



EPS

Escola Politècnica
Superior

Projecte/Treball Fi de Carrera

Estudi: Enginyeria Industrial. Pla 2002

Títol: Creació d'un model de simulació pels propulsors del robot submarí Girona 500 mitjançant CFD

Document: 1. Memòria

Alumne: Maria del Carmen Luque Sarmiento

Director/Tutor: Lino Montoro

Departament: Eng. Mecànica i de la Construcció Industrial

Àrea: Mecànica de fluids

Convocatòria (mes/any): juny / 2013

Índex

1. INTRODUCCIÓ	1
1.1 Antecedents	1
1.2 Objectiu	1
1.3 Abast.....	2
2. DESENVOLUPAMENT DEL PROJECTE.....	3
3. MODEL TEÒRIC	6
4. ANÀLISI EXPERIMENTAL.....	9
5. MODEL DE SIMULACIÓ	12
5.1 Pre-procés	12
5.1.1 Geometria del sòlid.....	12
5.1.2 Geometria del túnel d'aigua.....	13
5.1.3 Mallat	14
5.1.4 Mallat del sòlid.....	16
5.1.5 Mallat del túnel d'aigua	17
5.2 Procés	18
5.2.1 Configuració del túnel d'aigua.....	18
5.2.2 Configuració del sòlid	18
5.2.3 Configuració de les cares de contacte.....	19
5.3 Post-procés.....	20
5.3.1 Resultats analítics pel model Seaeye de 3 pales	20
5.3.2 Resultats gràfics pel model Seaeye de 3 pales.....	21
5.3.3 Resultats analítics pel model Kaplan Ka440	22
5.3.4 Resultats gràfics pel model Kaplan Ka440.....	23
6. RESUM DEL PRESSUPOST.....	24
7. CONCLUSIONS.....	25
8. RELACIÓ DE DOCUMENTS.....	27
9. BIBLIOGRAFIA	28
A. ANNEXOS.....	29
A.1. Geometria	29
A.2. Equacions	30

A.3. Open water diagram	31
A.4. Matlab	31
A.5. Equacions polinòmiques	32
A.6. Taula de coeficients.....	33
A.7. Mallat	34
A.8. Configuració amb ANSYS.....	37
A.9. Post-procés.....	39
A.10. Fotografies	43
A.11. Estudi econòmic: estat d'amidaments	45
A.12. Estudi econòmic: pressupost	46
A.13. Estandardització del procés	48

1. INTRODUCCIÓ

1.1 Antecedents

El grup de recerca ViCOROB crea l'any 2009 el robot submarí "Girona 500", un vehicle submarí amb capacitat per a funcionar amb total autonomia durant vuit hores.

Aquest vehicle, equipat amb un braç mecànic, permet recuperar objectes del fons marí, rastrejar el fons marí per a elaborar mapes, fer tasques de manteniment... tot fins a una profunditat de 500m. (Veure fotografies a l'annexA.10).

Per tal de mantenir una autonomia tan elevada, l'eficiència del motor i els propulsors ha de ser molt alta i és per això que s'arriba a un acord entre el grup de recerca GREFEMA i ViCOROB per estudiar els propulsors de pales que utilitza a l'actualitat el robot Girona 500, de forma que es pugui crear un model numèric que permeti estudiar qualsevol propulsor que es vulgui fer servir sense necessitat de fabricar-lo, comprar-lo o muntar-lo.

Fins a l'actualitat, els càlculs sobre l'eficiència dels propulsors que utilitza el robot (model "Seaeye" de 3 pales) s'ha fet a partir de dades experimentals, a partir d'una estructura amb braç de palanca amb un dinamòmetre per a mesurar la força a l'eix del propulsor submergit a la piscina del CIRS (centre d'investigació en robòtica submarina, veure Fig. 48 i Fig. 49 de l'annexA.10) i un multímetre per a mesurar les dades de voltatge i intensitat del motor.

1.2 Objectiu

L'objectiu del present treball és el de crear un model numèric de simulació amb el programari Workbench, CFD d'ANSYS per tal de poder recrear qualsevol model de propulsor que es vulgui emprar en un futur o ja s'hagi emprat anteriorment. La creació d'un model numèric vàlid permetrà simular la utilització d'un propulsor qualsevol i analitzar qualsevol dada necessària sense necessitat de fabricar o comprar el propulsor, estalviant en costos de compra o fabricació, a més d'evitar un muntatge experimental que pot no ser del tot fiable.

En resum, amb el model numèric s'estalviaran costos, temps i errors derivats de l'extracció experimental de dades (veure Fig. 50 de l'annexA.10).

Amb la creació d'un model numèric validat es tractarà d'estandarditzar el procés de simulació per tal de poder ser utilitzat per a qualsevol persona que no necessàriament conegui el programari CFD d'ANSYS, però que sigui capaç d'extreure les dades necessàries per a realitzar els càlculs que pertoquin.

1.3 Abast

S'ha escollit el programari Workbench d'ANSYS, concretament l'anàlisi en CFD, com a software de simulació, ja que permet simular processos complexos de dinàmica de fluids de forma computacional.

Disposem de la geometria dels propulsors a estudiar en format *.iges, format compatible amb la importació de geometries 3D de CFD. D'una banda, el robot Girona 500 treballa actualment amb el propulsor "Seaeye" de tres pales, amb el que s'han fet proves de forma experimental i s'han obtingut les dades que han permès estudiar el seu comportament i eficiència.

D'altra banda, es disposa d'un prototip de turbina Kaplan Ka440 de quatre pales realitzat amb impressora 3D, amb el que no s'han realitzat proves de forma experimental. D'aquest últim model disposem d'informació teòrica, amb dades normalitzades a partir dels anomenats assajos en aigües obertes (*open water test*).

Es tractarà, doncs, de crear un model numèric amb el model de propulsor Seaeye de tres pales que ens permeti comprovar la bondat del model en comparació amb les dades experimentals i de crear un model numèric amb el propulsor Ka440 per a comprovar la bondat del model en comparació amb el model teòric.

En ambdós casos el model numèric serà el mateix, tot i que les mides del túnel d'aigua canviaran per tal d'adaptar-se a les mides del propulsor, el mètode de mallat per a estudiar els elements finits serà el mateix i els resultats els obtindrem de la mateixa forma. D'aquesta manera podrem validar el model numèric proposat.

2. DESENVOLUPAMENT DEL PROJECTE

El present projecte comença treballant dues branques en paral·lel:

D'una banda, es realitza un muntatge experimental amb el model de turbina que utilitza actualment el robot submarí Girona 500, el model Seaeye de 3 pales. El muntatge experimental, realitzat amb una estructura metàl·lica basada en el principi de la palanca, permet, mitjançant un dinamòmetre en un extrem del muntatge, mesurar la força realitzada a l'eix de la turbina. El muntatge el podem veure a l'annex A.10 (Fig. 49 i Fig. 50).

Amb la realització de diverses mesures amb una tensió del motor fixa, es recopilen les dades experimentals (punt 1a de la Fig. 3) per a poder extreure'n la informació necessària (punt 2a de la Fig. 3, força d'empenta, *thrust*). Com en qualsevol anàlisi experimental, s'haurà de fer un tractament de les dades (punt 3a de la Fig. 3) per a procedir a l'eliminació de qualsevol dada anòmla que estadísticament no tindria validesa i es realitzaran les gràfiques pertinents que permetran definir la línia de tendència de les dades.

D'altra banda, es treballarà amb el model teòric basat en l'anàlisi en aigües obertes (punt 1b de la Fig. 3, *open water test*), on s'estudiaran una sèrie de paràmetres adimensionals que ens donaran informació sobre la força d'empenta (*thrust*), el parell a l'eix (*torque*) i el rendiment del model de turbina kaplan Ka440. La bibliografia de l'anàlisi en aigües obertes ens permet obtenir les gràfiques dels paràmetres adimensionals envers un paràmetre d'avançament (relacionat amb la velocitat d'avanç) mitjançant polinomis que dependran del diàmetre de la turbina, el *pitch*(avançament un cop realitzada una volta completa de la turbina) i la velocitat d'avanç.

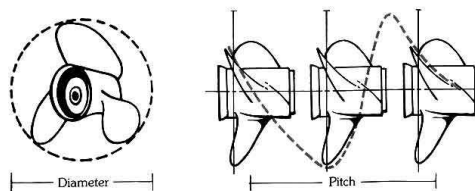


Fig. 1. Diàmetre i *pitch* d'un propulsor.

A partir dels esmentats polinomis, es realitzarà un model amb el software matemàtic Matlab (punt 2b de la Fig. 3) que ens permetrà obtenir les gràfiques de l'anàlisi en aigües obertes per a qualsevol turbina *kaplan* un cop conegudes les dades geomètriques de diàmetre i *pitch*.

A partir de les gràfiques realitzades amb Matlab, escollirem una sèrie de punts més o menys equidistants (punt 3b de la Fig. 3) que ens permetran extreure les dades de força d'empenta (*thrust*) i parell (*torque*), les quals analitzarem més endavant.

Un cop treballats l'anàlisi experimental per una banda i el model teòric per l'altra, procedirem a realitzar un model numèric mitjançant el software de dinàmica de fluids CFD d'ANSYS.

Comptem amb la geometria 3D en format *.iges (compatible amb el software que emprarem en el present projecte) d'ambdós models de turbina (Seaeye de 3 pales i Kaplan Ka440 de 4 pales). Un cop tractada la geometria (punt 4 de la Fig. 3), es modelitzarà un túnel d'aigua (punt 5 de la Fig. 3) a partir del model d'Ahmed per tal de simular un anàlisi en aigües obertes que ens permetrà, més endavant, comparar els resultats obtinguts derivats de la simulació tant amb els resultats teòrics com amb els resultats experimentals.

En la creació del model numèric, ens basarem en un anàlisi de discretització mitjançant elements finits (MEF¹).

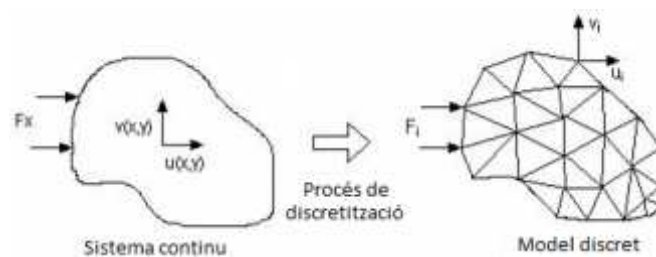


Fig. 2. Procés de discretització amb elements finits (2D)

Aquest mètode està pensat per a ser usat en computadores i permet resoldre equacions diferencials associades a un problema físic amb geometries complexes. Es tracta de dividir la geometria 3D en un número elevat de subdominis sense intersecció que s'anomenen "elements finits". Aquest tipus de programació la dividim en 3 mòduls de programació tal i com podem veure a la Fig. 3: pre-procés, procés i post-procés. Cada un d'aquests tres mòduls, el podem dividir, alhora, en 2 submòduls. Així doncs, el pre-procés consta del tractament de la geometria i del mallat, el procés consta de la definició de les condicions de l'entorn i el propi càlcul i, per últim, el post-procés consta de la visualització de resultats i el seu posterior anàlisi.

Haurem de tenir especial cura en la primera part de l'anàlisi amb elements finits (geometria i mallat), doncs una geometria mal definida o un mallat mal formulat podrien induir a errors que observariem en l'últim pas, l'anàlisi de resultats.

Amb l'anàlisi de resultats procedirem a la validació del model numèric i arribarem a unes conclusions que passaran per analitzar si s'han complert els objectius del projecte i com es podrien treballar possibles línies de millora.

¹ MEF: mètode d'elements finits.

La següent figura mostra l'esquema seguit en la realització del present projecte:

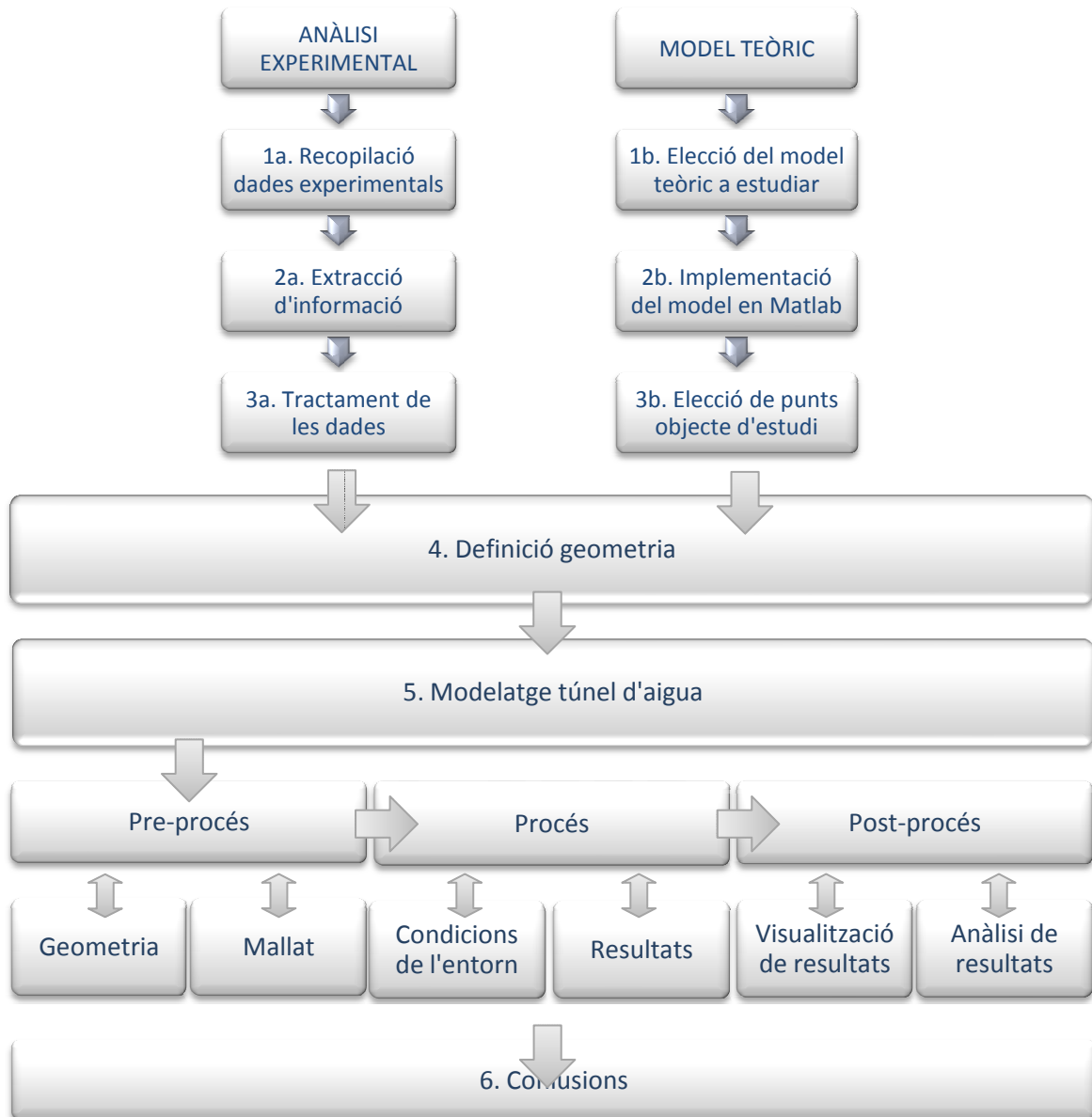


Fig. 3. Desenvolupament del projecte.

3. MODEL TEÒRIC

L'anàlisi en aigües obertes (*open water test*) consisteix en realitzar proves experimentals de sèries sistemàtiques de models d'hèlix en les que es fa avançar el model en petita escala a una certa velocitat sota l'aigua, amb una velocitat angular de rotació que vindrà donada per mitjà del motor elèctric. Mesurant la força d'embranchada (*thrust*) i el moment torçor transmès a l'eix del motor amb un dinamòmetre, serà possible determinar la potència transformada en força d'embranchada útil, de forma que, comparant-la amb la potència consumida, ens permetrà obtenir una eficiència (rendiment, η).

Per diferents models comercials de propulsor ja s'han definit les gràfiques i les equacions polinòmiques que permeten dibuixar-les, de forma que les podem trobar en diversa bibliografia i han esdevingut models teòrics.

En l'anàlisi del funcionament d'un propulsor, les forces i moments produïts s'expressen en termes adimensionals. Aquests termes es poden trobar a l'annexA.2i són els que emprarem en la representació gràfica tant de les dades experimentals com de les dades obtingudes mitjançant la simulació.

Treballarem amb els següents coeficients:

El coeficient K_T és el coeficient de força d'embranchada (*thrust*), un paràmetre adimensional que relaciona la força d'embranchada (*thrust*) amb la densitat del fluid, la velocitat de rotació del propulsor al quadrat i el diàmetre de l'hèlix elevat a quatre. El valor d'aquest coeficient es troba normalment entre 0 i 0,7 si la relació entre el diàmetre i el *pitch* és propera a 1.

El coeficient K_Q és el coeficient de parell, un paràmetre també adimensional que relaciona en aquest cas el parell amb la velocitat de rotació del propulsor al quadrat i el diàmetre de l'hèlix elevat a cinc. Com en el coeficient K_T , el valor d'aquest coeficient es troba normalment entre 0 i 0,7 si la relació entre el diàmetre i el *pitch* és propera a 1.

El coeficient J és el coeficient d'avançament, un paràmetre adimensional que relaciona la velocitat d'avançament del propulsor amb la velocitat de rotació i el diàmetre. El valor d'aquest coeficient normalment no supera l'1,1.

El rendiment η serà un valor que ens indicarà l'eficiència del propulsor i el seu valor es trobarà sempre entre zero i la unitat. El podem calcular relacionant els paràmetres anteriors.

Pel nostre model de turbina, el model teòric es pot representar en una gràfica *Open water diagram* com la de la figura Fig. 23 de l'annexA.3.

S'implementa una funció de Matlab que ens retorna els coeficients K_T (coeficient de força d'embranchada, "thrust"), K_Q (coeficient de parell) i η (rendiment) un cop introduïts els valors de J (valor variable relacionat amb la velocitat), P (pitch, valor fixe) i D (diàmetre, valor fixe) i ens dibuixa les gràfiques corresponents mitjançant les comandes de Matlab de l'annexA.4.

Les dades físiques del propulsor Ka440 (turbina Kaplan, 4 pales, bar=40%) són les següents:

D [mm]	P/D[adimensional]	Bar (bladearearatio)	Tipus
93,255	1	0,40	Kaplan Simètrica

Taula 1. Dades del propulsor Ka440

El concepte *bladearearatio* indica la proporció d'àrea ocupada per les pales de l'hèlix en comparació a l'àrea total del cercle de diàmetre D , tal i com mostra la figura següent:

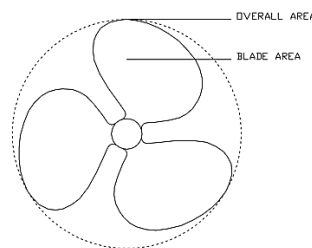


Fig. 4. Bladearea Vs. Overallarea

Les equacions polinòmiques² implementades en Matlab per tal de calcular el valor dels coeficients K_T , K_Q , K_{Tn} a partir de J , P i D , les podem trobar a l'annexA.5 i els coeficients A, B i C els obtenim de les taules corresponents (Annex A.6).

Obtenim el següent resultat gràfic derivat de les expressions anteriors:

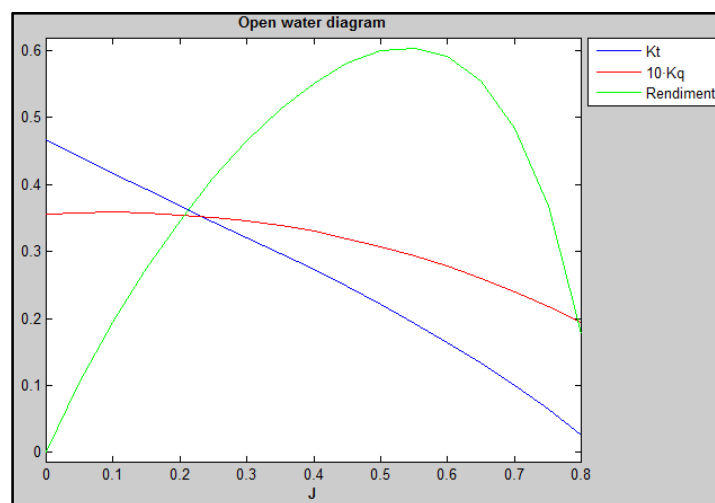


Fig. 5. Open waterdiagram pel model de propulsor Ka440.

²Oosterveld, M.W.C. Ductedpropellercharacteristics. RINA Symp.onDuctedPropellers, London 1973.

Gràcies a la funció de Matlab que ens retorna tots els valors des de $J = 0$ fins a $J = 0,8$, obtenim el valor dels coeficients K_T , $10 \cdot K_Q$ i el rendiment per cada punt, de forma que podem extreure el valor del parell i la força a l'eix a partir de les equacions de l'annexA.2.

A partir de quatre valors de J escollits de forma aleatòria però més o menys equidistants, extraiem les dades que analitzarem més endavant:

J [-]	Voltes [rpm]	Diàmetre [m]	Velocitat [m/s]	10Kq [-]	Kt [-]	η Rendiment[-]	Thrust [N]	Moment [Nm]
0	1500	0,0931	0,00	0,36	0,47	0,00=0%	21,97	1,56
0,3	1500	0,0931	0,70	0,35	0,32	0,47=47%	15,10	1,51
0,6	1500	0,0931	1,40	0,28	0,16	0,59=59%	7,72	1,22
0,7	1500	0,0931	1,63	0,19	0,03	0,18=18%	1,21	0,85

Taula 2. Dades extretes del model Matlab.

Hem analitzat quatre punts de la gràfica, que indiquen quatre velocitats d'avanç diferents que podem simular amb CFD d'ANSYS.

4. ANÀLISI EXPERIMENTAL

El robot submarí Girona 500 actualment utilitza un tipus de turbina Seaeye³ de 3 pales. Aquest tipus de propulsor incorpora un llaç tancat de control de velocitat per a una resposta precisa a les ordres d'entrada, una unitat electrònica autònoma dins la carcassa de l'hèlix, eixos de titani per augmentar la seva lleugeresa i resistència, protecció a canvis de voltatge, compensació integral de pressió per a operacions en profunditats oceàniques...



Fig. 6. Model de turbina Seaeye de 3 pales.

Les dades de fabricació del model anteriorment descrit són les següents:

D [mm]	Pitch [mm]	P/D[adimensional]	Bar(bladearearatio)	Tipus
178,20	216,76	1,22	0,55	Kaplan Simètrica

Taula 3. Dades del propulsor model Seaeye de 3 pales.

Veiem que la proporció d'àrea ocupada en comparació amb el model Ka440 ha augmentat del 40% al 55%, tot i tenir 3 pales en comptes de 4.

Per a prendre les mesures que tractarem com a dades experimentals, s'ha realitzat un muntatge amb el propulsor i un mecanisme amb un braç de palanca, que ens permetrà realitzar mesures amb un dinamòmetre a una determinada distància de l'eix (veure Fig. 49 i Fig. 50 de l'annex A.10)

³<http://www.seaeye.com>

El sistema es submergeix dins la piscina del centre d'investigació en robòtica CIRS per a estudiar els diferents models de turbina. S'han realitzat les següents mesures experimentals:

Voltatge [V]	Intensitat [A]	n [rpm]	F (experimental) [N]	Potència entrada [W]
43,67	0,3	248	6,96	13,10
43,67	0,5	312	10,83	21,84
43,67	0,6	366	14,7	26,20
43,67	0,8	428	20,11	34,94
43,67	1,1	432	27,07	48,04
43,67	1,2	497	28,62	52,40

Taula 4. Obtenció de dades experimentals.

Per a un altre voltatge:

Voltatge [V]	Intensitat [A]	F (experimental) [N]	n [rpm]
25	0,3	4,34	645
25	0,8	8,68	975
25	1,3	13,03	1.170
25	1,8	17,37	1.335
25	2,7	21,71	1.500
25	3,4	26,05	1.650
25	4,4	30,39	1.800
25	5,0	36,47	1.875
25	6,0	39,08	1.980
25	7,2	43,42	2.100

Taula 5. Obtenció de dades experimentals.

Segons les dades de la Taula 4, per a diferents revolucions obtenim una força corresponent a l'eix que representem a la següent gràfica, amb les revolucions en $[min^{-1}]$ a l'eix de les abscisses i la força en $[N]$:

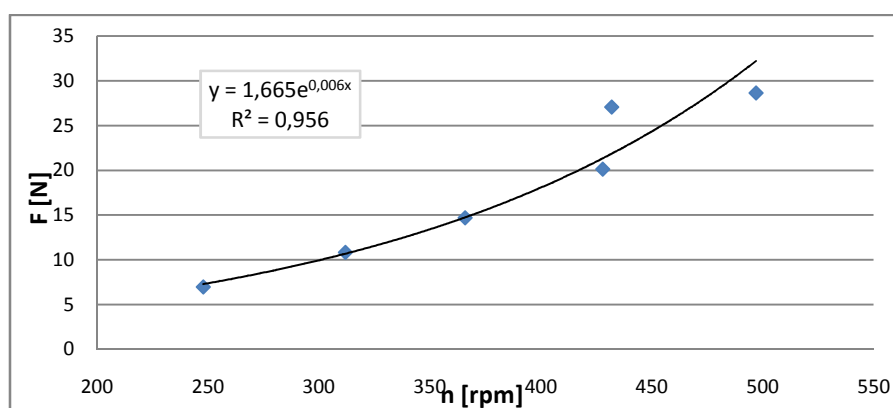


Fig. 7. Representació gràfica de les dades experimentals.

De forma visual observem que les dades tindrien una tendència exponencial (el coeficient de regressió és molt proper a la unitat), però una de les dades està fora d'aquest rang i, per tant, la considerem una dada anòmla.

Procedim a eliminar la dada anòmala, de forma que obtenim el següent resultat, amb un coeficient de regressió molt millorat:

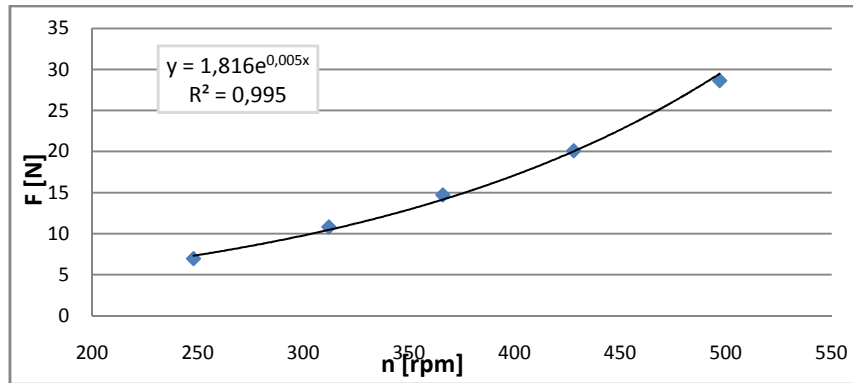


Fig. 8. Representació gràfica de les dades experimentals sense dada anòmala.

Representem les dades experimentals de la Taula 5 en un gràfic amb les revolucions en $[min^{-1}]$ a l'eix de les abscisses i la força a l'eix en $[N]$:

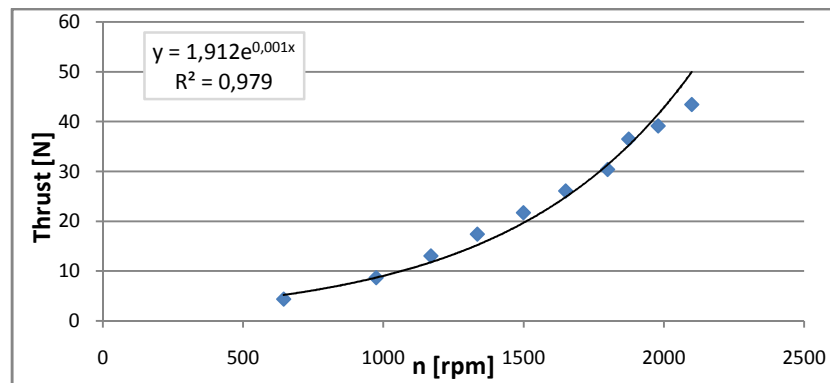


Fig. 9. Representació gràfica de les dades experimentals.

Podem concloure que la relació entre aquestes dues dades torna a ser de forma exponencial.

Utilitzem les equacions de l'annexA.2 per a trobar els valors de les variables K_q i $10 \cdot K_t$:

Voltatge [V]	Intensitat [A]	ω [rad/s]	n [rpm]	F (experimental) [N]	Potència entrada [W]	Potència sortida [W]	Moment [Nm]	K_q	$10 \cdot K_t$
43,67	0,3	25,97	248	6,96	13,1	16,27	0,62	0,20	0,40
43,67	0,5	32,67	312	10,83	21,84	31,84	0,96	0,20	0,40
43,67	0,6	38,33	366	14,7	26,2	50,71	1,31	0,20	0,39
43,67	0,8	44,82	428	20,11	34,94	81,12	1,79	0,20	0,39
43,67	1,2	52,05	497	28,62	52,4	134,07	2,55	0,21	0,41
Mitjana								0,20	0,40
Desv. estàndard								4,63E-03	9,26E-03

Taula 6. Obtenció de dades experimentals i càlculs.

Com que els experiments s'han realitzat amb una velocitat d'avançament nul·la, el rendiment en aquest punt és nul, a l'igual que la variable "J".

5. MODELDESIMULACIÓ

Per a realitzar els càlculs del model de simulació que proposem, utilitzem una simulació computacional amb elements finits. Aquest tipus de simulacions segueixen el següent esquema:

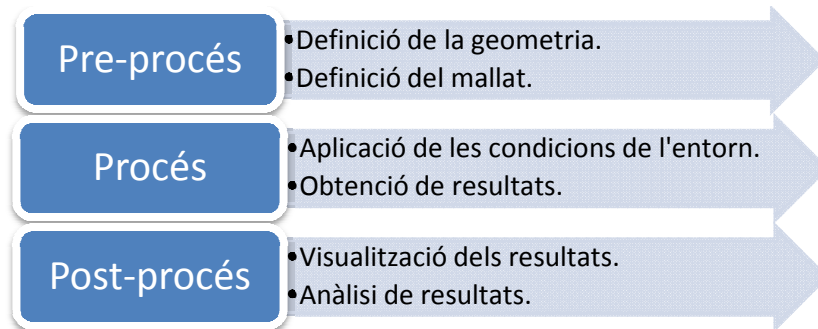


Fig. 10. Esquema de realització de càlcul amb elements finits.

5.1 Pre-procés

El robot Girona 500 té capacitat per submergir-se fins a 500 metres i funcionar autònomament, ja que algunes de les funcions per les quals s'ha creat és la construcció i reproducció de mapes amb una resolució òptima del terreny, així com la recuperació d'objectes.

A l'annex A.1 (Fig. 21 i Fig. 22) es mostra la geometria completa del robot Girona 500 en 3D així com la geometria del propulsor (pales i xassís).

A partir de la geometria del xassís del propulsori de la part rotatòria (actualment un model Seaeye de 3 pales), procedim a crear una geometria única que anomenarem "sòlid". En el cas del model kaplan Ka440 el sòlid es refereix només a l'hèlix.

5.1.1 Geometria del sòlid

Per tal d'analitzar el sòlid, que estarà format tant pel xassís del propulsor com pel propi propulsor en el cas del model Seaeye o per la turbina en el cas del model Ka440, creem un cilindre envolupant que contindrà la part rotatòria de forma immersa.

Per tal de crear el cilindre, abans haurem de crear un pla que ens servirà de base i estarà centrat en les coordenades del sòlid. Per fer-ho, donem una tolerància a les mides del cilindre, de forma que aquest mesuri uns mil·límetres més que el propi rotor. Això permetrà crear unes zones de contacte entre el líquid pertanyent al túnel d'aigua i les pales rotatòries.

Un cop creat en cilindre envolupant amb les mides desitjades, procedim a immernir el sòlid. Per fer-ho, utilitzarem l'eina "Boolean": create→boolean→subtract.

Per aplicar la subtracció per tal de crear un sòlid immers, definim els *targetbodies*, que en el nostre cas seria el cilindre que hem creat, i els *toolbodies*, que serien totes les parts del propulsor que quedaran immerses. On ens demana si volem preservar els “toolbodies”, direm que sí.

5.1.2 Geometria del túnel d'aigua

Modelem un túnel d'aigua amb el propulsor immergit que ens servirà per a poder simular la realitat basant-nos en la teoria de les semblances. D'acord amb aquesta teoria, enlloc d'observar el moviment d'un cos en el seu medi immòbil, podem observar el moviment del medi en relació al cos immòbil.

El cos d'Ahmed va ser definit per primer cop en el treball experimental de l'especialista en aerodinàmica Ahmed et Al a l'any 1984. Es tracta d'un cos geomètric que tracta d'emular d'una forma bàsica, l'aerodinàmica d'un vehicle terrestre.

Ens hem basat en aquest model per a dimensionar el nostre túnel d'aigua. Les mides del túnel segons el model d'Ahmed són les següents:

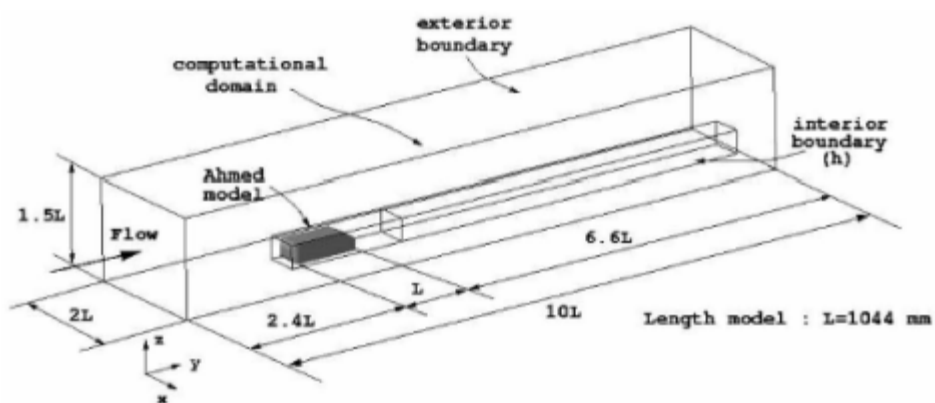
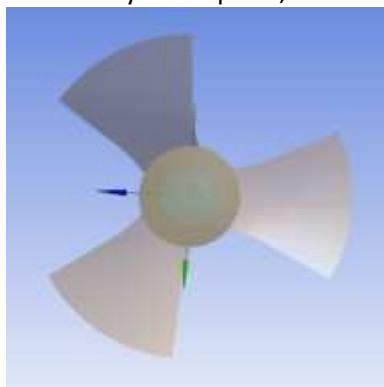


Fig. 11. Dimensions del model del túnel amb el model d'Ahmed.

La principal diferència entre el model d'Ahmed i el nostre és que el que hem creat té forma cilíndrica, ja que el model que analitzarem té també aquesta forma.

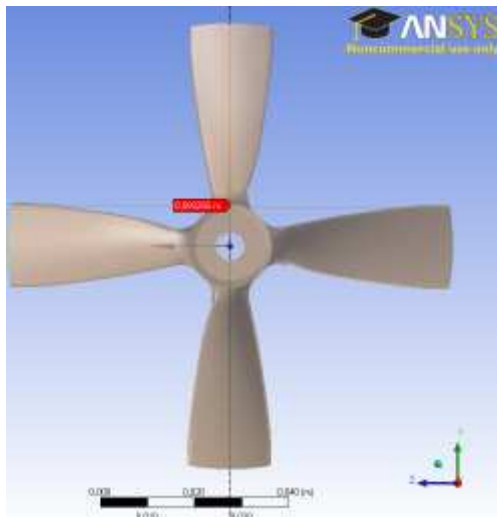
Amb el model de turbina Seaeeye de 3 pales, les mesures serien les següents:



1	L	181,69	mm
1,5	L	272,54	mm
2	L	363,38	mm
2,4	L	436,06	mm
3,4	L	617,75	mm
6,6	L	1.199,15	mm
10	L	1.816,90	mm

Fig. 12. Dimensions del túnel d'aigua pel model Seaeeye de 3 pales.

Pel model de turbina Kaplan Ka440 de 4 pales, les mesures serien les següents:



1	L	93,26	mm
1,5	L	139,88	mm
2	L	186,51	mm
2,4	L	223,81	mm
3,4	L	317,07	mm
6,6	L	615,48	mm
10	L	932,55	mm

Fig. 13. Dimensions del túnel d'aigua pel model Kaplan Ka440.

5.1.3 Mallat

El programari CFD de ANSYS permet realitzar iteracions en un rang discret d'elements dins el domini. L'objectiu de realitzar un mallat adequat és el de realitzar una partició del domini en subdominis, anomenats *elements finits*.

El mètode dels elements finits està pensat per a ser usat en computadores i permet resoldre equacions diferencials associades a un problema físic sobre geometries complexes. La geometria es divideix en punts anomenats nodes que formaran una xarxa anomenada "mallat". Les formes geomètriques en 3 dimensions que es formaran amb la unió d'aquests nodes s'anomenen "elements". Els tipus de geometria més habituals en la realització de mallats són els que veiem a la figura següent:

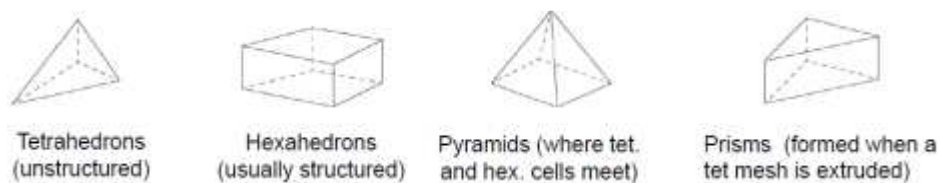


Fig. 14. Tipus de geometria 3D usada en mallats.

La qualitat de la solució depèn en gran quantitat de la qualitat del mallat, per això escollim el mallat més adequat al nostre sistema.

Els següents mètodes de mallat estan implementats a l'ANSYS: automàtic, tetrahedrons, patchConforming, patch Independent, sweptMeshing, multiZone, hex Dominant, entre d'altres.

Realitzem el mallat diferenciant dues zones: el sòlid i el túnel. Un primer mallat es realitza de forma automàtica per a observar les possibles zones que necessiten més definició. El primer mallat es genera amb la mida d'element definida per defecte (veure Fig. 27 de l'annex A.7). Es tracta d'un mallat de baixa qualitat, en què les zones crítiques estan mallades de la mateixa manera que les no crítiques, un disseny que no ens permetrà obtenir la informació que necessitem extreure de l'anàlisi amb elements finits. Disminuint la mida dels elements fins a 1mm el que aconseguim és un número massa elevat d'elements que alenteix el procés de càlcul, però no millora la qualitat del mallat, ja que no ens aporta la informació que necessitem (veure Fig. 28 de l'annex A.7).

Necessitem un algorisme de mallat que permeti diferenciar zones, que permeti un creixement gradual dels elements a mida que ens allunyem de zones crítiques, que permeti crear capes de creixement... i que en general sigui molt versàtil.

Després de diverses proves amb diferents tipus de mallat, ens decantem per l'algorisme de mallat "*PatchConformingMethod*" amb mètode "*tetrahedrons*", ja que ens permetrà utilitzar eines com "*inflation*" o "*facesizing*" i mallarà primer la superfície i després el volum (*bottom-up approach*).

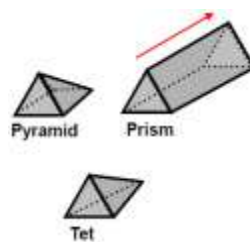


Fig. 15. Formes geomètriques utilitzades en el mètode *tetrahedrons*.

Els límits o fronteres (*boundary*) de les pales de l'hèlix cal estudiar-les amb deteniment i és per això que utilitzarem l'eina de creixement de capes (*inflation*). El mètode dels tetraedres és molt versàtil i s'adapta molt bé a tot tipus de geometries, tot i el desavantatge del gran nombre d'elements que utilitza, que alenteix el procés de mallat i posteriorment de simulació, de forma considerable.

Si cliquem amb el botó de la dreta del ratolí a sobre de "*mesh*" i escollim l'opció "*insert method*", escollim el mètode "*Tetrahedrons*" amb l'argorisme "*PatchConforming*", tal i com es mostra a la figura Fig. 29 de l'AnnexA.7.

Si cliquem amb el botó de la dreta del ratolí a sobre del mètode de mallat, escolim l'eina *inflation*, de forma que crearem una sèrie de capes de creixement en una cara determinada. Escollim l'opció de determinar el gruix de la primera capa (*firstlayerthickness*, 0,1mm), el nombre de capes (5 capes) i el rati de creixement (1.2), tal i com es mostra a la figura Fig. 30 de l'annexA.7.

A la figura següent veiem el resultat:

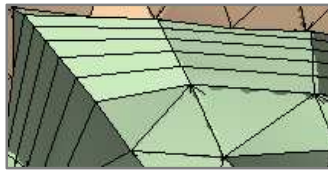


Fig. 16. Eina "inflation"

De la mateixa manera que hem escollit l'eina *inflation*, ara escollim l'eina *facesizing*, que ens permetrà definir la mida dels elements amb un rati de creixement a mesura que ens allunyem de les zones més crítiques. Definim una mida mínima de 4mm, tal i com es mostra a la figura Fig. 33 de l'annex A.7.

El resultat de fer servir eines com les anteriorment descrites el podem veure a la figura Fig. 31 de l'annex A.7 i a la figura següent:

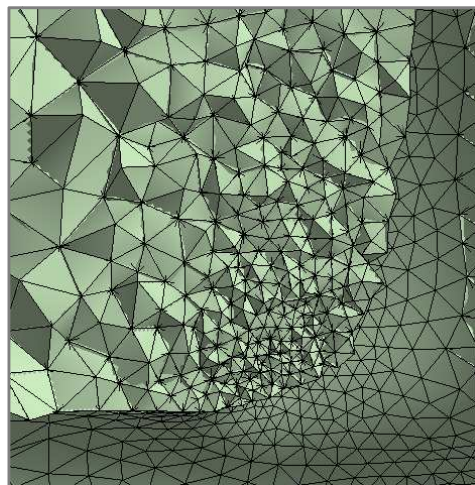


Fig. 17. Eina "facesizing"

5.1.4 Mallat del sòlid

Per a mallar el sòlid, veiem que les zones més crítiques on es podran concentrar els majors esforços i es podran obtenir les majors deformacions es donen a les juntes de les pales.

Per a poder realitzar un mallat més acurat en aquestes zones, hem utilitzat les tècniques descrites anteriorment, ja que ens ofereixen la possibilitat de marcar un creixement dels elements progressiu i a capes.

El resultat obtingut el podem veure a l'annex A.7 (Fig. 34 i Fig. 35).

5.1.5 Mallat del túnel d'aigua

Utilitzem la mateixa tècnica que hem utilitzat pel sòlid així com el creixement de les capes i dels elements.

A l'annex A.7 (Fig. 36 i Fig. 32), veiem un tall del mallat del túnel d'aigua així com un detall de l'objecte, on podem apreciar el creixement progressiu dels elements a mida que ens allunyem del sòlid (propulsor).

En acabar la definició de les capes de creixement, la mida dels elements i el seu rati de creixement, etc., ens disposem a fer calcular el mallat total. Si cliquem amb el botó de la dreta del ratolí a sobre *Mesh*, escollim l'opció de *generatemes* i es generarà el mallat després d'uns minuts de càlcul.

En finalitzar el càlcul, podem fer els talls amb els plans que vulguem per a comprovar que el mallat s'ha realitzat tal i com l'havíem definit. A l'opció d'estadístiques (*statistics*), veiem que la quantitat total d'elements obtinguts és aproximadament de 2 milions i mig.

5.2 Procés

5.2.1 Configuració del túnel d'aigua

Diferenciem tres zones:

Entrada (*Inlet*): es tracta d'una entrada de líquid on definim la velocitat d'entrada d'aquest líquid en $[m/s]$. Definim el líquid com a aigua amb una densitat de $1000 \text{ kg}/\text{m}^3$ (ideal).

En el cas del model Seaeye, la velocitat d'entrada del líquid es mantindrà constant en totes les simulacions, amb un valor de $0 \text{ m}/\text{s}$. L'assaig numèric es farà de forma estàtica, tal i com es va realitzar en l'assaig experimental.

En el cas del model Ka440, la velocitat d'entrada del líquid prendrà diferents valors, segons la Taula 2.

Sortida (*Outlet*): la sortida és oberta (*opening*) sense pressió, així que definim una pressió de 0 Pa , de forma que l'aigua pot sortir lliurement del túnel.

Parets (*wall*): la paret està definida com a *freeslipwallboundary*. És a dir, la paret és de lliscament lliure, no treballa com a recipient tancat, sinó que simula un espai obert.

5.2.2 Configuració del sòlid

El sòlid es comporta com un objecte (*frozen rotor*) amb una rotació que determinem nosaltres en $[rpm]$.

En el cas del model Seaeye, el nombre de revolucions serà variable, segons els valors de la Taula 2, però en el cas del model Ka440, fixem les revolucions en 1500 rpm , tot i que podríem haver escollit una altra velocitat de rotació, ja que el que anirà variant serà la velocitat d'avanç, no la de rotació.

Serà en aquest moment quan definirem tant la turbulència del líquid com la rugositat superficial del material del qual està feta la turbina segons convingui.

5.2.3 Configuració de les cares de contacte

Definim les cares de contacte (*interfaces*) on es trobarà l'aigua que es mourà pel túnel amb l'envolupant de les hèlix de la turbina.

Per definir les cares de contacte inserim una *interface* que anomenem "contacte". Caldrà definir quines seran les cares del domini 1 (rotor) que tindran contacte amb les cares que definim del domini 2 (túnel).

Degut al caràcter rotatori del sòlid, haurem de definir el sòlid com a *frozen rotor*, ja que si no ho féssim, ens trobaríem amb errors degut a la rotació i l'estàtica de dues cares que tenen contacte.

A l'annex Fig. 36 (Fig. 38) podem veure com s'han definit les cares de contacte.

A l'opció de "solver→solver control", definim el nombre màxim d'iteracions, a més d'altres paràmetres de càlcul previs a la simulació, tal i com podem veure a la figura Fig. 39 de l'annex Fig. 36.

5.3 Post-procés

Per a realitzar les simulacions pertinents s'han utilitzat 4 ordinadors amb un únic processador Intel Core2 Quad de 2,33GHz i 4Gb de memòria RAM. El sistema operatiu instal·lat és Windows 7 Enterprise de 64 bits.

El temps de simulació pel model Seaeye de 3 pales ha estat de $7,24E + 04$ segons en tots els casos (una mica més de 20h per a cada simulació). S'han fet unes 6 mil iteracions per a cada simulació (veure annex A.9, Fig. 40.)

El temps de simulació pel model Ka440 de 4 pales ha estat de $1,214E + 05$ aproximadament en tots els casos (1 dia i 9 hores aproximadament). S'han realitzat 3 mil iteracions per simulació.

La gràfica que observem a la Fig. 40 de l'annex A.9 ens mostra els valors residuals en un sistema de llaç tancat on l'error cada cop és més proper a zero fins a estabilitzar-se. Fins que aquest residu no s'estabilitzi i es trobi en un règim permanent, no podem finalitzar la simulació.

5.3.1 Resultats analítics pel model Seaeye de 3 pales

Realitzem diferents simulacions amb el software Workbench de ANSYS, tenint en compte condicions que es donen en l'anàlisi experimental, de forma que les tres columnes de *Thrust* de la Taula 7 es diferencien en el següent:

Thrust 1: no tenim en compte la rugositat del material de les pales del propulsor Seaeye. Seria el cas ideal en el què les propietats dels materials i de turbulència del fluid no es tindrien en compte.

Thrust 2: no tenim en compte la rugositat del material de les pales del propulsor Seaeye. Tenim en compte un coeficient de turbulència BSL.

Thrust 3: tenim en compte la rugositat del material de les pales del propulsor Seaeye, però no tenim en compte la turbulència del fluid. Definim un coeficient de rugositat del material de $100\mu m$.

Definim el nombre de revolucions segons el nombre de revolucions de l'anàlisi experimental, per a poder comparar els resultats obtinguts:

n [rpm]	<i>Thrust</i> experimental [N]	<i>Thrust 1</i> [N]	<i>Thrust2</i> [N]	<i>Thrust3</i> [N]
248	6,96	5,5	5,91	5,73
312	10,83	8,58	9,05	8,84
366	14,7	11,7	13,1	12,18
432	20,11	16,22	17,45	16,95
497	28,62	21,92	23,21	22,94

Taula 7. Resultats obtinguts a partir de la simulació amb ANSYS.

5.3.2 Resultats gràfics pel model Seaeyede 3 pales

Representem els resultats obtinguts en una sola gràfica. L'eix de les abscisses mostra les revolucions del rotor en $[rpm]$, mentre que l'eix de les ordenades mostra la força d'embranchada (*Thrust* [N]). El nombre de revolucions es mou entre 250 i 500, ja que els experiments es varen realitzar dins aquest rang de mesura:

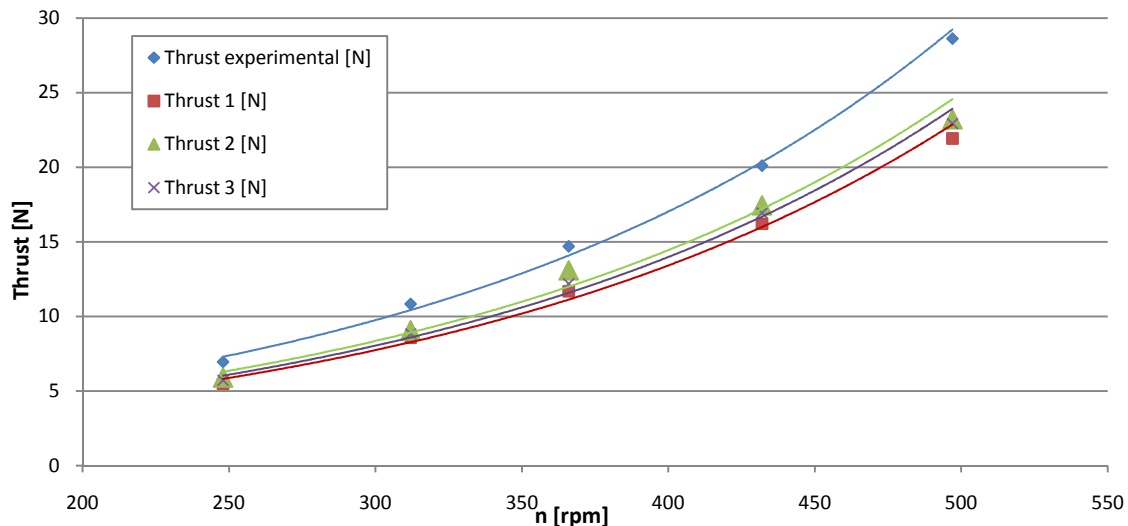


Fig. 18. Representació gràfica dels resultats experimentals i els de la simulació

Els resultats de la simulació, a l'igual que els de l'anàlisi experimental segueixen una gràfica exponencial, amb un coeficient de regressió (R^2) molt proper a la unitat.

Observem que obtenim un resultat pràcticament igual per als tres tipus de configuració que hem fet servir (Explicats a l'apartat 5.3.1), així que podem concloure que els efectes de la rugositat del material de les pales o el coeficient de turbulència no ens afecten pràcticament en el resultat final.

Si bé és cert que per a velocitats de rotació més baixes els resultats tenen un valor molt més proper que per a velocitats de rotació més altes, podem concloure que amb la simulació amb un model numèric hem obtingut uns molt bons resultats que donem per satisfactoris.

A l'annex A.9 (Fig. 44 i Fig. 46) veiem un pla de tall amb contorns de velocitat i de pressió respectivament. Recordem que la velocitat d'avançament del fluid en aquest cas es mantenia sempre a 0 m/s i el que variava era la velocitat de rotació ($n\text{ [rpm]}$).

5.3.3 Resultats analítics pel model Kaplan Ka440

Realitzem diverses simulacions pels valors de "J" escollits a la Taula 2. Aquests valors impliquen una velocitat de translació determinada [m/s] que anirà variant segons el que escollim en l'apartat de configuració del túnel d'aigua (Apartat 5.2.1) i amb un nombre de revolucions fixe, segons l'equació 3 de l'annex A.2.

Amb la simulació mitjançant ANSYS, els resultats que hem obtingut del valor de la força (*Thrust*) i el moment ens serveixen per a poder trobar els valors dels coeficients K_T , K_Q i η mitjançant les equacions de l'annex A.5 tal i com es mostra a la taula següent:

J	Voltes [rpm]	Diàmetre [m]	Velocitat [m/s]	Thrust [N]	Moment [Nm]	10Kq	Kt	Rendiment
0	1.500	0,0931	0,00	19,21	1,46	0,33	0,41	0,000
0,3	1.500	0,0931	0,70	16,70	1,58	0,36	0,36	0,470
0,6	1.500	0,0931	1,40	8,30	1,32	0,30	0,18	0,559
0,7	1.500	0,0931	1,63	1,17	1,10	0,25	0,02	0,110

Taula 8. Resultats obtinguts a partir de la simulació amb ANSYS.

En el punt $J = 0$, que indica una velocitat d'avançament nul·la, efectivament el rendiment obtingut és també nul, mentre que els coeficients de propulsió (K_T) i de parell (K_Q) tenen uns valors al voltant del 0,4.

Per a velocitats d'avançament més altes el rendiment augmenta considerablement i es veu minvat per a velocitats encara més altes. Com ens indicava la Fig. 23 de l'annex A.3, per a relacions de $\frac{P}{D} = 1$, el valor de J no superarà mai la unitat.

El coeficient de propulsió (K_T) es veu reduït gairebé a 0 per a J properes a la unitat, mentre que el coeficient de parell (K_Q) es veu poc afectat pels canvis de J .

5.3.4 Resultats gràfics pel model Kaplan Ka440

Representem amb línia discontinua les dades teòriques extretes a partir de les equacions polinòmiques (Fig. 26 de l'annex A.5) gràcies a l'eina de software matemàtic Matlab (Taula 2) juntament amb les dades obtingudes a partir de la simulació amb l'eina Workbench de ANSYS (Taula 8).

La gràfica mostra el típic gràfic d'un anàlisi en aigües obertes, amb el coeficient d'avançament (J) a l'eix de les abscisses i els coeficients de propulsió (K_T), de parell (K_Q) i rendiment (η). Aquests coeficients tindran sempre valors entre 0 i 1, el mateix que J sempre que la relació P/D sigui igual a 1.

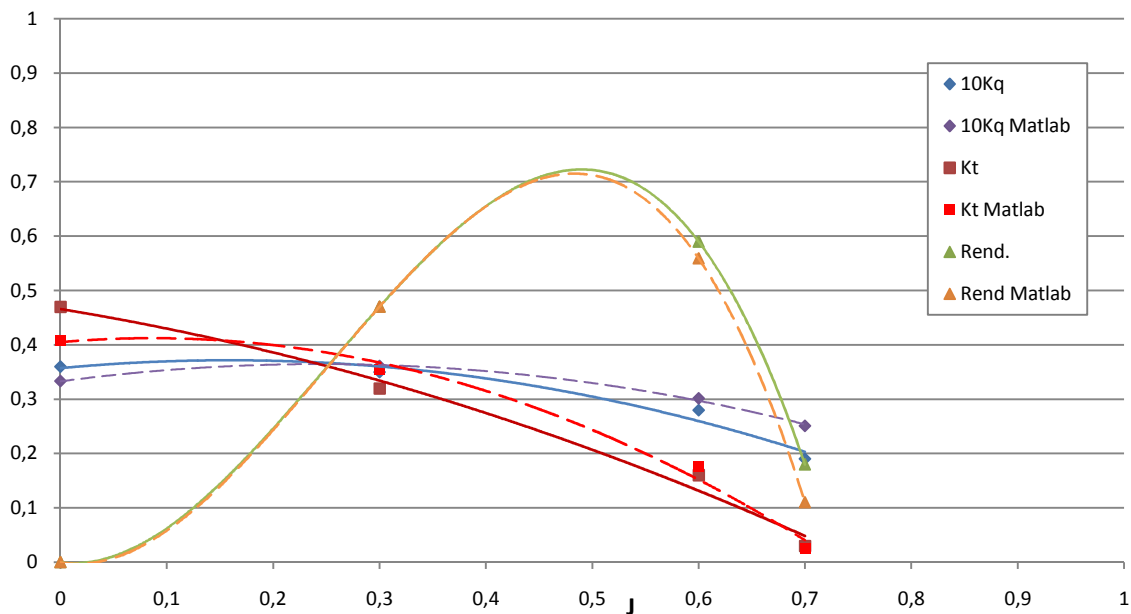


Fig. 19. Representació gràfica dels resultats teòrics i els de la simulació.

Mitjançant l'eina de regressió polinòmica que incorpora Microsoft Excel 2010, agreguem les línies de tendència corresponents per a poder dibuixar el gràfic d'anàlisi en aigües obertes, d'acord amb el grau dels polinomis de l'annex A.5.

Podem veure a la figura anterior que els valors obtinguts mitjançant la simulació numèrica i els valors extrets de les dades teòriques concorden per a tot el rang de velocitats d'avançament, tot i que en algun cas hi ha petites diferències. Curiosament, els valors de rendiment són els que ens han donat uns valors més propers al model teòric.

A l'annex A.9 (Fig. 45 i Fig. 47) veiem un pla de tall amb contorns de velocitat i de pressió respectivament. Recordem que la velocitat d'avançament del fluid en aquest cas era variable i el que es mantenia constant era la velocitat de rotació (n [rpm]). Aquestes dues figures mostren, a més, el mallat, on podem apreciar el creixement d'elements a les zones més crítiques i la progressió de figures en forma de tetraedre.

6. RESUM DEL PRESSUPOST

El pressupost per a crear un model de simulació pels propulsors del robot submarí Girona 500 mitjançant CFD (ANSYS) és cinc milvuitanta-dos cèntims sense IVA (veure annex A.12)

7. CONCLUSIONS

El present treball s'ha basat en dos models de turbina simètrica diferents: d'una banda el model Seaeye de 3 pales i d'altra banda el model Ka440 de 4 pales. El primer model és el que usa actualment el robot submarí Girona 500 i per tant ha estat possible disposar de dades experimentals extretes de simulacions amb diferents velocitats de rotació realitzades a la piscina del CIRS (Centre d'Investigació en Robòtica Submarina, veure annex A.10, Fig. 48 i Fig. 49). El muntatge experimental constava d'un braç de palanca amb un dinamòmetre a l'extrem per a mesurar la força d'embranchada (*Thrust*), un mètode senzill d'obtenció de dades que no tenia en compte la flexió o vinclament de l'estructura usada en el muntatge. Seria convenient com a línia de millora la d'idear un sistema més fiable d'obtenció de dades experimentals que ens permetria comparar d'una forma més real els resultats obtinguts en la simulació numèrica.

Per a poder acabar de validar el model numèric seria convenient realitzar les proves experimentals amb el model de turbina Ka440, però per ara només es disposa d'un prototip realitzat amb impressora 3D que no és apte per a posar en funcionament. Aquesta última prova seria definitiva per a poder concloure que el model numèric és l'adequat per a simular qualsevol tipus de turbina independentment del nombre de pales o de la geometria d'aquestes.

Al no disposar de gràfiques teòriques d'anàlisi en aigües obertes del model Seaeye, tampoc s'han pogut comparar dades teòriques amb les dades experimentals i les del model numèric. Així doncs, hem usat el mateix model numèric per a comparar les dades experimentals del model Seaeye amb les de la simulació i les dades teòriques del model Ka440 amb les de la simulació. En ambdós casos els resultats han estat molt satisfactoris, de forma que podríem validar el model numèric, objectiu del present projecte.

Cal dir que utilitzar el mateix model numèric en ambdós casos, amb la mateixa configuració de mallat però amb geometries molt diferents, ens ha dut a realitzar un mallat molt acurat per a estudiar els elements finits i, com a conseqüència, hem obtingut un nombre d'elements molt elevat (gairebé 2,5 milions d'elements) que han implicat un temps de mallat molt llarg.

El mateix ha ocorregut amb el temps de simulació, que ha estat molt elevat (una mitjana d'unes 24 hores per simulació). L'objectiu principal del projecte era el de crear un model que servís per a poder simular qualsevol tipologia de turbina que es volgués provar al robot submarí Girona 500 sense necessitat de compra de material o cost de fabricació.

Com a línia de millora, seria interessant poder utilitzar la configuració creada en el present projecte per a estudiar qualsevol turbina a partir de la geometria en 3D de forma automàtica, ja que actualment és un procés semiautomàtic, en el que la definició d'una sèrie de cares de contacte s'ha de realitzar manualment.

Cal destacar que l'elevat pressupost necessari per a la realització del present projecte s'ha vist molt incrementat degut al software emprat. Tot i que a l'estudi econòmic (annexos A.11 i A.12) es té en compte una part proporcional del cost del software (s'ha calculat un mes de funcionament), l'import és de 3.079,5€ sense IVA, és a dir, més de la meitat del pressupost total.

Com a procés d'estandardització, proposem la Taula 10 de l'annex A.13 com a base. El temps estimat per a realitzar tot el procés és d'un dia i 4 hores aproximadament, sempre i quan es tinguin coneixements del programari a utilitzar i d'anàlisi mitjançant elements finits.

A la següent figura s'han esquematitzat les línies de millora que es proposen:

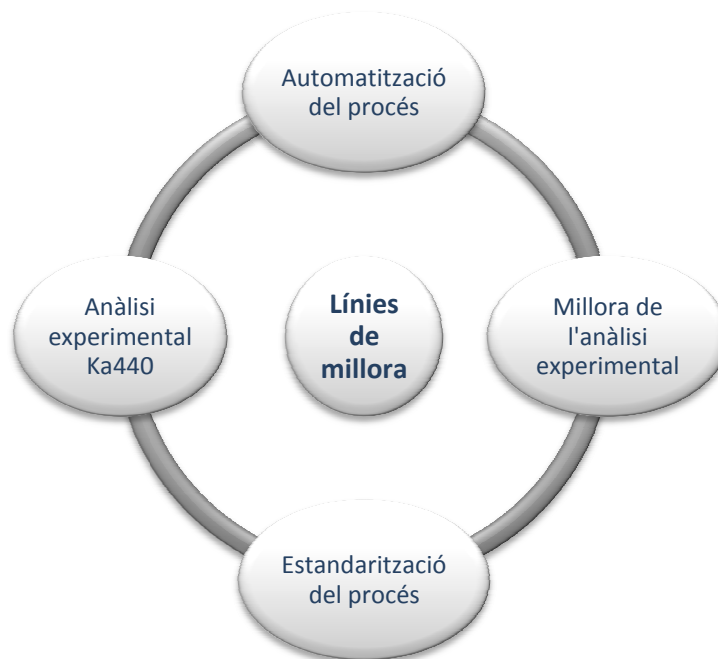


Fig. 20. Quadre sinòptic de les possibles línies de millora.

Carmina Luque i Sarmiento

Girona, 2 de juny de 2013

8. RELACIÓ DE DOCUMENTS

En el present projecte s'inclouen els següents documents: memòria descriptiva amb els seus corresponents annexos.

9. BIBLIOGRAFIA

Simulación numérica del flujo alrededor del modelo Ahmed para un ángulo de inclinación crítico, Gerardo Franck, Fernando Carazo, Norberto Nigro, Mario Storti y Jorge D'Elía.

Mecánica Computacional Vol. XXIII, pp. 2189-2209

G. Buscaglia, E. Dari, O. Zamonsky (Eds.)

Bariloche, Argentina, November 2004

Best practice guidelines for handling Automotive External Aerodynamics with FLUENT, Marco Lanfrit.

Version 1.2 (Feb 9th 2005)

Fluent Deutschland GmbH, Birkenweg 14^a, 64295 Darmstadt/Germany

Marine propellers and propulsion, John Carlton

Global Head of Marine Technology and Investigation, Lloyd's Register

Oxford: Elsevier Ltd., 2007 (2nd edition). 556 p. ISBN: 978-07506-8150-6

Hydrodynamic design of a bi-directional, rim-driven ducted thrusters suitable for underwater vehicles, C. Pashias.

University of Southampton, Ship Science Report No.128, September 2003.

(<http://eprints.soton.ac.uk/46052/1/128.pdf>, 10 de febrer de 2013)

Seaeye, pàgina oficial (<http://www.seaeye.com/thrusters.html>, 7 de març de 2013)

ITTC – Recommended procedures and guidelines. Testing and extrapolation Methods: propulsion, propulsor and open water test, ITTC (International Towing Tank Conference, 2002)

(http://itcc.sname.org/2006_recomm_proc/7.5-02-03-02.1.pdf, 2 d'abril de 2013)

A. ANNEXOS

A.1. Geometria

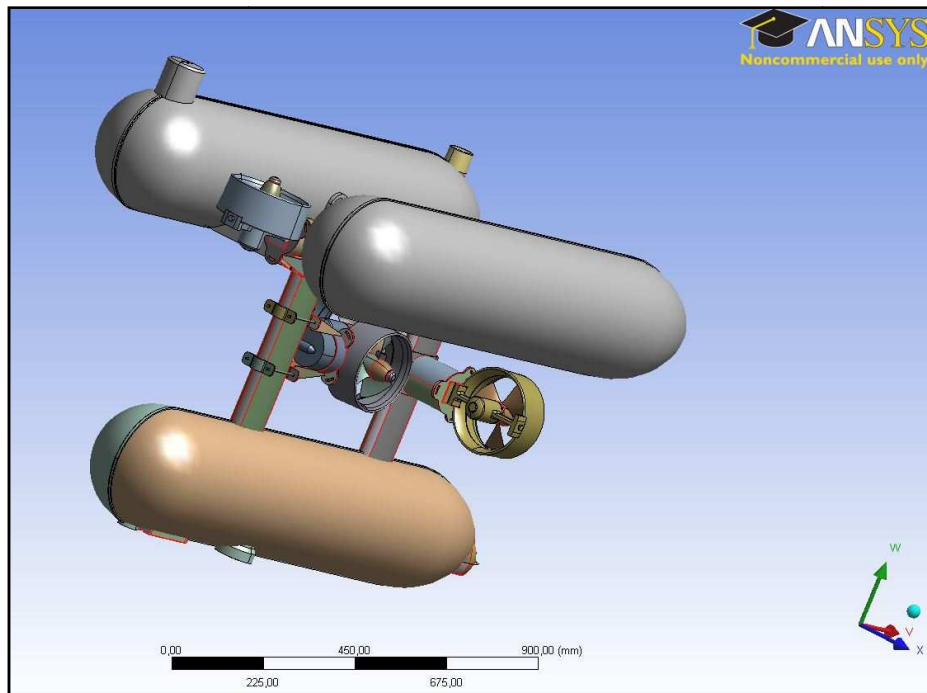


Fig. 21. Geometria completa del robot Girona 500.

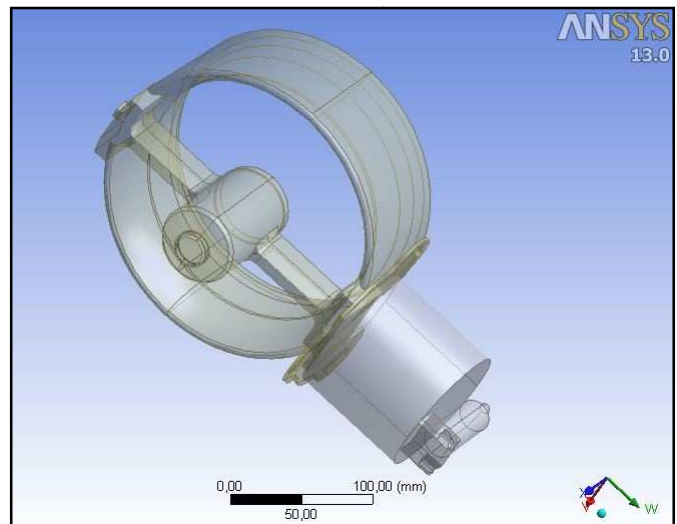
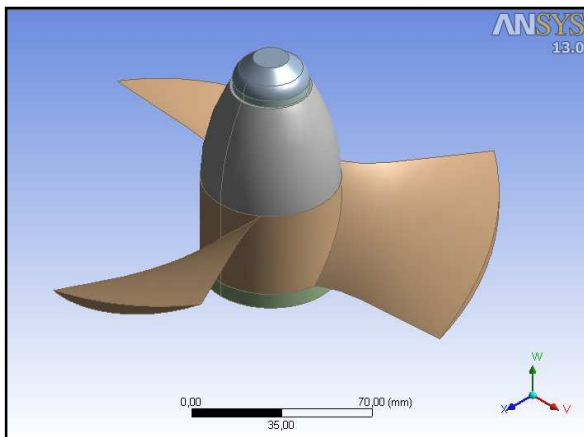


Fig. 22. Geometria del sòlid propulsor.

A.2. Equacions

Coefficient de propulsió:

$$K_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4} \quad \text{Eq. 1.}$$

Coefficient de parell:

$$K_Q = \frac{Q}{\rho n^2 D^5} \quad \text{Eq. 2.}$$

Coefficient d'avançament:

$$J = \frac{V_a}{nD} \quad \text{Eq. 3.}$$

Eficiència del propulsor:

$$\eta_0 = \frac{K_T}{K_Q} \cdot \frac{J}{2\pi} \quad \text{Eq. 4.}$$

Parell:

$$Q = \frac{Pot}{\omega} \quad \text{Eq. 5.}$$

On:

T és la força de propulsió. [N]

n és la velocitat de rotació. [rps]

D és el diàmetre. [m]

ρ és la densitat del fluid. [kg/m³]

V_a és la velocitat d'avanç. [m/s]

Q és el parell. [Nm]

ω és la velocitat angular. [rad/s]

Pot és la potència. [W]

A.3. Open waterdiagram

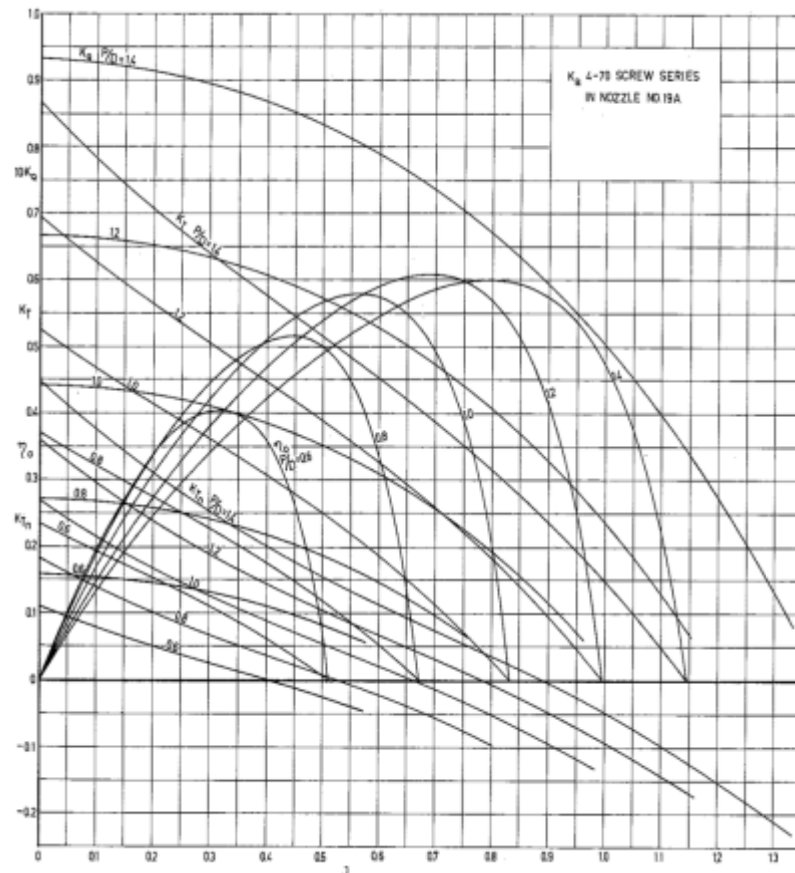


Fig. 23. Open waterdiagram pel model de turbina Ka440.

A.4. Matlab

```

densitat=1025;           %kg/m^3
D = 0.1782;             %metres
PoD = 1.22;
P = PoD*D;              %pitch en metres
J= 0:0.05:0.8;

for i = 1:length(J)
    [Kt(i),Kq(i),Ktn(i),rendiment(i)] = Ka440(J(i),P,D);
end

plot(J,Kt)
axis equal
hold on
plot(J,Kq*10,'r')
plot(J,rendiment,'g')
plot(J,Ktn,'.')

```

Fig. 24. Comandes de Matlab.

```

function [Kt,Kq,Ktn,n]=Ka440(J,P,D)

PD=P/D;

for i=1:6
    j(i)=J^i;
    pd(i)=PD^i;
end

% KAPLAN 440

Kt=0.03055-0.148687*j(1)-0.391137*j(3)-
0.432612*pd(1)*j(1)+0.667657*pd(2)+0.285076*pd(2)*j(2)-0.172529*pd(3)-
0.017293*pd(6)*j(1);

Kq=0.006735-0.016306*j(2)-0.007244*j(4)-
0.024012*pd(1)*j(2)+0.005193*pd(2)*j(2)+0.046605*pd(3)-
0.007366*pd(4)+pd(6)*(-0.001730-0.000337*j(1)+0.000861*j(2));

Ktn=0.076594+0.075223*j(1)-0.061881*j(2)-0.138094*j(3)-
0.370620*j(5)+0.323447*j(6)+pd(1)*(-0.271337-0.687921*j(1)+0.225189*j(2)-
0.081101*j(6))+pd(2)*(0.666028+0.734285*j(2))+pd(3)*(-0.202467-
0.542490*j(2)-0.016149*j(6))+0.099819*pd(4)*j(3)+0.030084*pd(5)*j(2)-
0.001876*pd(6)*j(2);

Kt = Kt.*0.4/0.45;
Kq = (Kq.*0.54/0.67)+0.005*J;
J = J*11/10.5;
n = (Kt).*J./(Kq.*2*pi);

end

```

Fig. 25. Comandes de Matlab.

A.5. Equacions polinòmiques

$$\begin{aligned}
 K_T &= A_{0,0} + A_{0,1} J + \dots + A_{0,6} J^6 \\
 &+ A_{1,0} \left(\frac{P}{D}\right) + A_{1,1} \left(\frac{P}{D}\right) J + \dots + A_{1,6} \left(\frac{P}{D}\right) J^6 \\
 &+ A_{2,0} \left(\frac{P}{D}\right)^2 + A_{2,1} \left(\frac{P}{D}\right)^2 J + \dots + A_{2,6} \left(\frac{P}{D}\right)^2 J^6 \\
 &\dots \\
 &+ A_{6,0} \left(\frac{P}{D}\right)^6 + A_{6,1} \left(\frac{P}{D}\right)^6 J + \dots + A_{6,6} \left(\frac{P}{D}\right)^6 J^6 \\
 K_{TN} &= B_{0,0} + B_{0,1} J + \dots + B_{6,6} \left(\frac{P}{D}\right)^6 J^6 \\
 K_Q &= C_{0,0} + C_{0,1} J + \dots + C_{6,6} \left(\frac{P}{D}\right)^6 J^6
 \end{aligned}$$

Fig. 26. Equacions polinòmiques pel model Kaplan.

A.6. Taula de coeficients

	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>Axy</i>	<i>Bxy</i>	<i>Cxy</i>
0	0	0	+0.030550	+0.076594	+0.006735
1		1	-0.148687	+0.075223	
2		2		-0.061881	-0.016306
3		3	-0.391137	-0.138094	
4		4			-0.007244
5		5		-0.370620	
6		6		+0.323447	
7	1	0		-0.271337	
8		1	-0.432612	-0.687921	
9		2		+0.225189	-0.024012
10		3			
11		4			
12		5			
13		6		-0.081101	
14	2	0	+0.667657	+0.666028	
15		1			
16		2	+0.285076	+0.734285	+0.005193
17		3			
18		4			
19		5			
20		6			
21	3	0	-0.172529	-0.202467	+0.046605
22		1			
23		2		-0.542490	
24		3			
25		4			
26		5			
27		6		-0.016149	
28	4	0			-0.007366
29		1			
30		2			
31		3		+0.099819	
32		4			
33		5			
34		6			
35	5	0			
36		1		+0.030084	
37		2			
38		3			
39		4			
40		5			
41		6			
42	6	0			-0.001730
43		1	-0.017283		-0.000337
44		2		-0.001876	+0.000861
45		3			
46		4			
47		5			
48		6			
49	0	7			

Taula 9. Taula de coeficients per a les equacions polinòmiques.

A.7. Mallat

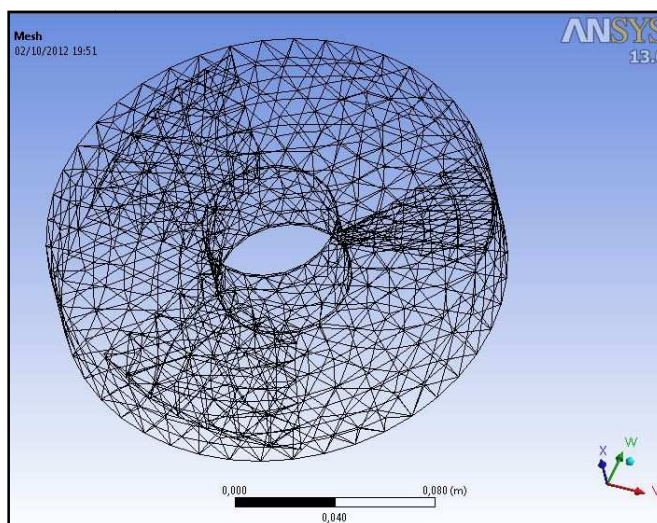


Fig. 27. Mallat automàtic amb mida d'elements per defecte.

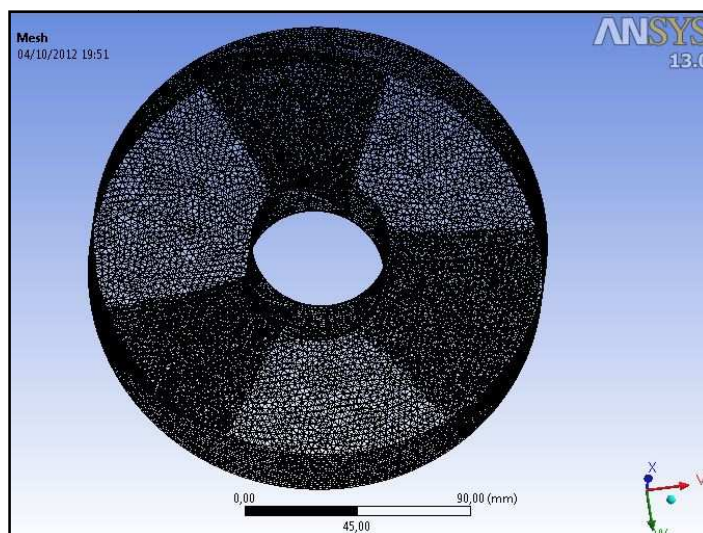


Fig. 28. Mallat automàtic amb mida d'element d'1mm.

Details of "Patch Conforming Method" - Method	
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Body
Definition	
Suppressed	No
Method	Tetrahedrons
Algorithm	Patch Conforming
Element Midside Nodes	Use Global Setting

Fig. 29. Detalls del mètode de mallat.

Details of "Inflation" - Inflation	
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Body
Definition	
Suppressed	No
Boundary Scoping Method	Geometry Selection
Boundary	1 Face
Inflation Option	First Layer Thickness
<input type="checkbox"/> First Layer Height	1,e-004 m
<input type="checkbox"/> Maximum Layers	5
<input type="checkbox"/> Growth Rate	1,2
Inflation Algorithm	Post

Fig. 30. Configuració de l'eina "inflation".

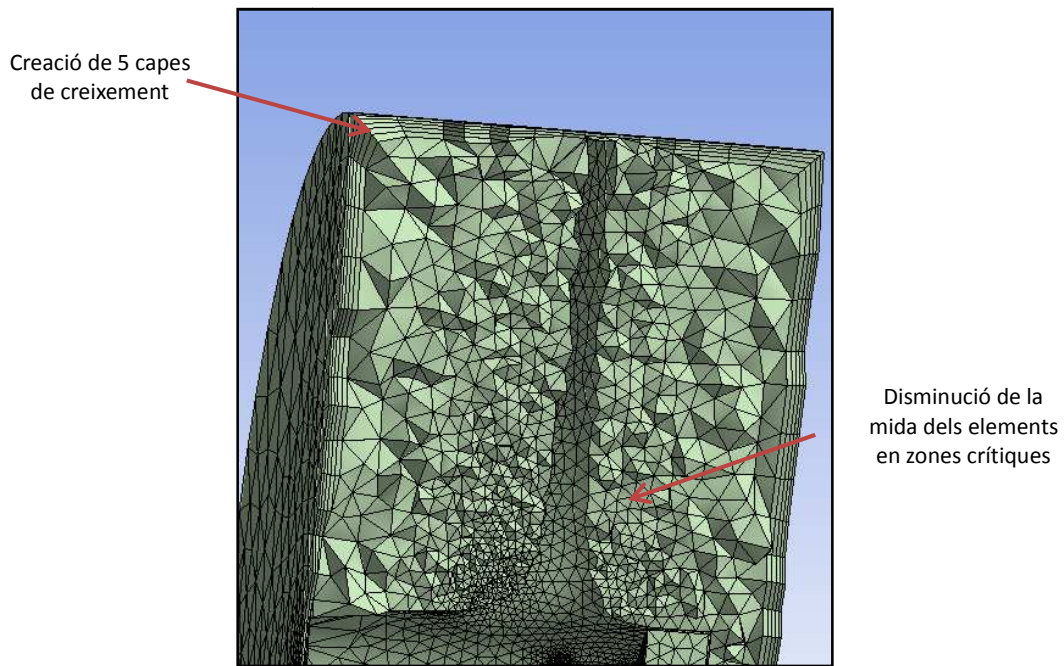


Fig. 31. Resultat de fer servir l'eina "inflation" i "facesizing".

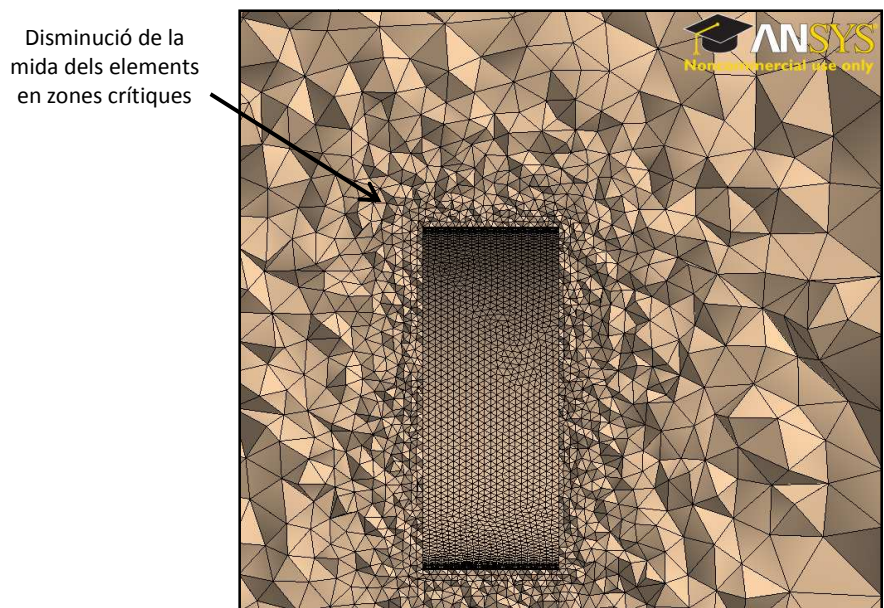


Fig. 32. Detall del mallat del túnel amb l'eina "facesizing".

Details of "Face Sizing" - Sizing	
[-] Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Face
[-] Definition	
Suppressed	No
Type	Element Size
<input type="checkbox"/> Element Size	4,e-003 m
Behavior	Soft
<input type="checkbox"/> Curvature Normal Angle	Default
<input type="checkbox"/> Growth Rate	Default

Fig. 33. Configuració de l'eina "facesizing".

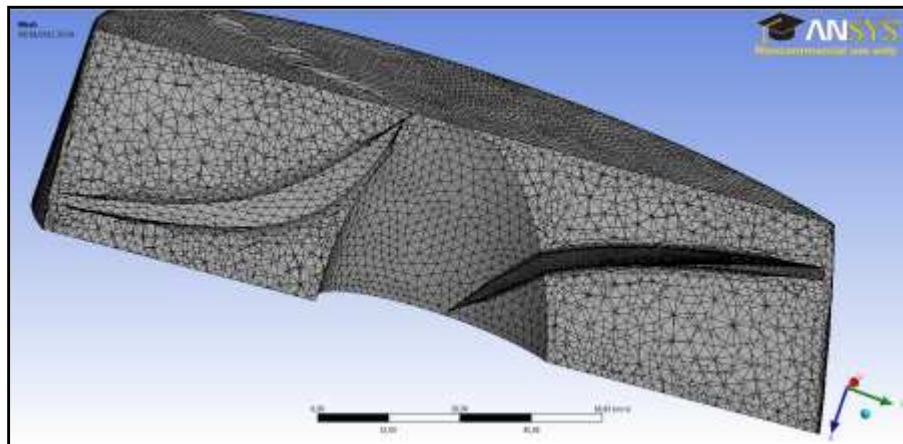


Fig. 34. Mallat del sòlid. Visió Shaded Exterior andEdges.

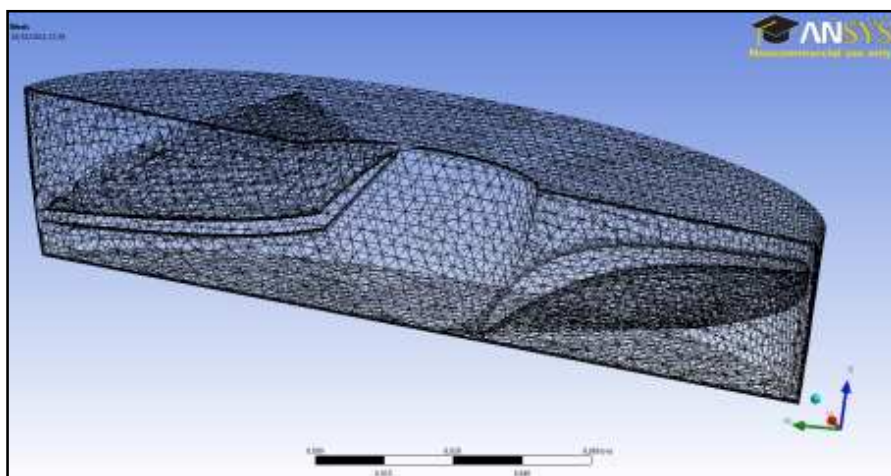


Fig. 35. Mallat del sòlid. Visió Wireframe.

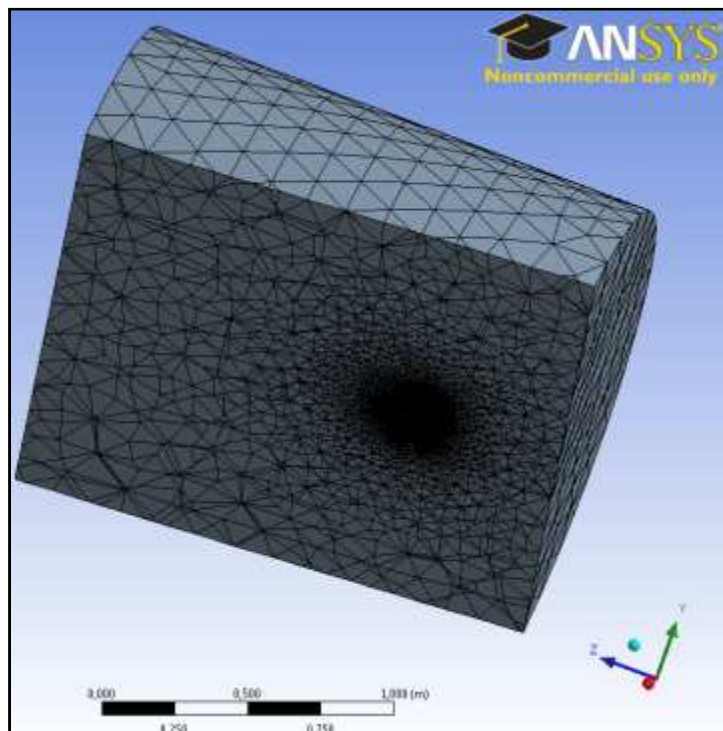


Fig. 36. Mallat del túnel d'aigua.

A.8. Configuració amb ANSYS

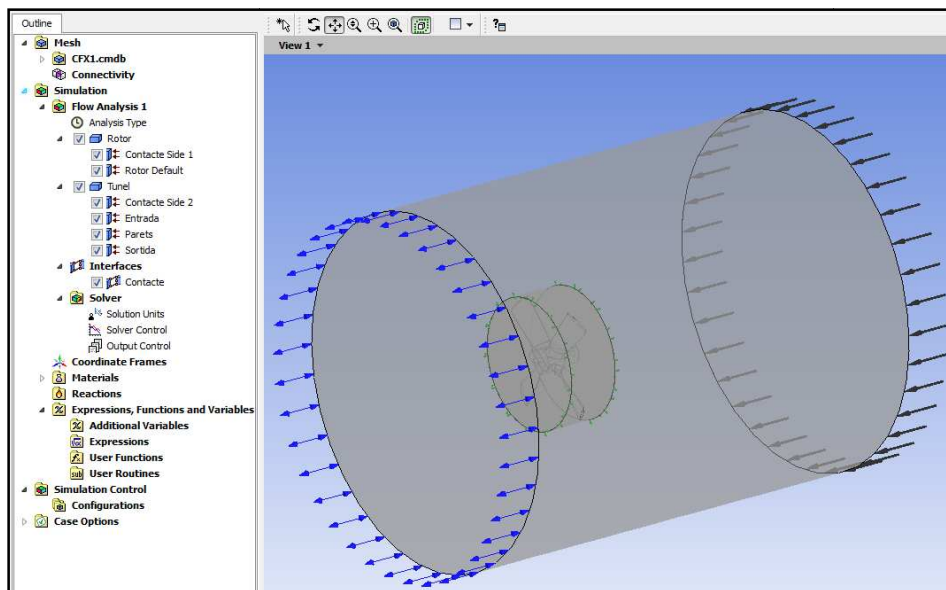


Fig. 37. Pantalla de configuració amb ANSYS.

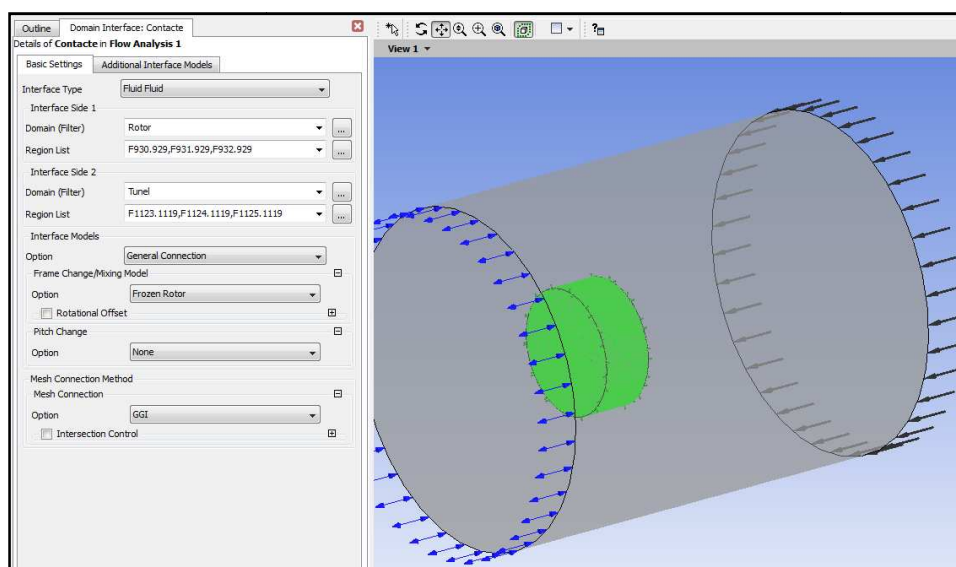


Fig. 38. Detall del domini "interface" en la configuració amb ANSYS.

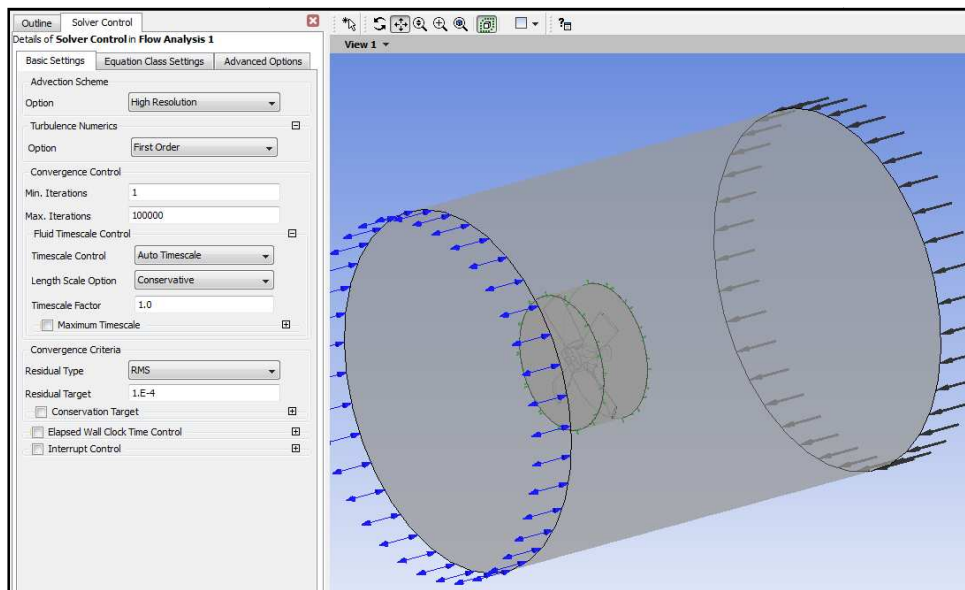


Fig. 39. Configuració de l'eina Solver Control.

A.9. Post-procés

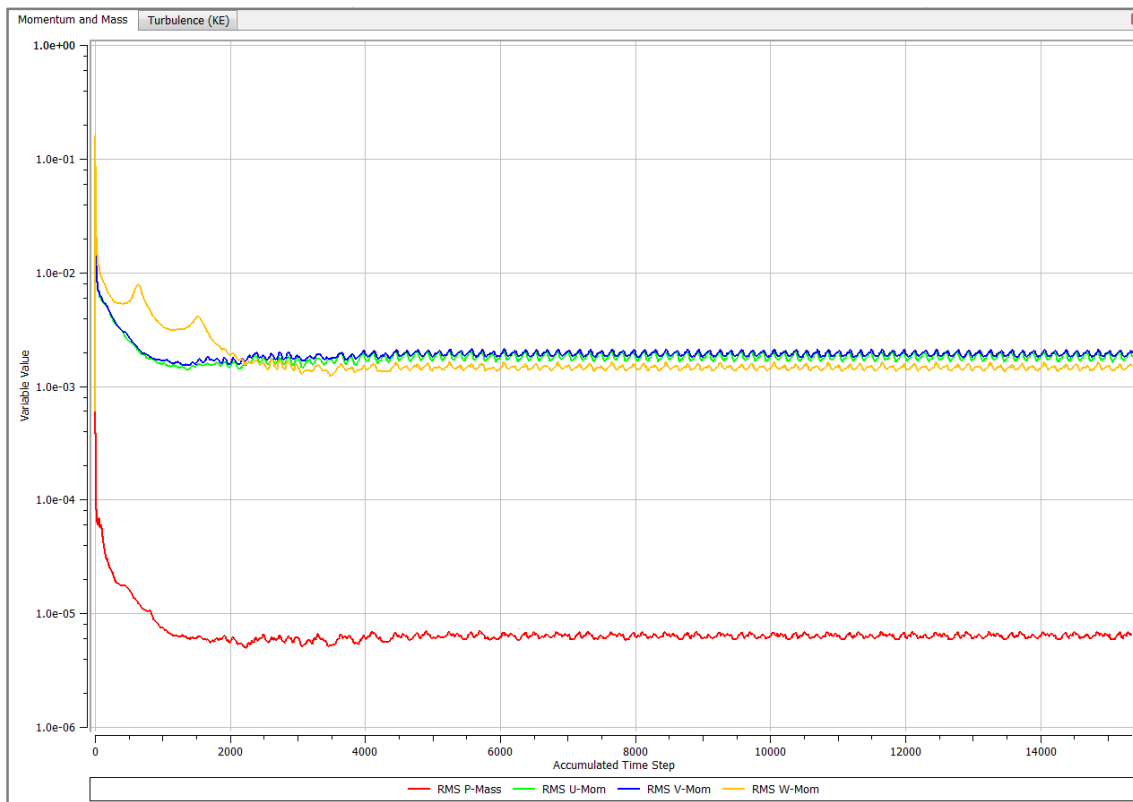


Fig. 40. Gràfica de simulació amb valors residuals.

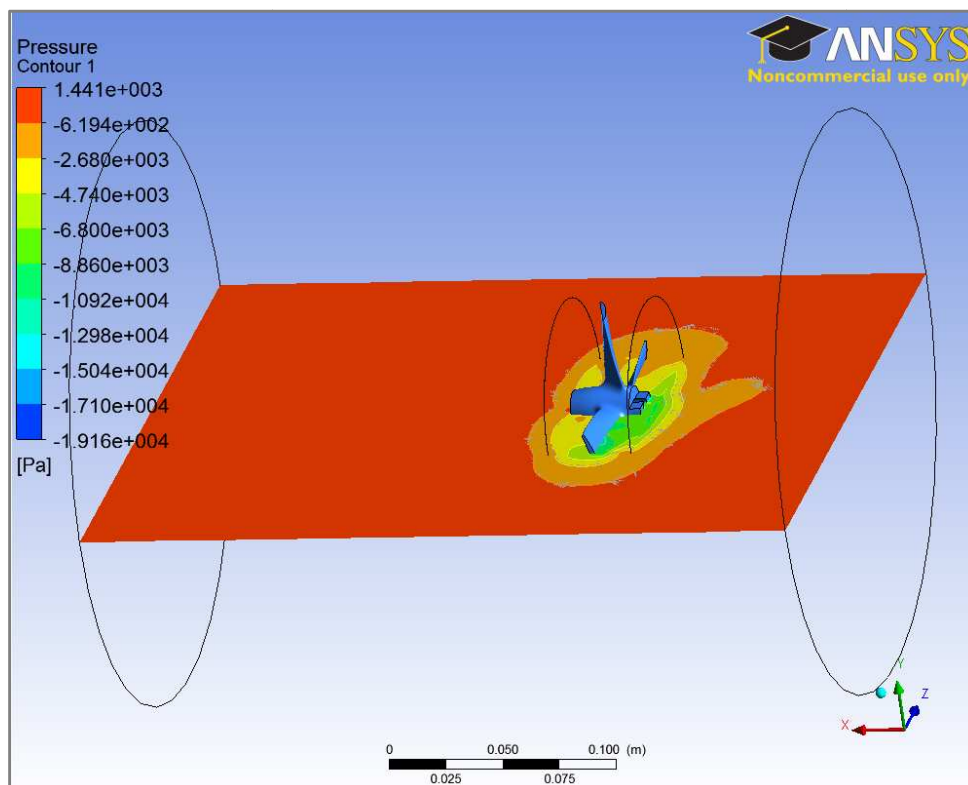


Fig. 41. Pla de tall amb contorn de pressió (model Ka440).

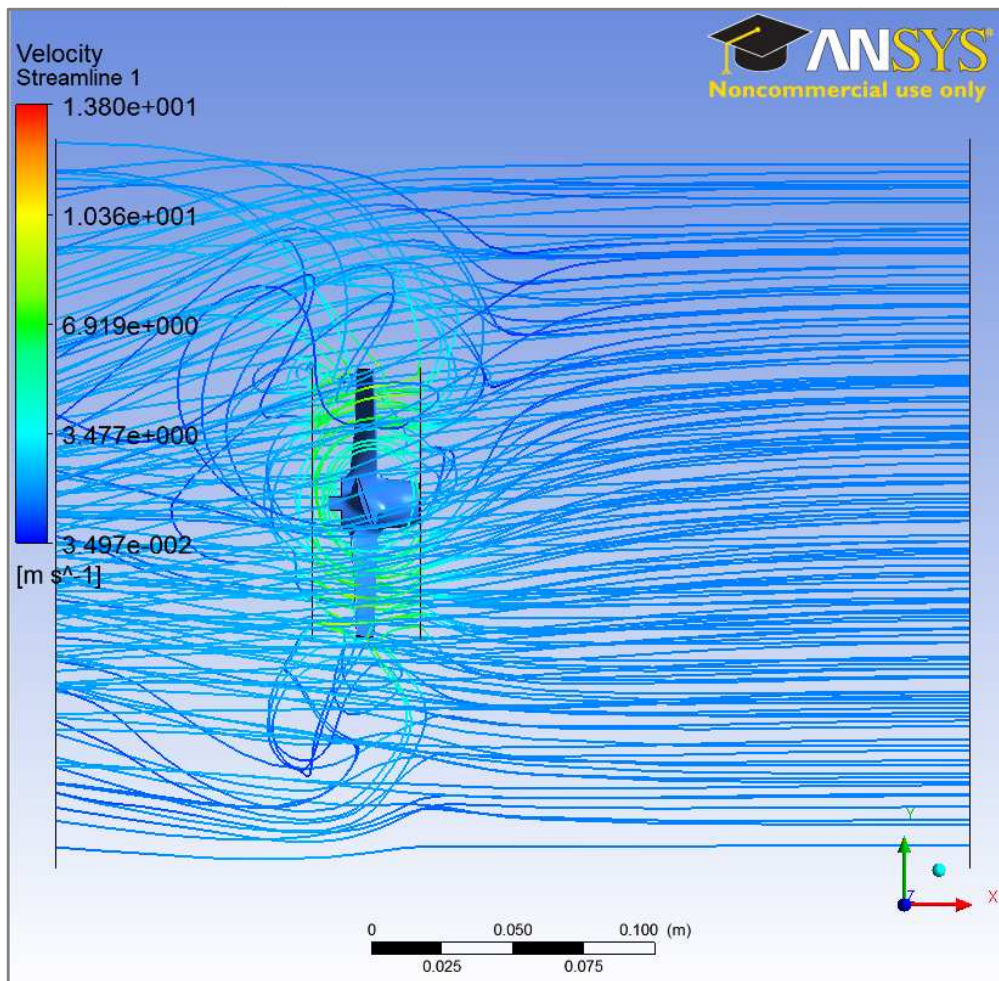


Fig. 42. Línies de velocitat.

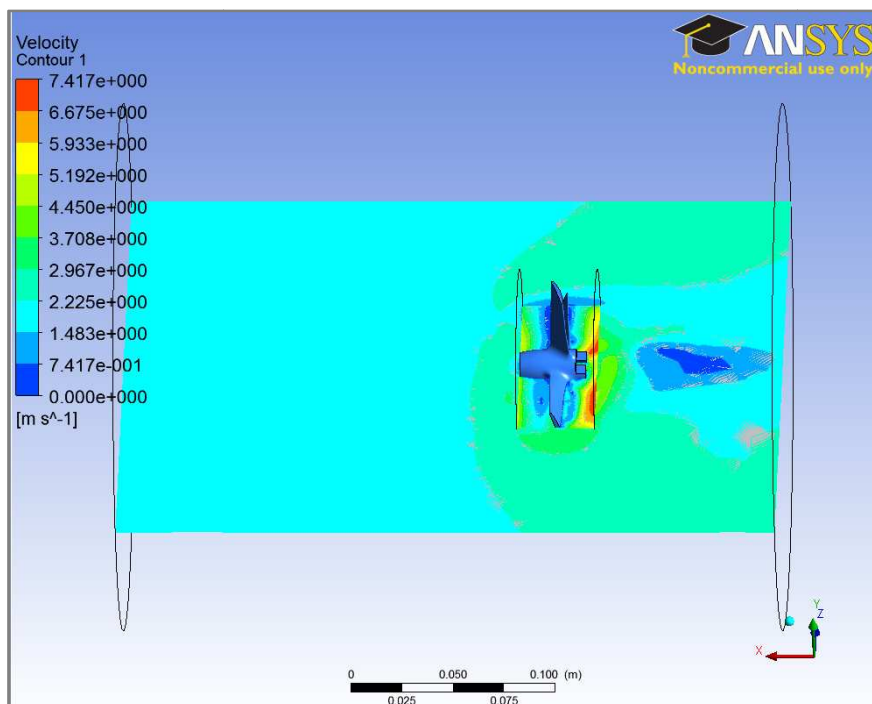


Fig. 43. Pla de tall amb contorn de velocitat.

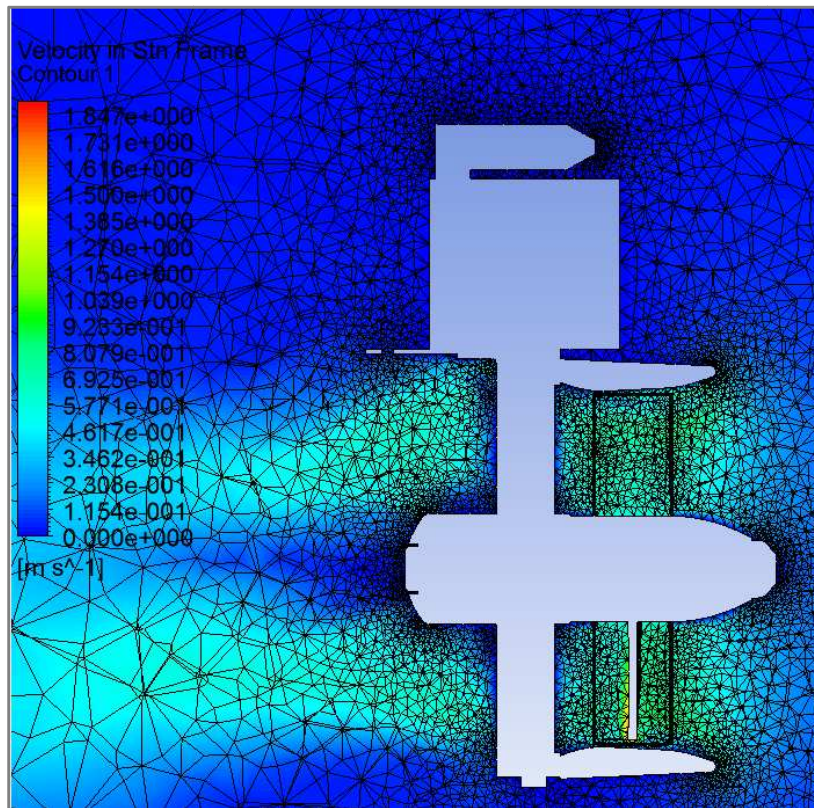


Fig. 44. Pla de tall amb contorn de velocitat (model Seaeeye).

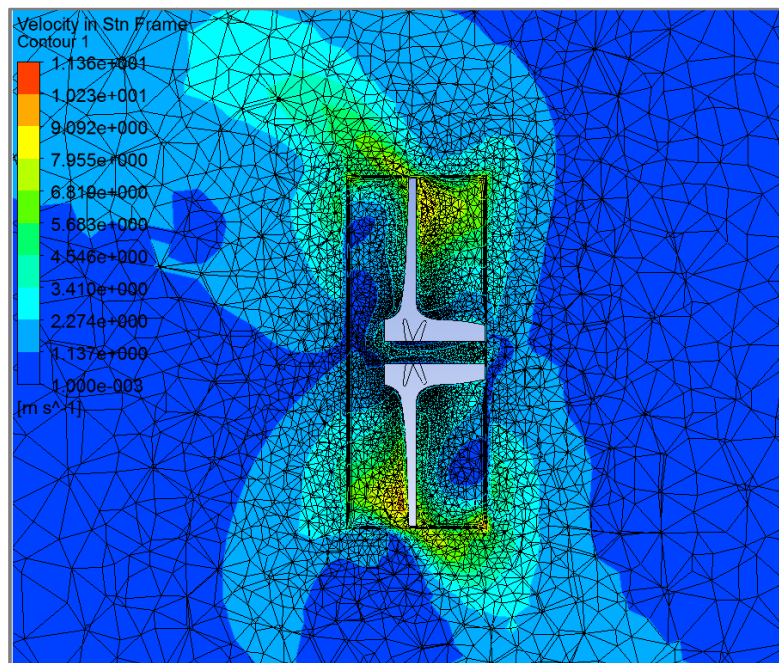


Fig. 45. Pla de tall amb contorn de velocitat (model Ka440).

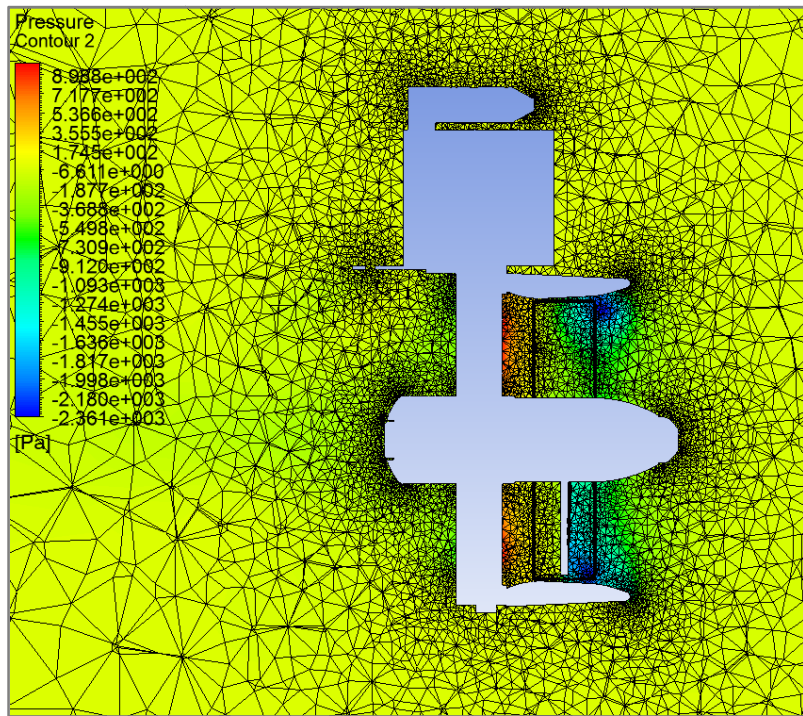


Fig. 46. Pla de tall amb contorn de pressió (model Seaye).

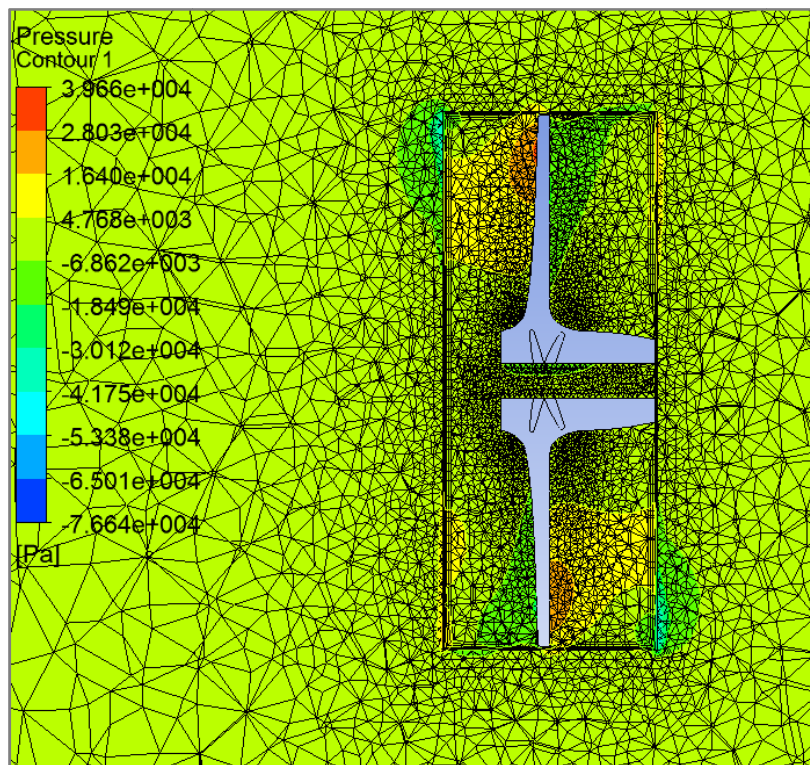


Fig. 47. Pla de tall amb contorn de pressió (model Ka440).

A.10. Fotografies



Fig. 48. Piscina del CIRCS, on es realitzen proves i assajos.



Fig. 49. Obtenció de dades experimentals.



Fig. 50. Muntatge per a proves experimentals amb prototip.

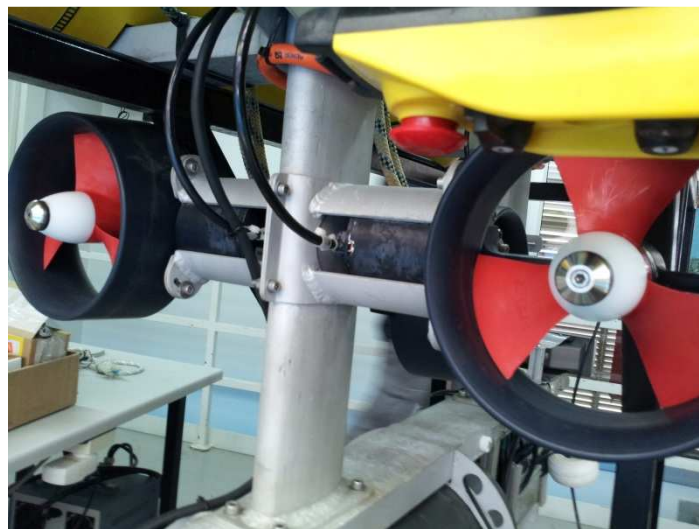


Fig. 51. Detall dels propulsors del robot Girona 500.



Fig. 52. Robot Girona 500.

A.11. Estudi econòmic: estat d'amidaments

1. Muntatge experimental

Descripció	Quantitat
Propulsor Seaeye de 3 pales	1
Propulsor Ka440	1
Dinamòmetre	1
Multímetre digital	1
Estructura metàl·lica	1
Hores enginyer industrial	3

2. Material informàtic

Descripció	Quantitat
Ordinador de sobretaula PC	1
Software ANSYS 13 amb 1 llicència	1
Software matemàtic Matlab	1
Paquet Microsoft Office 2010	1
Hores programador	20
Hores proves programador	30

3. Comprovació

Descripció	Quantitat
Hores enginyer industrial	5

A.12. Estudi econòmic: pressupost

PREUS UNITARIS

Propulsors

Descripció	Preu unitari (€)
Propulsor Seaeye de 3 pales	150,00
Propulsor Ka440	200,00

Material

Descripció	Preu unitari (€)
Dinamòmetre	50,00
Multímetre digital	37,00
Estructura metàl·lica	25,00

Software i hardware

Descripció	Preu unitari (€)
Lloguer software ANSYS 13 amb 1 llicència (1 mes)	3.032,50
Software matemàtic Matlab(1 mes, amortització 1 any)	42,00
Paquet Microsoft Office 2010 (1 mes, amortització 2 any)	5,00
Ordinador de sobretaula PC (1 mes, amortització 5 anys)	9,00

Treball

Descripció	Preu unitari (€)
Hores enginyer industrial	30,00
Hores programador	25,00
Hores proves programador	25,00

PRESSUPOSTOS PARCIALS

Muntatge experimental

Descripció	Quantitat	Preu unitari (€)	Import (€)
Propulsor Seaeye de 3 pales	(1)	150,00	150,00
Propulsor Ka440	(1)	200,00	200,00
Dinamòmetre	(1)	50,00	50,00
Multímetre digital	(1)	37,00	37,00
Estructura metàl·lica	(1)	25,00	25,00
Hores enginyer industrial	(3)	30,00	90,00
Subtotal:			552,00

Material informàtic

Descripció	Quantitat	Preu unitari (€)	Import (€)
Ordinador de sobretaula PC (1 mes, amortització 5 anys)	(1)	9,00	9,00
Lloguer software ANSYS 13 amb 1 llicència (1 mes)	(1)	3.032,50	3.032,50
Software matemàtic Matlab(1 mes, amortització 1 any)	(1)	42,00	42,00
Paquet Microsoft Office 2010 (1 mes, amortització 2 any)	(1)	5,00	5,00
Hores programador	(20)	25,00	500,00
Hores proves programador	(30)	25,00	750,00
Subtotal:			4.338,50

Comprovació

Descripció	Quantitat	Preu unitari (€)	Import (€)
Hores enginyer industrial	(5)	30,00	150,00
Subtotal:			150,00

PRESSUPOST TOTAL

Descripció	Import (€)
Muntatge experimental	552,00
Material informàtic	4380,00
Comprovació	150,00
Base imposable (€)	5.082,00
21% IVA (€)	1.067,22
Import total (€)	6.149,22

COST DEL PROJECTE

Descripció	Quantitat	Preu unitari (€)	Import (€)
Hores enginyer industrial	(30)	30,00	900,00
Material d'oficina	(1)	25,00	25,00
Total:			925,00

A.13. Estandardització del procés

Nº operació	Descripció del procés	Comentaris	Temps [min]
1	Importació geometria a ANSYS.	Utilitzar format compatible amb ANSYS. En el nostre cas, *.iges, el més habitual.	05
2	Creació del cilindre (túnel d'aigua).	Les mides del túnel aniran en relació al diàmetre i gruix del propulsor que utilitzem.	30
3	Creació del cilindre envolupant.	El diàmetre i el gruix seran un parell de mil·límetres majors que els del propulsor.	30
4	Immersió de geometries.	Immergim el propulsor al cilindre envolupant i tot s'immergeix al cilindre túnel d'aigua.	10
5	Definició del mallat.	Utilitzar el mètode Tetrahedrons amb les eines "inflation" i "facesizing".	60
6	Càlcul del mallat.	Generar mallat.	20
7	Preparar la configuració.	Definir cares de contacte (<i>interfaces</i>), entrada de fluid, sortida, parets, condicions de l'entorn...	30
8	Càlcul	Càlcul dels elements finits.	1.440
9	Anàlisi de resultats	Mitjançant ANSYS es poden analitzar tot una sèrie de paràmetres de forma numèrica o visual.	60
			1.685

Taula 10. Operacions d'estandardització del procés.

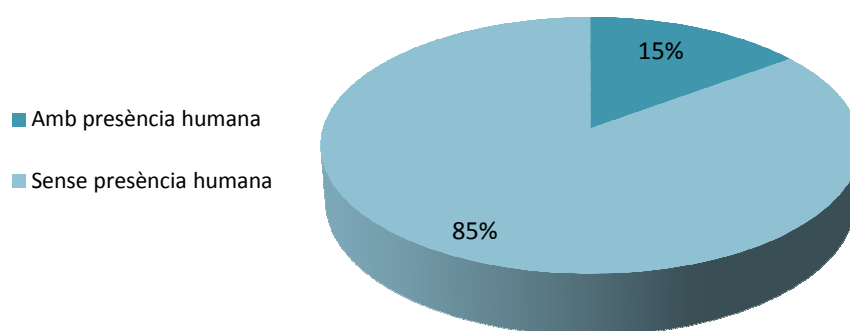


Fig. 53. Distribució del temps segons si hi ha presència humana o si no.