. i Vals Garcia, G., *Projecte 50 nusos. Optimització aerodinàmica d'una vela de windsurf de velocitat*. Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona, Universitat Politècnica de Catalunya. Febrer de 2004. (Disponible a: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3643/31133-1.pdf?sequence=1&isAllowed=y>).
- [6] Pàgina web de JavaFoil. <https://www.mh-aerotoools.de/airfoils/javafoil.htm> (Data de consulta: abril de 2019).
- [7] Airfoil Tools, base de dades de perfils NACA. <http://www.airfoiltools.com/> (Data de consulta: abril de 2019).
- [8] Tesi Schnaidt, M., *Coeficientes Aerodinámicos Cl Cd Cm*. Universidad Andres Bello, Santiago, Xile. Any 2006. Disponible a: <http://kimerius.com/app/download/5782358926/Coeficientes+aerodin%C3%A1micos+Cl,+Cd,+Cm.pdf>).
- [9] Tretow, C., *Design of a free-rotating wing sail for an autonomous sailboat*. KTH Institute of Technology School of Engineering Sciences. Estocolm, Suècia, any 2017. (Disponible a: <https://kth.diva-portal.org/smash/get/diva2:1145351/FULLTEXT01.pdf>).
- [10] Pàgina web de Alas Volantes. *Diseño, construccion y vuelo de alas volantes y otros modelos*. <http://www.alasvolantes.es/tecnica/9-diseno/145-calculo-larguero-sencillo.html> (Data de consulta: abril de 2019).
- [11] Valios Arregui, A., *Diseño de un velero de 60' para regatas oceánicas clase IMOCA 60*. Universidad de Cádiz. Març de 2012. (Disponible a: <https://rodin.uca.es/xmlui/handle/10498/14916>).
- [12] Larsson, L., E Eliasson, R. *Principles of Yatch Designs*. 2a edició. Londres: Bookcraft, any 2000, 332 p. ISBN: 0-7136-5181-4.

- [13] Notícia sobre l'onatge captat per les boies oceanogràfiques espanyoles. Diari El País. https://elpais.com/politica/2014/10/22/actualidad/1413970354_602120.html (Data de publicació: 22 d'octubre de 2014).
- [14] Pàgina web de World Robotic Sailing Championship. <https://www.roboticsailing.org/> (Data de consulta: febrer de 2019).
- [15] Pàgina web de la regatta Microtransat. <https://www.microtransat.org/> (Data de consulta: febrer de 2019).
- [16] Notícia sobre el veler autònom A-Tirma. Mi Playa de las Canteras. <https://miplayadelascanteras.com/2019/06/20/el-a-tirma-vuelve-a-navegar-en-las-canteras/> (Data de consulta: febrer de 2019).
- [17] Pàgina web de l'empresa Offshore Sensing AS. <http://www.sailbuoy.no/> (Data de consulta: febrer de 2019).
- [18] Pàgina web de l'empresa Openocean Robotics. <https://openoceanrobotics.com/force12explorer/> (Data de consulta: febrer de 2019).
- [19] Skene, N. L. *Elements of Yacht Design*. 1a edició. Nova York: Sheridan House, any 2001, 251 p. ISBN: 1-57409-134-4.
- [20] Llistat de participants de la Microtransat. Pàgina web de la Microtransat. <https://www.microtransat.org/wrsc2012/boats.php> (Data de consulta: febrer de 2019).
- [21] Pàgina web de l'empresa Saildrone. <https://www.saildrone.com/> (Data de consulta: febrer de 2019).
- [22] Directiva 2013/53/UE del Parlament Europeu i del Consell. (Disponible a: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=uriserv:OJ.L_.2013.354.01.0090.01.SPA&toc=OJ:L:2013:354:TOC).
- [23] Real Decret 98/2016, de l'11 de març. (Disponible a: https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2016-2578).
- [24] Norma UNE-EN ISO 12215-5:2019. (Disponible a: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=N0061477>).
- [25] Norma UNE-EN ISO 12217-2:2017. (Disponible a: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=N0059400>).
- [26] Gràcia Espinosa, J., Apuntes de Proyecto del buque y artefactos navales, Tema 2a Diseño de formas, Facultat de Nàutica de Barcelona, Universitat Politècnica de Catalunya, 2018.
- [27] Kewing, J. A. i Sonnenberg, U. B. *Approximation of the Hydrdynamic Forces on a Sailing Yacht based on the 'Delft Systematic Yacht Hull Series'*. Shiphydrodynamics Laboratory, Delft University of Technology. (Disponible a: http://www.deno.oceanica.ufri.br/deno/prod_academic/relatorios/2012/pinheiro/relat1/Subpasta3/_Delft%20systematic%20yacht%20hull%20series_Hydrodynamic%20forces%20sailing%20yachts.pdf).
- [28] Pàgina web de la International Robotic Sailing Regatta. <https://www.sailbot.org/> (Data de consulta: febrer de 2019).
- [29] Pàgina web del Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS). <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php> (Data de consulta: juliol de 2019).

- [30] Notícia sobre les veles rígides de l'empresa Bound4blue. Nobot. <https://www.nobot.com/futuro/david-ferrer-desclaux-de-bound4blue/> (Data de publicació 4 de desembre de 2018).
- [31] Imatge d'un veler amb l'aparell de Marconi. (Disponible a: https://www.pinterest.co.kr/pin/543739355003481147/?nic_v1=1aL44gmpfHfo1V13A0IMW9DiCFitfL5xLuyEfSoENY36ufutb2sV%2BQ2B5Tqxku6Xh).
- [32] Imatge d'un veler amb una vela semirrígida. (Disponible a: <https://ca.wikipedia.org/wiki/Fitxer:Bladef16-1up.jpg>).
- [33] Connectors aeris, disponibles a la web de la botiga Diotronic. https://diotronic.com/portahembras-jst-sm-2-54-2cts_8791/
- [34] Connectors blocs terminals, disponibles a la pàgina web de RS. https://es.rs-online.com/web/p/bloques-terminales-para-pcb/8024978?cjevent=6e8f49cfb87b11ea811a00530a180512&cm_mmc=ES-CJAFF--Commission+Junction--Generic--Kelkoo+Internet+SL--RS+Components+ES+Product+Feed
- [35] Explicació del funcionament de la vela del SenSailor. Publicació al compte de Twitter @SenSailor_drone. Disponible a: https://twitter.com/SenSailor_drone/status/1183910296861188096. (Data de publicació: 15 d'octubre del 2019).
- [36] Gómez, A. *Diseño de una estación meteorológica sin hilos y de bajo consumo*. (Disponible a: <https://sites.google.com/site/tfgalbertogomez/home/proyectos/Sensores/windvane>).
- [37] Compte de Twitter del projecte SenSailor, @SenSailor_drone. https://twitter.com/SenSailor_drone (Data de creació: maig de 2019).
- [38] Ruiz, E., i Reche, M. *Optimization of the rig for an autonomous sailing vessel*. Facultat de Nàutica de Barcelona, Universitat Politècnica de Catalunya. Any 2018. (Disponible a: <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/119322>).
- [39] Pàgina web de l'Institut de Nàutica de Barcelona. <https://agora.xtec.cat/ins-nauticabcn/> (Data de consulta: setembre de 2019).
- [40] Pàgina web de l'empresa Boat Security. <https://boatsecurity.com/> (Data de consulta: octubre de 2019).
- [41] Pàgina web de l'empresa Ventus Electrónica Náutica. <https://www.ventuselectronica.com/> (Data de consulta: setembre de 2019).
- [42] Pàgina web del Menorca Comercial, amb referència a l'empresa Velas Fonduco. <https://menorcacomercial.es/empresa/3051/> (Data de consulta: agost de 2019).
- [43] Pàgina web de la botiga RCTecnic. <https://www.rctecnic.com/> (Data de consulta: juliol de 2019).
- [44] Pàgina web de l'Ateneu de Fabricació La Fàbrica del Sol. <https://ajuntament.barcelona.cat/lafabricadelsol/ca> (Data de consulta: setembre de 2019).
- [45] Pàgina web de la llibreria d'Arduino Servo. <https://www.arduino.cc/en/reference/servo> (Data de consulta: novembre de 2019).

- [46] Pàgina web de la llibreria d'Arduino *OneWire*.
<https://www.arduinolibraries.info/libraries/one-wire> (Data de consulta: novembre de 2019).
- [47] Pàgina web de la llibreria d'Arduino *DallasTemperature*.
<https://www.arduinolibraries.info/libraries/dallas-temperature> (Data de consulta: novembre de 2019).
- [48] Fitxa tècnica del sensor UV. (Disponible a <https://datasheetspdf.com/pdf-file/1093061/ROITHNER/GUVA-S12SD/1>).
- [49] Fitxa tècnica del sensor de temperatura. (Disponible a: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20-PAR.pdf>).
- [50] Pàgina web de la llibreria d'Arduino *Wire*. <https://www.arduino.cc/en/reference/wire> (Data de consulta: novembre de 2019).
- [51] Fitxa tècnica del xip MPU-9250. (Disponible a: <https://invensense.tdk.com/wp-content/uploads/2015/02/PS-MPU-9250A-01-v1.1.pdf>).
- [52] Fitxa tècnica del sensor AK8963 (magnetòmetre, giroscopi i acceleròmetre), inclòs dins el xip MPU-9250. (Disponible a: <https://download.mikroe.com/documents/datasheets/ak8963c-datasheet.pdf>).
- [53] Pàgina web de la llibreria d'Arduino *TinyGPS++*.
<http://arduiniana.org/libraries/tinygpsplus/> (Data de consulta: novembre de 2019).
- [54] Fitxa tècnica del GPS. (Disponible a: https://www.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/NEO-7_DataSheet_%28UBX-13003830%29.pdf).
- [55] Procediments recomanats de la ITTC. *Resistance Uncertainty Analysis, Example for Resistance Test*. International Towing Tank Conference, any 2002. (Disponible a <https://ittc.info/media/2021/75-02-02-02.pdf>).
- [56] Entrevista de ràdio sobre el projecte SenSailor al programa El Far, dia 4 de novembre de 2019 a les 16:40. Disponible a <http://elfarfm.cat/>
- [57] Notícia de la Sala de Premsa de la Universitat Politècnica de Catalunya, el dia 9 d'octubre de 2019. (Disponible a: <https://www.upc.edu/ca/sala-de-premsa/noticies/dron-a-vela-creat-estudiants-upc-fnb-exposa-salo-nautic>).
- [58] Explicació del UART: <https://ca.wikipedia.org/wiki/UART> (Data de consulta: novembre 2019).
- [59] Explicació del Bus Sèrie Universal:
https://ca.wikipedia.org/wiki/Bus_en_s%C3%A8rie_universal (Data de consulta: desembre 2019).
- [60] Pàgina web de la llibreria *SoftwareSerial*:
<https://www.arduino.cc/en/Reference/softwareSerial> (Data de consulta: novembre 2019).
- [61] Explicació NMEA: https://ca.wikipedia.org/wiki/NMEA_0183 (Data de consulta: desembre 2019).
- [62] Imatge de dades NMEA: <https://tronixstuff.files.wordpress.com/2014/01/cba2f-arduino-gps-raw-nmea-data.jpg> (Data de consulta: juny 2020)

- [63] Explicació registres de memòria: https://ca.wikipedia.org/wiki/Registres_de_la_CPU (Data de consulta: juny 2020).
- [64] Explicació bus I²C: <https://ca.wikipedia.org/wiki/I%C2%B2C> (Data de consulta: juny 2020).
- [65] Explicació complement a dos: https://ca.wikipedia.org/wiki/Complement_a_dos (Data de consulta: juny 2020).
- [66] Enllaç de compra del producte lubricant recomanat pel manteniment del SenSailor.
<https://www.amazon.es/EN-UNO-Profesional-34167-multiusos/dp/B00K7Y5HT8>

Annex I. Guia de l'usuari del SenSailor

El SenSailor és un aparell amb moltes parts i funcions que cal conèixer per fer-ne un bon us. Sabem que aquest vaixell passarà per mans de persones que no han participat en el seu disseny i construcció i que, per tant, no tenen un coneixement global de les tasques de manteniment i manipulació del dron. Per tal de facilitar la familiarització dels nous projectistes amb l'ús del SenSailor, s'ha elaborat una guia amb un recull ordenat de tot el que cal saber a nivell d'usuari per fer funcionar l'embarcació. Aquest manual serveix com a referència bàsica per a qualsevol persona que vulgui intervenir amb l'ús del dron. Tot i això, cal remarcar que al llarg de la memòria s'expliquen aspectes de funcionament i detalls del programa que no estan recollits en aquesta guia però calen ser llegits per adquirir el coneixement suficient que tota persona hauria de saber a l'hora de dur a terme un projecte relacionat amb el SenSailor.

L'annex s'estructura de la següent manera. A la secció A 1.1, es recullen i s'expliquen les accions que es duen a terme amb més freqüència i les advertències i recomanacions que tot usuari ha de saber abans de començar a manipular el dron. A l'apartat A 1.2 s'exposa una guia detallada dels passos que cal seguir per desmuntar cada una de les parts del vaixell, ja sigui pel transport o pel manteniment. A la secció A 1.4 s'exposen consideracions referents al muntatge de les parts del vaixell. S'expliquen alguns passos que cal tenir en compte quan es segueixi l'ordre invers de la guia detallada al punt anterior. Per acabar, l'apartat A 1.5 és un recull de les operacions de manteniment que cal anar realitzant per conservar el bon estat del dron.

Tota persona que realitzi un projecte relacionat amb el SenSailor és responsable del seu bon us i manteniment.

A 1.1. Operacions habituals

En aquest apartat s'expliquen les operacions bàsiques que es duen a terme de manera habitual al vaixell per la realització de proves, o posada en funcionament.

A 1.1.1. Pràctiques a tenir en compte per la seguretat i la cura dels sistemes

- Mentre el SenSailor no estigui fent proves, navegant o tasques de manteniment al taller, és possible que es deixi exposat a algun lloc públic i visible com per exemple el vestíbul de la Facultat de Nàutica de Barcelona. Per seguretat, cal desmuntar i guardar a un lloc segur fora de l'abast del públic tots aquells equips que puguin ser extrets amb relativa facilitat. Aquests equips són: la capsa de l'electrònica, la bateria i el dispositiu Boat Track. Altres aparells com els sensors de vent, situats a llocs poc accessibles, poden quedar-se muntats segons el criteri del responsable actual del projecte.
- Quan es transporta el dron sobre el carro de varada cal tenir en compte en tot moment l'alçada de les portes i les bigues del sostre. En alguns casos el vaixell passa sense problemes amb el pal muntat però els sensors de vent arriben a tocar a dalt. Aquest és el cas, per exemple, de les bigues del sostre del taller de mecànica de l'edifici NT1 o la porta del taller de l'edifici NT2. En aquests casos serà suficient desencaixar el suport dels sensors sense treure els cables, fer passar el vaixell per sota l'obstacle i tornar-lo a muntar.
- Quan la vela està muntada i el cable del servo passat per dins el pal, sempre hi ha d'haver col·locat un cable d'acer de 1,5 mm de diàmetre que vagi des de la punta davantera del suport superior dels sensors fins l'anella de proa situada a la coberta. Aquest cable impedeix que la vela giri la volta sencera i els cables del servo es trenquin. Mentre no hi hagi posat el cable cal assegurar-se que això no passa.
- Periòdicament s'ha de fer una revisada als cargols i rosques del carro de varada, especialment els que suporten les quatre rodes. També cal comprovar l'estat de les cintes i de la fusta.
- Quan es posi el vaixell a l'aigua s'ha de remolcar a motor fins a la bocana del port. Durant aquest trajecte no es poden superar els 3 nusos de velocitat i s'ha de controlar el vaixell amb el mode manual, amb el comandament a distància. També s'ha d'evitar posar els timons tots a una banda i fer girs bruscs. La persona que porta el comandament ha de mantenir el SenSailor al centre de l'estela de l'embarcació remolcadora.
- El cap de remolc es ferma a la base del pal, a l'espai entre la coberta i la vela, i es fa passar cap a proa a través de l'anella roscada al pern de la junta de coberta de més a proa. En cap cas es ferma el cap de remolc directament a aquesta anella.
- Per governar el vaixell de manera correcta i segura mitjançant el mode manual, cal conèixer les instruccions de navegació especificades al capítol 7 *Disseny del sistema de control* de la memòria del treball.
- Si es transporta el SenSailor desmuntat a dins un vehicle o remolc, s'ha d'evitar que el pes recaigui sobre els *skegs* i timons. Cal falcar el buc de tal manera que aquests apèndixs quedin lliures d'esforços.

A 1.1.2. Manipulació dels dispositius de l'interior del buc

A l'interior del buc s'hi ubiquen els dispositius elèctrics i electrònic principals per fer funcionar el vaixell. Com s'explica al subapartat anterior, una de les operacions per garantir la seguretat i la cura dels sistemes consisteix en desmuntar, com a mínim, la capsa d'electrònica principal i la bateria. És possible que el vaixell quedi exposat al públic quan no s'hagin de fer proves o reparacions. Per tant, és prudent retirar aquests dos components, que són els més fàcilment desmuntables. Els altres dispositius es poden quedar al vaixell en funció del criteri del responsable actual del projecte. A continuació s'explica el funcionament de cada un d'aquests elements a nivell d'usuari.

Capsa d'electrònica principal

La capsa d'electrònica es col·loca sobre la plataforma ubicada a l'interior del buc, tocant al costat de proa dels reforços estructurals dels *skegs*. La capsa s'orienta de manera que el costat on hi ha la fila de connectors quedi mirant a proa i el connector d'alimentació, a babord. La capsa es fixa sobre la plataforma mitjançant 4 pernys roscats. Aquests pernys es fan passar a través de la plataforma de fusta i es cargolen a unes rosques femella encolades a l'altra banda de l'orifici, que queden ocultes sota la plataforma.

A la fila de connectors de la cara de proa de la capsa, s'hi connecten 4 connectors, cada un d'ells amb 4 terminals. Aquests connectors es troben a l'interior del buc, units als cables que venen dels diferents equips electrònics del vaixell. La connexió s'ha de fer respectant la numeració indicada sobre cada connector. Cada un anirà connectat a l'endoll de la capsa que tingui marcat el mateix número. El cable d'alimentació es connecta al port ubicat a la cara de babord de la capsa.

A l'interior de la capsa s'hi troba la placa electrònica amb els controladors, reguladors, relés i components electrònics varis del circuit. Al costat interior de la tapa hi ha fixada l'antena receptora del sistema de ràdio control i el seu controlador. Cal parar especial atenció a l'obrir i tancar la tapa per comprovar que els cables que van del mòdul ràdio control a la placa, no quedin forçats.

Bateria

La bateria, de 12 V, s'ubica a un suport fet a mida a l'interior del buc, a popa de l'enfognament que suporta el pal, i s'orienta de manera que els borns quedin mirant a popa (veure Figura 141, a la memòria). Si el vaixell ha de navegar, cal trincar la bateria amb un cap que eviti el seu desplaçament cap a popa i cap a dalt. Aquest cap pot fer-se a unes anelles metàl·liques que hi ha a un costat i a l'altre del suport de la bateria. Quan s'hagi de ficar i treure la bateria del vaixell a través de la tapa de registre de popa, no és recomanable deixar-la en cap moment recolzada sobre la coberta. Si es vol fer, cal posar una protecció (drap, cartró, etc.) perquè aquesta no ralli la pintura degut al seu pes.

Dispositiu Boat Track

Aquest dispositiu, cedit per l'empresa *Boat Security*, patrocinadora del projecte, serveix per localitzar el vaixell en temps real i rebre informació sobre la velocitat i l'estat de la bateria principal. També se li poden connectar altres sensors que registrin altres tipus d'informació, però en aquest cas cal consultar l'empresa del producte. Un cop encès el dispositiu, comença a enviar senyal amb la informació esmentada via ones de ràdio. Aquesta informació és captada per un receptor terrestre i penjada al núvol virtual. Per consultar aquesta informació a temps real, cal entrar a la web localizatubarco.com i entrar amb l'usuari i contrasenya del compte creat per al SenSailor (consultar aquesta informació als autors del projecte).

Per manipular aquest dispositiu cal accedir a través de la tapa de registre rodona situada a proa del pal, sobre coberta. El *Boat Track* està fixat sobre el calaix de l'orsa mitjançant un *velcro* d'alta subjecció. Aquest dispositiu s'alimenta a través de la bateria del vaixell, però en cas que s'esgoti o que sorgeixi una averia elèctrica general, disposa d'una bateria interna de reserva amb una autonomia de 16 hores, que permet seguir enviant informació sobre la posició per poder localitzar l'embarcació i recuperar-la.

Engegar el dispositiu

Inicialment, el dispositiu es troba apagat. Per encendre'l, cal seguir els següents passos:

- 1- Desmuntar la tapa superior de la capsa que protegeix el dispositiu.
- 2- Connectar el cable de la bateria interna.
- 3- Tancar la tapa de la capsa.
- 4- Assegurar-se que els connectors de la bateria principal del vaixell estan fent contacte.
- 5- Prémer el polsador blanc ubicat al costat de babord del suport de la bateria del vaixell. Aquest és el que connecta el dispositiu amb la bateria principal.
- 6- Esperar que s'encenguin els 2 LEDs del dispositiu. Si la bateria interna està descarregada, pot ser que trigui uns segons a encendre's.
- 7- Deixar el polsador blanc premut.

Apagar el dispositiu

Un cop engegat, el dispositiu no té cap interruptor de parada. El polsador blanc permet la connexió entre el *Boat Track* i la bateria del vaixell, però si es desconnecta el dispositiu seguirà en funcionament fins que s'esgoti la seva bateria interna (no recomanable per mantenir la bateria en bon estat). Per aquest motiu, quan no s'ha de fer servir el servei del *Boat Track* cal seguir el següent procediment per aturar-lo del tot:

- 1- Prémer el polsador blanc i posar-lo en posició obert (es desconnecta l'alimentació de la bateria principal).

- 2- Obrir la tapa del dispositiu.
- 3- Desconnectar la bateria interna.
- 4- Tancar la tapa.

En el cas que el dispositiu s'hagi retirat del vaixell per guardar-lo a un lloc segur o fer-ne manteniment, també s'haurà retirat el polsador blanc que el connecta amb la bateria principal del vaixell. En aquest cas, quan es vulgui fer servir el Boat Track es podran connectar els cables d'alimentació directament a la bateria del vaixell sense passar pel polsador.

Tant bon punt el dispositiu es connecti a la bateria del vaixell, s'encendrà encara que la bateria interna del Boat Track estigui desconnectada. Sempre és recomanable connectar primer la bateria interna. D'aquesta manera, si la bateria del vaixell o la connexió d'alimentació del Boat Track falla, el dispositiu seguirà enviant senyal de posició durant aproximadament 16h.

Si la bateria interna està connectada, quan es desconnecti el Boat Track de la bateria del vaixell, el dispositiu seguirà en marxa fins que s'esgoti la bateria de reserva. Per conservar el bon estat d'aquesta bateria interna, és recomanable desconnectar SEMPRE la bateria interna quan no es vulgui fer servir, per aturar el dispositiu.

Capsa dels sensors d'orientació

Situada al fons del buc, a proa del calaix de l'orsa, es troba una capsa d'electrònica petita on s'allotgen els mòduls que proporcionen la informació d'orientació del dron: GPS, magnetòmetre, oscil·loscopi i acceleròmetre. Actualment els dos darrers sensors esmentats no estan operatius, però es troben disponibles per a futures aplicacions. S'ha triat aquesta posició per evitar interferències amb altres components electrònics de la placa base.

La capsa està cargolada sobre una base de fusta de la mateixa manera que la capsa de l'electrònica principal (explicat anteriorment). A l'interior de la capsa hi ha una petita placa electrònica on s'hi ubiquen els sensors. Aquesta capsa no pot ser extreta amb facilitat del vaixell degut a que els cables que venen de l'electrònica principal estan encolats al vaixell i a la vegada soldats a la petita placa que hi ha a l'interior. És a dir, no hi ha connectors desacoblables. Tot i això, els sensors d'aquesta capsa estan fixats a la placa mitjançant connectors DIL. Això permet retirar el sensor amb facilitat de la capsa si s'ha de substituir.

Abans de posar el vaixell a l'aigua, és important engegar el sistema elèctric i observar el LED del mòdul GPS. Inicialment està encès de manera permanent. Quan capti el senyal de satèl·lits i tingui prou cobertura, s'il·luminarà de forma intermitent. Llavors, ja es pot tancar la capsa, la tapa de registre i posar el vaixell a l'aigua.

A 1.1.3. Posta a punt i encesa

Quan es vol posar el dron a l'aigua per iniciar una ruta de navegació s'han de tenir en compte una sèrie de passos per tal de garantir el correcte funcionament i evitar fallades.

- 1- Comprovar que s'hagi fet el correcte engeixament de les llimeres i rodament de la vela.
- 2- Si prèviament s'ha desmuntat l'orsa, comprovar que els orificis del calaix per on passen els perns que la subjecten, han quedat segellats amb cola estanca.
- 3- Comprovar el tancament hermètic de totes les juntes: perímetre de coberta i pas del pal a través de la mateixa. Això implica revisar el correcte roscat de tots els cargols i rosques.
- 4- Muntar la bateria dins el vaixell segons s'indica al punt *Bateria* de l'apartat A1.1.2 i comprovar que el seu estat de càrrega estigui al màxim.
- 5- Muntar la capsa d'electrònica principal segons s'indica al punt *Capsa d'electrònica* de l'apartat A1.1.2.
- 6- A un lloc descobert, encendre el sistema elèctric prement el pulsador vermell ubicat al costat d'estribord del suport de la bateria. La llum vermella del pulsador indica que el sistema elèctric està encès.
- 7- Observar la el LED vermell del mòdul GPS, ubicat a la capsa d'electrònica de proa. Inicialment està encès de manera permanent. Quan capti el senyal de satèl·lits i tingui prou cobertura, s'il·luminarà de forma intermitent.
- 8- Un cop capti el senyal de satèl·lits, tancar les dues tapes de registre assegurant que quedin ben encaixades.
- 9- Encendre el comandament de ràdio control i comprovar el seu estat de bateria (mostrat en pantalla o mitjançant un multímetre. És recomanable tenir bateries de recanvi durant el temps que es faci la navegació.
- 10- Proves del comandament: commutar al mode de navegació manual. Fer girar els timons cap una banda i l'altra i assegurar-se que giren de manera simultània. A continuació, girar l'aleró d'un costat a l'altre assegurant que pot fer tot el recorregut.
- 11- Proves del sistema automàtic: commutar al mode de navegació automàtica. Amb el dron sobre el carro de varada, fer-lo girar de manera que prengui diferents rumbos i comprovar que els timons i l'aleró reaccionen com toca segons la direcció de vent i el waypoint fixat.

A 1.1.4. Posar el vaixell a l'aigua

- 12- Tornar a commutar el sistema al mode manual. Tot el procés de posar el vaixell a l'aigua i remolcar-lo s'haurà de dur a terme amb el mode manual activat.
- 13- Fermar el cap de remolc com s'indica a l'apartat A1.1.1, *Pràctiques a tenir en compte per la seguretat i la cura dels sistemes*.
- 14- Posar el vaixell sota la grua i fermar les cintes al buc, ben assegurades. Comprovar que les cintes no quedin mal passades pels sensors de dalt del pal o per la vela.

- 15- Aixecar el vaixell i posar-lo a l'aigua. Parar molta atenció amb la vela i vigilar que l'aleró no toqui al moll. És recomanable que hi hagi algú a una barca pneumàtica ajudant a fer la maniobra des del nivell de l'aigua.
- 16- Remolcar el SenSailor fins a la bocana del port a una velocitat no superior a 3 nusos, prenent les precaucions indicades a l'apartat A1.1.1, *Pràctiques a tenir en compte per la seguretat i la cura dels sistemes*.

A 1.1.5. Treure el vaixell a l'aigua

Per treure el vaixell de l'aigua, seguir l'ordre invers a l'indicat a l'apartat A1.1.4, *Posar el vaixell a l'aigua*. Abans de posar el vaixell sobre el carro de varada, esbandir la sal amb aigua dolça. Quan s'apagui l'electrònica, cal recordar d'apagar també el dispositiu *Boat Track* com s'indica al punt *Dispositiu Boat Track* de l'apartat A1.1.2 .

A 1.2. Procés de desmuntatge del SenSailor

El SenSailor ha sigut dissenyat pensant en el seu fàcil transport i substitució de peces. Per aquest motiu, la majoria dels seus components poden ser desmuntats. En cas de necessitat, es pot carregar dins un cotxe familiar gran, amb l'orsa i el pal desmuntat. Els únics objectes que sobresurten del buc i que no poden ser desmuntats per temes estructurals són els *skegs* i el tub de l'enfognament. Els timons es poden desmuntar, però com que no sobresurten més que els *skegs* es poden deixar muntats.

Cal remarcar que, si es transporta el SenSailor desmuntat a dins un vehicle o remolc, **s'ha d'evitar que el pes recaigui sobre els *skegs* i timons**. Cal faltar el buc de tal manera que aquests apèndixs quedin lliures d'esforços.

A la figura que es mostra a continuació s'indiquen les mesures del volum prismàtic que ocupa el buc. Cal tenir-les en compte a l'hora d'escollir el mitjà de transport. Per facilitar la feina, també es pot transportar el buc amb l'orsa muntada, ajagut de costat dins el portaequipatges d'una furgoneta. Aquesta és una opció que cal considerar la seva viabilitat, ja que per desmuntar l'orsa s'ha d'accedir a l'interior del buc traient la coberta i obrint la unió estanca, i això representa un procés llarg que és millor evitar.

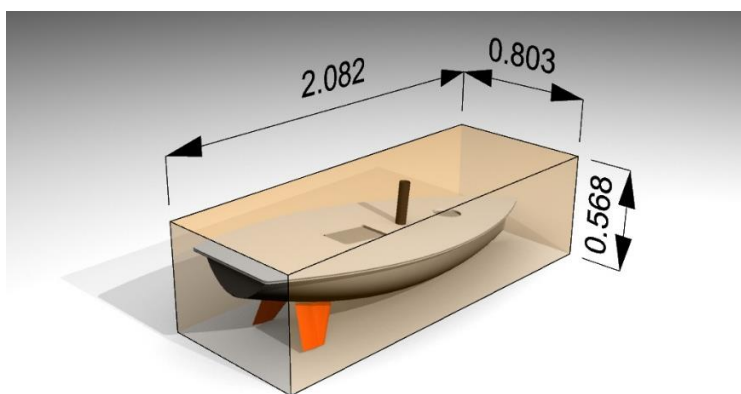


Figura 162. Volum prismàtic necessari per al transport del buc. Font: pròpia.

Seguidament s'indiquen els passos que cal seguir per desmuntar el SenSailor per complet. El procés està seccionat per blocs, corresponents a les diferents parts de l'embarcació. Es recomana dur a terme aquest procés amb la col·laboració de **2 persones** com a mínim.

A 1.2.1. Suport dels sensors superiors

- 1- Retirar la bateria de l'interior del buc.
- 2- Desacoblar tots els connectors que uneixen els cables que baixen del pal amb els de dins el vaixell.
- 3- Retirar el cable d'acer que uneix la proa del buc amb la proa del suport dels sensors.
- 4- Retirar el passador que uneix el suport dels sensors de dalt del pal, amb el pal.
- 5- Desacoblar el suport dels sensors de dalt del pal i estirar cap amunt els cables de dins el pal fins a fer-los sortir per complet. És recomanable que una altra persona estigui pendent de la base del pal (a l'interior del buc) per ajudar a fer passar els cables i connectors per dins l'orifici que comunica amb l'interior del tub. En aquest procés, els sensors es queden units al suport.

A 1.2.2. Aparell

- 6- Orientar la vela paral·lela a la línia de cruïxa (amb l'aleró a popa). Obrir la cremallera ubicada al costat de babord de la vela i estirar el cable del servo per fer-lo sortir de l'interior del pal a través de l'orifici practicat.
- 7- Retirar el passador que uneix l'enfognament amb el pal. Aquest passador es troba a l'interior del buc, travessant l'enfognament de babord a estribord, a mitja alçada entre el fons i la coberta.
- 8- Aixecar la vela uns 20 cm fins a visualitzar l'extrem superior de l'enfognament. També apareixerà el rodament, que es recolza a l'extrem superior de l'enfognament i envolta

el pal com un anell. Si s'ha quedat travat més amunt, sacsejar lleugerament la vela fins que caigui. Si no cau, es pot procedir amb els següents passos i ja es retirarà més tard.

- 9- **Entre dues persones**, aixecar el pal, la vela i el rodament (tot alhora) fins que el pal surti per complet de l'enfognament.
- 10- Deixar la vela sobre una superfície plana i desencaixar el pal i el rodament.

A 1.2.3. Aleró

- 11- Tallar la brida que uneix el braç travesser de l'aleró amb la tija transmissora del moviment (servo-aleró).
- 12- Retirar els topalls de filferro units a l'eix de l'aleró.
- 13- Desencaixar amb l'eix de l'aleró. Si es queda travat, fer-lo girar suaument mentre s'estira per no forçar els suports de l'aleró.

A 1.2.4. Contrapès de la vela

- 14- Retirar el cable d'acer que uneix la punta de l'extensor del pes amb la part superior de la vela.
- 15- Tallar la brida de seguretat ubicada sota l'extensor del contrapès, que evita que es separi de la vela.
- 16- Desacoblar l'extensor de l'estructura de la vela.

A 1.2.5. Tija transmissora del moviment servo-aleró

- 17- Obrir la cremallera del costat de la vela i, amb una punta de tornavís d'estrella agafada amb dos dits, descarregar el cargol situat sobre l'eix del servo.
- 18- Desencaixar el braç del servo cap amunt.
- 19- Desencaixar la tija transmissora del braç del servo.

A 1.2.6. Coberta

- 20- Desenganxar la goma protectora del perímetre de la unió entre el buc i la coberta. No arrencar de cop! Retirar la cola ajudant-se amb un tornavís o formó per evitar que salti la pintura.
- 21- Descarregar tots els cargols del perímetre de la coberta. **Atenció:** quan el procés sigui de muntatge, cal anar roscant els cargols de mica en mica, alternant els cargols de babord i estribord, i de proa i popa.
- 22- Aixecat la coberta i desencaixar-la de l'enfognament.

- 23- Si es creu necessari, es poden retirar també les 2 gomes cilíndriques de l'interior de la junta.

A 1.2.7. Orsa

- 24- A l'interior del buc, retirar els 3 cargols que fixen l'orsa amb el calaix. És recomanable posar un elevador sota el bulb de l'orsa per descarregar pes i facilitar l'extracció dels cargols.
- 25- Aixecar el buc i desenganxar l'orsa del calaix.

A 1.2.8. Timons

- 26- Posar els timons a la via (alineats a l'eix longitudinal del vaixell).
- 27- A l'interior del buc, treure els passadors que uneixen la metxes dels timons amb els respectius braços de transmissió.
- 28- A l'extrem inferior dels *skegs*, descargolar les rosques i retirar les fixacions dels timons.
- 29- Estirar el timó avall, en direcció a l'eix, i controlar que el braç de transmissió es desenganxi de la metxa.

A 1.3. Procés de muntatge del SenSailor

El muntatge del dron es fa seguint l'ordre invers del procediment indicat a l'apartat A1.2 *Procés de desmuntatge del SenSailor*. Tot i això, cal destacar algunes consideracions:

- Quan s'insereix la metxa del timó a través de la llimera cal assegurar-se (mirant a l'extrem de sortida de la llimera) que aquesta també passa correctament per dins l'encaix del braç transmissor.
- Quan es munten les fixacions de la part inferior dels timons i *skegs* no és necessari aplicar molta força a les rosques. Els pernins inserits dins la fusta dels *skegs* es podrien trencar. Posant una rosca amb sistema antiblocatge o una doble rosca és suficient per garantir que no caiguin.
- Quan es munta l'orsa, cal segellar els orificis del calaix per on passen els cargols amb unes puntades de cola impermeable.
- Per garantir una bona estanquitat a la unió entre el buc i la coberta, és recomanable retirar amb una espàtula o formó els rails de cola impermeable de sobre la solapa de la unió i posar cola nova. Per aplicar la cola nova es tracen 2 cordons a sobre la solapa d'unió, seguint tot el perímetre. Un cordó ha de passar pel costat interior dels orificis dels cargols, i l'altre pel costat exterior. Seguidament, enganxar els dos cilindres de goma sobre els cordons aplicant una mica de pressió, començant i acabant per la meitat del

mirall de popa. La unió entre els dos extrems de cada cilindre amb ell mateix després de fer la volta, cal segellar-la amb una punta de cola. Fer el mateix al disc de la unió entre l'enfognament i la coberta. A bans que endureixi la cola, posar la coberta i tancar-la amb els cargols.

- Quan es faci pressió sobre els cargols de la coberta cal fer-ho de mica en mica, alternant els cargols de babord i estribord, i de proa i popa. Els cargols de mitja eslora costen d'encaixar perquè el pes de l'orsa fa que la màniga del buc augmenti uns pocs mil·límetres respecte la màniga de la coberta. Per facilitar la inserció d'aquests cargols es recomana pressionar els dos costats del buc cap endins entre dues persones i a la vegada posar els cargols. És recomanable començar per aquests cargols.
- Com que la secció del pal disminueix a mida que augmenta l'alçada, és necessari posar 2 anells de goma a l'espai que queda entre el pal i la part superior de l'enfognament per evitar el joc. Aquests anells han d'estar separats entre ells una distància aproximada de 1,5 cm. Abans d'encaixar el pal, s'han de posar aquests 2 anells a l'alçada correcta de manera que, un cop muntat, els anells quedin just per sota la línia on s'acaba l'enfognament. Quan s'encaixa el pal, cal fer una mica de pressió perquè els anells quedin ben inserits a l'esclatxa.
- En el moment d'inserir el pal a l'enfognament, també cal tenir en compte la orientació. El pal ha d'entrar de manera que l'orifici per on han de sortir els cables cap a l'interior del buc quedi mirant a popa.
- El suport dels sensors i els cables que passen per dins el pal **no** s'han de muntar fins que el pal i la vela ja estiguin ben col·locats. És recomanable posar el passador de la base del pal **després** d'haver passat els cables. Per posar-lo es recomana estirar lleugerament els cables des de l'interior del buc per fer espai a l'interior del pal i que el passador entri amb més facilitat.

A 1.4. Operacions de manteniment

Per garantir el bon funcionament del SenSailor i la durabilitat de tots els seus components és important revisar l'estat d'algunes de les parts i fer-ne el manteniment o reparació si és necessari. Les feines bàsiques de manteniment del SenSailor són les següents:

- Mantenir lubricades les llimeres amb greix d'engrenatges resistent a l'aigua. Per fer-ho, desmuntar els timons i aplicar greix a les metxes. Això assegura un bon lliscament i garanteix l'estanquitat. Es recomana utilitzar la Grassa de Liti 3 en 1 del fabricant WD40 [66].
- Comprovar la tensió dels cables d'acer, tant el del contrapès de la vela com el que uneix la proa del buc amb la proa del suport dels sensors. El primer haurà de tenir la tensió justa perquè el contrapès de la vela es mantingui horitzontal. El segon ha d'estar a una tensió suficient perquè no quedi tou però tampoc faci molta força. La seva funció no és

reforçar la verticalitat del pal com si fos un estai, sinó fer de límit físic perquè la vela no faci la volta.

- De tant en tant, cal fer una revisió del rodament de la vela per comprovar el seu estat. Si s'ha oxidat, caldrà substituir-lo (vegeu la referència del producte a la memòria del treball). Cal mantenir el rodament sempre lubricat, tant per dins com per fora, per evitar la corrosió, especialment quan es porta a navegar. Per accedir al rodament, cal seguir el procediment de desmuntatge del punt 1 al 10.
- Mantenir engraixats els mecanismes que transmeten el moviment dels servos als timons o l'aleró. Amb el mateix greix recomanat per les llimeres.
- Revisar la pressió homogènia de tots els cargols de la coberta.

Annex II. Planificació

A la fase inicial del projecte s'ha fet una planificació global amb la intenció de plasmar sobre l'escala temporal totes les fases del treball. La realitat és que la durada del projecte estimada inicialment ha quedat molt desviat respecte la realitat, però aquest primer plantejament ha servit per estructurar i ordenar les fases del projecte, que sí que s'han realitzat amb una seqüència molt similar. La falta d'experiència en projectes pràctics és la que ha provocat un allargament de la fase constructiva força considerable, a diferència de la fase de disseny, que s'ha realitzat més o menys amb el temps previst.

La planificació feta inicialment s'ha anat corregint al llarg del projecte. Com que a la fase de construcció ha resultat complicat preveure el progrés del projecte a llarga durada, s'han anat fent programacions concretes i assolibles a curt termini. En paral·lel, s'ha tingut sempre la planificació inicial com a esquema general de les tasques a realitzar, i s'han anat fent modificacions en l'ordre d'execució a conveniència del moment i la situació.

Aquest annex mostra la planificació real del projecte. A l'apartat A 2.1 s'explica la metodologia emprada per procedir amb les diverses fases del projecte. A la secció A 2.2 es presenten les hores de treball dedicades al projecte. Al punt A 2.3 es mostren les tasques realitzades en aquest projecte i un cronograma.

A.2.1. Espiral de projecte

En aquesta memòria s'expliquen les fases de disseny i construcció de manera lineal, ja que és la manera que permet comprendre més fàcilment les decisions preses i l'avanç del projecte, si es llegeix de cap a fi. Tot i això, a la realitat no s'ha procedit exactament seguint aquest ordre. La principal diferència rau a la fase de disseny, en la qual s'ha passat diverses vegades per les mateixes tasques amb l'objectiu de millorar el disseny i aproximar-se a la solució més òptima.

A l'inici del projecte es pretén dissenyar un producte des de zero on totes les variables són incògnites. Resulta difícil preveure el dimensionament d'una sèrie de factors, donat que molts d'ells es relacionen alhora amb altres característiques del producte, també desconegudes. Així doncs, s'ha procedit a fer una primera iteració per definir les característiques principals, seguint aquest ordre:

- 1- Elecció de les característiques principals del buc. S'han pres com a referència altres embarcacions similars i s'ha fet una aproximació a criteri dels dissenyadors segons una sèrie d'especificacions.

- 2- Càlcul de la resistència a l'avanç del buc sense apèndixs i determinació aproximada de la força propulsiva.
- 3- Disseny de la vela.
- 4- Càlcul de consum elèctric aproximat.
- 5- Dimensionament de bateria.
- 6- Càlcul aproximat del pes total de l'embarcació.

A la primera volta, el càlcul de pes final ha resultat força desviat respecte el desplaçament de les especificacions. Per tant, s'ha realitzat una segona volta per ajustar paràmetres i aproximar-se a un disseny més òptim. S'ha augmentat el desplaçament de disseny i la superfície vèlica, i s'han dissenyat alguns mecanismes per reduir el consum dels servos. Al repetir el procés s'ha assolit un resultat final amb un error mínim comprès dins els marges permesos per garantir el bon funcionament. Encara s'hauria pogut repetir el procés una tercera vegada per acabar d'optimitzar alguns paràmetres, però tenint en compte el resultat obtingut i el temps disponible, s'ha decidit seguir endavant el projecte amb aquest segon disseny.

A.2.2. Hores de dedicació

S'estima que el temps de dedicació d'aquest projecte ha sigut de 2.000 hores per cada un dels autors, és a dir, un total de 4.000 hores. Aquestes hores inclouen tot el temps invertit en tasques del projecte (fase de disseny, hores de treball al taller, temps de recerca de patrocinis, període de proves, etc). Per fer el càlcul d'hores s'ha observat el cronograma (visible més endavant en aquest annex) i s'ha fet una aproximació del número d'hores setmanals dedicades al projecte en funció de la tasca realitzada en cada moment.

Malgrat això, aquesta xifra d'hores reals treballades no representa exactament la magnitud del projecte. Cal tenir en compte que la fase on s'han dedicat més hores de treball ha sigut a la construcció de l'embarcació. Degut a la falta d'experiència s'han hagut de repetir processos i aprendre dels errors, fet que ha provocat l'allargament de la fase constructiva.

També s'ha d'afegir que el projecte s'ha vist perjudicat per dos imprevistos de causa externa i força major. A finals del gener de 2020, coincidint amb l'etapa final del procés de construcció, el temporal Glòria deixà totalment fora de servei el taller de treball i la grua d'avarada. Degut a això, es van haver d'aturar les proves de mar i traslladar la feina a un taller amb unes condicions menys idònies per la fase on es trobava. Per altra banda, el confinament imposat degut a la pandèmia del virus Covid-19 va obligar a interrompre les últimes proves del pilot automàtic en sec i qualsevol accés al vaixell.

Es calcula que, realitzant aquest mateix projecte però amb experiència prèvia pel que fa la part de construcció i sense imprevistos majors com els que han passat, el temps total es reduiria un 40%, aproximadament. Per tant, el temps representatiu d'aquest projecte es preveu que és d'unes 1.200 hores per cada un dels autors, és a dir, 2.400 hores en total.

A.2.3. Tasques del projecte i cronograma

A aquesta memòria no es presenta la planificació inicial, ja que la informació que hi apareix resulta irrellevant i poc realista. Per altra banda, s'ha cregut interessant mostrar la distribució de la feina feta i les fases per on s'ha anat passant. Es creu que fer constar el que seria la planificació real d'un projecte d'aquestes característiques pot donar una bona visió del que suposa realment a futurs estudiants que vulguin orientar el seu treball a un repte similar. A continuació es mostren les tasques que s'han realitzat durant el projecte. A la Taula 49 es mostra un llistat de les tasques del projecte ordenades per categories. Cada tasca té assignada una numeració que no representa l'ordre de realització sinó una xifra d'identificació. A la Taula 50 es mostra una taula similar on s'ordenen les tasques de forma cronològica, agrupades per mesos segons la seva data d'inici. La numeració de cada tasca correspon a l'establerta a la Taula 49. D'aquesta manera resulta més senzill identificar una tasca d'una taula a l'altre per consultar l'ordre de realització o bé el grup de tasques de la mateixa categoria. Posteriorment es mostra un cronograma en forma de diagrama de Gantt.

	NOM DE LA TASCA	DURACIÓ	INICI	FINAL
	Disseny i construcció d'un dron de navegació automàtica a vela	501 dies	dm 1/1/19	dv 15/5/20
1	Definició global del projecte	81 dies	dm 1/1/19	dv 22/3/19
2	Disseny de les especificacions principals	28 dies	dm 1/1/19	dl 28/1/19
3	Recerca d'informació	68 dies	dl 14/1/19	dv 22/3/19
4	Estudi de viabilitat	14 dies	dl 28/1/19	dg 10/2/19
5	Pla de finançament	301 dies	dv 1/2/19	dv 29/11/19
6	Primer càlcul de pressupost aproximat	1 dia	dl 15/4/19	dl 15/4/19
7	Segon càlcul de pressupost aproximat	1 dia	dl 2/9/19	dl 2/9/19
8	Recerca de patrocinadors	273 dies	dv 1/2/19	dj 31/10/19
9	Tramitació de beca d'ajuts per TFG i TFM innovadors	95 dies	dl 26/8/19	dv 29/11/19
10	Redacció de la memòria resum per sol·licitació de beca	17 dies	dl 26/8/19	dc 11/9/19
11	Termini d'entrega de sol·licitud de beca	0 dies	dv 13/9/19	dv 13/9/19
12	Termini d'entrega de documentació de justificació de beca	0 dies	dv 29/11/19	dv 29/11/19
13	Formació addicional necessària	199 dies	dc 1/5/19	dv 15/11/19
14	Curs de Rhinoceros	31 dies	dc 1/5/19	dv 31/5/19
15	Curs d'AutoCAD	18 dies	dm 2/7/19	dv 19/7/19
16	Curs d'iniciació a l'Arduino	31 dies	dj 1/8/19	ds 31/8/19
17	Formació en programació en llenguatge C	46 dies	dm 1/10/19	dv 15/11/19
18	Disseny de sistema elèctric i electrònic	322 dies	dl 4/2/19	dg 22/12/19
19	Recerca de la tecnologia adient	40 dies	dl 4/2/19	dv 15/3/19
20	Càlcul predictiu de consum (1a volta)	1 dia	dl 25/3/19	dl 25/3/19
21	Càlcul predictiu de consum (2a volta)	1 dia	dv 26/7/19	dv 26/7/19
22	Disseny del circuit d'alimentació	6 dies	dg 21/7/19	dv 26/7/19
23	Disseny del circuit de senyal	24 dies	dc 20/11/19	dv 13/12/19
24	Disseny de la placa electrònica i la disposició del cablejat al vaixell	9 dies	ds 14/12/19	dg 22/12/19
25	Disseny del programa de control automàtic	410 dies	dl 28/1/19	dj 12/3/20
26	Disseny de l'esquema de regulació i control	14 dies	dl 28/1/19	dg 10/2/19
27	Definició condicions de programa per navegació a vela	15 dies	dj 10/10/19	dj 24/10/19
28	Redacció del codi de programa	59 dies	dj 24/10/19	ds 21/12/19
29	Correccions de programa	35 dies	dv 7/2/20	dj 12/3/20
30	Disseny constructiu	122 dies	dv 15/2/19	dg 16/6/19
31	Disseny del buc (1a volta)	25 dies	dv 15/2/19	dl 11/3/19
32	Disseny del buc (2a volta)	13 dies	dm 26/3/19	dg 7/4/19
33	Disseny del motlle	4 dies	dj 16/5/19	dg 19/5/19
34	Disseny de l'estructura de reforç	38 dies	dl 8/4/19	dc 15/5/19
35	Disseny de la vela (1a volta)	11 dies	dm 12/3/19	dv 22/3/19
36	Disseny de la vela (2a volta)	17 dies	dl 8/4/19	dc 24/4/19
37	Disseny dels apèndixs	21 dies	dl 27/5/19	dg 16/6/19

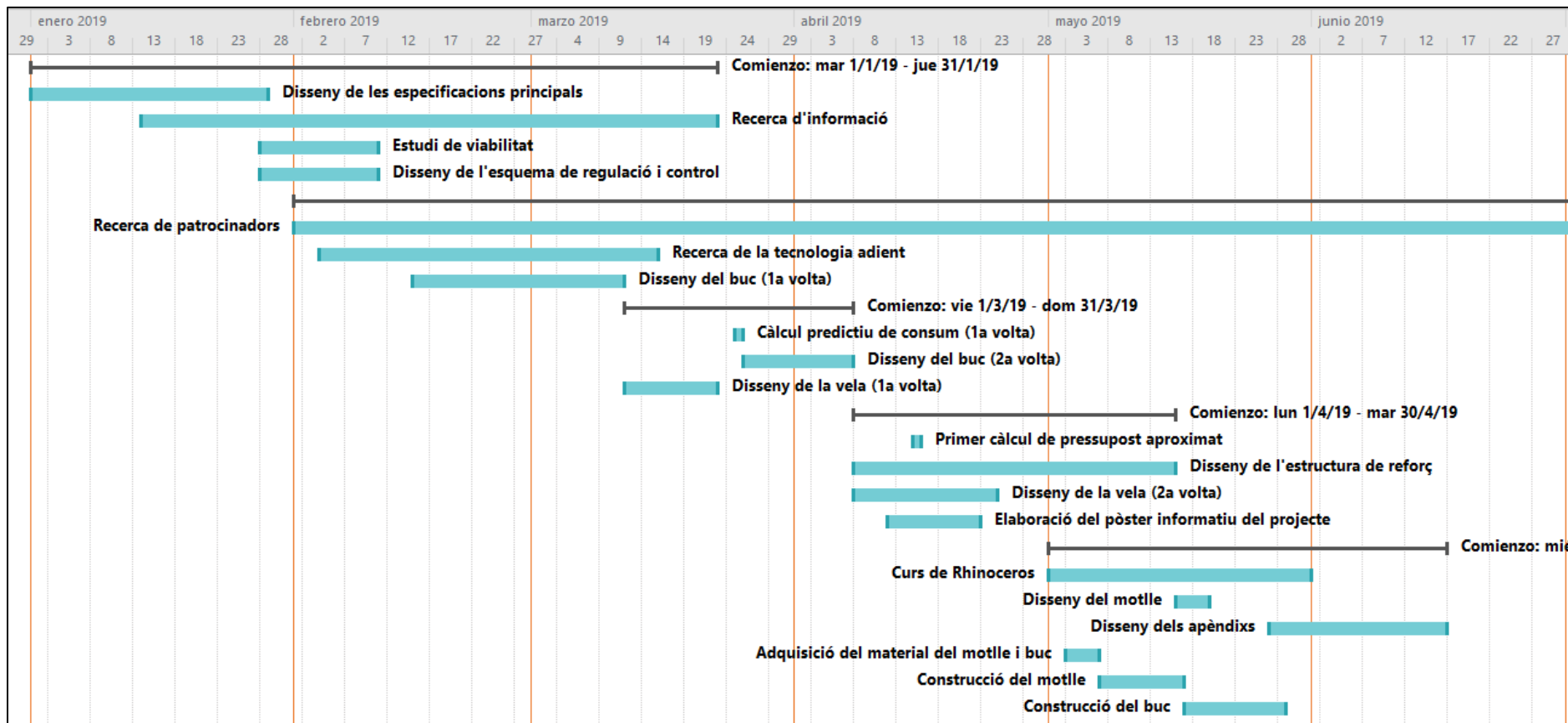
38	Construcció de l'embarcació	267 dies	dv 3/5/19	dv 24/1/20
39	Adquisició del material del motlle i buc	4 dies	dv 3/5/19	dl 6/5/19
40	Construcció del motlle	10 dies	dm 7/5/19	dj 16/5/19
41	Construcció del buc	12 dies	dv 17/5/19	dm 28/5/19
42	Construcció dels timons i skegs	13 dies	dj 30/5/19	dm 11/6/19
43	Construcció de l'estructura de reforç	1 dia	dl 24/6/19	dl 24/6/19
44	Adquisició del material de la coberta	1 dia	dm 11/6/19	dm 11/6/19
45	Construcció de la coberta (1r intent)	5 dies	dj 13/6/19	dl 17/6/19
46	Construcció de la coberta (2n intent)	6 dies	dm 18/6/19	dg 23/6/19
47	Construcció de la coberta (3r intent)	16 dies	dl 23/9/19	dm 8/10/19
48	Adquisició material vela i orsa	1 dia	dv 21/6/19	dv 21/6/19
49	Construcció estructura de la vela	7 dies	dl 24/6/19	dg 30/6/19
50	Construcció pla de l'orsa	1 dia	dm 25/6/19	dm 25/6/19
51	Construcció pla de subjecció orsa	4 dies	dl 23/9/19	dj 26/9/19
52	Impressió 3D del suport de sensors	2 dies	dc 2/10/19	dj 3/10/19
53	Impressió 3D del model del bulb	2 dies	dl 9/9/19	dm 10/9/19
54	Adquisició del material per a l'elaboració del bulb	1 dia	ds 14/9/19	ds 14/9/19
55	Construcció de motlle per fosa	3 dies	dl 16/9/19	dc 18/9/19
56	Fabricació del bulb de l'orsa	2 dies	dj 19/9/19	dv 20/9/19
57	Muntatge del bulb a l'orsa	1 dia	ds 21/9/19	ds 21/9/19
58	Construcció del calaix de l'orsa i mampares de reforço	4 dies	dl 30/9/19	dj 3/10/19
59	Adquisició del material pels acabats superficials	1 dia	dj 19/9/19	dj 19/9/19
60	Acabat superficial del buc	17 dies	dv 20/9/19	dg 6/10/19
61	Acabat superficial de la coberta	2 dies	dl 7/10/19	dm 8/10/19
62	Scabat superficial orsa	2 dies	dl 7/10/19	dm 8/10/19
63	Fabricació dels vinils	2 dies	dc 2/10/19	dj 3/10/19
64	Adquisició de material per reparacions	1 dia	dv 24/1/20	dv 24/1/20
65	Reparacions després del temporal Glòria	7 dies	dv 24/1/21	dj 30/6/19
66	Construcció del sistema elèctric	48 dies	ds 21/12/19	dj 6/2/20
67	Adquisició de material del sistema electrònic	3 dies	ds 21/12/19	dl 23/12/19
68	Construcció de la placa electrònica base	14 dies	dj 2/1/20	dc 15/1/20
69	Comprovacions i correccions de la placa electrònica base	1 dia	dj 16/1/20	dj 16/1/20
70	Preparació del cablejat i muntatge de connectors	7 dies	dl 13/1/20	dg 19/1/20
71	Instal·lació del sistema elèctric al vaixell	7 dies	dv 31/1/20	dj 6/2/20
72	Prova d'estanquitat	1 dia	dm 19/11/19	dm 19/11/19
73	Prova d'estabilitat	1 dia	dm 19/11/19	dm 19/11/19
74	Prova de navegació 1	1 dia	dm 19/11/19	dm 19/11/19
75	Prova de navegació 2	1 dia	dm 26/11/19	dm 26/11/19
76	Elaboració del pòster informatiu del projecte	11 dies	dv 12/4/19	dl 22/4/19
77	Redacció de la memòria	124 dies	dl 13/1/20	dv 15/5/20
78	Exposició del vaixell al Saló Nàutic	5 dies	dc 9/10/19	dg 13/10/19
79	Temporal Glòria	4 dies	dl 20/1/20	dj 23/1/20
80	Període de confinament per Covid-19	63 dies	ds 14/3/20	dv 15/5/20

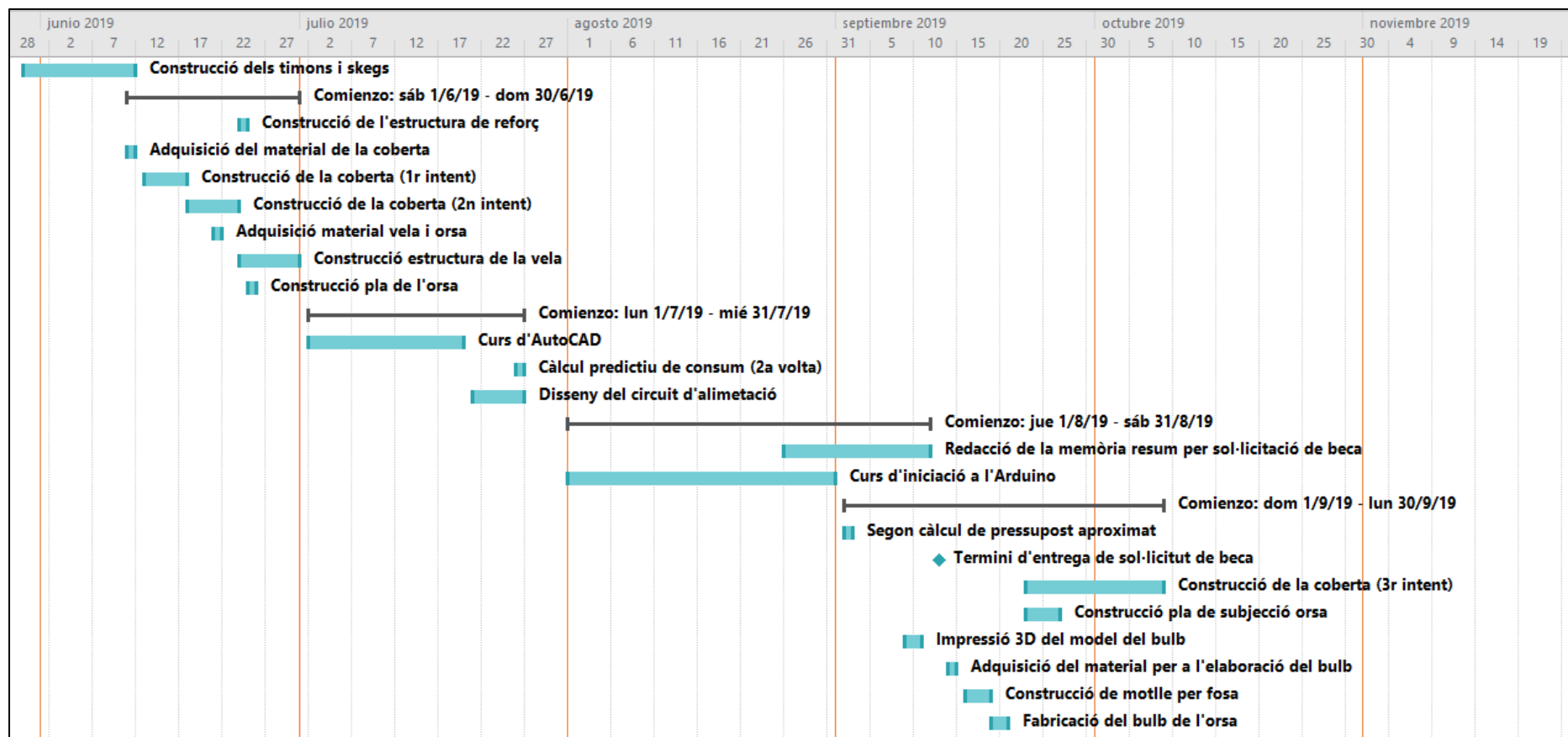
Taula 49. Llistat de tasques ordenades per categories. Font: pròpia.

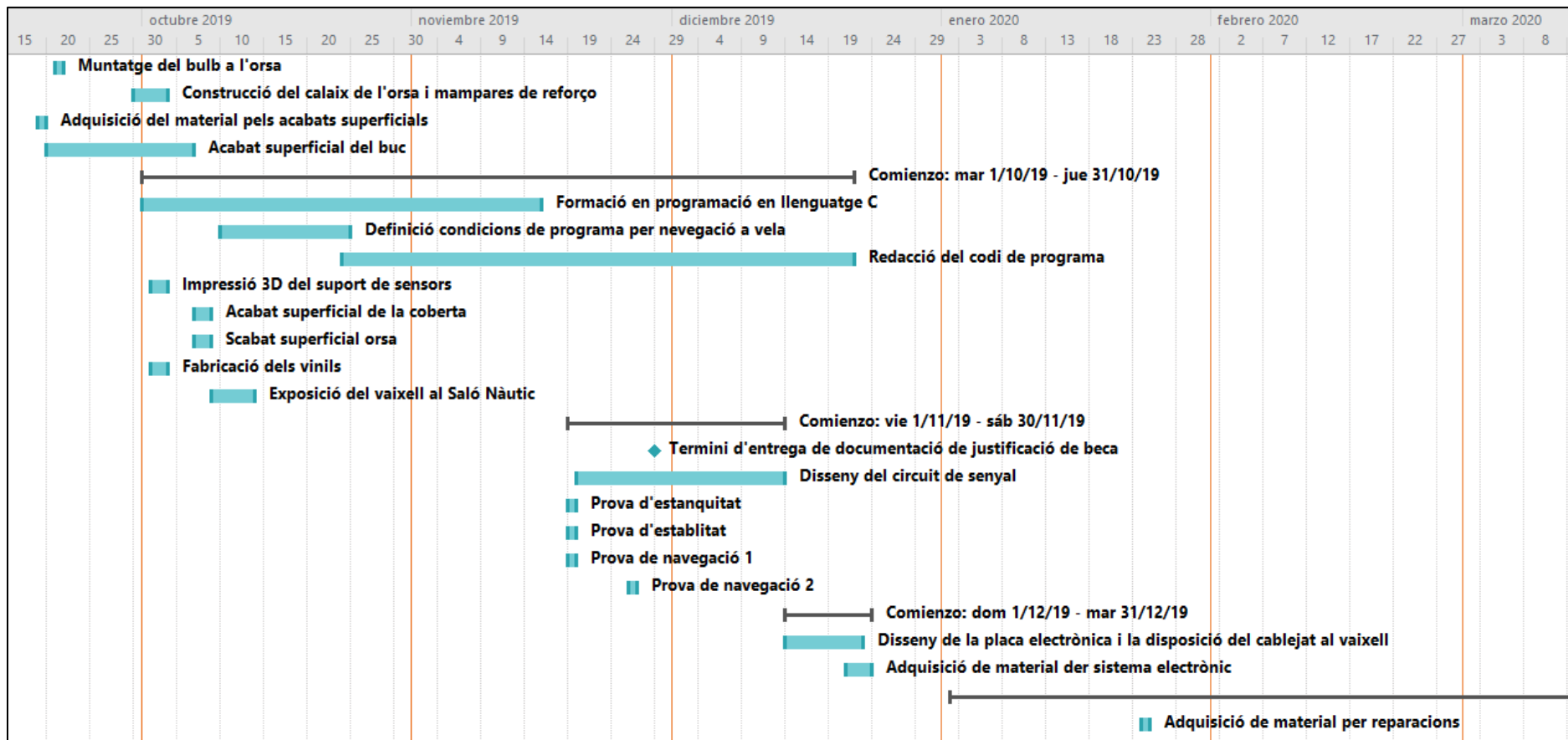
	NOM DE LA TASCA	DURACIÓ	INICI	FINAL
Gener 2019				
2	Disseny de les especificacions principals	28 dies	dm 1/1/19	dl 28/1/19
3	Recerca d'informació	68 dies	dl 14/1/19	dv 22/3/19
4	Estudi de viabilitat	14 dies	dl 28/1/19	dg 10/2/19
26	Disseny de l'esquema de regulació i control	14 dies	dl 28/1/19	dg 10/2/19
Febrer 2019				
8	Recerca de patrocinadors	273 dies	dv 1/2/19	dj 31/10/19
19	Recerca de la tecnologia adient	40 dies	dl 4/2/19	dv 15/3/19
31	Disseny del buc (1a volta)	25 dies	dv 15/2/19	dl 11/3/19
Març 2019				
20	Càlcul predictiu de consum (1a volta)	1 dia	dl 25/3/19	dl 25/3/19
32	Disseny del buc (2a volta)	13 dies	dm 26/3/19	dg 7/4/19
35	Disseny de la vela (1a volta)	11 dies	dm 12/3/19	dv 22/3/19
Abril 2019				
6	Primer càlcul de pressupost aproximat	1 dia	dl 15/4/19	dl 15/4/19
34	Disseny de l'estructura de reforç	38 dies	dl 8/4/19	dc 15/5/19
36	Disseny de la vela (2a volta)	17 dies	dl 8/4/19	dc 24/4/19
76	Elaboració del pòster informatiu del projecte	11 dies	dv 12/4/19	dl 22/4/19
Maig 2019				
14	Curs de Rhinoceros	31 dies	dc 1/5/19	dv 31/5/19
33	Disseny del motlle	4 dies	dj 16/5/19	dg 19/5/19
37	Disseny dels apèndixs	21 dies	dl 27/5/19	dg 16/6/19
39	Adquisició del material del motlle i buc	4 dies	dv 3/5/19	dl 6/5/19
40	Construcció del motlle	10 dies	dm 7/5/19	dj 16/5/19
41	Construcció del buc	12 dies	dv 17/5/19	dm 28/5/19
42	Construcció dels timons i skegs	13 dies	dj 30/5/19	dm 11/6/19
65	Reparacions després del temporal Glòria	7 dies	dv 24/5/19	dj 30/5/19
Juny 2019				
43	Construcció de l'estructura de reforç	1 dia	dl 24/6/19	dl 24/6/19
44	Adquisició del material de la coberta	1 dia	dm 11/6/19	dm 11/6/19
45	Construcció de la coberta (1r intent)	5 dies	dj 13/6/19	dl 17/6/19
46	Construcció de la coberta (2n intent)	6 dies	dm 18/6/19	dg 23/6/19
48	Adquisició material vela i orsa	1 dia	dv 21/6/19	dv 21/6/19
49	Construcció estructura de la vela	7 dies	dl 24/6/19	dg 30/6/19
50	Construcció pla de l'orsa	1 dia	dm 25/6/19	dm 25/6/19
Juliol 2019				
15	Curs d'AutoCAD	18 dies	dm 2/7/19	dv 19/7/19
21	Càlcul predictiu de consum (2a volta)	1 dia	dv 26/7/19	dv 26/7/19
22	Disseny del circuit d'alimentació	6 dies	dg 21/7/19	dv 26/7/19
Agost 2019				
10	Redacció de la memòria resum per sol·licitació de beca	17 dies	dl 26/8/19	dc 11/9/19
16	Curs d'iniciació a l'Arduino	31 dies	dj 1/8/19	ds 31/8/19
Setembre 2019				
7	Segon càlcul de pressupost aproximat	1 dia	dl 2/9/19	dl 2/9/19
11	Termini d'entrega de sol·licitut de beca	0 dies	dv 13/9/19	dv 13/9/19
47	Construcció de la coberta (3r intent)	16 dies	dl 23/9/19	dm 8/10/19
51	Construcció pla de subjecció orsa	4 dies	dl 23/9/19	dj 26/9/19
53	Impressió 3D del model del bulb	2 dies	dl 9/9/19	dm 10/9/19
54	Adquisició del material per a l'elaboració del bulb	1 dia	ds 14/9/19	ds 14/9/19
55	Construcció de motlle per fosa	3 dies	dl 16/9/19	dc 18/9/19
56	Fabricació del bulb de l'orsa	2 dies	dj 19/9/19	dv 20/9/19
57	Muntatge del bulb a l'orsa	1 dia	ds 21/9/19	ds 21/9/19
58	Construcció del calaix de l'orsa i mampares de reforç	4 dies	dl 30/9/19	dj 3/10/19
59	Adquisició del material pels acabats superficials	1 dia	dj 19/9/19	dj 19/9/19
60	Acabat superficial del buc	17 dies	dv 20/9/19	dg 6/10/19

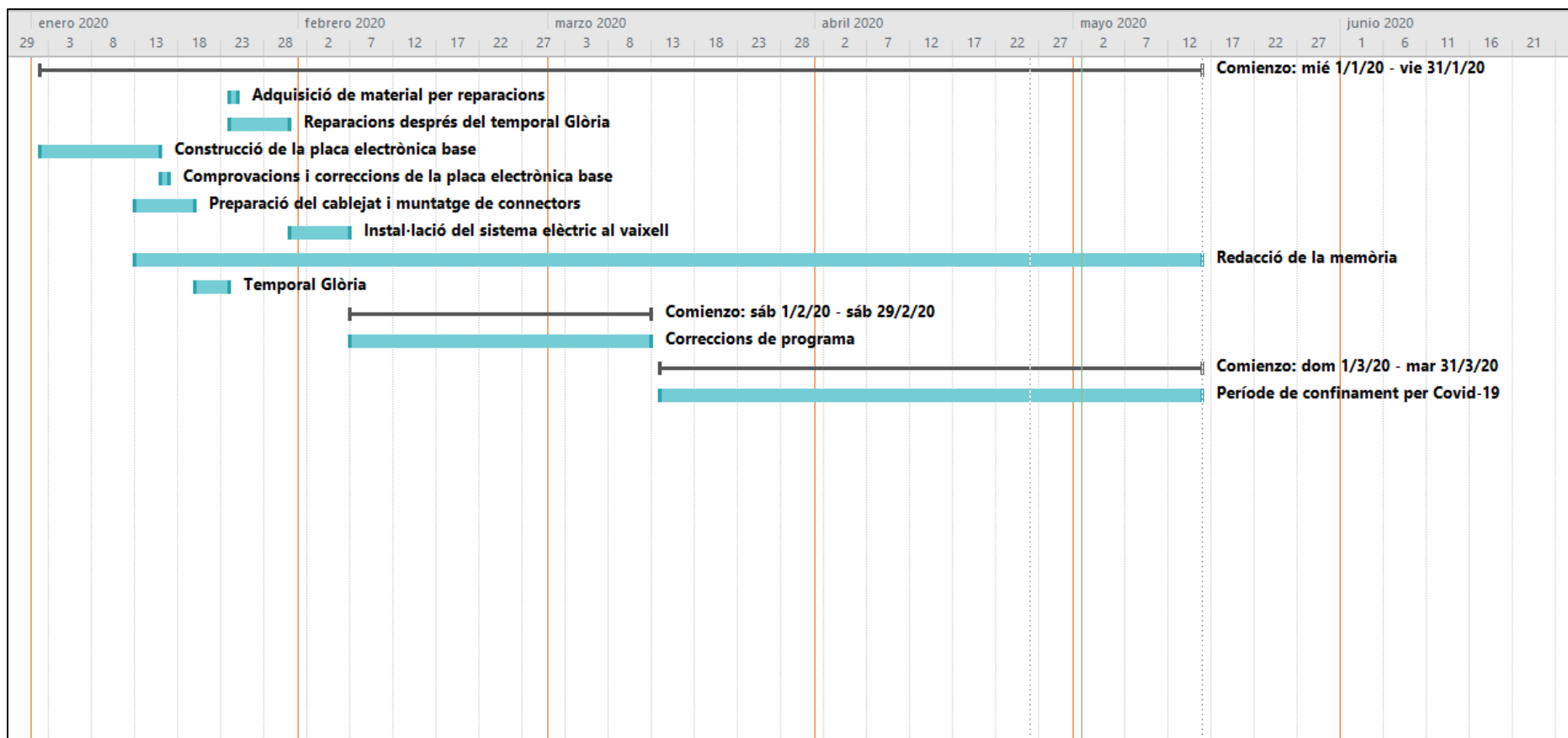
Octubre 2019				
17	Formació en programació en llenguatge C	46 dies	dm 1/10/19	dv 15/11/19
27	Definició condicions de programa per navegació a vela	15 dies	dj 10/10/19	dj 24/10/19
28	Redacció del codi de programa	59 dies	dj 24/10/19	ds 21/12/19
52	Impressió 3D del suport de sensors	2 dies	dc 2/10/19	dj 3/10/19
61	Acabat superficial de la coberta	2 dies	dl 7/10/19	dm 8/10/19
62	Scabat superficial orsa	2 dies	dl 7/10/19	dm 8/10/19
63	Fabricació dels vinils	2 dies	dc 2/10/19	dj 3/10/19
78	Exposició del vaixell al Saló Nàutic	5 dies	dc 9/10/19	dg 13/10/19
Novembre 2019				
12	Termini d'entrega de documentació de justificació de beca	0 dies	dv 29/11/19	dv 29/11/19
23	Disseny del circuit de senyal	24 dies	dc 20/11/19	dv 13/12/19
72	Prova d'estanquitat	1 dia	dm 19/11/19	dm 19/11/19
73	Prova d'estabilitat	1 dia	dm 19/11/19	dm 19/11/19
74	Prova de navegació 1	1 dia	dm 19/11/19	dm 19/11/19
75	Prova de navegació 2	1 dia	dm 26/11/19	dm 26/11/19
Desembre 2019				
24	Disseny de la placa electrònica i la disposició del cablejat al vaixell	9 dies	ds 14/12/19	dg 22/12/19
67	Adquisició de material del sistema electrònic	3 dies	ds 21/12/19	dl 23/12/19
Gener 2020				
64	Adquisició de material per reparacions	1 dia	dv 24/1/20	dv 24/1/20
68	Construcció de la placa electrònica base	14 dies	dj 2/1/20	dc 15/1/20
69	Comprovacions i correccions de la placa electrònica base	1 dia	dj 16/1/20	dj 16/1/20
70	Preparació del cablejat i muntatge de connectors	7 dies	dl 13/1/20	dg 19/1/20
71	Instal·lació del sistema elèctric al vaixell	7 dies	dv 31/1/20	dj 6/2/20
77	Redacció de la memòria	124 dies	dl 13/1/20	dv 25/6/20
79	Temporal Glòria	4 dies	dl 20/1/20	dj 23/1/20
Febrer 2020				
29	Correccions de programa	35 dies	dv 7/2/20	dj 12/3/20
Març 2020				
80	Període de confinament per Covid-19	63 dies	ds 14/3/20	dv 15/5/20

Taula 50. Tasques del projecte ordenades cronològicament. Font: pròpia.









Annex III. Diagrames de flux

Figura 163: Codi del pilot automàtic

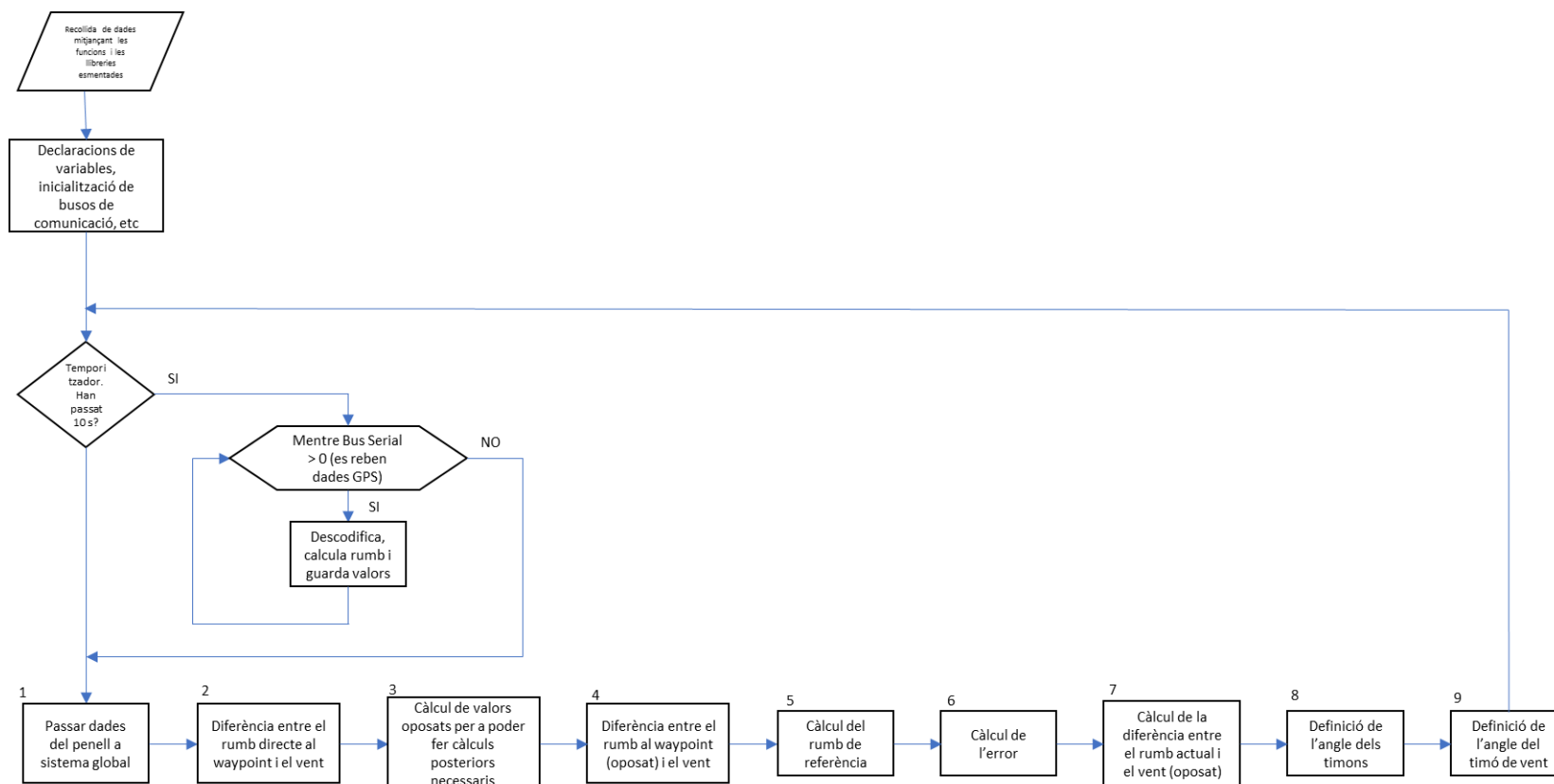


Figura 164: Vent local a global. Bloc 1

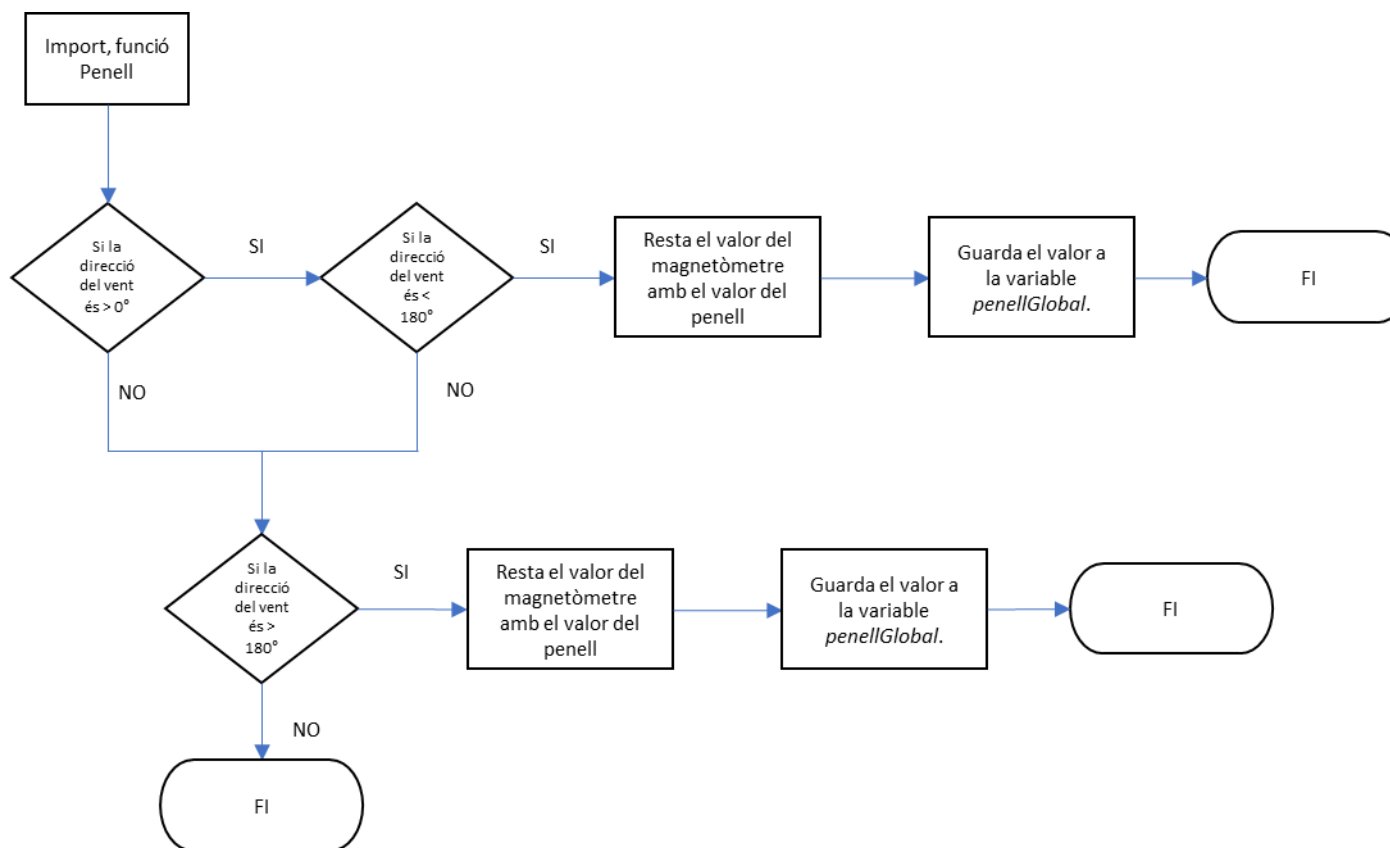


Figura 165: Diferència entre el rumb cap al waypoint (rumb directe) i el vent. Bloc 2

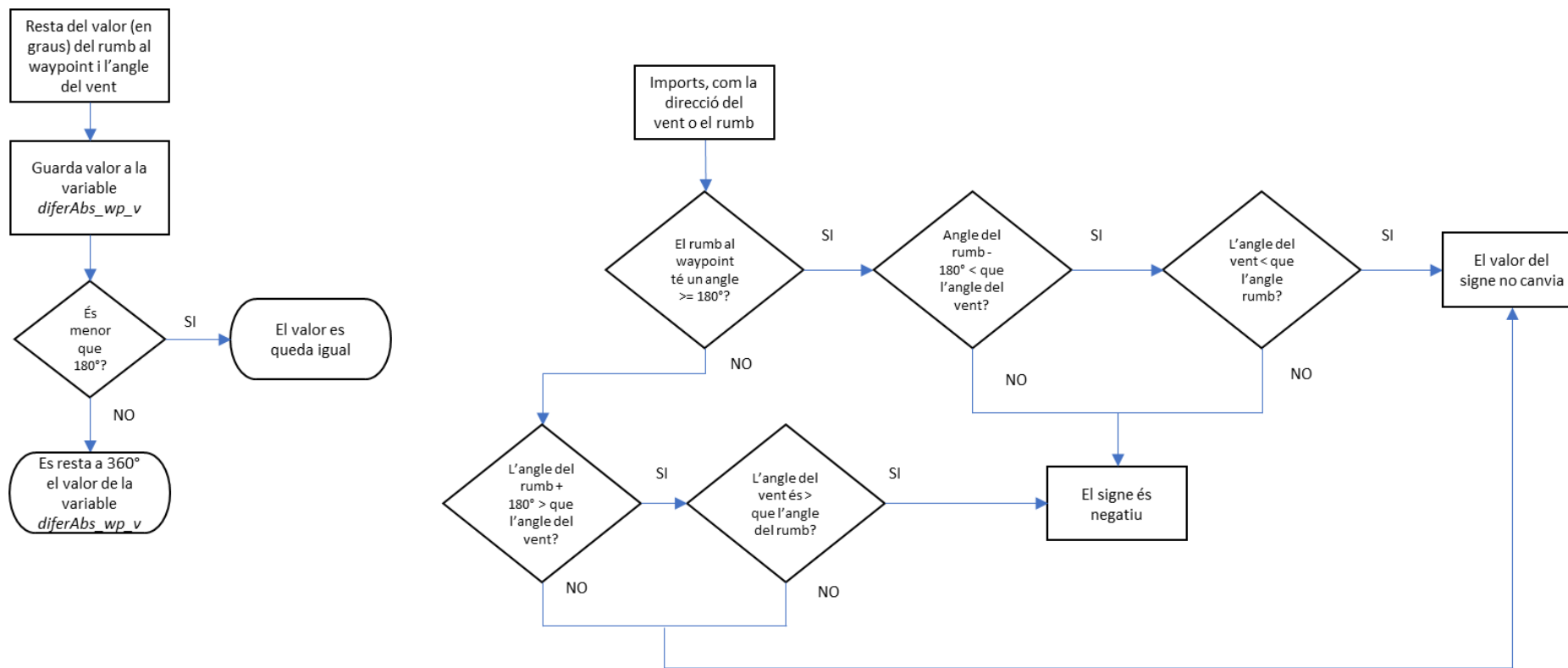


Figura 166: Diferència entre el rumb oposat cap el waypoint (rumb directe) i el vent. Bloc 4

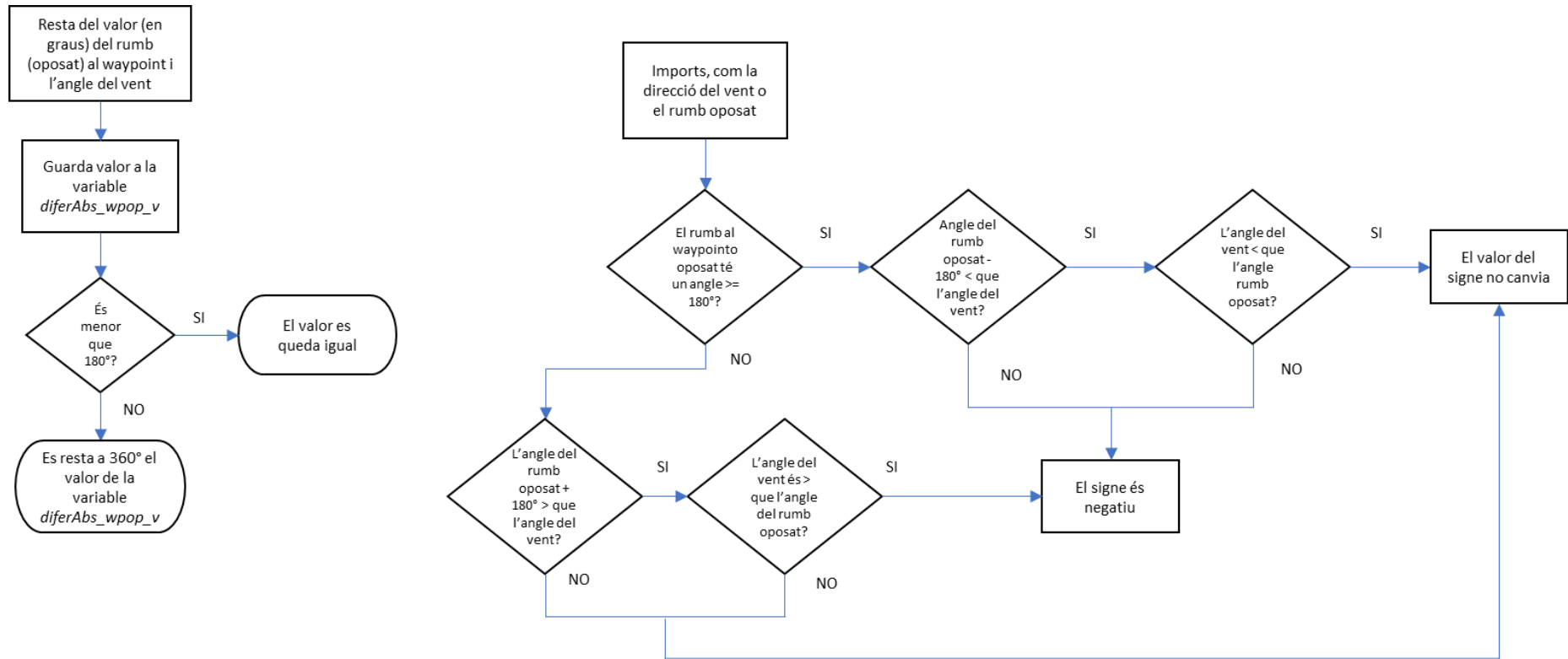


Figura 167: Elecció del rumb referència. Bloc 5

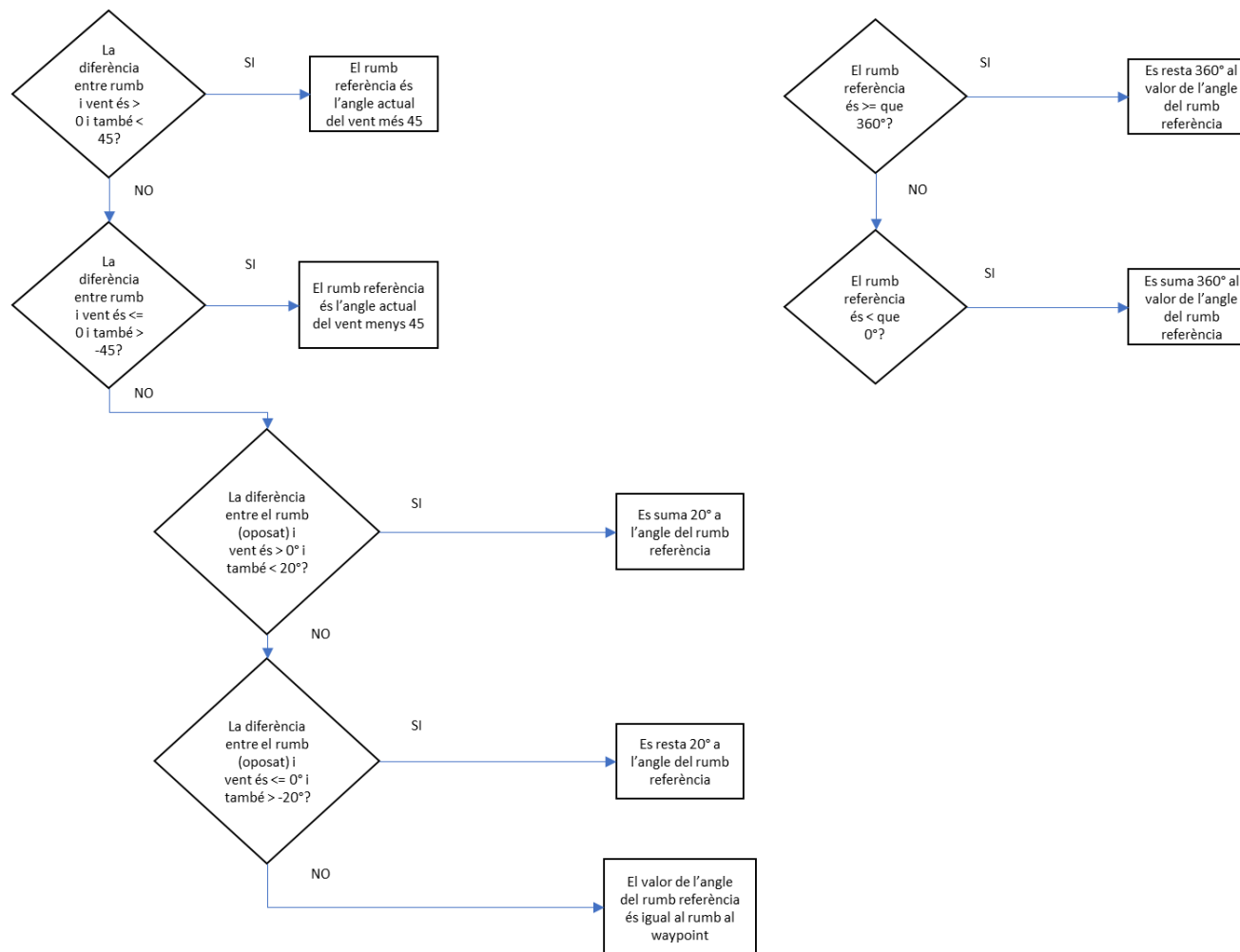


Figura 168: Càlcul de l'error. Bloc 6

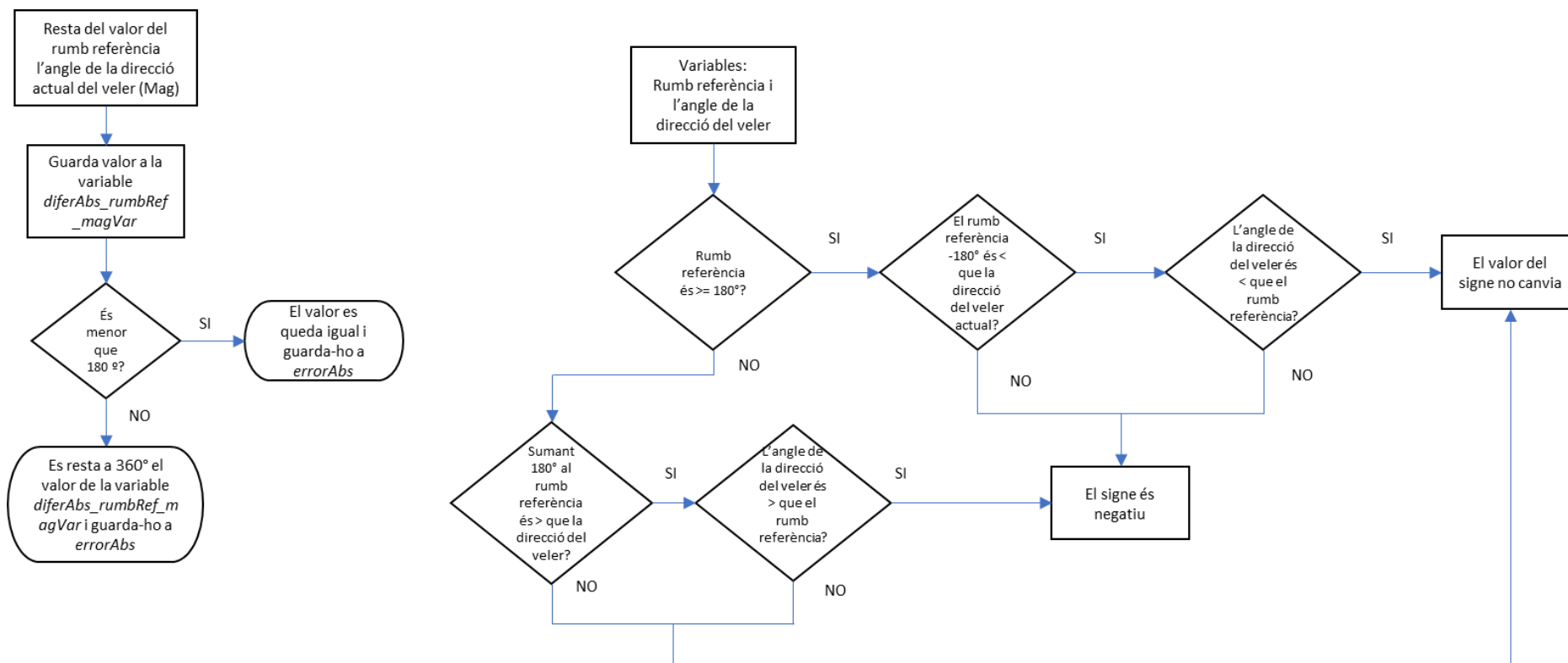


Figura 169 Càlcul de la diferència entre el rumb actual i el vent (oposat). Bloc 7

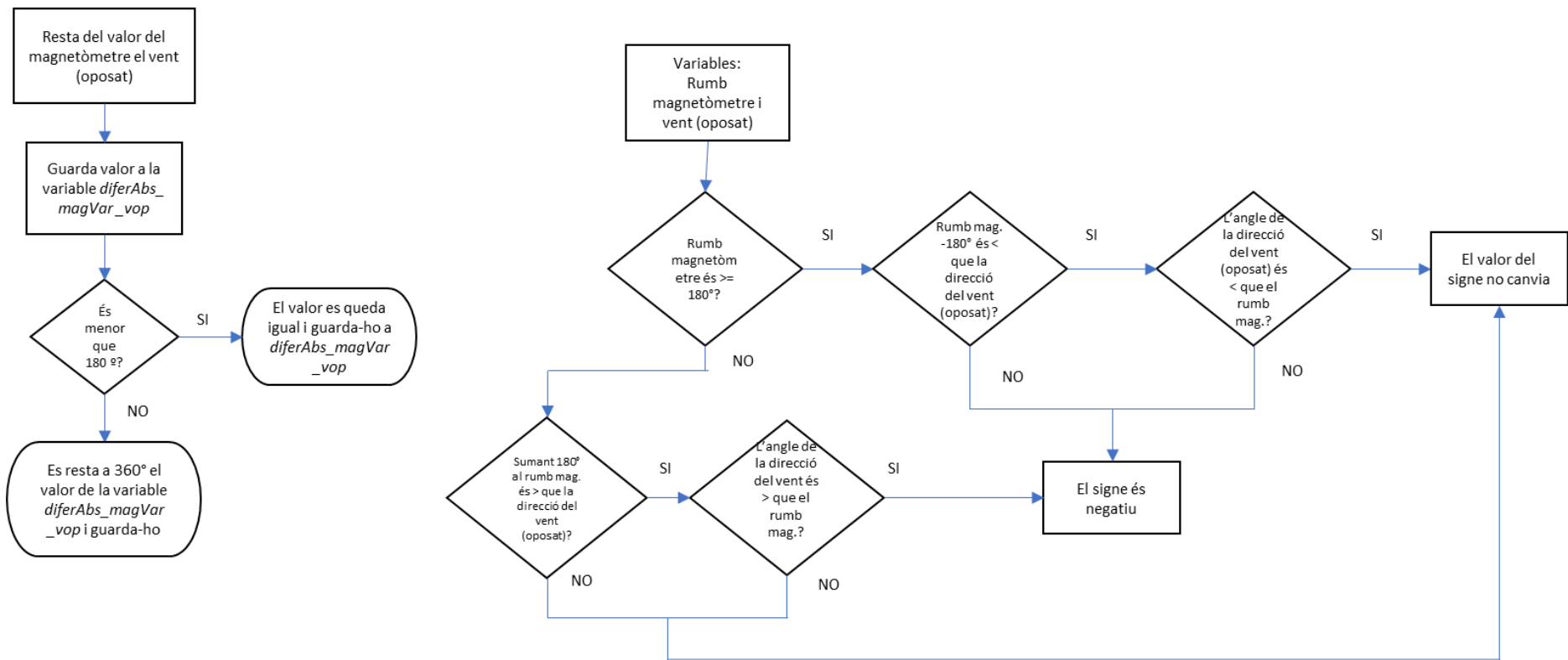


Figura 170: Definició de l'angle dels timons. Bloc 8

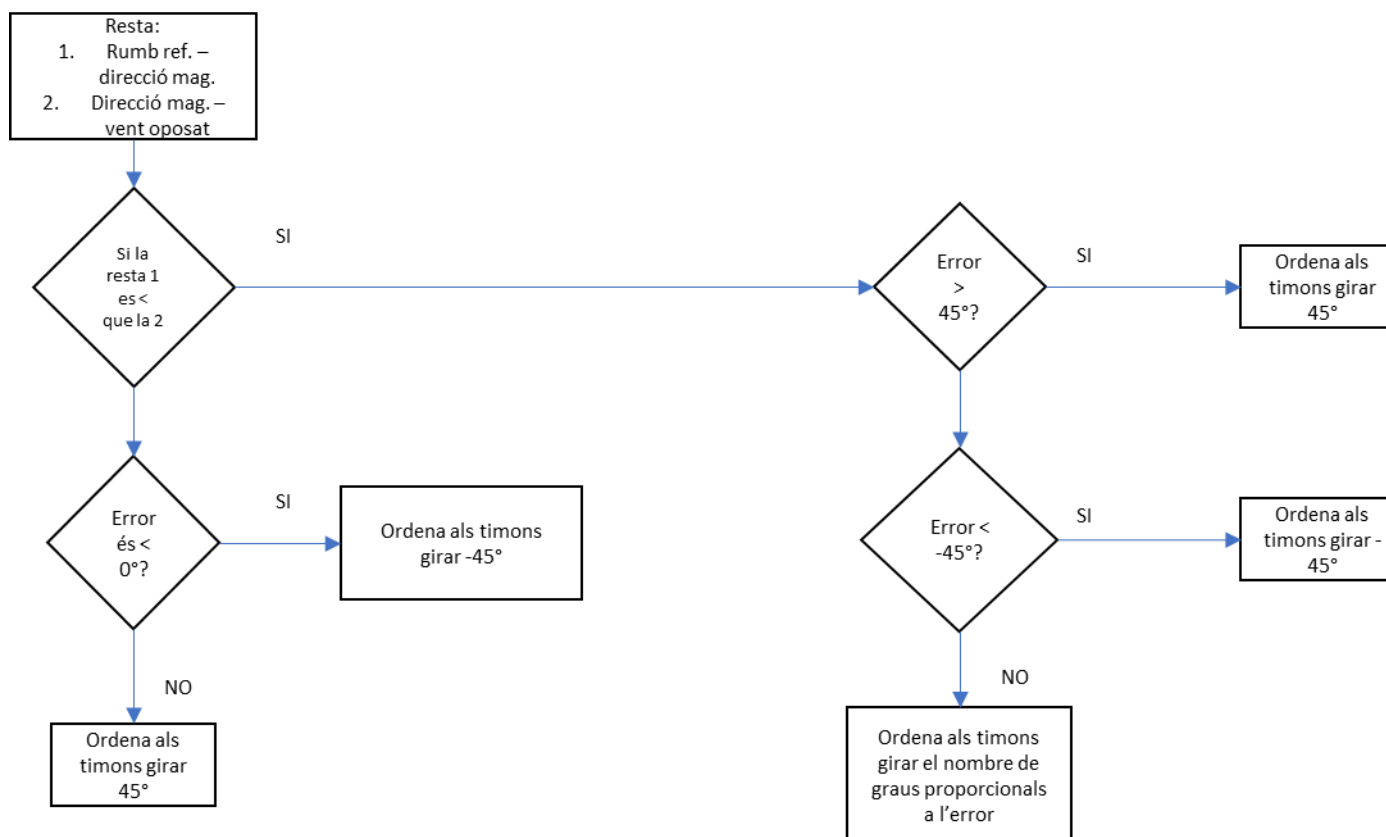


Figura 171: Elecció de l'angle del timó de vent. Bloc 9

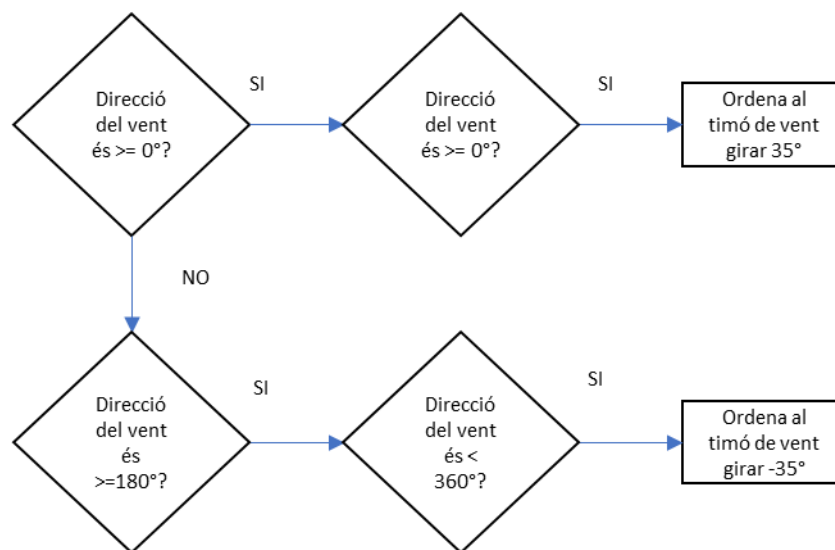


Figura 172: Funció penell

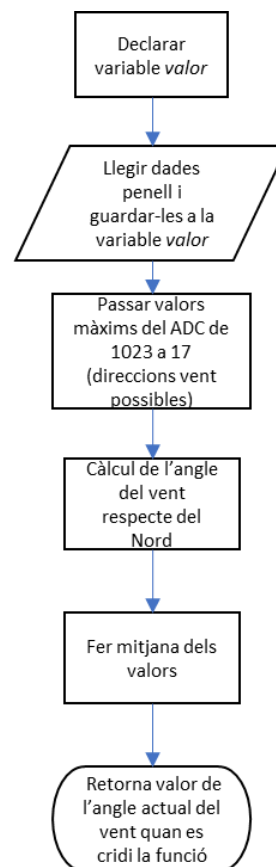


Figura 173: Funció magnetòmetre

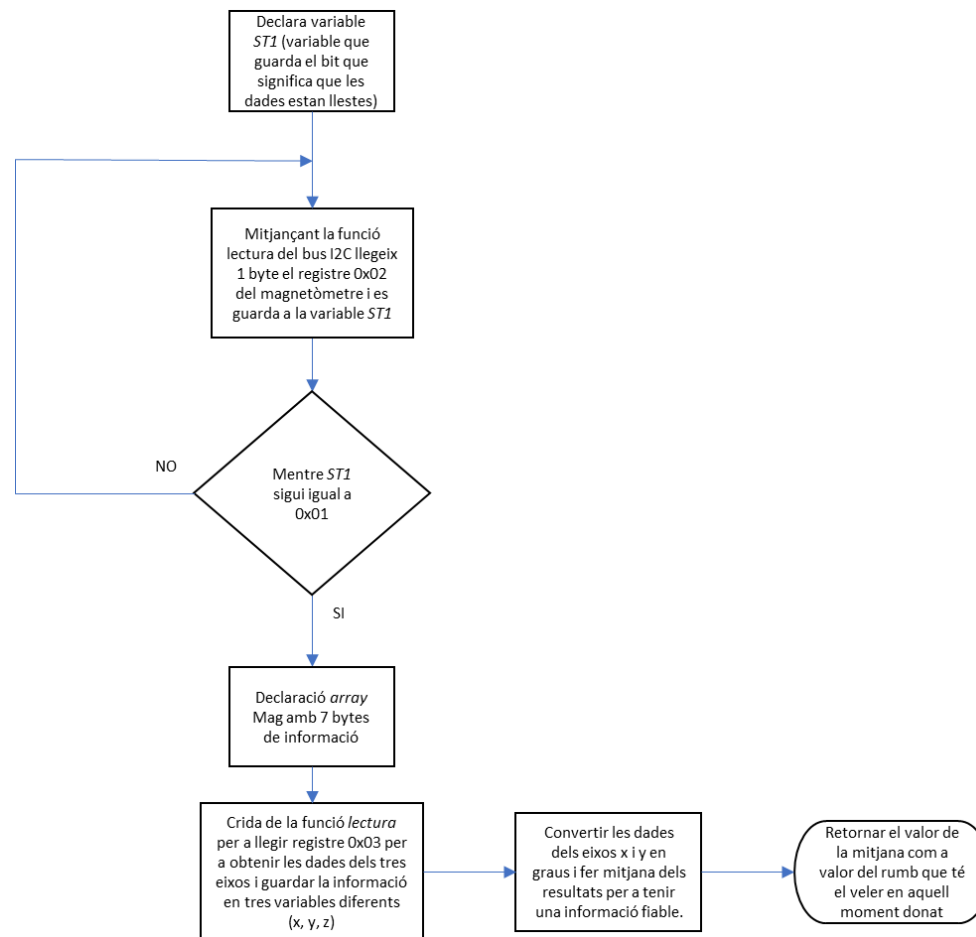


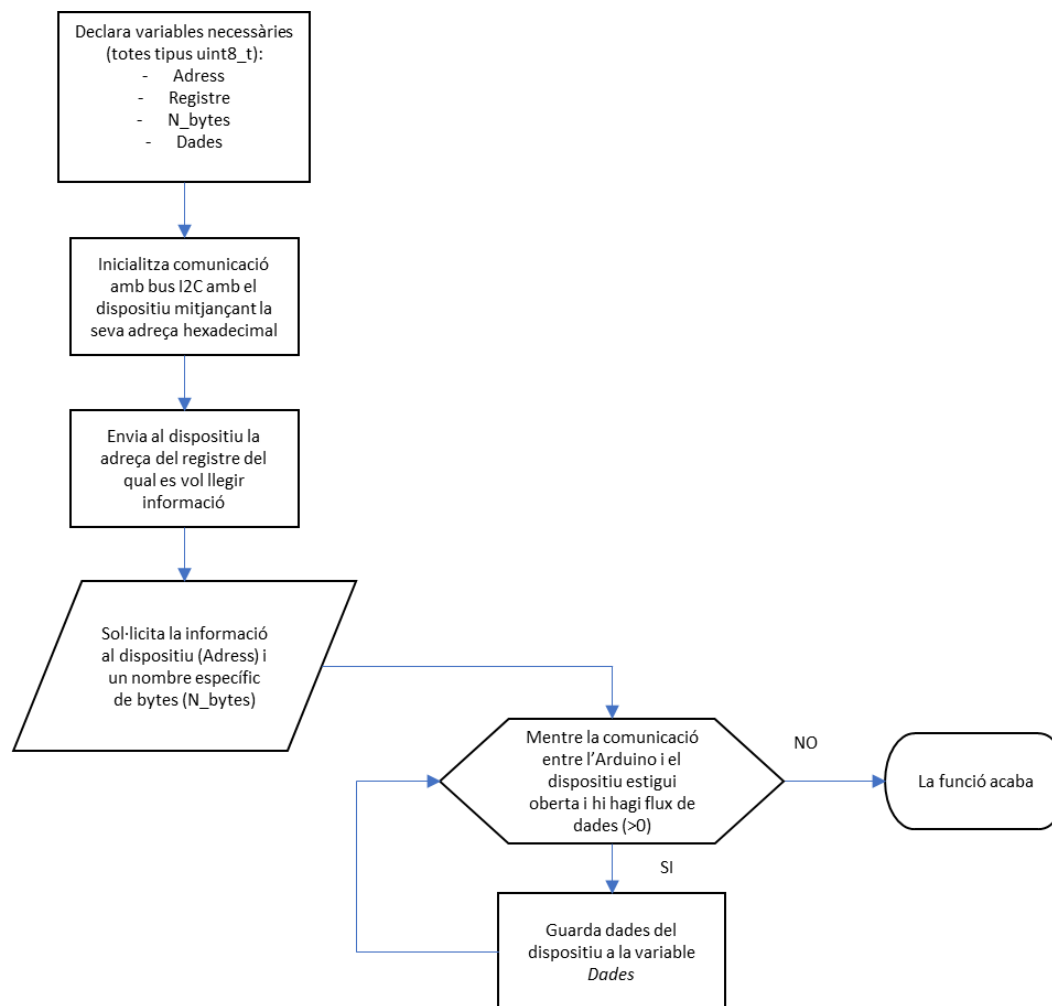
Figura 174: Funció lectura I²C

Figura 175: Funció escriptura I²C

