



EPS

Escola Politècnica
Superior

Projecte/Treball Fi de Carrera

Estudi: Enginyeria Industrial. Pla 2002

Títol: ACOBLAMENT D'UN PERFILADOR DE
MICROESTRUCTURA AMB UN ROBOT SUBMARÍ PER
MESURAR LA TURBULÈNCIA EN SISTEMES AQUÀTICS
NATURALS.

Document: Memòria i Annexos

Alumne: Jordi Armengol i Masferrer

Director/Tutor: Elena Roget / Toni Pujol

Departament: Física / Eng. Mecànica i de la Construcció Industrial

Àrea: Mecànica de Fluids

Convocatòria (mes/any): Juliol 2008

CONTINGUT

1.	INTRODUCCIÓ	4
1.1.	Antecedents	4
1.2.	Objecte	5
1.3.	Especificacions i abast	5
1.4.	Contingut de l'estudi	6
2.	MESURES DE TURBULÈNCIA: ESTAT DE L'ART	8
2.1.	Introducció	8
2.2.	Mesures de perfils horitzontals	9
2.3.	Mesures de perfils verticals	13
2.4.	Valoracions preliminars	15
3.	ESTUDI DE LA CAPA LLINDAR A L'ICTINEU^{AUV}	16
3.1.	Objectiu de l'estudi	16
3.2.	Definició de la capa llindar turbulent	16
3.3.	Caracterització dimensional de l'Íctineu	18
3.4.	Simulació numèrica	20
3.5.	Conclusió de la simulació numèrica	39
4.	ESTUDI DE LA TRANSMISSIÓ DE VIBRACIONS EN L'ACOBLAMENT	40
4.1.	Objectiu de l'estudi	40
4.2.	Sensors per a la mesura de la turbulència	40
4.3.	Assaig experimental	48
4.4.	Anàlisi dels resultats obtinguts	50
4.5.	Conclusions de l'assaig experimental	54
5.	CONCLUSIONS GENERALS	56
6.	RESUM ECONÒMIC	57
7.	GLOSSARI	58
8.	BIBLIOGRAFIA	60

ANNEX A. INTRODUCCIÓ AL FENOMEN DE LA TURBULÈNCIA	62
ANNEX B. CREACIÓ I SIMPLIFICACIÓ DE LA GEOMETRIA DE L'ICTINEU	74
ANNEX C. NAVEGACIÓ SUBMARINA: EVOLUCIÓ FINS ALS AUV'S	79
ANNEX D. PROGRAMARI ESPECIALITZAT UTILITZAT	93
ANNEX E. MÈTODE NUMÈRIC DELS VOLUMS FINITS	98
ANNEX F. ESTUDI DE COSTOS	101

AGRAÏMENTS

En primer lloc cal donar les gràcies als professors tutors Elena Roget i Toni Pujol, que a partir de la seva experiència i coneixements en els diferents àmbits del projecte han fet possible la progressiva realització d'aquest.

En el primer bloc del projecte, per la realització de la simulació numèrica, també han estat de gran ajuda els consells dels membres del grup GREFEMA Marc Pelegrí i Lino Montoro.

Per tal de realitzar els diferents assajos de transmissió de vibracions, agraeixo enormement l'atenció i dedicació dels membres del grup VICOROB que ens varen facilitar les instal·lacions i el vehicle, i part del seu temps per a poder-los dur a terme, especialment a Pere Ridao, Marc Carreras i David Ribas.

També cal fer menció als diferents membres del departament de física de l'EPS, la feina dels quals ha facilitat i agilitzat el procediment de l'anàlisi de vibracions, en aquest cas cal donar les gràcies a Francesc Gómez i a Jesús Planella.

1. INTRODUCCIÓ

1.1. Antecedents

L'estudi de la turbulència és un tema obert i al que les noves possibilitats de mesures i de modelització han donat un nou impuls. Dins les línies de recerca del Grup de Física Ambiental (GFA) hi ha la de fenòmens de transport i barreja en sistemes aquàtics, en què el grup té àmplia experiència tant en sistemes limnològics com oceanogràfics (Roget et al., 2006). Per aquests estudis s'utilitzen models hidrodinàmics que es contrasten amb dades reals mesurades in situ. Per fer mesures de turbulència el GFA disposa d'un perfilador de caiguda lliure amb el que s'enregistren dades de microestructura (MS) tèrmica i de cisallament que permeten obtenir, entre d'altres, la velocitat de dissipació in situ de l'energia cinètica turbulenta (ϵ), això és, els Watts per quilo d'aigua que es dissipen i que indiquen el nivell de turbulència.

Per altra banda, el grup VICOROB disposa d'un vehicle subaquàtic, l'anomenat Ictineu, el qual va esdevenir campió del SAUC-E (Student Autonomous Underwater Challenge – Europe) l'estiu del 2006 (E.Hernandez et al., 2006). Aquest vehicle, validats certs condicionants, pot esdevenir un medi perfectament adequat per a mostrejar horitzontalment i obliquament diferents medis aquàtics tot acoblant el perfilador a la seva estructura, per d'aquesta forma obtenir una nova perspectiva del sistema, complementaria a la que s'obté de la manera més estàndard de mostreig que és en caiguda lliure, deixant anar el perfilador des d'una embarcació. A la figura 1.1 es veu l'Ictineu amb el perfilador acoblat navegant a la piscina del grup VICOROB en un dels assajos que s'hi han dut a terme.



Fig. 1.1. Fotografia de l'Ictineu amb el perfilador de microestructura acoblat, a la piscina del grup VICOROB al Parc Tecnològic.

1.2. Objecte

L'objectiu del present projecte és estudiar la viabilitat de l'acoblament del perfilador de microestructura de què disposa el GFA amb el vehicle autònom submergible Ictineu desenvolupat per el grup VICOROB per obtenir mesures físiques que caracteritzin la turbulència i, entre altres, determinar ε .

Això implica treballar bàsicament dos aspectes. En primer lloc dur a terme un estudi de la capa llindar turbulenta generada per la pròpia navegació de l'Ictineu, per tal de comprovar que aquesta no contamina les mesures dutes a terme per el perfilador i en segon lloc realitzar un estudi de la transmissió de vibracions en l'acoblament del perfilador a l'Ictineu per tal de confirmar que aquestes no contaminin les dades enregistrades i poder determinar correctament el nivell de turbulència del medi.

1.3. Especificacions i abast

Per a l'estudi de la capa llindar turbulenta generada al voltant del vehicle, quan navega, s'han utilitzat eines de simulació numèrica. Es tracta de comprovar que la dimensió d'aquesta capa llindar no influeixi a la zona on hi haurà el sensor de microestructura del perfilador. S'ha utilitzat el programari Ansys Icem per a la discretització de la geometria i Star-CCM+ per realitzar les simulacions (veure Annex D).

Un cop validat aquest aspecte, es procedirà a realitzar un estudi experimental en el que s'enregistraran dades de les vibracions generades per la navegació de l'Ictineu i el funcionament dels components mòbils en un medi no turbulent: a la piscina del grup VICOROB al Parc Tecnològic.

Aquest estudi no té com a objectiu determinar les mancances hidrodinàmiques de l'Ictineu ni proposar oficialment millores en aquest aspecte si no són exclusivament necessàries per obtenir les mesures de turbulència amb l'acoblament amb el perfilador.

Tampoc n'és un objectiu el disseny de l'acoblament en sí, doncs l'estructura de suport ja estava fabricada per membres del GFA.

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 la utilització de diferents tipologies de plataformes per a realitzar mesures de turbulència, prestant especial atenció als AUV's (Autonomous Underwater Vehicles).

Com s'esmentava breument a l'objecte, l'estudi es divideix en dos grans blocs:

El primer bloc (capítol 3) s'ha dedicat per estudiar la capa llindar turbulent generada per la navegació de l'íctineu en un medi aquàtic. 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 capa llindar. Les característiques geomètriques bàsiques de l'íctineu seran definides a l'apartat 3.3 i a continuació (apartat 3.4) es detalla el procés de simulació numèrica, des del preprocés fins als resultats obtinguts, les conclusions dels quals seran exposades al darrer apartat (3.5) d'aquest capítol.

El capítol 4 fa referència al segon gran pilar del projecte, l'estudi de transmissió de vibracions al perfilador degut a l'acoblament d'aquest a l'íctineu. Al primer apartat (4.1) es defineix l'objectiu de l'assaig experimental. A l'apartat següent (4.2) es presenten els sensors i els procediments que s'utilitzen per a determinar el nivell de turbulència d'un medi. A continuació (apartat 4.3) s'exposen els detalls de l'assaig experimental, els resultats del qual són analitzats al següent apartat (4.4). Finalment, a l'apartat 4.5, s'exposen les conclusions que se n'ha extret.

El capítol 5 s'exposen les conclusions finals de l'estudi considerant tots els factors tinguts en compte.

Al capítol 6 es resumeix l'estudi de costos.

Al capítol 7, 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 8 s'hi detalla la bibliografia empleada en el desenvolupament de la memòria, la referent als diferents annexes està detallada al final de cadascun d'ells.

A continuació s'han inclòs els següents annexes:

A l'annex A, dedicat al fenomen de la turbulència, s'ha dut a terme un petit repàs històric del seu estudi, seguit d'una caracterització qualitativa i finalment s'hi ha inclòs el model matemàtic que s'ha escollit per a solucionar el problema numèric plantejat.

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

A l'annex C s'ha dut a terme una recerca de l'evolució històrica de la navegació submarina fins als AUV's, els quals són detalladament caracteritzats destacant les principals bases per al seu funcionament. Al final d'aquest annex es detallen les característiques principals de l'Ictineu^{AUV}.

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. MESURES DE TURBULÈNCIA: ESTAT DE L'ART

En aquest capítol es farà un breu repàs a les evolucions dels diferents mètodes i vehicles emprats en la mesura de turbulència en els sistemes aquàtics naturals, des dels seus inicis als anys cinquanta fins a l'actualitat.

En primer lloc es farà una petita introducció que resumeix a grans trets les tendències generals en aquest camp i a continuació es prestarà especial atenció a les diferents tipologies de plataformes utilitzades per a dur a terme les mesures de perfils horitzontals. Finalment es farà menció dels aparells utilitzats en la obtenció de perfils verticals que representa la segona gran opció per a l'estudi del fenomen.

2.1. Introducció

L'estudi de la turbulència en sistemes aquàtics naturals és una ciència relativament recent, doncs els seus estudis experimentals s'iniciaren cap a mitjans del segle XX per un petit grup de recerca anomenat Pacific Naval Laboratory (PNL) de Victoria (British Columbia, Canada) sota la direcció de H. Grant (Stewart i Grant, 1962), motivats per la necessitat de conèixer els fenòmens que influïen en la navegació dels submarins que adquiriren una importància crucial durant la Guerra Freda.

Aquestes primeres mesures foren realitzades amb un vehicle equipat amb diverses sondes, remolcat per un canal de marea on les corrents eren intenses, així com el nivell de turbulència. S'intentà reproduir les mesures a mar obert, però donat que les fluctuacions de velocitat en aquest medi eren notablement menors, fracassaren per manca de precisió en els elements d'adquisició disponibles.

Aquesta tècnica d'adquisició (amb vehicles remolcats i sensors basats en variacions de temperatura) presentava certs problemes (bàsicament tres): les mesures obtingudes estaven contaminades per les vibracions del vehicle remolcat, les variacions de profunditat i velocitat d'aquests vehicles eren molt grans i les fluctuacions de temperatura contaminaven les dades degut a la imprecisió dels sensors utilitzats (basats en temperatures).

Degut a això, i fent ús de noves tecnologies (termistors, cables elàstics i sensors de cisallament), a partir dels anys seixanta es començà a treballar amb perfiladors de caiguda lliure que presentaven l'avantatge de no haver d'estar acoblats a un vaixell remolcador i així s'eliminaven els dos primers problemes descrits anteriorment (el tercer fou eliminat gràcies al desenvolupament dels sensors de cisallament).

Donat que els perfils horitzontals proporcionen un punt de vista diferent del que s'obtenia amb els perfiladors de caiguda lliure (vertical), a partir dels anys vuitanta es tornà a insistir en l'obtenció de perfils horitzontals. Els nous avenços tècnics minimitzaren els problemes que presentaven inicialment.

Recentment s'han desenvolupat noves tecnologies tant en un camp com en l'altre, així podent adquirir plataformes comercials per adaptar-hi els sensors requerits, o perfiladors de caiguda lliure de diferents procedències com Europa, EEUU, Canada o Japó.

2.2. Mesures de perfils horitzontals

2.2.1. Vehicls arrossegats

Tal com s'apuntava a la introducció, el PNL realitzà les primeres mesures utilitzant un vehicle remolcat, el qual s'havia utilitzat per inutilitzar mines, que fou adaptat per incorporar els sensors necessaris per a la mesura de turbulència. A la Fig. 2.1 es veu una foto d'aquest primer vehicle utilitzat per a fins oceanogràfics a Canadà al voltant dels anys cinquanta.

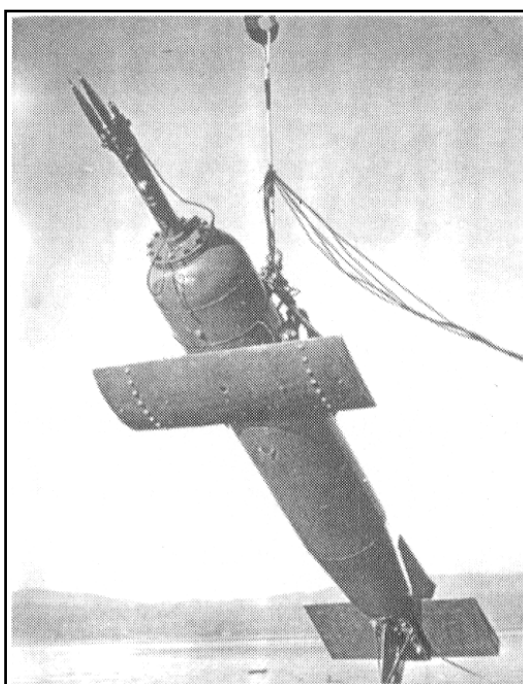


Fig. 2.1. Primer vehicle d'arrossegament utilitzat per a mesures de la turbulència als anys cinquanta per el PNL.

A partir de la dècada dels seixanta, el programa de recerca del PNL va finalitzar i tota la informació i equipament es transferí a l'Institute of Ocean Sciences (també a Victoria) i P. Nasmyth i A. Gargett van prendre la direcció de les investigacions amb el mateix vehicle i d'altres de menor embergadura més endavant.

Cap a la dècada dels vuitanta, els problemes que presentava aquesta tècnica d'adquisició de dades foren solucionats per nous sistemes d'arrossegament que minimitzaven les vibracions induïdes pel vehicle remolcador i la pròpia navegació del vehicle remolcat i els recentment desenvolupats sensors de cisallament que no eren tant sensibles a les variacions de temperatura. D'aquesta època cal destacar la tècnica d'arrossegament de línia llarga que s'aplicà al vehicle HOTDAD (Horizontal Ocean Turbulence Data Acquisition Device) desenvolupat per R. Lueck i T. Osborn a la School of Earth and Ocean Sciences, University of Victoria (Lueck, 1987). Aquest vehicle feia gairebé 4 metres de longitud i un diàmetre màxim de 0.6 metres; pesava 1 Tm a l'aire per reduir les fresses induïdes i només 150N a dins l'aigua. La novadora tècnica d'arrossegament consistia en dos trams de cable, el primer i més proper al vehicle remolcador, d'acer, es mantenia inclinat 45° gràcies a un pes al final d'aquest, on començava un segon tram de 200 metres de Kevlar per reduir la fricció que es mantenia gairebé horitzontal per tal de minimitzar les pertorbacions produïdes pel seu avanç. Es pot observar un esquema d'aquesta metodologia aplicada al vehicle HOTDAD a la Fig. 2.2.

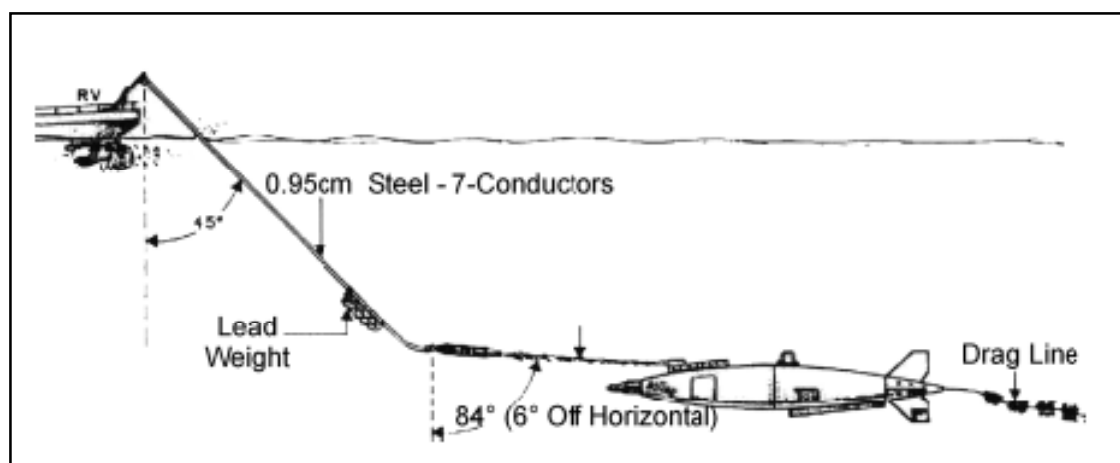


Fig. 2.2. Esquema de la tècnica d'arrossegament de línia llarga amb el vehicle HOTDAD (la longitud dels cables no està a escala)

Els paràmetres de navegació essencials tenien molt poca variabilitat: la inclinació vertical era menor de 2° i la desviació horitzontal menor de 1° , mentre que les oscil·lacions de profunditat eren menors de 7 cm en un mar amb onades efectives de 2 metres d'altura, convertint-lo així en un vehicle molt estable i per tant molt adequat per a les tasques de mesura encomanades. Fou utilitzat fins a 1994 en un gran nombre de campanyes.

R. Lueck desenvolupà un segon vehicle anomenat TOMI (Towed Ocean Microstructure Instrument) als voltants de l'any 1995 (el qual era de major embergadura (5.7 metres de llarg i 0.6 de diàmetre) i tenia dos ales (per sobre i per sota del cos): a la superior hi havia diversos sensors i a la inferior, a més dels sensors, hi havia un pes mort per assegurar l'estabilitat en condicions molt turbulents. Els sensors ubicats als extrems de les ales per sobre i sota del vehicle permetien determinar els gradients de temperatura i salinitat verticals. L'estabilitat d'aquest vehicle reduïa les

variacions verticals i d'orientació a dècimes de grau. A la Fig. 2.3 es veuen dos fotografies de la seqüència de llançament del vehicle TOMI a l'aigua. Amb un cable de 1000 metres de longitud es podien aconseguir profunditats de fins a 600 metres.

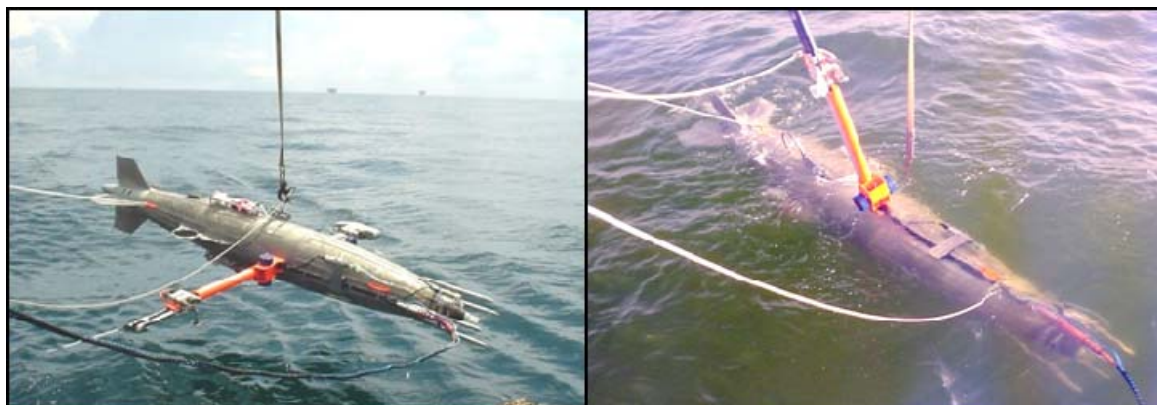


Fig. 2.3. Vehicle TOMI en la seqüència de llançament. A la dreta ja ha assolit la seva posició natural (braç vertical).

L'últim vehicle que es construí d'aquest tipus és l'anomenat MARLIN (1999), sota la direcció de J. Moum (Moum et al. 2001). Aquest és el vehicle més pesat construït (5 metres de longitud i 0.8 de diàmetre) i permet assolir profunditats molt majors ja que el cable de connexió mesura 9 km.

2.2.2. Submarins i submergibles tripulats

L'ús d'aquest tipus de plataformes no progressà massa, doncs suposava un cost econòmic molt gran, fora de l'abast de la majoria. Destaquen les mesures realitzades per Osborn (Osborn and Lueck, 1985) a la dècada dels vuitanta amb el submarí de recerca USS Dolphin del qual es pot veure una fotografia a l'esquerra de la Fig. 2.4.

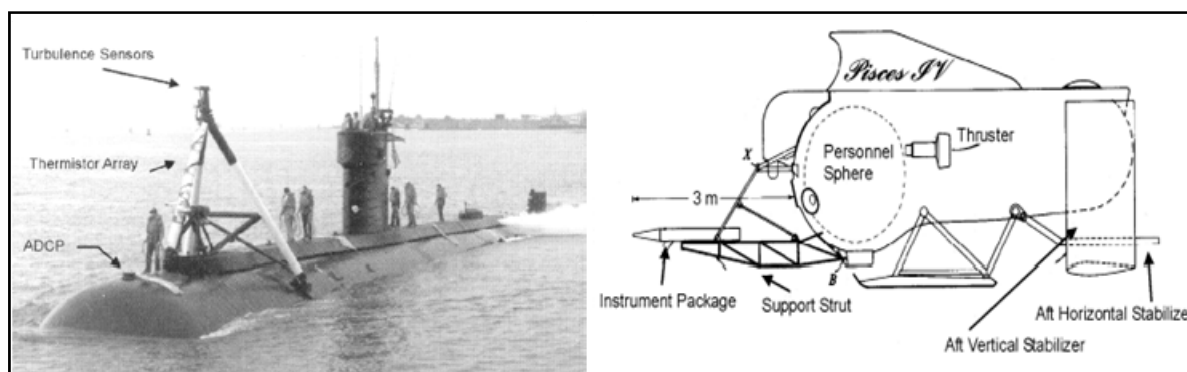


Fig. 2.4. Esquerra: Submarí USS Dolphin en una campanya dirigida per T. Osborn a la dècada dels 80. Dreta: Esquema del submergible Pisces IV amb l'estructura per a l'acoblament del sistema de sensors de turbulència a la part frontal.

Per altra banda, Gargett et. Al. (1984) realitzà unes mesures de turbulència amb un vehicle de dimensions més reduïdes i formes menys aerodinàmiques que s'anomenava PISCES IV al qual se li acoblà un perfilador a una estructura a la part frontal (esquema de la dreta de la Fig. 2.4). Degut a la seva dimensió menor i a la forma, en aigües molt turbulents, es produïen grans desviacions en

orientació vertical i horitzontal fins que no se li acoblaren ales (verticals i horitzontals) a la part posterior.

2.2.3. AUV's

Els AUV's (Autonomous Underwater Vehicles) es començaren a desenvolupar a la dècada dels noranta gràcies a l'avanç de noves tecnologies, els quals requereixen de controladors electrònics, mètodes d'enregistrament digitals i ordinadors d'abord per a controlar els diferents paràmetres de navegació i els diferents actuadors i sensors de què disposen (veure Annex C per a una descripció detallada dels aspectes característics més importants dels AUV's).

El principal problema que presentaven eren les vibracions induïdes pels actuadors i motors del vehicle, els quals solen estar units al cos per mitjà de juntes elàstiques i les vibracions encara present són filtrades per sensors de vibració interns. Les primeres mesures amb aquests plataformes es realitzaren l'any 1996 per Levine i Lueck (1999) amb un vehicle de 7.9 metres de longitud.

Posteriorment, diversos grups de recerca desenvoluparen diversos AUV's de dimensions més reduïdes amb les quals quedà palesa la possibilitat d'efectuar les mateixes mesures amb plataformes de dimensió molt menor. Cal destacar el vehicle Ocean explorer, desenvolupat per M. Dhanak i K.Holappa (1999), de només 2.4 metres de longitud i 0.5 de diàmetre i més recentment un nou vehicle desenvolupat per la Naval Undersea Warfare Center per E. Levine, anomenat REMUS (Remotely Environmental Measuring Units) i de només 0.18 metres de diàmetre. A la Fig. 2.5 s'observen imatges dels dos vehicles mencionats.

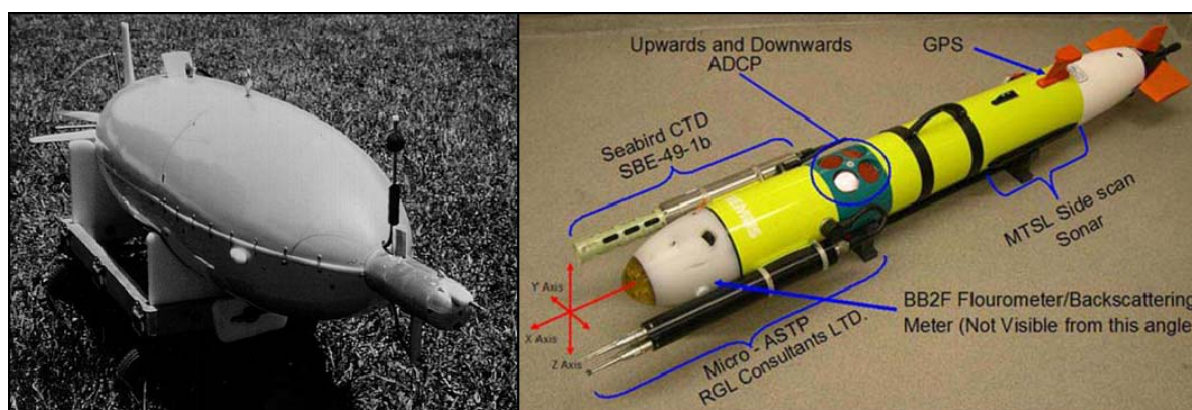


Fig. 2.5. Esquerra: Fotografia de l'AUV Ocean Explorer, desenvolupat a Florida Atlantic University. Dreta: Fotografia de l'AUV REMUS desenvolupat a la Naval Undersea Warfare Center.

Apart dels dissenys presentats fins aquí, cal també destacar la possibilitat d'equipar AUV's comercials genèrics amb els sensors necessaris per així obtenir una plataforma adequada per a realitzar mesures de turbulència. Cal mencionar la companyia Canadencia ISE (International Submarine Engineering) de Vancouver, Bluefin Robotics, de Cambridge (Regne Unit) i Gavia, de

Reykjavic (Islandia), els quals ofereixen un vehicle modular molt adaptable a les necessitats de cada missió (veure Fig. 2.6).

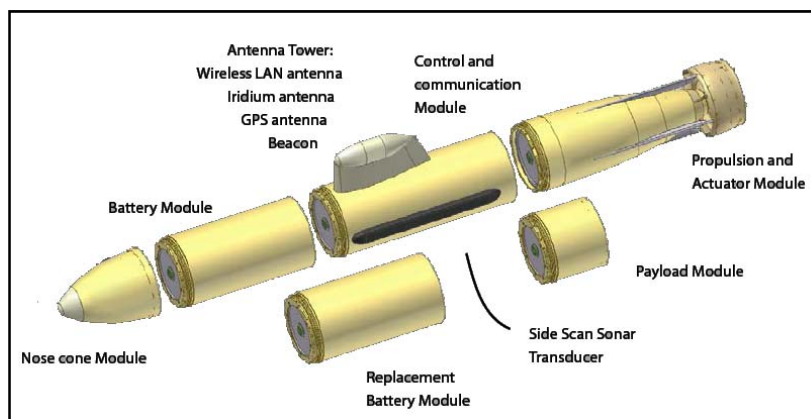


Fig. 2.6. Esquema de l'AUV Gavia que presenta un disseny modular, adequat per dur a terme mesures de turbulència.

Cal fer menció de la importància dels sistemes de navegació i posicionament, la importància de la duració de l'alimentació (bateries) i el paper clau que juguen els sistemes d'emmagatzematge d'informació (Annex C).

Cal també mencionar alternatives menys utilitzades per a l'adquisició de perfils horitzontals com són els planejadors remolcats (normalment perfiladors verticals a qui se'ls ha acoblat ales i cua per estabilitzar la seva navegació) i un altre subgrup de construcció semblant, però que difereixen en el mètode d'operació, doncs estan amarrats a un punt fix del fons marí i prenen mesures de les corrents que passen a través dels seus sensors.

2.3. Mesures de perfils verticals

Els perfiladors verticals, de menor dimensió i forma gairebé sempre cilíndrica, presenten l'avantatge de moure's de forma desacobrada al vaixell des d'on són llançats, doncs la seva velocitat de caiguda depèn només de la gravetat. De fet, hi ha dos tipologies bàsiques, els de caiguda totalment lliure (que quan arriben a una determinada profunditat alliberen pes i emergeixen donat que la seva densitat és menor que la del medi) i els semi-lliures (els quals estan units per mitjà d'un cable que serveix per transmetre dades i alimentació del vaixell al perfilador i viceversa i recollir-lo quan es desitgi).

El primer disseny s'emplaça a la dècada dels setanta a la University of British Columbia (Canadà) per T. Osborn (1974). L'enregistrament de les dades era un tema clau, doncs es multiplexaven les senyals mesurades utilitzant freqüència modulada (FM) i aquestes eren transmeses

al vaixell on eren enregistrades en cintes de casset que requerien una posterior demultiplexació per a ser tractades i estudiades.

Fou a l'any 1985 quan Oakey (Oakey, 1988) presentà un nou perfilador (EPSONDE) que incorporava una novadora tècnica d'enregistrament, on les senyals analògiques eren digitalitzades internament així facilitant l'enregistrament (encara al vaixell).

Cal destacar també l'aportació de l'americà M. Gregg en el disseny de perfiladors, doncs fou ell qui primer presentà un perfilador connectat per mitjà de cable de fibra òptica (Gregg et al. 1982) i una nova tècnica d'enregistrament de dades de microestructura per mitjà de corrents electromagnètiques aplicat a un perfilador anomenat MSP (Winkel et al. 1996).

A partir d'aquest punt, tant a Amèrica, Europa, Australia, Japó i Rússia, d'on cal destacar el BAKLAN (Paka et al., 1999), s'han desenvolupat nous dissenys de perfiladors, en un procés d'optimització contínua, tant en aspectes d'adquisició de dades (senyors i amplificadors) com transmissió i enregistrament d'aquesta informació. Paral·lelament a nous perfiladors desenvolupats en grups de recerca a diferents universitats, se'n poden trobar també de comercials com l'MSS (Prandke and Stips, 1996), el TurboMap (Wolk et al., 2002) i el PME (Stevens et al., 1999).

A la figura següent (Fig. 2.7) es mostren les imatges dels diversos perfiladors aquí comentats i de l'utilitzat per aquest estudi.

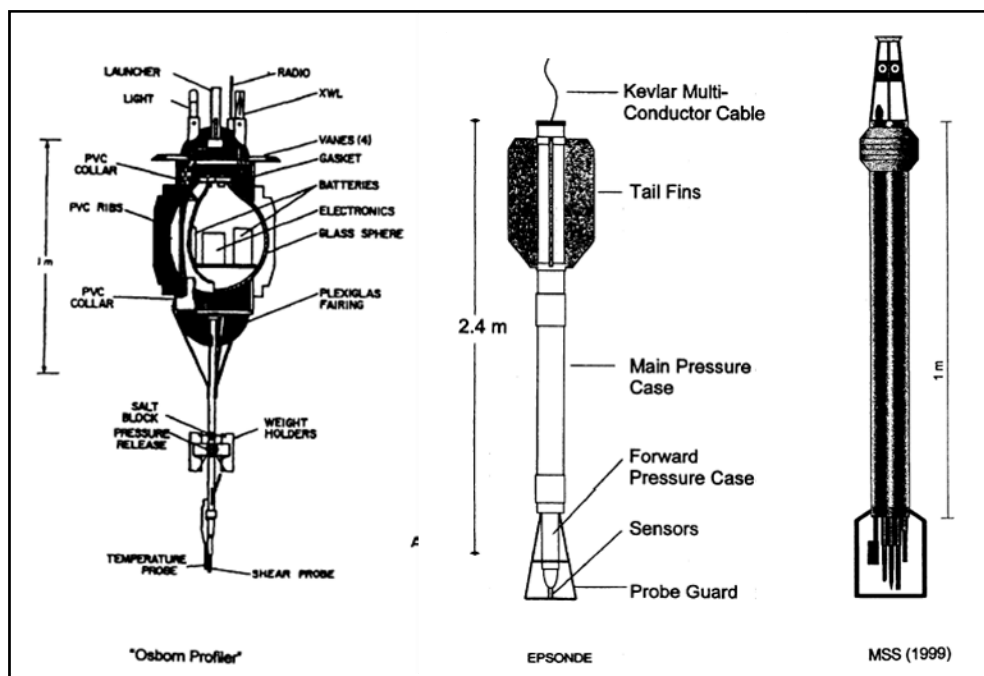


Fig. 2.7. Perfiladors de caiguda lliure. D'esquerra a dreta: Osborn Profiler (1972), EPSONDE (1988) i MSS90 de Sea&Sun Technology (1999).

2.4. Valoracions preliminars

Tot i que la majoria de plataformes per a les mesures de turbulència presenten formes molt hidrodinàmiques ja que han estat dissenyades exclusivament per aquest fi, també hi ha alguna referència (Gargett et al. 1984) que demostra la factibilitat de realitzar l'acoblament d'un perfilador de caiguda lliure a una plataforma no pensada per a tal fi.

A més, considerant que l'objectiu principal de les mesures és l'estudi de la turbulència en aigües continentals on la intensitat de turbulència i les dimensions dels remolins generats són menors que a mar obert (on es realitzen la majoria de mesures turbulents) i les condicions de navegació del vehicle seran més idònies, es preveu un resultat satisfactori per a dur a terme l'acoblament del perfilador de microestructura del GFA amb l'ICTINEU^{AUV} del grup VICOROB.

3. ESTUDI DE LA CAPA LLINDAR A L'ICTINEU^{AUV}

La capa límit es coneix com la zona de fluid al voltant d'un cos en la qual la velocitat relativa al cos varia de zero a la superfície al 99% del valor de la velocitat de la corrent exterior (L. Virto, 1996). En general, aquesta capa pot ser laminar o turbulenta. En el cas d'un règim turbulent l'amplitud de la capa esdevé de gran importància per a l'objectiu de l'estudi, doncs si al voltant del Ictineu s'hi desenvolupa una capa llindar turbulenta de grans dimensions (que assolís el punt on han de situar-se els sensors del perfilador) contaminaria les mesures i impossibilitaria obtenir els nivells reals de turbulència del medi, que és el que es pretén validar amb aquest estudi.

A continuació, i després de definir l'objectiu d'aquest apartat concret, es presenten alguns aspectes introductoris al tema. Seguidament es detalla el procediment seguit per a la simulació mitjançant CFD (Computational Fluid Dynamics).

3.1. Objectiu de l'estudi

Analitzar la dimensió de la capa llindar turbulenta generada per l'avanç del robot Ictineu en un medi aquàtic i determinar si el seu propi desplaçament pertorba o no, les mesures que es pugin dur a terme amb el perfilador acoblat.

3.2. Definició de la capa llindar turbulent

La capa llindar es desenvolupa a causa de la viscositat que presenten els fluids reals. Quan un cos sòlid en repòs es troba envoltat per un fluid en moviment, la continuïtat en el camp de velocitats implica que la velocitat relativa del fluid que està en contacte amb la superfície del cos ha de ser nul·la. Així doncs, es produeix un gradient de velocitats (per la transmissió d'esforç tallant degut a la viscositat entre làmines de fluid) amb un valor nul de la velocitat a la superfície fins a un valor igual al del flux mig quan parlem de zones prou allunyades del cos.

Aquesta capa pot ser laminar o bé esdevenir turbulenta si el nombre de Reynolds o el gruix d'aquesta làmina creixen prou. Si es dona alguna d'aquestes condicions, la capa llindar s'ha d'estudiar com a flux turbulent.

Les dimensions (δ) de la capa límit es poden estimar a partir de les següents expressions (L. Virto, 1996), segons el flux sigui laminar o turbulent.

$$\text{Flux laminar} \quad \delta_l \approx \frac{L}{Re^{1/2}} \quad (\text{eq. 1})$$

$$\text{Flux turbulent} \quad \delta_t \approx \frac{L}{Re^{1/5}} \quad (\text{eq. 2})$$

On Re és el número de Reynolds i es calcula com $Re \approx \frac{v \cdot L \cdot \rho}{\mu}$, d'on v [m/s] és la velocitat del fluid respecte el robot, L [m] és la longitud característica, ρ [Kg/m³] és la densitat de l'aigua i μ [Pa·s] representa la viscositat dinàmica.

Tant la dimensió com la forma del perfil de velocitats varia en funció del règim. Així doncs, observem a la Fig. 3.1 les diferències entre el perfil d'una capa laminar (parabòlic) i una turbulenta (logarítmic) el qual presenta un gradient molt més notable prop de la superfície del cos ($y=0$).

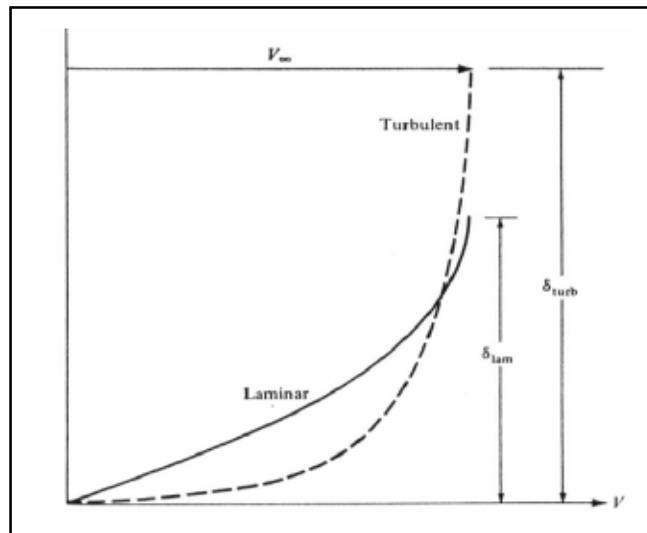


Fig. 3.1. Perfils de la capa límit per règim laminar i turbulent. L'eix y representa la distància a la superfície del cos.

Cal fer menció de que la capa llindar, quan esdevé turbulenta, es pot descomposar en 3 subcapes, definides a continuació:

La subcapa més propera s'anomena regió interna, i en aquesta dominen els efectes de la viscositat mol·lecular (és una subcapa laminar) i el gradient de velocitat és constant (i.e. la velocitat incrementa proporcionalment a la distància de la paret). Té un gruix relativament petit comparat amb el gruix total de la capa llindar turbulenta.

La segona subcapa s'anomena regió intermèdia i els efectes viscosos i turbulents són comparables, tot propiciant un increment de la velocitat de tipus logarítmic (veieu, per exemple *L. Virto, 1996*).

Finalment, la tercera subcapa és la més allunyada de la superfície del cos i en ella hi dominen els efectes turbulents.

Tal i com es comenta en l'Annex A, per la simulació numèrica realitzada, s'ha utilitzat una aproximació de doble capa per estendre el model k-epsilon en tot el domini. Així, en les cel·les adjacents a la superfície, la taxa de dissipació (ϵ) i la viscositat turbulenta s'especifiquen en funció de

la distància a la paret. En aquestes cel·les només es resol l'equació per a l'energia cinètica turbulenta (k). El model de turbulència esdevé, en aquesta regió, d'una sola equació.

D'altra banda, el model de turbulència és el tradicional k-epsilon (dues equacions d'evolució) per a les cel·les que es trobin allunyades de la superfície per sobre d'un cert valor. En les cel·les entremig de les adjacents a la superfície i les que es troben separades una distància mínima llindar, la taxa de dissipació turbulenta s'avalua per tal d'obtenir una variació gradual entre el valor obtingut amb el model d'una sola equació al de l'obtingut amb dues equacions (veieu l'Annex A).

Si avaluem la dimensió de la capa llindar turbulenta (considerant totes les subcapes) per el cas que ens ocupa tenim que el nombre de Reynolds val:

$$Re \approx \frac{v \cdot L \cdot \rho}{\mu} = \frac{0,4 \cdot 0,046 \cdot 1000}{0,001} = 184000 \quad (\text{eq. 3})$$

On: v [m/s] és la velocitat del fluid respecte el robot, L [m] és la longitud característica (altura del robot), ρ [Kg/m³] és la densitat de l'aigua i μ [Pa·s] representa la viscositat dinàmica.

Donat que per aquest valor, el flux es comporta com a turbulent, el gruix de la capa llindar s'estima en (*L. Virto, 1996*):

$$\delta_t \approx \frac{L}{Re^{1/5}} = \frac{0,46}{184000^{1/5}} = 0,041 \text{ m} \quad (\text{eq. 4})$$

Obtenim un valor de referència (uns 4 cm), amb el qual l'acoblament amb el perfilador seria factible ja que no alteraria les mesures de la turbulència del medi. Cal recordar que aquest valor només és una referència, doncs s'haurà de contrastar la dimensió efectiva, que depèn enormement de la forma del cos en qüestió, per mitjà de l'anàlisi per CFD.

3.3. Caracterització dimensional de l'Ictineu

En aquest apartat s'especifiquen les dimensions característiques de l'Ictineu amb i sense perfilador per tal que el lector es situï en el rang dimensional en què es desenvolupa l'estudi hidrodinàmic.

Donat que la maniobrabilitat era l'aspecte més important en el moment de la concepció de l'Ictineu, aquest no presenta una forma gaire hidrodinàmica (que ofereix baixa resistència a l'avanç en el sí d'un fluid) com ho són els torpedes, submarins convencionals o altres AUV's on l'autonomia és el factor decisiu de disseny i es treballa la optimització de la geometria per aconseguir un baix coeficient d'arrossegament. Malgrat la geometria externa global no és molt hidrodinàmica, el fet de no presentar massa superfície plana perpendicular a la direcció d'avanç (punt d'atac de la carcassa

superior arrodonida i dipòsits centrals cilíndrics) implica que ofereix menys resistència que un cos prismàtic completament tancat.

D'altra banda, al no ser un cos continu tancat, es donen molts fenòmens de recirculació i petites turbulències entre les diferents parts que no són favorables en l'aspecte hidrodinàmic, però que no són massa rellevants pel projecte.

A la figura 3.2 es pot veure un esquema del robot i les dimensions característiques d'aquest.

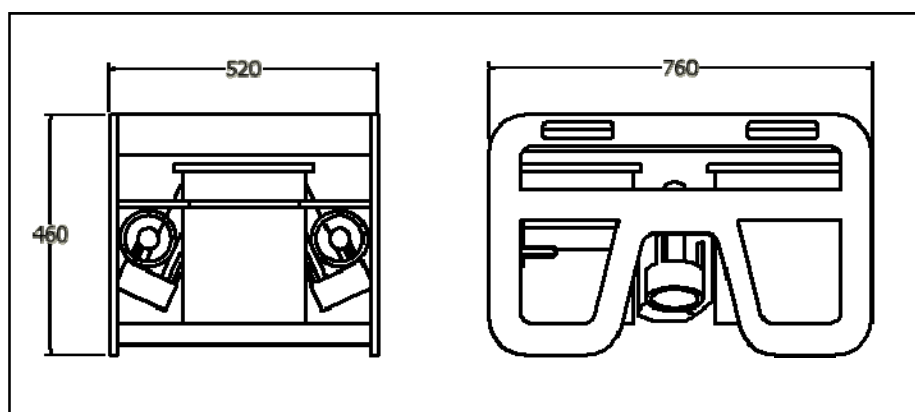


Fig. 3.2. Esquema de l'Ictineu amb les cotes principals.

A continuació, a la Fig. 3.3 es mostra un esquema de l'Ictineu amb el perfilador acoblat de forma que quedin definides les dimensions i la posició relativa d'aquest respecte el robot en la simulació numèrica. Tal com es pot veure, els sensors del perfilador es troben a la part frontal superior del robot i per tant, aquesta és la zona d'interès per aquest estudi.

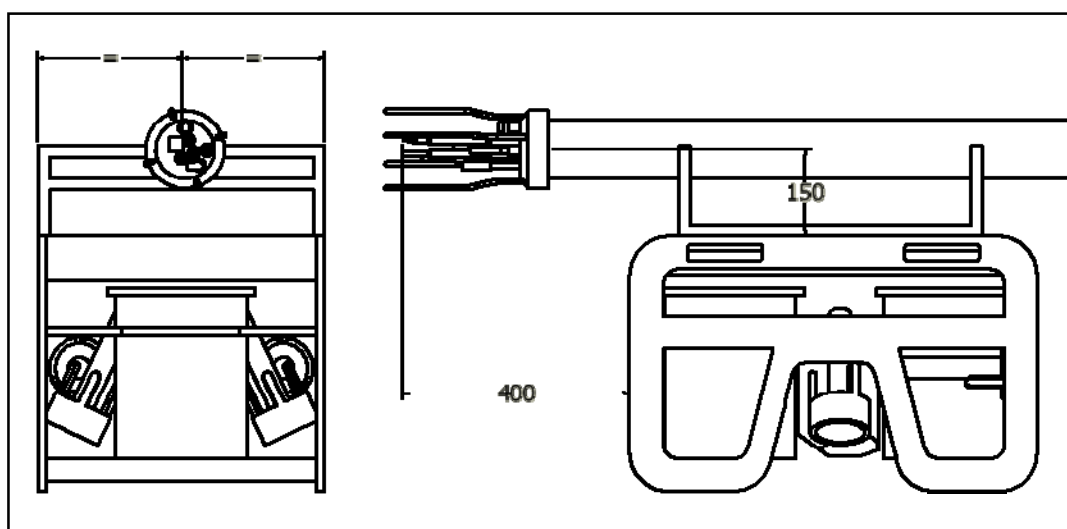


Fig. 3.3. Esquema del posicionament del perfilador en l'acoblament.

3.4. Simulació numèrica

En les següents pàgines, es defineix el procediment seguit per a realitzar la simulació del model Ictineu i perfilador navegant en un medi líquid (aigua) en 3 dimensions. Tal com ja s'ha comentat el programari usat ha sigut l'ANSYS Icem versió 10.0 per al preprocés -la discretització de la geometria- i l'Star-CCM+ com a solucionador i post-processor (annex D).

S'ha dut a terme el càlcul de dos casos diferents: el robot Ictineu tot sol i el robot amb el perfilador acoblat. També s'han considerat diferents mallats amb el primer cas per tal de comprovar la independència d'aquest amb el resultat final. El segon cas té l'objectiu de veure si es dona algun fenomen imprevist que distorsioni molt la capa llindar degut a la presència del perfilador, tot i que per la pròpia concepció del perfilador, per ell sol, no hauria de generar cap distorsió perjudicial per a l'enregistrament de dades de turbulència.

La característica principal que es pretén estudiar amb aquesta simulació numèrica de la navegació de l'Ictineu és precisament la dimensió de la capa llindar turbulent que es genera al seu voltant, especialment a la part frontal superior. Per identificar-la utilitzarem la variable ϵ , la qual quantifica el nivell de turbulència i més concretament representa la velocitat de dissipació de l'energia cinètica turbulenta (en W/Kg).

3.4.1. Preprocés

El preprocés es pot subdividir en 3 passos forçosament consecutius. En primer lloc, i tal com es comenta amb més detall en el subapartat 3.4.1.1, es defineix la geometria del volum de fluid que es vol estudiar. Per això cal considerar la geometria del robot ja que serà un contorn més del volum de fluid que volem estudiar, el qual suposarem dins d'una espècie de piscina -l'anomenat canal hidrodinàmic- que es defineix amb unes condicions de contorn adequades per ajustar-se al cas real en què el robot navega en un medi obert.

El següent pas consisteix en discretitzar el volum anterior (canal hidrodinàmic amb el robot a dins) en centenars de milers de petits elements on les propietats físiques es consideraran constants per el càlcul (veure annex E) tot controlant les dimensions i distribució dels elements així com altres detalls del mallat (subapartat 3.4.1.2).

Finalment, en el subapartat 3.4.1.3 es defineixen les condicions de contorn del model per tal d'assimilar-ho al cas real i els valors per inicialitzar els càlculs dels models numèrics emprats. Les variables per les quals s'hauran de definir condicions de contorn i condicions inicials, dependrà del model numèric de turbulència que utilitzem d'entre les diferents possibilitats que ofereix el programari per tant, des d'una altra perspectiva es torna a fer referència a aquest tema en

subapartat 3.4.2 sobre el càlcul i es comenta en més detall el model de turbulència utilitzat en l'apèndix A. Finalment, un cop definides les condicions de contorn i inicials, s'exporta el fitxer que les conté en un format estàndard (*.msh) per tal de què ho pugui interpretar el programa solucionador.

A continuació es detalla el procediment empleat.

3.4.1.1. Definició geomètrica del model

Per a simular el comportament del robot en un fluid es necessita un model d'aquest en 3D, que en aquest cas ha estat generat amb Inventor (veure Annex B per a més detalls del procés de creació de la geometria base per a la simulació).

Tal com s'ha apuntat anteriorment, definir la geometria del model consisteix en la situació del robot en l'interior d'un volum contenidor que representa el fluid del medi per on s'està desplaçant. Fet això, tenim un volum que haurem de discretitzar de manera que per cada element de volum es pugui solucionar l'equació de balanç de la quantitat de moviment (i, si és el cas, de l'energia) considerant que existeix un flux amb una velocitat igual a la de navegació del robot que, en la simulació, considerem que no es mou. A la Fig. 3.4 es pot observar una representació isomètrica del conjunt.

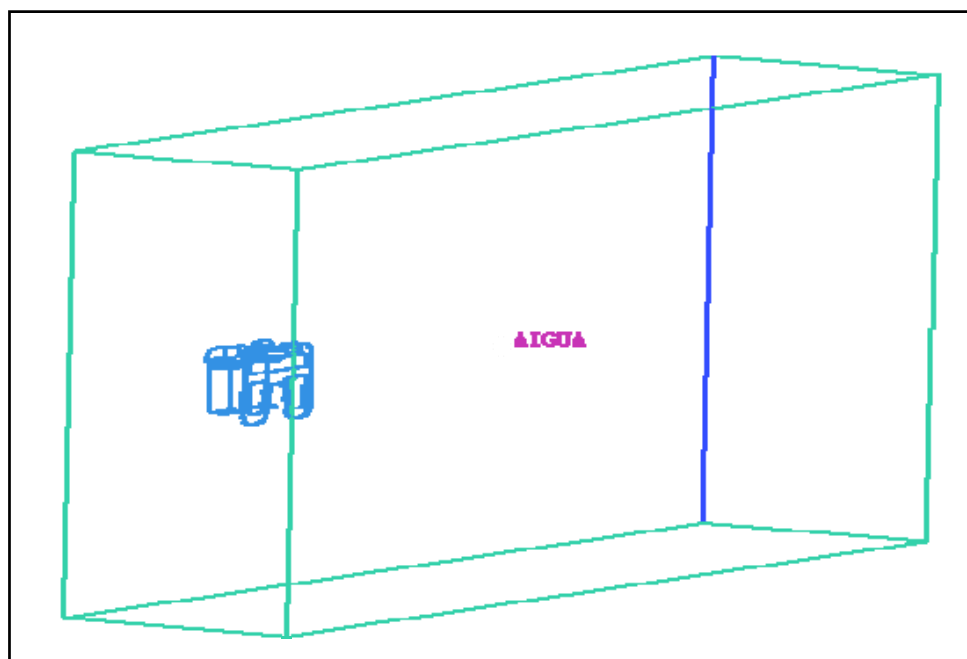


Fig. 3.4. Vista isomètrica del canal hidrodinàmic modelitzat.

Cal notar que es modelitza únicament la meitat del robot i per tant del canal hidrodinàmic, dividit per un pla vertical en la direcció de l'avanç, tot aprofitant la condició de simetria que presenta el cas real. D'aquesta manera s'aprofiten les eines matemàtiques del programari de càlcul per

obtenir la solució del sistema complert, i així optimitzar els recursos informàtics per treure la màxima precisió en els resultats.

Més concretament, per a la creació d'aquesta geometria, en primer lloc s'importa la geometria del robot o del conjunt robot-perfilador, en un format neutral de transferència de informació gràfica (en aquest cas s'ha utilitzat el format IGES). A continuació es determina la posició dels extrems del canal hidrodinàmic i es defineix el volum que es considerarà com a fluid. A la Fig. 3.5 es veuen les dimensions del canal així com la situació del robot en el seu interior.

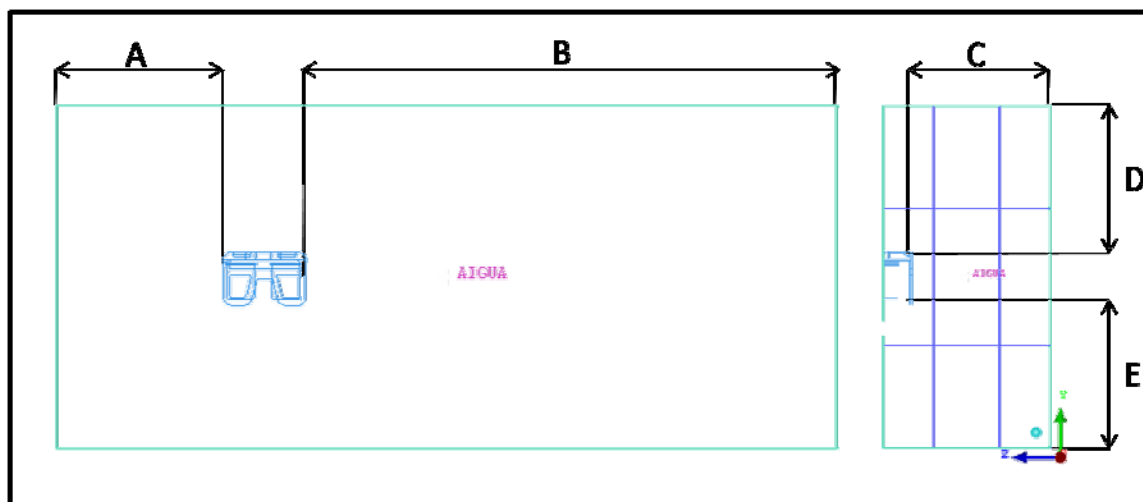


Fig. 3.5. Esquema dimensional del canal hidrodinàmic

Les dimensions del canal hidrodinàmic, s'han definit a partir de valors de referència obtinguts a partir de l'experiència en simulacions comparables que s'han fet al grup Grup de Recerca en Enginyeria de Fluids, Energia i Medi ambient (GREFEMA). En aquest cas s'han pres com a referència les relacions resumides a la Taula 3.1 i les conseqüents dimensions, que s'han considerat a l'hora de definir el canal hidrodinàmic.

Taula 3.1. Relacions i dimensions aplicades per a la definició del canal hidrodinàmic.

Dimensió	Relació aplicada (aprox.)	Valor [mm]	Ref.
Distància cos-entrada	2 vegades longitud cos	1520	A
Distància cos-superior	2,5 vegades altura cos	1160	B
Distància cos-inferior	2,5 vegades altura cos	1160	C
Distància cos-sortida	7 vegades dimensió cos	5320	D
Distància lateral	2 vegades amplada cos	1240	E

3.4.1.2. Discretització de la geometria

Un cop les superfícies s'han definit geomètricament, s'hauran de definir el tipus, les dimensions i distribució dels elements en el qual es subdividirà el model. Els elements utilitzats s'han determinat en base a les següents consideracions generals (més endavant es defineixen les característiques concrets dels diferents mallats realitzats).

- a) **NOMBRE/MIDA DELS ELEMENTS:** Als punts on hi ha més discontinuïtats geomètriques i detalls de dimensions més petites és on la densitat d'elements haurà de ser major i la seva mida menor. En base a aquesta premissa es defineix una dimensió màxima dels elements més externs del canal (a prop de les parets d'aquest) i una mida molt més petita pels elements en contacte amb les superfícies que conformen el robot per tal de que quedi plasmada la geometria dels diferents punts del robot en el model discretitzat. A la Fig. 3.6 s'observa que el nombre (i/o mida) d'elements és clau per a modelar una geometria i conservar la seva forma real(dreta) o perdre-la en gran mesura (esquerra).

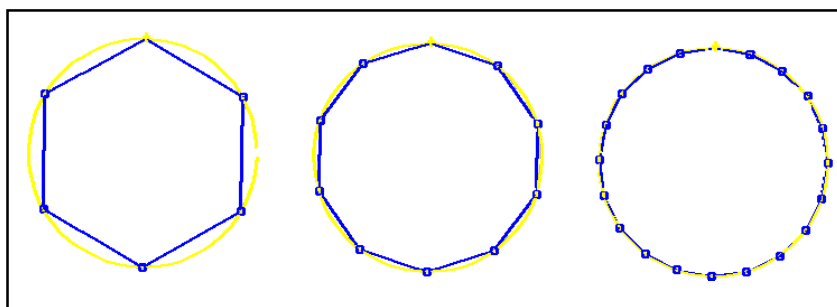


Fig. 3.6: Discretització d'un cercle amb diferent nombre d'elements.

Per a la definició de les dimensions permeses pels elements en contacte amb les superfícies, en alguns casos, s'han distingit entre superfíciesG (on el rati amplada/llargada és proper a la unitat) i superfíciesP (on hi ha molta diferència entre les dimensions en una direcció i la perpendicular). Així, depenent de les formes locals de les superfícies s'han utilitzat elements diferents a fi de poder reproduir (capturar) correctament les zones on la geometria és més complexa. A la Fig. 3.7 es mostra'n uns exemples de cada tipus de superfície definida per clarificar la idea.

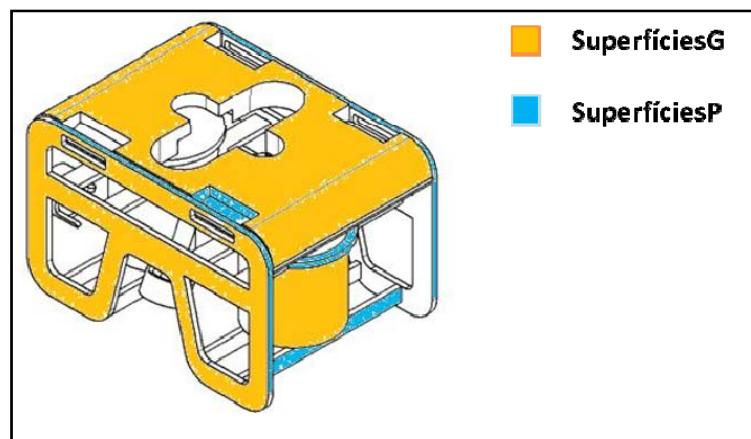


Fig. 3.7. Esquema de l'Ictineu amb exemples de superfíciesG i superfíciesP assenyalades.

- b) **DENSITATS:** En les zones del canal hidrodinàmic on les variacions de les magnituds simulades pel model són més acusades (zones més pròximes al cos en moviment), es defineixen uns altres volums, anomenats densitats (segons Ansys Icem). En la regió definida per aquests “subvolums” els elements tindran una dimensió menor (i.e. hi haurà més elements per unitat de volum). També es defineix un rati de transició. Aquí definim les densitats com volums de forma prismàtica ja que s’ajusten millor a la geometria del problema. A la Fig. 3.8 s’observa l’efecte que té l’aplicació de densitats al volum a estudiar.

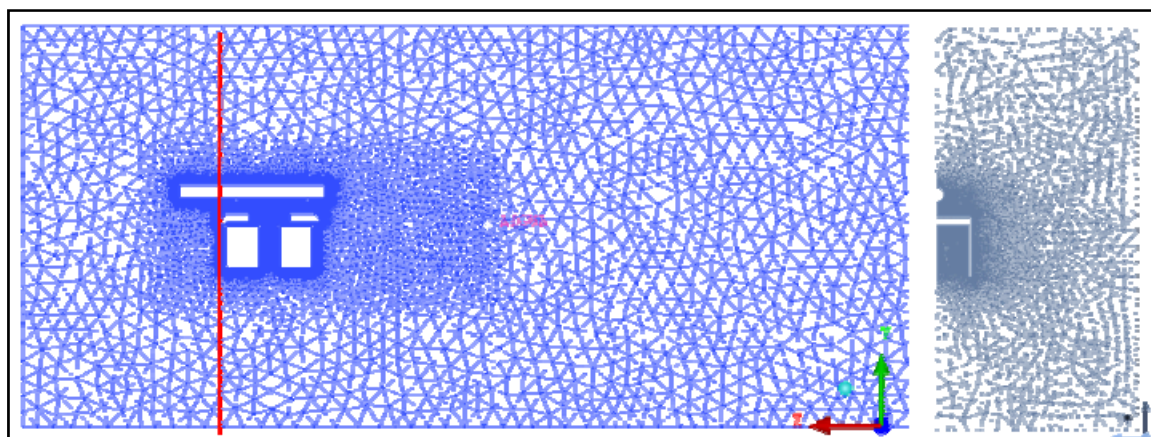


Fig. 3.8. Pla de simetria del volum estudiat mallat. S'observa l'efecte de la densitat definida a la superfície del pla de simetria en la direcció del flux (esquerra) i a un pla perpendicular a ell a la posició on hi ha la línia vermella (dreta).

- c) **TIPOLOGIA ELEMENTS:** Per aquest treball s’ha seguit la recomanació d'utilitzar elements triangulars per a discretitzar superfícies de geometria complexa, i usar-ne de tetraèdrics (elements de volum formats per quatre cares triangulars) per a la subdivisió inicial del volum.
- d) **CAPA PRISMÀTICA:** Com ja s’ha dit, degut a la viscositat, es produeix un gradient de velocitats en les immediacions de les superfícies del cos quiet, dins del medi líquid en moviment. Llavors en la zona on s’estima que es desenvolupa aquest gradient els elements tetraèdrics es substitueixen

per unes capes molt més regulars d'elements prismàtics (extrusions de triangles) de ràtio progressiu partint del mallat triangular de la superfície del robot per tal de facilitar la convergència de la solució del model numèric. Aquesta capa es pot observar a la Fig. 3.9.

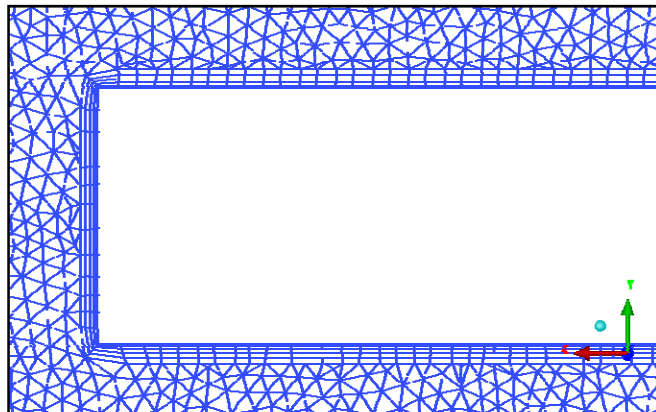


Fig. 3.9: Detall de la capa prismàtica projectada a la superfície de simetria.

Les capa prismàtica utilitzada en aquest treball ha sigut la mateixa per a tots els mallats que s'han generat i es caracteritza amb els següents paràmetres:

- Nombre de capes = 7
- Altura total capa = 10 mm
- Ratio creixement = 1.3

Del que se'n deriva que l'altura del primer element mesura 0,57 mm.

- e) TRANSICIÓ: Donat que no tots els elements del volum aigua tenen la mateixa dimensió, és òptim passar d'una zona amb elements d'una mida a una altra zona contigua amb elements de mida diferent fixant un gradient en la mida dels element que assegurí que no hi hagi canvis molt bruscos de mida entre elements contigus, doncs aquest fet reporta problemes al procediment de càlcul numèric.
- f) POTÈNCIA DE CàLCUL: La potència de càlcul dels ordinadors utilitzats és la limitació última per determinar el nombre d'elements amb què es discretitza el model. Per tant, cal fixar un valor límit aproximat pel número d'elements per poder abordar els càlculs. En aquest cas s'ha fixat el límit en dos milions d'elements per tal de poder efectuar els càlculs en menys de 48 hores en ordinadors amb processadors Intel Pentium IV a 3 GHz i 3 Gb de memòria RAM.

En aquest cas, a més, s'ha reduït el nombre d'elements tot utilitzant un model simplificat de l'Ictineu ja que el model original té detalls de l'ordre de 10^{-3} m i per tal de capturar característiques geomètriques d'aquesta escala s'hauria de realitzar un mallat molt més fi (més elements) del que s'ha definit com a límit (per no superar 2 milions d'elements). Per altra banda, cal tenir en compte que els detalls de petita dimensió que han estat simplificats no tenen una influència determinant en

la mida de la capa llindar, que és l'objecte de l'estudi i per tant, de fet, és lògic no considerar-los. Els detalls de la simplificació geomètrica es troben a l'annex B.

Donada la important relació que hi ha amb el mallat i els resultats que s'obtenen, és interessant realitzar el càlcul d'un mateix model amb diferents mallats. Segons la teoria de volums finits, els resultats amb un mallat cada vegada més fi convergeixen en un resultat únic.

Per aquest estudi s'han realitzat diferents mallats en el cas del robot sense perfilador (casos A1 A2 i A3) i només un per al cas del robot amb el perfilador (cas B). La Taula 3.2 recull la informació bàsica utilitzada en cada cas per definir els diferents mallats i, així, tenir una visió global de les diferències entre ells.

Taula 3.2. Dimensions definides per a la discretització dels diferents models simulats.

Dimensió màxima permesa pels elements discrets a les diferents zones [mm]	Cas A1	Cas A2	Cas A3	Cas B
superfíciesG robot	10	8	8	8
superfíciesP robot	10	8	6	6
parets canal	200	150	150	150
volum fluid	200	150	150	150
densitat 1¹	40/1.5	40/1.5	60/1.5	40/1.5
densitat 2	-	-	15 /1.3	-
Nombre total d'elements	0,92e6	1,16e6	1,65e6	2,10e6

¹ Per caracteritzar les densitats s'utilitza la nomenclatura dimensió max/rati creixement.

A continuació es defineixen les característiques més destacables de cada mallat realitzat. Recordar que els casos A.x fan referència al model de l'Ictineu sol i el cas B fa referència a l'Ictineu amb el perfilador acoblat.

a) Cas A1: Ictineu mallat 1

Aquest cas és el que té un mallat més bast amb la particularitat de la densitat definida a prop de l'Ictineu. A la Fig. 3.10 s'observa la discretització de la superfície a la paret de simetria, on destaca la major densitat d'elements a les immediacions del robot provocat per l'efecte de la densitat.

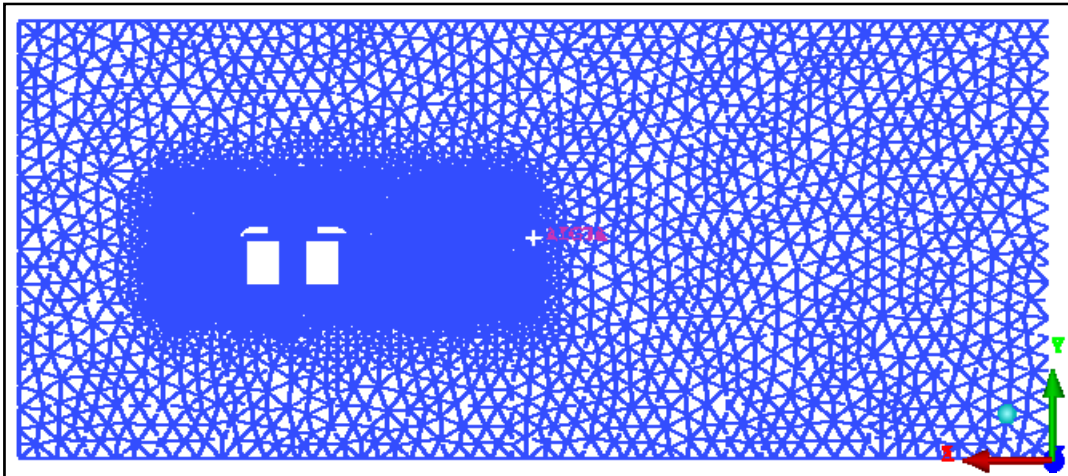


Fig. 3.10. Discretització de la superfície de simetria per el cas A1 (vista de tot el canal hidrodinàmic).

De la mateixa forma, aquesta densitat més alta d'elements a les immediacions del robot s'ha definit en la direcció perpendicular al pla de simetria. L'efecte és el mateix que el que es mostra a la Fig. 3.8.

b) Cas A2: Ictineu mallat 2

Remetent-nos a la Taula 3.2, s'observa que en aquest segon cas només s'han reduït les dimensions dels elements respecte al cas A1, tant de les superfícies del robot com del volum del túnel hidrodinàmic obtenint així un mallat més fi a tot el volum (d'aquí ve el major nombre d'elements) però sense diferències visuals significatives respecte el mallat del cas A1.

c) Cas A3: Ictineu mallat 3

Aquest cas presenta diverses característiques que sí que difereixen dels dos casos anteriors, a més de les dimensions dels elements. En primer lloc, s'ha definit una segona densitat (més propera al robot) amb una mida d'elements encara molt més petita que a la densitat 1 i alhora s'han definit diferents dimensions dels elements segons les diferents tipologies de superfícies d'acord amb les definicions donades anteriorment de SuperfíciesG i superfíciesP.

A la Fig. 3.11 es pot observar el mallat resultant a la superfície de simetria.

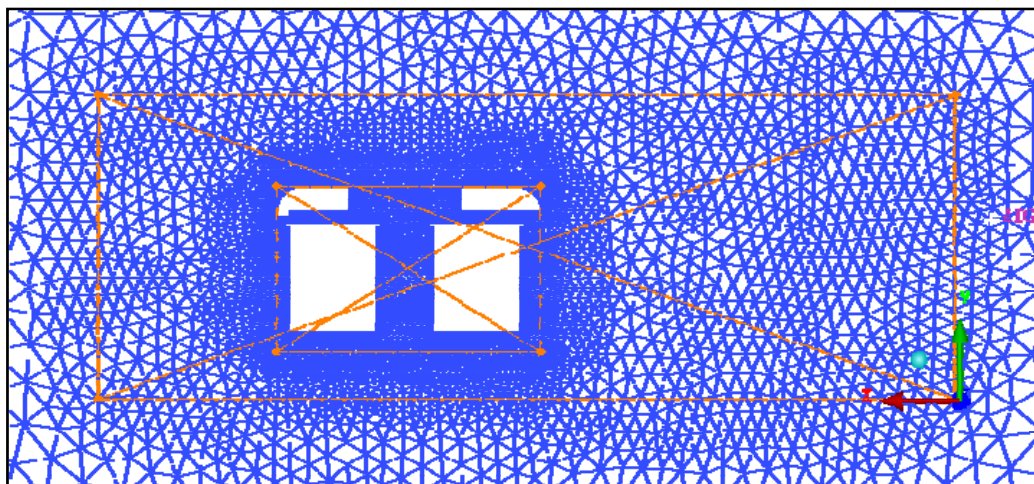


Fig. 3.11. Discretització de la superfície de simetria per el cas A3 (vista parcial del canal hidrodinàmic).

d) Cas B: Ictineu i perfilador

En aquest cas s'han utilitzat les mateixes eines que en el cas A.2. (només una densitat definida), però s'ha utilitzat una eina que permet crear una transició controlada (factor de transició igual a 1.2) entre la dimensió d'uns elements de superfície i els de volum, tot evitant col·locar elements de dimensió més petita en zones allunyades de la geometria, com ho és la zona que queda per sota el voladís del perfilador. A la Fig. 3.12 s'observa el mallat resultant a la superfície de simetria.

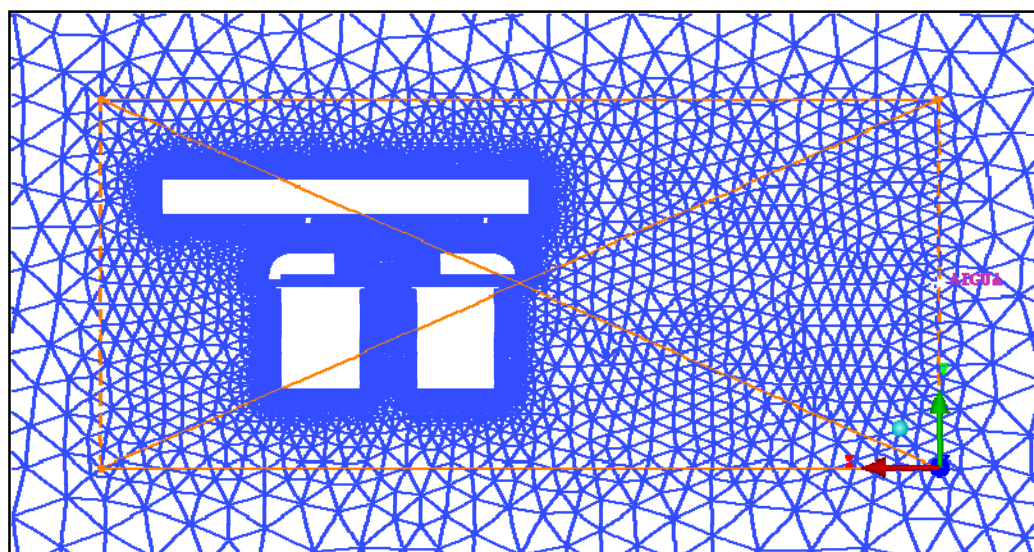


Fig. 3.12. Discretització de la superfície de simetria per el cas B (vista parcial del canal hidrodinàmic).

3.4.1.3. Definició de les condicions de contorn

Les condicions de contorn (CC) en un model numèric defineixen característiques de les superfícies (per ser un model en 3 dimensions) que fan de frontera per al volum de fluid estudiat. Les CC serveixen per definir el comportament del model i assimilar-lo al cas real. També cal donar al






model les anomenades condicions inicials (CI), que serveixen per a poder inicialitzar els càlculs iteratius a partir d'una situació real.

Tal com s'apuntava, s'haurà de definir el paper que juguen les superfícies que limiten el volum tot simulant que el robot es desplaça per un volum "infinit" de fluid. Hi ha dos tipus de CC que engloben les condicions utilitzades al problema:

- a) DIRICHLET (de primer ordre). S'usen per imposar un valor determinat a una magnitud de la zona frontera (en aquest cas superfícies). Exemples: velocitat, pressió, nivell de turbulència, etc.
- b) NEUMANN (de segon ordre). Amb aquestes condicions de contorn s'imposa el valor de la derivada d'una variable. Exemple: Simetries.

A la Taula 3.3 es defineixen les diferents CC utilitzades i quines implicacions tenen. A continuació es determinarà quines s'apliquen a cada zona.

Taula 3.3. Condicions de contorn utilitzades al model.

Nom i representació	Tipus	Definició
Wall No-slip 	N	Implica que el fluid en contacte amb aquesta superfície té velocitat zero. Es genera una capa llindar.
Wall Slip 	N	Implica que el fluid en contacte amb aquesta superfície NO té velocitat tangencial zero – com si hi hagués més fluid de les mateixes propietats a l'altra banda. Per simular contorns del volum estudiat.
Symmetry 	D	Implica que les propietats dels elements a una banda i l'altra d'aquesta superfície tenen la mateixa magnitud. Totes les propietats i CC definides a la banda present es consideren idènticament a la part no representada. Equival a imposar uns gradients nuls de les variables en la direcció perpendicular de la superfície.
Velocity inlet 	N	Imposa un valor a la velocitat del fluid que entra al sistema per la superfície determinada per aquesta condició (també es poden especificar altres magnituds com, per exemple, la pressió).
Outflow 	D	Implica que el flux surt per la superfície determinada per aquesta CC.

¹ Tipus de CC: D – Dirichlet, N - Neumann

A la Fig. 3.13 es detalla quines condicions s'apliquen a cada una de les superfícies que delimiten el volum estudiat. Com es pot veure, les superfícies que conformen el cos de l'Ictineu estan definides com a paret (Wall No slip) ja que ofereixen una resistència (tallant) a l'aigua que circula per les seves immediacions degut a la viscositat del fluid.

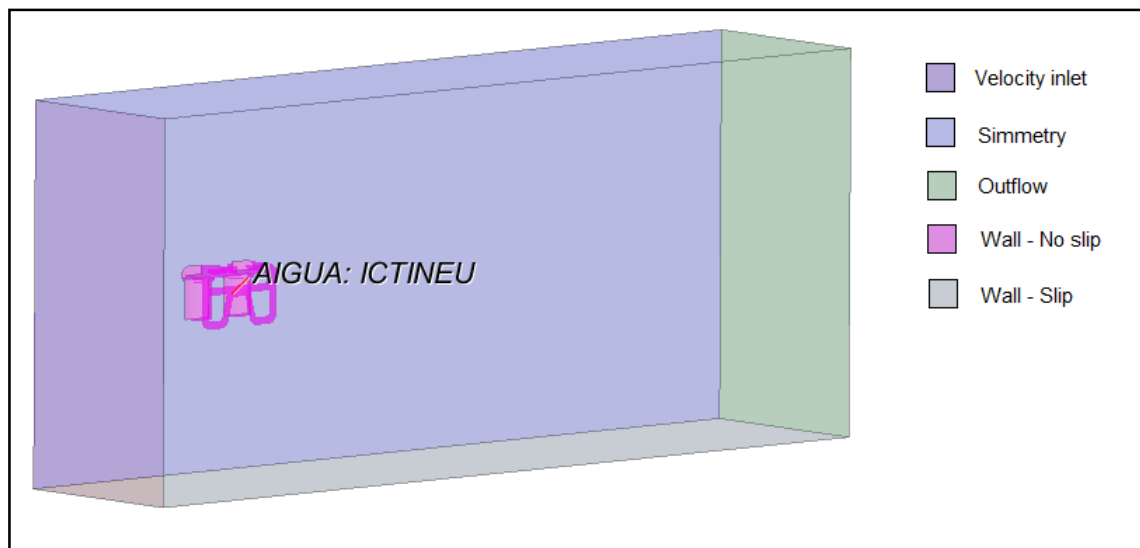


Fig. 3.13. Condicions de contorn aplicades al model del canal hidrodinàmic.

La superfície de color lila de més a l'esquerra de la Fig. 3.13 és per on entra el fluid al volum (velocity inlet). En aquesta superfície es defineix la velocitat de l'aigua igual a 0,7 m/s i normal a la superfície (notar que en una simulació de fluids numèrica, no és el robot qui es desplaça sinó el fluid que l'envolta aconseguint així la mateixa velocitat relativa entre el cos i el fluid). S'ha escollit la magnitud de la velocitat a 0,7 m/s donat la recomanació del fabricant del perfilador de MS (Sea&Sun Technology) que estipula una velocitat mínima per al funcionament correcte del sensor de cisallament de 0,6 m/s. S'ha volgut avaluar la capa en un cas una mica més desfavorable, doncs com més velocitat, major serà el gruix de la capa turbulenta.

La superfície verda (la de més cap a la dreta de la Fig. 3.13) representa per on surt el flux que travessa el volum; també de forma normal a aquesta cara. No s'hi defineix la velocitat de sortida ni la pressió que serà un paràmetre a tenir en compte per validar els resultats de la simulació.

Finalment, havent definit la condició de simetria (superfície blava del fons), a les tres cares restants del prisma (superior, inferior i frontal de la Fig. 3.13) s'ha definit la CC de paret lliscant (Slip Wall) que implica que la velocitat del fluid a la seva immediació no és zero ja que a l'altra banda també hi ha fluid que és arrossegat per el de la part interna.

Velocitat de dissipació de l'energia cinètica turbulenta i energia cinètica turbulenta

Tal com ja s'ha comentat les variables per les que s'ha de definir les CC i/o les CI dependran de les variables que consideri el model utilitzat. En el nostre cas, i tal com s'explica al subapartat 3.4.2.1 s'ha escollit el model K- ϵ realitzable i per tant ens caldrà també definir a l'entrada i a la sortida del canal la velocitat de dissipació de l'energia cinètica turbulenta, ϵ , i l'energia cinètica turbulenta, k , que en ambdós casos es defineixen com a $\epsilon = 1e-10$ W/Kg i $k = 1e-4$ J/Kg.

Els valors de velocitat de dissipació de l'energia cinètica turbulenta (ϵ) i energia cinètica turbulenta (k) a l'entrada del canal han estat definits per a simular que l'entorn es troba en una situació de no turbulència per d'aquesta manera evitar que el medi pugui influir en la capa llindar generada pel propi avanç del vehicle.

El valor de $\epsilon = 1e-10$ W/Kg s'ha fixat considerant que aquest és el límit de resolució que té el sensor que s'utilitza i per sota del qual es considera que el fluid no és turbulent. De forma absoluta, a més, el nivell de turbulència real per sota de $1e-10$ W/Kg es pot considerar menyspreable.

Pel que fa a l'energia cinètica turbulenta, k , aquesta es defineix a partir de la velocitat del flux mig, v , considerant un paràmetre anomenat intensitat turbulenta, I , de manera que $k=(3/2)(Iv)^2$. També partint de l'experiència dels professors tutors, es determina un valor d'intensitat turbulenta (I) d'un 1% de manera que k resulta ser d'aproximadament $1e-4$ J/kg.

$$K = \frac{3}{2}(Iv)^2 = \frac{3}{2}(0.01 * 0.7)^2 = 0.0000735 \approx 1e - 4 \text{ J/Kg}$$

Pressió i altura de referència.

Per tal de simular el moviment del robot submergit una determinada profunditat, s'ha de jugar amb els paràmetres de pressió i altitud de referència. En aquest cas s'ha volgut simular el desplaçament del robot a 1,5 metres de profunditat, per tant, a la superfície superior del túnel s'ha definit l'altura de referència a la qual la pressió és $P_{atm}=101300$ Pa. D'aquesta manera, al fons del volum estudiat, donat que el canal hidrodinàmic fa 3 metres d'altura, hi haurà d'haver una pressió de $P_{fons} = P_{atm} + 3 \text{ mca} = 101300 + 30000 = 131300$ Pa (aprox.). Donat que la pressió al fons no es fixa, aquest paràmetre ens servirà per avaluar la validesa de la simulació numèrica un cop hagi convergit.

3.4.1.4. Definició de les Condicions Inicials

Per tal de poder inicialitzar els procediment de càlcul iteratiu s'ha de definir uns valors per a les variables que intervenen al procés (CI).

Pel que fa als valors de les variables de turbulència, s'han establert els mateixos que a la condició de contorn "entrada" per al volum de fluid. D'altra banda, s'ha inicialitzat el càlcul amb un valor de velocitat igual a zero per aquest volum. A partir d'aquests valors inicials, el procediment

iteratiu anirà convergint a la solució estable on es satisfaran les equacions de balanç per el volum estudiat.

3.4.2. Càlcul

Un cop s'ha caracteritzat el model geomètric a estudiar, les CC que defineixen el comportament dels seus límits i les CI que inicialitzen les variables del sistema, 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.

3.4.2.1. Definició del model

En aquest subapartat es fa referència al model emprat i els detalls de la simulació. Bàsicament el procediment que s'ha seguit consisteix perimer en seleccionar, d'entre els models implementats al programa, el més adequat per al problema en qüestió. A continuació 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: *estacionari (steady)*. Donat que el cas en qüestió implica un moviment del robot en una direcció i velocitats definides i constants, 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. De fet, en els instants on la velocitat no és la màxima, el perfilador no pot adquirir les dades requerides per mesurar la turbulència. Així doncs, el comportament transitori no interessa en aquest estudi.

Moviment: *estàtic*. Es defineix així ja que no hi ha moviment relatiu entre els diferents elements sòlids del volum discretitzat (hi ha únicament el moviment del fluid).

Fluid. El fluid considerat és aigua amb les propietats a 20°C. Es considera una densitat constant per a simplificar els càlculs ja que no es donen gradients importants de temperatura.

Model de turbulència. El model de turbulència emprat per als càlculs és el K-Epsilon Realitzable amb aproximació doble capa (una breu explicació, incloent la formulació emprada, es troba a l'annex A).

Gravetat. Per tal de tenir en compte la força externa de la gravetat i, així, obtenir, per exemple, un increment de pressió degut a la profunditat, s'hauran d'especificar les components del vector gravetat (aquest efecte es podria negligir si el fluid estudiat fos aire mantenint les mateixes dimensions de l'estudi).

La resta d'opcions serveixen per acabar de definir el model numèric i són escollides automàticament per el programa.

A la Fig. 3.14 s'observa una captura de pantalla del programa de càlcul STAR-CCM+ amb les opcions del model matemàtic seleccionat per a la resolució del problema.

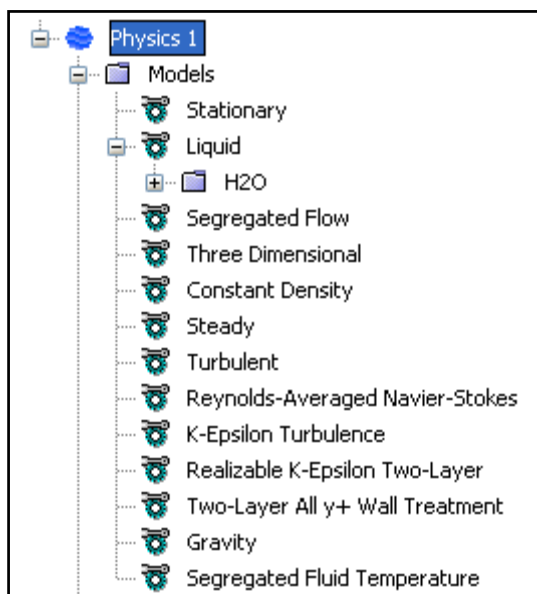


Fig. 3.14. Opcions emprades en la simulació numèrica (Al programa Star CCM+)

3.4.2.2. *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 aquestes simulacions s'ha fixat un valor de $1e-6$. A la Fig. 3.15 es veu l'evolució dels residuals en el càlcul per al cas A1.

En aquest cas, tots el paràmetres de control han superat el criteri del valor llindar de $1e-6$, i tot i que encara presenten una lleugera tendència a la baixa, es considera que la solució numèrica obtinguda és prou bona. Per tant, en aquest cas, es pot procedir a avaluar-ne els resultats.

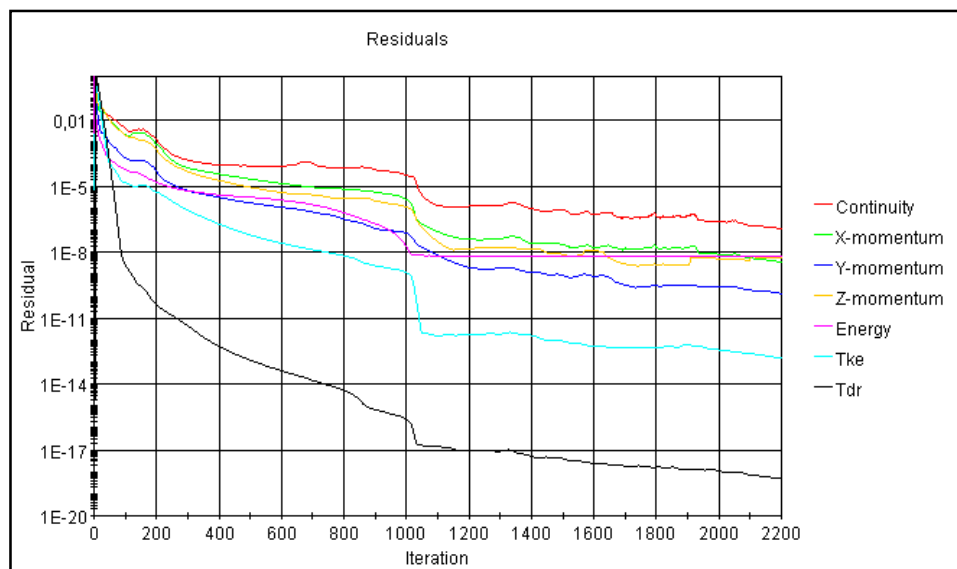


Fig. 3.15. Evolució del valor dels residuals del càlcul per al cas A1.

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 $1e-6$.

En determinats casos, però, no ha estat possible assolir el valor de convergència estipulat ($1e-6$) per a tots els paràmetres de control. Si els residuals, però, s'han estabilitzat amb un valor raonable (menor de $1e-3$) acceptem la simulació del règim estacionari. En aquestes condicions es pot donar per finalitzat aquest procés i s'hauran d'analitzar els resultats obtinguts per determinar-ne la seva validesa.

A tall d'exemple, el temps de càlcul del cas A3 va ser de 48 hores aproximadament.

3.4.3. Post procés

Per a la visualització dels resultats cal definir la magnitud que es vol observar i on es vol representar. Això és, si es vol obtenir el seu valor en un sol punt determinat, al llarg d'una línia o sobre una superfície. Les magnituds es poden representar sobre elements ja definits en el propi model o bé sobre noves línies o superfícies creades en regions concretes. A continuació es presenten els resultats obtinguts dels diferents casos simulats.

3.4.3.1. Anàlisi dels resultats obtinguts

Un cop els residuals han complert els criteris comentats en els subapartat anterior, és l'hora d'analitzar els resultats obtinguts i determinar la seva validesa. Primer i com a comprovació de que els càlculs són coherents, es verifica que la pressió a diferents profunditats incrementa linealment a raó de 1mca/metre de profunditat. Per a obtenir el valor d'aquesta magnitud s'ha creat una línia

(line-probe) a la sortida del canal tal i com es mostra a la Fig. 3.16. Per cada cel·la que es troba en la line-probe es recupera el valor de la pressió absoluta i es grafica en funció de l'altura (coneguda) a la Fig. 3.17. (Notar que com a màxim es poden obtenir tants valors com cel·les en què s'ha discretitzat la línia al preprocés, això explica que la gràfica no mostri una tendència perfectament lineal).

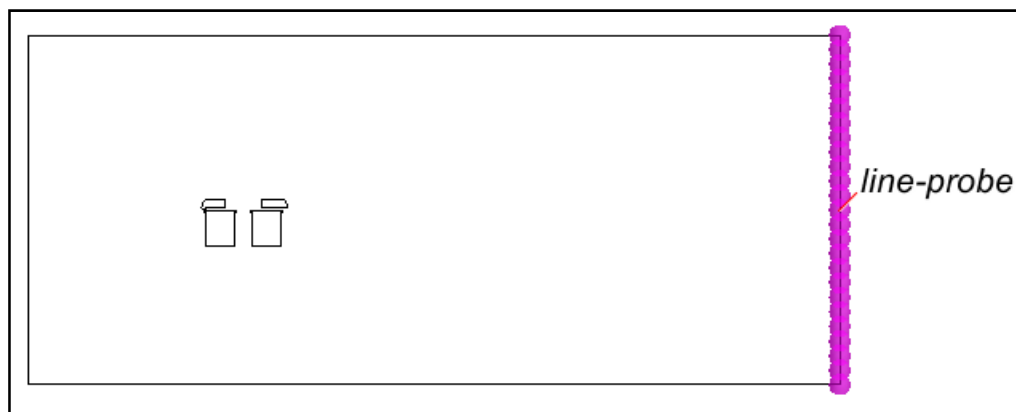


Fig. 3.16. Ubicació d'una línia de captura de dades al pla de simetria a la sortida del canal.

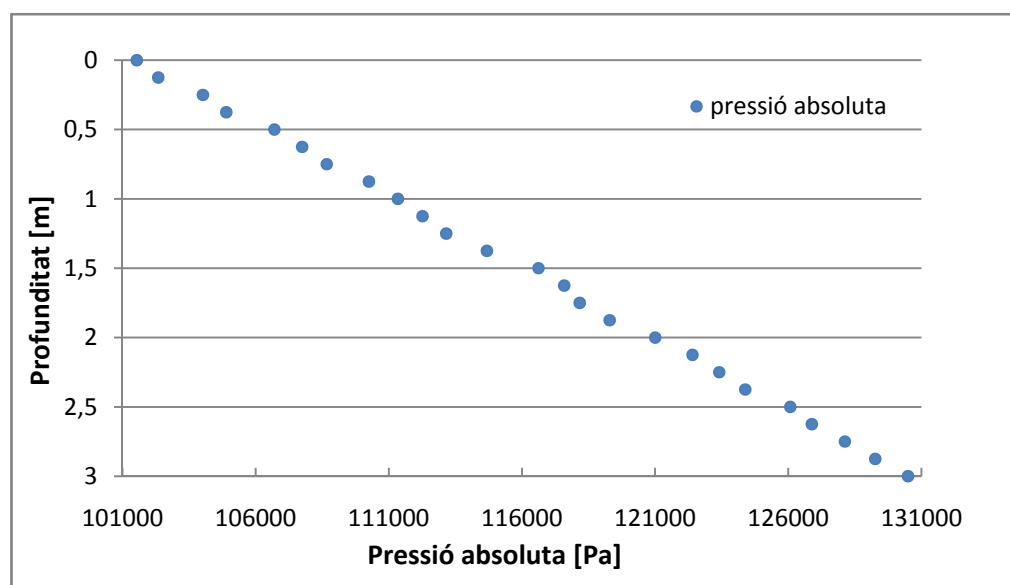


Fig. 3.17. Gràfic de la pressió absoluta a la línia creada al pla de simetria a la sortida del túnel.

S'observa que el guany de pressió en els 3 metres de profunditat coincideix amb l'increment de 30.000 Pascals (3 mca) que s'esperava degut a la pressió hidrostàtica com a conseqüència de la gravetat. La Fig. 3.18 mostra el valor de la pressió en el pla de simetria d'on es pot observar com aquest gradient de pressions és uniforme en tot el volum .

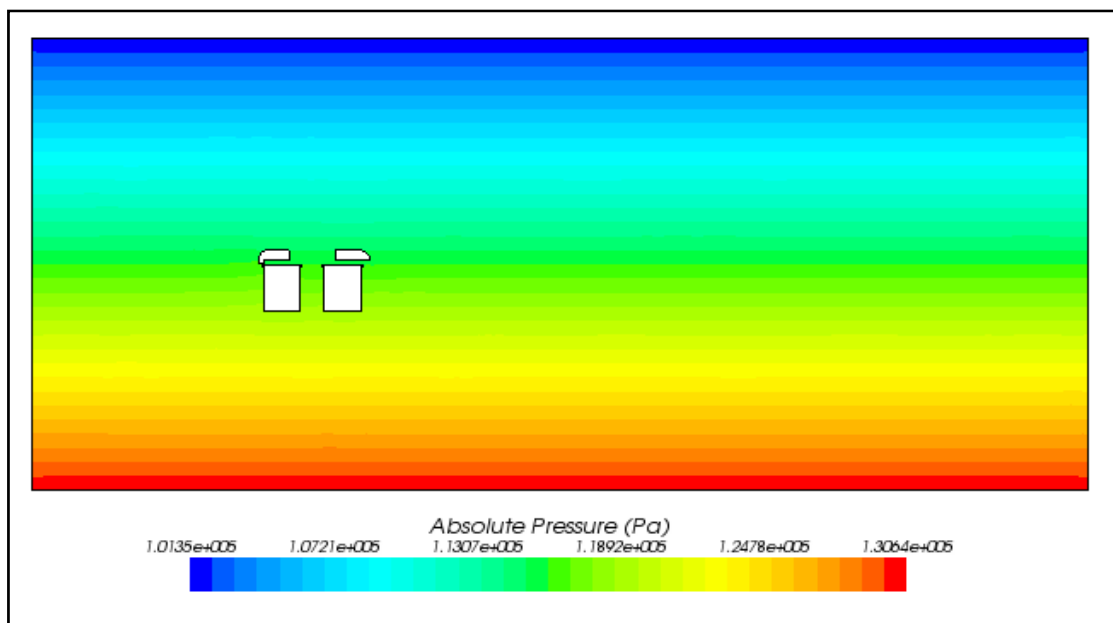


Fig. 3.18. Gradient de pressions al pla de simetria del canal hidrodinàmic.

Malgrat que només destaco aquí el procediment i el resultat d'un dels casos simulats (cas A1), s'ha utilitzat el mateix criteri per tots ells. S'ha de tenir en compte que donades les mateixes dimensions del canal hidrodinàmic i la pressió de referència a la part superior del canal per a cada cas, el resultats són idèntics quan els models han convergit adequadament.

3.4.3.2. Anàlisi de la capa llindar generada

Per analitzar la capa llindar turbulenta generada al voltant de l'íctineu es considera la magnitud que interessa mesurar i que és la velocitat de dissipació de l'energia turbulenta (ϵ) que es mesura en W/Kg (o equivalentment en m^2/s^3). Donat que aquesta magnitud varia de forma molt notable (entre $1e-10$ en situacions de no turbulència i fins a ordres de magnitud de $1e-4$ en condicions molt turbulentes) és adequat visualitzar-la en escala logarítmica.

Donat que el programa no té implementada aquesta funció, s'ha de crear una nova variable a partir de la pròpia magnitud de la següent forma:

- Crear una nova "funció de camp" i definir-la com a $\log_{10}(\$turbulent.dissipation.rate)$ la qual representarà la magnitud "turbulent dissipation rate" en escala logarítmica en base 10.
- A continuació s'ha d'escollir la funció creada com a magnitud a representar.

A la Fig. 3.19 es mostra el valor de la ϵ al pla de simetria per els 3 casos sense el perfilador. (el color blanc correspon al fons d'escala definit ($\epsilon = 1e-10$ W/Kg)).

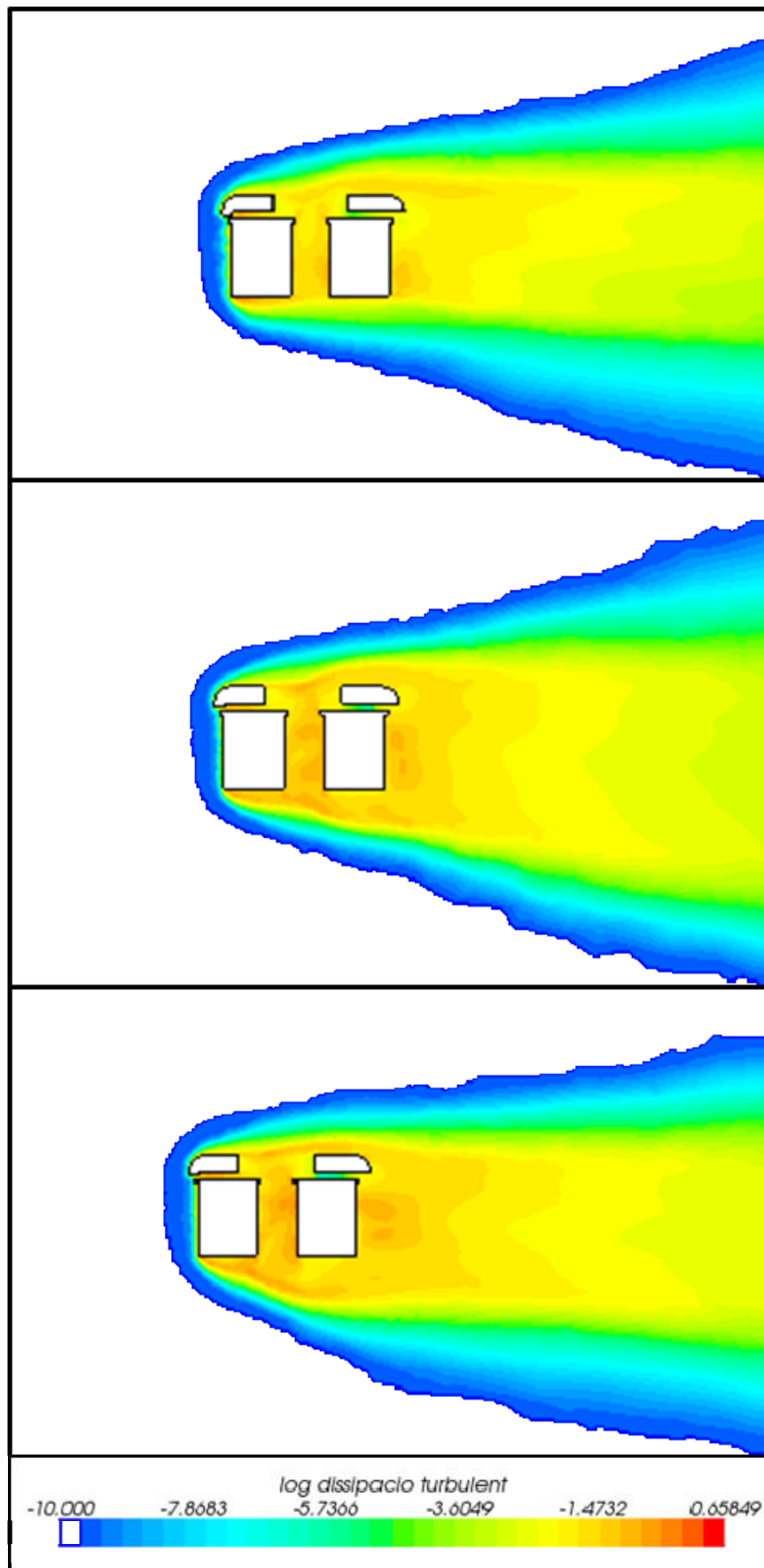


Fig. 3.19. Dissipació turbulenta (en escala logarítmica base 10) al pla de simetria per als diferents models (de dalt a baix: cas A.1, cas A.2 i cas A.3). Capa límit turbulenta al voltant de l'Ictineu.

Tot i que s'observen petites diferències entre els resultats obtinguts per a les diferents discretitzacions, especialment en l'estela, una anàlisi detallada de la zona d'interès (part frontal superior de l'íctineu a la part esquerra de les figures) s'observa una bona concordança. Això es pot comprovar tot creant una "line-probe" a la zona on hi hauran els sensors del perfilador (tenint en compte que aquest es pot col·locar més endavant o enrere del robot) i extraient els valors de ϵ en diferents punts de la seva longitud. La Fig. 3.20 mostra la situació de la line-probe situada sobre el pla de simetria.

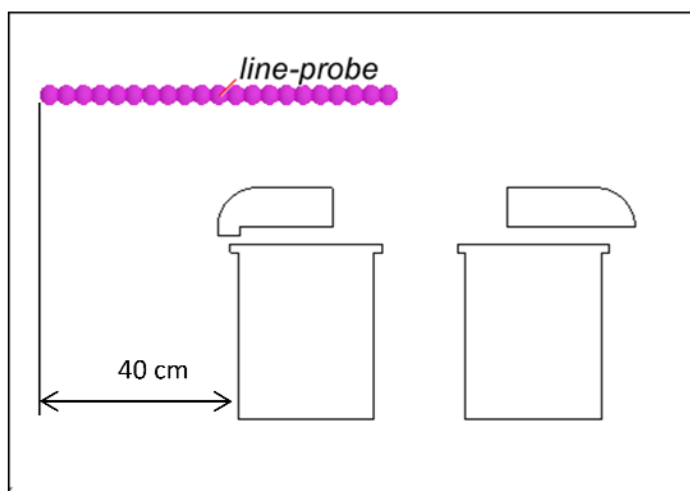


Fig. 3.20. Situació de la line-probe2 per a la captura dels valors de ϵ a la zona d'interès.

A la figura següent es mostren els valors de ϵ [W/Kg] als punts definits a la line-probe de la Fig. 3.20 (20 punts).

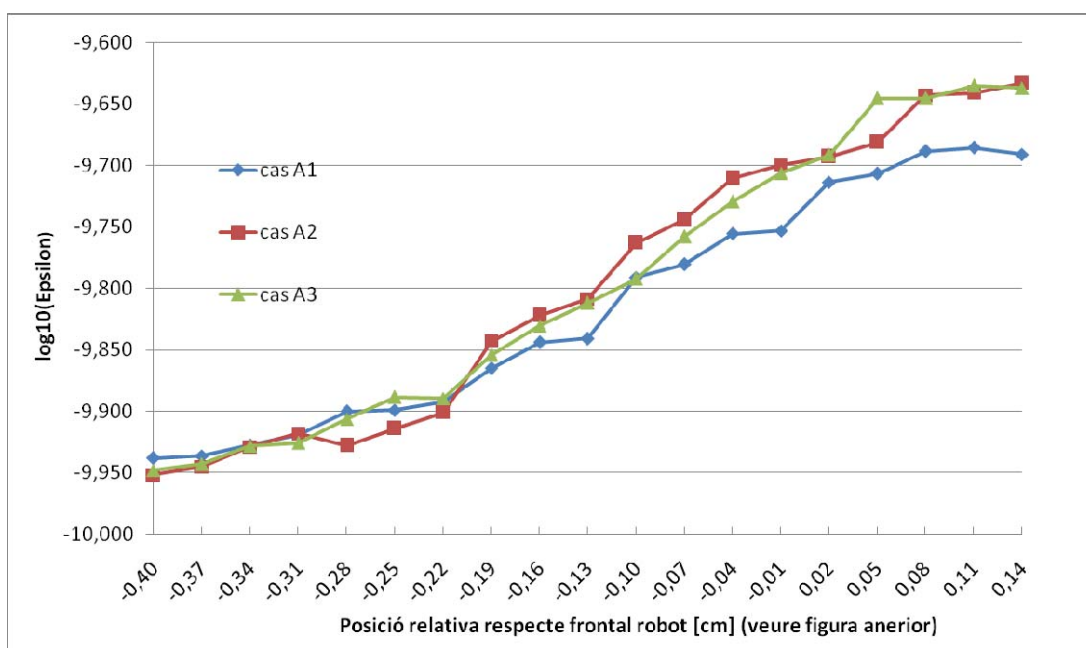


Fig. 3.21. Valors de la velocitat de dissipació de l'energia turbulenta a la line-probe de la Fig. 3.20 per els 3 casos estudiats sense perfilador.

S'observa que a mida que ens anem apropant a l'Ictineu, el valor d' ϵ es va fent més important, però sense assolir un valor prou alt com per considerar que s'hi doni un fenomen de turbulència no desitjat que pogués distorsionar les mesures realitzades amb el perfilador de microestructura (mai superior a $1e-9$ W/Kg).

De la mateixa manera s'ha simulat el comportament del model del cas B on hi ha el perfilador acoblat a l'Ictineu. A la Fig. 3.22 es mostren els valors que pren ϵ al pla de simetria del model.

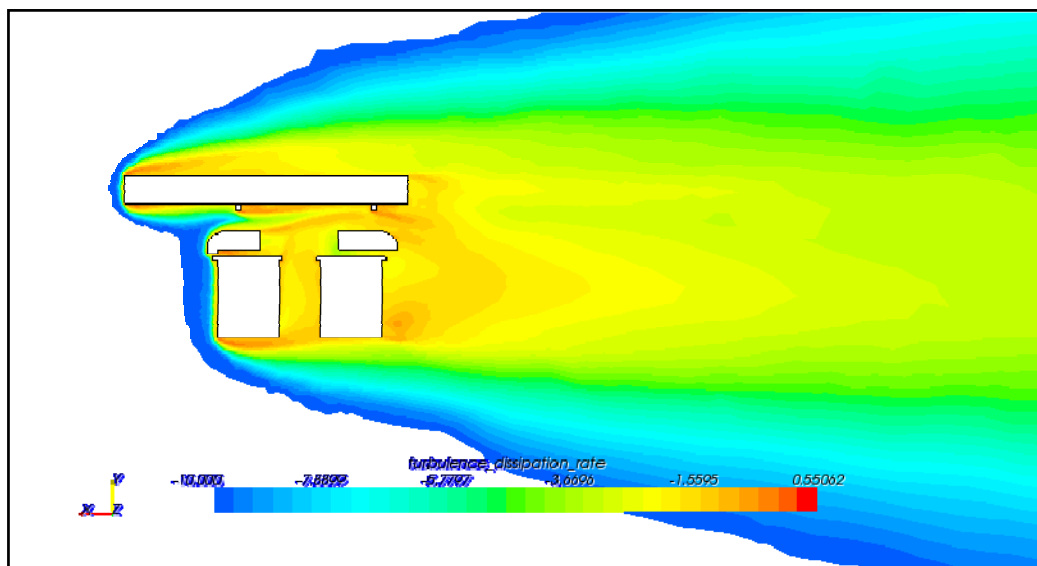


Fig. 3.22. Dissipació turbulenta (en escala logarítmica base 10) al pla de simetria per als cas B. Capa límit turbulenta al voltant del conjunt Ictineu+perfilador.

S'observa que afegint el perfilador, l'estela augmenta de dimensions. Alhora, el nivell de turbulència és major en les zones entre la carcassa superior i el perfilador però no afecta a aquest. Pel que fa a la capa límit al voltant del perfilador, tal com ha contrastat l'empresa subministradora d'aquest instrument, en la part frontal no és prou ampla com per abastar la zona on hi ha els sensors del perfilador, donat que aquests sobresurten considerablement de la part cilíndrica principal (uns 30 cm).

3.5. Conclusió de la simulació numèrica

Considerant la posició a la que s'ha situat el perfilador respecte el robot i que el nivell de turbulència generat degut a la navegació és inferior a $1e-9$ W/Kg, es pot concloure que aquesta no tindrà influència en els valors enregistrats en un medi aquàtic natural.

Fins i tot tenint en compte el model del cas B on hi ha acoblat el perfilador, si bé la distorsió de l'entorn degut a la navegació és una mica major, tampoc queda afectada la zona d'interès (part frontal en la direcció de l'avanç).

4. ESTUDI DE LA TRANSMISSIÓ DE VIBRACIONS EN L'ACOBLAMENT

El mètode més directe i comunament utilitzat actualment per a determinar el nivell de turbulència d'un medi es basa en l'adquisició de dades de cisallament. És per això que estudiar les vibracions induïdes als sensors pel funcionament dels propulsors o la pròpia navegació de l'Ictineu és de vital importància, doncs han de poder ser identificades i filtrades per tal de que no contaminin les dades obtingudes amb l'esmentat sensor. Per això s'ha fet l'estudi que es detalla en aquest capítol.

Al primer apartat es defineix, amb més precisió, l'objectiu d'aquest estudi. A l'apartat següent (4.2) es presenten els sensors i els procediments que s'utilitzen per a determinar el nivell de turbulència d'un medi. A continuació (apartat 4.3) s'exposen els detalls de l'assaig experimental, els resultats del qual són analitzats al següent apartat (4.4). Finalment, a l'apartat 4.5, s'exposen les conclusions que se n'ha extret.

4.1. Objectiu de l'estudi

Fer una assaig de navegació en el que es pugui adquirir dades de les vibracions transmeses al perfilador degut a estar acoblat a l'Ictineu. Això serà possible gràcies a un sensor d'acceleració intern acoblat al perfilador que permetrà analitzar les característiques d'aquestes vibracions i valorar si contaminen o no les dades que es puguin enregistrar amb el sensor de cisallament.

4.2. Sensors per a la mesura de la turbulència

El perfilador, equipat amb diversos sensors per a mesures físiques, conté també dos sensors per a la mesura de la turbulència que es solen anomenar de microestructura, ja que la turbulència afecta a les escales petites.

Tot i que el mètode més utilitzat actualment per a la determinació del nivell de turbulència d'un medi és a partir de les dades d'un sensor de cisallament de petita escala (que en essència enregistra les fluctuacions de velocitat), també és possible fer-ho a partir de les fluctuacions de temperatura (microestructura tèrmica), íntimament lligades a les fluctuacions de velocitat,

Per tant, hi ha dos jocs de sensors que ens permeten obtenir el nivell de turbulència del medi. El primer, un sensor de cisallament (PNS 93), que enregistra les fluctuacions de velocitat del fluid a la seva punta i el segon, un sensor termistor de resposta ràpida que, igualment que el sensor de

cisallament, ens permet resoldre variacions tèrmiques de freqüències elevades (turbulentes). Aquest sensor també s'anomena de microestructura tèrmica.

El perfilador també conté un segon sensor de cisallament encapsulat en un receptacle pressuritzat que en no estar en contacte amb l'aigua enregistra directament les vibracions que experimenta el perfilador. Per això es diu que és un sensor de control de vibracions intern o, més impròpiament, un acceleròmetre.

D'altra banda, el perfilador també està equipat amb dos sensors de temperatura de precisió situats a dos extrems oposats del cap del sensor de microestructura tèrmica per tal de poder determinar el gradient de temperatures sobre el que es desenvolupen fluctuacions de temperatura a causa de la turbulència. Notis que un petit desplaçament vertical en un gradient tèrmic gran pot generar una fluctuació tèrmica més gran que un desplaçament gran en un gradient tèrmic petit.

A la Taula 4.1 es detallen les especificacions tècniques dels sensors involucrats en la mesura de turbulència i a continuació es detallen les característiques referents a cadascun d'ells i els seus principis d'operació.

Taula 4.1. Especificacions tècniques dels sensors del perfilador involucrats en la mesura de turbulència.

Sensor	Rang	Precisió	Resolució	Temps resposta
Sensor de cisallament PNS93	1e-2 ... 1e-11 W/Kg	no especificat	1e-11 W/Kg	4 ms
Termistor de resposta ràpida FP07	-2 ... +32 °C	± 0.02 °C	0.002 °C	10 ms
Sensor de T^a de precisió T100	-2 ... +32 °C	± 0.01 °C	0.002 °C	150 ms

4.2.1. Sensor de cisallament

4.2.1.1. Construcció del sensor de cisallament

La Fig. 4.1 representa un esquema del capçal del sensor de cisallament. La punta del sensor està connectada a un element piezoelèctric per mitjà d'una peça allargada que actua com a palanca per a incrementar la força de vincament transmesa des de la punta a l'element piezoelèctric. És doncs, aquesta punta (que es tracta d'un perfil axisimètric amb les següents dimensions: diàmetre=3mm i longitud=3.5mm) l'element sensible a vibrar degut el moviment del fluid en direcció perpendicular a l'avanç del sensor.

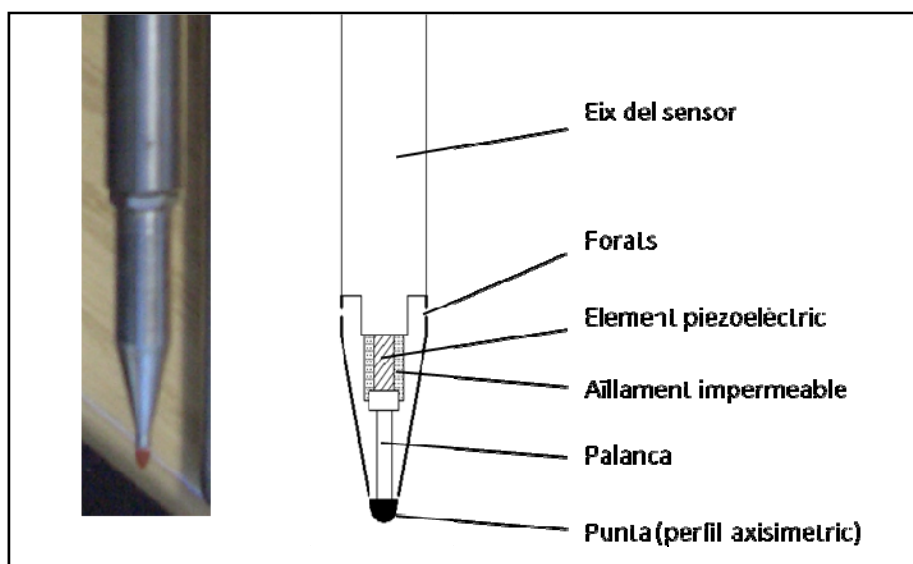


Fig. 4.1. Fotografia i esquema constructiu del sensor de cisallament PNS 93.

Els moviments de la punta, deguts a les fluctuacions de velocitat, són transmesos i amplificats a l'element piezoelèctric per mitjà de la palanca. Tant la palanca com l'element piezoelèctric estan protegits per un caputxó metàl·lic en forma cònica del qual només sobresurt la punta. A més, l'element piezoelèctric està protegit de l'aigua per un aïllament impermeable ja que la part interna d'aquest caputxó és inundada quan el perfilador està submergit.

S'observa que hi ha només una petita separació entre la punta i l'extrem del caputxó per tal de prevenir danys a l'element piezoelèctric deguts a vibracions massa grans. També s'observen uns forats petits a la part més alta per evitar que quedi aire atrapat a l'interior del caputxó.

Per mitjà d'un circuit seqüencial s'amplifica la senyal generada per l'element piezoelèctric i s'obté un voltatge de sortida proporcional a la força transversal a la que està sotmesa la punta en cada instant a una freqüència de 1024Hz.

4.2.1.2. Principi de funcionament

Tal com sha comentat en el apartat anterior, el principi de funcionament del sensor es basa en la utilització d'un material piezoelèctric que dona una tensió de sortida proporcional a la seva deformació.

Més concretament, a la Fig. 4.2 es representa un esquema de les magnituds que intervenen en el procediment d'operació del sensor de cisallament.

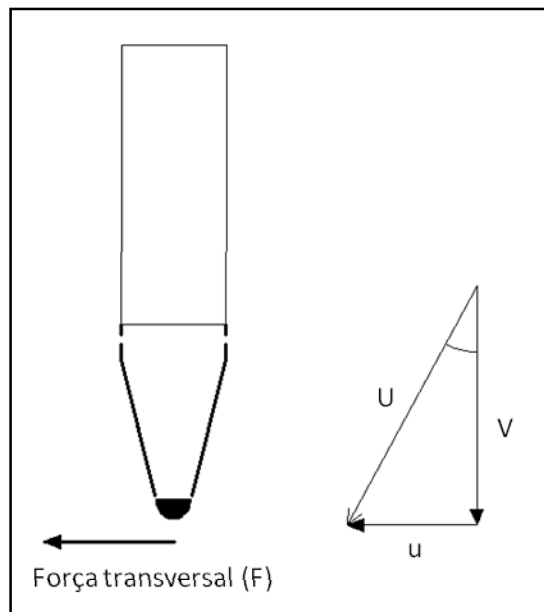


Fig. 4.2. Esquema de la geometria dels fluxos al sensor PNS93.

La velocitat axial V és la d'avanç del perfilador (i.e. velocitat del robot o de caiguda lliure) juntament amb la component transversal de la velocitat u -deguda a la turbulència- generen el vector U a la punta del sensor de manera que és a partir de l'angle generat entre V i U (angle d'atac) que es pot determinar la força transversal.

4.2.1.3. *Obtenció del valor de ϵ a partir de senyal de cisallament*

La sortida del sensor de cisallament és una senyal de voltatge (E_{out}) que està directament relacionada amb du/dz per un coeficient constant que s'anomena factor de calibració (CF)

$$\frac{du}{dz} = \frac{4\pi f_0 \sqrt{2}}{\rho G S V^2} \cdot E_{out} \quad (\text{eq.1})$$

On: f_0 és la freqüència, ρ és la densitat del fluid, S és un coeficient específic del sensor, G és el guany electrònic i V és la velocitat d'avanç del perfilador (o plataforma).

Tindrem per tant doncs, 1024 senyals d'aquest tipus cada segon (considerant freqüència de 1024Hz).

Segons l'equació de l'energia cinètica turbulent (TKE) obtinguda a partir de les equacions de Navier-Stokes i la descomposició de Reynolds (veure Annex A, apartat A.3.1), la velocitat de dissipació de TKE s'escriu com:

$$\epsilon = \nu \cdot \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \cdot \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (\text{eq.2})$$

On ν representa la viscositat cinemàtica de l'aigua, u és la velocitat de la fluctuació turbulent i x és la coordenada del sistema.

Si es considera un sistema isotròpic, és a dir, que la fluctuació turbulent tingui la mateixa intensitat en totes direccions, l'equació 8 (que representa 12 termes de fluctuacions turbulents) queda simplificada a la següent expressió:

$$\varepsilon = 7.5 \cdot \nu \cdot \overline{\left(\frac{du}{dz}\right)^2} \quad (\text{eq.3})$$

On recordem que du/dz representa el perfil de fluctuacions de velocitat en la direcció axial del cisallament en el medi aquàtic (*Batchelor, 1953*).

Cal mencionar que la viscositat cinemàtica no presenta una forta dependència amb la pressió o salinitat. D'altra banda, aquesta està estretament relacionada amb la temperatura de l'aigua, cosa que s'haurà de tenir en compte alhora de calcular ε . La Fig. 4.3 mostra l'evolució d'aquesta magnitud en funció de la temperatura en el rang en què sol treballar el perfilador.

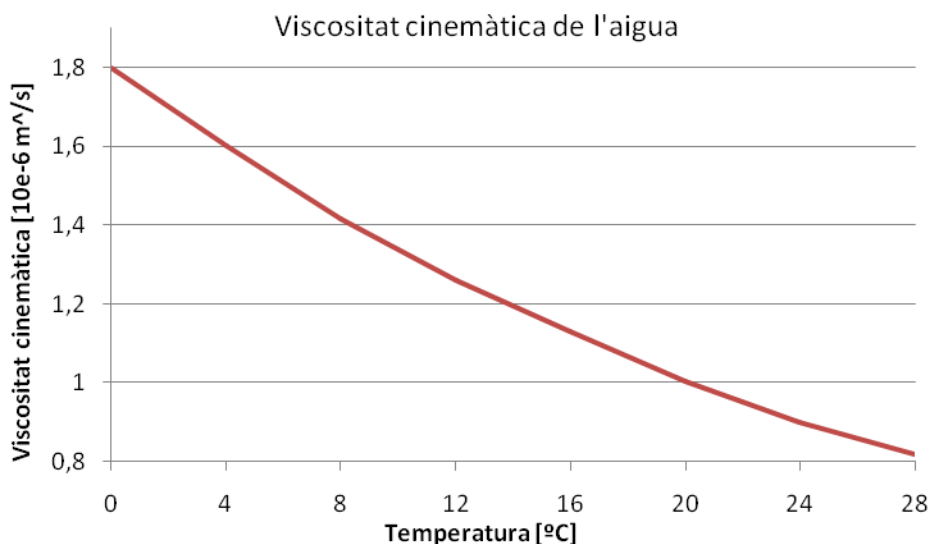


Fig. 4.3. Viscositat cinemàtica de l'aigua en funció de temperatura.

4.2.2. Sensor de control de vibracions

Tal com ja s'ha comentat, el sensor de control de vibracions és de fet un sensor anàleg al de cisallament però que no està en contacte amb l'aigua. En aquest cas, a causa de les vibracions pròpies del perfilador (ja siguin de la seva "navegació" o transmeses externament), el sensor detecta una acceleració (força) transversal que no és deguda al sistema aquàtic (fluctuacions de l'aigua que envolta la punta del sensor a causa de la turbulència del medi) sinó a aquestes vibracions.

Aquest sensor doncs, actua com a acceleròmetre i les dades de sortida ens permetran fer l'estudi que ens proposem sobre les vibracions que experimenta el sensor a causa del acoblament amb el robot submarí.

4.2.3. Microtermistor de resposta ràpida

4.2.3.1. Construcció del termistor de resposta ràpida.

Un termistor és un sensor de temperatura fabricat amb material semiconductor ceràmic per sinterització a partir d'òxids metàl·lics, el qual ofereix una resistència variable en funció de la temperatura. Els materials usats típicament són Níquel, Cobalt, Magnesi, Manganès, Ferro, Coure, Titani entre d'altres.

N'hi ha de diverses tipologies, però quan es necessiten temps de resposta curts, la tipologia constructiva més empleada són els de glòbuls, els quals consisteix en unes petites el·lipsoides de material sinteritzat a la punta de dos conductors fins separats dècimes de mil·límetre. Sol estar recobert de vidre per aconseguir una major protecció si s'ha d'utilitzar en medis líquids o ambients corrosius. A la Fig. 4.4 s'observa un esquema de la construcció del termistor muntat al perfilador.

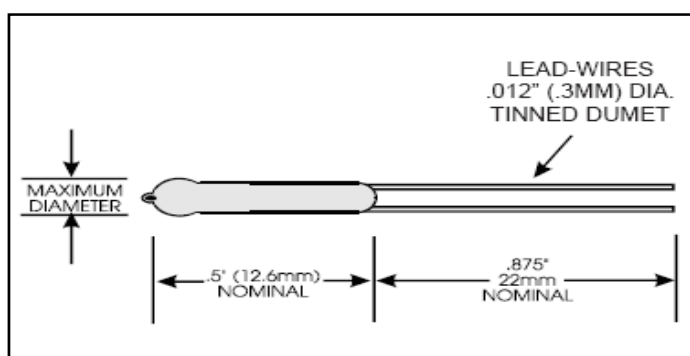


Fig. 4.4. Esquema constructiu del termistor de resposta ràpida FP07 muntat al perfilador de microestructura.

El diàmetre màxim mesura 2.2 mm i el sensor s'ubica dins un tub metàl·lic protector obert per la part frontal on se li han practicat diversos forats a tota la longitud per poder permetre el pas de fluid per el voltant del sensor. La figura següent és una fotografia del que hi ha acoblat al perfilador.



Fig. 4.5. Microtermistor de resposta ràpida dins el cilindre perforat de protecció.

4.2.3.2. Principi de funcionament

El seu principi de funcionament es basa en la variació de la resistència del material en funció de la temperatura, així, coneixent la tensió aplicada es pot determinar la temperatura a la que es troba en funció de la caiguda de potencial en ell.

La Fig. 4.6 mostra la relació entre la resistència que ofereixen i la temperatura a la que estan sotmesos.

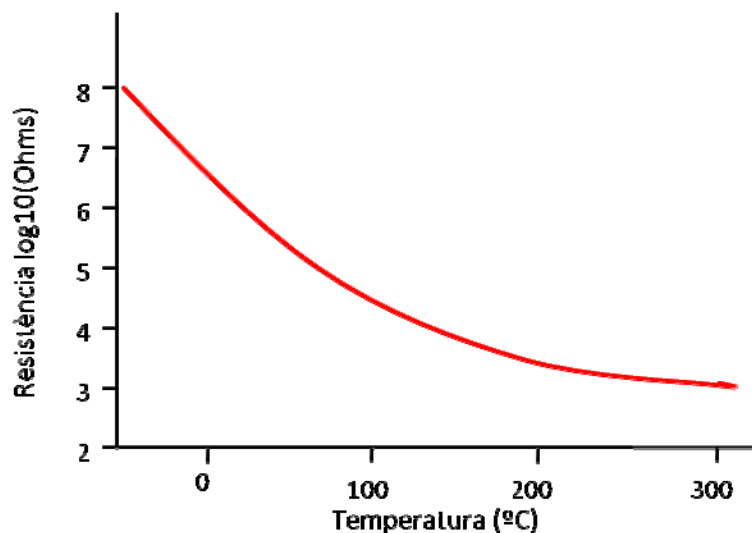


Fig. 4.6. Resposta dels transistors tipus NTC en funció de la temperatura.

Com es pot observar les variacions de la resistència és prou acusada a tot el rang de temperatures representat, fent-los ideals per a aplicacions on es requereix un temps de resposta molt ràpid.

4.2.3.3. Obtenció del valor de ϵ a partir de senyal de temperatura

Anàlogament al funcionament de la sonda de tallant (cisallament), s'obté una diferència de potencial proporcional a la temperatura a la que està el termistor, d'aquesta manera podent enregistrar les fluctuacions de temperatura que es produeixen al medi.

També és clau la disposició dels sensors de temperatura de precisió (un a la part superior i l'altre a la inferior, aproximadament en línia amb el termistor) per a poder determinar el gradient de temperatura que existeix en la zona de mesura.

De la mateixa forma que es definia ϵ a l'equació 2, es defineix el terme χ que representa la dissipació escalar (de temperatura) tal com:

$$\chi = D \cdot \frac{dT}{dx} + \frac{dT}{dy} + \frac{dT}{dz} \quad (\text{eq.4})$$

La qual considerant isotropia al medi es simplifica com:

$$\chi = 6 \cdot D \cdot \overline{\left(\frac{dT}{dz}\right)^2} \quad (\text{eq.5})$$

on: D és el coeficient de difusivitat de l'aigua i dT/dz representen les fluctuacions de temperatura enregistrades amb el termistor.

Degut a que en fluids estratificats les fluctuacions turbulentes tèrmiques i les de velocitat estan íntimament lligades, la velocitat de dissipació de la variància de les fluctuacions tèrmiques, χ , depèn de la intensitat de la turbulència i per tant de la dissipació de l'energia cinètica turbulenta, ε . Gràcies a treballs com el de Batchelor (1959), es pot estimar ε si es coneix χ a partir de l'espectre (apartat 4.4.2) de temperatura el qual té la següent forma:

$$E_B(k) = \frac{\chi_0 q^{3/2}}{D k_B^3} \left(\exp\left(\frac{-y^2}{y}\right) - \sqrt{\pi}(1 - \text{erf}(y)) \right) \quad (\text{eq.6})$$

on: $\text{erf}(y) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^y \exp(-x^2) dx$, $y = \frac{k \sqrt{q}}{k_B}$, $k_B = (\varepsilon/\nu D^2)^{1/4}$, $L_B = (2\pi/k_B)$ i q és una constant que tradicionalment val 3.9.

L'equació 6 doncs, defineix l'espectre teòric. Aquest s'ajusta a l'obtingut experimentalment tot donant valors a k_B . Un cop trobat el valor de k_B que proporciona un ajust més adequat, es pot trobar ε a partir d'aquesta variable.

Ambdós mètodes, el directe –a partir de les fluctuacions de velocitat – o l'índirecte – a partir de les fluctuacions de temperatura – són àmpliament utilitzats per la comunitat científica que treballa en turbulència en sistemes naturals.

4.2.4. Sensor de temperatura de precisió

Mentre que els microtermistors tenen la característica de tenir un temps de resposta molt petit, aquest altre tipus de sensors ofereixen valors de temperatura amb una precisió molt gran però en canvi tenen un temps de resposta relativament elevat (un ordre de magnitud superior) i per tant no poden resoldre freqüències (o estructures espacials) molt petites. En aquest sentit aquest sensor no es pas un sensor de turbulència, però cal fer-ne menció, ja que com s'ha dit, serveix de suport per obtenir dades de la turbulència.

4.2.4.1. Construcció del sensor de temperatura de precisió

L'estructura constructiva és més simple, ja que s'utilitza una barilla de material metàl·lic per fer la funció de sensor que en el termistor es duia a terme amb el material sinteritzat. Aquesta barilla s'ubica també dins un cilindre perforat que actua com a protecció. Es pot observar a la següent figura l'esquema constructiu del sensor i una fotografia del mateix dins el receptacle del que està acoblat al perfilador.

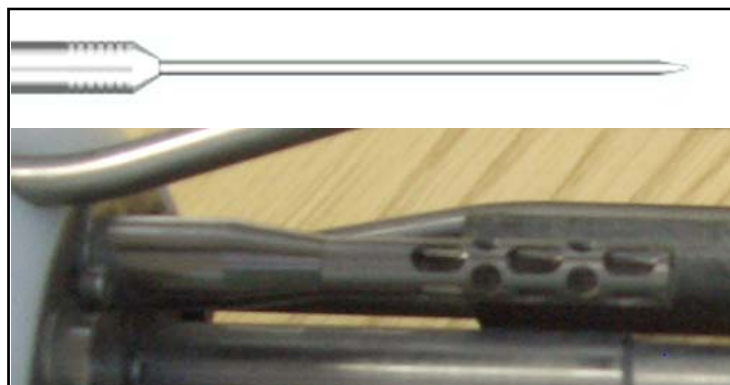


Fig. 4.7. Esquema constructiu del sensor (superior) i fotografia del conjunt montat al perfilador.

4.2.4.2. Principi de funcionament

De la mateixa forma que el microtermistor, la barilla metàl·lica ofereix una resistència o una alta en funció de la temperatura. A partir de les variacions que presenta es pot determinar la temperatura.

4.3. Assaig experimental

L'assaig experimental s'ha dut a terme a la piscina del grup VICOROB, al Parc Tecnològic de Girona en dos dies diferents (dia 03/03/2008 i dia 07/03/2008) en els quals s'han realitzat diversos transectes horitzontals mentre, entre d'altres, s'enregistraven les dades del sensor intern de vibracions que analitzarem en l'apartat 4.4.

Els aspectes que es van considerar prèviament a l'assaig, per tal de poder realitzar l'adquisició de dades correctament van ser els enumerats a continuació.

4.3.1. Control

Donat que el robot no era capaç d'avançar suficientment ràpid ($v > 0,6$ m/s) per tal de poder adquirir dades de cisallament amb la configuració del seu sistema de regulació que fan que el vehicle funcioni autònomament (i.e. mantenir profunditat, velocitat i angles d'atac vertical i horitzontal), es va decidir desactivar aquests controladors, doncs limitaven la potència subministrada als propulsors. D'aquesta forma es podia fer funcionar els motors a la potència màxima assolible.

4.3.2. Velocitat d'avanç

Tot i així, només es va aconseguir arribar a una velocitat de 0,4 m/s si bé en un futur immediat estan previstes algunes modificacions en el robot que permetran assolir la velocitat de 0.6 m/s.

Naturalment, per una velocitat de navegació superior, caldrà repetir l'estudi fet en aquest treball per estar segurs que en augmentar la velocitat el nivell de soroll es manté. Tanmateix amb una velocitat de 0,4 m/s si bé el sensor de cisallament és inoperatiu, no és pas el cas del sensor de microestructura tèrmica que, tal com s'explica a l'apartat 4.2.3.3, també permet obtenir de forma alternativa la velocitat de dissipació de l'energia cinètica turbulenta. Així doncs, l'anàlisi del soroll que es presenta en el apartat següent, ens ha de servir per veure si podem resoldre la turbulència en transectes horitzontals en base a les mesures fetes amb el sensor de temperatura de resposta ràpida.

4.3.3. Flotabilitat

El robot Ictineu està dissenyat per tenir una flotabilitat nul·la (i.e. densitat igual a la de l'aigua dolça). Per tant, l'acoblament del perfilador, tot i que també té una flotabilitat pràcticament nul·la (té un pes en aigua inferior a un quilo) fa incrementar lleugerament el pes del robot i, per això s'haurà d'equilibrar de nou tot afegint espuma a la carcassa.

Es parteix de l'experiència pròpia dels membres del VICOROB per col·locar dos tubs d'espuma d'uns 40 cm de longitud a banda i banda de l'AUV i s'acaba d'ajustar per mitjà d'uns discs petits situats on sigui necessari per equilibrar el balanç del cos a l'aigua. A la figura següent es veu la tipologia d'espuma utilitzada i la seva col·locació.



Fig. 4.8. Col·locació de les espumes (color blau) per equilibrar la flotabilitat de l'Ictineu a la piscina del grup VICOROB.

4.3.4. Equilibri

Derivat del fet descrit anteriorment, el robot no navegava a profunditat constant, i es va procedir a modificar la posició axial del perfilador. La col·locació més favorable per evitar que el robot perdés profunditat va resultar ser que la punta es situés a uns 30 cm de la part frontal del robot. Aquesta posició era més endarrerida del previst inicialment i amb la que es van fer les

simulacions. Tot i així, tal com s'ha vist en el capítol 3, la dimensió de la capa llindar en la part frontal superior del robot és prou petita com per poder operar en aquesta posició.

4.3.5. Aïllament mecànic

Tot i que la part en contacte amb el perfilador és metàl·lica (abraçadores), aquests estan units a l'estructura per mitjà d'unes tires de material elàstic per aconseguir amortiment de vibracions transmeses a través del casc del robot a l'estructura del suport que estan en contacte directe. A la Fig. 4.9 s'observa el detall de l'acoblament elàstic estructura-perfilador.



Fig. 4.9. Detall de l'acoblament elàstic entre l'estructura i el perfilador

4.3.6. Repetibilitat

Finalment, comentar que es van repetir les mesures diverses vegades en les mateixes condicions (mateix recorregut i velocitat) per a tenir unes estadístiques prou robustes per efectuar correctament l'anàlisi.

4.4. Anàlisi dels resultats obtinguts

4.4.1. Dades experimentals

Els resultats presentats en aquest capítol es basen en les dades enregistrades per el sensor de cisallament intern, les quals, tal com hem comentat, permeten determinar les vibracions a què està sotmès el perfilador degut a la navegació del conjunt (robot-perfilador) i de les vibracions transmeses degudes al funcionament dels propulsors. Més concretament, aquestes dades s'han comparat amb les enregistrades en una campanya en un embassament en què, utilitzant el perfilador en caiguda lliure, es va poder resoldre el camp turbulent i per tant, el nivell de soroll era acceptable.

A la Taula 4.2 s'identifiquen les diferents sèries de dades que s'utilitzaran pels diversos gràfics que s'aniran presentant al llarg del capítol. I que són representatives dels conjunt d'experiments realitzats el dies 3 i 7 de març durant els quals es van registrar un total de 29 transectes.

Taula 4.2. Identificació de les sèries de dades que s'analitzaran al llarg del capítol.

Identificador de la sèrie	Lloc d'enregistrament	Data
acc1	Embassament de Boadella	11/09/2002
acc2	Embassament de Boadella	11/09/2002
acclab08	Piscina grup VICOROB	03/03/2008
acclab18	Piscina grup VICOROB	07/03/2008

A la Fig. 4.1 es mostra un exemple de l'amplitud característica del senyal del sensor de vibracions internes (en unitats arbitràries) per les quatre campanyes indicades en la Taula 4.2

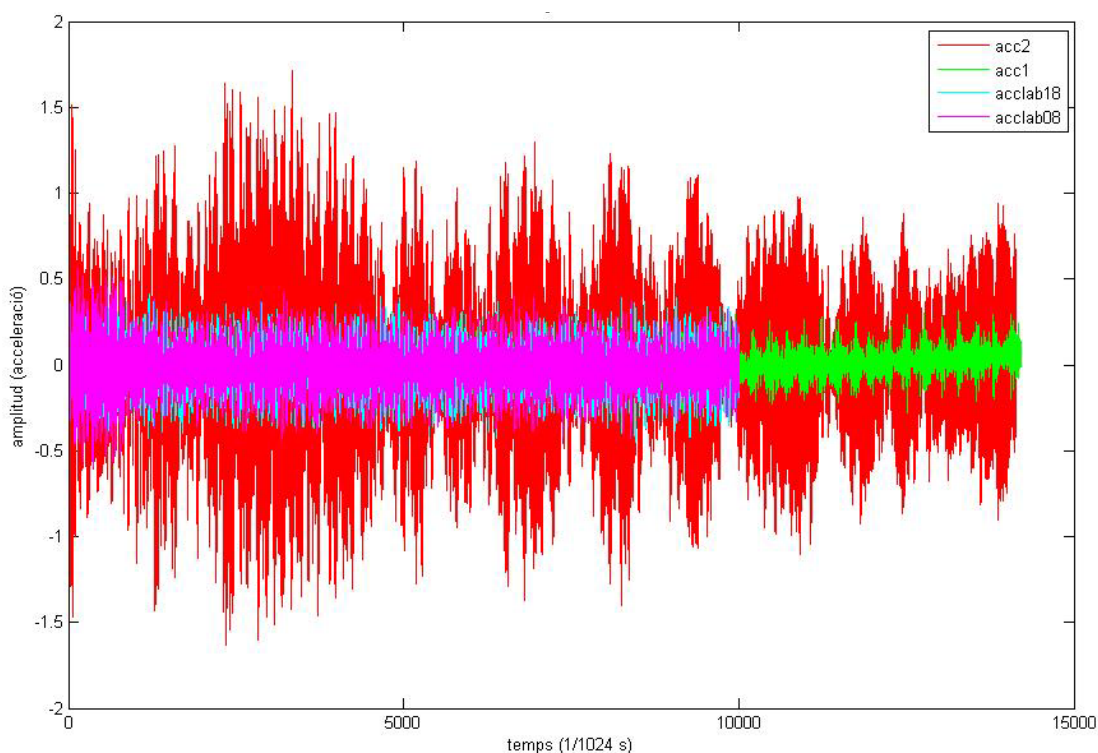


Fig. 4.10. Amplituds de les acceleracions enregistrades pel sensor de control de vibracions intern.

S'observa que les dades de les mesures de les campanyes realitzades amb el perfilador en caiguda lliure (que resultaren ser adequades per a la posterior determinació del nivell de turbulència) tenen amplituds que poden ser superiors (acc2) o inferiors (acc1) a les obtingudes en els experiment que s'han realitzat a la piscina amb el robot (acclab18 i acclab08).

Notis que les dades obtingudes amb el perfilador a dins la piscina en dos dies diferents presenten una certa similitud, indicant un comportament estable de la navegació i transmissió de vibracions.

4.4.2. Espectres de densitats

La densitat (número de punts per segon/longitud) de les dades representades en la Figura 4.10 fa difícil l'anàlisi de l'estructura del senyal pel que resulta convenient analitzar-ne l'espectre. D'una manera intuïtiva, en l'eix d'ordenades d'un espectre es representen les amplituds al quadrat de les vibracions que tenen una freqüència determinada, les quals es representen en l'eix d'abcises (en cps – cicles per segon). Notis que per analogia amb el cas d'un oscil·lador harmònic, el quadrat de l'amplitud de l'oscil·lació és proporcional a l'energia.

Per tal de construir l'espectre de densitats s'ha utilitzat el programari Matlab. Primerament s'aplica la descomposició de Fourier a la sèrie de dades enregistrada (representades a la Fig. 4.10) per tal de trobar les amplituds associades a cada freqüència, que és amb el que finalment es construeix l'espectre.

A la Fig. 4.11 es mostren els espectres per les 4 series de dades de les vibracions internes representades a la Taula 4.2.

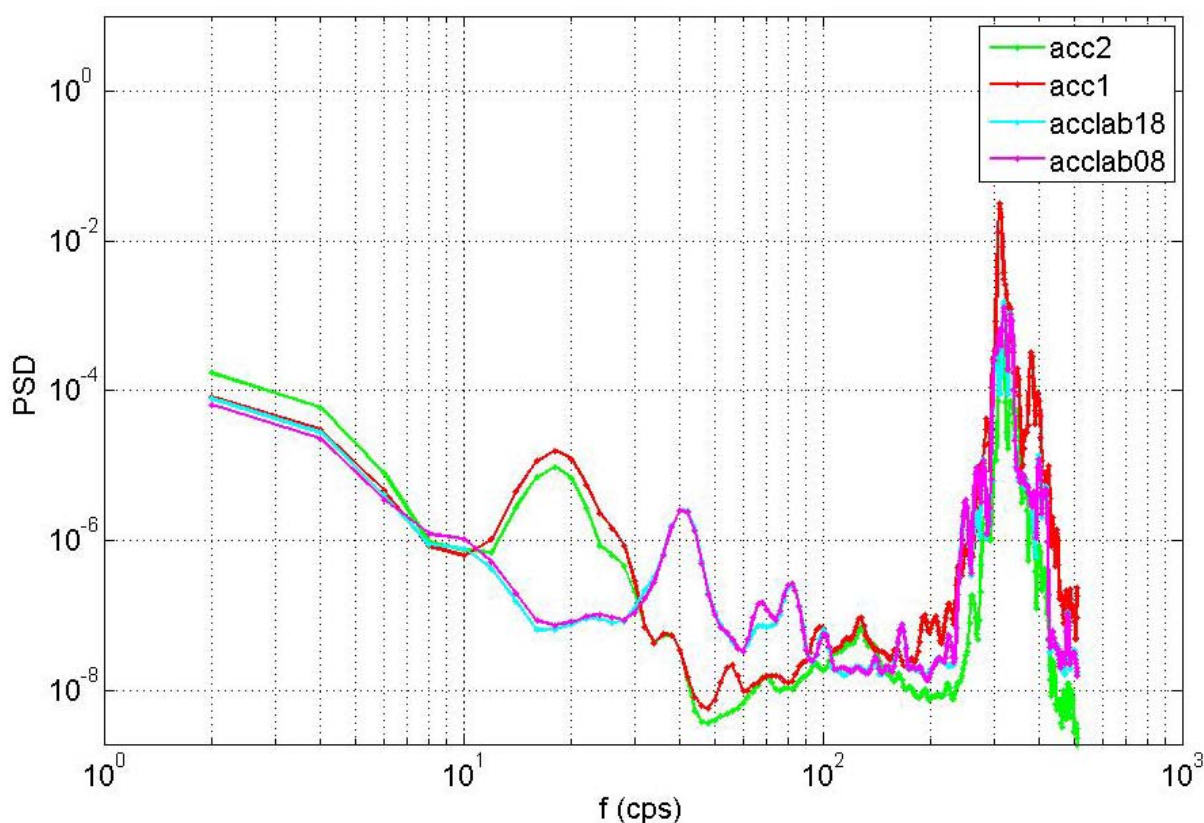


Fig. 4.11. Espectres de densitats obtinguts a partir dels valors d'acceleració.

Donat que ens interessa fer mesures en sistemes aquàtics naturals en situacions no extremes, les intensitats turbulents que esperem resoldre van des de $\epsilon=1e-10$ fins $1e-6$ W/kg. Per tant, d'acord

amb la taula A.2 de l'annex A , haurem d'arribar a resoldre les fluctuacions turbulentes fins a l'ordre d'1 cm, si es tracta de la velocitat, o fins a 0,5 cm si es tracta de la temperatura.

Considerant aquesta premissa, les freqüències superiors a 200 cps no ens interessin ja que fins i tot en cas de què el vehicle anés a 60 cm/s, a 200 cps resoldríem l'escala de 3 mm. A continuació es detallen les relacions emprades per arribar a aquesta conclusió.

$$\frac{200 \text{ cps}}{0,6 \text{ m/s}} = 333 \text{ cpm} \longrightarrow \frac{100 \text{ cm}}{333 \text{ cpm}} = 0,3 \text{ cm}$$

Pel que fa a l'origen del soroll d'altres freqüències, aquest és electrònic i tal com es veu a la Fig. 4.11 pràcticament és el mateix per les sèries obtingudes amb el perfilador en caiguda lliure i incorporat al AUV.

Amb referència a les escales llargues, s'acostuma a treballar per sota dels 50 cm havent-hi mètodes per corregir la pèrdua de senyal si és el cas (Roget et al., 2006).

Respecte a les escales intermèdies que ens interessin més, es veu com el nivell d'energia de les vibracions presenta un patró diferent pel cas de les dades enregistrades amb el perfilador en caiguda lliure i amb el robot. En el primer cas existeix un pic molt ample al voltant dels 20 cps i que es deu a la ressonància del perfilador amb els remolins que genera. Aquesta ressonància no es produeix sempre, sinó que depèn de la velocitat de caiguda, però fins i tot en el cas que es produeixi, aquest soroll localitzat es pot eliminar amb un filtre de Lanczos (Roget et al., 2006). Pel cas de les dades obtingudes a la piscina amb el robot, veiem que aquest pic desapareix, tal com era d'esperar i que el nivell de fons de soroll és comprable amb les mesures en caiguda lliure. Tanmateix en el cas del AUV existeix un nou pic al voltant de 40 cps que apareix en totes les proves. Tant el nivell d'energia com l'amplitud del pic, així com el fet de què es doni per una freqüència més elevada que amb caiguda lliure, fan que tot i que seria preferible que no es donés, aquest tipus de soroll és menys perjudicial que el que s'obté en el règim de caiguda lliure. A més, com que es tracta també d'un pic localitzat també es pot eliminar amb un filtrat de Lanczos.

A la zona de baixa freqüència ($f < 8$ cps), es donen amplituds grans tant en les dades de les dues campanyes de camp com en les obtingudes recentment a la piscina. Pel que fa a les dades de les campanyes, aquestes acceleracions s'associen a oscil·lacions del perfilador en caiguda lliure a causa dels remolins que aquest genera. Tanmateix aquest origen és inversemblant pel cas del vehicle, per això, per tal d'analitzar quin és l'origen d'aquesta desviació en les dades de l'assaig a la piscina, s'analitza l'espectre de pressió. Després d'eliminar la tendència general (per mitjà de Matlab) per si el robot mantenia una trajectòria lleugerament ascendent o descendent, s'observa que l'espectre augmenta de manera continua a partir d'una certa freqüència i cap a freqüències elevades (veure Fig. 4.12) seguint un comportament anàleg al observat en el espectre de les acceleracions. El fet que els

nivells d'energia representats en les gràfiques amb unitats arbitràries siguin comparables es tracta només d'una coincidència.

Per tant, podem interpretar que l'origen de les acceleracions observades per freqüències elevades són degudes a la navegació del vehicle. Cal notar però que durant els experiments el robot no tenia cap sistema d'estabilització activat i per tant probablement aquest soroll es podria reduir si s'activés. En aquest cas, caldria però assegurar-se que els estabilitzadors no introduïssin soroll a les freqüències altes. Pel cas que ens ocupa, tornant a la figura 4.11 veiem que el nivell de soroll amb AUV per a freqüències baixes no és pas superior al que es té en caiguda lliure.

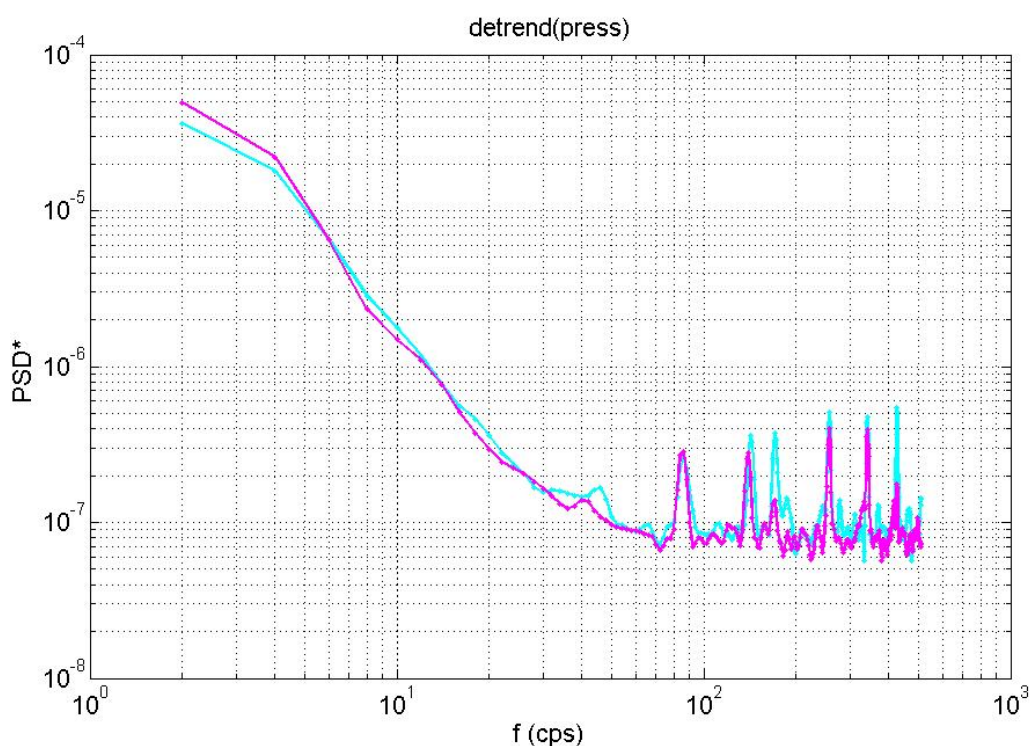


Fig. 4.12. Espectre de densitat de pressió havent corregit la tendència general (dtrend).

4.5. Conclusions de l'assaig experimental

Considerant els resultats obtinguts en l'assaig experimental, per a una velocitat d'avanç de 0,4 m/s, es pot concloure que les vibracions provocades pel funcionament dels propulsors de l'Ictineu i les induïdes per la pròpia navegació del conjunt podran ésser adequadament filtrades, doncs presenten característiques veritablement millors que les enregistrades amb el perfilador en caiguda lliure.

Aquesta velocitat de navegació es tanmateix inferior a la recomanada per un bon funcionament del sensor de cisallament però en canvi és òptima per mesures de microestructura tèrmica a partir de les quals també es pot obtenir informació sobre la turbulència en el camp de velocitats. Per tant, podem concloure que el conjunt perfilador+AUV que hem estudiat en no presentar un nivell superior al que s'observa en mesures de caiguda lliure és adequat per obtenir dades de microestructura tèrmica longitudinals per a l'estudi de la turbulència.

Pel que fa a les mesures directes del cisallant de petita escala pel que la velocitat actual del AUV no és d'adequada, cal tenir present que l'anàlisi de vibracions per a la velocitat de 0,4 m/s (aquí duta a terme) no té perquè ser vàlid pel cas de la velocitat major (0,6 m/s) que es requereix per poder adquirir dades amb el sensor de cisallament. Per tant, en un futur immediat, quan les modificacions que s'estan fent a l'Ictineu faci possible assolir aquesta velocitat de navegació, caldrà repetir l'anàlisi presentat en aquest apartat. Tanmateix, els resultats obtinguts en el present anàlisi ens permeten concloure que almenys resta oberta la possibilitat de què amb mesures de cisallament de petita escala es pugui estudiar el camp turbulent amb registres horitzontals.

5. CONCLUSIONS GENERALS

En base als resultats de la simulació numèrica es pot afirmar que la capa llindar turbulent generada per la navegació del conjunt Ictineu+perfilador no pertorba les mesures que es puguin prendre amb el sensor de cisallament per a determinar el nivell de turbulència del medi.

Per a la velocitat d'avanç actual (0.4 m/s), s'ha comprovat que les vibracions degudes a la navegació del conjunt i al funcionament dels propulsors de l'Ictineu no contaminaran les dades enregistrades per el sensors de cisallament i microestructura tèrmica, doncs aquestes són menys notables que les que s'obtenen utilitzant el perfilador en caiguda lliure, i poden ser correctament filtrades.

Tot i que la navegació de l'Ictineu s'ha controlat manualment durant l'enregistrament de dades per assolir la màxima potència permesa, es considera que els paràmetres de navegació (orientació vertical i horitzontal i velocitat constants) són suficients per a dur a terme les mesures dels diferents paràmetres d'interès.

Pel que fa a la quantificació del nivell de turbulència a partir de les dades de temperatura, amb la velocitat actualment disponible, és totalment factible i permetrà estudiar escales de barreja de fins a 3 mm, així permetent estudiar gairebé tots els nivells de turbulència pel que fa a les fluctuacions de velocitat.

Cal notar que tot i que l'Ictineu permet operar autònomament, l'acoblament del perfilador, alimentat per mitjà de cablejat, limita la seva autonomia a la longitud del cablejat d'aquest. De totes formes, aquesta és suficient per a les mesures que, en una primera etapa, es planteja el GFA.

Jordi Armengol Masferrer

Girona, 18 de Juny de 2008

6. RESUM ECONÒMIC

El cost de l'estudi de la viabilitat de l'acoblament del perfilador de microestructura MSS90 amb el vehicle autònom submergible Ictineu, considerant les despeses generals, el benefici industrial, la redacció del projecte i l'IVA és de VUIT MIL DOS-CENTS ONZE euros8.211€

Jordi Armengol Masferrer

Girona, 18 de Juny de 2008

7. 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.

Cisallament (τ): reacció que pateix un cos (o element de fluid) quan actuen un conjunt de forces que tendeixen a deformar-lo en direcció tangencial a la seva superfície. Es defineix com: $\tau = \mu \frac{dv}{dz}$ on μ és la viscositat dinàmica.

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).

ε (Velocitat de dissipació de l'energia cinètica turbulent): representa la taxa de disminució de l'energia cinètica turbulent en funció del temps. És el paràmetre utilitzat per quantificar el nivell de turbulència d'un medi. Unitats dimensionals: $[L^2/T^3]$.

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

K (Energia cinètica Turbulent - TKE): és la energia cinètica mitjana per unitat de massa associada amb els remolins generats en un flux turbulent. Aquesta energia és transmesa en forma de cascada de remolins grans a més petits fins a dissipar-se degut a la viscositat molecular. Unitats dimensionals: $[L^2/T^2]$.

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.

Microestructura: Estructura de petita escala en els camps de la temperatura, salinitat, densitat i/o velocitat. El terme fa referència a estructures dins l'oceà d'escala menor de 10 metres. Normalment associat a fenòmens de barreja.

Nodes: Punts d'unió dels elements que formen la malla. La disposició i la quantitat d'aquests determinen la densitat de la malla.

Perfil: Anomenat a una sèrie de dades preses en una sèrie de punts alineats per on es desplaça el perfilador.

Perfilador de microestructura (referit també com a perfilador simplement): Aparell utilitzat per a prendre mesures de cisallament, temperatura, turbidesa en medis aquàtics.

RANS : Acrònim de Reynolds Averaged Navier-Stokes. Mètode per a simular la turbulència usualment aplicat en situacions estacionàries. Pot variar en complexitat depenent de com es parametrizin les equacions (veure annex A, apartat A.3)

Transsecte: línia recta al llarg de la qual s'efectuen les mesures de determinats paràmetres físics per mitjà de sensors.

Turbulència: règim dinàmic d'un flux caracteritzat per no seguir un patró de moviment constant al temps, on es produeixen canvis espacials i temporals aleatoris de pressió i velocitat. És caòtic i impredecible, cosa que obliga a utilitzar eines estadístiques per al seu tractament.

Viscositat: Resistència que oposa un volum de líquid en ser deformat com a conseqüència de l'atracció molecular (cohesió). És la causa de la dissipació de l'energia cinètica turbulent als remolins de menor dimensió que es donen en un flux turbulent.

8. BIBLIOGRAFIA

- [1] Ansys Icem user guide. V11.
- [2] Batchelor, G. K. (1953). *The Theory of homogeneous Turbulence*. Cambridge University Press.
- [3] Dhanak, M. R., K. Holappa (1999). An autonomous ocean turbulence measurement platform. *Journal of atmospheric and oceanic technology*, 16, 1506-1518.
- [4] Gargett, A., T. R. Osborn, P. Nasmyth, (1984). Local isotropy and the decay of turbulence in stratified fluid. *Journal of Fluid Mechanics*, 144, 231-280.
- [5] Goodman, L., E. R. Levine, R. G. Lueck (2005). On measuring the terms of their TKE Budget from an AUV. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 23, 977 to 990.
- [6] Goodman, L. (2006). AUV Turbulence measurements in the LOCO field experiments. <http://www.smast.umassd.edu/Turbulence>. [consultat 07.03.2008].
- [7] Hernandez, E., P. Ridao, M. Carreras, D. Ribas, N. Palomeras, A. El-fakdi, F. Chung, T. Almohaya, X. Ribas, G. García de Marina, J. Massich, N. Hurtós et al. (2006). ICTINEUAUV, un robot per a competir. Institut d'Informàtica i Aplicacions. UdG.
- [8] Levine, E., R. G. Lueck (1999). Turbulence measurements from an autonomous underwater vehicle. *Journal of atmospheric and oceanic technology*, 16, 1533-1544.
- [9] Lueck, R. G. (1987): Microstructure measurements in a thermohaline staircase. *Deep-Sea Res.*, 34, 1677-1688.
- [10] Lueck, R. G., F. Wolk, H. Yamazaki (2002). Oceanic Velocity Microstructure Measurements in the 20th century. *Journal of Oceanography*, 58, 153-174.
- [11] Oakey, N. (1988). EPSONDE: an instrument to measure turbulence in the deep ocean. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 13, 124-128.
- [12] Osborn, T. (1974). Vertical profiling of velocity microstructure. *Journal of Physical Oceanography*, 4, 109-115.
- [13] Osborn, T., R. G. Lueck (1985). Turbulence measurements with a submarine. *Journal of Physical Oceanography*.
- [14] Paka, V.T., V.N. Nabatov, I.D. Lozovatsky, and T.M. Dillon (1999) Oceanic microstructure measurements by "Baklan" and "Grif", *J. Atmosph. and Ocean Tech.*, 16(11), 1519-1532.
- [15] Prandke, H. and A. Stips (1996). Investigation of microstructure and turbulence in marine and limnic waters using the MST profiler. Ispra Joint Research Center. European commission. Technical note no I.96.87.
- [16] Pujol, T. (2006). *Estudi de l'aerodinàmica del cos d'Ahmed*. PTFC. Escola Politècnica Superior. UdG.

- [17] Roget, E., I. Lozovatsky, X. Sanchez, M. Figueroa (2006). Microstructure measurements in natural waters: Methodology and applications. *Progress in Oceanography*, 70, 126-148.
- [18] Star-CCM User Guide. Versió 2.
- [19] Stewart, R.W., H.L. Grant, (1962). Determination of the rate of dissipation of turbulent energy near the sea surface in the presence of waves. *Journal of Geophysical Research* 67, 3177–3180.
- [20] Virto. L. (1996). *Mecànica de Fluids, Fonaments*. Vol. II. Edicions UPC. Barcelona.
- [21] Winkel, D. P., M. C. Gregg, T. B. Sanford (1996): Resolving oceanic shear and velocity with the Multi-Scale Profiler. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 13, 1046–1072.
- [22] White, F.M. (1983). *Mecánica de fluidos*. McGraw Hill. Madrid.
- [23] Wolk, F., R. G. Lueck (1995). TOMI Synopsis.
<http://www.rocklandocean.com/resources/TOMIsynopsis.pdf>. [consultat 07.03.2008].
- [24] Wolk, F., H. Yamazaki, L. Seurton, R. G. Lueck (2002). A new free-fall profiler for measuring bio-physical microstructure. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 19, 780-793.
- [25] Wolk, F., R. G. Lueck (2003). Tomi Synopsys. Rockland Oceanographic Services Inc.

A. INTRODUCCIÓ AL FENOMEN DE LA TURBULÈNCIA

Donat el fet que el projecte s'emmarca en la recerca dins el camp de la turbulència, és prou interessant fer una breu introducció a diferents aspectes de la dinàmica de fluids per tal de situar-nos i conèixer alguns conceptes clau per a poder realitzar una lectura més amena i assolir un major nivell de comprensió de l'estudi.

En el primer apartat es farà un breu repàs històric, que tot recordant figures importants en el camp tant teòric com experimental, anirà repassant els avenços en els models teòrics i conceptes claus per entendre el fenomen. A continuació, s'ha dedicat l'apartat A.2 a caracteritzar qualitativament el fenomen. A l'apartat A.3 es detallarà la formulació del model de turbulència utilitzat per a la resolució numèrica del cas que s'ha abordat en aquest estudi.

A.1. Breus apunts històrics

Si bé actualment, l'estudi de la Turbulència té un pes molt important en la disciplina de la dinàmica de fluids, els estudis en aquest camp es varen iniciar fa relativament poc temps.

Els noms més rellevants en l'estudi de la turbulència són Taylor, Kolmogorov, Reynolds, Prandtl, von Darman, Heissenberg, Landau, Millikan i Onsagar.

Els primers treballs sistemàtics sobre el fenomen es van dur a terme l'any 1883 per Osborne Reynolds, on s'estudiava els fluxos en conductes tancats. Va definir que el flux deixava de ser laminar quan la relació $Re=UL/v$ excedia un cert valor – on U és la velocitat mitja del fluid, L és l'escala de longitud i v representa la viscositat cinemàtica. Aquesta relació, anomenada més tard com "Nombre de Reynolds" per Sommerfeld, és adimensional i determina la similitud dinàmica de fluxos viscosos. Reynolds també va apuntar la separació de variables en una suma d'un valor mig i una fluctuació ($u_i = U_i + u'_i$), conegut com la descomposició de Reynolds, i va definir el concepte de tensió turbulenta (turbulent stress).

Ja a principis del segle XX, a partir de l'any 1921, G.I. Taylor va treballar en el que esdevingueren les bases estadístiques de la teoria de la turbulència. Entre d'altres conceptes, va introduir el de l'espectre turbulent.

Paral·lelament, Prandtl i Von Karman (estudiant seu), van desenvolupar teories semi-empíriques per la turbulència, de les quals destaca la teoria de la longitud de barreja a partir de la qual es va deduir per primera vegada el perfil (logarítmic) universal de la velocitat turbulenta.

També a principis dels anys 20, Lewis Richardson – meteoròleg britànic – va proposar que la energia cinètica turbulent és transferida dels remolins grans als petits on finalment és dissipada degut a la viscositat; teoria coneguda com *Cascada Espectral de l'energia*. Malauradament, la seva teoria va ser ignorada a la seva època i no es va considerar fins al cap de 20 anys per Kolmogorov – matemàtic rus .

Kolmogorov, generalment considerat el millor probabilista del segle XX, partint de la idea de Richardson de la cascada espectral de l'energia, va fer la hipòtesis de que a escales petites, es podien considerar les estadístiques isotròpiques i que depenien només de dos paràmetres: ν i ϵ (viscositat i velocitat de dissipació de l'energia cinètica turbulent respectivament). A partir d'aquesta hipòtesis, va definir que l'escala menor haviem de tenir una mida de $\eta=(\nu^3/\epsilon)^{1/4}$ i que a escales molt més petites que L i molt més grans que η , les estadístiques només depenien ϵ i ν no hi jugava cap paper. A partir d'aquestes hipòtesis, va determinar que l'espectre havia de ser proporcional a $\epsilon^{2/3}K^{5/3}$ on K és el nombre de cicles per metre. Aquesta llei és una de les més importants en la teoria de la turbulència i concorda amb les observacions realitzades.

Més recentment i gràcies al progrés de la tecnologia en camps com la mecànica, electrònica i tecnologia de materials, des de meitat del segle XX s'han pogut desenvolupar equips de mesura i tècniques que han permès contrastar teories proposades anteriorment i revelar noves característiques imprevistes fins al moment del fenomen.

A.2. Característiques d'un flux turbulent

Un flux és turbulent quan no segueix un patró de moviment constant al temps sinó que ho fa de forma caòtica i impredecible. Per tant, es tracta d'un fenomen determinista – la dinàmica del flux es regeix per les equacions de Navier-Stokes – i s'ha de descriure mitjançant mètodes estadístics.

Malgrat que es donen discontinuïtats a tot el sí del flux, el moviment mitjà d'aquest té una direcció i velocitat determinada, a partir de la qual es poden establir uns sistemes d'anàlisi, descripció i predicció dels efectes generals que aquest provoca.

Tal com ja s'ha introduït a la memòria, el nombre de Reynolds (NRe) s'usa per a determinar quantitativament (tot i que té un caràcter aproximat) si el flux és laminar o bé si aquest podria presentar turbulència tot tenint en compte 4 paràmetres:

- a) Velocitat del flux - V
- b) Dimensió del conducte (o bé del medi on circula el flux) - D
- c) Viscositat dinàmica del fluid - μ
- d) Densitat - ρ

Des d'una altra perspectiva, el nombre de Reynolds, que resulta en una magnitud adimensional, es calcula de la següent forma i expressa una relació entre les forces inercials i les forces degudes a la viscositat (Per NRe baixos, les forces degudes a la viscositat són més notables que les degudes a la inèrcia).

$$NRe = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (\text{eq. 0})$$

S'ha demostrat experimentalment que l'aparició del fenomen es dona amb diferents combinacions d'altres velocitats, valors grans de D , alta densitat i viscositats baixes. El valor de $NRe=2300$ es coneix com el valor de transició per a fluxos no confinats, tot i que es poden donar fluxos laminars que presenten valors majors en condicions òptimes on les distorsions del medi siguin poc influents (superfície del conducte molt llisa, amplitud d'ona de les distorsions lluny de la ressonància, etc.). Per a fluxos confinats o per altres sistemes de flux que interaccionen amb objectes diversos els números crítics són diferents.

A continuació es defineixen les següents característiques de caràcter qualitatiu, les quals són comunes als fluxos turbulents. Així doncs, per tal de qualificar un fluid com a tal, hauran de donar-se totes elles.

- a) No linealitat

Els flux turbulents són notablement no lineals. Una primera conseqüència, és que els paràmetres rellevants de no-linealitat (Nombre de Reynolds - Re , nombre de Rayleigh - Ra), excedeixen valors crítics. Petites perturbacions creixen espontàniament i el flux sol assolir un estat caòtic. En segon lloc, la no-linealitat resulta en la formació de vòrtexs. En general, els fluxos turbulents són irregulars, caòtics i impredecibles.

- b) Alta difusivitat

Degut a la mescla macroscòpica de partícules de fluid, el flux turbulent està caracteritzat per un alt índex de difusió de quantitat de moviment, temperatura, sal o altres components.

c) Vorticitat

La turbulència està caracteritzada per alts nivells de vorticitat fluctuant. Això és, la creació de remolins tridimensionals de diferents dimensions. Els remolins de major amplitud, són de l'ordre de la regió del flux turbulent; són els que contenen la major part de l'energia. Aquesta energia és transmesa dels de major a menor mida per mitjà d'interaccions no lineals, fins que aquesta és dissipada per la viscositat en els remolins de menors dimensions, els quals són de l'ordre de mil·límetres. Això implica unes variacions molt notables tant de pressió com velocitat en espai i temps.

d) Dissipació

La formació de vòrtexs transfereix energia i vorticitat a dimensions cada vegada menors, fins que els gradients són dissipats per la viscositat. La Fig. A.1 representa aquest concepte. Conseqüentment, els fluxos turbulents requereixen un aport continu d'energia per compensar les pèrdues per viscositat.

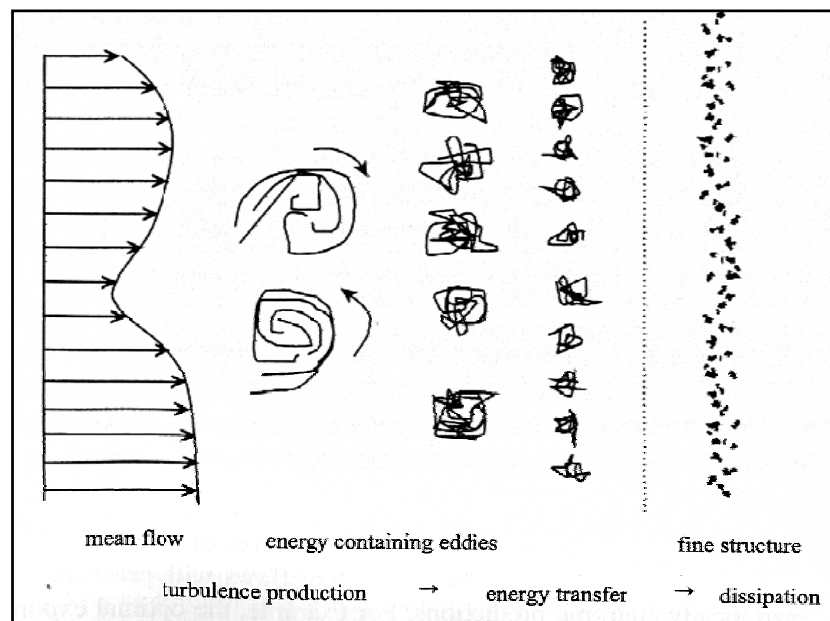


Fig. A.1. Representació esquemàtica de la transferència d'energia des del flux mitjà fins a l'escala fina.

A.2.1. Escales de barreja

En funció del nivell de turbulència del medi (ϵ) els límits mínims d'escala on es produiran fluctuacions de velocitat, de temperatura i de salinitat varien, tal com es recull a la Fig. A.2 a continuació.

Concretament la línia contínua mostra per la velocitat l'escala de Kolmogorov que és fins on s'observen les fluctuacions corresponents. La línia de punts i ratlles en canvi correspon a l'escala per

les fluctuacions de temperatura (escala de T-Batchelor) i la línia de punts per les de salinitat (escala de S-Batchelor).

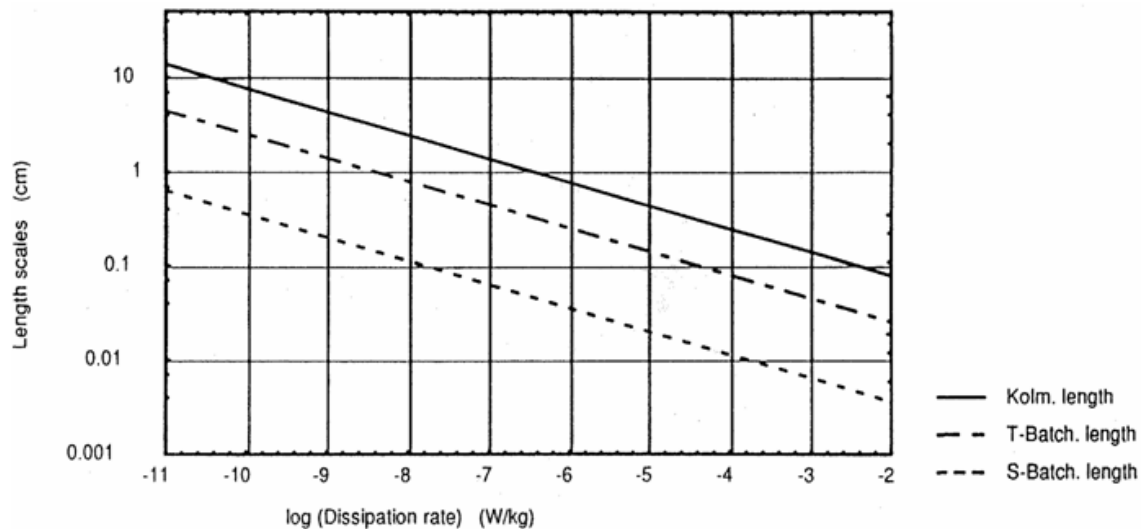


Fig. A.2. Escales mínimes on es produeixen fluctuacions de velocitat (línia contínua: escala de Kolmogorov), temperatura (punt-ratlla: escala de T-Batchelor) i de salinitat (punts: escala de S-Batchelor) en funció del nivell de turbulència del medi.

S'observa que a mida que el nivell de turbulència augmenta ($\log(\text{Dissipation rate}) = \log(\epsilon)$) l'escala mínima a la que es produeixen fluctuacions és menor. Així, per exemple, per a un valor de $\epsilon=1e-6$ W/Kg la mínima escala on es produeixen fluctuacions de velocitat determinat per l'escala de Kolmogorov (línia contínua al gràfic) seria de poc menys d'1 cm. Per aquesta mateixa intensitat turbulent, les fluctuacions de temperatura, que ve determinada per l'escala de Batchelor (T), es donarien fins a escales de 0.2 cm i les fluctuacions de salinitat (Batchelor S) fins a escales de 0.02 cm.

La longitud d'escala que es vulgui resoldre dependrà del procés a estudiar. De forma indicativa, la turbulència al interior de l'oceà presenta una velocitat de dissipació d'entre 10^{-11} i 10^{-9} W/kg, a la termoclina entre 10^{-10} i 10^{-8} W/Kg, el corrents 10^{-9} i 10^{-6} W/Kg, a la capa superficial 10^{-7} i 10^{-5} W/kg o en zones més someres i en estuaris afectats per la marea són usuals dissipacions de fins a 10^{-4} W/Kg.

A.3. Modelització del fenomen

La teoria per a estudiar i predir el comportament de fluxos turbulents és un tema extensíssim que inclou, entre d'altres, coneixements avançats de mecànica de fluids. En aquest subapartat simplement es fa un apunt al model de turbulència emprat. Per a aprofundir en el tema, referir-se a les entrades [2] i [3] de la bibliografia d'aquest annex.

La funció dels models de turbulència anomenats RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) és introduir clausures per a poder solucionar les equacions de govern dels fluxos turbulents un cop s'hi ha aplicat la descomposició de Reynolds (tal i com es veurà més endavant). Aquestes són aproximacions que s'utilitzen per tal de tenir en compte, entre d'altres, els efectes de les fluctuacions turbulentes de la velocitat en el flux mig ja que els models numèrics amb discretitzacions espacials i temporals inferiors a les escales característiques d'aquestes fluctuacions, les quals són impossibles de modelar en general, si bé és possible en casos particulars amb nombres de Reynolds petits.

Per aquests casos cal fer menció del mètode de simulació numèrica directe (DNS), no utilitzat en el present estudi, que a diferència dels models de turbulència, són capaços de predir el comportament d'un flux turbulent només a partir de les equacions de conservació (quantitat de moviment, energia interna i massa) a costa d'utilitzar increments de temps molt petits i una discretització espacial de l'ordre de les fluctuacions esmentades. La limitació a l'ús d'aquest procediment rau en el fet que la potència de càlcul disponible actualment no és suficient per complir les especificacions d'increments de temps i espai tant petits per a problemes complexos.

En aquest apartat, es farà menció al mètode de Turbulència K-Epsilon, utilitzat en la simulació numèrica realitzada al present estudi.

A.3.1. Equació de conservació de la quantitat de moviment

La quantitat de moviment és la base per a l'anàlisi dinàmica del sistema. La seva equació de conservació per a un flux incompressible és

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho_r} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\mu}{\rho_r} \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} + g_i \frac{(\rho - \rho_r)}{\rho_r} \quad (\text{eq.1})$$

on ρ representa la densitat local, ρ_r una densitat de referència, x_i la coordenada espacial i (per a $i = 1, 2, 3$), u_i la component i de la velocitat, P la pressió i μ la viscositat dinàmica molecular. A l'equació 1, s'ha utilitzat l'aproximació de Boussinesq que accepta només els canvis en la densitat en el terme de flotabilitat on g_i representa el vector de l'acceleració de la gravetat.

Els termes de l'esquerra de l'equació 1 representen la taxa de variació de la quantitat de moviment del flux incompressible (primer terme) i la seva advecció (segon terme). Els termes de la dreta de l'Eq. (1) corresponen a fonts o embornals de quantitat de moviment. D'aquests, el primer fa referència al gradient de pressions (que si augmenta en un sentit té tendència a desaccelerar el fluid, en el mateix sentit) i el segon fa referència als canvis en la quantitat de moviment degut als

efectes de la viscositat molecular del fluid. El darrer terme de l'Eq. (1) correspon al terme de flotabilitat.

Els models RANS (Reynolds Averaged Navier Stokes) es basen en la ja comentada descomposició de Reynolds que es fonamenta en la separació de la velocitat instantània del flux u_i en un valor mig U_i (promitjat sobre un interval temporal $t_2 - t_1$ de durada superior a l'escala temporal característica del moviment turbulent) i una fluctuació u_i' :

$$u_i = U_i + u_i' \quad (\text{eq.2})$$

on

$$U_i \equiv \overline{u_i} = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} u_i dt \quad (\text{eq.3})$$

d'on

$$\overline{u_i'} = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} u_i' dt = 0 \quad (\text{eq.4})$$

Així, aquesta fluctuació u' s'entén com la diferència, en un instant donat, entre la velocitat instantània u i el valor mig U , tal i com mostra la figura següent.

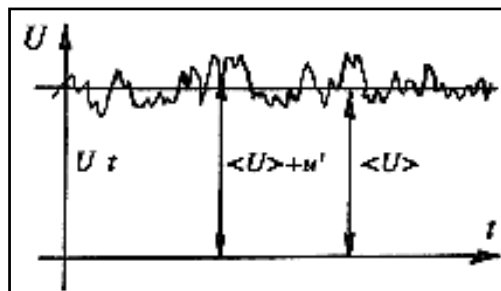


Fig. A.3. Evolució de la velocitat en un punt en funció del temps.

Si introduïm l'Eq. (2) en l'Eq. (1), obtenim l'equació d'evolució per a la velocitat mitjana U_i

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho_r} \frac{\partial P}{\partial x_j} + \frac{\mu}{\rho_r} \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_j^2} - \frac{\overline{\partial u_i' u_j'}}{\partial x_j} + g \frac{(\rho - \rho_r)}{\rho_r} \quad (\text{Eq. 5})$$

on P és la pressió mitjana i $-\overline{\rho u_i' u_j'}$ és l'anomenat tensor d'esforços turbulents de Reynolds, les components del qual representen els fluxos turbulents.

La modelització clàssica de la turbulència consisteix en acceptar que els fluxos turbulents són proporcionals als gradients de la velocitat mitjana:

$$-\rho \overline{u_i' u_j'} = \mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (\text{Eq. 6})$$

on μ_t és la viscositat turbulenta, δ_{ij} la delta de Kronecker i k l'energia (específica) cinètica turbulenta

$$k = \frac{1}{2} \sum_i u_i'^2 \quad (\text{Eq. 7})$$

Cal tenir present que la viscositat turbulenta (μ_t) no és una propietat del fluid com la viscositat molecular (μ) sinó que depèn molt de l'estat de la turbulència, podent variar significativament d'un punt a un altre en el flux i d'un moment a un altre.

A.3.2. Determinació de la viscositat turbulenta

D'entre els diferents models RANS, el model k - ε és un dels més utilitzats en la resolució de la gran majoria de problemes estudiats amb CFDs degut al seu compromís entre robustesa i requeriments computacionals. En aquests models k fa referència a l'energia cinètica turbulenta (Eq. (7)) i ε correspon a la taxa de dissipació d'aquesta energia cinètica turbulenta per unitat de massa que es determina a partir de la següent expressió:

$$\varepsilon = \frac{\mu_t}{\rho} \overline{\left(\frac{\partial u_i'}{\partial x_j} \right)^2} \quad (\text{Eq. 8})$$

En el present estudi s'ha utilitzat la versió del model k - ε anomenat realitzable amb l'aproximació doble capa, el qual presenta certs avantatges de robustesa respecte a la formulació estàndard i, d'acord amb investigacions d'altres autors, dona resultats iguals o millors en la majoria dels problemes tipus en què ambdues formulacions han estat utilitzades. En aquesta versió, a l'igual que en el model k - ε estàndard, la viscositat turbulenta s'avalua a partir de la següent expressió:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (\text{eq.9})$$

on l'energia cinètica turbulenta k i la dissipació turbulenta ε s'obtenen a partir de les seves respectives equacions d'evolució descrites més endavant. La diferència entre la versió estàndard i la

realitzable consisteix en considerar C_μ de l'equació 9 com a constant en el primer cas i com un paràmetre en funció de k i $d'\epsilon$ en la versió realitzable tal i com es descriu a continuació:

$$C_\mu = \frac{1}{4 + A_s U^{(*)} \frac{K}{\epsilon}} \quad (\text{eq.10})$$

on:

$$U^{(*)} = \sqrt{\mathbf{S} : \mathbf{S} - \mathbf{W} : \mathbf{W}} \quad (\text{eq.11})$$

essent \mathbf{S} el tensor de velocitat de deformacions (Strain rate tensor) i \mathbf{W} el tensor de velocitat de rotació (rotation rate tensor) definits com:

$$\mathbf{S} = \frac{1}{2} (\nabla \mathbf{v} + \nabla \mathbf{v}^T) \quad (\text{eq.12})$$

$$\mathbf{W} = \frac{1}{2} (\nabla \mathbf{v} - \nabla \mathbf{v}^T) \quad (\text{eq.13})$$

I el coeficient A_s a l'Eq.(10) ve determinat per:

$$A_s = 6W \quad (\text{eq.14})$$

on:

$$W = \frac{S_{ij} S_{jk} S_{ki}}{\sqrt{2} S^3}$$

on S és el mòdul del tensor de velocitats de deformacions \mathbf{S} (definit a l'equació 12):

$$S = |\mathbf{S}| = \sqrt{2\mathbf{S} : \mathbf{S}^T} = \sqrt{2\mathbf{S} : \mathbf{S}} \quad (\text{eq.15})$$

A.3.3. Equacions d'evolució

Les equacions d'evolució (o de transport) per a k i ϵ en un volum finit V de contorns A es descriuen a continuació:

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho k dV + \int_A \rho k (\mathbf{v} - \mathbf{v}_g) \cdot d\mathbf{a} = \quad (\text{eq.16})$$

$$\int_A \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \cdot d\mathbf{a} + \int_V (G_k - G_b - \rho(\epsilon + Y_M)) dV$$

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho \varepsilon dV + \int_A \rho \varepsilon (\mathbf{v} - \mathbf{v}_g) \cdot d\mathbf{a} = \quad (\text{eq.17})$$

$$\int_A \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \cdot d\mathbf{a} + \int_V \left(C_{\varepsilon 1} S \varepsilon + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} C_{\varepsilon 3} G_b - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon) \right) dV$$

on \mathbf{v}_g és la velocitat de la malla en el volum V (no nul·la si aquesta és mòbil) amb:

La **producció Turbulenta** (G_k) avaluada a partir de la següent relació:

$$G_k = \mu_t S^2 - \frac{2}{3} \rho k \nabla \cdot \mathbf{v} - \frac{2}{3} \mu_t (\nabla \cdot \mathbf{v})^2 \quad (\text{eq.18})$$

On $\nabla \cdot \mathbf{v}$ és la divergència de la velocitat i S és el mòdul del tensor de deformacions definit a l'equació 15.

La **producció de flotabilitat** (G_b) avaluada de la següent forma:

$$G_b = \beta S^2 - \frac{\mu_t}{\sigma_t} (\nabla T \cdot \mathbf{g}) \quad (\text{eq.19})$$

On β és el coeficient d'expansió tèrmica, \mathbf{g} és el vector acceleració de la gravetat, ∇T representa el vector de gradients de temperatura i σ_t és el nombre turbulent de Prandtl.

A la literatura tècnica no queda clar com es determina el coeficient $C_{\varepsilon 3}$. En el model k- ε realitzable de l'Star-CCM, aquest coeficient es calcula de la següent forma:

$$C_{\varepsilon 3} = \tanh \frac{|v_b|}{|u_b|} \quad (\text{eq.20})$$

On v_b és la component de la velocitat paral·lela a la gravetat (\mathbf{g}) i u_b és la component perpendicular a \mathbf{g} .

El terme Y_M representa la **dissipació per la dilatació** (o modificació per la compressibilitat) que es determina a partir de:

$$Y_M = \frac{2k\varepsilon}{c^2} \quad (\text{eq.21})$$

On c és la velocitat del so.

Els coeficients restants del model són els següents:

$$C_{\varepsilon 1} = \max \left(0.43, \frac{\eta}{5+\eta} \right); \quad \eta = \frac{Sk}{\varepsilon}; \quad C_{\varepsilon 2} = 1.9; \quad \sigma_k = 1.0; \quad \sigma_\varepsilon = 1.2$$

A.3.4. Aproximació per doble capa

Les equacions anteriors (16) – (17) amb (9) no s'apliquen en tot el domini de fluid. En efecte, en les regions properes a les parets on la capa llindar s'esdevé, s'utilitza l'anomenada aproximació per doble capa. Com s'ha definit a l'apartat 3.4.2.1 de la memòria, la capa llindar es pot subdividir en tres subcapes, la inferior i en contacte amb la superfície dominada pels efectes viscosos, la superior dominada pels efectes de la turbulència i una intermèdia on ambdós efectes, viscosos i turbulents, són importants. El model $k-\varepsilon$ realitzable aplica el model de Wolfstein, el qual és apropiat per fluxos on el terme de la tensió tallant (shear-driven flows) predomina enfront de la flotabilitat (en els quals s'aplicaria el model de Xu).

A continuació es defineix la formulació emprada:

En aquelles cel·les on la distància mínima del centre de gravetat a la superfície y satisfaci que

$$Re_y \leq 60$$

On

$$Re_y = \frac{\sqrt{k}y}{\nu} \quad (\text{eq.22})$$

amb $\nu (= \mu/\rho)$ la viscositat cinemàtica del fluid, la taxa de dissipació ε s'obté de forma algebraica a partir de la distància a la paret (y) amb la següent expressió:

$$\varepsilon = \frac{K^{3/2}}{l_\varepsilon} \quad (\text{eq.23})$$

On per el model de Wolfstein:

$$l_\varepsilon = C_l y \left[1 - \exp\left(-\frac{Re_y}{A_\varepsilon}\right) \right] \quad (\text{eq.24})$$

$$A_\varepsilon = 2C_l \quad (\text{eq.25})$$

$$C_l = k' C'_\mu^{-3/4} \quad (\text{eq.26})$$

amb $K'=0.42$ i $C'_\mu=0.09$.

Així, en la regió determinada per $Re_y \leq 60$, només es resol l'equació de transport per a k (Eq. (16)).

Per tal de combinar la formulació del model $k-\varepsilon$ i la del model doble capa s'utilitza la següent funció d'acoblament (blending function):

$$\lambda = \frac{1}{2} \left[1 + \tanh \left(\frac{Re_y - Re_{y*}}{A} \right) \right] \quad (\text{eq.27})$$

On:

$Re_{y*} = 60$ (valor que delimita el límit d'aplicabilitat de la formulació de doble capa) i $A=13,28$.

D'aquesta forma, el model de doble capa modifica la viscositat turbulenta (que en el model realitzable original es determinava a partir de l'equació (9)) de la següent forma:

$$\mu_t = \lambda \mu_t|_{k-\varepsilon} + (1 - \lambda) \mu \left(\frac{\mu_t}{\mu} \right)_{2\text{capes}} \quad (\text{eq.28})$$

On $\mu_t|_{k-\varepsilon}$ correspon a la viscositat turbulenta obtinguda amb el model $k-\varepsilon$ realitzable en la cel·la immediatament per sobre de $Re_y \leq 60$ i μ és la viscositat molecular. El darrer terme de l'Eq. (28), segons el model de Wolfstein es determina a partir de:

$$\left(\frac{\mu_t}{\mu} \right)_{2\text{capes}} = Re_y C_\mu^{1/4} 0.42 \left[1 - \exp \left(-\frac{Re_y}{70} \right) \right] \quad (\text{eq.29})$$

on $C'_\mu = 0.09$.

A.4. Bibliografia: Introducció al fenomen de la turbulència

- [1] Antoni M. Correig et al. 2003. Jornades Científiques. Terratrèmols i temporals de Llevant: 2 exemples de sistemes complexos. Institut d'estudis Catalans.
- [2] Kundu, P.K. 1990. *Fluid Mechanics*. Academic Press Inc. San Diego. California.
- [3] Star-CCM user guide. Versió 2.
- [4] Virto. L. (1996). *Mecànica de Fluids, Fonaments. Vol. II*. Edicions UPC. Barcelona.
- [5] http://www.giss.nasa.gov/research/briefs/canuto_01 [consultat 20.02.2008].
- [6] http://www.princeton.edu/~asmits/Bicycle_web/transition.html [consultat 15.02.2008].

B. CREACIÓ I SIMPLIFICACIÓ DE LA GEOMETRIA DE L'ICTINEU^{AUV} I PERFILADOR

En aquest annex es detallen les simplificacions realitzades a la pròpia geometria del robot i al perfilador 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 B.3) i la modelització del perfilador a l'últim capítol.

B.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 (característiques que defineixen el volum estudiat) del problema perquè aquest sigui tractable numèricament per el computadors de què es disposa. Les assumpcions fetes per a simular l'entorn (CC) del robot circulant per un medi líquid ja han estat definides i justificades a l'apartat 2.4.1.2 de la memòria.

S'han generat dos models per a l'anàlisi amb CFD: el model A que consta de la geometria simplificada de l'Ictineu i el model B, en el qual l'Ictineu porta acoblat el perfilador de microestructura.

B.2. Geometria inicial

El model de partida ha estat una representació modelada (facilitada per David Ribas a l'Octubre de 2007) amb el programari Rhino, la qual ja presentava certes diferències amb el model real, però tot i que encara s'havien de fer algunes modificacions abans d'estar apunt per exportar-lo al programa mallador, va haver de tornar-se a modelar de zero donat que la geometria presentava certs problemes de caracterització (superfícies sobreposades, mal connectades entre elles, no hi havia els volums creats adequadament, entre altres). A més a més, donades aquestes circumstàncies, resultava molt més còmode realitzar les simplificacions necessàries partint d'un model creat amb Inventor.

A la Fig. B.1 s'hi pot observar les principals diferències entre el model amb rhino i el robot real (cal dir que aquest ha sofert algunes modificacions des que es va començar a treballar en les simulacions

per CFD i per això aquí es fa referència a la configuració que tenia l'Ictineu llavors - Octubre de 2007). A continuació es destacaran les mes rellevants i la importància que poden tenir per al procés de modelització.

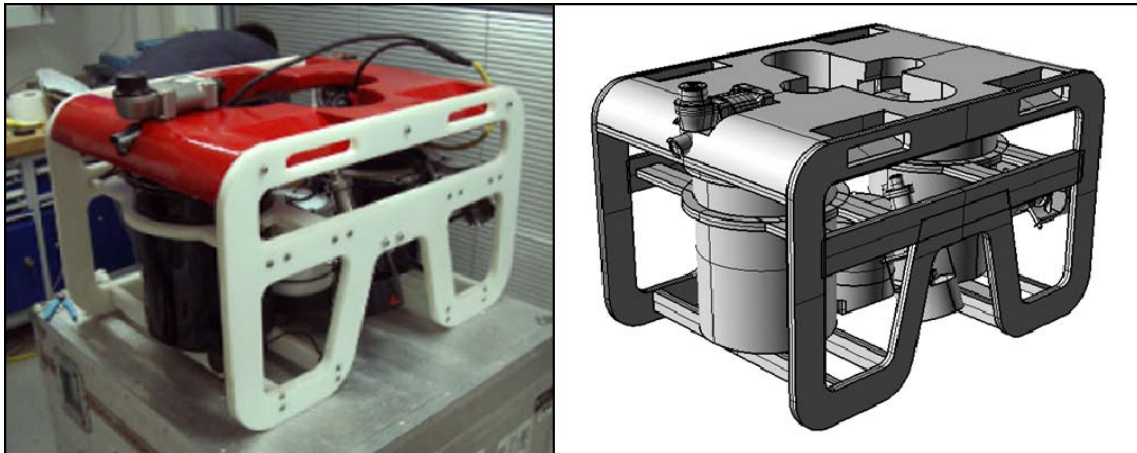


Fig. B.1. Imatge de l'Ictineu^{AUV} (esquerra) i del model creat en Rhino (dreta).

- a) Diferències entre geometria real i geometria modelada de l'element frontal superior.
- b) Manca de tot el cablejat per l'alimentació i transmissió de dades entre els diferents components del robot.
- c) Manquen alguns suports per l'element de contenció central i els propulsors.

Tot i que es presenten certes diferències, el model encara haurà de ser més simplificat per poder generar una malla i simular el seu comportament hidrodinàmic per mitjà de CFD.

B.3. Creació de la geometria de l'Ictineu amb Inventor: Simplificació i obtenció del model A.

Tot i les petites diferències esmentades, la geometria i les mides principals estaven correctament representades al model inicial, i visualitzant les diferents vistes amb Rhino es van poder treure totes les cotes necessàries per a modelar el robot amb Inventor de nou i així obtenir una geometria base per fer les modificacions necessàries per a la modelització.

En aquest punt és clau determinar el motiu principal de la simplificació. Tal i com ja s'ha esmentat repetidament al llarg del projecte, el factor determinant per a la creació del mallat és la potència dels ordinadors de què es disposa. Havent definit la dimensió necessària dels elements del canal hidrodinàmic per obtenir uns bons resultats i tenir un model que es pogués solucionar en menys de 48 hores es va definir una dimensió mínima per els elements que haurien de dividir les diferents

superfícies de l'Ictineu en 10 mm de costat (el nombre d'elements resultant es troba entre 1 i 2 milions d'elements).

Aquesta dimensió és clau per a la creació de la geometria utilitzada en el model, doncs aquesta és la dimensió mínima dels detalls que es pot capturar amb la discretització. Per tant, tots els detalls que siguin de menor mida, no podran ser capturats en la discretització. Per evitar problemes de reconeixement i facilitar el procés de discretització s'ha de simplificar la geometria original tot suavitzant les característiques menors a aquesta dimensió i 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 de l'Ictineu -subvolums continguts dins els límits d'altres, volums diferents molt propers o no disposar d'un volum completament envolvent- s'ha d'anar provant si el programa mallador és capaç de generar una malla amb les simplifications fetes. Altrament, analitzar on es donen els problemes i tornar a simplificar aquella zona determinada).

A la Fig. B.2 s'observa la geometria generada amb Inventor amb tots els detalls que recollia el model inicial (amb Rhino), la qual servirà de base per a realitzar-hi les modificacions necessàries. Aquestes s'aniran detallant més endavant.



Fig. B.2. Model inicial creat amb Inventor.

Aquest model conté totes les característiques geomètriques del model creat en Rhino a excepció de la protuberància a la part frontal (veure Fig. B.3), que per les dimensions dels cantells que presentava ja va quedar descartada inicialment.

A la mateixa figura també s'observa que el sensor que hi ha just a sobre de l'esmentada protuberància figura encaixat en un buidat del cos principal (al model amb Rhino), el qual fou omès en la modelització amb Inventor ja que el robot real no disposa d'aquest encaix.

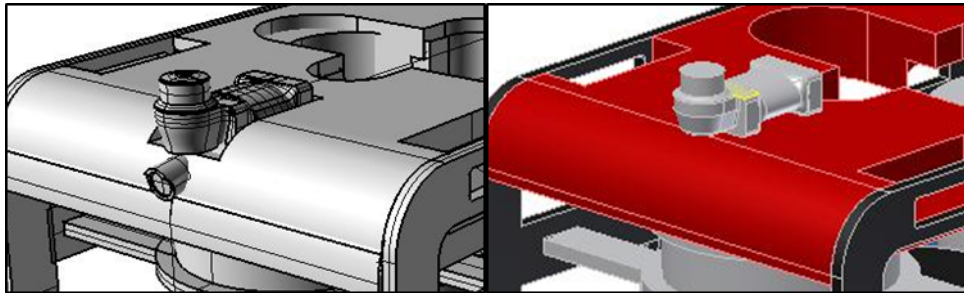


Fig. B.3. Vista isomètrica frontal de l'Ictineu.

A partir d'aquest punt, s'aniran detallant i justificant les simplificacions realitzades a la geometria respecte el model creat inicialment amb Inventor (Fig. B.2.)

a) Supressió del sensor a la part superior (veure Fig. B.4)

Donat que el sensor presenta 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. Per altra banda, considerant el cas real, ja que aquest element té una forma arrodonida a la part frontal, no influeix de manera molt considerable a la generació de la capa lliandar que es genera al seu voltant, considerant la distància a la que es trobaran els sensors del perfilador.

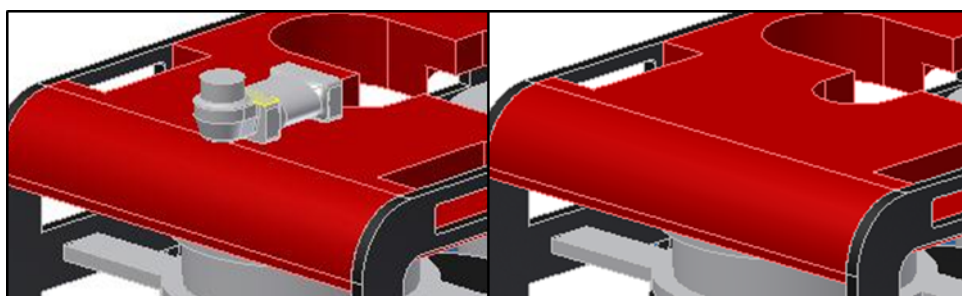


Fig. B.4. Vista isomètrica frontal amb sensor (esquerra) i sense (dreta).

b) Supressió del cos central (veure Fig. B.5)

Donat que el factor a estudiar és la capa lliandar generada a la part superior frontal del robot (que és on hi haurà els sensors del perfilador) aquest cos situat a la part central del cos tindrà

poca influència en la capa esmentada i per tant la seva supressió no influirà en els resultats obtinguts de forma notable.

c) Supressió dels propulsors (veure Fig. B.5)

Tot i la influència que aquests poden tenir en el moviment del fluid, la discretització de la geometria dels propulsors i la modelització de la seva influència en el medi serien extremadament costoses en termes de potència de càlcul. És per això que es va optar per la seva supressió.



Fig. B.5. Vista isomètrica inferior amb cos central i propulsors (esquerra) i sense (dreta).

d) Supressió dels orificis laterals (veure Fig. B.6)

Els 4 orificis (o nanses) practicats a la estructura lateral del robot, tot i no presentar característiques de dimensió inferior a la límit, 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 amb els forats es va optar per a eliminar-los i així deixar una superfície llisa i d'aquesta manera poder obtenir finalment un mallat de bona qualitat.

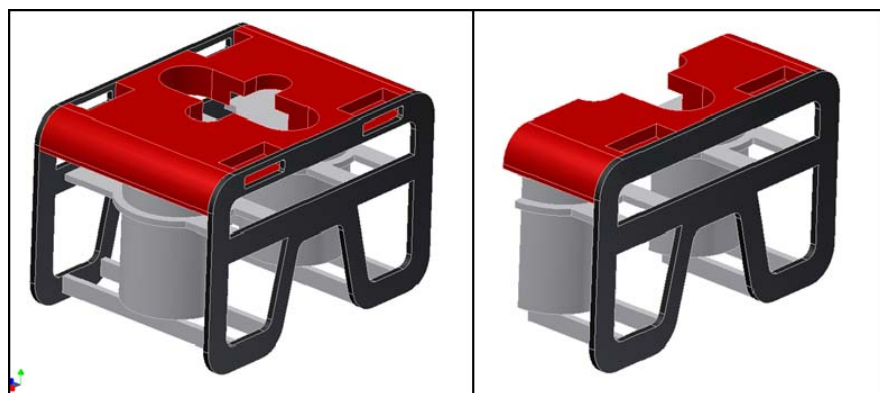


Fig. B.6. Vista isomètrica model complet amb orificis (esquerra) i meitat sense orificis (dreta).

Cal notar que a la dreta de la Fig. B.6 es mostra un model partit per la meitat (per un pla de simetria vertical que divideix el robot en el sentit longitudinal). Aquest és un recurs usat per aprofitar la potència de càlcul dels computadors, d'aquesta manera modelitzar només la meitat del volum a estudiar i poder obtenir un mallat el doble de dens i així uns resultats més acurats.

B.4. Simplificació del perfilador i obtenció del model B

Com s'ha esmentat en el projecte, s'ha realitzat una simulació del robot amb el perfilador de microestructura acoblat. La Fig. B.7 mostra la modelització del perfilador amb Inventor.



Fig. B.7. Vista isomètrica del perfilador modelat amb Inventor.

Considerant els criteris establerts al principi de l'annex, és obvi que no es pot capturar la geometria dels sensors (en negre) ni dels tubs corbats que els protegeixen amb els elements amb què s'ha de discretitzar la geometria, per tant, s'ha optat per a suprimir-los, però allargar una mica el perfil cilíndric per a contrastar la supressió d'aquests elements. El model del perfilador que finalment s'ha utilitzat en la simulació numèrica es pot veure a la Fig. B.4 on es compara amb l'original.

Tanmateix pel que fa al perfilador, cal dir que la disposició dels sensors i l'efecte que l'estela creada pel propi cos del perfilador pot tenir sobre les mesures ja ha estat considerat i tingut en compte per l'empresa subministradora i altres empreses que ofereixen perfiladors anàlegs.

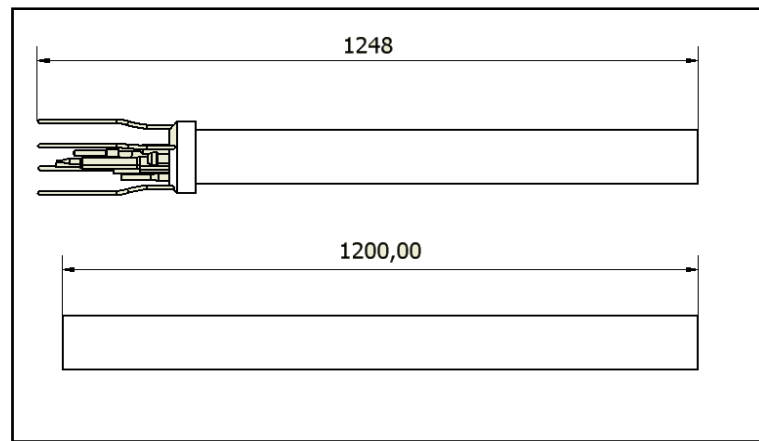


Fig. B.8. Esquema del perfilador original (a dalt) i de la simplificació (a baix).

A continuació (Fig. B.9) es mostra el segon model que s'ha estudiat amb CFD: Ictineu i perfilador acoblat per mitjà del suport¹.



Fig. B.9. Vista isomètrica de la meitat del model simplificat Ictineu+perfilador.

¹ El disseny del suport havia estat dissenyat i construït per membres del Departament de Física Aplicada de la EPS.

C. NAVEGACIÓ SUBMARINA: EVOLUCIÓ FINS ALS VEHICLES AUTÒNOMS SUBMERGIBLES (AUV'S)

Aquest annex té la finalitat de donar uns coneixements bàsics del que són els AUV's, les principals característiques i classificacions (apartat A.3) tot fent un repàs per la història dels submarins (apartat A.1) i el que representa el pas intermedi entre aquests i els AUV's (els ROV'S) a l' apartat A.2. Finalment, a l' apartat A.4 es detallen les característiques principals de l'Ictineu des d'un punt de vista físic, sense entrar en detalls de l'electrònica o programari utilitzats per al seu control.

C.1. Notes històriques sobre la navegació submarina

Els primers projectes de naus submarines van ser desenvolupades al segle XV per Leonardo Da Vinci, precursor en aquesta disciplina. Fou al cap d'uns anys, cap a 1540, quan N. Tartaglia va dur a terme els primers experiments sense resultats satisfactoris. De fet, es diu que el primer vehicle subaquàtic fou un simple cos de forma similar a una campana remolcat per un vaixell.

Fou un matemàtic anglès, William Bourne, qui a l'any 1578 deixà constància d'un disseny d'una nau tancada submergible propulsada per mitjà de remes. Consistia en una estructura de fusta recoberta de pell impermeable, la qual es podia submergir reduint el seu propi volum, contraient els laterals per mitjà de visos sens fi manuals. Bourne no va arribar a construir-lo i fou Cornelis Drebbel, inventor holandès, qui generalment és reconegut per ser el primer constructor d'un submarí.

Va ser construït i testat entre 1620 i 1624 i es submergí fins a profunditats de 4 o 5 metres durant repetides immersions al riu Thames, Anglaterra. Era propulsat per remes, els quals sobresortien del casc i eren segellats per juntes flexibles de pell. L'alimentació d'aire fresc es produïa per mitjà de tubs connectats al casc que arribaven a la superfície ja que estaven subjectats a flotadors per l'extrem superior.

Posteriorment s'anaren dissenyant noves naus submergibles, entre les que cal destacar el Turtle, dissenyat amb fins militars per l'americà David Bushnell (1775), el Nautilus, que fou desenvolupat i construït per Fulton, compatriota de Bushnell (1802). Tot i ésser tècnicament més evolucionats que els primers intents, eren propulsats manualment per molinets o una espècie de visos sens fi.

Fou el català Narcís Monturiol qui desenvolupà, després de 10 anys de proves amb propulsió manual amb el primer model, l'Ictineu I, l'acoblament d'un motor de vapor al submarí Ictineu II a l'any 1867. A la Fig. C.1 s'observa una fotografia d'una rèplica de l'Ictineu II exposat a Barcelona.

Malauradament, els seus projectes no progressaren per manca de suport econòmic tot i les seves propostes encaminades a la utilització del vehicle submergible per a fins militars que el govern Espanyol refusaren.



Fig. C.1. Reproducció de l'Ictineu II dissenyat per Narcís Monturiol

És precisament per aquesta finalitat (militar) que els submarins varen continuar evolucionant, esdevenint un factor clau a la Primera Guerra Mundial quan ja s'havia demostrat el seu potencial a la guerra de Secessió nord-americana.

C.2. ROV's: Evolució cap als AUV's

Deixant de banda la concepció tradicional que hom té dels submarins, recentment i gràcies a les noves tecnologies de control i comunicació i sistemes de propulsió més eficients, s'han pogut desenvolupar vehicles subaquàtics governats a distància, anomenats ROV's (de l'anglès Remotely Operated Vehicles).

Es van començar a desenvolupar a la dècada dels 60 per la marina nord-americana per dur a terme operacions de rescat i recuperació d'elements del fons del mar, fora de l'abast dels submarinistes. A la dècada dels 80 la indústria petrolífera li donà un gran impuls quan començà a desenvolupar ROV's especialment dissenyats per a treballar en prospeccions a zones costaneres on s'anaven descobrint nous jaciments. Entre aquests objectius de realitzar treballs d'alt risc o en condicions extremes, més recentment s'han desenvolupat infinitat de models enfocats a la investigació (oceanografia, limnologia, etc), gràcies als quals s'han assolit importants descobriments.

Els ROV's són vehicles governats des d'una plataforma superficial (normalment vaixells), a on necessàriament estan units utilitzant cert cablejat, anomenat cordó umbilical. Aquest cablejat serveix per transmetre l'alimentació al vehicle, senyals de vídeo i dades en ambdós sentits entre el vehicle i

l'operador. Es pot veure a la Fig. C.2 el vehicle Hercules^{ROV} apunt de ser llençat al mar des del vaixell base – notar la presència del cordó umbilical. Cal mencionar la opció de transmissió de dades mitjançant ones de radio, però les longituds d'ona, necessàriament molt grans per transmetre la informació en un medi submarí, requereixen antenes de gran embergadura i per tant és un mètode rarament emprat.

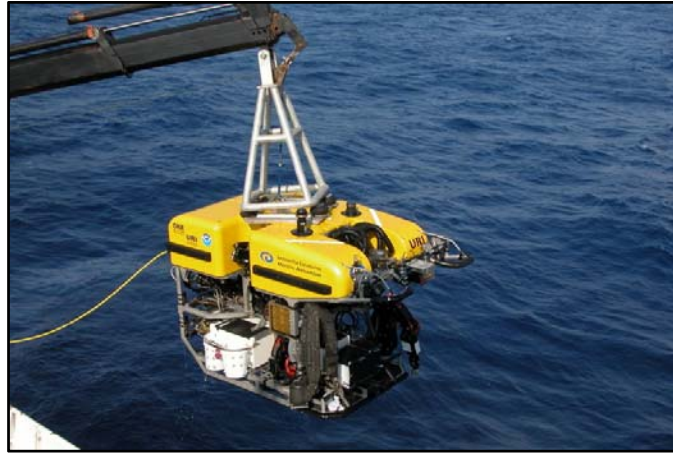


Fig. C.2. Hercules^{ROV} en el moment previ a una immersió l'any 2005 per una aplicació científica

Habitualment, tant els elements de propulsió com els diferents dispositius auxiliars són alimentats elèctricament, si bé que en determinades aplicacions on els requeriments demanen potències molt elevades, es poden alimentar per mitjà de circuits hidràulics també a través del cablejat fins al vaixell base.

Necessàriament disposen d'una videocàmera i il·luminació artificial, a més de tota mena de sensors i actuadors en funció de la tasca que hagin de desenvolupar, ja siguin treballs submarins o adquisició de dades. Una de les característiques més destacables és la seva alta maniobrabilitat.

Es pot dur a terme una divisió de les diferents tipologies de ROV's, amb el tret diferencial de l'aplicació que tenen. En una primera instància es trobaria la família anomenada "eyeballs", de dimensions i pes reduït i normalment usats per a tasques de reconeixement i la segona gran família la formen els vehicles destinats a dur a terme treballs subaquàtics, normalment de dimensions i potències molt majors.

És el primer grup que fou el precursor original dels AUV's, tot i que posteriorment s'han dissenyat també vehicles autònoms per realitzar treballs determinats.

C.3. Definició i caracterització dels AUV'S

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 Massachussets Institute of Technology a la dècada dels 70. (Vegem a la Fig. C.3 un AUV navegant a l'àrtic).



Fig. C.3. L'AUV Theseus posicionant cable a l'Àrtic

És precisament el fet de necessitar un vaixell que serveixi per transportar el vehicle i fer de base de control durant tot el temps d'intervenció que encareix enormement el cost total d'operació que ha propiciat el desenvolupament d'AUV's. 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's 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", els quals seran breument caracteritzats més endavant.

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'interès 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.

Feta una idea del concepte, anem a detallar les característiques principals dels AUV's tot veient les diferents variants que n'existeixen.

C.3.1. 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 (F_x) necessària vindrà definida per la resistència hidrodinàmica del vehicle de la següent forma (considerant moviments rectilinis):

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

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:

$$Pot = \frac{1}{2} \rho V^3 A C_D$$

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 el 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 ràtio 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 sistema 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.

C.3.2. 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 C.1. Comparació característiques de les bateries més usades 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).

Taula C.1. Comparació característiques de les bateries més usades

Tecnologia	Energia específica [Wh/Kg]	Densitat energètica [Wh/litre]	Cicles de vida	Altres característiques
Acumulador de plom	30	65	600	-pèrdua de capacitat a T ^a baixes -baix cost
Niquel-Cadmi	40	75	1500	-no sensibles a T ^a 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

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-lo les més habitualment 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. C.4 mostra una gràfica on es relaciona l'energia específica amb la densitat energètica.

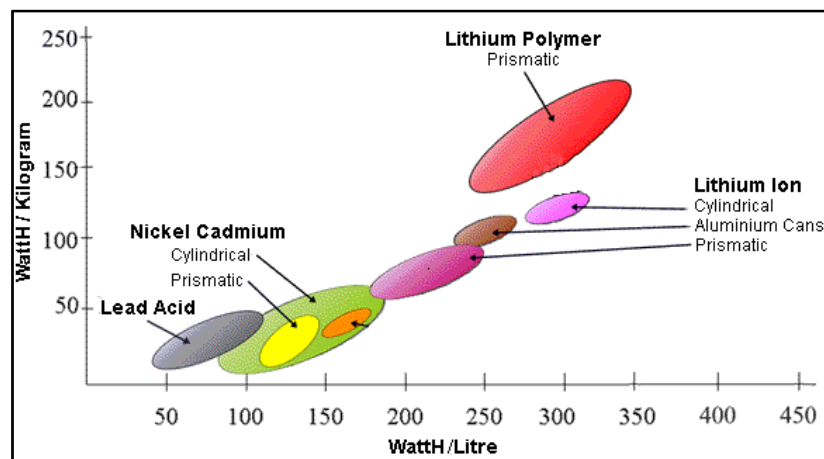


Fig. C.4. Relació energia específica (Wh/kg) amb Densitat energètica (Wh/l)

Recentment i en vehicles de grans dimensions, apart de les bateries químiques, es comencen a utilitzar les cel·les de combustible de cycle tancat, les quals poden proporcionar fins a 3 vegades més autonomia que una bateria de liti-lo. També s'ha desenvolupat un AUV alimentat per energia solar.

C.3.3. 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:

- USBL (Ultra Short Baseline system)
- SBL (Short Baseline system)
- 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.

C.3.4. 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.

C.3.5. 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 kilòmetres) 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 tan aerodinàmica, però disposarà de més elements de propulsió per tal d'obtenir els graus de llibertat requerits. Vegem a la Fig. C.5 dues tipologies extremes de AUV, a la dreta l'Ictineu^{AUV} que pertanyeria al segon grup aquí descrit i a l'esquerra el GAVIA^{AUV} que pertany al primer grup i disposa d'una característica comuna en els vehicles d'aquest estil: la modularitat.

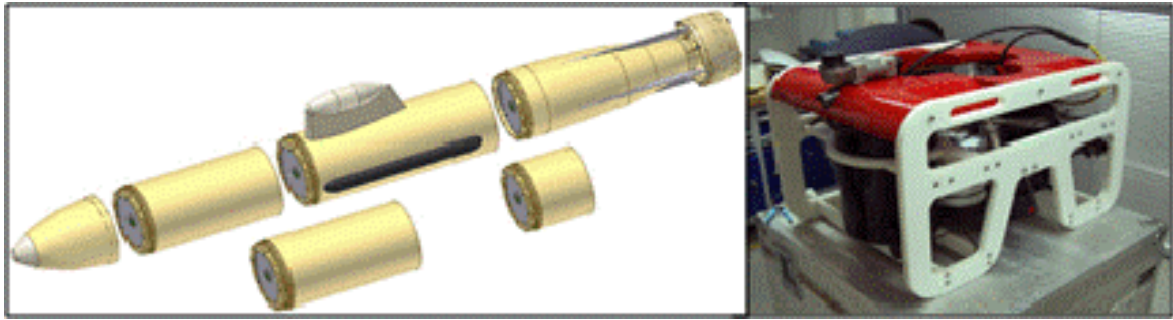


Fig. C.5. Esquerra: Gavia^{AUV} de tipologia torpede modular. Dreta: Ictineu^{AUV} - UdG

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.

El disseny modular del vehicle GAVIA, proporciona molta flexibilitat, tot permetent carregar els elements de mesura adequats en cada missió tot optimitzant el sistema en cada cas concret.

C.3.6. 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 duïen a terme per submarinistes o ROV's. Solen tenir geometries menys hidrodinàmiques i potències i dimensions molt majors.

C.4. ICTINEU^{AUV}

Tot i que durant el present annex s'han fet diverses referències a l'Ictineu, en aquest capítol es resumiran aquestes i d'altres característiques del robot submarí que centra el projecte. Cal tenir present que s'han realitzat algunes modificacions a l'Ictineu des que es va iniciar el projecte. A la descripció aquests canvis no són contemplats, així detallant l'estat de l'Ictineu de l'Octubre de 2007. Les modificacions realitzades fins al moment són llistades al final del capítol.

ICTINEU^{AUV} ha estat dissenyat amb una arquitectura clàssica de tipus *open frame* que facilita la seva construcció i manteniment.

El robot disposa de quatre propulsors, dos horitzontals per a la direcció (moviment en l'eix x i rotació al voltant de l'eix z), i dos verticals orientats en forma de V invertida que el permeten moure verticalment (eix z) i transversal (eix y). Per construcció, el centre de gravetat està més baix que el centre de flotabilitat, assegurant una estabilitat passiva de les rotacions respecte els eixos x i y. Dos cilindres estancs (color negre a la imatge) acomoden l'electrònica i les bateries.

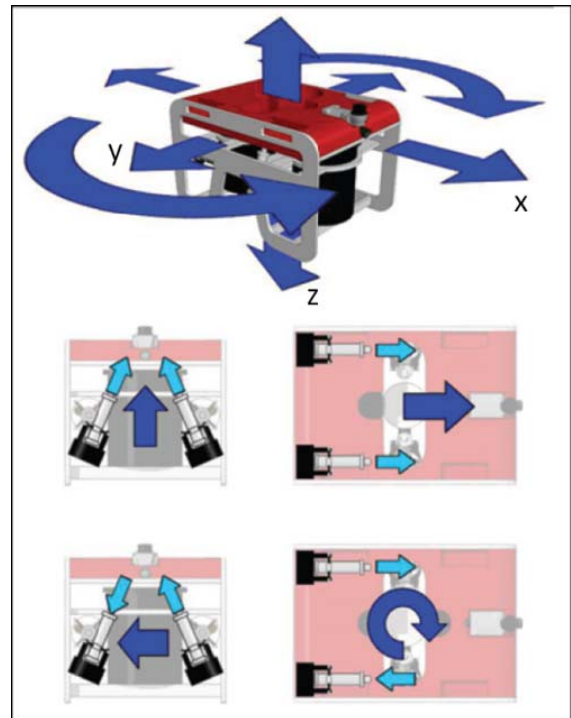


Fig. C.6. Representació graus de llibertat a l'Ictineu.

El sistema informàtic està basat en dos ordinadors connectats a través d'una xarxa *Ethernet*. El primer ordinador està dedicat bàsicament a albergar el sistema de control, mentre el segon s'encarrega principalment dels sistemes de visió visual i acústics. El sistema operatiu utilitzat és la distribució Gentoo de Linux. La taula C.2. recull les característiques principals del AUV:

Taula C.2. Característiques IctineuAUV

Dimensions	74 x 47 x 53 cm
Pes en sec	≅ 50 Kg
Umbilical	<i>Ethernet</i> , alimentació
Graus de Llibertat	4 (<i>Surge, Sway, Heave, Yaw</i>)
Maquinari	PC-104 / Via C3 @ 1Gz
Programari	GNU/Linux + RTAI; CORBA-RT ACE-TAO
Sensors	<i>Miniking Imaging Sonar; Argonaut DVL; INS MTi de XSens Technologies;</i> càmera submarina
Autonomia	<i>2h aprox</i>
Profunditat max.	<i>50 m</i>

Les aplicacions principals a les que està destinat actualment consisteixen en fer inspeccions submarines a preses, ports i missions en aigües costaneres poc profundes.

Modificacions recents

El llistat de modificacions que s'ha fet a l'Ictineu des de l'Octubre del 2007 quan vaig rebre la geometria en 3D són els següents:

S'ha canviat el nombre de propulsors: abans n'hi havia 4 i ara n'hi ha 6: 2 de verticals i 4 al pla horitzontal girats 45° respecte l'eix Z (en robòtica submarina l'eix Z és el que s'utilitza per mesurar la profunditat).

S'ha afegit un nou sensor anomenat USBL (Ultra-Short Base Line). Bàsicament és un sensor format per 2 components (el transciever -situat aprop de la superfície- i el transponder -col·locat al robot-) que es comuniquen entre ells per tal d'obtenir la seva posició relativa, i així poder conèixer la localització del robot sota l'aigua (un GPS no funciona dins d'aigua). El transponder, que és un element cilíndric col·locat a la part posterior del robot, és l'element d'interès, doncs modifica la geometria externa del robot. De totes formes, com s'ha comentat anteriorment, la part posterior no té influència en la dimensió de la capa lliandar generada a la part frontal. D'aquesta manera, l'anàlisi realitzat és igualment vàlid.

C.5. Bibliografia: Navegació Submarina

- [1] Carreras, M., N. Palomeras, P. Ridao and D. Ribas (2007). 'Design of a mission control system for an AUV', International Journal of Control, 80:7, 993 – 1007
- [2] Hernandez, E., P. Ridao, M. Carreras, D. Ribas, N. Palomeras, A. El-fakdi, F. Chung, T. Almohaya, X. Ribas, G. García de Marina, J. Massich, N. Hurtós et al. (2006). ICTINEUAUV, un robot per a competir. Institut d'Informàtica i Aplicacions. UdG.
- [3] http://www.ise.bc.ca/design_WhatIsAnAUV.html [consultat 10/02/2008]
- [4] <http://www.rov.net> [consultat 19/02/2008]
- [5] http://en.wikipedia.org/wiki/Autonomous_underwater_vehicle [consultat 10/02/2008]
- [6] http://en.wikipedia.org/wiki/Intervention_AUV [consultat 21/02/2008]
- [7] <http://www.escolar.com/lecturas/temas-varios/submarinos.html> [consultat 29/01/2008]
- [8] <http://www.cervantesvirtual.com/servlet/SirveObras/bc/01826418650148206322257/p0000000.htm> [consultat 29/01/2008]
- [9] http://en.wikipedia.org/wiki/Underwater_vehicles#History_of_submarines [consultat 19/02/2008]
- [10] <http://www.hydro-international.com/productsurvey/id4-AUVs.html> [consultat 23/02/2008]
- [11] <http://www.jamstec.go.jp/e/about/equipment/ships/urashima.html> [consultat 23/02/2008]

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 Icem, utilitzat per a la discretització de la geometria, a l'Star-CCM+, que és el programa de CFD utilitzat i al programari necessari per a l'adquisició de dades, tot ometent el programa de CAD 3D Inventor, utilitzat per a la creació de la geometria i Matlab utilitzat per al tractament i visualització dels resultats de l'assaig experimental, doncs aquest programes ja són prou coneguts dins l'àmbit enginyeril.

D.1. Ansys Icem

Aquest és el programari utilitzat per a la discretització de la geometria (es tracta del pre-procès de la simulació numèrica). La versió utilitzada és v11.

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 (e.g. *.igs).

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 llegeix amb el programa de càlcul.

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

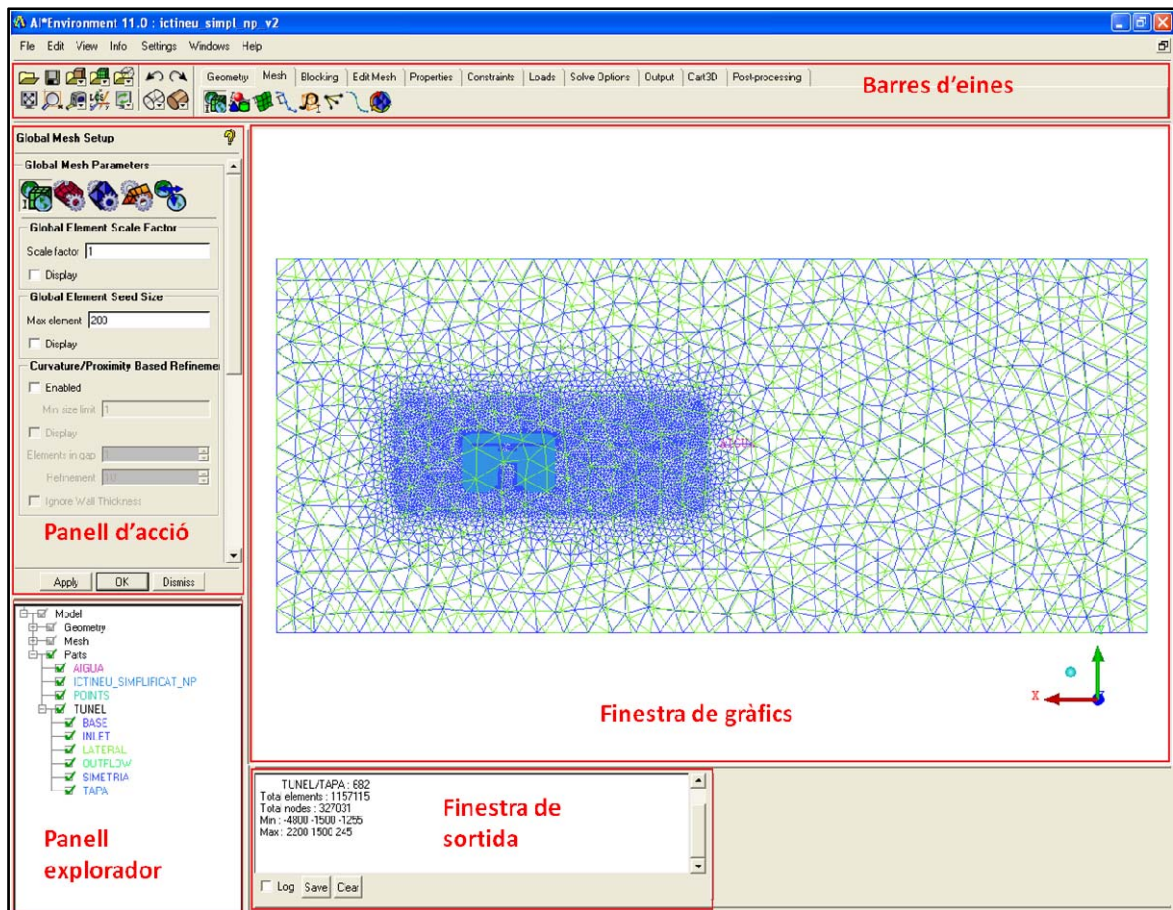


Fig. D.1. Interfície gràfica del programa Ansys Icem.

El **panell explorador** és la part on es pot veure l'estructura de les diferents parts que formen part del model geomètric i mallat, així com activar i desactivar la seva representació visual.

La **barra d'eines** s'estructura en pestanyes per les diferents accions que es poden dur a terme al programa (creació de geometries, creació de mallat, edició de mallat...). En clicar una pestanya apareixen totes les accions que es poden dur a terme i automàticament s'obre un **panell d'acció** on definir les característiques o propietats de l'operació que es vol realitzar.

El **finestra de sortida** és on el programa escriu la informació important per a l'usuari. Des de missatges d'error, com respostes a accions que se li han encomanat.

A la **finestra de gràfics** és on es visualitzen gràficament la geometria i els resultats obtinguts.

La **barra d'eines** superior serveix (apart de realitzar les tasques habituals d'un programa informàtic) per a controlar la simulació (i.e. iniciar, parar) i opcions de visualització i mesura.

D.2. Star CCM+

El programari Star-CCM+ és el motor de càlcul per a solucionar problemes de mecànica de fluid de forma numèrica. La versió utilitzada ha estat v2.10.013.

Aquest programa engloba els apartats de càlcul i post-procés del conjunt global de la simulació numèrica, doncs apart de solucionar les equacions de balanç requerides per a un problema fluidodinàmic, segons els models definits per l'usuari, també ofereix una interfície gràfica molt agradable que facilita i agilitza la visualització dels resultats.

Tot i que el programa ofereix certes eines per mallar, es té un control major utilitzant programari específic per a tal fi (com Ansys Icem) i important la malla generada en aquest altre programa.

A continuació es definiran breument les diferents àrees d'interès d'aquesta interfície, prestant especial atenció a les característiques que han hagut de ser utilitzades per a la simulació numèrica.

La següent figura mostra la interfície principal del programa amb les principals parts identificades.

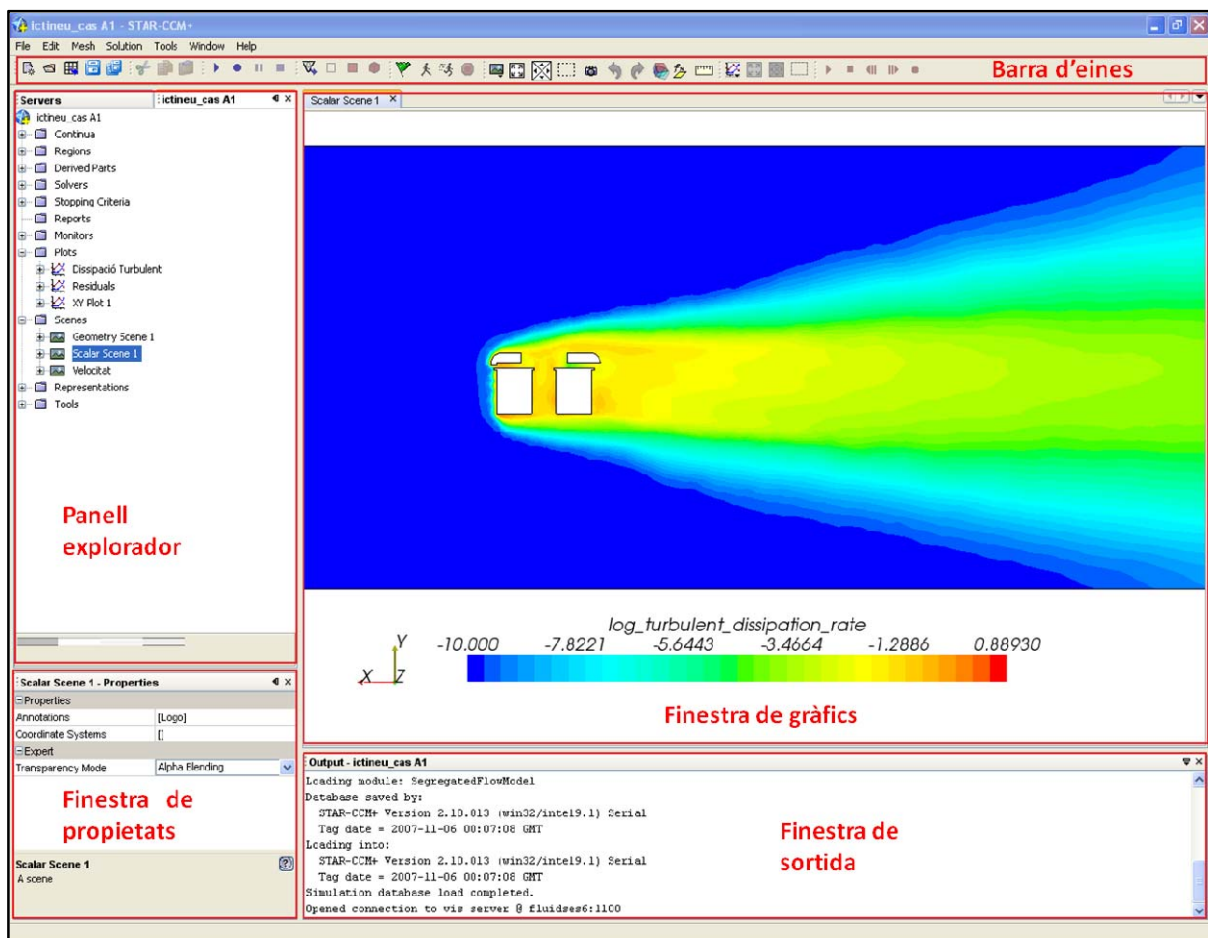


Fig. D.2. Interfície gràfica del programa Star-CCM+.

El **panell explorador** és la part on es defineixen totes les condicions de la simulació (models utilitzats, condicions de contorn, condicions inicials, criteris de convergència) a més de les característiques de les visualitzacions (paràmetres escalars o vectorials i elements auxiliars com plans o line-probes a on representar els resultats).

La **finestra de propietats** és la zona que s'activa en seleccionar un determinat component del panell explorador, per tal de poder definir les seves característiques particulars.

El **finestra de sortida** és on el programa escriu la informació important per a l'usuari. Des de missatges d'error, com respostes a accions que se li han encomanat (e.g. comprovar la validesa d'una determinada malla), o els valors dels residuals durant el procés iteratiu d'una simulació numèrica.

A la **finestra de gràfics** és on es visualitzen gràficament la geometria i els resultats obtinguts.

La **barra d'eines** superior serveix (apart de realitzar les tasques habituals d'un programa informàtic) per a controlar la simulació (i.e. iniciar, parar) i opcions de visualització i mesura.

La **barra de menús** conté les pròpies pestanyes d'edició, una que permet actuar sobre el mallat, i controls alternatius a la barra d'eines de la simulació.

D.3. Programari d'adquisició de dades del perfilador

El programari utilitzat per a l'adquisició de dades, proporcionat pel fabricant del perfilador, ha estat el SST Standard Data Acquisition rev.1.81.

El programa recull les senyals enregistrades pels diferents sensors de què disposa el perfilador en un fitxer de text normalitzat (una sèrie de dades, i.e. columna per cada sensor). Aquest conté les dades que posteriorment són tractades amb Matlab per a analitzar els resultats obtinguts. La figura a continuació mostra una captura de pantalla del programa en el moment de l'adquisició de dades.

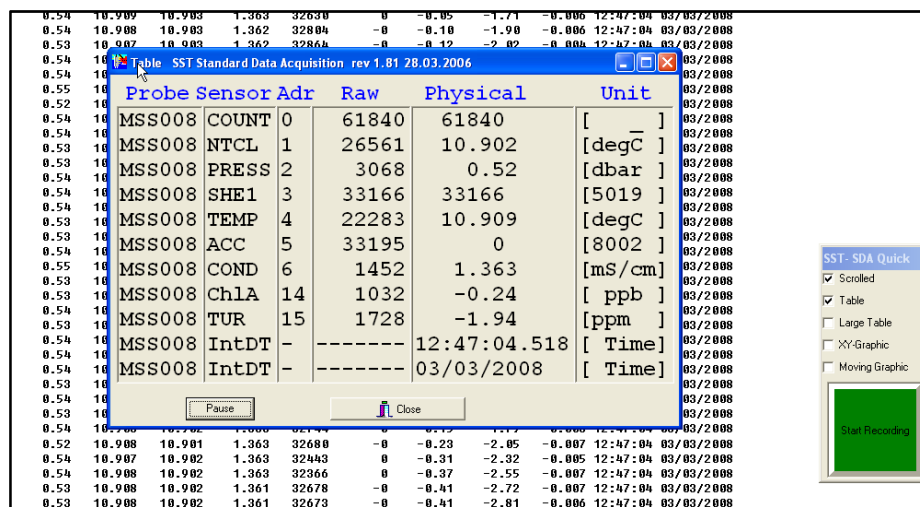


Fig. D.3. Captura de pantalla del programa SST Standard Data Acquisition en un moment de l'enregistrament.

El programari també proporciona unes gràfiques d'evolució contínua per tal de visualitzar diferents paràmetres desitjats a temps real d'una forma més intuïtiva. La Fig. D.4. mostra un gràfic on es visualitza la temperatura (de precisió) i el senyal de cisallament.

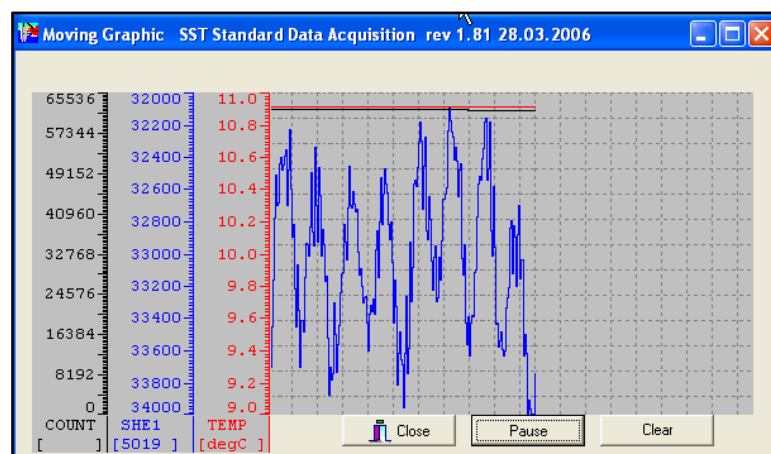


Fig. D.4. Gràfic a temps real de les variables d'interès.

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:

$$\int_S \vec{v} \cdot \vec{n} dS = 0 \quad (\text{eq.1})$$

On S és la superfície que envolta el volum estudiat, \vec{v} és la velocitat en la direcció normal a la superfície per cada punt (\vec{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 (\vec{v}):

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

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

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

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:

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

On els primer terme de la dreta correspon a la taxa de variació de l'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 a 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 edevé:

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

Aquesta és l'equació que es discretitza 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.

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

on F és el flux associat a la variable U, Qs representa les possibles fonts de U en la superfície del volum i Qv 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:

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

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

$$\iint_S \vec{F} d\vec{S} = \sum_{\text{vores}} (\vec{F} \cdot \vec{S}) \quad (\text{eq.9})$$

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

Considerant que:

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

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):

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

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 UT.	SUBTOTAL
Aprenentatge ús Star CCM	20	hores	0	0 €
Aprenentatge ús Ansys Icem	20	hores	0	0 €
Recerca informació (llibres, internet i altres)	40	hores	20	800 €
Creació geometria 3D	10	hores	20	200 €
Amortització programari disseny (maquinari inclòs)	10	hores	25	250 €
Generació mallat (Ansys Icem)	20	hores	20	400 €
Simulacions numèriques (Star-CCM)	80	hores	25	2.000 €
Amortització programari específic simulació numèrica (maquinari inclòs)	30	hores	25	750 €
Utilització Ictineu ^{AUV}	10	hores	50	500 €
Utilització instal·lacions grup VICOROB	10	Hores	40	400 €
Personal tècnic del grup VICOROB	10	hores	20	200 €
Tractament de les dades experimentals	20	Hores	20	400 €
Redacció	50	hores	20	1.000 €
SUBTOTAL ACUMULAT				6.900 €
13 % DESPESES				897 €
6% BENEFICI INDUSTRIAL				414 €
TOTAL				8.211 €