EPS
Escola Politècnica
UdG Superior

Projecte/Treball Fi de Carrera

Estudi: Enginyeria Industrial. Pla 2002

Títol: ANÀLISI HIDRODINÀMIC DE VEHICLES SUBMARINS MITJANÇANT EINES DE SIMULACIÓ CFD

Document: Memòria i Annexos

Alumne: Toni Güell Bosch

Director/Tutor: Lino Montoro Moreno / David Ribas Romagos
Departament: Eng. Mecànica i de la Construcció Industrial
Àrea: Mecànica de Fluids/Arquitectura i Tecnologia de Computadors

Convocatòria (mes/any): Juny/2013

CONTINGUT

1. INTRODUCCIÓ: 2

1.1. Antecedents 2

1.2. Objecte 3

1.3. Especificacions i abast 3

1.4. Contingut de l'estudi 3

2. EXPLORACIONS SUBMARINES: 5

2.1. Bases del moviment a l'aigua 5

2.2. Definició i caracterització dels AUV 12

2.3. Girona 500 19

3. ESTUDI DEL COEFICIENT D'ARROSSEGAMENT DEL GIRONA 500 25

3.1. Objectiu de l'estudi 25

3.2. Definició del coeficient d'arrossegament 25

3.3. Simulació numèrica 26

3.4. Conclusió de la simulació numèrica 46

4. GRÀFIQUES DE CONDICIONS 47

4.1. Pressions 47

4.2. Velocitats 49

4.3. Línies de corrent 55

5. RESUM ECONÒMIC 58

6. GLOSSARI 59

7. BIBLIOGRAFIA 60

ANNEX A. CREACIÓ I SIMPLIFICACIÓ DE LA GEOMETRIA 61

ANNEX B: EVOLUCIÓ HISTÒRICA 69

ANNEX C: TIPUS DE SUBMARINS 74

ANNEX D. PROGRAMARI ESPECIALITZAT UTILITZAT 79

ANNEX E. MÈTODE NUMÈRIC DELS VOLUMS FINITS 81

ANNEX F. ESTUDI DE COSTOS 85

1. INTRODUCCIÓ

1.1 Antecedents

El grup VICOROB de la UdG té una àmplia experiència en l'àmbit dels vehicles i robots submarins, amb diferents prototips degudament validats experimentalment. L'interès d'aquest grup de recerca és anar més enllà i conèixer exactament el comportament del vehicle dins de l'aigua.

El grup VICOROB disposa d'un vehicle subaquàtic, l'anomenat GIRONA 500 que ha estat dissenyat com una plataforma d'investigació amb capacitat per tornar a configurar-se per a moltes aplicacions diferents, que van des dels clàssics sonar i servei d'imatges de vídeo fins a tasques d'intervenció autònomes difícils. A la figura 1.1 es veu el GIRONA 500 navegant a la piscina del grup VICOROB en un dels assajos que s'hi han dut a terme.

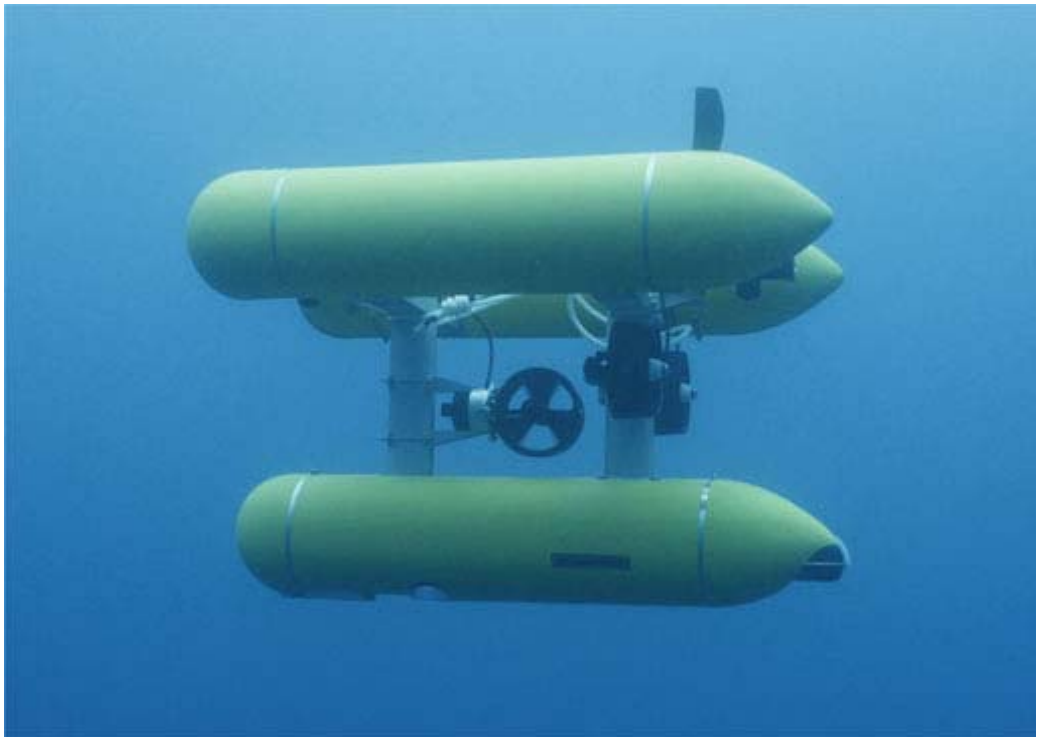


Fig. 1.1. Fotografia del GIRONA 500 a la piscina del grup VICOROB al Parc Tecnològic.

1.2 Objecte

L'objectiu del present projecte és obtenir a partir de la geometria real del vehicle GIRONA 500 els coeficients hidrodinàmics del submarí complet i de solament l'estructura per així conèixer l'efecte hidrodinàmic del nombre de propulsors acoblats al respectiu vehicle aquàtic.

1.3 Especificacions i abast

Per a l'estudi dels coeficients hidrodinàmics del vehicle, quan navega, s'han utilitzat eines de simulació numèrica. S'ha utilitzat el programari Ansys Workbench per a la discretització de la geometria i per realitzar les simulacions. El tractament de la geometria externa del vehicle s'ha fet mitjançant el programa Autodesk Inventor (veure Annex D).

Aquest estudi no té com a objectiu determinar les mancances hidrodinàmiques del GIRONA 500 ni proposar oficialment millores en aquest aspecte.

1.4 Contingut de l'estudi

Atenent que aquest estudi no segueix l'estructura d'un projecte convencional, s'ha cregut convenient dedicar aquest apartat per fer referència a la forma amb que s'ha estructurat i els continguts dels diferents apartats.

Al capítol 2 s'ha resumit el resultat d'una feina prèvia de recerca que l'autor ha fet en el context d'aquest treball per tal de situar l'estat de la qüestió pel que fa a l'exploració submarina, prestant especial atenció als AUV's (Autonomous Underwater Vehicles). A l'apartat final d'aquest capítol es detallen les característiques principals del GIRONA 500.

El capítol 3 s'ha dedicat per estudiar el coeficient hidrodinàmic del GIRONA 500. A l'apartat 3.1 es defineix detalladament l'objecte de l'estudi. A continuació, a l'apartat 3.2 es defineix i caracteritza el concepte de coeficient d'arrossegament. A l'apartat 3.3 es detalla el procés de simulació numèrica, des del preprocés fins als resultats obtinguts, les conclusions dels quals seran exposades al darrer apartat (3.4) d'aquest capítol.

El capítol 4 conté diferents imatges que mostren de manera gràfica les condicions amb les que es troba el submarí i el fluid al moures a la velocitat simulada. Magnituds de pressió, velocitat, línies de corrent, turbulències...

Al capítol 5 es resumeix l'estudi de costos.

Al capítol 6, glossari, es defineixen els conceptes i paraules clau utilitzats al llarg de l'estudi. Si bé no és imprescindible, és recomanable la lectura d'aquest annex abans de continuar amb la memòria, d'aquesta forma, la lectura d'aquesta esdevindrà més amena i el grau de comprensió major.

Al capítol 7 s'hi detalla la bibliografia empleada en el desenvolupament de la memòria i els annexos.

A continuació s'han inclòs els següents annexes:

A l'annex A es detallen la creació i les simplificacions realitzades a la pròpia geometria del submarí per poder ser utilitzat amb el programari de simulació numèrica.

A l'annex B s'ha dut a terme una recerca de l'evolució històrica de la navegació submarina.

A l'annex C resumeix totes les varietats de naus subaquàtiques i els propòsits pel que s'utilitzen.

A l'annex D s'ha fet una breu referència als programes específics utilitzats en l'estudi.

A l'Annex E es fa una breu introducció al mètode del volums finits, mètode numèric que utilitza el programa de càlcul utilitzat per a la simulació numèrica.

A l'annex F es detalla l'estudi de costos de la realització de l'estudi.

2.EXPLORACIONS SUBMARINES

Aquest capítol té la finalitat de donar uns coneixements bàsics de la navegació submarina en general i en el Girona 500 en particular. Al primer apartat s'explicaran les bases del moviment dins de l'aigua i totes les forces que hi participen. Al segon s'expliquen tots els elements d'un AUV que participen en qualsevol exploració submarina. Finalment, a l'apartat 2.3 es detallen les característiques del Girona 500 tant de disseny, propulsió i font d'alimentació.

2.1 Bases del moviment a l'aigua

2.1.1. Introducció

Qualsevol vehicle, tant si es tracta d'un vehicle de tres rodes, avió, camió o submergible, ha de ser capaç de transportar persones, equips o altres elements d'un lloc a un altra. Si ho fa sota l'aigua requereix mètodes especials per propulsar el vehicle d'una manera controlada a través d'un món aquàtic tridimensional. Qualsevol vehicle tindrà aquests requisits:

- S'ha de tenir algun dispositiu per a la generació de les forces de propulsió necessàries.
- Es requereix alguna forma de subministrar a aquests dispositius l'energia necessària per fer el seu treball.
- Es necessita alguna manera de controlar la força i la direcció de les forces produïdes

2.1.2. Fonaments del moviment d'un vehicle a través de l'aigua

El filòsof grec Aristòtil (384-322 a.C) es feia moltes preguntes sobre el món natural, incloent: "Què fa que alguna cosa es mogui?" al observar un carro tirat per cavalls, va pensar que el carro es movia perquè el cavall estirava, i que va deixar de moure's quan el cavall es va aturar. Encara que no és molt precisa, aquesta noció aristotèlica del

moviment sembla raonable, fins i tot en l'actualitat, i prevalgut durant 1.800 anys.

Després, al segle XVI, un astrònom i filòsof italià anomenat Galileu (1564-1642) va realitzar experiments senzills que qüestionaven les idees d'Aristòtil sobre moviment. Per exemple, alguns dels experiments de Galileu van mostrar que una bola podria mantenir-se rodant per molt de temps, fins i tot si l'impuls inicial que ha de rodar havia cessat. Això i altres experiments van portar a Galileu a la conclusió que les forces no s'han de mantenir perquè un objecte continuï en moviment , sinó que es requereixen per iniciar el moviment d'un objecte, per aturar o canviar la direcció d'aquest moviment.

Encara que una mica contradictori, aquesta idea va revolucionar la comprensió científica de com es mouen els objectes. Els científics ara reconeixen, per exemple, que el carro no s'atura perquè el cavall deixa d'estirar sinó per la fricció a les rodes.

2.1.3. Lleis de Newton

A la fi del segle XVII, Isaac Newton (1642-1727), un matemàtic anglès, científic i filòsof, basant-se en l'obra de Galileu va desenvolupar tres equacions matemàtiques que són simples en la seva forma, però profundament influents. Descriuen amb notable precisió el moviment de tots els objectes, des de grans de sorra a galàxies senceres, està controlada per forces mecàniques bàsiques. Aquestes relacions són conegudes com les lleis del moviment de Newton. A causa de la seva precisa, quantitativa naturalesa i poder predictiu, les lleis de Newton constitueixen la base de la majoria de la ciència i l'enginyeria moderna.

Simplificació de les lleis de Newton del moviment per al control de vehicles:

1. Per mantenir la velocitat i direcció constant, totes les forces que actuen sobre el vehicle han d'estar en equilibri, pel que els seus efectes es contraresten.

2. Per canviar la velocitat i /o direcció, hi ha d'haver una desequilibri de les forces que actuen sobre ell, de manera que la força neta no és zero.

3. Per empènyer un vehicle en una direcció, s'ha de pressionar una altra cosa igual en la direcció oposada.

Una cosa que es pot veure immediatament de les lleis del moviment és que la comprensió de les combinacions de forces que actuen sobre un vehicle és essencial per la comprensió de com fer que es mogui i com controlar el seu moviment.

2.1.4. Forces sobre un vehicle submergit

Cinc tipus de forces influeixen en el moviment d'un vehicle sota l'aigua (es mostren a la fig. 2.1):

- Pes (Weight)
- Flotabilitat (Buoyancy)
- Empenta (Thrust)
- Sustentació (Lift)
- Arrossegament (Drag)

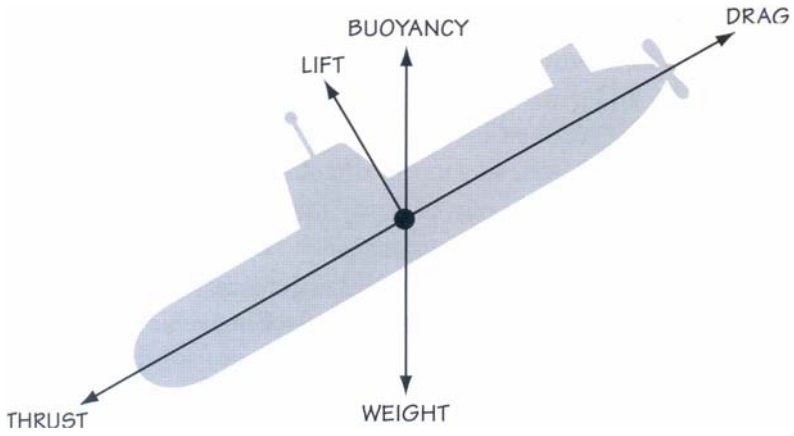


Fig. 2.1 Forces que actuen sobre un vehicle que es mou sota l'aigua

Aquests no són els únics tipus de força en el món, però aquestes són les cinc categories de la força que afecten directament als moviments de vehicles a l'aigua. Tot seguit s'explicaran cada una de les forces.

2.1.4.1 Pes

El pes és sempre una força descendent causada per la interacció entre la massa del vehicle i la gravetat. Actuant per si mateix, el pes tendeix a estirar un vehicle cap avall a través de l'aigua.

2.1.4.2 Flotabilitat

Una força cap amunt que actua sobre el vehicle, causada indirectament pel pes de l'aigua. La pressió de l'aigua empeny cap amunt el vehicle és major que la pressió empenyent cap avall des de dalt, de manera que l'efecte net és una força d'empenta cap amunt. Actua per si mateixa, la flotabilitat tendeix a empènyer un vehicle cap amunt, cap a la superfície.

2.1.4.3 Empenta

És una força que requereix energia, s'utilitza específicament per a causar o controlar el moviment del vehicle a través de l'aigua. Hèlixs en rotació són el mètode més comú per a generar empenta, però existeixen altres possibilitats. En principi, l'empenta es pot adreçar a qualsevol direcció, tot i que la majoria dels dissenys de vehicles empren una gama limitada de possibles direccions. L'empenta dirigida verticalment es pot utilitzar, en combinació amb el pes i flotabilitat, per controlar la posició vertical d'un vehicle i els moviments verticals a través de la aigua. L'empenta dirigida horitzontalment es pot utilitzar per propulsar el vehicle cap endavant o cap enrere, executar girs a la dreta o l'esquerra, o girar el vehicle en el lloc.

2.1.4.4 Sustentació:

La sustentació és una mica com l'arrossegament , ja que existeix aquesta força només quan hi ha moviment relatiu entre el vehicle i l'aigua. A diferència de l'arrossegament, però, la sustentació sempre actua perpendicular a la direcció de moviment del vehicle a

través de l'aigua en lloc que exactament aquesta direcció. Encara que el terme sustentació suggereix una força cap amunt, també pot actuar cap avall o cap als costats.

Pot ser creada intencionadament amb l'ús de les "ales" fixes o superfícies de control ajustables. Exemples de superfícies de control serien les pales en un submarí, que poden ser inclinades cap amunt o cap avall per ajudar al submarí, també és un exemple el timó d'un vaixell, que és utilitzat per dirigir el vaixell a esquerra o dreta.

També es pot produir sense voler, perquè gairebé qualsevol superfície en un vehicle pot generar l'elevació quan el vehicle es mou a través de la aigua. Igual que amb l'arrossegament, augmenta la força amb la velocitat del vehicle dins l'aigua. Juga un paper important en el control dels vehicles en moviment ràpid com submarins i torpedes, però sovint és insignificant en vehicles lents com els AUV.

2.1.4.5 Arrossegament

La força que resisteix el moviment relatiu entre un objecte i el fluid que l'envolta s'anomena arrossegament. Els dissenyadors de vehicles han d'entendre l'arrossegament a fons, ja que és la força que limita la velocitat màxima del vehicle, exerceix un paper important en la direcció del vehicle, i consumeix la major part de l'energia utilitzada per vehicles submarins.

Sempre tracta d'aturar el moviment relatiu entre el vehicle i l'aigua al seu voltant. Això obliga al vehicle a tractar de fer el que l'aigua està fent. En aigües tranquil·les, com un estany o piscina, l'arrossegament tractarà de frenar i aturar un vehicle en marxa. En aigua en moviment, com un riu que flueix, l'arrossegament tractarà de portar un vehicle juntament amb el moviment d'aigua, pel que és difícil de controlar.

Per tant, per moure un vehicle a través de l'aigua o per mantenir la posició, es requereixen altres forces per superar les forces d'arrossegament. Aquest és el treball del sistema de propulsió del vehicle generar les forces necessàries. En general, aquestes forces vénen en forma d'empenta a partir d'un o més hèlixs. El sistema de propulsió també ha ser capaç d'ajustar la força, direcció, i el moment de forces de propulsió per produir els moviments del vehicle desitjats. Un aspecte molt important de

l’arrossegament és que la mida de l'efecte d'arrossegament depèn de la velocitat a la qual el vehicle es mou a través de l'aigua. Un vehicle que no es mou en absolut (en relació amb l'aigua) no experimenta arrossegament.

L’arrossegament és la força que utilitzarem alhora de calcular el coeficient de resistència hidrodinàmica. Tot seguit explicarem com obtenir-lo teòricament.

Quan un objecte es mou a través de l'aigua, dos tipus d'arrossegament actuen sobre l'objecte. Un tipus és anomenat arrossegament. És causat per la natural tendència de les molècules del fluid a enganxar-se entre si i als objectes en contacte amb el fluid. Aquest tipus de resistència és el que fa que sigui difícil de remoure la mel o qualsevol altre líquid viscós.

L'altre tipus de fricció es denomina pressió d'arrossegament. La pressió d’arrossegament és causat per la inèrcia o massa del fluid. Quan un objecte es mou dins un fluid, ha d’impulsar el fluid fora del camí, creant d'aquesta manera una alta pressió a la regió al davant de l’objecte. Mentrestant, una regió de pressió relativament baixa es forma immediatament darrere de la objecte. La caiguda de pressió d'endavant cap enrere crea una força neta que retarda el moviment de l'objecte a través del fluid..

La importància relativa de la viscositat i la pressió d'arrossegament depèn de diferents factors:

- La mida i la forma de l'objecte
- La densitat i la viscositat del fluid
- la velocitat relativa de l'objecte i el fluid

Per a objectes molt petits i lents, com els bacteris que es mouen a través aigua, l’arrossegament viscós és el tipus dominant d'arrossegament, i la pressió d'arrossegament és insignificant.

No obstant això, per a objectes més grans, més ràpids com vehicles subaquàtics, la resistència de pressió esdevé molt més significativa i en general domina. Això és particularment cert per a vehicles amb carrosseries poc hidrodinàmiques com els AUV.

En aquests vehicles no simplificats, la pressió d'arrossegament és generalment milers de vegades més gran que l'arrossegament viscós, per tant el viscós es pot ignorar.

Quan la pressió d'arrossegament és molt més gran que el viscós, es pot utilitzar la següent equació (eq.1) de resistència hidrodinàmica per obtenir una estimació aproximada de la resistència total:

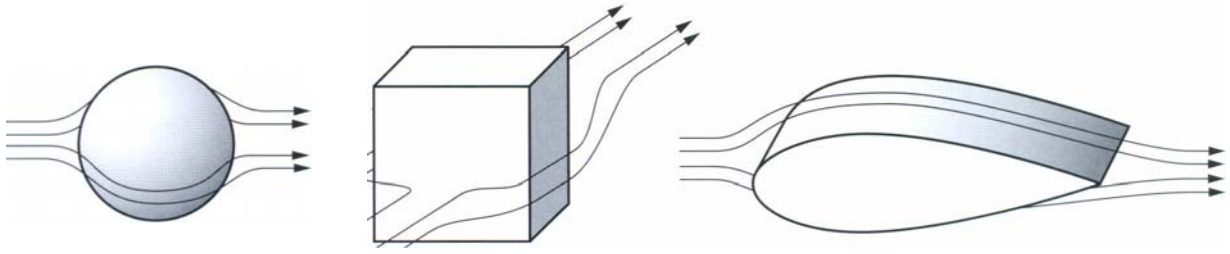
$$F = \frac{1}{2} \times \rho \times C_d \times V^2 \times A \qquad \text{(eq.1)}$$

Els símbols algebraics utilitzats en aquesta fórmula es defineixen a continuació.

- F = arrossegament (en newtons): ja s'ha descrit anteriorment.

- ρ = Densitat del fluid (en quilograms per metre cúbic): Ja que el vehicle estarà operant en aigua, la densitat del fluid a connectar aquí és la densitat de l'aigua. Això varia lleugerament amb la temperatura i la salinitat.

- Cd = coeficient d'arrossegament (un nombre sense dimensions, sense unitats): Les formes aerodinàmiques tenen un menor coeficient d'arrossegament que altres formes. Es pot suposar que un AUV o qualsevol altre vehicle no és particularment aerodinàmic si té un coeficient d'arrossegament per sobre l. A la fig. 2.2 es mostren els coeficients de diferents formes simples.



C_d= 0.5 C_d= 1.1 C_d= 0.23

Fig. 2.2 Coeficients d'arrossegament aproximats

- U = velocitat a través del fluid (en metres per segon): S'utilitza la velocitat màxima desitjada del vehicle en la fórmula de la pressió d'arrossegament. Tingueu en compte que la velocitat és quadrat a la fórmula de la pressió d'arrossegament. Això significa que la fricció augmenta ràpidament en augmentar la velocitat. Per exemple, es quadruplica la seva empenta només per el doble de la velocitat.

- A = àrea frontal (en metres quadrats): Per als càlculs teòrics d'arrossegament, s'haurà d'estimar l'àrea frontal del vehicle. Per això, només cal imaginar la grandària i forma de l'orifici més petit que hauries de tallar d'un tros de cartró per tal que el vehicle passi a través a mesura que avança per l'aigua. La superfície del cartró que has de treure és igual a la àrea frontal del seu vehicle.

Per exemple, en aquesta figura on el submarí que viatja en la direcció de la fletxa, l'àrea frontal és la mateixa que l'àrea de la peça de material eliminat que permet el pas del submarí.

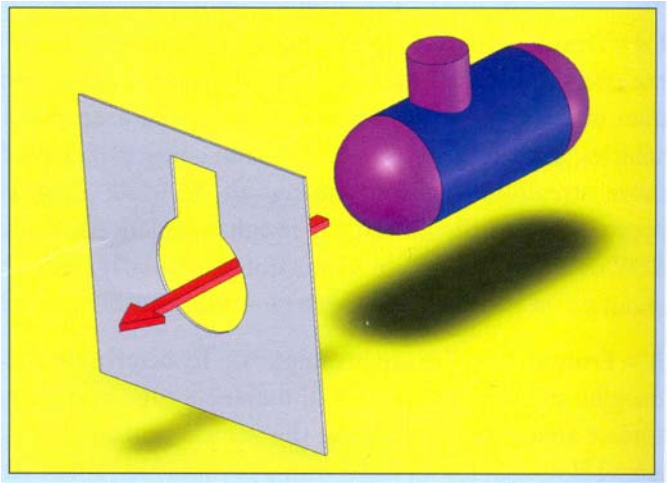


Fig. 2.3 Càlcul de l'àrea frontal

2.2 Definició i caracterització dels AUV

Si el pas dels submarins necessàriament tripulats als governats remotament va suposar una revolució en la indústria de la navegació submarina, la implementació de sistemes d'autosuficiència a aquests últims ha permès dotar-los d'una certa autonomia. És doncs aquesta la característica bàsica que diferencia un AUV d'un ROV el qual ha d'ésser

governat i alimentat des d'una plataforma base. El primer AUV va ésser desenvolupat per l'Institut de Tecnologia de Massachussets a la dècada dels 70.

El que ha propiciat el desenvolupament dels AUV és el fet de no necessitar un vaixell per transportar el vehicle i fer de base de control durant tot el temps d'intervenció que encareix enormement el cost total d'operació. Alguns dels quals requereixen el transport al punt d'interés concret i n'hi ha que fins i tot poden ésser llançats des de la costa.

La principal funció dels AUV és carregar diferents dispositius d'adquisició de dades, ja sigui per recerca o dur a terme inspeccions de manteniment a construccions submarines. Altrament, també son usats per dur a terme diferents accions concretes com les que solien realitzar submarinistes o ROV's. Aquests últims són coneguts com "Intervention AUV's". El terme "autosuficiència", esmentat al primer paràgraf d'aquest apartat, fa referència a dos aspectes principalment:

a) La alimentació dels propulsors i elements auxiliars és proporcionada per bateries de diferent tipologia, cel·les de combustibles integrades al vehicle o fins i tot per mitjà d'energia solar.

b) L'implementació de rutines i instruccions, que recullen aspectes com l'accionament dels propulsors per controlar el desplaçament, la posada en marxa o parada dels diferents elements auxiliars, guiatge i posicionament, la superació d'obstacles o accions a dur a terme en cas de fallada d'algun dels elements del vehicle substitueixen la figura de l'operador.

S'ha de remarcar que alguns AUV necessiten d'un vaixell de suport que els traslladi al punt d'interés o fins i tot que es mantingui en una determinada posició per fer de punt de referència per al seu posicionament, com també n'hi ha que es poden llançar des de la costa.

2.2.1. Propulsió

Els elements de propulsió hauran de proporcionar l'empenta necessària al vehicle per tal de realitzar els moviments requerits per la missió. L'empenta (Fx) necessària vindrà

definida per la resistència hidrodinàmica del vehicle de la següent forma (considerant moviments rectilinis):

$$F_x = \frac{1}{2}\rho V^2 A C_D \qquad \text{(eq.2)}$$

On: ρ és la densitat, V la velocitat en la direcció x, A és l'àrea de referència i C_d el coeficient d'arrossegament.

Per tal d'obtenir la potència necessària només cal multiplicar el terme per la velocitat, obtenint així:

$$Pot = \frac{1}{2}\rho V^3 A C_D \qquad \text{(eq.3)}$$

S'observa que la potència és proporcional al cub de la velocitat, així, per a doblar la velocitat la potència requerida seria vuit vegades major. La velocitat a la que haurà de navegar és un paràmetre molt important alhora de dissenyar un AUV. Generalment, les velocitats no excedeixen els 2 m/s.

Donat que la disponibilitat d'energia a bord d'un AUV és limitada, l'eficiència dels diferents components del sistema de propulsió ha de ser màxima per incrementar-ne l'autonomia. L'eficiència depèn tan de la geometria de les hèlix utilitzades com del rendiment elèctric del motor, pèrdues mecàniques per fricció i transmissions. A més a més, s'hauran de buscar sistemes que apart de ser reduïts i amb un bon ràti potència/pes i potència/dimensió hauran de generar el mínim soroll possible i les vibracions que es generin hauran de ser les mínimes possibles i alhora conegudes. És per això que es sol simplificar al màxim el sistemes de transmissió o optar per acoblaments directes tot prescindint-ne, assolint així els objectius esmentats i evitant introduir soroll i vibracions en excés que podrien contaminar les dades enregistrades pels diferents sensors que pugui dur incorporats.

2.2.2. Alimentació energètica

Com s'ha apuntat anteriorment, l'energia necessària per a l'accionament dels propulsors i la resta d'elements auxiliars és proporcionada per bateries o bé cel les de combustible integrades al propi vehicle. D'això se'n deriva que l'autonomia és limitada, tot i que pot arribar a ser de mesos en determinades tipologies de AUV's. Per tal de seleccionar el sistema d'alimentació adequat s'han de considerar els següents paràmetres:

a) Durada de les missions a portar a terme
b) Velocitat
c) Dimensions, pes i forma del vehicle
d) Reserves energètiques requerides

Altres aspectes a considerar, referents al sistema d'alimentació, inclouen l'energia específica (rati energia/pes), la densitat energètica (rati energia/volum), la fiabilitat del sistema, simplicitat i facilitat d'operabilitat.

La Taula 2.1 recull les característiques de diferents tipologies de bateries, des de les usades actualment i altres en desús per tenir una idea de l'evolució que hi ha hagut en aquest camp (els valors expressats són valors mitjans dins de cada subgrup).

Tecnologia	Energia específica [Wh/Kg]	Densitat energètica [Wh/litre]	Cicles de vida	Altres característiques
Acumulador de plom	30	65	600	-pèrdua de capacitat a Tª baixes -baix cost
Niquel-Cadmi	40	75	1500	-no sensibles a Tª baixa -baix cost
Plata-Zinc	130	240	45	-usades per missions llargues -alt cost
Liti-Io	100	240	1000	-possible operar a alta pressió -cost raonable
Polimer de Liti	170	300	600	-possible operar a alta pressió -molt alt cost

Taula 2.1 Comparació característiques de les bateries més usades

Inicialment s'utilitzaven les dues primeres tipologies, per el seu cost reduït i per la fiabilitat que aportaven, quedant de mica en mica desplaçades per noves tecnologies que proporcionen majors característiques de potència i vida a preus raonables, essent les de Liti-Io les més usades. Les de polímer de liti presenten unes característiques molt bones, però el seu elevat cost(tot i estar en descens) explica la seva baixa utilització.

La Fig. 2.4. mostra una gràfica on es relaciona l'energia específica amb la densitat energètica.

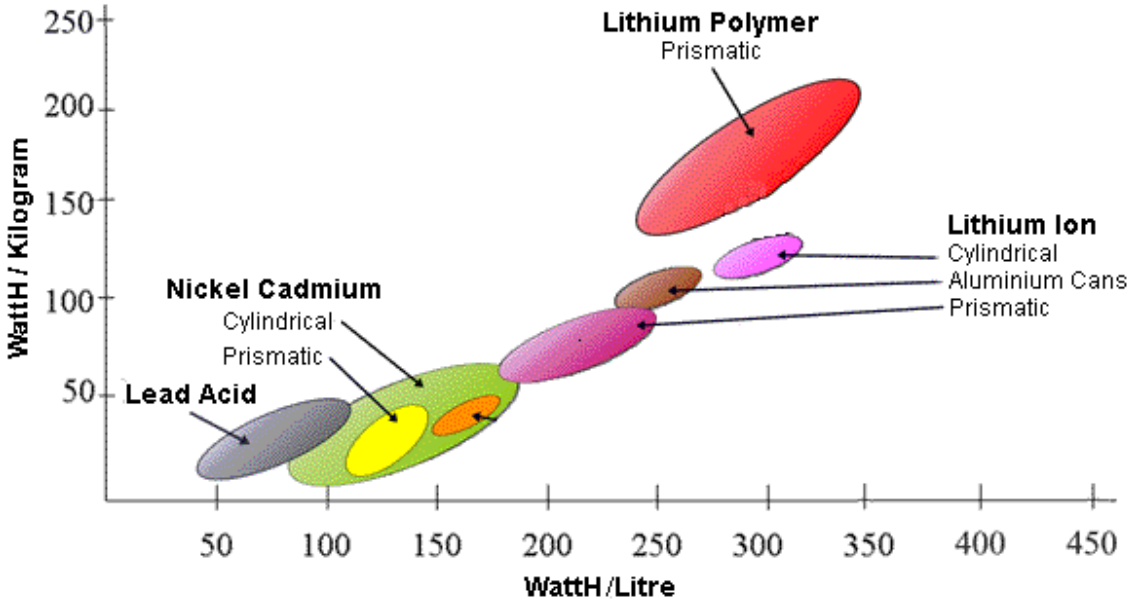


Fig. 2.4 Relació energia específica (Wh/kg) amb Densitat energètica (Wh/l)

Recentment i en vehicles de grans dimensions, apart de les bateries químiques, es comencen a utilitzar les cel·les de combustible de cicle tancat, les quals poden proporcionar fins a tres vegades més autonomia que una bateria de liti-Io. També s'ha desenvolupat un AUV alimentat per energia solar.

2.2.3. Posicionament i guiatge

Es consideren dos conceptes alhora de parlar d'aquests aspectes: precisió de navegació i precisió posicional. La primera fa referència a la precisió amb la que el vehicle navega d'un punt a un altre i la segona a defineix l'error que comet en determinar la posició geogràfica.

Per determinar la posició i la orientació dels AUV's s'utilitzen principalment sensors acústics, brúixoles electròniques, sensors inercials, sensors de profunditat, sensors de velocitat, receptors /emissors GPS i fins i tot càmeres en determinades situacions. Per a determinar la posició global via GPS, el robot ha de sortir a la superfície, on aquesta pot tenir un error de només un o dos metres. Una vegada el vehicle s'ha submergit, la seva posició ha d'obtenir-se acústicament. Hi ha diferents mètodes per aconseguir això:

a) USBL (Ultra Short Baseline system)
b) SBL (Short Baseline system)
c) LBL (Long Baseline system)

Mentre que els dos primers requereixen de calibració prèvia a una immersió i elements de referència posicionats al casc del vaixell base i al fons del mar a la zona a treballar, el sistema LBL (el més car de tots) pot treballar sense més referència que algun receptor al fons, sense la necessitat que el vaixell de suport estigui permanentment empleat durant la missió de l'AUV.

2.2.4. Navegació i flotabilitat

En funció dels requeriments de la missió el vehicle haurà de disposar de certs graus de llibertat, però en tots els casos aquest haurà de realitzar immersions i conseqüentment sortides a la superfície. És per això que la flotabilitat juga un paper molt important en el disseny d'un AUV. La majoria d'ells estan dissenyats de tal forma que la seva flotabilitat sigui nul la, és a dir, submergits sense efectes externs, aquests es mantindrien a una profunditat estable. Llavors, només els cal tenir propulsors en les direccions necessàries per tal de submergir se o ascendir. Altres dissenys disposen de cambres inundables com els submarins per variar la inclinació del vehicle i així definir la orientació desitjada per l'avanç. Les aletes i elements de guiatge també són molt utilitzats en algunes tipologies d'AUV.
Alguns d'ells disposen d'elements de seguretat, perquè en cas de fallada dels elements propulsors alliberar pes del vehicle, i que per pròpia diferència de densitat amb l'aigua aquest ascendeixi naturalment cap a la superfície.

2.2.5. Casc exterior i pressurització

La funció que ha de realitzar un AUV determinarà la geometria del casc exterior, així doncs, un vehicle destinat a cobrir grans distàncies (milers de quilometres) durant períodes llargs de temps (mesos) presenten geometries semblants a les dels torpedes per tal de reduir al màxim l'efecte hidrodinàmic. Per contra, un vehicle que hagi de disposar de molta maniobrabilitat, però la seva velocitat no sigui críticament important, no tindrà una forma tant aerodinàmica, però disposarà de més elements de propulsió per tal d'obtenir els graus de llibertat requerits.

Donades les condicions de treball en ambients subaquàtics on la pressió és major que l'atmosfèrica, els AUV han de disposar de compartiments pressuritzats per albergar diferents components electrònics necessaris per al control del vehicle. La qualitat i resistència d'aquests compartiments vindrà directament definida per la profunditat a què el vehicle haurà d'operar, arribant en determinats casos fins a 6000 metres.

2.2.6. Tipologies bàsiques segons aplicació

Hem vist les principals característiques d'aquests vehicles, i les capacitats que ofereixen. Es podrien fer moltes classificacions en funció de les opcions adoptades per els diferents aspectes fins aquí comentats, però una classificació general, que alhora determinarà moltes d'aquestes característiques, és la que contempla la aplicació que tindrà el vehicle.

Així doncs, es defineixen dues tipologies principals d'AUV, els d'adquisició de dades i els d'intervenció.

Els primers, desenvolupats principalment per la comunitat científica, tenen la missió de recórrer una determinada zona amb la finalitat d'enregistrar dades de diversos paràmetres del medi aquàtic, mapejar el fons marí, detecció de mines en aplicacions militars, etc. Aquesta tipologia generalment es caracteritzen per tenir formes aerodinàmiques, gran autonomia i potències baixes per tal de maximitzar la vida de la bateria.

La segona gran família, coneguts com I-AUV, han estat recentment desenvolupats per portar a terme diverses tasques d'intervenció ja sigui per col·locar cablejat al fons marí, o realitzar altres operacions que anteriorment es duien a terme per submarinistes o ROV. Solen tenir geometries menys hidrodinàmiques i potències i dimensions molt majors.

2.3 GIRONA 500

Aquest capítol presenta el Girona 500, l' AUV desenvolupat al Laboratori de Robòtica Submarina de la Universitat de Girona, que ha estat dissenyat com una plataforma d'investigació amb capacitat per tornar a configurar-se per a moltes aplicacions diferents, que van des dels clàssics sonar i servei d'imatges de vídeo fins a tasques d'intervenció autònomes difícils.

2.3.1 Disseny mecànic:

El vehicle, dissenyat per a una profunditat màxima d'operació de fins a 500 m, es compon d'una estructura d'alumini que suporta tres cascos en forma de torpede de 0,3 m de diàmetre i 1,5 m de longitud , Així com altres elements com els propulsors. Aquest disseny ofereix una bon comportament hidrodinàmic i un gran espai per a l'habitatge de l'equip, mantenint una mida compacte que ens permet operar el vehicle des de petites embarcacions. Les dimensions totals del vehicle són d'1 m d'alçada, 1 m d'ample, 1,5 m de longitud, i un pes de menys de 200 kg.

L'estructura principal del vehicle és d'aliatge d'alumini 6082-T6 i es compon de dos pilars en forma de T cargolats a tres perfils en forma d'U que serveixen com a columna vertebral de cada un dels tres cascos en forma de torpede. Els perfils en forma d'U no només serveixen com a suport dels diferents equips, sinó també com a conductes per els cables de la font d'alimentació i les comunicacions. El mateix principi s'aplica a la part superior de les columnes en forma de T, que també utilitzen un perfil en U per transmetre els cables a l'interior dels pilars, fent possible la connexió entre la part superior i la part inferior del vehicle. S'utilitza el mateix aliatge d'alumini en algunes

parts petites que treballen sota estrès, com els suports per les bateries i els propulsors, mentre que els elements menys crítics estan fets d'acetal, com ara els sensors.

Els tres cossos que componen el vehicle es cobreixen amb una pell de plàstic ABS obtingut a partir de termoconformació. La pell proporciona protecció a l'equip més sensible i redueix la resistència de la vehicle.

Els mòduls de flotació són d'una escuma compost epoxi amb una densitat de 400 kg/m3, estan col·locades a la part superior de la vehicle. La seva missió principal és fer que el vehicle tingui gairebé flotabilitat neutra. De fet, el Girona 500 és lleugerament flotant com a mesura de seguretat davant una fallada crítica en el control sistema. Els blocs són cilíndrics i tenen una ranura en la part inferior que encaixa en els perfils en forma d'U del casc, deixant que el cablejat passi a través d'ells.

Els sistemes electrònics del vehicle es troben a l'interior de dos carcasses cilíndriques de pressió fetes d’un dur aliatge d'alumini anoditzat 6082-T6. El primer habitatge, que conté principalment l'electrònica de control i té flotabilitat positiva, es col·loca al port superior del costat del casc, mentre que el segon, que conté el grup de bateria (el component més pesat del vehicle) i una mica de poder l'electrònica, es col·loca a la part inferior del casc. El casc inferior també té capacitat per la càrrega útil, que es col·loca a la part davantera i ocupa gairebé la meitat del volum disponible. Aquesta ubicació és la més adequada per a la majoria dels equips que poden ser instal·lats, particularment per els sensors, ja que ofereix bona visibilitat cap endavant i cap avall.

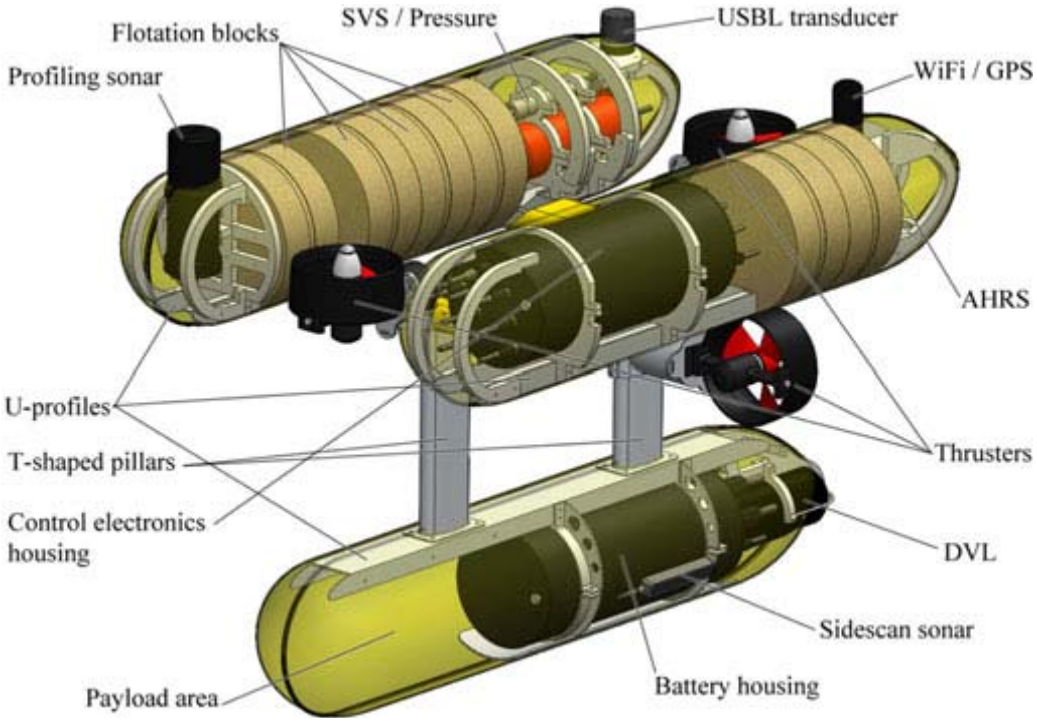


Fig. 2.5. Interior del Girona 500

Com s'ha comentat anteriorment, els elements positivament flotants, com l'escuma de flotació i la carcassa de l'electrònica de control, són col·locats a la part superior del vehicle, mentre que els elements més pesats com ara les bateries i la càrrega útil es col·loquen a la part inferior del casc.

Aquesta disposició particular no és arbitrària, ha estat dissenyada per crear una plataforma molt estable, augmentant la separació vertical entre el CB (Center of Buoyancy- Centre de flotació) i el CG (Center of gravity- Centre de gravetat), aquesta distància dependrà de la configuració del vehicle (càrrega útil equipada, blocs de flotació, el nombre de propulsors), però com es pot veure a la Fig. 2.6, aquesta serà al voltant de 10 cm per a la majoria de les situacions.

Aquesta estabilitat passiva de capcineig i balanceig fa que el Girona 500 sigui especialment adequat per estudis de batimetria i d'imatges així com per a les operacions d'intervenció.

Payload conf. #	Weight (kg)	Distance (cm)
1 (Empty)	141	8.6
2 (Multibeam sonar, camera, LED lights)	147	9.5
3 (RAUVI manipulator)	169	10.5

Payload conf #	CB	CG
1	■	□
2	●	○
3	▲	△

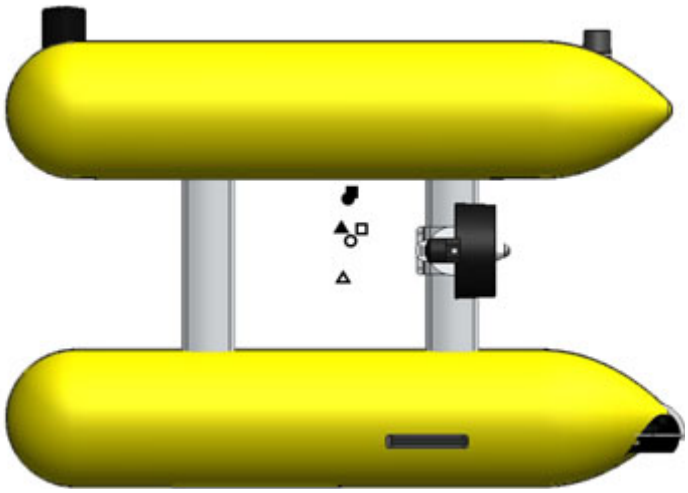


Fig. 2.6. Posicions del CB i del CG segons la càrrega.

2.3.2 Sistema de propulsió :

Per complir els requisits de les diverses aplicacions previstes pel Girona 500, el seu sistema de propulsió ha estat dissenyat per admetre diferents configuracions d'empenta que van des l'empenta vectorial redundant típic de ROV d'intervenció fins a més lleugeres i eficients adients per a tasques de llarga durada. Aquesta configuració es pot implementar fàcilment per mitjà de peces mecàniques reconfigurables i un caixa de connexions amb la capacitat de connectar fins a vuit propulsors, proporcionar energia regulada i les comunicacions RS485.

En la seva configuració mínima, el Girona 500 està equipat amb tres propulsors, dos per accionar l'arrancada i la virada i un per accionar l'estirada [veure fig. 2.7 (a)]. Atès que el vehicle no està equipat amb un timó, dos és el nombre mínim de propulsors necessaris per controlar el moviment horitzontal del vehicle. D'altra banda, només una hèlix és necessària per controlar el moviment vertical a causa de l'estabilitat passiva del vehicle en els graus de llibertat del capcineig i balanceig . Aquesta configuració, però, requereix l'alineació dels vectors d'empenta vertical amb els centres de flotació i gravetat del vehicle i, com a conseqüència, fa que sigui necessari acuradament equilibrar el vehicle cada vegada que s’equipa una càrrega útil diferent. De la mateixa manera, els canvis en la posició vertical del CG es poden compensar amb la configuració de l'altura dels propulsors horitzontals, els suports poden ser muntats al llarg de tot el pilar posterior.

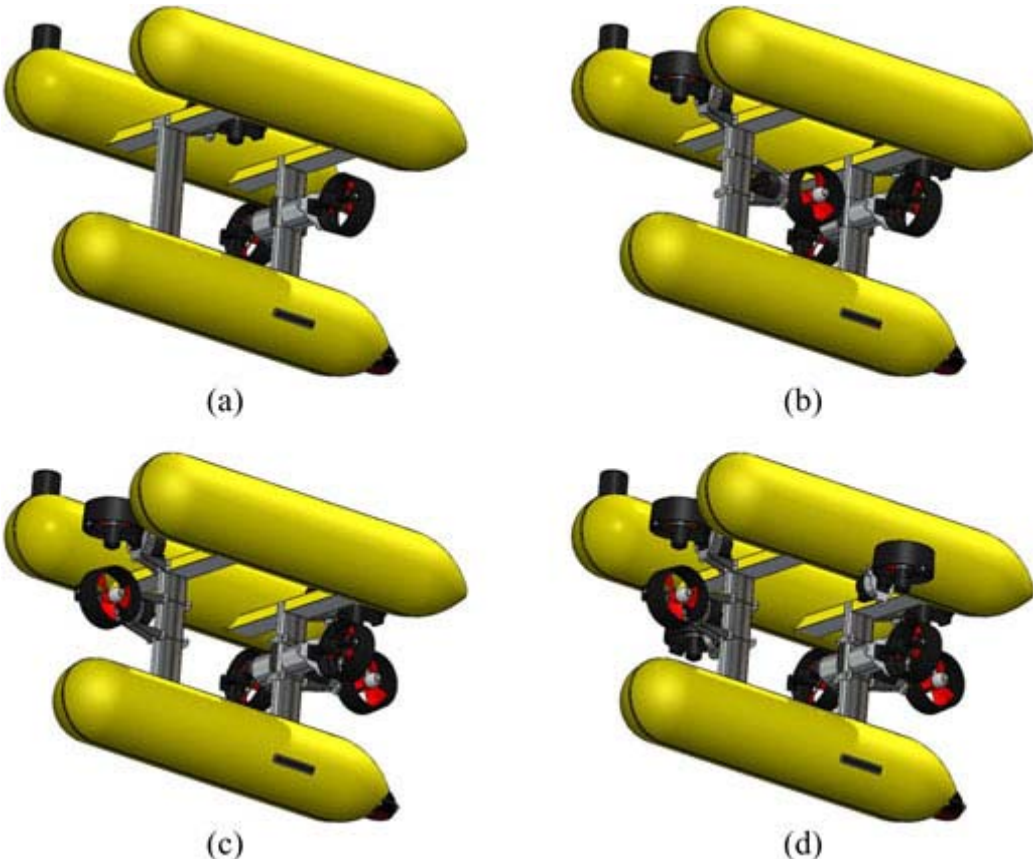


Fig. 2.7. Diferents configuracions dels propulsors en el sistema de propulsió del Girona 500
(a) Tres propulsors, 3 GdL. (b) Cinc propulsors, 5 GdL. (c) Sis propulsors, 5 GdL.
(d) Vuit propulsors, 6 GdL.

La configuració estàndard Girona 500 és la configuració de quatre propulsors. L'addició d'un altre propulsor vertical permet sortir a la superfície en cas de fallada d'un dels propulsors. D'altra banda, en el cas d'un propulsor danyat, les parts estructurals han estat dissenyades per tal que es pugui canviar la configuració de quatre a tres propulsors de manera ràpida permetent tornar al vehicle de nou a l'operació. Val la pena assenyalar que l'addició d'un nou propulsor no implica necessàriament l'augment del consum. La relació potència-força es comporta linealment durant tot el rang d'operació, i per tant, el consum d'una sola hèlix és pràcticament equivalent al consum combinat de dos propulsors produint la meitat de l'empenta cada un.

En la presència de corrents, o quan la tasca demandes la capacitat d'executar moviments laterals, hi ha la possibilitat de muntar propulsors de proa i popa com es mostra a la fig. 2.7 (c) . Com a resultat d'aquesta configuració, el vehicle guanya la possibilitat d'influir

en el moviment en el pla horitzontal. El moviment lateral també es pot aconseguir mitjançant la instal·lació d'una sola hèlix en el mig dels dos pilars, però d'aquesta manera perds control en la rotació [Veure fig. 2.7 (b)].

Finalment, es poden incorporar dos propulsors més verticals per aconseguir un control total del vehicle [vegeu la fig. 2.7 (d)]. A causa de l'estabilitat passiva del vehicle, aquesta configuració només serà emprada en tasques on es requereixi un control precís.

2.3.3. Font d'alimentació

La font d'alimentació del Girona 500 és un clúster de bateria integrat de 24 petits paquets de bateries de ions de liti recarregables amb una capacitat combinada de més de 2,2 kW·h d'energia. Cada paquet de bateria té una capacitat de 95 W·h amb una potència de 14,4 V i està equipat amb el seu propi circuit de seguretat integrat que supervisa i informa dels diferents paràmetres clau (temperatura, voltatge, actual, i el temps de càrrega / descàrrega). Tres controladors d'alta corrent, cada un amb la capacitat de manejar fins a vuit paquets de bateries, són responsables de tots els aspectes de seguretat requerides per la càrrega i descàrrega del sistema. El grup de la bateria carregar completament en 4 h utilitzant una font d'alimentació ac-dc.

3.ESTUDI DEL COEFICIENT D'ARROSSEGAMENT DEL GIRONA 500

Les formes hidrodinàmiques tenen un menor coeficient d'arrossegament que altres formes. Es pot suposar que un AUV o qualsevol altre vehicle no és particularment aerodinàmic si té un coeficient d'arrossegament per sobre l. L'objectiu d'aquest capítol és trobar aquest coeficient mitjançant programari CFD.

3.1 Objectiu de l'estudi

L'objectiu d'aquesta simulació és la de poder calcular el coeficient de resistència hidrodinàmica del submarí quan es mou dins l'aigua del mar amb una velocitat i direcció coneguda.

3.2 Definició del coeficient d'arrossegament:

Com ja s'ha explicat al capítol anterior el coeficient de resistència hidrodinàmica s'obté a partir de la fórmula següent:

$$C_D = \frac{F}{\frac{1}{2} \times \rho \times V^2 \times A}$$

On:

- F és la força d'arrossegament sotmesa el submarí . S'expressarà en N
- El factor ½ prové d'Euler i Bernoulli.
- ρ és la densitat de l'aigua de mar (1025 kg/m^2)
- V és la velocitat d'entrada del fluid o el submarí. En les simulacions es va utilitzar una velocitat de 10 km/h. S'introduiran en m/s.
- A és l'àrea en m^2 del cos que es veu mirant en la direcció del moviment.

3.3. Simulació numèrica

S'han realitzat dos tipus de simulacions del submarí, una amb totes les parts i l'altra amb només l'estructura i els flotadors. El segon cas s'ha fet per poder analitzar l'impacte hidrodinàmic que tenen els propulsors. En cada cas s'han realitzat diferents tipus de mallats diferents per poder veure l'impacte que tenen en el resultat final.

3.3.1 Preprocés

En aquest apartat s'explica el procediment seguit abans de poder simular el moviment del submarí GIRONA 500 dins un fluid en 3D.S'ha utilitzat el programari ANSYS 13.0 per a tot els passos del preprocés i la simulació.

La primera part del preprocés és la definició de la geometria, a part de la geometria del submarí també s'haurà de definir una mena de túnel d'aigua virtual dins el qual es mourà el cos que volem estudiar. Aquest túnel es construeix a partir d'uns valors respecte les cotes del cos.

El segon pas es la discretització del volum creat anteriorment en milers de parts amb propietats físiques iguals, aquestes divisions s'aconsegueixen fent un mallat.

Finalment l'última tasca abans de simular és la de definir les condicions del contorn per assimilar-lo a la realitat, com per exemple velocitats, temperatures, forces...

3.3.1.1 Definició geomètrica del model

El primer va ser obtenir un dibuix 3D del submarí el màxim semblant al de la realitat, després d'un seguit d'intents i problemes s'ha utilitzat un dibuixat amb inventor i amb simplificacions que s'expliquen a l'annex A .

Un cop obtingut s'importa la geometria en format IGES al programa de simulació per poder fer-li el túnel virtual al voltant que simularà el medi líquid pel qual es mou el submarí.

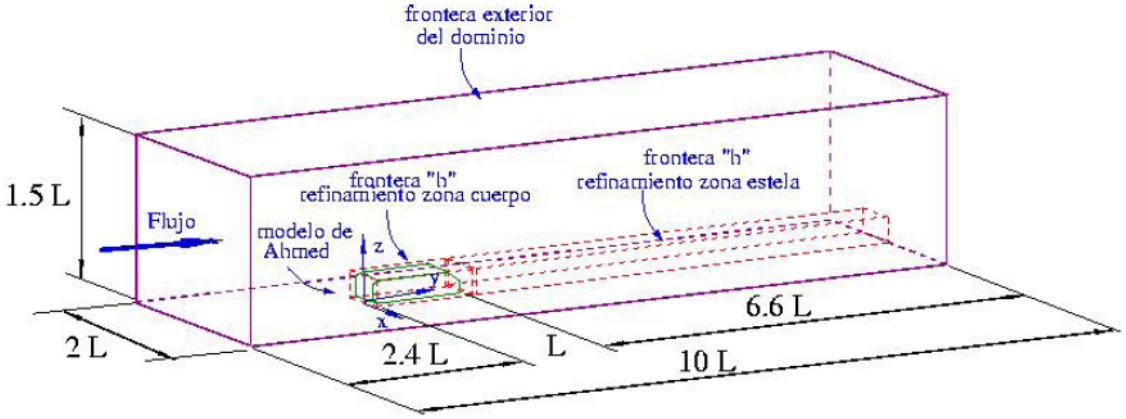


Fig. 3.1 Exemple canal hidrodinàmic

L'exemple de túnel de la fig. 3.1 pertany a la simulació d'un vehicle que es mou sobre el terra. Per assimilar-ho al nostre model s'ha decidit fer-lo cilíndric i no rectangular ja que el submarí al moure dins l'aigua el fluid afecte a tot el cos.

Finalment les dimensions venen donades per la taula 3.1:

Dimensió	Relacio (Valor x Longitud)	Mida (mm)	Referencia
Distància del cos a l'entrada	2.4 x L	3600	A
Distància del cos a la sortida	6.6 x L	9900	B
Distància del cos a les parets	1.75 x L	2625	C

Taula 3.1 Dimensions del túnel

On:

L= 1500 mm

Un cop creat el canal hidrodinàmic es fa una subtracció booleana per tal de que el volum final sigui una resta entre el volum del túnel i el del submarí. Un cop obtingut aquest cos ja es pot mallar i aquest és el segon pas.

3.3.1.2 Discretització de la geometria

Per poder simular es va discretitzar la geometria, es va fer amb el mateix ansys i és la part on hi hagut més problemes i alhora la més complexa. Teníem un nombre d'elements màxim predefinit de dos milions d'elements aproximadament per tant s'ha modificat les propietats del mallat per arribar a aquest objectiu.

Es van realitzar moltes proves i com he dit van sorgir molts problemes ja sigui pel nombre d'elements, la complexitat de la geometria, problemes amb llicencies...

Es van obtenir diferents tipus de mallats on cada un és l'evolució de l'anterior. Tot seguit s'explica aquesta evolució.

Inicialment el mallat general es va fer a partir d'una curvature size function. La funció mida de curvatura examina curvatura en les vores i cares i calcula mides dels elements en aquestes entitats tal que la mida no violi la mida màxima o l'angle de curvatura normal, tan si es calcula automàticament pel mallador o definit per l'usuari.

Aquesta size function permet modificar el mallat segons les propietats següents:

- Curvature Normal Angle (Angle de curvatura normal): és l'angle màxim permissible que una cara d'un element se li permet abastar.
- Max Face Size (Mida màxima de la cara): és la mida màxima que la size function donarà al mallador superficial.
- Min Size (Mida mínima): és la mida mínima que la funció de mida tornarà al mallador. Alguna mida dels elements pot ser menor ja que està basat en mides de les característiques locals o altres anomalies geomètriques.
- Max Face (Mida màxima): és la mida màxima que la funció de mida tornarà al mallador.
- Growth Rate (Taxa de creixement): representa l'augment de la longitud d'element amb cada capa successiva d'elements. Per exemple, una taxa de creixement de 1,2 dóna com a resultat un augment del 20% en la longitud element amb cada capa successiva d'elements.

Es va fixar la mida mínima a 0,1 mil·límetres i l'angle de curvatura normal s'hi va deixar el valor per defecte que en el nostre cas és de 70,39 º. Per tant els valors que es van variar són els de Max Face, Max Size i el Growth Rate.

Es van realitzar vàries proves fins arribar al nombre d'elements desitjats, a la taula 3.2. es mostren els diferents tipus de mallats obtinguts:

Geometria	Max. Face(mm)	Max Size (mm)	Growth Rate	Nombre d'element (Milions)
Estructura sense propulsors (A.1)	100	100	1.4	3.27
	100	100	1.5	3.26
	100	100	1.7	3.25
	200	200	1.7	0.4
	120	120	1.7	1.9
Submarí complet (B.1)	200	200	2	0.74
	200	200	1.7	3.7
	200	200	1.5	5.29
	220	220	1.7	3.7
	100	100	1.9	3.6
	300	300	1.4	1.4
	300	300	1.7	3.4
	120	120	1.4	3
	140	140	1.4	2.3
	148	148	1.4	2.16
	155	155	1.4	2

Taula 3.2 Mallats A.1 i B.2

Els primers mallats utilitzats de la geometria estructura i completa són els remarcats amb 1.9 i 2 milions d'elements respectivament. També es va provar amb algun mallat superior als 3 milions d'elements però donaven errors de llicències.

Als mallats inicials de l'estructura i del submarí complet els anomenarem A.1 i B.1 respectivament.
A la fig. 3.2 és mostra una secció en planta del mallat A.1.

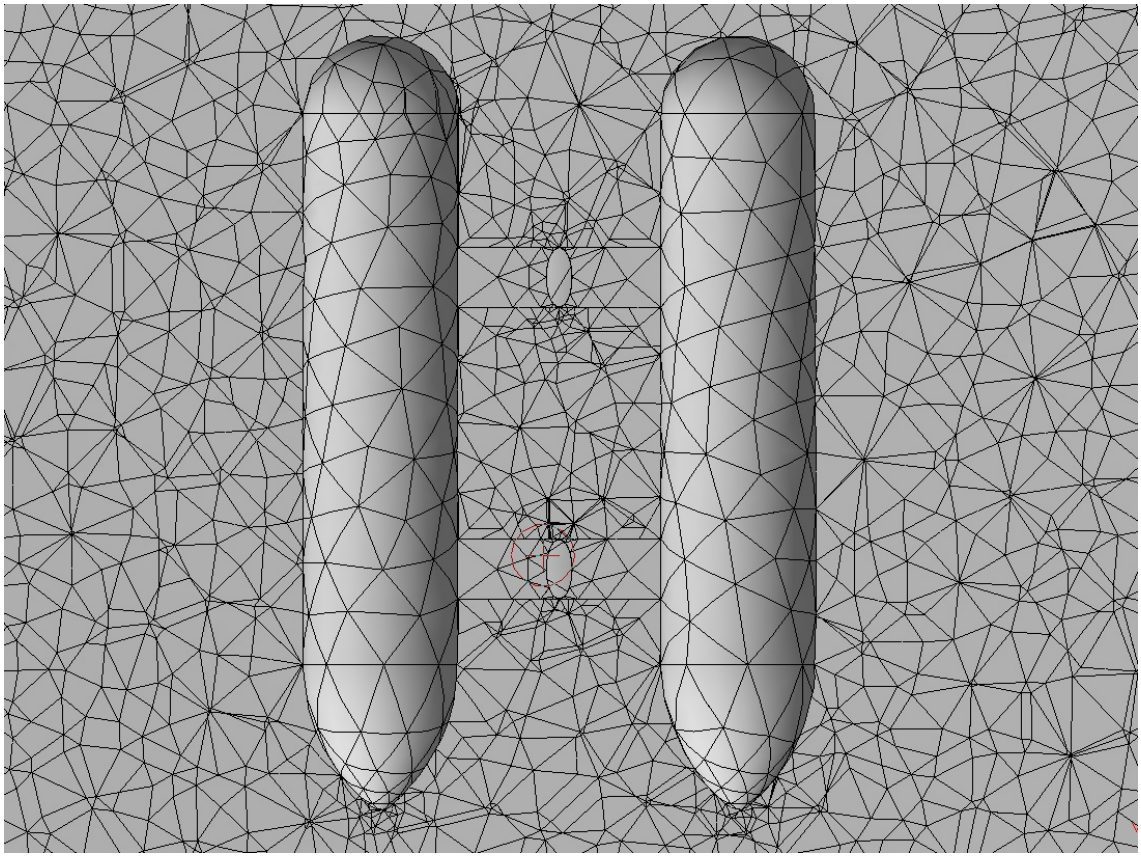


Fig 3.2 Secció en planta del mallat A.1

A la fig.3.3 és mostra una secció del perfil del mallat B.1.

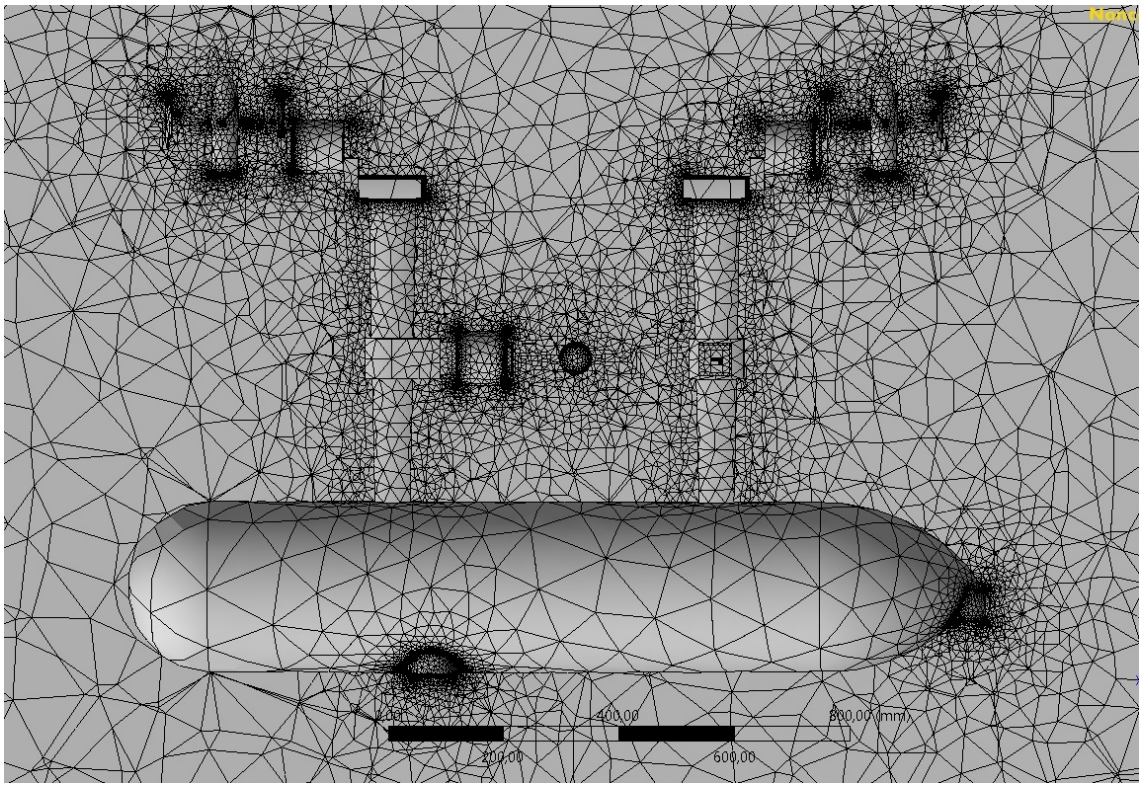


Fig 3.3 Secció del perfil del mallat B.1

Els elements van creixent de mida a mesura que es van allunyant del submarí fins arribar a la mida màxima definida anteriorment. Ja és una malla bastant bona però els elements al voltant del submarí tenen un creixement massa ràpid i per tant són massa grans com per obtenir resultats acurats. Aquest problema es resoldria disminuint el Growth Rate (taxa de creixement) però al fer-ho augmentava molt el número d'elements i per tant no es podia simular. A partir d'aquí es va decidir introduir dins al mallat una capa al voltant del volum del submarí anomenada Inflation.

El que fa la inflation és substituir els elements tetraèdrics del voltant del submarí per unes capes més regulars d'elements prismàtics (extrusions de triangles) de rati progressiu partint del mallat triangular de la superfície del volum.

En el cas de l'estructura sense propulsors es va introduir l'inflació sense modificar la mida dels elements de la Size Function. Es van obtenir dos mallats, un amb l'inflació per defecte Smooth Transition i l'altra amb la First Layer Thickness.

L'Smooth transition (Transició suau) utilitza la mida local de l'element tetraèdric per calcular l'altura inicial i l'altura total, de manera que la taxa de canvi de volum és suau. Cada triangle que està sent inflat tindrà una alçada inicial que es calcula a partir de la seva àrea. Això vol dir que per una malla uniforme, les altures inicials serà aproximadament la mateixa, mentre que per a una malla variable, les altures inicials variarà. L'augment del valor de la taxa de creixement redueix l'alçada total de la capa d'inflació. L'altura total s'aproxima a un valor asimptòtic al nombre de capes d'inflació.

Les propietats que varien el nombre d'elements en l'Smooth transition són les següents:

- Transition Ratio (Relació de transició): En termes bàsics, el control de relació de transició determina la velocitat a la qual els elements adjacents creixent. És el canvi de mida basada en el volum entre l'última capa d'elements en la capa d'inflació i els primers elements a la regió de tetràedre. El valor de la relació de transició és un valor ideal i ha de produir un canvi de mida exacte de la inflació a partir d'un límit planar. No obstant això, s'ha de tenir en compte que les zones de forta curvatura presentarà una inexactitud en el canvi de mida. Els valors vàlids per a la relació de transició són de 0 a 1, el valor predeterminat és 0.272.

- Maximum Layers (Capes màximes): determina el nombre màxim de capes d'inflació que es crea en la malla. Els valors vàlids són d'1 a 1000. (També a Firts Layer Thickness)

- Growth Rate (Taxa creixement): determina el gruix relatiu de les capes adjacents d'inflació. A mesura que s'allunyen de la cara a la qual el control de la inflació s'aplica, cada capa successiva és d'aproximadament un factor de taxa de creixement més gruixuda que l'anterior. Els valors vàlids són de 0,1 a 5,0. Per defecte és 1,2. (També a Firts Layer Thickness)

Per altra banda l'inflació First Layer Thickness (Espessor Primera Capa) crea capes de constant inflació utilitzant els valors de l'alçada de la primera capa, el nombre màxim de capes i la taxa de creixement de controls per generar la malla de la inflació.

Aquesta inflació també depèn del nombre de capes màxim i de la taxa de creixement però s'afegeix una característica que és la First Layer Height (Alçada de la primera capa) que defineix l'altura de la primera capa d'inflació.
La diferència entre una i altra és que a la segona el gruix de la primera capa d'inflació i cada capa següent és constant.

A la taula 3.3 es mostren els dos mallats obtinguts:

Inflation	Growth Rate	Maximum Layers	Transition Ratio	First Layer Height	Nombre d'element (Milions)
A.2 Smooth Transition	1,2	5	0,272	-	1,9
A.3 First Layer Thicknes	1,2	5	-	1	1,91

Taula 3.3. Mallats A.2 i A.3

Pel que fa els resultats obtinguts no afecta molt quina de les dues esculls així que per els mallats posteriors es va utilitzar la Smooth Transition.

La fig. 3.4 mostra una secció en planta del mallat A.2 i s'hi pot apreciar les capes creades al voltant del submarí gràcies a l'inflation.

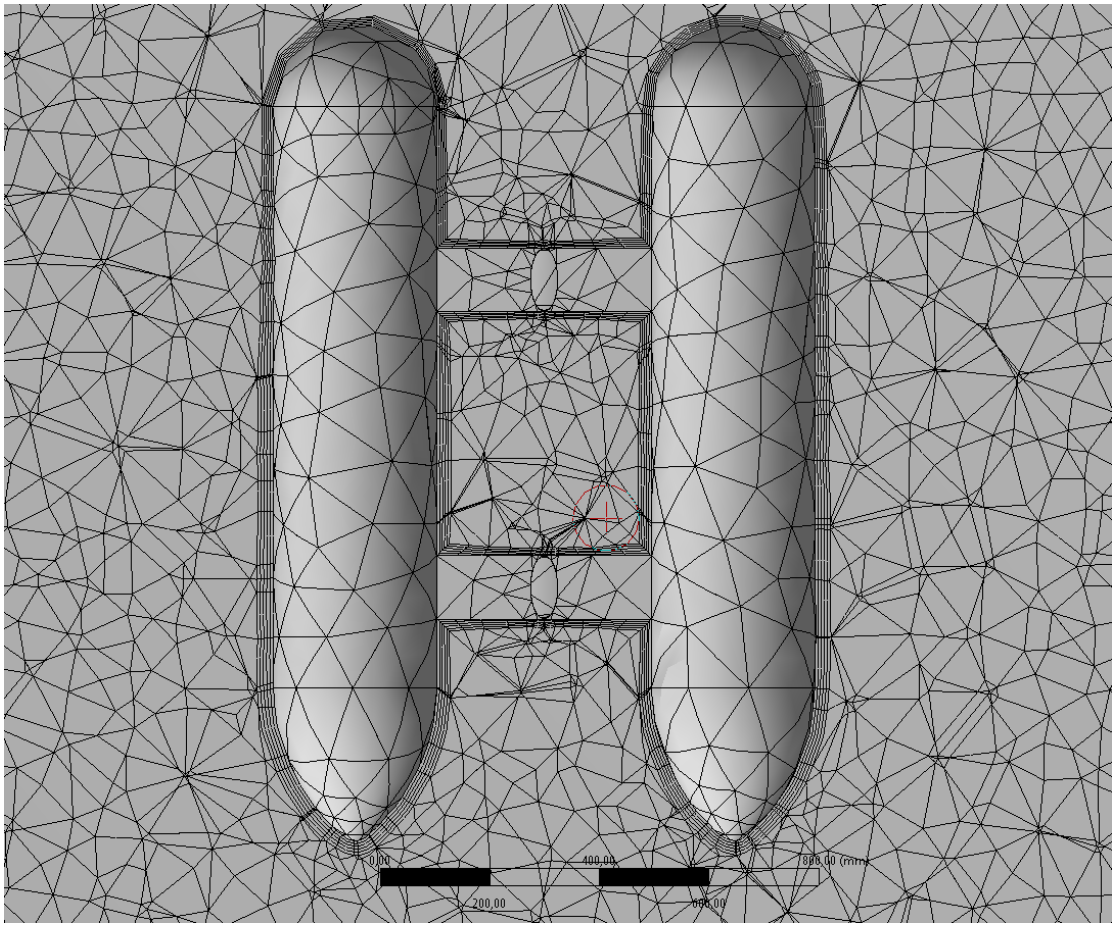


Fig 3.4 Secció en planta del mallat A.2

En el cas del submarí complet no va ser tant senzill com simplement introduir la inflation sinó que per temes de llicències també es van variar els paràmetres inicials de la size function.

Inicialment es va introduir la inflation dins al mallat B.1 amb dos milions d'elements, el resultat va ser un mallat més gros del permès per les llicències de la universitat així que el següent pas va ser reduir el nombre d'elements modificant els paràmetres de la size function i mantenint els de la smooth transition fins obtenir els dos milions d'elements.

Inflation	Growth Rate	Maximum Layers	Transition Ratio
Smooth Transition	1,2	5	0,5

Taula 3.4. Paràmetres de la inflation dins el mallat B.2

En aquests procés es va veure que al introduir la inflation els nombre d'elements permesos per les llicències es reduïa. Per tant es va intentar obtenir el màxim nombre d'elements i que alhora fos simulable. A la taula 3.5 es mostren els mallats obtinguts i si són simulables o no.

Max. Face(mm)	Max Size (mm)	Growth Rate	Nombre d'element (Milions)	Permet Simulació
200	200	1,8	1,1	Si
200	200	1,6	1,37	Si
200	200	1,55	1,47	Si
190	190	1,45	1,83	No
150	150	1,55	2	No
170	170	1,6	1,6	Si

Taula 3.5. Proves mallat B.2

El mallat remarcat l'anomenarem B.2 i és el que es va utilitzar per fer la segona simulació del submarí complert.

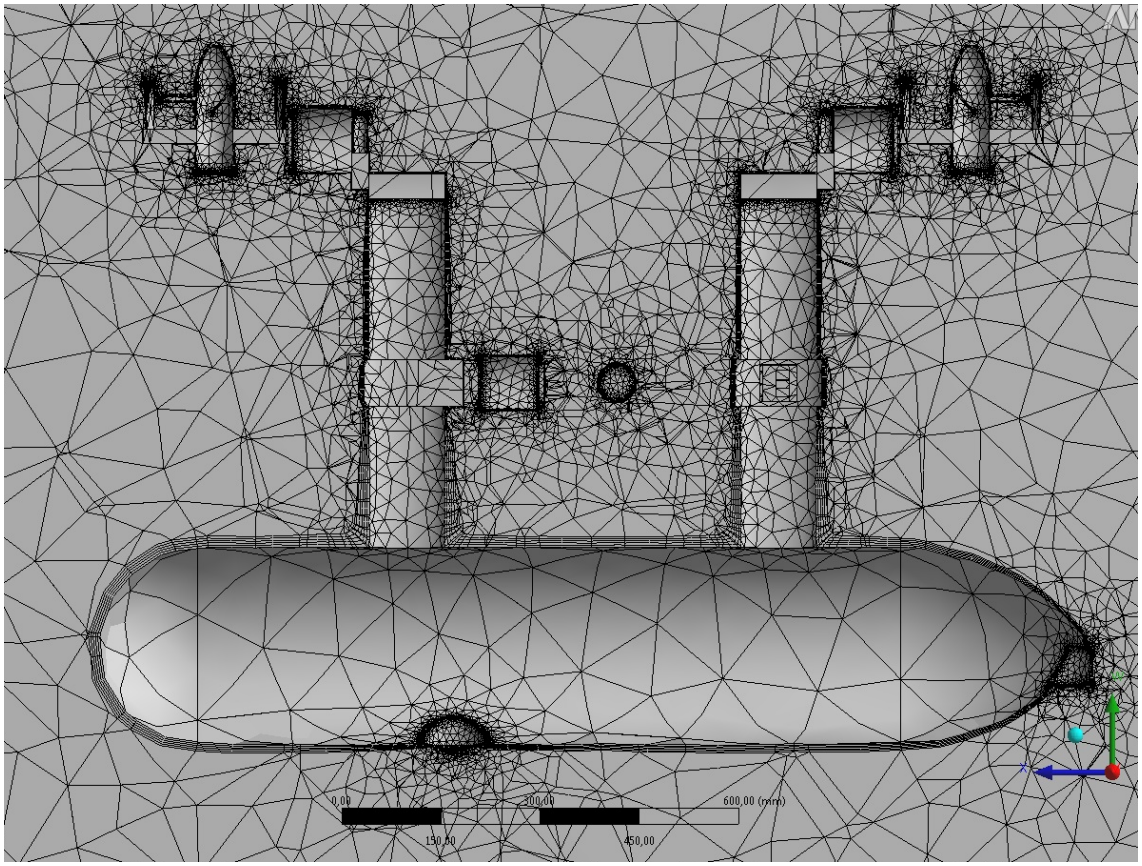


Fig 3.5. Secció del perfil del mallat B.2

Al obtenir el mallat B.2 es va observar que les capes produïdes per l'inflation eren massa consecutives i com a conseqüència els elements que formaven eren molt petits i propers al volum del submarí en comparació als creats per la size function. Per això es va decidir augmentar tant el nombre de capes com el rati de creixement per tal de que la inflation avarques molt més al voltant del submarí. Això feia que els elements produits per la size function fossin més similars als de la inflation que tenien al voltant i no hi hagués aquests canvis tant bruscs de mida.

Finalment es va obtenir el mallat B.3 definitiu amb els següents paràmetres:

Size Function	Max. Face(mm)	210
	Max Size (mm)	210
	Growth Rate	1.6

Smooth Transition	Growth Rate	1,2
	Maximum Layers	10
	Transition Ratio	1

Nombre d'elements	1,65 milions

Taula 3.6. Paràmetres mallat B.3

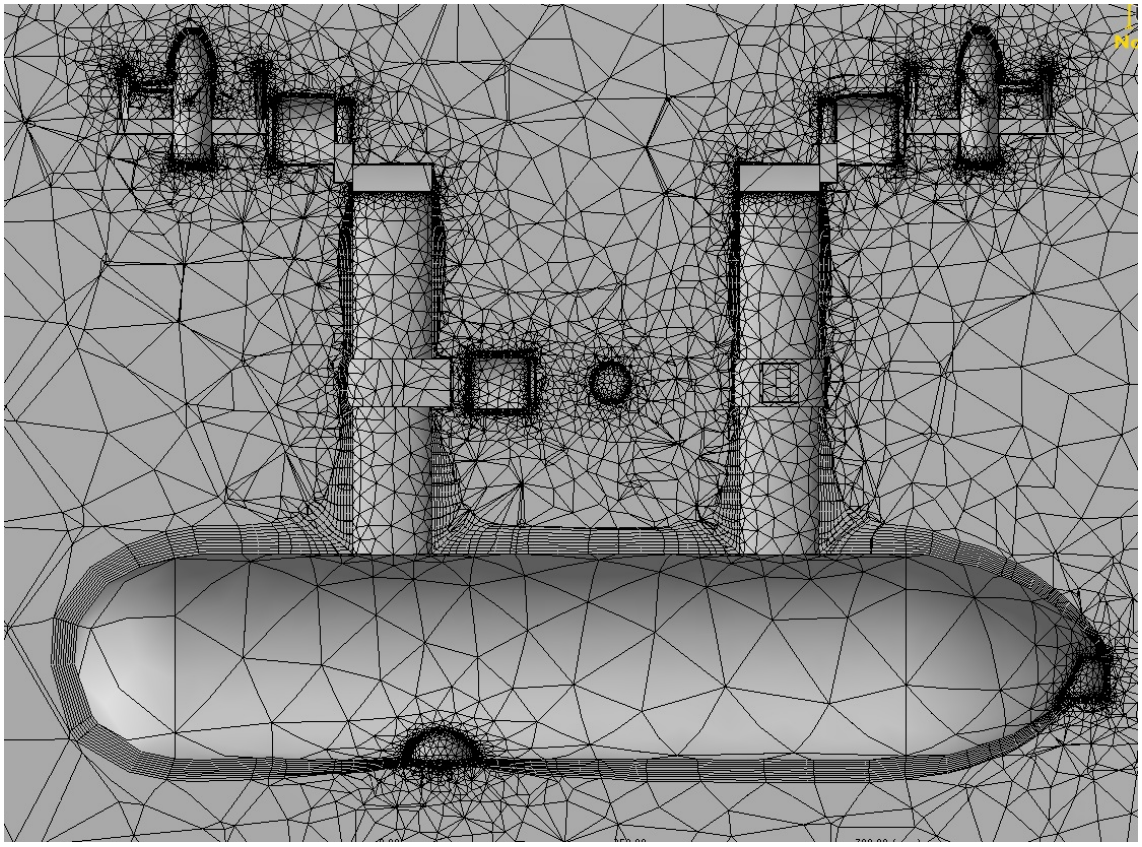


Fig 3.6. Secció del perfil del mallat B.3

Per poder veure quin era l'efecte del tipus de mallat també es van crear dos mallats amb molt pocs elements i sense inflació anomenats C.1 i C.2. El C.1 corresponent a la geometria sense propulsors i el C.2 al submarí complert.

Size Function del mallat C.1	Max. Face(mm)	1000
	Max Size (mm)	1000
	Growth Rate	2,2
	Min Face (mm)	0,5
	Nombre d'elements	0,012 milions

Taula 3.7. Paràmetres mallat C.1

Size Function del mallat C.2	Max. Face(mm)	1000
	Max Size (mm)	1000
	Growth Rate	2,2
	Min Face (mm)	0,5
	Nombre d'elements	0,27 milions

Taula 3.8. Paràmetres mallat C.2

A la fig. 3.7 es pot veure com el mallat C.2 és poc acurat i amb pocs elements i a sobre grans.

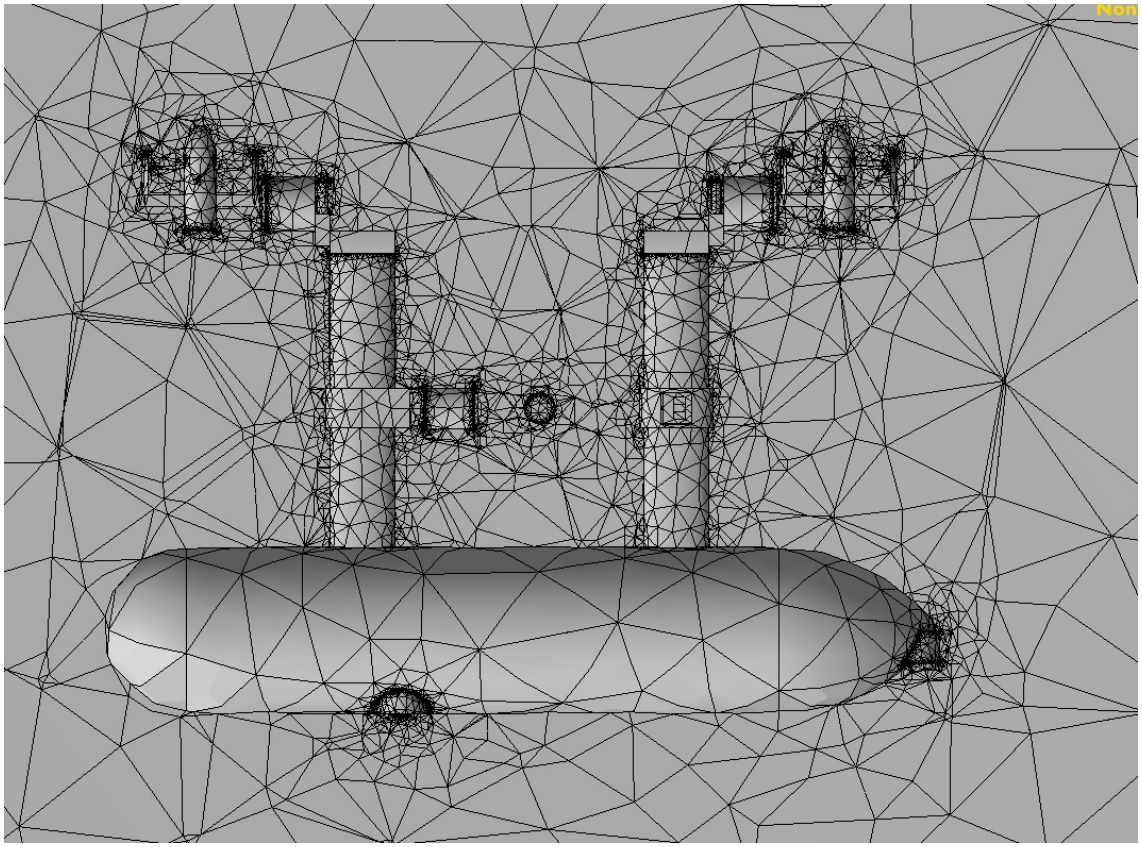


Fig 3.7. Secció del perfil del mallat C.2

3.3.1.3 Condicions de contorn

Les condicions de contorn defineixen les característiques de les superfícies que fan de frontera en el model. Aquestes condicions serveixen per aconseguir que la simulació s'assembli a la realitat el màxim possible. A continuació explicaré les diferents condicions de contorn i la respectiva zona on s'han aplicat.

Les condicions de contorn utilitzades son les següents:

- INLET: Dóna un valor a la velocitat d'entrada del fluid dins el túnel i el règim d'aquest, recordem en la simulació és el fluid qui està en moviment i no el submari.

- OUTLET: Defineix la zona per on el fluid surt del túnel, també es pot definir altres paràmetres com el règim o la pressió relativa.
- NO SLIP WALL: Defineix que el fluid en contacte amb aquest volum té velocitat zero i per tant s'hi generen forces i pressions.
- FREE SLIP WALL: El fluid en contacte amb el volum no té velocitat tangencial zero, és a dir el fluid es comporta com si estigués envoltat d'un túnel hidrodinàmic de radi infinit.

A les imatges següents és mostren cada zona amb la seva condició aplicada.

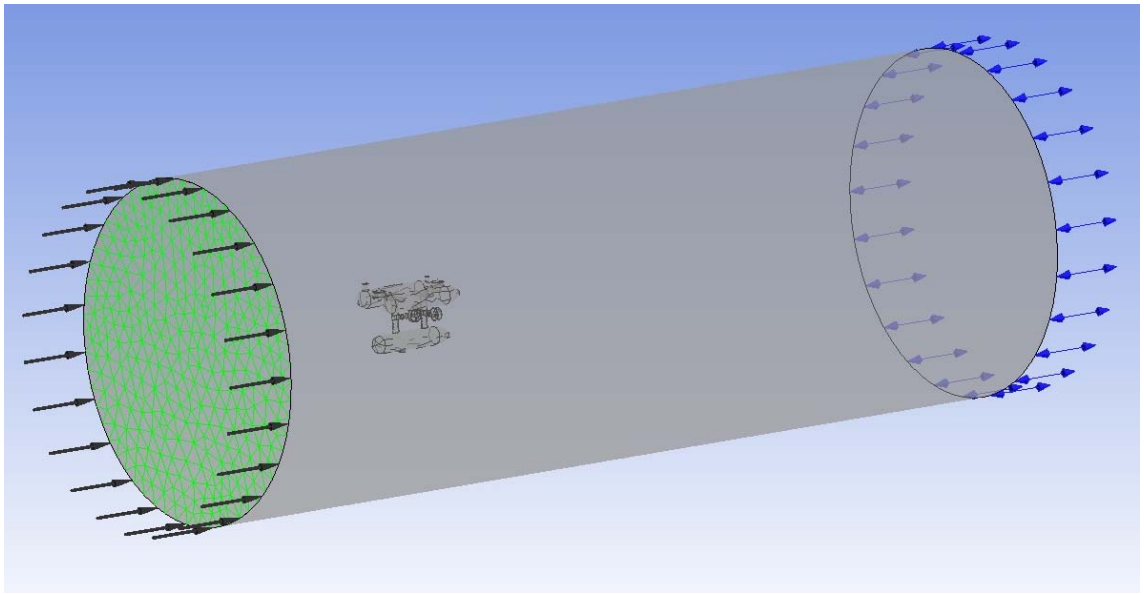


Fig 3.8. Condició de contorn INLET

La part marcada en verd a la fig. 3.8 correspon a l'entrada al túnel a la qual se l'hi ha definit la condició INLET. El fluid entra en règim subsonic i amb una velocitat de 10 km/h. La direcció d'entrada del fluid correspon a la de les fletxes dibuixades, és a dir normal a la superfície d'entrada.

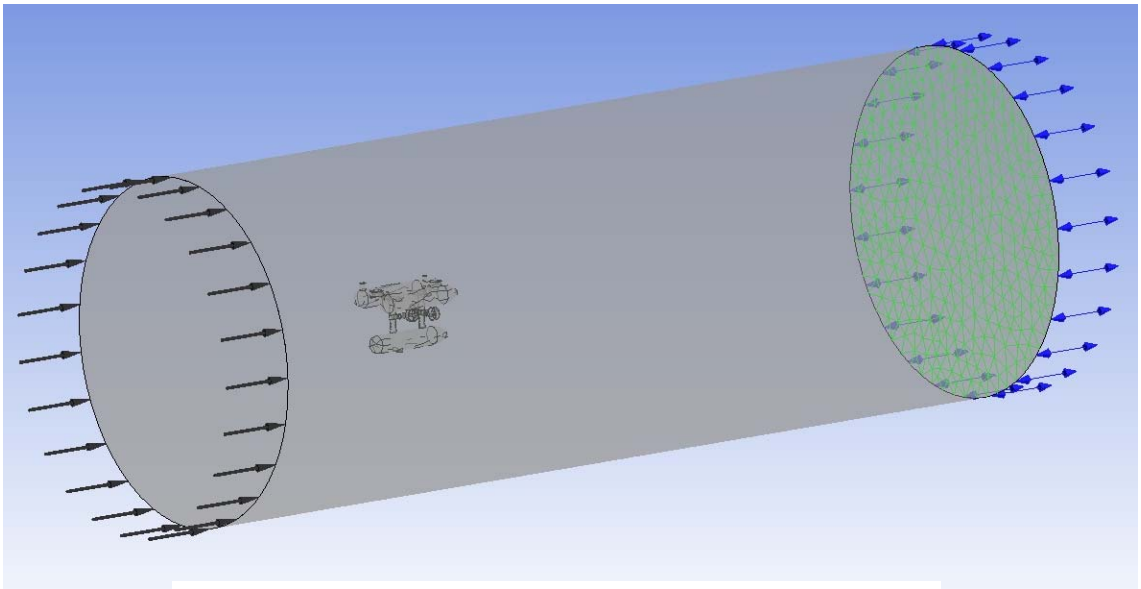


Fig 3.9. Condició de contorn OUTLET

A la figura 3.9 es mostra la sortida amb la condició OUTLET, on el fluid surt en règim subsonic i té una pressió relativa de valor 0. La direcció del fluid és normal a la superfície de sortida.

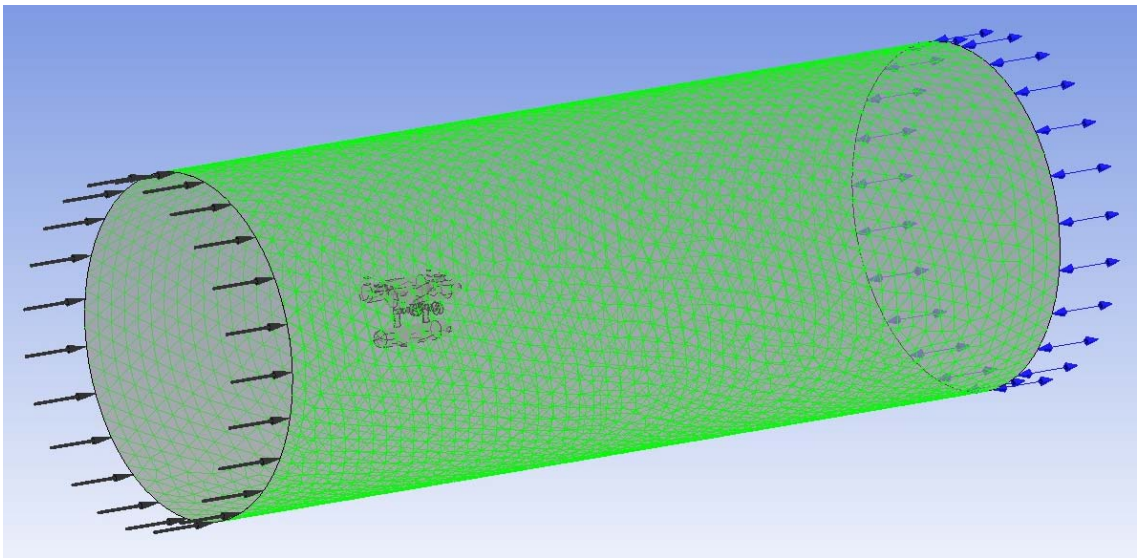


Fig. 3.10. Condició de contorn FREE SLIP WALL

La frontera amb vector perpendicular a la direcció del fluid té adjudicada la condició de FREE SLIP WALL tal i com es veu a la fig. 3.10, tal i com hem dit aquesta condició simula la no limitació del fluid dins el túnel i per tant les condicions d'aquest son les mateixes que es produirien per exemple en el mar.

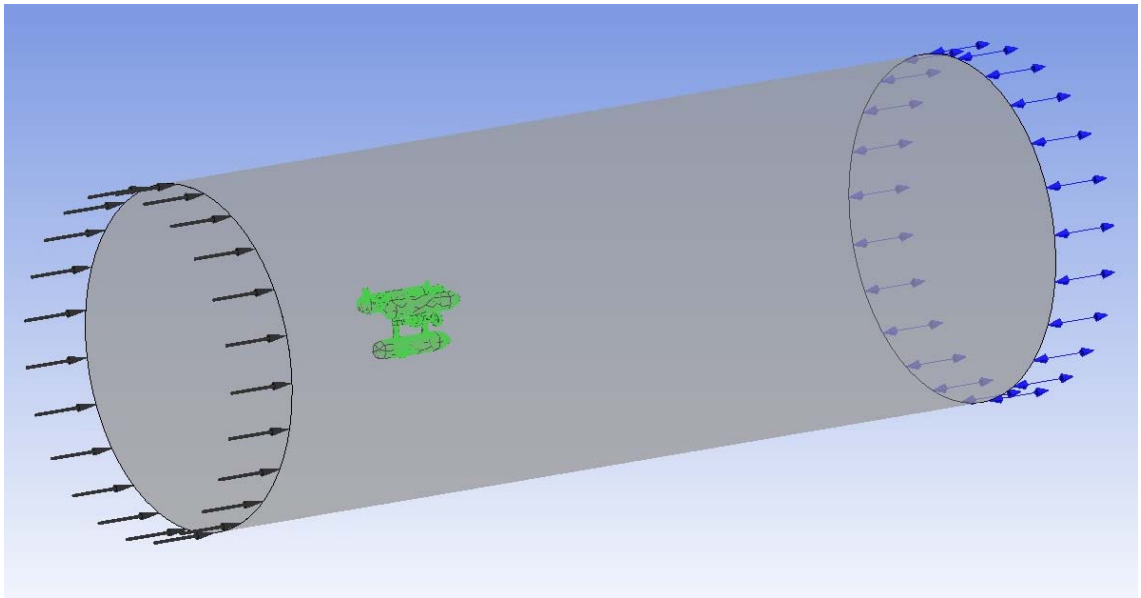


Fig. 3.11. Condició de contorn NO SLIP WALL

Finalment se li ha donat la condició de NO SLIP WALL al volum del submarí.

3.3.2 Càlcul

Un cop s'ha caracteritzat el model geomètric a estudiar i les condicions de contorn que defineixen el comportament dels seus límits, s'han d'escollir els models matemàtics i opcions que el programa utilitzarà per a solucionar les equacions de balanç en cada un dels volums discrets amb què s'ha dividit el model.

3.3.2.1 Definició del model

Consisteix en la definició dels detalls de la simulació. Tot seguit es detallen les diferents opcions que s'han escollit alhora d'aplicar el model. Cadascuna d'elles afegirà nous termes a les equacions de balanç bàsiques o bé implicaran una simplificació per adaptar-les al cas concret que es vol estudiar.

- Temps: Steady (estacionari). Ja que el moviment del submarí és en una direcció i velocitats definides i constant, s'estudia el cas com a invariable en el temps, ometent així les condicions transitòries que es donarien en el moment d'iniciar el moviment o de parar lo.

- Moviment: Stationary (estàtic). Ja que no existeix moviment relatiu entre els diferents volums discretitzats. Considerem que només es mou l'aigua.
- Fluid. El tipus de fluid és l'aigua a una pressió de 1 atmosfera i a 25 Cº de temperatura. La transferència de calor en el fluid és isotèrmica. S'ha considerat el fluid amb una morfologia continua.
- Model de turbulència. El model de turbulència emprat per als càlculs és el K-Epsilon Scalable
- Gravetat: Es va considerar una gravetat de 9,8 m/s^2 en la direcció normal a la direcció del fluid.

3.3.2.2 Convergència

El grau de validesa de la solució obtinguda en un CFD depèn, entre d'altres factors, de la diferència entre els valors de les variables entre una iteració i la següent. A mesura que el mètode numèric va realitzant iteracions, les diferències entre els valors de les variables entre dues iteracions successives han de disminuir (i.e., el procés de convergir), finalment assolint l'estat estacionari. És en aquest règim permanent on els residuals tenen uns valors únicament associats als errors de truncament del mètode numèric. Normalment, es fixa un valor llindar per als residuals normalitzats per a tot el domini per sota del qual es considera que la solució és prou exacta per finalitzar amb el procés iteratiu (a partir d'aquest punt, el resultat canviaria molt poc). En el cas que s'ha estudiat es va fixar aquest valor en 1e-09 . També es va fixar un valor mínim d'iteracions en 1 i un màxim de 10000. El nombre d'iteracions per arribar a convergir depèn de molts factors, però un paràmetre molt important és el mallat. És per això que cadascun dels casos estudiats ha hagut de realitzar diferent nombre d'iteracions per assolir el criteri de convergència de residuals inferiors a 1e-09.

En general es pot dir que les simulacions varen necessitar entre 300 i 600 iteracions per arribar a convergir. A la fig. 3.12 que pertany a la simulació de la discretització A.1 es pot veure com els residuals comencen a convergir gairebé a les 350 iteracions.

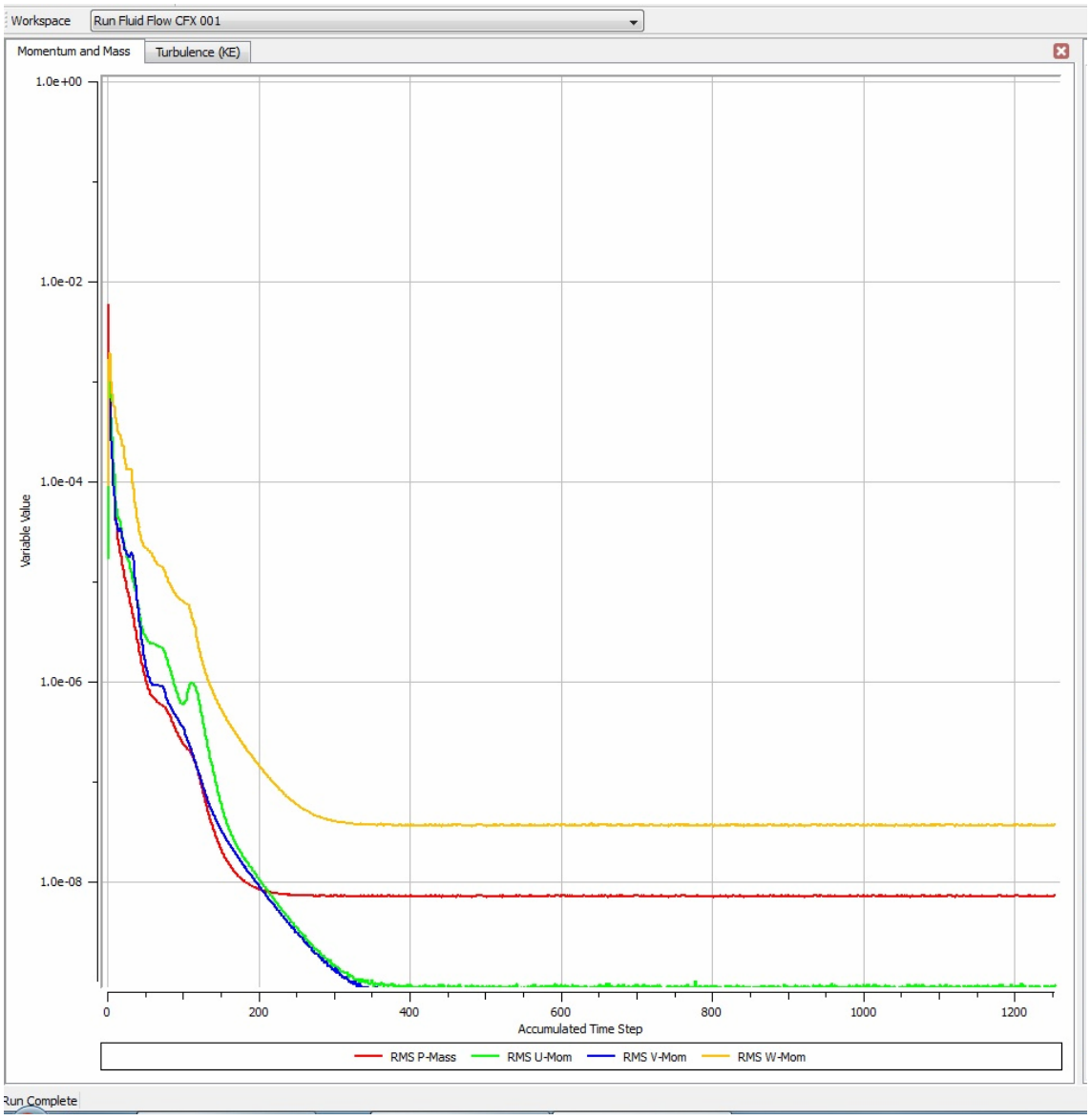


Fig. 3.12. Evolució del valor dels residuals del càlcul per el mallat A.1

3.3.3 Anàlisi dels resultats

Un cop s'ha produït la convergència en els residuals ja es pot aturar la simulació per obtenir resultats. L'objectiu de les simulacions era obtenir el coeficient de resistència hidrodinàmica que s'obté a partir de la fórmula següent:

$$C_D = \frac{F}{\frac{1}{2} \times \rho \times V^2 \times A}$$

Gràcies als resultats es varen obtenir els diferents valors de forces a la qual estava sotmès el submarí. La direcció d'aquestes forces correspon a l'eix z indicat a la fig.3.13.

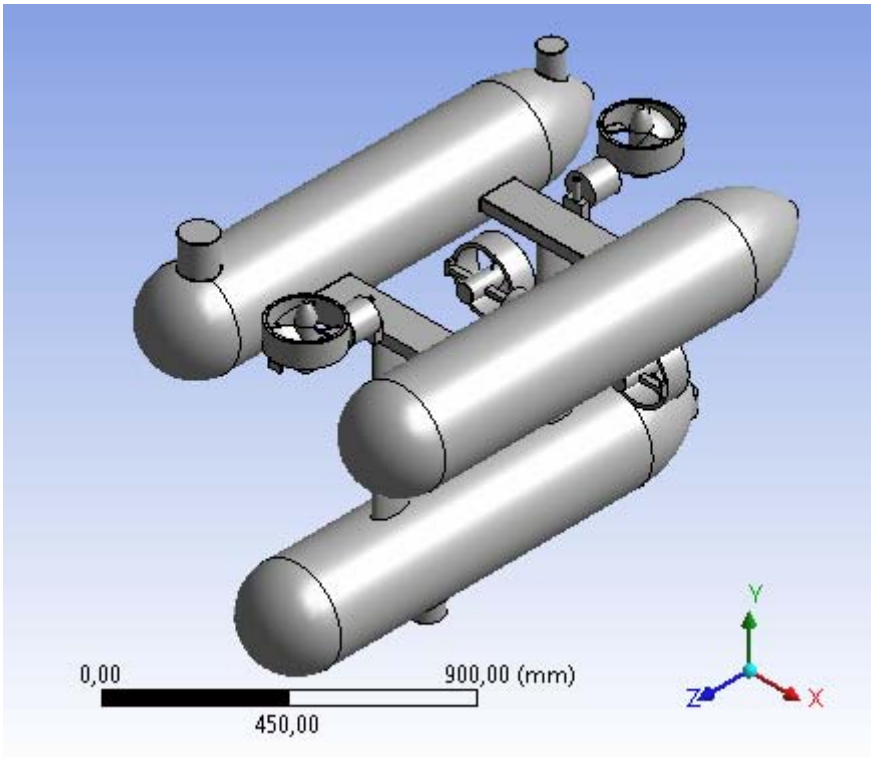


Fig. 3.13. Direccions de les forces obtingudes

El vector z és oposat a la direcció de la velocitat del fluid, per aquesta raó totes les forces obtingudes tenien signe negatiu. Les forces en la direcció del vector z són les que utilitzarem per calcular el coeficient.

Tots els valors de les forces estaran expressats en valor absolut sense tenir en compte el signe. El quadre següent mostra els valors de les forces en la direcció z de cada mallat explicat anteriorment:

	FORCES (N)
MALLATS ESTRUCTURA	DIRECCIO Z
A.1	776,7
A.2	892,3
A.3	876,3

Taula 3.9. Forces resultants als mallats del submarí sense propulsors

	FORCES (N)
MALLATS COMPLETS	DIRECCIO Z
B.1	1136,3
B.2	1307,5
B.3	1349,8

Taula 3.10. Forces resultants als mallats del submarí complet

	FORCES (N)
MALLATS POBRES	DIRECCIO Z
C.1 (ESTRUCTURA)	916,0
C.2 (COMPLET)	1528,0

Taula 3.11. Forces resultants als mallats C

Un cop es van obtenir les forces es van calcular les àrees de cada eix per conèixer les diferencies entre cada un, s'ha de dir que només seria necessària l'àrea característica de l'eix z per fer els càlculs . Es va fer mitjançant una projecció en un pla de tot el volum que es veia des de cada eix i llavors és va calcular l'àrea resultant amb el programa autocad. Cal recalcar que no és una simple secció en algun punt del submarí sinó una projecció. Tot seguit mostrarem totes les àrees calculades amb la seva imatge pertinent.

	AREA CARACTERÍSTICA SEGONS DIRECCIÓ (m^2)		
GEOMETRIA	X	Y	Z
Estructura sense propulsors (A)	0,943205	1,263567	0,273086
Submari complet (B)	0,986367	1,266401	0,371142

Taula 3.12. Àrees característiques

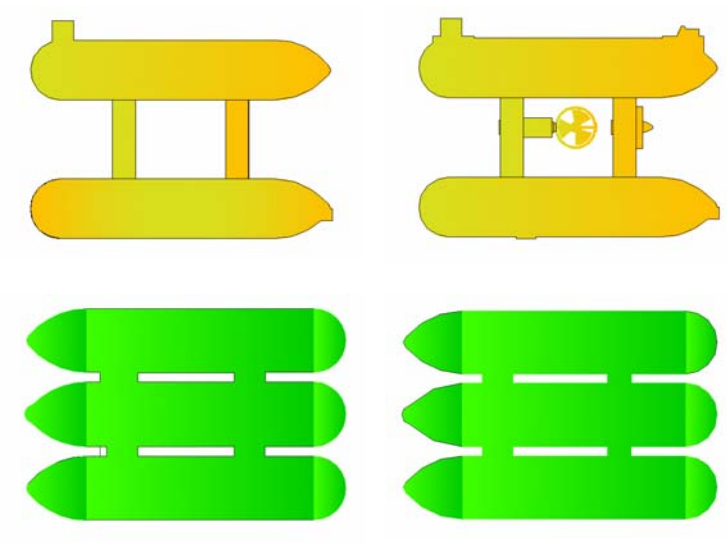


Fig 3.14. Àrees característiques: Ax - Bx
Ay - By

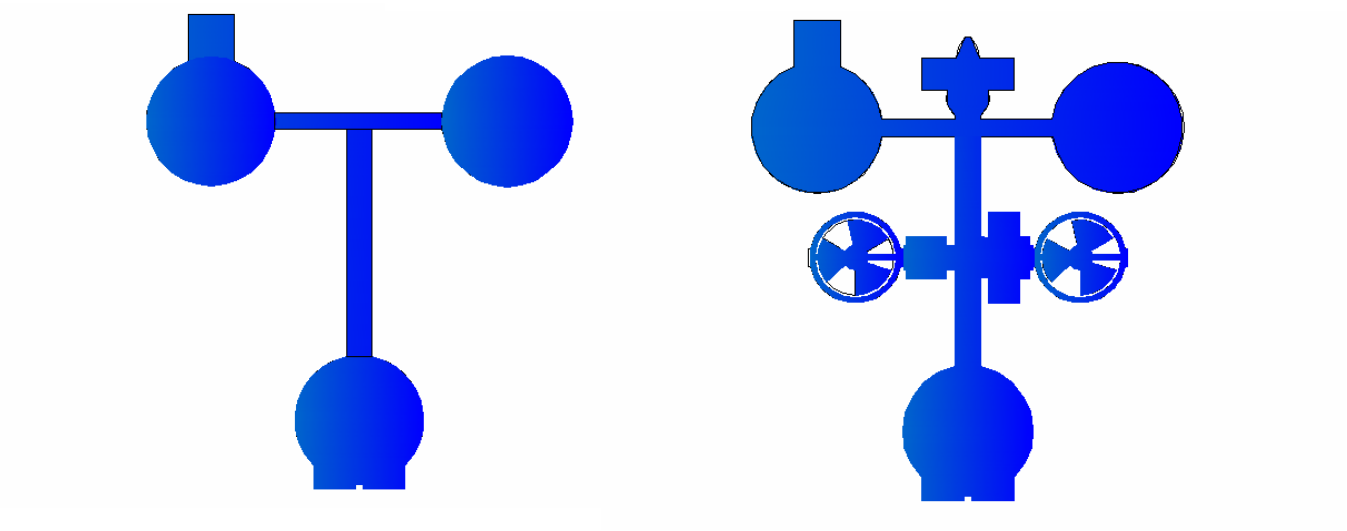


Fig 3.14. Àrees característiques Az i Bz

Un cop recopilades totes les dades necessàries es varen calcular els coeficients, els resultats es mostren a la taula següent:

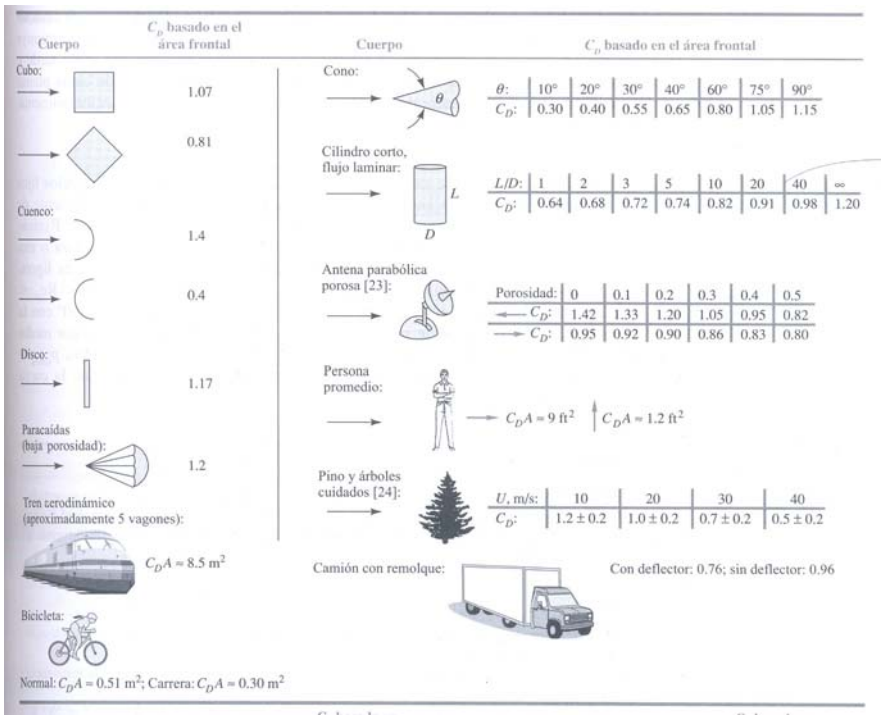
SIMULACIONS	COEFICIENT D'ARROSSEGAMENT(C_D)
A.1	0,72
A.2	0,83
A.3	0,81
B.1	0,77
B.2	0,89
B.3	0,92
C.1	0,85
C.2	1,04

Taula 3.13. Coeficients d'arrossegament obtinguts

3.4 Conclusió de la simulació numèrica

Analitzant els valors de coeficients obtinguts podem arribar a les següents conclusions:

- Com era de preveure el submarí amb propulsors és menys hidrodinàmic que sense, per tant és recomanable sempre tenir acoblats al submarí el menor nombre de propulsors. Amb els propulsors el coeficient augmenta en un 10% per tant s'haurà de definir prèviament quins graus de llibertat necessitarà l'AUV per cada missió amb l'objectiu de minimitzar l'acoblament de propulsors i així aconseguir gastar menys energia.
- El tipus de mallat afecta als resultats final, la tendència general és que a mesura que augmenta la precisió del mallat també augmenta el valor dels coeficients.
- En el cas dels mallats molt poc precisos el valor dels coeficients es disparen de manera exagerada en comparació als anteriors que si que mantenen una relació entre ells. Per tant el resultat dels mallats C és un resultats poc rellevant.
- A la taula 3.14 es poden veure diferents C_D de varis cossos tridimensionals. Agafant aquesta taula com a referència podem dir que és un bon submarí hidrodinàmicament parlant.



Taula 3.14. Coeficients d'arrossegament de cossos tridimensionals
(Font: Mecànica de Fluidos, Frank M.White)

4. GRÀFIQUES DE CONDICIONS

Aquest capítol conté diferents imatges que mostren de manera gràfica les condicions amb les que es troba el submarí i el fluid al desplaçar-se a la velocitat simulada. S'analitzaran en els dos casos estudiats, submarí complert i estructura. Magnituds de pressió, velocitat, línies de corrent, turbulències...

4.1 Pressions

Tot seguit es mostren diferents gràfics de pressió amb la seva respectiva escala de colors expressada en Pascals.

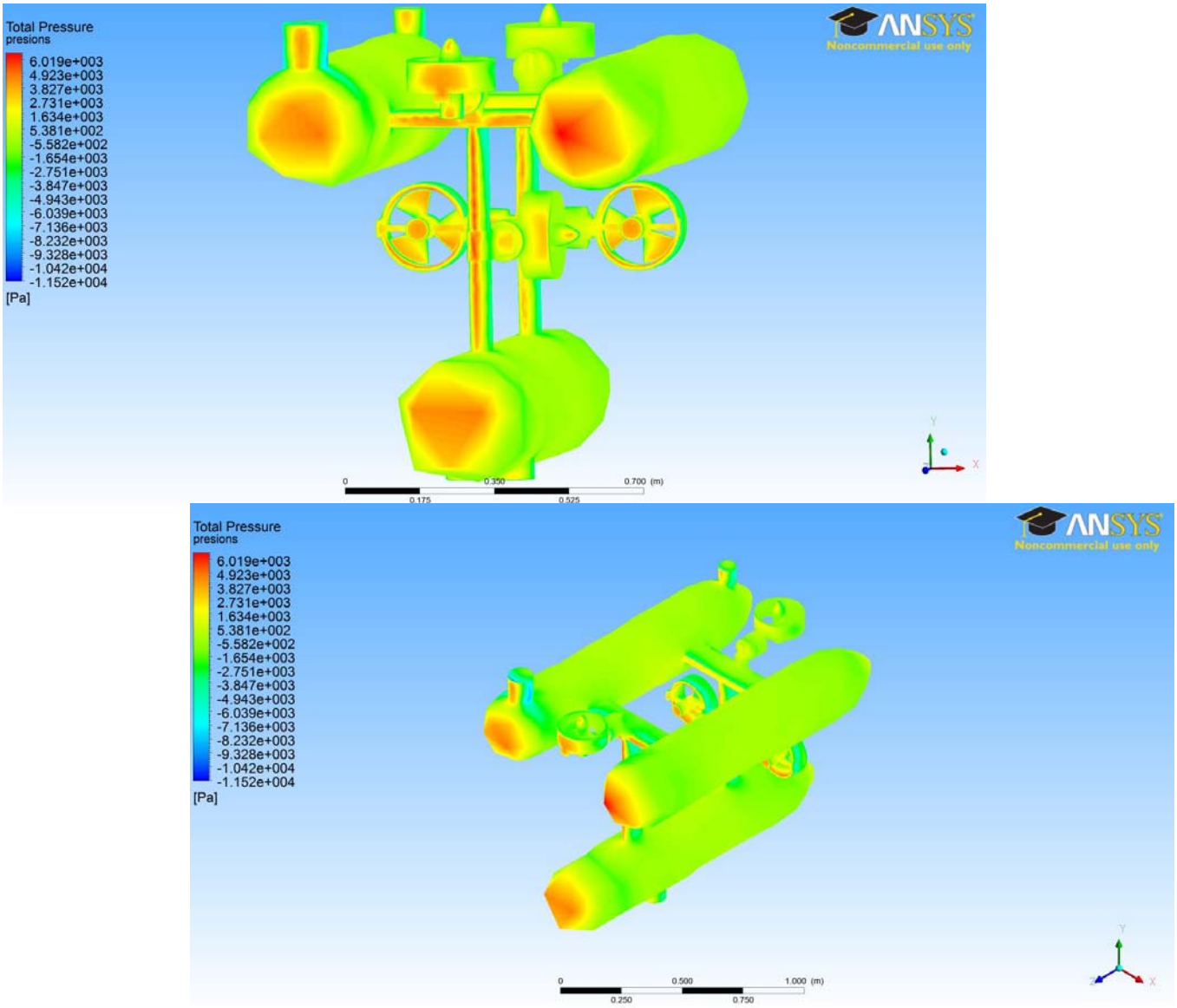


Fig. 4.1 Vistes 3D del gràfic de pressions del submarí complert

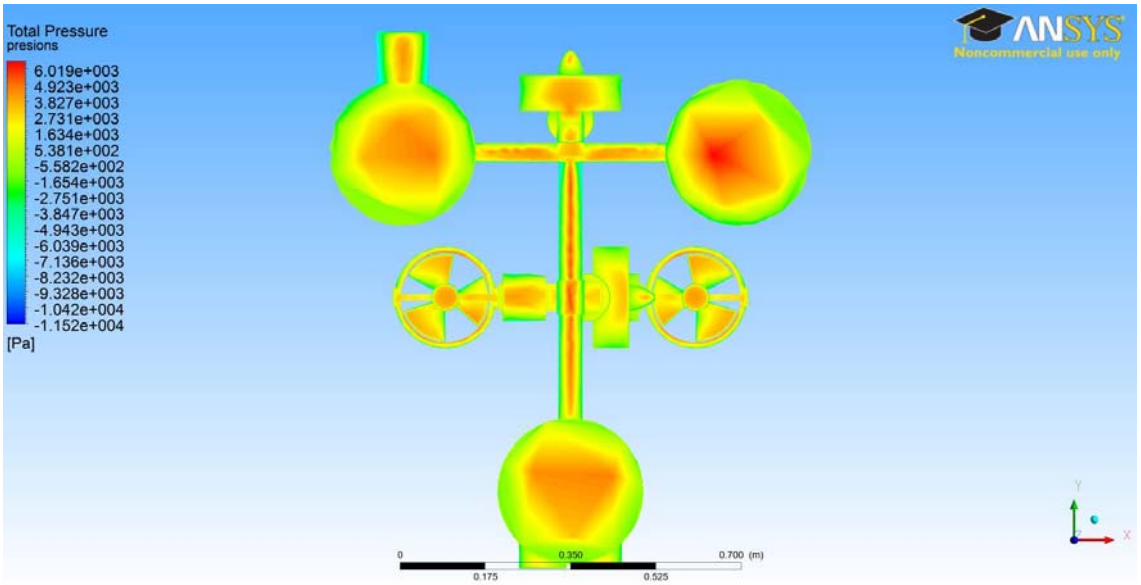


Fig. 4.2 Alçat del gràfic de pressions del submarí complert

Com era d'esperar les parts situades al davant del submarí són les que reben una pressió més crítica per part del fluid. A la velocitat simulada el submarí complert rep una pressió crítica d'aproximadament 6 Mpa.

A la fig. 4.3 i 4.4 es pot veure que en el cas de només l'estructura a una velocitat de simulació igual a l'anterior el valor crític de pressió disminueix fins a 5,8 Mpa.

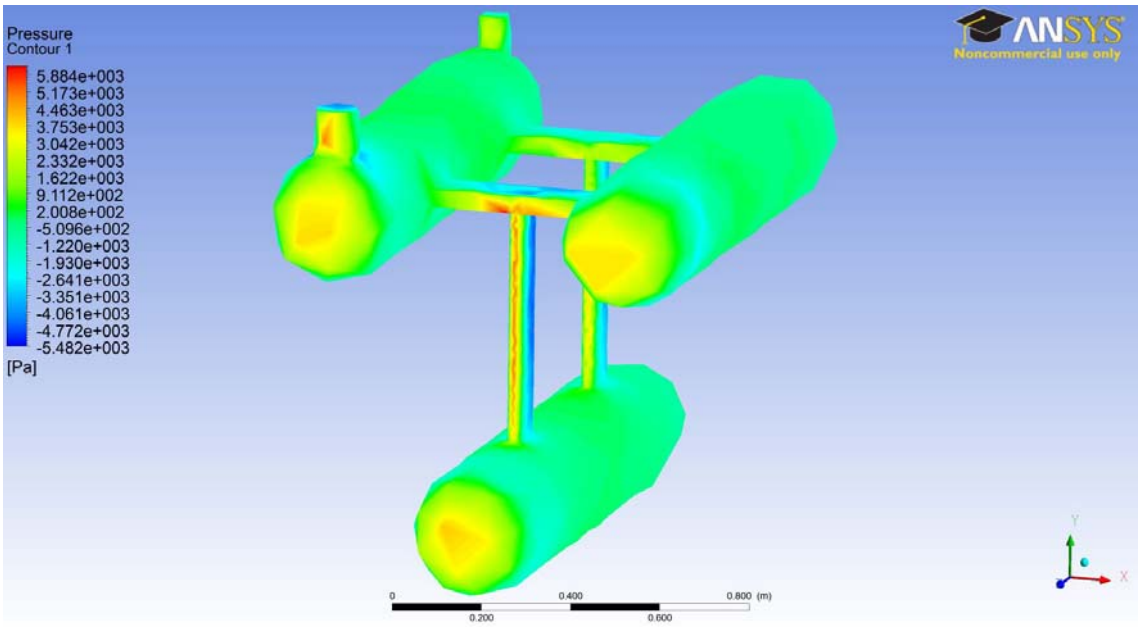


Fig. 4.3 Vista 3D del gràfic de pressions de l'estructura

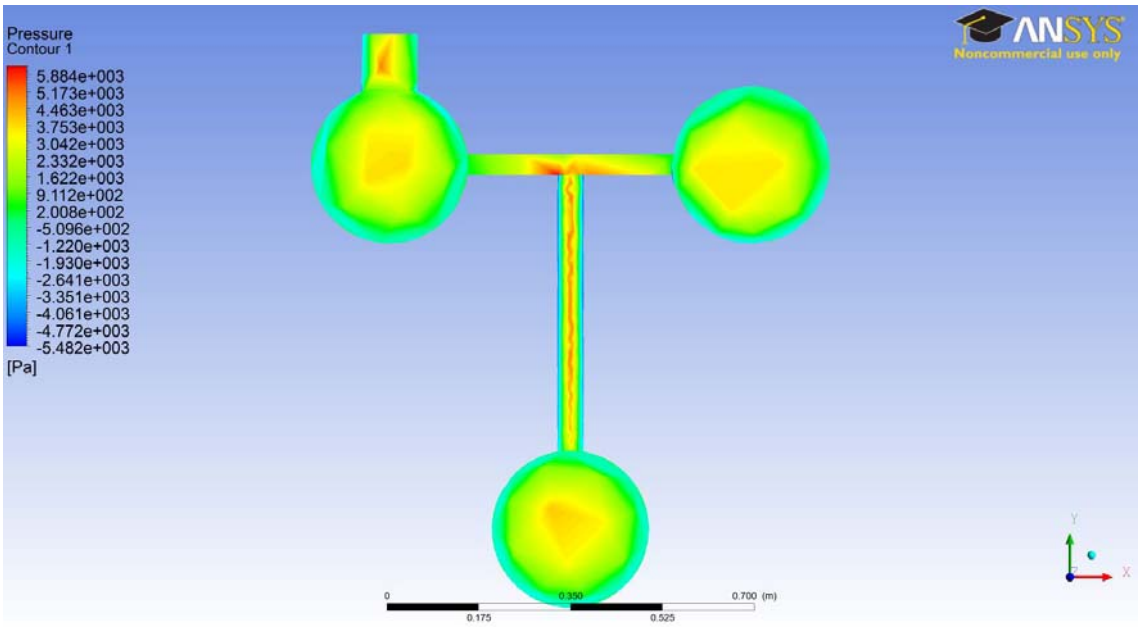


Fig. 4.4 Alçat del gràfic de pressions de l'estructura

En els dos casos la pressió més alta coincideix en els passamans en forma de T, aquesta pressió és podria reduir si es fabriquessin d'una forma més hidrodinàmica.

4.2 Velocitats

Tot seguit es mostren diferents gràfics de velocitats amb la seva respectiva escala de colors expressada en m/s. Els gràfics mostren les variacions de velocitat del fluid al ser travessat pel submarí. S'han analitzat diferents seccions (anomenades plans) dels dos casos en tots els eixos, començarem pel cas del submarí complert i després el compararem amb el de només l'estructura.

A la fig. 4.5 s'indica la primera secció estudiada, és el pla longitudinal a la direcció del fluid i l'anomenarem pla 1 (direccions Y i Z) .

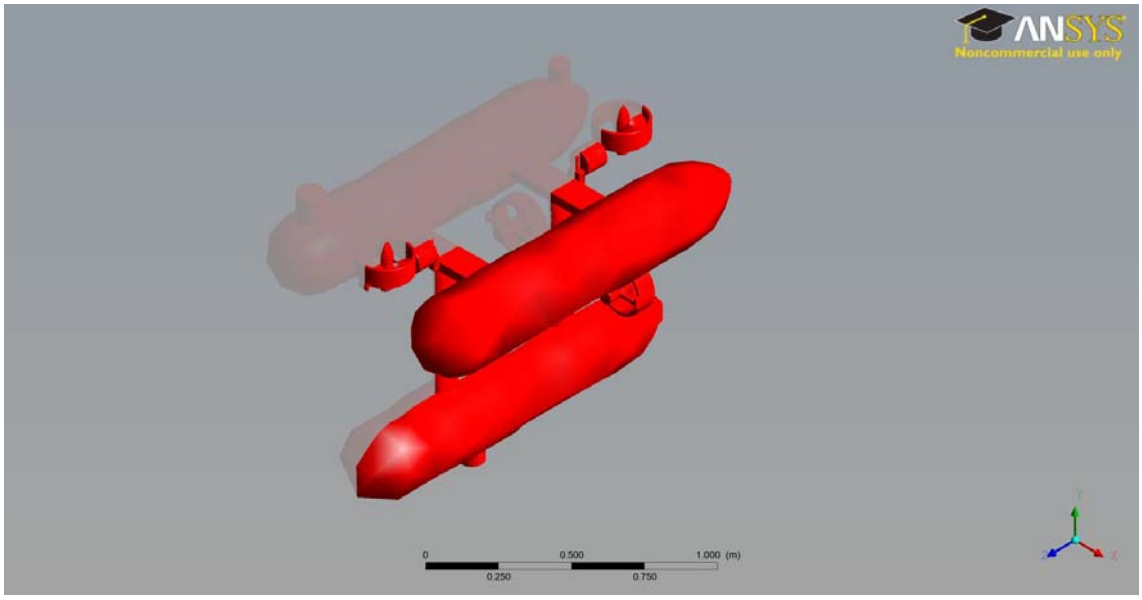


Fig. 4.5 Render del pla 1 (direccions Y i Z)

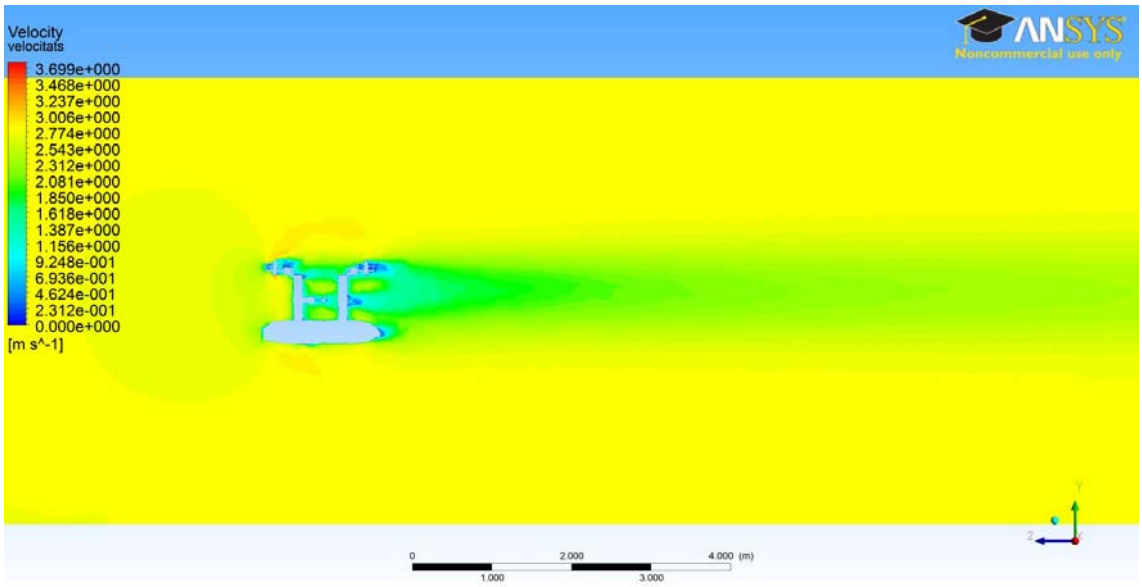


Fig. 4.6 Estela de velocitats generada al pla 1 en el submarí complert

A la figura 4.6 és pot veure una vista general de l'estela generada per el submarí al travessar el fluid, en aquest pla podem dir que la variació és en general de 2,77 m/s a 2 m/s, és a dir, d'un 25%.

A la fig 4.7 es pot veure més en detall les variacions més crítiques.

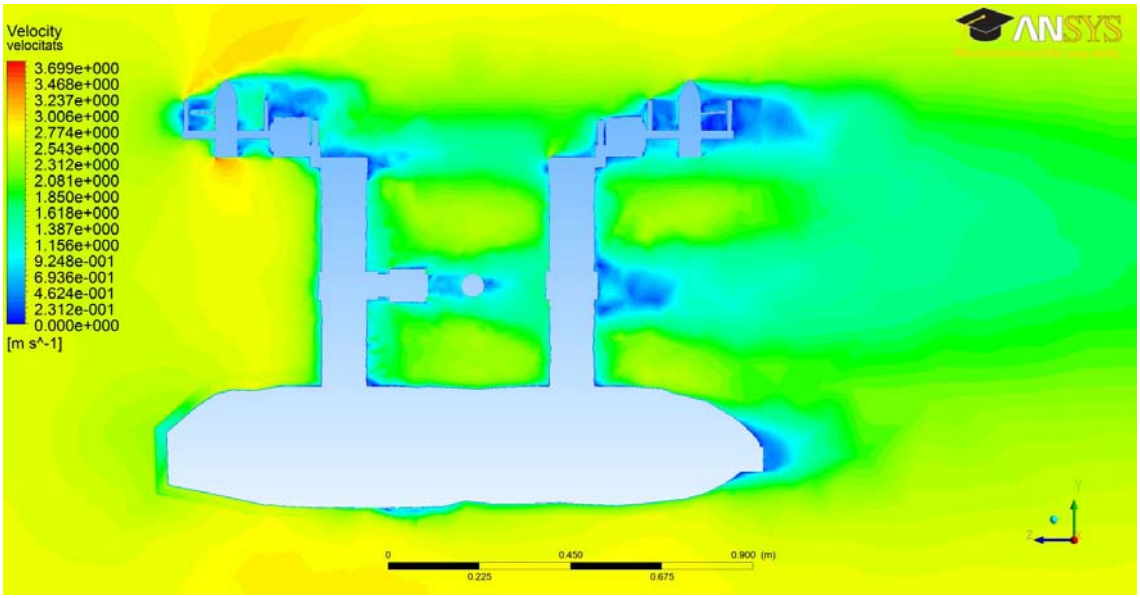


Fig. 4.7 Detall del gràfic de velocitats del pla 1 en el submarí complert

Al creuar el propulsor es genera una velocitat crítica de 3,7 m/s , això pot ser degut a la forma poc hidrodinàmica de la carcassa del propulsor.

Com era d'esperar es generen velocitats nul·les en zones situades després de la primera zona de contacte amb el fluid.

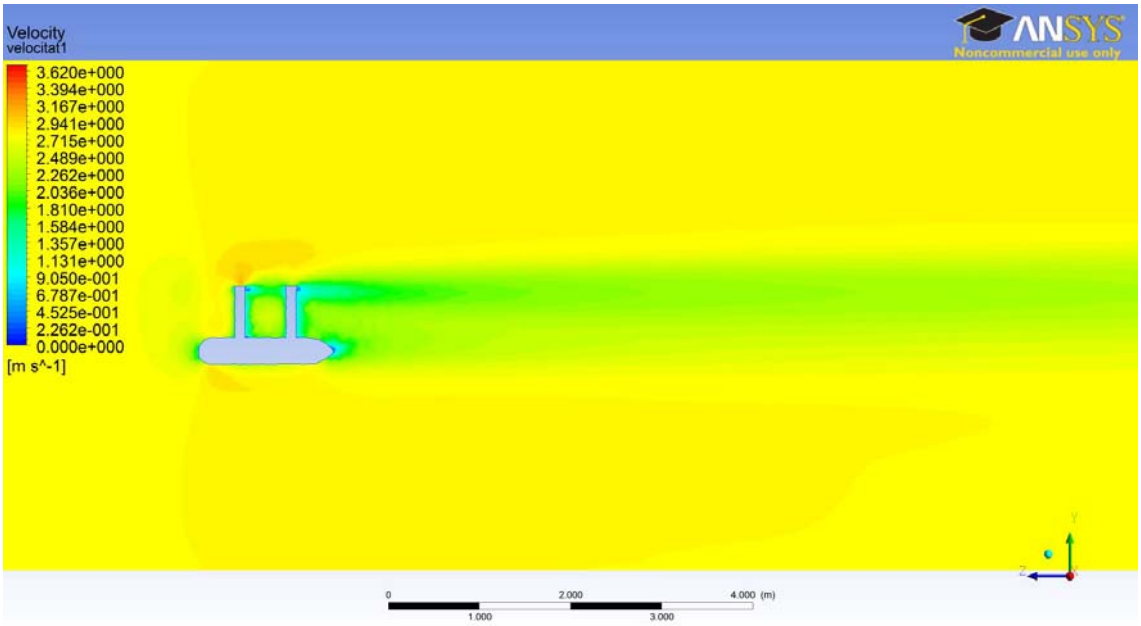


Fig. 4.8 Estela de velocitats generada al pla 1 en l'estructura

En el cas de l'estructura sola l'estela generada és molt més suau i no hi apareixen les velocitats crítiques provocades pels propulsors tal i com podem veure a les figures 4.8 i 4.9.

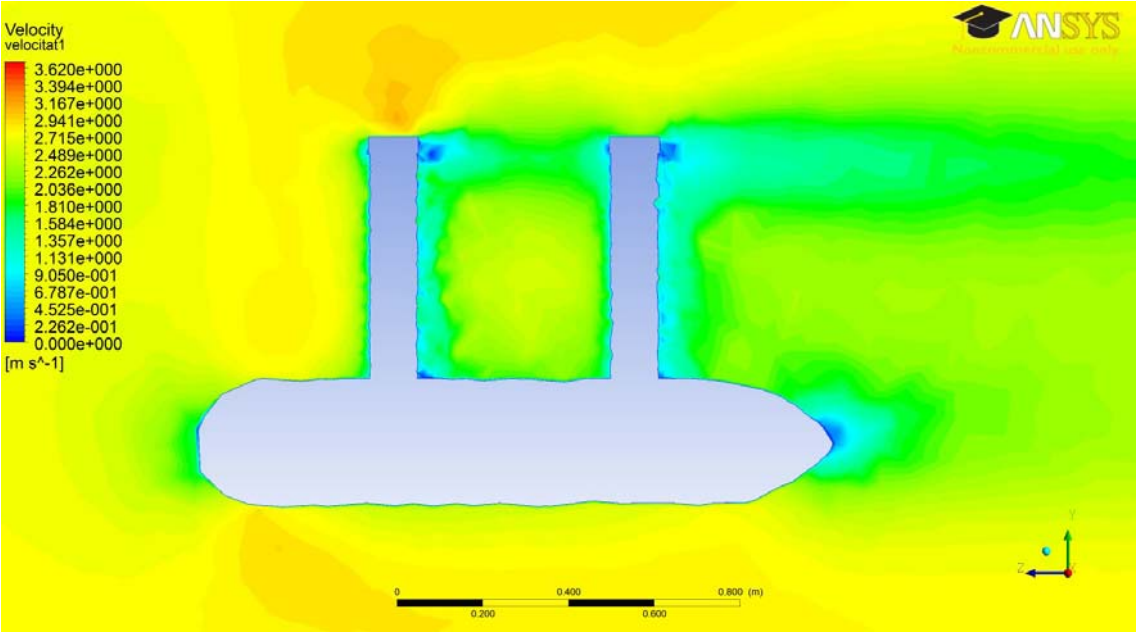


Fig. 4.8 Detall del gràfic de velocitats del pla 1 en l'estructura

En aquesta mateixa direcció també s'ha analitzat el pla 2 (direccions Y i Z), que correspon al de la fig. 4.9. Aquesta secció ens permet veure el comportament del flotador amb més irregularitats.

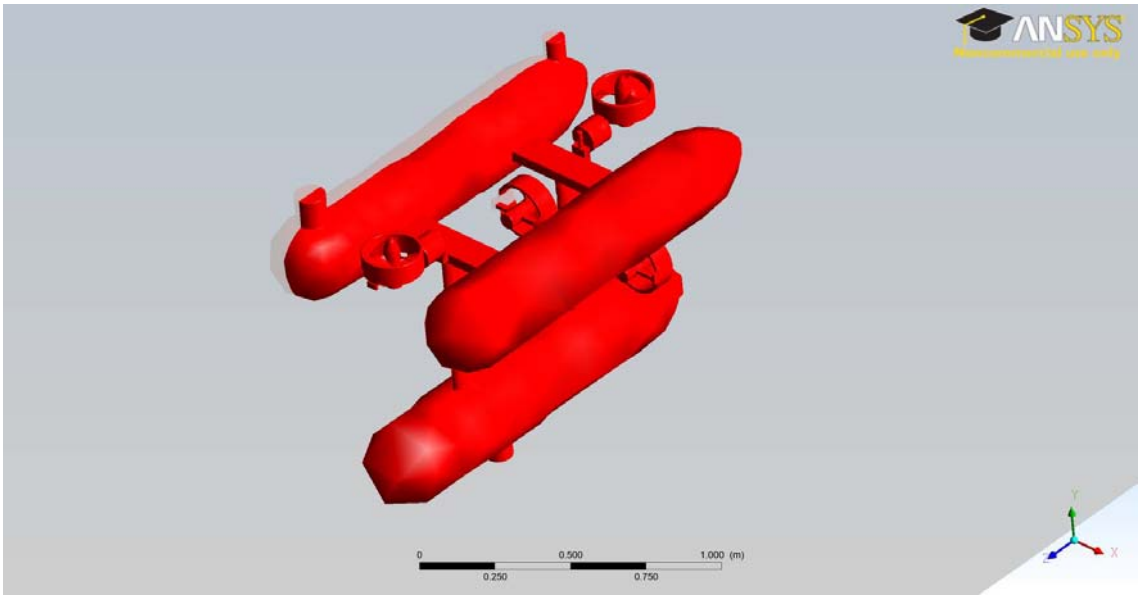


Fig. 4.9 Render del pla 2 (direccions Y i Z)

L'estela generada és idèntica a l'explicada en el pla 1, però si ens fixem en el detall de la fig. 4.10 veurem que les carcasses del sonar i USBL que sobresurten del flotador provoquen un vòrtex i un increment molt elevat de la velocitat i per tant un empitjorament de la hidrodinàmica del submarí. El fluid al entrar en contacte amb el sonar augmenta un 100% la seva velocitat. En el cas de l'estructura passa absolutament el mateix ja que en aquest pla no hi intervenen els propulsors.

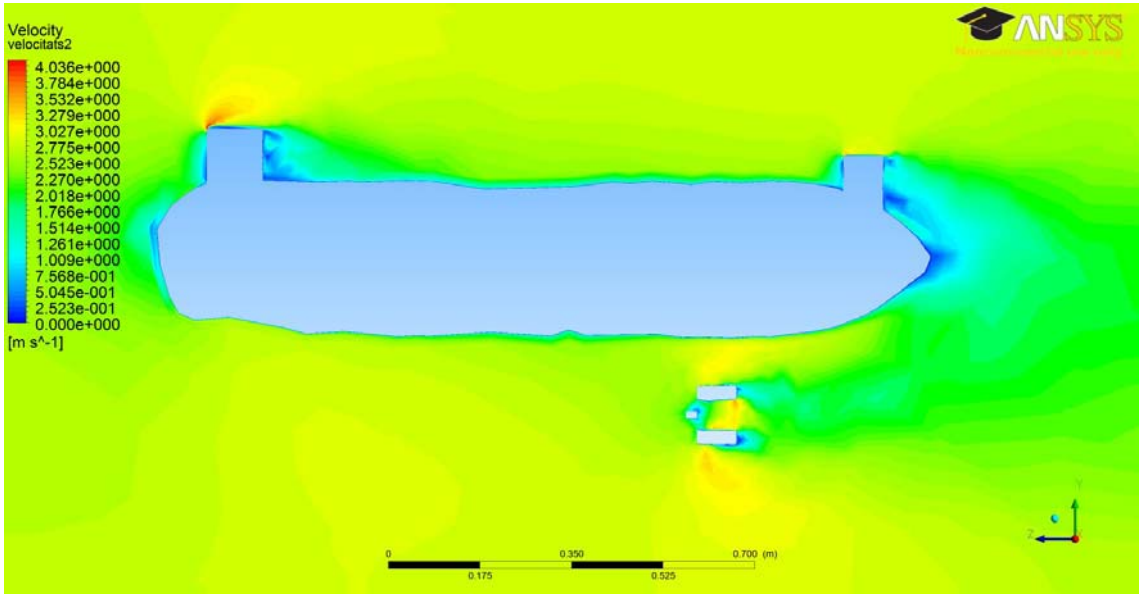


Fig. 4.10 Detall del gràfic de velocitats del pla 2 en el submarí complert

El següent pla a estudiar correspon a les direccions X i Z i l'anomenarem pla 3, també és longitudinal a la direcció del fluid. Es mostra a la fig. 4.11.

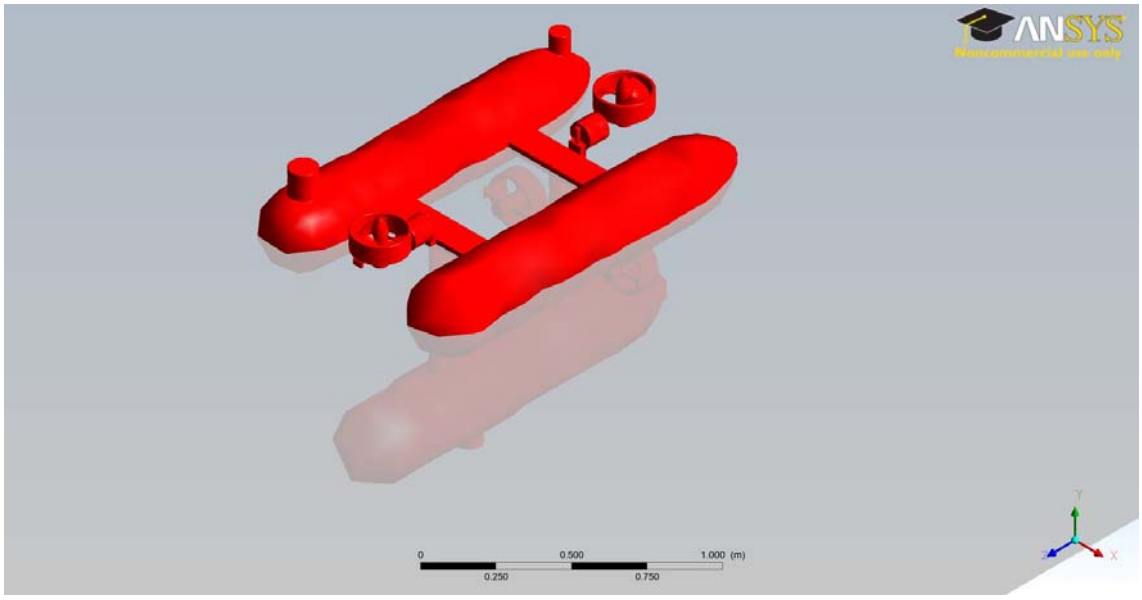


Fig. 4.11 Render del pla 3 (direccions X i Z)

A la figura 4.12 es mostra l'estela generada, molt semblant a les anteriors.

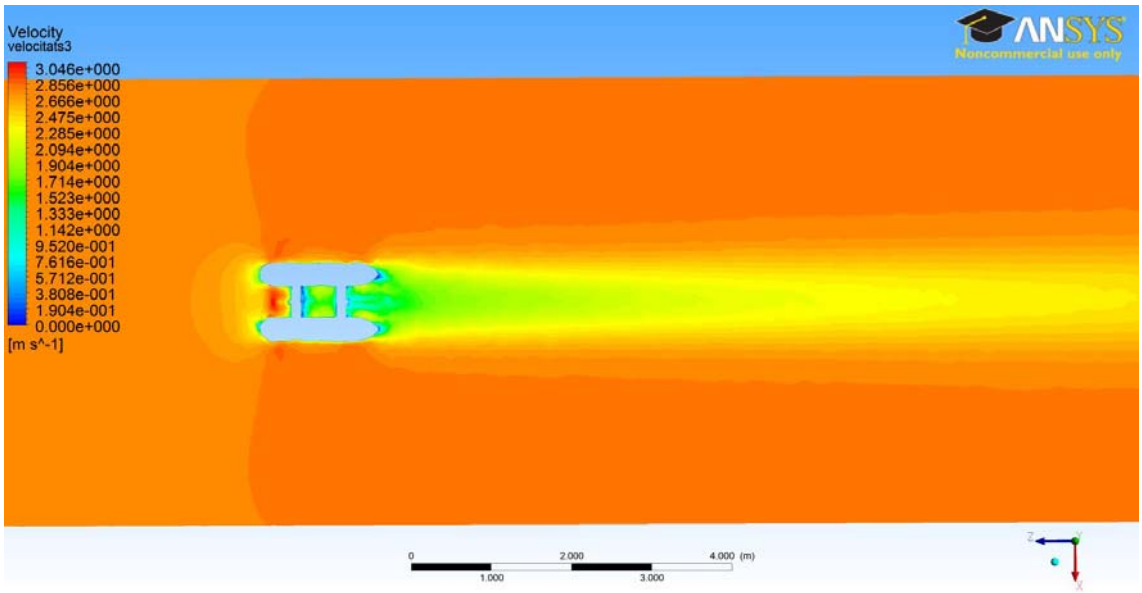


Fig. 4.12 Estela de velocitats generada al pla 3 en el submarí complert

En el detall de la figura 4.13 és pot veure el vòrtex generat entre els dos flotadors però amb una augment de només el 10% de la velocitat inicial.

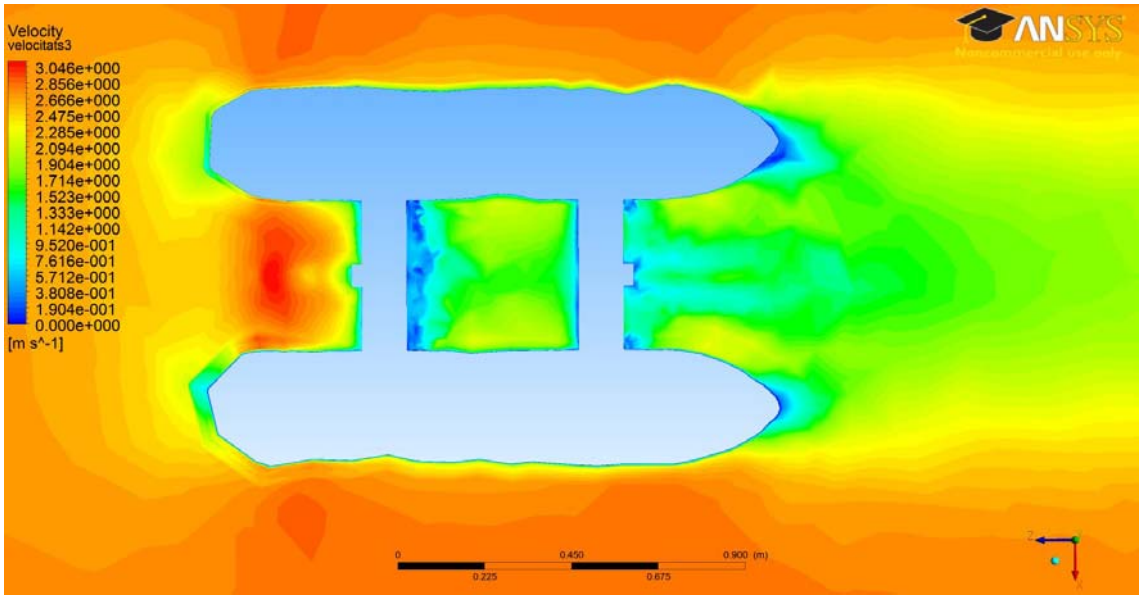


Fig. 4.13 Detall del gràfic de velocitats del pla 3 en el submarí complert

En la secció de l'estructura de la fig 4.14 es pot veure que la variació no es tant turbulent com era d'esperar.

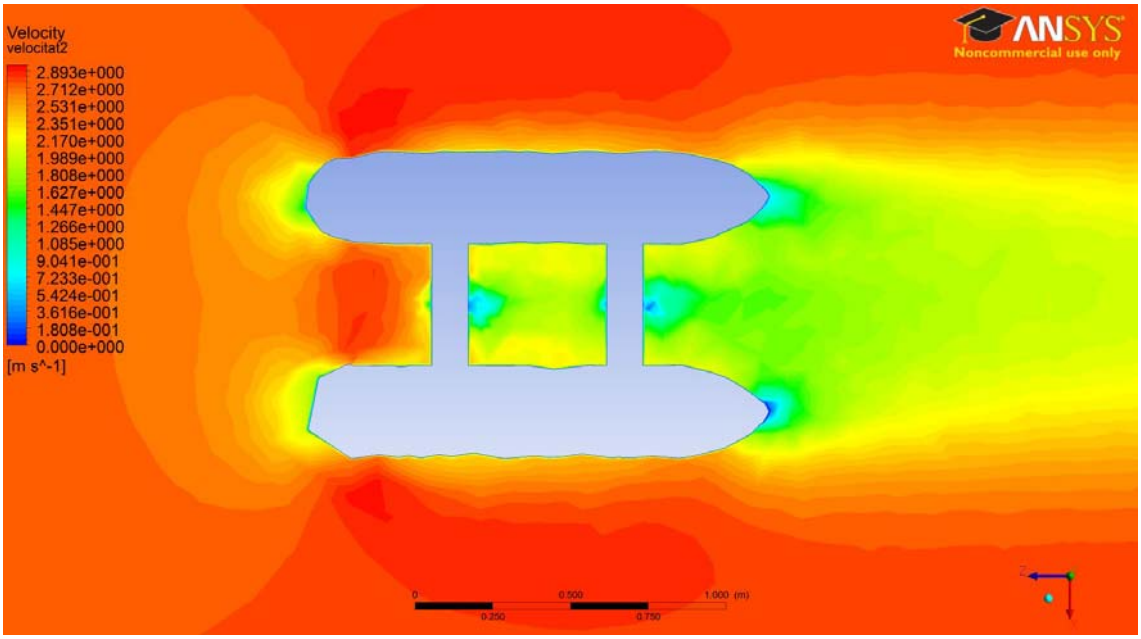


Fig. 4.14 Detall del gràfic de velocitats del pla 3 en l'estructura

4.3 Línies de corrent

Utilitzarem els mateixos plans anteriors per les línies de corrents.

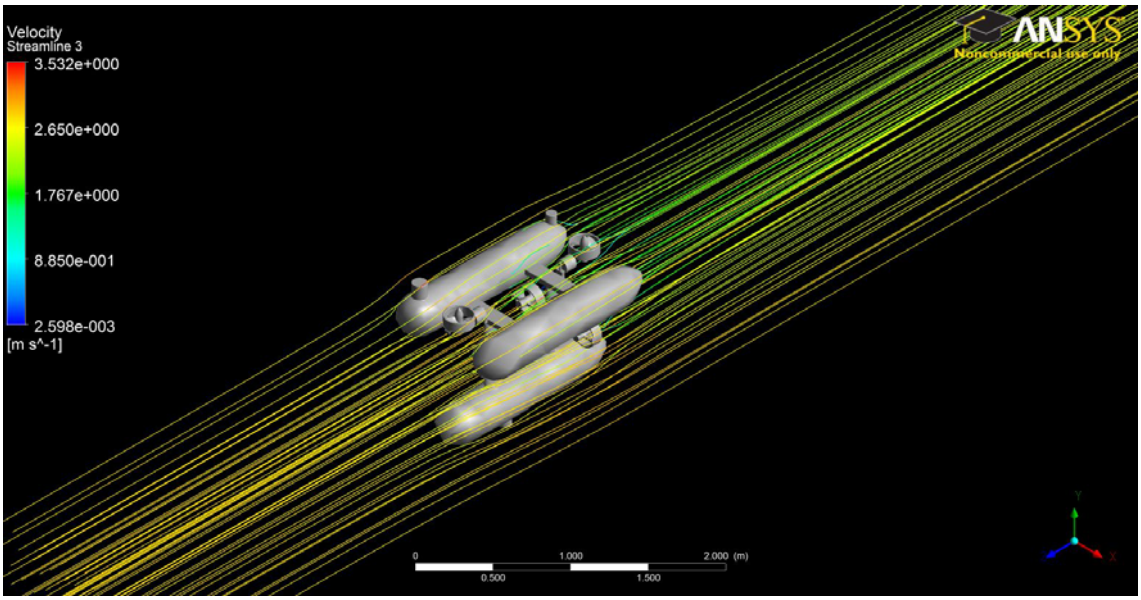


Fig. 4.15 Vista 3D de les línies de corrent

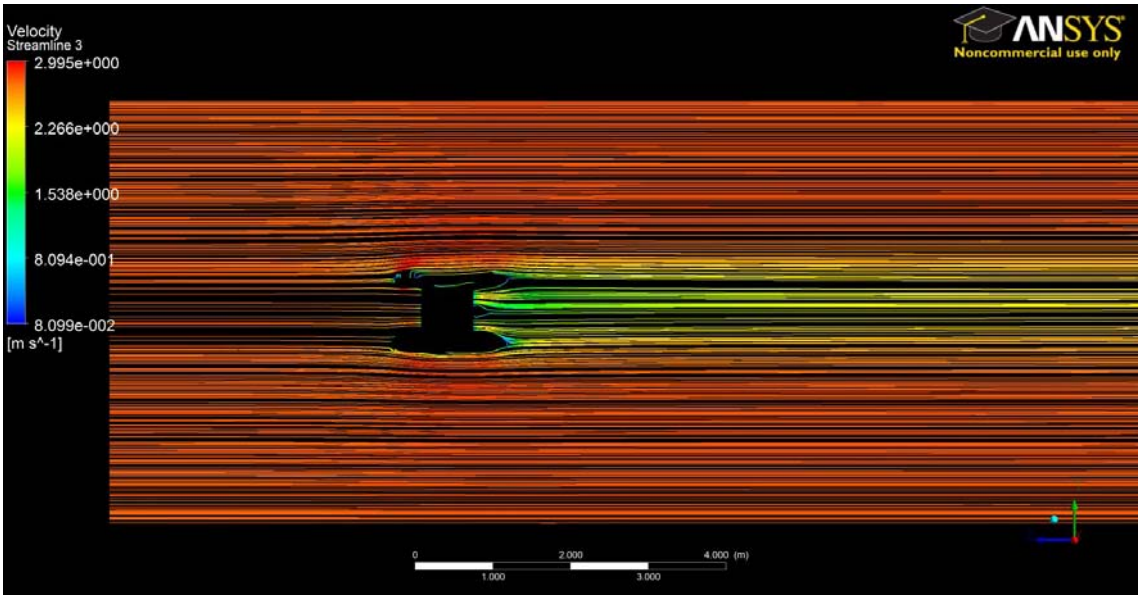


Fig. 4.16 Vista de les línies de corrent del pla 1

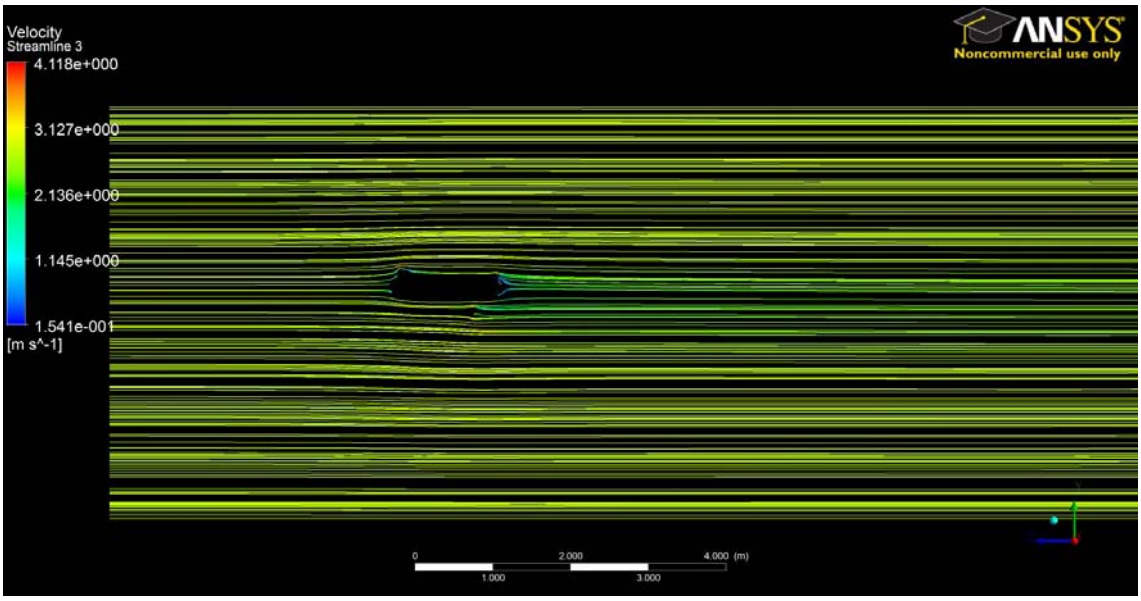


Fig. 4.17 Vista de les línies de corrent del pla 2

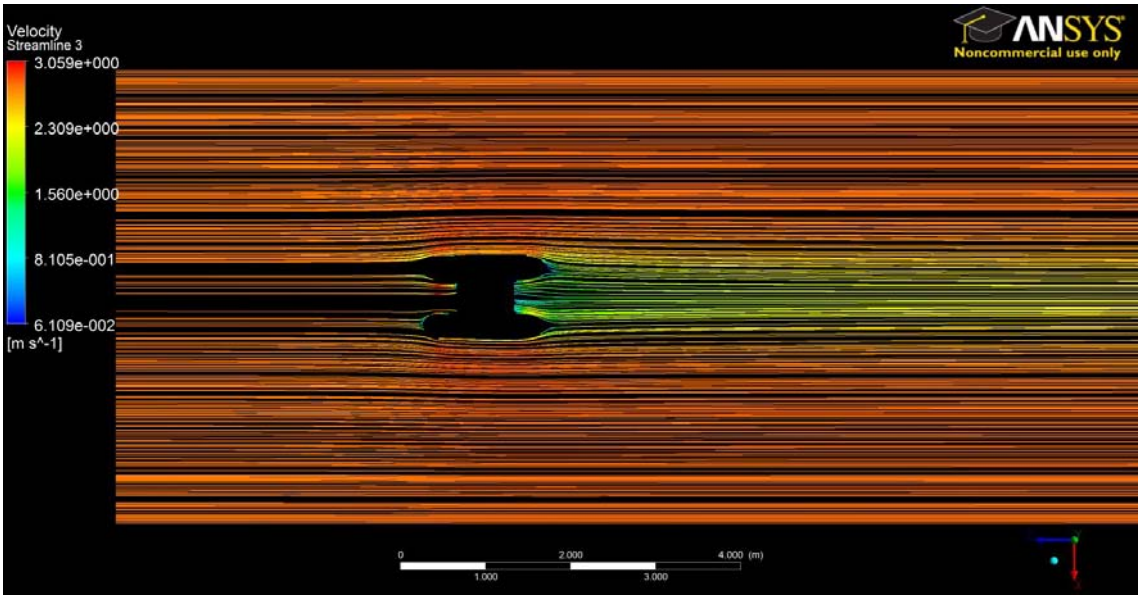


Fig. 4.18 Vista de les línies de corrent del pla 2

5. RESUM ECONÒMIC

El cost de l'estudi considerant les despeses generals, el benefici industrial, la redacció del projecte i l'IVA és de:

NOU MIL CENT SEIXANTA TRES euros ..... 9.163 €

Toni Güell Bosch

Girona,17 de Maig de 2013

6.GLOSSARI

AUV (Autonomus Underwater Vehicle): Vehicle autònom submergible, capaç d'operar sense connexió amb la superfície per períodes llargs de temps.

CFD: Acrònim de Computational Fluid Dynamics. Dit dels programaris que usen eines numèriques per a resoldre la dinàmica dels fluids.

Discretització: dit de l'acció de dividir un determinat volum o superfície en elements discrets per tal de poder resoldre el model amb el mètode dels volums finits (o altre mètode anàleg).

IGES: Acrònim de Initial Graphics Exchange Specification. Format estàndard d'intercanvi d'informació gràfica.

Malla: Entitats físiques utilitzades per resoldre problemes de simulació format per un conjunt de cel les i nodes, dels quals els primers estan units pels segons.

7. BIBLIOGRAFIA

[1] Steven W.Moore, Harry Bohm, Vickie Jensen. Underwater robotics. Science, design & fabrication. MATE (Marine Advanced Thecnology Education center)

[2] Harry Bohm,1954. Build your own underwater robot and other wet projects.

[3] Frank M.White. Mecànica de Fluidos. University of Rhode Island.

[4] Marco Lanfrit (9 de Febrer de 2005) Best practice guidelines for handling Automotive External Aerodynamics with FLUENT

[5] Mecánica Computacional Vol. XXIII, pp. 2189-2209. G.Buscaglia, E.Dari, O.Zamonsky. Novembre 2004

[6] G500brochure, Universitat de Girona

[7] David Ribas, Narcís Palomeras, Pere Ridao, Marc Carreras and Angelos Mallios. *et al.* (2012) GIRONA 500 AUV: FROM SURVEY TO INTERVENTION.

[8] Ansys workbench *14* user manual

[9] *Users Guide* to Autodesk *Inventor* 5.3

A.CREACIÓ I SIMPLIFICACIO DE LA GEOMETRIA DEL GIRONA 500

En aquest annex es detallen les simplificacions realitzades a la pròpia geometria del submarí per poder ser exportat i utilitzat amb el programari de simulació numèrica. Després d'una petita introducció (capítol A.1) es fa un apunt sobre la geometria inicial proporcionada per el grup VICOROB (capítol A.2). A continuació es detallen les simplificacions realitzades a un nou model creat amb Inventor (capítol A.3).

A.1 Introducció:

En tots els models estudiats per elements finits, és necessari dur a terme certes simplificacions, ja sigui de la geometria o bé de les condicions de contorn del problema perquè aquest sigui tractable numèricament per el computadors de què es disposa.

Aquesta simplificació va ser una tasca molt llarga i plena d'entrebancs que tot seguit s'explicaran. Al final de tot el procés es varen obtenir dos geometries, l'estructura sense els propulsors i el submarí sencer.

A.2 Geometria inicial:

La primera geometria amb que es va començar a treballar va ser una facilitada per VICOROB. Era dibuixada amb autocad inventor (en format IGES), a partir d'ajuntar totes les seves parts dibuixades per separat. Per tant no era un volum sol, sinó molts volums ajuntats.

A la Fig. A.1 es mostra la geometria facilitada per VICOROB.

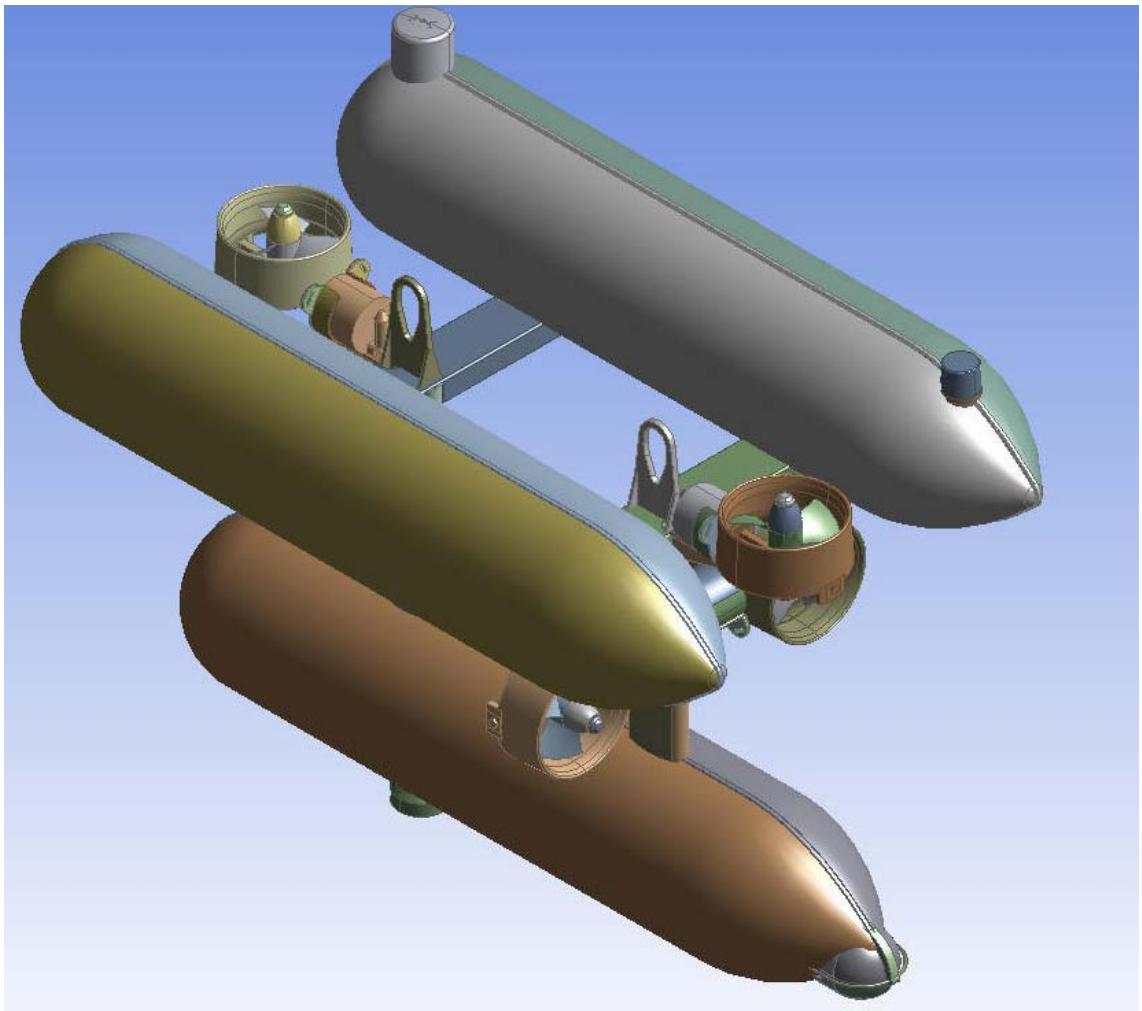


Fig. A.1 Imatge de la geometria inicial

El problema que es va tenir era que el programari ANSYS demana que el submarí estigui definit per un sol volum, així que es va intentar transformar-lo en un de sol. També la geometria contenia les parts interiors del submarí i només interessava el contorn global del submarí.

Tot seguit es mostren els passos realitzats alhora de simplificar la geometria.

1. Importar la geometria amb format IGES al programa ANSYS
2. Eliminar tots els cossos que no afectessin al contorn del submarí, és a dir els interiors com motors, dobles fons...
3. Realitzar unions de cossos a partir de la funció BOOLEAN que permetia convertir dos cossos en contacte en un de sol. Aquesta maniobra no sempre sortia a la primera ja sigui per superfícies sobreposades, mal connectades entre

elles o que els volums no estaven creats adequadament... Per tant moltes vegades es va retocar els cossos abans de poder unir-los. Per exemple, als propulsors va haver molts problemes ja que no eren cossos massissos sinó que estaven buits per dins i per tant no es podien unir. La solució que es va trobar va ser emplenar-los amb la funció FILL i llavors fer la unió BOOLEANA.

4. Després d'un procés molt llarg es va obtenir un sol cos de tot el submarí complet.

Tot i obtenir la geometria els problemes més greus varen arribar alhora de discretitzar ja que contínuament apareixien errors. Tot i aconseguir un sol volum les unions entre les parts no eren netes sinó que es sobreposaven o quedaven espais entre unions, també les geometries eren massa complexes per el programari.

Així es va decidir crear la geometria començant de zero amb inventor a partir de les mides de l'IGES facilitat per VICOROB.

Per evitar problemes de reconeixement i facilitar el procés de discretització es va simplificar la geometria original tot suavitzant les característiques tot allò que pugui donar o doni problemes en el procés de mallat. El procés de simplificació té un cert caràcter iteratiu, doncs en geometries complicades com és el cas del GIRONA 500 apareixen subvolums continguts dins els límits d'altres, volums diferents molt propers o no disposar d'un volum completament envolvent per tant s'ha d'anar provant si el programa mallador és capaç de generar una malla amb les simplificacions fetes. Altrament, analitzar on es donen els problemes i tornar a simplificar aquella zona determinada).

Les premisses més importants alhora de dibuixar el nou cos eren:

1- Començar per una part i anar construint el submarí sobre d'aquesta a partir d'unions boleanes. Per evitar unions estranyes es va decidir no dibuixar per parts i llavors unir.
2- Simplificar parts molt petites o de geometria complexa amb poca rellevància hidrodinàmica.
3- Intentar dibuixar a partir de volums simples sense angles crítics.

4- Dibuixar sempre a partir de les cotes obtingudes de l'IGES facilitat per VICOROB i així obtenir un volum el més semblant possible al submarí real.
5- Obtenir una geometria només de l'estructura i una altra del submarí complet amb els propulsors.

Finalment es va obtenir un volum simplificat del GIRONA 500 que permetia ser mallat sense problemes i que representava de forma relativament bona i acurada el real.. A la Fig.A.2 es mostra la geometria final obtinguda.

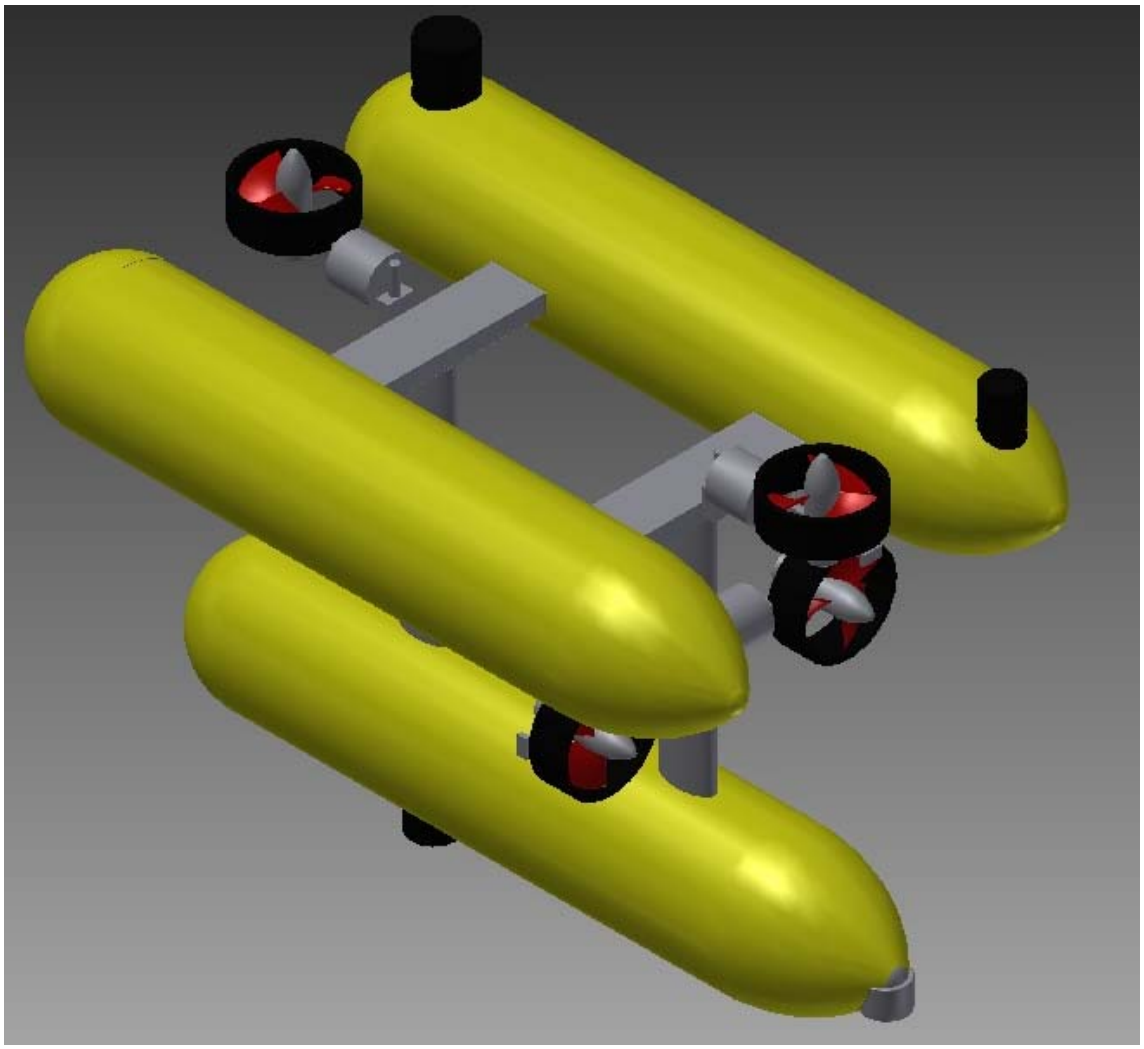


Fig. A.2 Geometria final obtinguda

Tot seguit s'explicaran les simplificacions realitzades respecte l'IGES original amb les imatges comparatives corresponents.

- Supressió dels ancoratges (Veure Fig. A.3): Les dos nanses es varen suprimir degut a problemes en la generació de la malla en les seves immediacions. Així doncs després d'analitzar diverses opcions per obtenir un mallat correcte es va optar per a eliminar-les i així deixar una superfície llisa i d'aquesta manera poder obtenir finalment un mallat de bona qualitat.

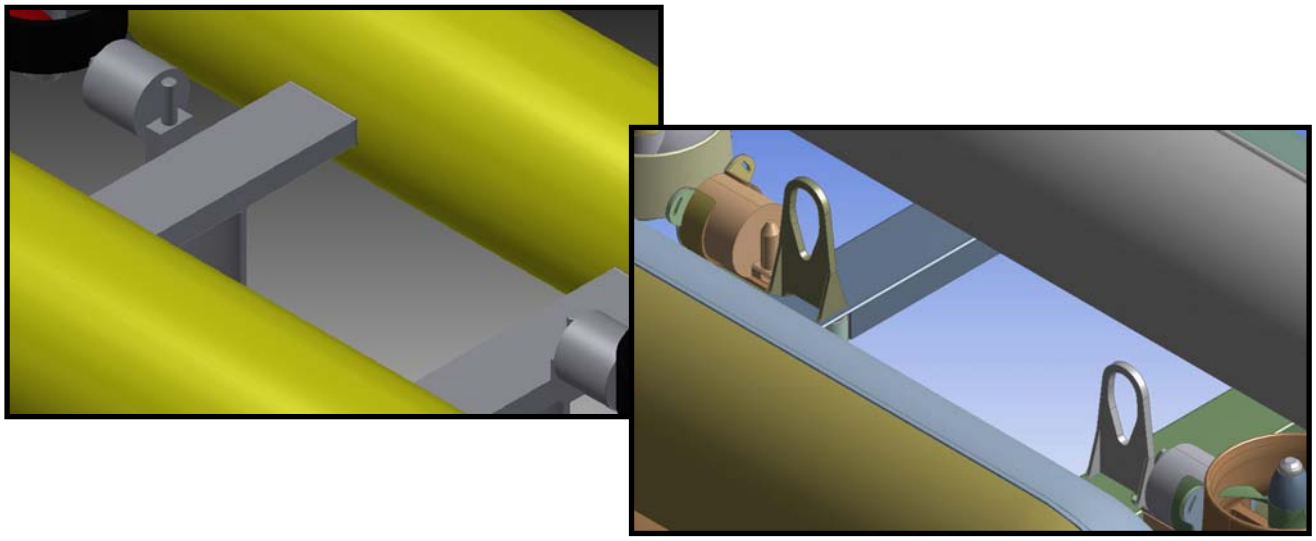


Fig. A.3 Detall de la simplificació dels ancoratges

- Supressió i simplificació d'unions mecàniques com cargols i femelles (Veure Fig. A.4 i A.5): Donat que els cargols presenten unes característiques amb un nivell de detall molt inferior a la dimensió dels elements que s'usaran per a discretitzar la geometria, aquest element no seria ben capturat, perdent així la influència real que pogués tenir. Alguns cargols s'han suprimit directament, altres s'han simplificat per volums sòlids d'unió més simples.

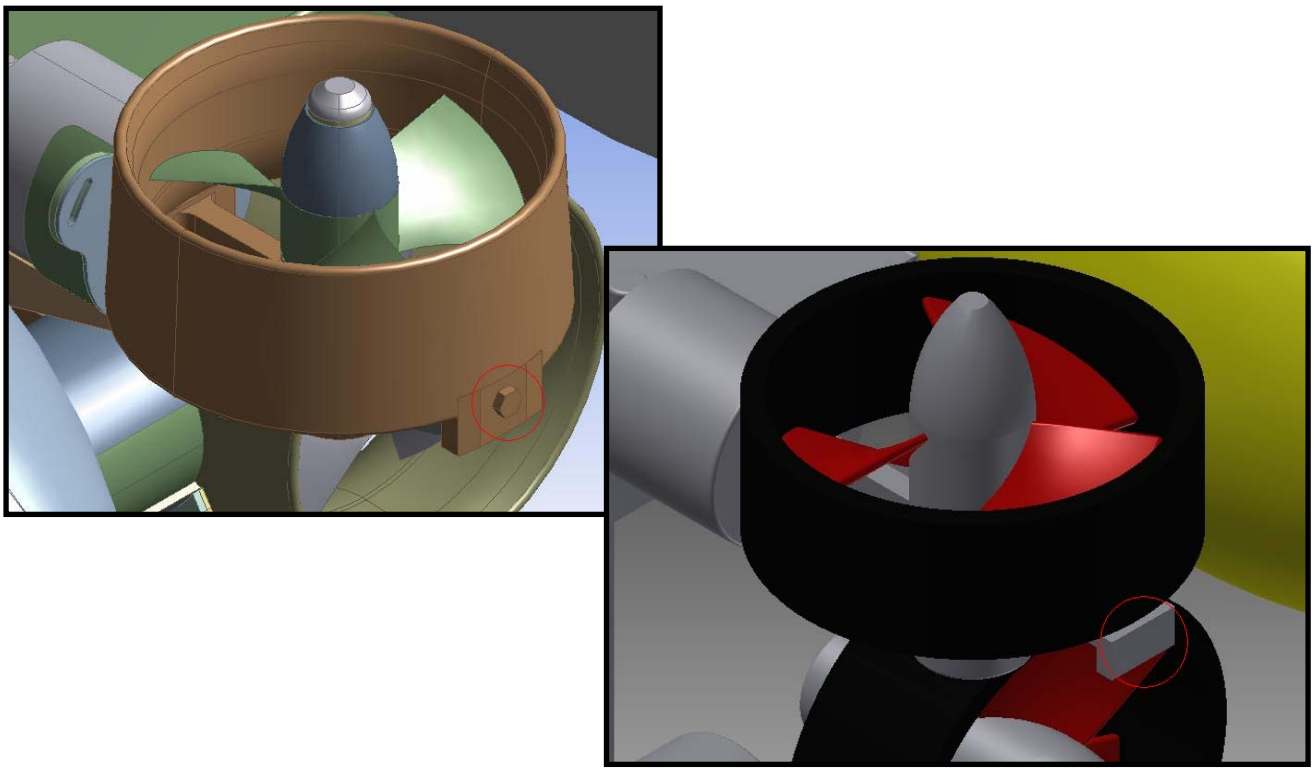


Fig. A.4 Eliminació cargols del propulsors

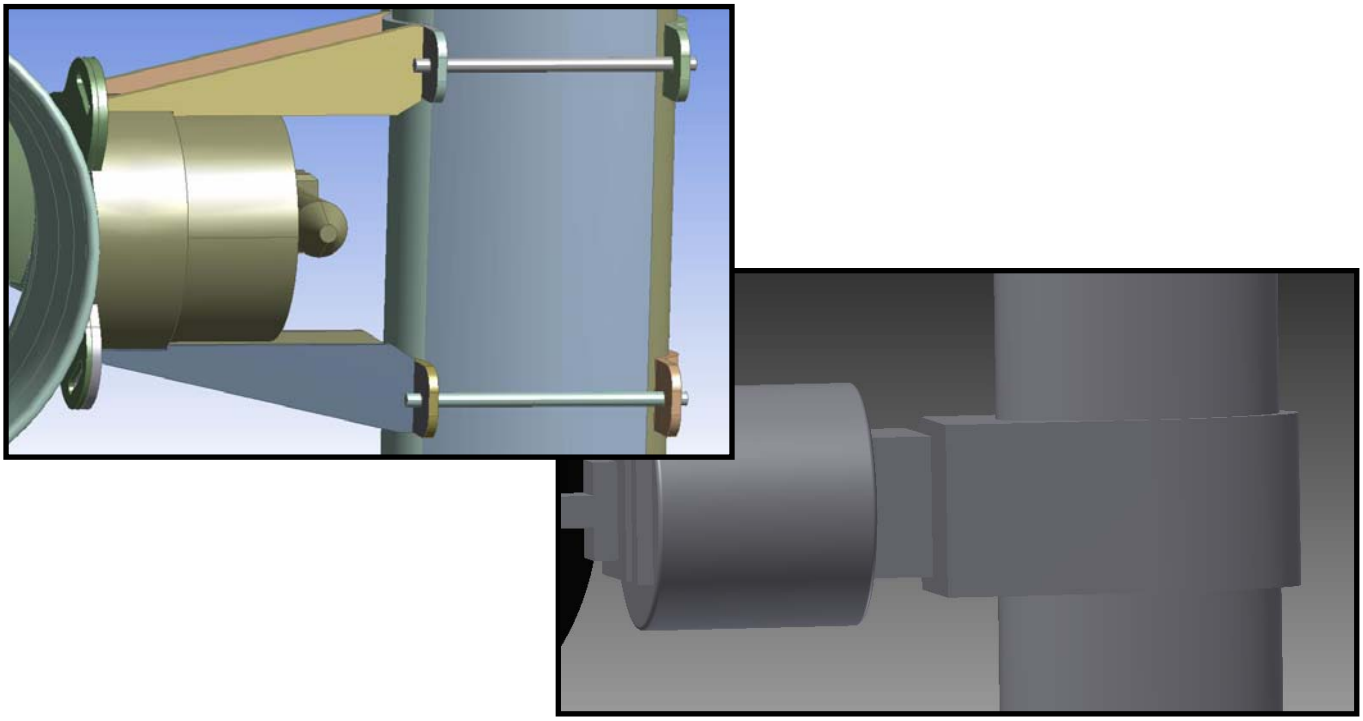


Fig. A.5 Eliminació cargols d'unió

- Simplificació dels suports dels propulsors (Veure Fig. A.6, A.7 i A.8): Els suports dels propulsors presentaven molts detalls de geometria complicada, formes complexes i volums interiors que generaven errors alhora de mallar, després de molts problemes es va decidir substituir totes aquestes parts per volums geomètrics simples. Així es va aconseguir obtenir un volum molt semblant al real i sense dificultats alhora de discretitzar.

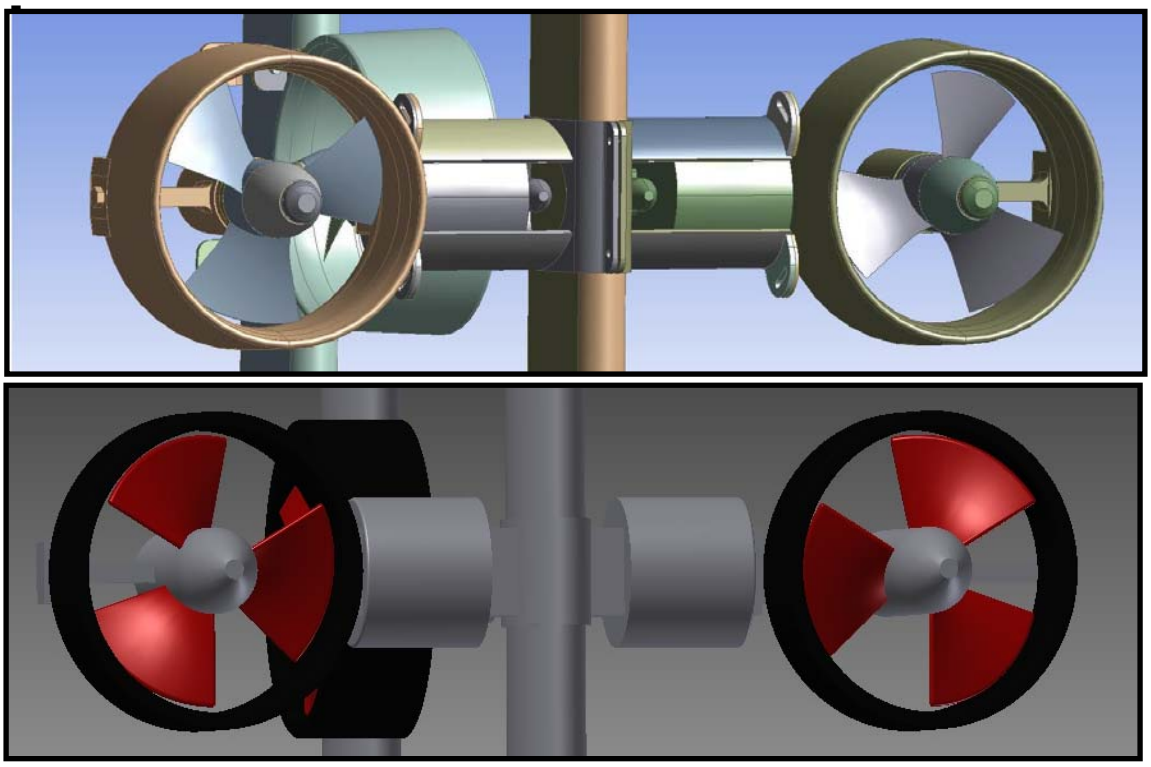


Fig. A.6. Simplificació dels suports dels propulsors

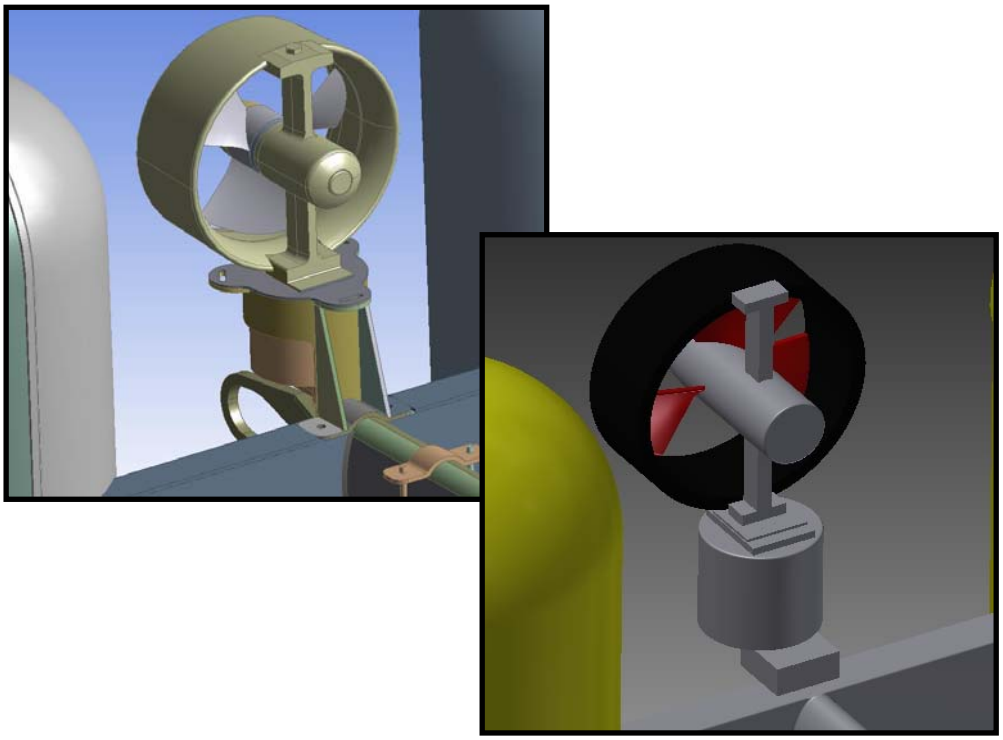


Fig. A.7. Simplificació de la base de fixació dels propulsors

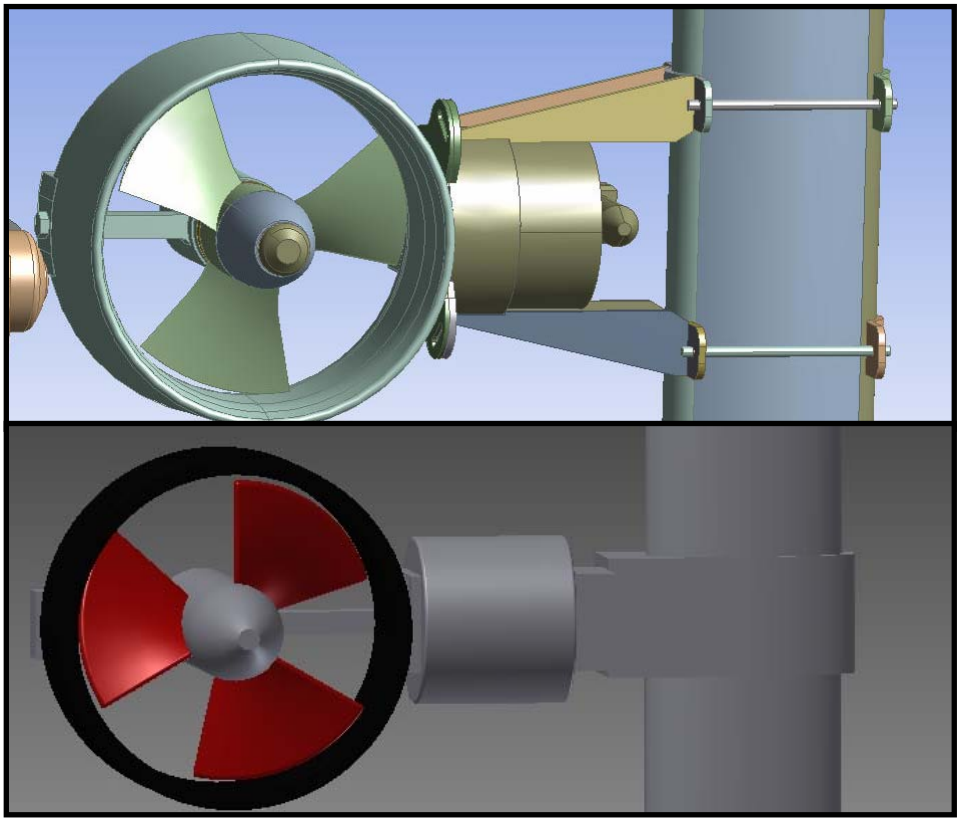


Fig. A.8. Simplificació de la fixació dels propulsors a l'estructura de l'AUV

B.BREU HISTÒRIA D'EXPLORACIÓ SUBMARINA

Aquest annex fa un repàs de la història de l'exploració submarina i proporciona un mostreig dels més significants en la història dels submarins, les campanes de busseig, ROV, AUV, equip de submarinisme i busseig de saturació.

En els primers temps, la majoria de les persones tenien por dels mars. Ells creien que els oceans eren sense fons o controlats per déus capritxosos. Però no tothom se sentia d'aquesta manera.

Tot i que sabem molt més sobre els mars que les persones de fa 2000 anys, la vida sota l'aigua segueix sent màgic i misteriós. En els últims temps, l'èmfasi de l'exploració submarina ha passat de l'àmbit militar al científic o per aplicacions empresarials.

Tot seguit s'exposarà un resum ordenat cronològicament de l'evolució històrica dels submarins:

- Mitjans 1200. L'anglès Roger Bacon va fer un dispositiu escafandre similar pel que sembla al utilitzat per Alexandre el Gran segles abans.

- 1620. L'holandès Cornelius Van Drebbel, enginyer de la cort del Rei Jaume I d'Anglaterra, va provar el seu submarí experimental al Riu Thames, Anglaterra. El submarí de fusta estava cobert amb una pell de cuir i l'haurien submergit durant diverses hores. L'aire es subministrava a través de tubs des de la superfície i la nau era accionada per dotze remers. El concepte d'un submarí intrigava inventors de molts països, però la falta d'una font d'energia no humana era un problema important en el seu desenvolupament.

- Principis del 1700. Es van fer immersions de rescat exitoses de la mà de John Lethbridge. Es van fer submergint-se uns 20 metres usant un barril de fusta equipat amb un port de visualització com es mostra a la fig. B.1.

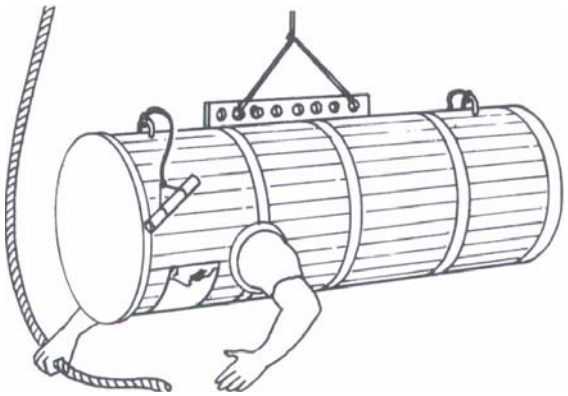


Fig. B.1Cambra de busseig de Lethbridge

- 1772 . El primer vaixell de busseig alemany va ser d'aproximadament 10 metres i tenia la forma d'un peix. Per a la propulsió, els tripulants utilitzaven cordes per tirar de la seva cua cap enrere i endavant.
- 1776. L'americà David Bushnell va inventar un submarí per una persona propulsat manualment que va ser de 2,5 metres de llarg per 2 metres de profunditat. El vaixell es deia Turtle (tortuga) perquè el seu casc de roure semblaven dues closques de tortuga unides per bandes de ferro. Aquest invent es mostra a la figura (#).
- 1800. Robert Fulton va construir el primer submarí accionat a mà pràctic a França. El cost total per al Nautilus va ser de 10.000 francs.
- 1819. August Siebe desenvolupa un vestit de busseig comprimit i casc de gran èxit conegut com el vestit de Siebe per a la mànega d'aire de busseig. Una versió posterior americana es coneix com "The Mark V".
- 1839. El Sir James Clark Ross s'estableix a l'Erebus i el Terror per explorar l'Oceà Antàrtic. Va fer 6,4 quilòmetres i va tenir èxit en obtenir les primeres mesures de profunditat del fons marí.
- 1863. Durant la guerra civil nord-americana es va veure el primer èxit d'un atac submarí quan el vaixell confederat H.L. Hunley va enfonsar el Housatonic. La tripulació del submarí van morir en l'atac.
- 1863. El primer submarí d'aire comprimit impulsat va ser construït pels francesos Simeó Borgeois i Charles Brun-Marie. S'anomenava Plongeur, mesurava 46 metres i es va provar de manera exitosa a 6.6 metres de profunditat. S'utilitzava aire comprimit per expulsar l'aigua des seus tancs, un mètode que es segueix utilitzant avui en dia.

- 1866.El primer torpede automàtic va ser inventat per l'anglès Robert Whitehead. Treballava per la marina austríaca, va perfeccionar controls automàtics que van permetre mantenir una direcció constant dels torpedes a una profunditat establerta.
- 1872-6. El viatge de quatre anys de l'anglès HMS Challenger va ser un dels primers viatges d'exploració científica del mar. El vaixell va viatjar als principals oceans del món i va portar informació abundant, amidaments i mostres de plantes i animals.
- 1878. L'americà d'origen irlandès John Holland és considerat el pare del submarí modern. Ell va inventar un submarí a vapor, Holland I. Després d'experimentar amb molts dissenys submarins va vendre als Estats Units el seu primer que utilitza un motor elèctric per a la propulsió sota l'aigua i un motor de gasolina per a la propulsió de la superfície i per a la recàrrega de les bateries.
- 1894. L'inventor nord-americà Simon Lake va fer moltes contribucions per al desenvolupament del submarí modern. Va dissenyar una sèrie de submarins amb rodes, com ara l'Argonaut així que poguessin recórrer el fons de llacs o rius.
- 1901. Gran Bretanya va llançar el seu HM Submarine N º 1 a l'octubre de 1901. El periscopi, un invent britànic, va ser introduït en aquests vaixells.
- 1914 – 1945. Durant la primera i segona guerres mundials, es va dur a terme els principals avenços tecnològics en els submarins i aquests van esdevenir una gran amenaça per les marines del món. Van ser desenvolupats dispositius de so sota l'aigua com telèfons i sonars per a les comunicacions i per detecció de naus enemigues. Durant la segona guerra mundial, alemanya va ser pionera en submarins que permetien recarregar les bateries mentre es navegava a profunditat de periscopi. Aquest desenvolupament va augmentar considerablement la gamma de submarins sota l'aigua.
- 1930. Es van inventar les aletes de cautxú. Tant Leonardo da Vinci com Benjamí Franklin havien arribat a un disseny similar molt abans, però no tenien material adequat.
- 1934. Otis Barton va dissenyar una esfera que podia portar amb seguretat científics fins a profunditats abans inaccessibles per obtenir informació oceanogràfica. Ell i el Dr William Bebee varen descendir a un profunditat de 1.000 metres.
- 1942. Jacques Cousteau i Emile Gagnan varen perfeccionar l'SCUBA (aparell autònom de respiració sota l'aigua). Que permet al bussejador treballar i explorar sota l'aigua en total llibertat.

- 1949. Otis Barton va perfeccionar la seva esfera original i va descendir 1.500 metres davant Califòrnia.
- 1954. L'aplicació de l'energia nuclear per a la propulsió de submarins va esdevenir un desenvolupament revolucionari. El primer submarí de propulsió nuclear va ser l'USS Nautilus. Encara que en molts aspectes s'assemblava a un submarí ordinari, la seva velocitat de creuer era de més de 20 nusos.
- 1954. Bussejadors francesos van descendir a 4 km davant les costes d'Àfrica en un batiscaf. Igual que la batiesfera, un batiscaf es construeix amb un globus d'acer per protegir els científics de les grans pressions de les profunditats. A diferència del batiscaf, té propulsió pròpia i funciona sense una corretja.
- Dècada 1960. Durant aquest període revolucionari per a la investigació submarina, es van desenvolupar els vehicles operats remotament (ROV). Gran part d'aquesta revolució en la indústria del busseig va ser impulsat pel necessitats de la indústria petrolera a alta mar i l'interès de la Marina dels EUA. Per la dècada de 1970 la tecnologia estava prou avançada per permetre una capacitat real per treballar en l'oceà.
- 1960. Jacques Piccard va aconseguir una immersió profunda sense precedents amb la batiscaf Trieste (Fig. B.2). Va tardar gairebé dues hores per baixar a 10,911 m al lloc més profund de l'oceà, anomenat l'Abisme Challenger en les Mariannes Trench.

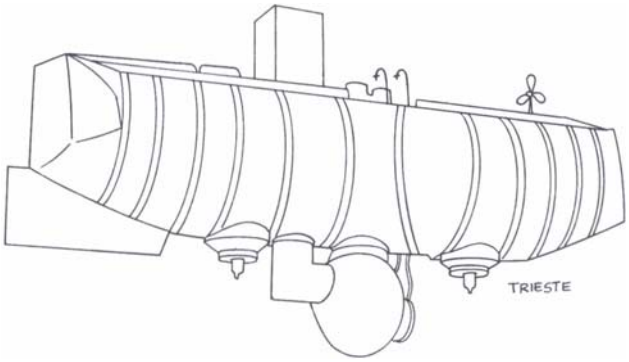


Fig. B.2. La batiscaf Trieste de Jacques Piccard

- 1960. Dimitri Rebikoff va experimentar amb dissenys de ROV (Remotely Operated Vehicles) i AUV (Autonomous Underwater Vehicles). “Sea Spook”va ser un dels seus primers robots.
- 1970. A finals dels anys 70, els interessos comercials i tecnològics van fer canviar la investigació dels bussejadors a la robòtica. Aquest va donar lloc a una gran onada de

desenvolupament ROV. Inicialment s'utilitzaren per l'inspecció de canonades, com a suport en la perforació, i encara més recent s'utilitza en la construcció sota l'aigua i manteniment.

- 1980-Present. A part de torpedes, el desenvolupament de vehicles sense lligams, o vehicles submarins autònoms (AUV), ha estat molt poc explorat. El potencial de reducció de costos de tasques com ara la topografia haurien de seguir encoratjant la recerca i el desenvolupament.
- 1985. Utilitzant un submergible amb equips de vídeo de control remot , l'equip de Bob Ballard finalment va localitzar el vaixell "insubmergible" Titanic, que va xocar contra un iceberg i es va enfonsar 3.780 ma l' oceà l'any 1912.
- 1998. El noruec "Hugin" és el primer AUV comercial accionat per una pila de combustible. Hugin utilitza una ecosonda multifeix per sondejar els fons marins i es comunica a través de tres enllaços acústics.
- 2009. El vehicle híbrid Nereus va descendir 6,8 milles, convertint-se en el tercer vehicle (després de Kaiko i Trieste) en explorar la fossa de les Mariannes, la part més profunda coneguda dels oceans del món.
- 2010. Després de que la plataforma petrolera Deepwater Horizon explotés al golf de Mèxic, els ROV varen servir com a "ulls" per supervisar i guiar la tapa i equips collaret que finalment van impedir l'enorme fuita d'oli.

C. TIPUS DE VEHICLES SUBMARINS

Existeixen una àmplia varietat de tipus i mides de naus subaquàtiques i s'utilitzen per a molts propòsits diferents. Aquest annex resumeix totes aquestes varietats per així tenir una idea de cadascuna i de les diferències entre elles.

C.1 Introducció

Alguns vehicles submarins porten tripulació o passatgers humans i són coneguts, per raons històriques, com vehicles tripulats. Els exemples inclouen submarins i submergibles. Els vestits de busseig atmosfèrics (ADS), que s'assemblen als vestits espacials en molts aspectes, són essencialment submergibles unipersonals. En tots aquests vehicles tripulats, les vides humanes estan en risc, pel que el disseny i la construcció han de ser extremadament robust Els vaixells estan equipats amb sistemes de seguretat i amplis estan subjectes a rigoroses inspeccions periòdiques i manteniment per personal especialitzat. Això els fa molt costosos alhora de construir, operar i mantenir-los.

Una alternativa cada vegada més popular és l'ús de vehicles no tripulats. Aquests són parcialment o totalment màquines robòtiques. Estan normalment operats per control remot o estan programats per operar pel seu propi compte sense la guia d'un pilot humà. Els vehicles no tripulats inclouen, vehicles operats remotament (ROV), vehicles submarins autònoms (AUV) i vehicles submarins híbrids.

Tot seguit es descriuran més detalladament cadascun dels tipus de vehicles submarins mencionats anteriorment .

C.2 Submarins

Potser els més coneguts dels tripulats sota l'aigua són els moderns submarins militars, com ara la classe Typhoon russa, la classe Vanguard britànica o la classe Ohio o Virgínia d'estats units. Aquests són molt grans, gairebé tan llarg com dos camps futbol

(172 metres) i un pes de fins a 48.000 tones a plena càrrega i submergits. La majoria obtenen el seu poder dels reactors nuclears o motors dièsel i poden cobrir grans distàncies sota l'aigua. Els submarins dièsel han de sortir periòdicament a la superfície, perquè puguin encendre els seus motors per recarregar les bateries, que s'utilitzen per a l'alimentació mentre està sota l'aigua. Els submarins de propulsió nuclear poden romandre completament submergits durant mesos. Porten una tripulació considerable i s'utilitzen per a la vigilància militar o com a bases des de la qual llançar armes, incloent míssils nuclears, que poden ser dirigits contra objectius en terra o flotes enemigues.

No tots els submarins moderns són grans. Alguns més petits s'utilitzen per a la investigació científica. Més comunament, els submarins turístics fan múltiples immersions per dia, duent a grups de 25 a 50 passatgers per a una vista d'ull de peix de visites subaquàtiques.

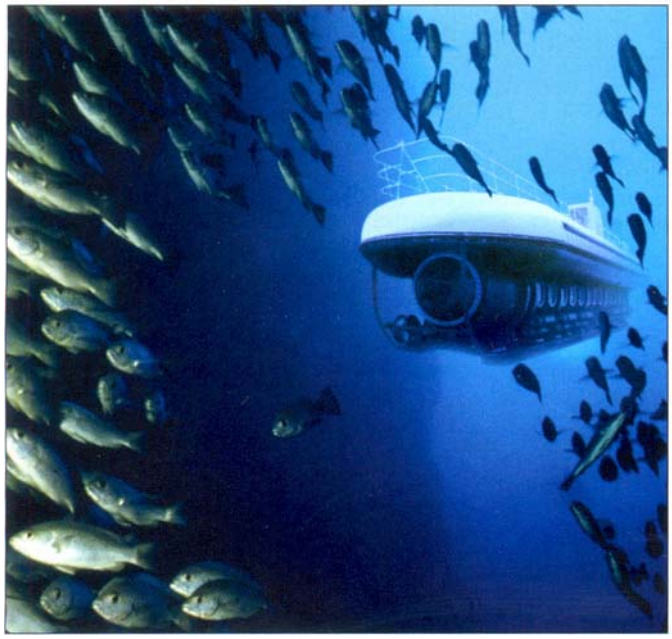


Fig. C.1 Submarí turístic Atlantis

C.3 Els submergibles

Els submergibles són vehicles tripulats de mida petita, habitualment porta de dos a tres científics o tripulació. Poden estar equipats amb una varietat de sensors, braços robòtics, o engranatges altament especialitzats per facilitar l'exploració i la recerca científica.

Mentre que els submarins operen de forma independent, els submergibles generalment requereixen els serveis d'un vaixell de suport proper, o "nau mare", per al llançament, la recuperació i el manteniment.

Tot i que els vehicles no tripulats (descrits més endavant) estan prenent cada vegada més protagonisme en les missions que abans realitzaven els submergibles, aquestes naus tripulades encara s'utilitzen àmpliament per a aplicacions científiques.

C.4 Vestits de busseig atmosfèrics

El vehicle tripulat més petit (si es pot tractar com a vehicle). La majoria dels ADS (Atmospheric Diving Suit) s'assemblen als vestits espacials dels astronautes, i alguns estan equipats amb unitats de propulsió. A diferència d'un vestit de bussejador comercial, l'atmosfèric té un exterior rígid que funciona com una mena d'armadura per protegir l'ocupant de l'exposició a pressions extremes. Permeten al bussejador treballar a una profunditat de 600 metres. Un altre avantatge significatiu és que el bussejador treballa a la pressió de l'aire de la superfície, pel que no ha de descomprimir al tornar a la superfície, fins i tot després de treballar en aigües profundes. Els ADS més moderns s'utilitzen per fins militars o comercials.

C.5 Vehicles teledirigits (ROV)

Els vehicles no tripulats més comuns són els vehicles operats per control remot o ROV. Aquestes màquines permeten als seus operadors controlar-los des d'un lloc segur, sec i còmode, en general en un vaixell o plataforma situada a la superfície de l'aigua per sobre del ROV. La comunicació amb el vehicle es fa per mitjà d'un cable anomenat corretja de subjecció o umbilical, aquesta corretja de subjecció també transmet energia elèctrica al robot i permet que les dades, incloent àudio, vídeo, imatges, la informació de navegació, i altres lectures dels sensors s'enviïn de tornada.

Varien en grandària de petites unitats que es poden fabricar fàcilment per una persona fins a les grans unitats de la mida d'un petit garatge i un pes de diverses tones. Els més

petits es poden utilitzar per a la investigació científica, l'educació, o la inspecció de ambients líquids perillosos, com l'interior de les canonades.

La majoria dels vehicles teledirigits grans estan equipats amb dos manipuladors (braços robòtics), així com un carro intercanviable amb un assortiment d'eines per inspeccionar i fer el manteniment de les plataformes petrolíferes submarines o canonades submarines. Independentment de la grandària, hi ha tres categories de ROV

- ROV que neden lliurement
- ROV que arrosseguen pel fons
- ROV estructuralment dependents

C.6 Vehicles submarins autònoms (AUV)

Autonomia descriu la naturalesa independent d'aquests submarins. Els AUV porten la seva pròpia font d'alimentació i no tenen cap lligam físic amb la superfície. A més, cap pilot controla directament aquest tipus de robot. En el seu lloc, un ordinador preprogramat o algun tipus de circuit electrònic guia el vehicle en la seva missió.

Els sensors a bord connectats a un ordinador aporten informació de navegació, com ara la profunditat, la velocitat, direcció, i de la ubicació de possibles obstacles. Sistemes addicionals poden recopilar i emmagatzemar dades oceanogràfiques o altra informació per a la posterior revisió per part dels éssers humans després la missió.

Els AUV poden tornar a la superfície periòdicament durant una missió per establir comunicació per ràdio amb un vaixell, instal·lació en terra o satèl·lits. Tal comunicació d'enllaç pot ser utilitzat per recuperar dades dels AUV, per actualitzar la seva informació de posició, o proporcionar instruccions de la missió revisades. En alguns casos, poden aparcar ells mateixos en les estacions de connexió per a submarins que estan a la costa, per la qual cosa permet als AUV recarregar les bateries i intercanviar informació amb les instal·lacions en terra per mitjà d'un cable.

Els AUV requereixen sistemes molt sofisticats per a la navegació i evasió d'obstacles, de manera que tendeixen a ser cars. Poden emmagatzemar una quantitat limitada de

l'energia i per tant es restringeix a la quantitat de treball que poden fer abans de tornar a casa per recarregar les bateries. A causa de les propietats físiques de l'aigua que limiten les opcions de transmissió de dades, els AUV no poden transmetre imatges de vídeo en directe ni tampoc és fàcil rebre ordres complexes mentre que un ROV pot. Certament, el disseny AUV és una àrea de recerca molt activa, amb noves idees i els nous sistemes que s'estan provant tots els dies.

C.7. Vehicles submergibles híbrids

El terme "híbrid" en general suggereix que combinen característiques de dues o més coses diferents, com els cotxes que poden funcionar amb gasolina o amb bateries. En el cas dels vehicles submarins no tripulats, sovint es refereix a vehicles que combinen els avantatges dels ROV i AUV de diverses maneres per proporcionar el millor d'ambdós móns. Aquests són anomenats vehicles híbrids operats remotament (HROV).

És cert que hi ha moltes interpretacions diferents del que significa "híbrid" en el món submarí. Un exemple d'això és un vehicle que pot canviar entre ser un ROV i un AUV, porta potència i sistemes de navegació sofisticats a bord pel que poden operar independentment com un AUV, i també permet la connexió d'un cable flexible de fibra òptica que permet pilotar el vehicle veure imatges de vídeo en directe com un ROV.

D. PROGRAMARI ESPECIALITZAT UTILITZAT

En aquest annex es farà referència als diferents programes d'àmbit tècnic utilitzats per a l'execució de l'estudi. Es defineixen les característiques principals i la interfície gràfica que ofereixen. Es prestarà atenció al programari Ansys Workbench, utilitzat per a la discretització de la geometria i simulació per a l'adquisició de dades, tot ometent el programa de CAD 3D Inventor, utilitzat per a la creació de la geometria, doncs aquest programa ja és prou conegut dins l'àmbit enginyeril.

D.1 Ansys Workbench

Aquest és el programari utilitzat per a la discretització de la geometria (es tracta del pre procès de la simulació numèrica) i per la simulació. La versió utilitzada és v14.

Tot i que disposa d'eines d'edició geomètrica, aquests són molt limitades i utilitzades en determinades situacions en què no es requereixi complexitat en la geometria, per exemple en la creació del canal hidrodinàmic. És per això que s'ha d'importar la geometria creada amb un software de CAD en un format neutral, en el meu cas en format IGES.

Disposa d'eines de mallat per a definir i controlar les característiques i dimensions dels elements en que es subdividirà la geometria (volum en el cas del present estudi), tant a nivell d'aresta, superfície com volum. També disposa d'eines de revisió i reparació del mallat, per tal de que el mallat de sortida presenti la major qualitat possible i així evitar errors de lectura del mallat quan es calculi.

A la següent figura es mostra la interfície gràfica principal del programa amb les diferents parts identificades.

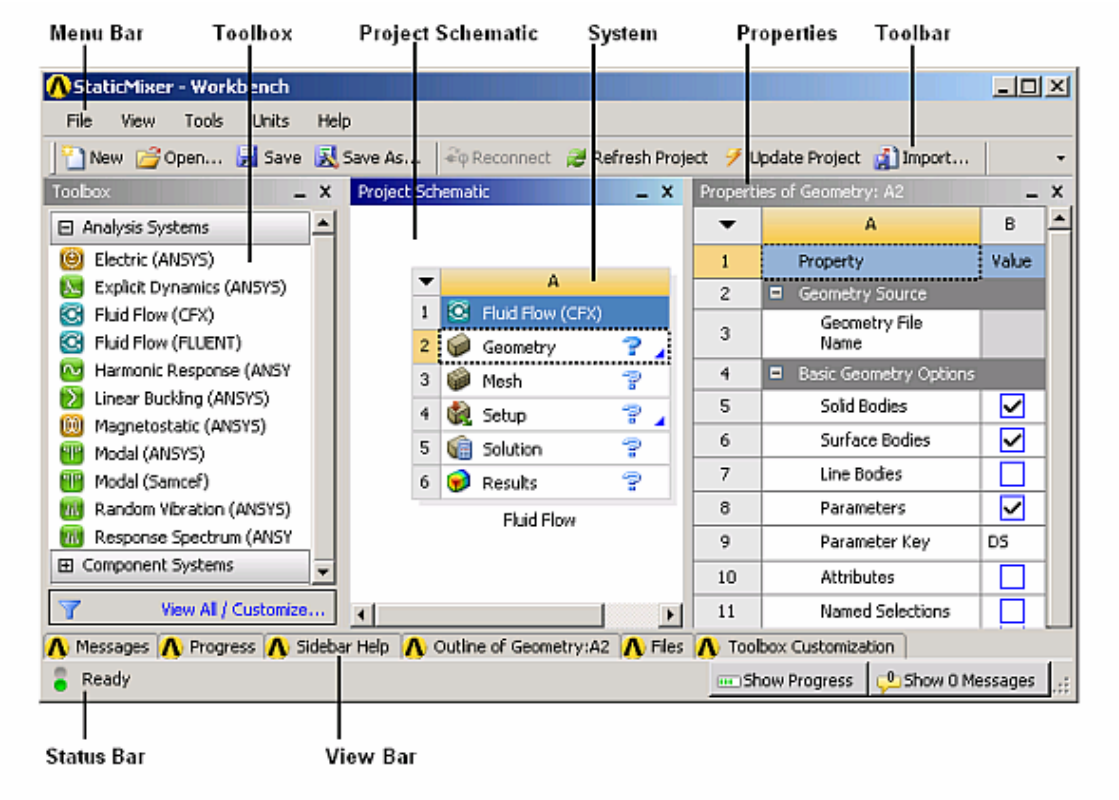


Fig. D.1 Interfície gràfica del programa ANSYS WORKBENCH

E. MÈTODE NUMÈRIC DELS VOLUMS FINITS

Aquest és un mètode numèric utilitzat per a la resolució aproximada de les equacions que regeixen la dinàmica de fluids, en casos en què és impossible resoldre les analíticament. És una particularització del mètode dels elements finits. Aquí es considera el valor d'una variable constant en tot el volum de l'element considerat, simplificant així els càlculs necessaris i reduint significativament el cost computacional en comparació amb l'altre mètode.

El procediment, a grans trets, consisteix en discretitzar les equacions diferencial parcials que defineixen el comportament considerant un determinat nombre d'elements dins el volum estudiat, per tal de poder les solucionar mitjançant mètodes numèrics iteratius. D'aquest fet se'n deriva la importància de subdividir el volum en elements prou petits on es pugui considerar el valor d'una variable (velocitat, pressió, etc.) constant.

E.1. Equacions generals del moviment

Les tres equacions que governen la dinàmica d'un fluid s'obtenen considerant els balanços de massa, quantitat de moviment i energia en un element de volum infinitesimal. Els balanços es poden dur a terme des del punt de vista d'un sistema de referència mòbil amb la partícula de fluid (Eulerià), o bé des d'un sistema de referència fix a l'espai (Lagrangià). Les equacions que es presenten en aquest annex s'obtenen a partir del punt de vista Lagrangià.

E.1.1. Equació de conservació de la massa

Considerant que la densitat és constant a tot el fluid, el balanç màssic en un volum determinat s'escriu com:

$$\int_s \vec{v} \cdot \vec{n} dS = 0$$

(eq.1)

On S és la superfície que envolta el volum estudiat, v és la velocitat en la direcció normal a la superfície per cada punt (n representa el vector normal a la superfície).

E.1.2. Equació de la conservació de quantitat de moviment

Considerant el cas amb fluid incompressible i d'una viscositat constant, el balanç de la quantitat de moviment s'expressa de la següent forma en termes de la velocitat (v):

$$\rho \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \rho(\vec{v} \cdot \nabla)\vec{v} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{v} \qquad \text{(eq.2)}$$

On: ρ és la densitat, μ és la viscositat dinàmica, p és la pressió mitjana del fluid i ∇^2 representa l'operador laplacià que satisfà:

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \qquad \text{(eq.3)}$$

Els termes de l'esquerra de l'equació 2 corresponen a la taxa de variació de la velocitat i a la seva advecció. El primer terme de la dreta correspon al gradient de pressions i el darrer correspon a la dissipació de la quantitat de moviment degut a la fricció (i.e. viscositat).

E.1.3. Equació de conservació de l'energia

En determinats casos, també s'haurà de considerar l'equació de conservació de l'energia total per a la resolució del problema físic. Aquesta equació relaciona la variació d'energia (cinètica i interna) amb les forces exteriors que hi actuen de la següent forma:

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\rho\left(e + \frac{v^2}{2}\right)\right) + \nabla\left(\rho\left(e + \frac{v^2}{2}\right)\vec{v}\right) = \vec{v} \cdot \rho \frac{d\vec{v}}{dt} - p\nabla\vec{v} - \nabla\vec{q} + q_r + q_q + \Phi_v \qquad \text{(eq.4)}$$

On el primer terme de la dreta correspon a la taxa de variació de d'energia interna (e) i energia cinètica (on v representa el mòdul de la velocitat) i el segon a la seva advecció.

D'altra banda, el primer terme de la dreta correspon a la potència associada a les forces externes i a les forces de pressió al deformar la partícula i els termes restant fan referència a les contribucions e variació d'energia interna i cinètica degudes a la conducció q, radiació q_r, reacció química q_q i forces viscoses Φ_v.

Si es considera un fluid incompressible, i s'ometen els termes radiatius, convectius i químics, l'equació esdevé:

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(e+\frac{v^2}{2}\right)+\nabla\left(\left(e+\frac{v^2}{2}\right)\vec{v}\right)=\vec{v}\cdot\frac{d\vec{v}}{dt}+\Phi_v \qquad \text{(eq.5)}$$

Aquesta és l'equació que es dicretitza per tal de solucionar numèricament.

E.2. Equació de conservació d'una variable U

A partir de la següent equació de balanç es permet obtenir numèricament els balanços de massa, quantitat de moviment i energia per solucionar un problema numèric de dinàmica de fluids.

$$\frac{\partial}{\partial t}\iiint_V U\,dV+\iint_S \vec{F}\,d\vec{S}=\iint_S Q_s\,d\vec{S}+\iiint_V Q_V\,dV \qquad \text{(eq.6)}$$

on F és el flux associat a la variable U, Q_s representa les possibles fonts de U en la superfície del volum i Q_v les possibles fonts d'U en el volum.

E.3. Discretització de l'equació de conservació

Aquest és el pas que permet solucionar les equacions de conservació numèricament. Aquí les integrals s'assimilen a sumatoris de la següent forma:

$$\frac{\partial}{\partial t}\iiint_V U\,dV=\frac{\partial}{\partial t}\left(U_{ij}V_{ij}\right) \qquad \text{(eq.7)}$$

$$\iiint_V Q_V\,dV=\frac{\partial}{\partial t}\left((Q_V)_{ij}V_{ij}\right) \qquad \text{(eq.8)}$$

$$\iint_S \vec{F}\, d\vec{S} = \sum_{vores}\left(\vec{F} \cdot \vec{S}\right) \qquad \text{(eq.9)}$$

$$\iint_S Q_s\, d\vec{S} = \sum_{vores}\left((Q_s)_{ij} \cdot \vec{S}\right) \qquad \text{(eq.10)}$$

Considerant que:

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(U_{ij}V_{ij}\right) = \frac{U_{ij}(t+1) - U_{ij}(t)}{\Delta t} \qquad \text{(eq.11)}$$

Agrupant tots els termes en la forma de l'equació 6 i aïllant el valor de la variable al temps (t+1), s'obté la següent expressió que determina el valor de la variable en un temps posterior a partir dels valors a un temps (t):

$$U_{ij}(t+1) = \left[\sum_{vores}\left(\vec{F} \cdot \vec{S}\right) + \sum_{vores}\left((Q_s)_{ij} \cdot \vec{S}\right) + (Q_V)_{ij}V_{ij}\right]\frac{\Delta t}{V_{ij}} + U_{ij}(t) \qquad \text{(eq.12)}$$

Aquesta equació permetrà avaluar els balanços de massa, quantitat de moviment i energia per determinar l'estat d'un sistema fluidodinàmic.

F. ESTUDI DE COSTOS

CONCEPTE	QUANTITAT	UNITATS	PREU	SUBTOTAL
Aprenentatge ús ANSYS Workbench	20	Hores	0 €	0 €
Recerca informació (llibres, internet i altres)	30	Hores	10 €	300 €
Creació geometria 3D	40	Hores	20 €	800 €
Amortització programari disseny	10	Hores	15 €	150 €
Generació mallat (ANSYS Workbench)	100	Hores	25 €	2.500 €
Simulacions numèriques (ANSYS Workbench)	80	Hores	25 €	2.000 €
Amortització programari específic simulació numèrica	30	Hores	25 €	750 €
Redacció	60	Hores	20 €	1.200 €
			SUBTOTAL ACUMULAT	7.700 €
			13% DESPESES	1.001 €
			6% BENEFICI INDUSTRIAL	462 €
			TOTAL	9.163 €