



EPS

Escola Politècnica

Superior

Projecte/Treball Fi de Carrera

Estudi: Enginyeria Tècn. Ind. Mecànica. Pla 2002

Títol: Disseny i optimització d'un rodet hidràulic d'un molí fariner de meitat del segle XX situat a Besalú

Document: Memòria i Annexos

Alumne: Jordi Solà Codony

Director/Tutor: Josep Ramon González

Departament: Eng. Mecànica i de la Construcció Industrial

Àrea: Mecànica de Fluids

Convocatòria (mes/any): Juny de 2008

ÍNDEX

MEMÒRIA

1. INTRODUCCIÓ	4
1.1. ANTECEDENTS.....	5
1.2. OBJECTE.....	6
1.3. ESPECIFICACIONS I ABAST.....	7
2. EL MOLÍ HIDRÀULIC.....	8
2.1. CONTEXT HISTÒRIC.....	9
2.2. DESCRIPCIÓ DEL FUNCIONAMENT	10
2.3. ELEMENTS DEL MOLÍ HIDRÀULIC DE RODET HORITZONTAL.....	12
3. RODET CLÀSSIC.....	26
3.1. INTRODUCCIÓ.....	27
3.2. CÀLCULS ANALÍTICS	28
3.3. SIMULACIÓ.....	42
3.4. RESULTATS	48
3.5. CONCLUSIONS	55
4. RODET MODIFICAT 1: REDUCCIÓ D'ÀLEPS	56
4.1. INTRODUCCIÓ.....	57
4.2. SIMULACIÓ.....	57
4.3. RESULTATS	59
4.4. CONCLUSIONS	61
5. RODET MODIFICAT 2: VARIACIÓ EN L'ORIENTACIÓ DELS ÀLEPS.....	63

5.1.	INTRODUCCIÓ	64
5.2.	SIMULACIÓ	64
5.3.	RESULTATS	66
5.4.	CONCLUSIONS	68
6.	RESUM DEL PRESSUPOST	69
7.	CONCLUSIONS	71
8.	RELACIÓ DE DOCUMENTS.....	74
9.	BIBLIOGRAFIA.....	76
ANNEX A: GENERACIÓ DE MALLAT AMB ICEM “ANSYS”		78
A.1.	ICEM “ANSYS” 11.0.....	79
ANNEX B: SIMULACIÓ CFD AMB STAR CCM+		84
B.1.	STAR CCM+	85
ANNEX C: RESULTATS DEL RODET CLÀSSIC.....		88
C.1.	INTRODUCCIÓ	89
C.2.	FRACCIÓ DE VOLUM D'AIGUA.....	90
C.3.	PRESSIÓ	92
C.4.	VECTORS VELOCITAT	93
ANNEX D: RESULTATS DEL RODET MODIFICAT 1		94
D.1.	INTRODUCCIÓ	95
D.2.	FRACCIÓ DE VOLUM D'AIGUA.....	96
D.3.	PRESSIÓ	98
D.4.	VECTORS VELOCITAT	99

ANNEX E: RESULTATS DEL RODET MODIFICAT 2	100
E.1. INTRODUCCIÓ	101
E.2. FRACCIÓ DE VOLUM D'AIGUA.....	102
E.3. PRESSIÓ	104
E.4. VECTORS VELOCITAT	105
ANNEX F: ESQUEMES DE DISSENY	106
F.1. RODET CLÀSSIC	107
F.2. RODET MODIFICAT 1: REDUCCIÓ D'ÀLEPS.....	108
F.3. RODET MODIFICAT 2: VARIACIÓ EN L'ORIENTACIÓ DELS ÀLEPS.....	109

1.INTRODUCCIÓ

1.1. ANTECEDENTS

Besalú és un municipi de la comarca de la Garrotxa amb una superfície municipal de 4,81 Km² i una població d'uns 2.200 habitants.

L'àmbit turístic i cultural són els punts de màxim interès en aquesta petita població d'estil medieval, on el patrimoni històric és la principal font d'activació econòmica. És per això que l'Ajuntament de Besalú destina una part molt important dels seus recursos en descobrir, rehabilitar i conservar tot aquest llegat històric que el municipi ens ofereix.

Dins d'aquest gran patrimoni històric de Besalú hi ha les restes d'un molí fariner de rodet horitzontal que va deixar de funcionar a meitat del segle XX. Durant l'any 2004, l'Ajuntament de Besalú va realitzar unes actuacions arqueològiques a la zona dels horts, pròxima al riu Fluvià, que han permès la redescoberta del Molí d'en Subirós, que està propulsat per la força de l'aigua del canal de rec, que va paral·lel al riu.

Actualment s'estan duent a terme les obres de reconstrucció de l'edifici del molí amb la intenció que torni a funcionar com ho feia antigament i convertir aquest espai en un petit museu dedicat a aquest antic ofici, en l'actualitat desaparegut.

Per això, cal reconstruir tots els elements que componen el mecanisme del molí. Per poder dur a terme aquesta feina amb el màxim rigor històric s'ha realitzat un treball d'investigació històrica i s'ha comparat amb molins existents a la comarca.

Aquesta comparació i anàlisi de molins existents ha revelat la manca d'estudis tècnics sobre el rodet hidràulic tot i ésser una de les parts fonamentals del molí. D'aquesta forma, és d'esperar que un redisseny adequat del rodet permetés millorar de forma apreciable el rendiment hidràulic del molí.

1.2. OBJECTE

L'objecte d'aquest projecte és contribuir a la recuperació del patrimoni industrial que ens ofereix la nostra història mitjançant l'estudi tècnic d'un rodet hidràulic d'un molí fariner situat a Besalú. Això ens permetrà suggerir una sèrie de millores per optimitzar-ne el rendiment.

Per tal de dur a terme aquest objectiu, dividirem el projecte en dues parts, primer definirem els elements que componen el mecanisme del molí fariner hidràulic de rodet horitzontal i analitzarem el seu funcionament.

En segon lloc, realitzarem un estudi tècnic (hidràulic i mecànic) del rodet clàssic (utilitzat en d'altres molins de característiques semblants). D'aquesta forma, serem capaços de conèixer no només el seu comportament hidràulic sinó també com podem modificar les variables essencials del mecanisme com potència hidràulica, parell motriu, etc.

En base als coneixements assolits en l'anàlisi anterior, proposem dos redissenys del rodet clàssic per optimitzar-ne el rendiment energètic.

L'estudi hidràulic de cada un d'aquests rodets el durem a terme mitjançant simulacions amb el programari informàtic de dinàmica de fluids computacional (CFD) Star-CCM+.

1.3. ESPECIFICACIONS I ABAST

En la realització d'aquest projecte s'utilitzaran diferents eines informàtiques i una metodologia de treball que es descriu a continuació.

L'estudi de tots els elements que formen el molí es farà mitjançant un disseny 3D fet amb el programa SOLID WORKS. Degut a que el molí fariner objecte del present projecte es troba molt malmès, aquesta etapa d'investigació i recopilació de documentació històrica es basarà de forma molt important en informació extreta de visites a diferents molins fariners existents a la comarca de característiques globals similars al de Besalú.

L'anàlisi hidràulica del rodet es realitzarà mitjançant una simulació virtual amb un programa de mecànica de fluids computacional anomenat Star-CCM+ de la companyia CD-ADAPCO que actualment disposa l'Àrea de Mecànica de Fluids del Departament d'Enginyeria Mecànica i de la Construcció Industrial de la Universitat de Girona. Prèviament, però, s'ha realitzat una discretització de la geometria analitzada en petits elements amb el programa ICEM d'ANSYS, també disponible en el Departament d'Enginyeria Mecànica i de la Construcció Industrial que ens permetrà mallar la geometria que es vol analitzar.

S'ha de tenir present que l'abast d'aquest projecte es limitarà a la simulació virtual del rodet hidràulic i dels seus posteriors redissenys. Per això, no es preveu la construcció dels rodets.

2.EL MOLÍ HIDRÀULIC

2.1. CONTEXT HISTÒRIC

El Molí d'en Subirós situat a la zona dels Horts a la confluència del carrer dels Horts i el carrer de la Font del municipi de Besalú existeix provablement des de l'època medieval ja que tots els elements arquitectònics de la zona pròxima a aquest són d'aquesta època.

Antigament els molins es construïen en llocs on hi hagués no només una quantitat abundant d'aigua sinó també lloc suficient per emmagatzemar-la i crear una bassa artificial per disposar de l'energia potencial necessària per moure tot el mecanisme. Per això és molt freqüent que les ubicacions dels molins no variïn al llarg del temps, ja que tenen unes característiques constructives molt particulars. Així doncs, les múltiples inundacions al llarg de la història i les posteriors reconstruccions fan difícil definir amb exactitud en quina època fou construït el Molí d'en Subirós. Es pot afirmar, però, que l'últim any de funcionament va ser el 1963, quan a l'octubre es va produir una riuada que va acabar definitivament amb la vida d'aquest molí.

Així, les instal·lacions que encara resten són de la meitat del s. XX. Per això el projecte general de reconstrucció que impulsa l'Ajuntament de Besalú es realitza considerant les característiques i estil d'aquesta època.

Actualment s'està reconstruint l'edifici del molí que es trobava en un estat de deteriorament molt avançat. Pel que fa al mecanisme, aquest es trobava molt malmès, amb una gran quantitat de peces desaparegudes. S'ha de tenir present que moltes peces eren de fusta i s'han descomposat amb el pas del temps. De fet, només es conserva la mola volandera (part mòbil) i la mola sotana (part encastada) que són de pedra.

Tanmateix, gràcies a la conservació de les moles s'ha pogut constatar que el molí fariner de Besalú té les mateixes dimensions i característiques que la majoria de molins fariners que encara hi ha a la comarca i que, per tant, s'han utilitzat de referència per a la seva reconstrucció. En aquest cas utilitzarem un molí fariner de la Vall de Bianya.

2.2. DESCRIPCIÓ DEL FUNCIONAMENT

El molí fariner hidràulic de rodet horitzontal és una màquina propulsada per un doll d'aigua regulable que prové d'una bassa situada a una alçada superior al punt d'utilització. D'aquesta forma, l'energia potencial de l'aigua inicial que es troba a la bassa es transforma en energia cinètica i posteriorment en mecànica al colpejar els àleps del rodet. Això produeix un moment de gir que és aprofitat per moure una de les moles.

En efecte, per mitjà d'un eix rígid es transmet aquest moment de gir a una mola mòbil que gira sobre una mola encastada al terra. El fregament entre les dues pedres permet triturar el gra fins a convertir-lo en farina. Tot aquest procés de moldre té lloc dins una caixa de fusta anomenada "riscla", que garanteix l'estanqueïtat i la correcta recollida del producte elaborat. Aquest cau directament dins una altra caixa anomenada "fariner".

El gra s'aboca per la part central superior, mitjançant una mena d'embut de fusta anomenat "tremuja" que es fa vibrar per regular la velocitat d'abocament. Posteriorment, el gra cau al centre de la mola i a conseqüència d'unes ranures que estan gravades en la pedra, es va desplaçant fins a la part exterior de la mola on surt convertit en farina.

D'altra banda es pot regular la distància de separació entre les dues pedres, variant el punt de recolzament de l'eix principal, per poder escollir la mida del granulat de la farina obtinguda.

Aquest sistema permet evitar el contacte directe entre les dues pedres, fet molt útil a l'hora de posar en funcionament el molí. En efecte, això permet eliminar la força de fregament entre les dues pedres i, per tant, reduir de forma substancial el moment resistent que ha de vèncer el rodet hidràulic. Si no fos així el rodet podria no generar suficient parell motriu per iniciar el moviment.

També hi ha un sistema de grua que permet agafar la mola mòbil i posar-la en posició vertical, per tal de dur a terme feines de manteniment.

Cal destacar que aquest tipus de màquines hidràuliques són poc precises i aconseguir un bon rendiment amb idèntics elements depèn molt de l'experiència del moliner.

En la figura 1, podem veure un esquema d'un molí fariner hidràulic tipus, que ens permetrà entendre millor el seu funcionament.

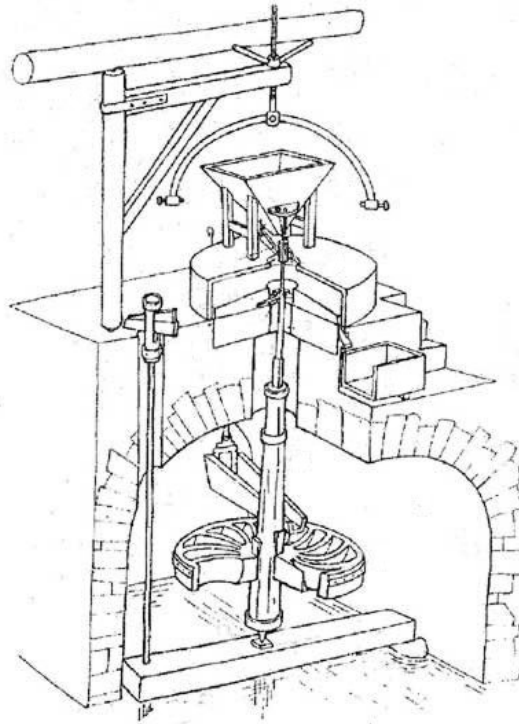


Figura 1: Esquema del principi de funcionament d'un molí fariner de rodet horitzontal (Enciclopèdia Catalana, 1998).

2.3. ELEMENTS DEL MOLÍ HIDRÀULIC DE RODET HORIZONTAL

Per poder estudiar millor tots els elements que componen el molí, s'ha realitzat un dibuix en 3D de tot el conjunt.

Aquest s'ha realitzat amb les mides reals del que resta del molí de Besalú. El conjunt s'ha reconstruït gràficament aprofitant, per una banda tots els elements constructius que encara es conserven i, per una altra, visitant molins similars. En aquest cas s'ha visitat un molí situat a la Vall de Bianya.

D'aquesta forma hem obtingut els paràmetres geomètrics necessaris per simular el funcionament del rodet. En la figura 2, podem veure una vista global del conjunt.

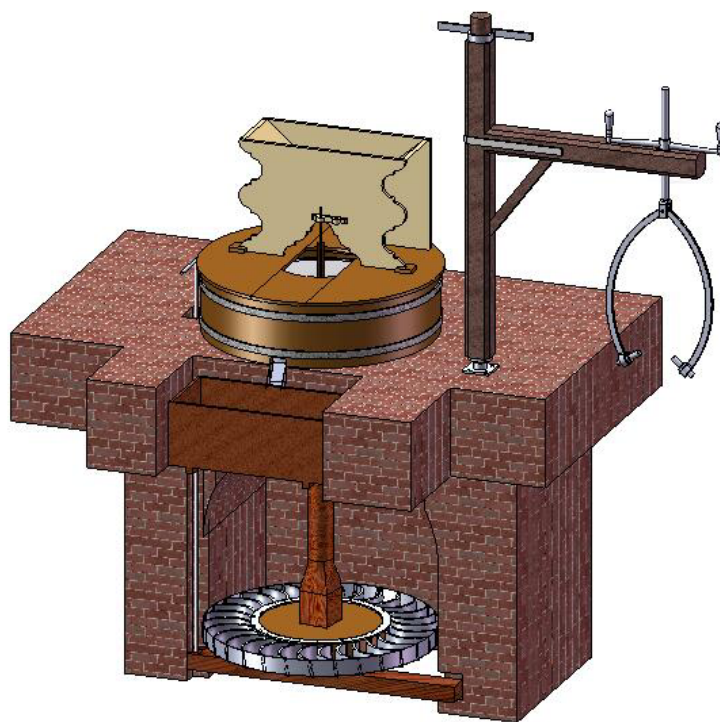


Figura 2: Vista de conjunt del molí fariner de Besalú.

A continuació es descriuen de forma individual els principals elements que formen el molí fariner (veure la figura 2).

2.3.1. Mola volandera

La mola volandera és la pedra circular de 1,30 m de diàmetre i gruix de 20 cm que gira sobre una altra pedra fixa de les mateixes dimensions (mola sotana). Normalment les moles són de materials molt resistents al fregament i el seu pes és d'uns 500 kg.

A conseqüència de la força de fricció que es produeix entre les dues pedres es genera un augment de la temperatura que podria provocar fractures de la pedra per dilatació. Per evitar-ho es col·loca una anella circular de ferro que embolcalla tota la pedra amb l'objectiu de reduir qualsevol variació en el diàmetre de la mola.

La pedra té un orifici central d'uns 30 cm de diàmetre per on s'hi aboca el gra i, alhora, per on hi passa l'eix principal.

En la cara lateral hi ha dos orificis circulars que permeten la seva subjecció quan es requereix un cert manteniment. Aquests dos orificis estan situats de manera aproximada a l'altura del centre de gravetat, aconseguint així una bona estabilitat quan la mola volandera s'alça.

En la cara on es produeix el contacte amb la pedra inferior, hi ha unes canals radials que faciliten el guiat de la farina de l'interior de la pedra cap a l'exterior. Per altra banda també hi trobem una ranura on hi encaixa la nadilla que és l'element que li transmet el moviment de rotació.

La vida útil de les moles és molt variable segons les hores d'ús. Per tal d'allargar-la, les pedres es construeixen amb un sobregruix que permet repicar-les a mesura que es va desgastant. D'aquesta manera també podem aconseguir el grau de rugositat desitjant en funció de la farina que volem obtenir. En la figura 3, podem veure un dibuix de la mola volandera.



Figura 3: Mola volandera de 1,33 m de diàmetre.

2.3.2. Mola sotana (solera)

Aquest és una pedra molt similar a la mola volandera amb la particularitat que està encastada al terra (no té cap mena de moviment). El seu gruix és lleugerament superior a conseqüència del seu encastament i la dificultat que això comporta a l'hora de canviar-la, per això es preveu un sobregruix més gran, per tal d'allargar la seva vida útil. El seu pes és d'uns 800 kg, aconseguint una base de treball molt estable.

També es preveu que sigui repicada. Aquesta operació es realitza al mateix temps que el repicat de la mola volandera.

En el seu orifici central hi finalitza l'eix motriu que engrana directament amb la nadilla. Per tal d'evitar que el gra caigui per aquest orifici hi ha una planxa metàl·lica que ajusta directament amb l'eix principal.

En la figura 4, podem veure el sobregruix de la mola sotana.

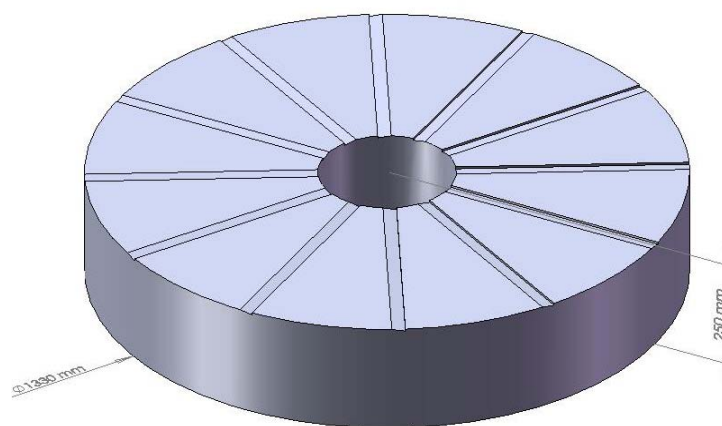


Figura 4: Mola sotana molt més gruixuda que la mola volandera.

2.3.3. Carcavà

El carcavà és l'espai físic on s'allotja el rodet, el banc i tots els elements que tenen contacte directe amb l'aigua. Es troba situat per sota del nivell de treball i està format per una volta circular amb una solera que serveix de canal per retornar l'aigua al riu.

En la figura 5, el carcavà és la part inferior amb forma d'arc.

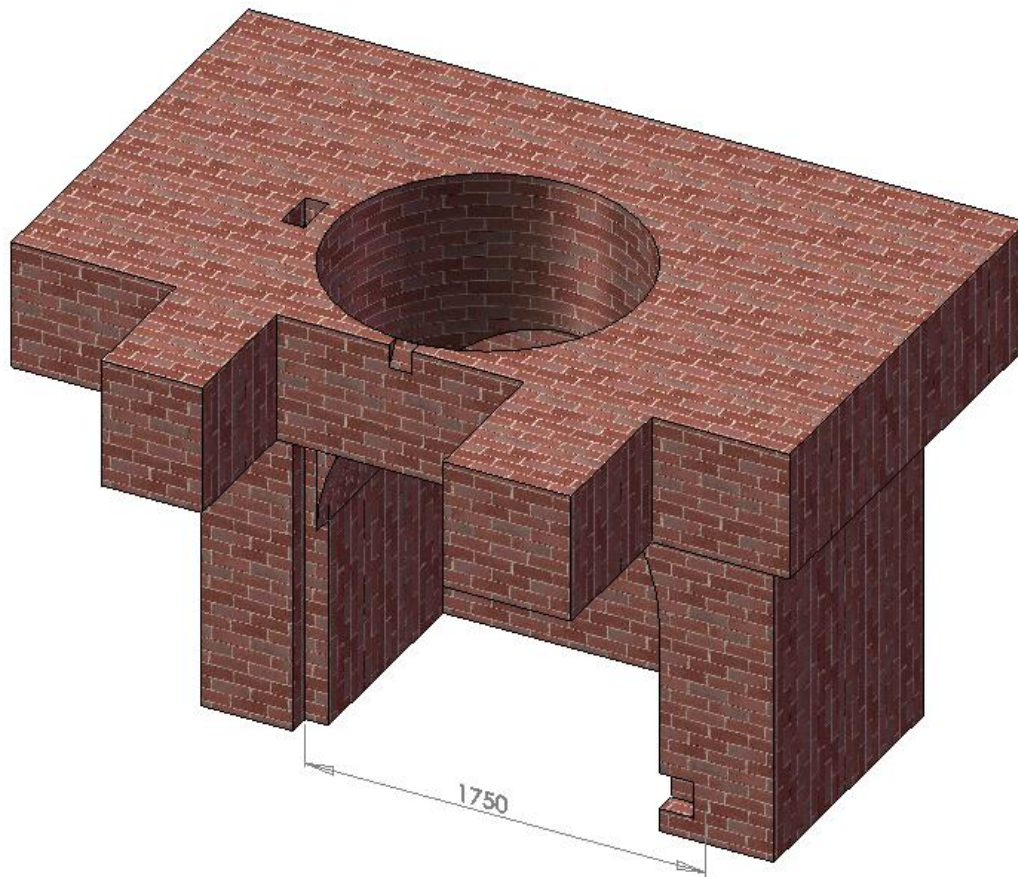


Figura 5: Base del molí on es pot apreciar el carcavà en forma d'arc.

2.3.4. Rodet

El rodet del molí és la roda de 1,40 m de diàmetre aproximadament, proveïda de 30 àleps en forma de cullera, que gira impulsada per l'energia cinètica de l'aigua que la colpeja. D'aquesta forma, l'objectiu del rodet és transformar l'energia hidràulica del fluid en energia mecànica aprofitable.

El rodet està format per un nucli de fusta on hi encaixa l'eix en la seva part central. Perimetralment s'allotgen 30 àleps de fosa que es subjecten per la part exterior mitjançant una anella metàl·lica. En la part interior del rodet, on encaixen els àleps, es col·loca un disc de ferro que evita el moviment vertical dels àleps.

Tots aquests elements són desmuntables, i permeten canviar amb facilitat qualsevol àlep en cas que es malmetin per impactes amb pedres que pugui portar l'aigua. En la figura 6, podem veure la geometria d'aquest rodet.

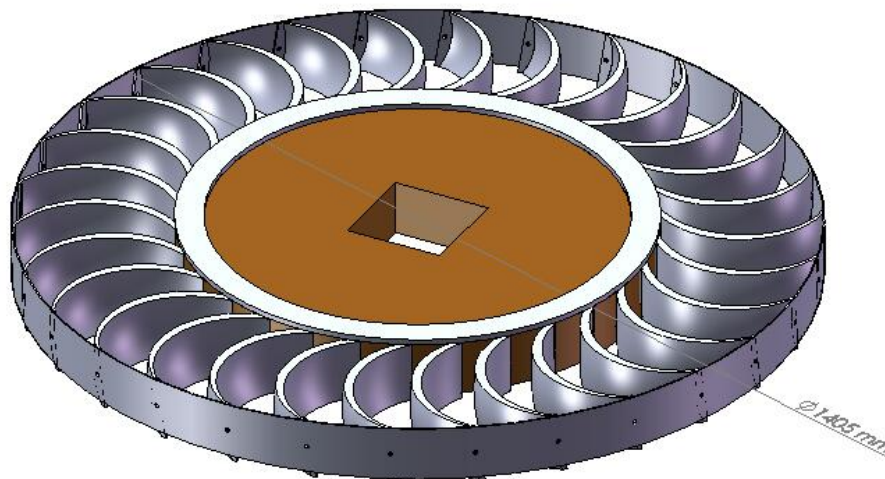


Figura 6: Rodet clàssic de 30 àleps (1 àlep cada 12°).

2.3.5. Eix principal, arbre i coll-ferro

L'eix principal que transmet el moment de gir del rodet a la mola està format per dues parts: l'arbre i el coll-ferro.

L'arbre és la part inferior de l'eix que engrana directament amb el rodet. Sempre està amb contacte amb l'aigua i és de fusta. D'aquesta manera podem garantir que la unió fusta-fusta, quedarà completament estampida per l'efecte de la dilatació que provoca l'aigua.

En la part central de l'eix es produeix un canvi de material, passant de fusta a ferro. La part superior, que no disposa de fusta, s'anomena coll-ferro i engrana directament amb la nadilla. Aquest element és metàl·lic per tal d'aconseguir unions més rígides. Aquesta part també encaixa amb la caixa que és un element en forma de corona circular, que evita la caiguda del gra per l'ull de la mola.

En la figura 7, podem veure els elements que componen l'eix, apreciament el canvi de material en la seva part central.



Figura 7: Eix principal que uneix el rodet (situat a la part inferior) amb la mola (a la part superior).

2.3.6. Nadilla

La nadilla és la peça de ferro disposada a l'ull de la mola sotana, sobre la qual descansa la mola volandera i transmet el moviment de rotació de l'eix motriu a la mola volandera.

Aquesta peça és solidària a l'eix i s'encaixa verticalment amb la pedra. D'aquesta manera quan aixequem la mola amb la càbria no hi ha cap element que dificulti aquest moviment. En la figura 8, podem veure la seva geometria.

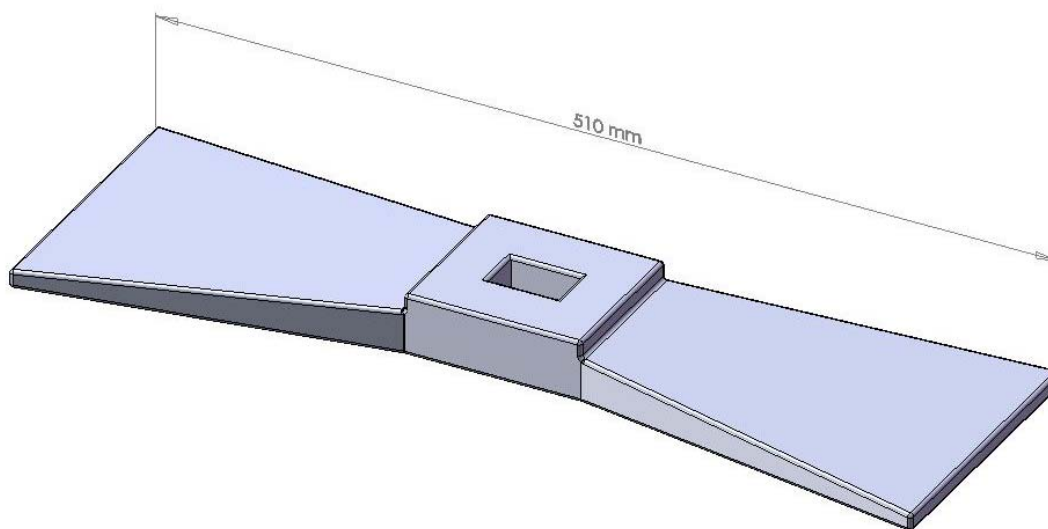


Figura 8: Nadilla metàl·lica encarregada d'engranar l'eix amb la mola.

2.3.7. Banc i alçador

S'anomena banc a la biga de fusta col·locada transversalment sota l'eix i que suporta tot el pes del conjunt suspès. Aquest element està encastat per una banda i lliure per l'altra, aconseguint un grau de llibertat en la vertical. Això permet variar la distància de separació entre les moles.

Aquesta modificació s'aconsegueix estirant més o menys l'alçador, que és l'element que comunica la zona de treball amb el carcavà.

Cal destacar que el banc de fusta pot arribar a suportar uns 800 kg de pes, provocats per la mola volandera i tot el conjunt de l'eix principal i el rodet. També s'ha de considerar que està constantment mullat pel doll d'aigua que impacte amb el rodet, fet que escurça molt la seva vida útil.

En la figura 9, podem veure el conjunt banc - alçador.

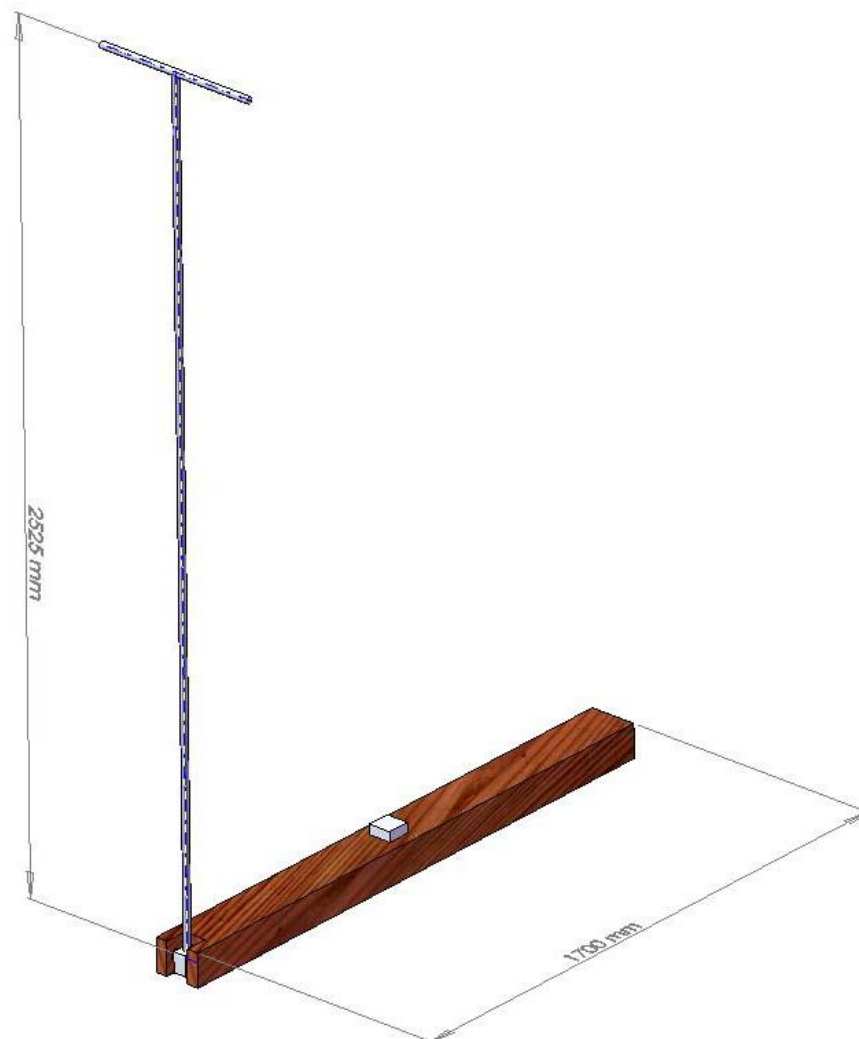


Figura 9: Conjunt del banc i l'alçador

2.3.8. Agulla i dau

L'agulla és l'element metàl·lic instal·lat al final de l'eix per la part inferior que fa la funció de punt de recolzament (i de gir) de l'eix sobre el banc. En el banc hi ha un dau de coure que evita malmetre en excés l'agulla.

Tanmateix, aquest dau és un dels elements més castigats del mecanisme, patint un elevat desgast que molt sovint en provoca la substitució.

Per tal de facilitar l'adaptació de l'agulla sobre el dau, al principi de la seva vida útil és practica un petit rebaix en forma de con en la cara superior del dau. En la figura 10, podem veure el tipus d'unió que hi ha entre aquests dos elements.

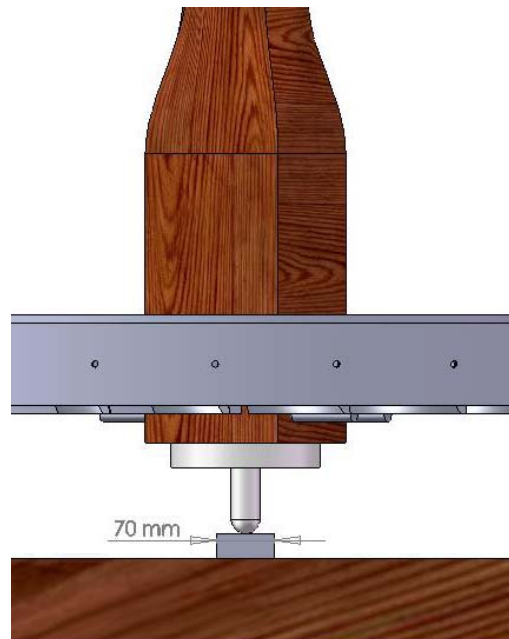


Figura 10: Unió per contacte entre l'agulla i el dau.

2.3.9. Engegadora

L'engegadora és la comporta metàl·lica que permet regular el cabal d'aigua que impacte contra el rodet. El seu comandament es fa per mitjà d'una barra metàl·lica que comunica la part inferior on hi ha ubicat el rodet (l'espai que anomenem carcavà) i la part superior on hi ha la zona de treball. La seva posició condiciona directament la velocitat de gir de la mola.

En el moment de l'arrencada es va obrint progressivament per evitar un impacte violent contra els àleps. Durant el funcionament normal del molí es pot anar regulant per tal de compensar les diferències de cabal que es produeixen al llarg del dia. Finalment també ens serveix per parar el molí.

2.3.10. Canal

Canalització de fusta que guia el doll d'aigua fins al rodet, per tal de garantir l'impacte de l'aigua en el lloc desitjat del rodet.

Aquest element no és present en tots els molins fariners que hem visitat. En el nostre cas no és necessari ja que el doll d'aigua té suficient energia cinètica com per impactar en el lloc adequat dels àleps. També cal destacar que les característiques constructives del carcavà no permeten la seva existència, ja que no hi cap.

2.3.11. Tremuja

Caixa de fusta en forma de tronc de piràmide invertida, que té la funció d'emmagatzemar el gra abans de ser convertit en farina. Aquesta caixa està col·locada sobre el riscla i és de fàcil muntatge i desmuntatge. Per altre banda té una funció ornamental molt importat, essent una de les parts més vistoses de tot el conjunt.

Normalment hi han unes marques en la part interior que serveixen d'escala graduada per tal de mesurar el nombre de sacs que s'aboquen. En la figura 11, podem observar les seves formes ornamentals.

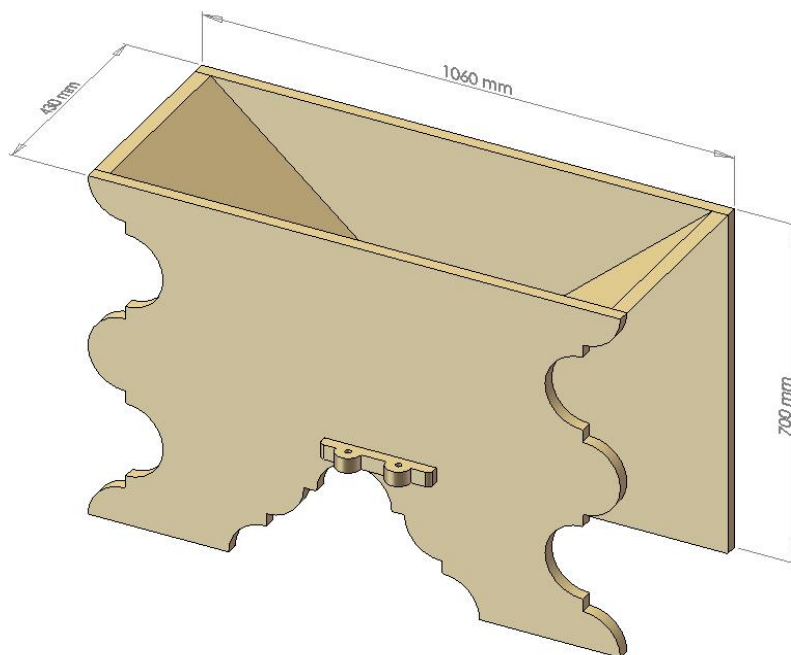


Figura 11: Tremuja ornamental de fusta.

2.3.12. Canalet

Canalització de fusta que transporta el gra del fons de la tremuja fins a l'ull de la mola. Aquesta es pot regular en inclinació per tal de dosificar la quantitat de gra abocada.

2.3.13. Granulador

Eix de ferro que per mitjà d'unes excentricitats de fusta fa vibrar la canaleta i, així, permet garantir una velocitat d'abocament constant.

Aquest eix engrana directament amb l'eix principal, fet que provoca una relació directa de la velocitat de la mola amb la velocitat d'entrada del gra. En la seva part superior gira dins d'un orifici fet en la tremuja per evitar-ne les vibracions.

En la figura 12 podem veure les dimensions del granulador. És interessant observar la seva combinació de ferro i fusta.

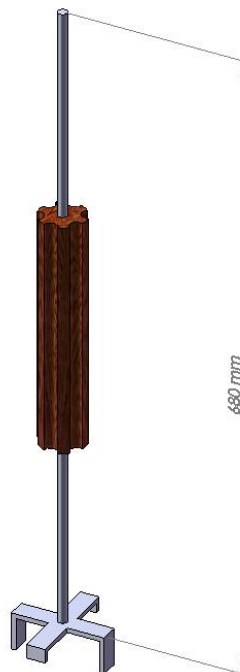


Figura 12: Granulador de fusta i ferro.

2.3.14. Riscle

El riscle és la caixa de fusta que embolcalla les moles i permet recollir i canalitzar la farina que surt perimetralment entremig de les dues pedres. Així, el riscle també evita que es produeixi una quantitat excessiva de pols de farina a la sala de moldre.

Per tal de facilitar la recollida de la farina, el riscle té un únic forat de sortida, ubicat en la base i centrat en la part frontal del molí.

Per altre banda, el riscle fa una funció de mesura de seguretat, evitant que es pugui tenir un accés a les moles mentre aquestes estan en ple funcionament.

Aquest element disposa de dues tapes superiors que permeten tenir un accés a l'interior, molt útil per investigar situacions en casos en què el gra no circuli correctament.

En la figura 13 podem observar les principals característiques d'aquesta caixa de fusta circular.

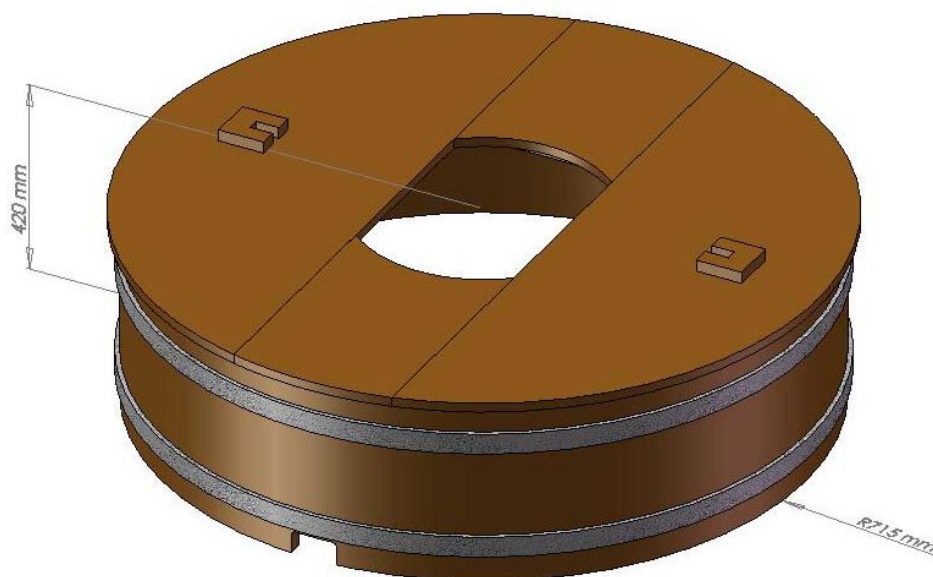


Figura 13: Riscle de fusta.

2.3.15. Farinal

El farinal és la canalització metàl·lica que facilita la recollida de la farina. Aquesta comunica l'orifici de sortida del riscle amb la farinera. En la figura 14 podem distingir aquest element.

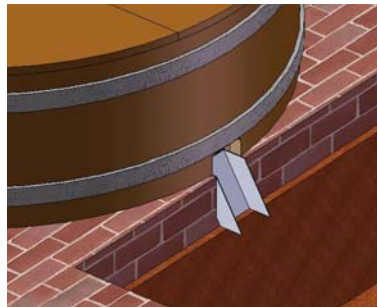


Figura 14: Farinal (canalització metàl·lica a la sortida del riscle).

2.3.16. Farinera

La farinera és la caixa de fusta on es disposa la farina un cop ha passat per les moles. Aquesta caixa està col·locada per sota el nivell de les pedres de manera que la farina cau per gravetat. En la figura 15 es mostra la farinera amb les seves dimensions.

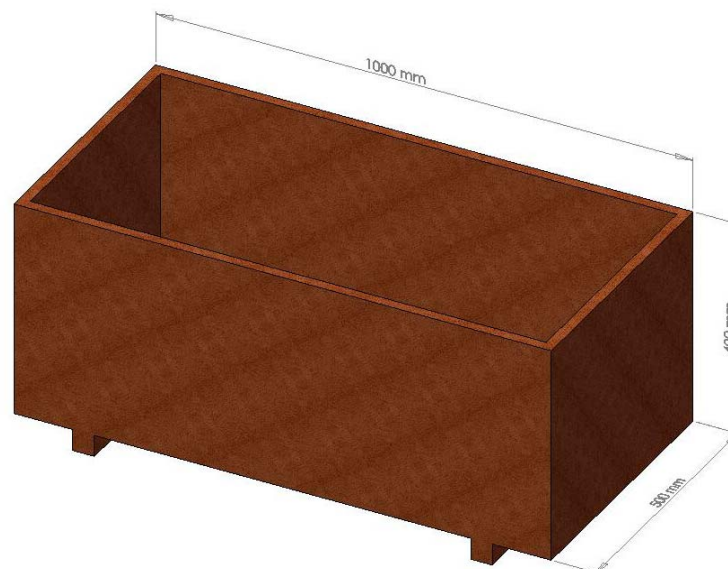


Figura 15: Farinera de fusta.

2.3.17. Càbria

Mecanisme de fusta i ferro que permet aixecar la mola volandera (part mòbil), per tal de dur a terme feines de manteniment en la pedra, com, per exemple, repicar-la per aconseguir un grau de rugositat que garanteixi un correcte granulat de la farina.

Aquest element consisteix en dos braços corbats de ferro que subjecten la pedra per mitjà d'uns perns d'acer que s'allotgen en dos petits orificis circulars fets en el lateral de la mola.

Un cop encaixats, es procedeix a girar la manovella, que mitjançant un eix roscat va aixecant la pedra fins a l'alçada desitjada. Un cop la pedra està aixecada, es pot girar tot el conjunt per tenir millor accessibilitat i posar-la en posició vertical. En la figura 16 podem veure com funciona el sistema de subjecció.

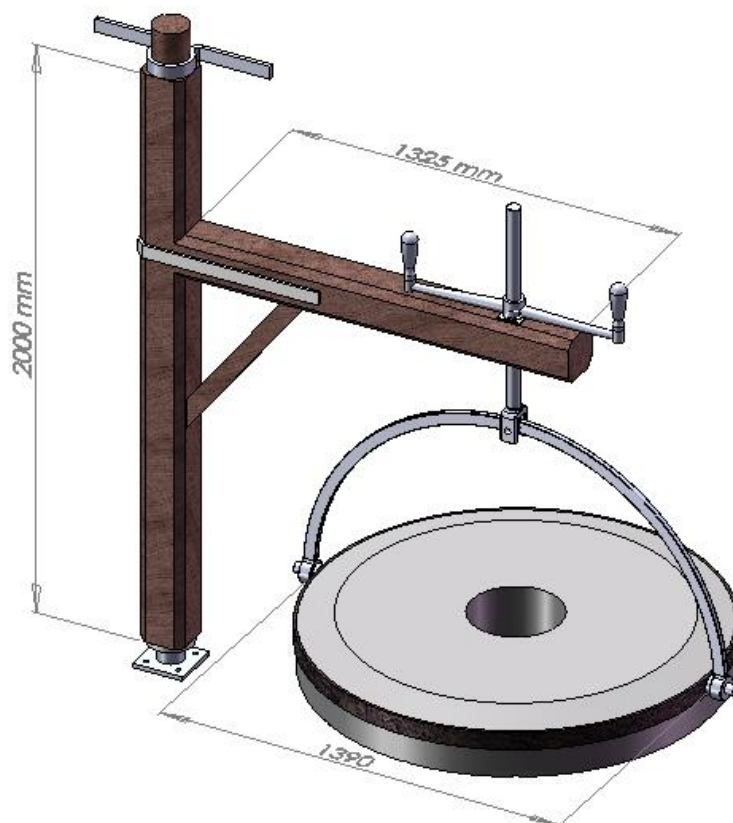


Figura 16: Dibuix del funcionament de la càbria.

Per poder subjectar la mola, cal desmuntar prèviament la tremuja i el riscle. La càbria s'utilitza poc, essent un element amb un desgast molt baix.

3.RODET CLÀSSIC

3.1. INTRODUCCIÓ

Un cop detallats tots els elements que conformen un molí fariner hidràulic clàssic de rodet horitzontal, i entès el seu principi de funcionament, anem a estudiar l'element que bescanvia l'energia hidràulica en mecànica. En efecte, en el capítol 2 s'ha observat com el rodet és el responsable de generar el parell motriu que posa en marxa tot el mecanisme que ens permet, finalment, realitzar l'acció de moldre.

Per simplicitat, aquí considerem que la resta d'elements que intervenen en la generació del moviment són fixes i invariables, només depenent de les característiques constructives de l'edifici del molí. Aquest és el cas del cabal disponible en funció de l'alçada del salt d'aigua, de la posició de l'eix de rotació, de les dimensions de les moles, etc.

Per això s'ha optat per analitzar i estudiar el rodet sense tenir present l'existència d'un canal a la sortida de l'engegadora ja que en el nostre cas no existeix. D'aquesta forma, el rodet és l'únic element que condiciona el rendiment hidràulic del molí. Així, modificacions com el nombre d'àleps o la seva geometria són determinants per al bon comportament del molí.

Aquí analitzem el rodet mitjançant una simulació virtual feta amb el programa de mecànica de fluids computacional Star-CCM+.

En primer lloc simularem el rodet clàssic de 30 àleps, que és el tipus de rodet que s'utilitza en d'altres molins semblants. Una vegada obtinguda la potència del rodet clàssic en funció de la seva velocitat de gir, i comparant-la amb l'esperada per una turbina estàndard clàssica, proposarem dues modificacions per millorar-ne el rendiment.

La primera modificació consistirà en una reducció d'àleps per reduir les interferències del flux a baixes revolucions i, d'aquesta forma, disposar d'un parell d'arrancada més elevat. El rodet amb 15 àleps proposat, però, no es comportarà adequadament a la velocitat de gir que s'assoleix quan el sistema es troba a règim.

Per això, modificarem la geometria del rodet inicial de 30 àleps per tal que la superfície d'impacte sigui el més perpendicular possible al doll d'aigua incident. D'aquesta forma, l'angle d'inclinació dels àleps respecte a la vertical passa de 5° (cas clàssic) a 15°. En

comparació amb el rodet estàndard, aquesta modificació sí produeix uns millors resultats en tot el rang possible de velocitats angulars del rodet.

3.2. CÀLCULS ANALÍTICS

Abans de començar amb les simulacions virtuals de CFD és necessari fer alguns càlculs previs per tal de poder conèixer paràmetres bàsics del comportament hidràulic i mecànic del sistema. Per això aquí calcularem 1) la velocitat de l'aigua a l'engegadora, 2) la trajectòria estimada del doll d'aigua, 3) la potència hidràulic estimada del rodet a partir de realitzar un símil amb una turbina Pelton i 4) el parell resistent produït pel fregament de les moles.

S'ha de tenir present, a més, que els càlculs analítics ens permetran tenir un punt de referència respecte als resultats que obtindrem en l'anàlisi virtual, essent molt útils per verificar el correcte funcionament de la simulació.

Cal destacar que cap d'aquests càlculs té en compte el nombre d'àleps, i per tant els podrem utilitzar com a referència en totes les simulacions.

3.2.1. Velocitat d'impacte de l'aigua

Per poder realitzar la simulació amb el CFD és necessari conèixer la velocitat del fluid a la sortida de l'engegadora. En el nostre cas, i per simplificar, suposem que el fluid és aigua i que a la sortida de l'engegadora té una velocitat constant. Aquesta velocitat s'aconsegueix gràcies a un bassa d'aigua situada a una alçada superior a la del punt d'utilització i a una caiguda lliure que ens permet transformar l'energia potencial de l'aigua en energia cinètica. En la figura 17 podem apreciar un croquis d'aquest sistema.

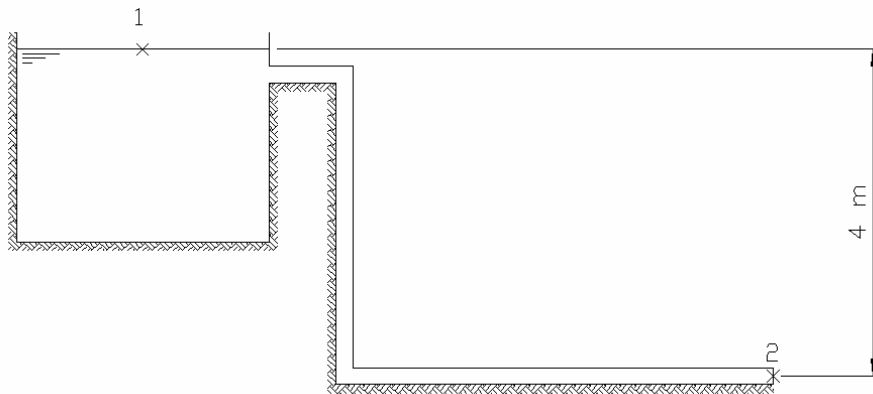


Figura 17: Croquis del salt d'aigua

Per conèixer aquesta velocitat apliquem l'equació de Bernoulli generalitzada entre el nivell màxim de l'aigua en la bassa (1) i la boca d'entrada al molí o engegadora (2) (Rojas-Sola i López-García, 2007)

$$\frac{V_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\rho g} + Z_1 - H_{r12} = \frac{V_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\rho g} + Z_2 \quad (\text{eq. 1})$$

On:

- V = mòdul de la velocitat del fluid (m/s)
- P = pressió relativa (Pa)
- g = acceleració de la gravetat (m/s^2)
- ρ = densitat de l'aigua (kg/m^3)
- H_{r12} = pèrdues de càrrega que es produeixen per anar d'1 a 2 (m)
- Z = alçada (m)

Inicialment la velocitat de l'aigua és nul·la, així com les pressions en el punt 1 i 2, ja que es tracta de pressions relatives. Si prenem l'entrada d'aigua al molí com a cota de referència tenim que $Z_1 = 4 \text{ m}$ i $Z_2 = 0 \text{ m}$. Substituint aquests valors a l'equació (1) tenim:

$$4 - H_{r12} = \frac{V_2^2}{2g} \quad (\text{eq. 2})$$

Les pèrdues de càrrega H_{r12} que es produeixen al llarg del recorregut del conducte que uneix el salt d'aigua amb la boca d'entrada al molí es poden calcular de la següent manera (White, 1982):

$$H_{r12} = \underbrace{\lambda \frac{L}{D} \frac{V_2^2}{2g}}_{\text{Pèrdues Primàries}} + \underbrace{\xi \frac{V_2^2}{2g}}_{\text{Pèrdues Secundàries}} \quad (\text{eq. 3})$$

On:

- L = longitud de la canalització (m)
- D = diàmetre (m)
- λ = coeficient de fricció
- ξ = coeficient de pèrdues de càrrega

Substituint l'equació (3) a l'equació (2) obtenim:

$$4 = \frac{V_2^2}{2g} + \underbrace{\lambda \frac{L}{D} \frac{V_2^2}{2g}}_{\text{Pèrdues Primàries}} + \underbrace{\xi \frac{V_2^2}{2g}}_{\text{Pèrdues Secundàries}} \quad (\text{eq. 4})$$

o, equivalentment,

$$V_2 = \left[\frac{4 \times 2g}{1 + \lambda \frac{L}{D} + \xi} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{eq. 5})$$

En aquest cas, la secció no és circular sinó rectangular. Per això, en comptes d'utilitzar D a l'equació (5), treballarem amb un diàmetre equivalent expressat en funció del radi hidràulic R_H (Mataix, 1982):

$$D = 4R_H \quad (\text{eq. 6})$$

On, d'acord amb les dimensions de l'engegadora, val:

$$R_H = \frac{\text{Secció}}{\text{Perimetremullat}} = \frac{0,2 \times 0,14}{(2 \times 0,14) + (2 \times 0,2)} = 0,041 \text{ m} \quad (\text{eq. 7})$$

D'altra banda, per tal de conèixer el valor de λ a l'equació (5) utilitzarem el Diagrama de Moody (Munson, 1992), escollint valors de rugositat absoluta molt elevats associats les gran irregularitats que presenta la canonada de pedra natural. Així, per a la rugositat absoluta $K = 0,01 \text{ m}$, obtenim un valor de la rugositat relativa ε com:

$$\varepsilon = \frac{K}{D} = \frac{0,01}{0,164} = 0,061 \xrightarrow{\text{Diagrama de Moody}} \lambda = 0,085 \quad (\text{eq. 8})$$

Considerant aquest valor de λ , menyspreant les pèrdues de càrrega secundàries, tal i com suggereixen Rojas-Sola i López-García (2007), i amb una longitud de 2,3 m de contacte amb el terra (excloent la longitud associada a la caiguda lliure, ja que aquesta no comporta cap pèrdua per fregament), obtenim el valor de la velocitat en el punt 2.

$$V_2 = \left[\frac{4 \times 2g}{1 + 0,085 \frac{2,3}{0,164}} \right]^{\frac{1}{2}} = 6,0 \text{ m/s} \quad (\text{eq. 9})$$

D'altra banda, en funció del valor del nombre de Reynolds podem determinar si el flux es troba, efectivament, en un règim turbulent. Així, s'ha de complir la condició que:

$$\text{Si } Re \geq 2000 \rightarrow \text{Règim turbulent}$$

A partir dels valors de l'eq. (9) i anteriors, trobem que (White, 1982):

$$Re = \frac{V D}{\nu} = \frac{6 \times 0,164}{101 \times 10^{-8}} = 974 \times 10^3 \geq 2000 \quad (\text{eq. 10})$$

On:

- ν = viscositat cinemàtica de l'aigua a 15 °C ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)

Aquest càlcul ens permet justificar la necessitat d'utilitzar un model de turbulència a l'hora de realitzar la simulació amb CFD.

3.2.2. Trajectòria estimada del doll d'aigua

Per tal de determinar la trajectòria que descriu el doll d'aigua considerarem la velocitat de sortida a l'engegadora com l'obtinguda en l'apartat anterior i farem un símil amb un moviment parabòlic. Aquest càlcul ens permetrà conèixer el grau d'inclinació del doll d'aigua en el moment d'impactar amb els àleps.

En l'instant inicial, a l'entrada del molí, la velocitat de l'aigua és de 6,0 m/s en la direcció x. Degut a l'efecte de la gravetat aquest doll comença a descriure una paràbola en direcció al rodet, aquesta trajectòria es pot observar en la figura 18.

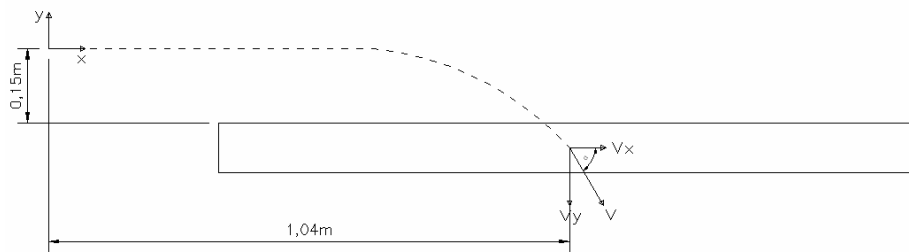


Figura 18: Trajectòria que descriu el doll d'aigua fins a impactar amb el rodet (aproximació a moviment parabòlic de sòlid rígid).

Coneguda la distància que hi ha entre el punt mig de l'entrada d'aigua i el punt mig de l'àlep, podem calcular el temps final de l'impacte.

$$Y_f = -\frac{1}{2} \cdot g \cdot t_f^2 \rightarrow t_f = -\sqrt{\frac{2 \cdot Y_f}{g}} = 0,173s \quad (\text{eq. 11})$$

On:

- Y_f = alçada del mig del doll d'aigua al centre del rodet (m)
- t_f = temps final quan el doll impacte amb el rodet (s)
- g = acceleració de la gravetat (m/s^2)

Una vegada conegut el temps que triga el doll en impactar al rodet, podem determinar amb quina velocitat ho fa. Aquesta velocitat la descomposarem en els dos eixos x i y.

$$V_{X_f} = V_{X_0} = 6,0 \frac{m}{s} \quad (\text{eq. 12a})$$

$$V_{Y_f} = -g \cdot t_f = -1,69 \frac{m}{s} \quad (\text{eq. 12b})$$

Amb els components de la velocitat (12a-b) podem determinar l'angle de la velocitat total, que és el mateix que l'angle d'inclinació del doll d'aigua quan impacte amb l'àlep del rodet.

$$\tan \alpha = \frac{|V_{Y_f}|}{V_{X_f}} \rightarrow \alpha \approx 15^\circ \quad (\text{eq. 13})$$

Així doncs l'angle d'impacte del doll d'aigua sobre la superfície dels àleps és de 15° respecte l'horitzontal. Tanmateix, l'àlep del rodet clàssic està inclinat 5° respecte a la vertical. Per un impacte perpendicular del doll d'aigua, caldria que l'àlep estigués inclinat 15° respecte la vertical, tal i com s'observa en la figura 19.

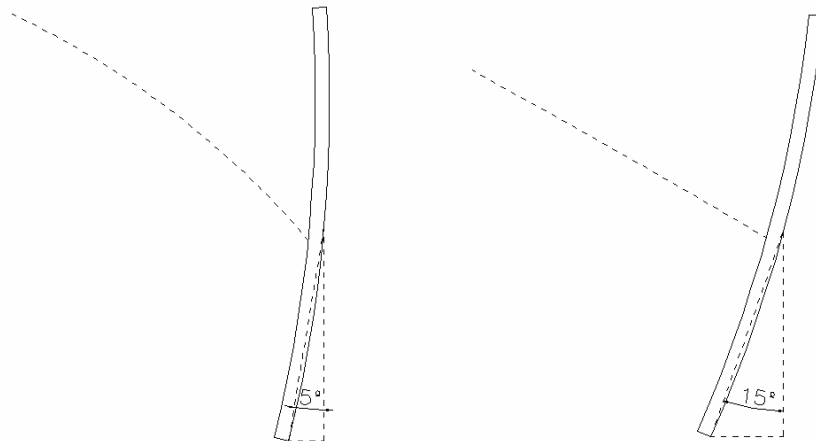


Figura 19: Comparació de l'àlep de 5° amb el de 15° a la secció central.

3.2.3. Potència hidràulica del rodet

A continuació calcularem la potència hidràulica teòrica del rodet a partir d'assimilar-la al d'una Turbina Pelton. Aquest procediment ja s'ha usat per Rojas-Sola i López-García (2005) en l'anàlisi teòrica del rodet d'un molí hidràulic.

En el càlcul hidràulic d'una turbina Pelton, es suposa que el doll d'aigua impacte perpendicularment en un àlep que té forma de doble cullera tal i com es mostra a la figura 20 (Fogiel, 1992)

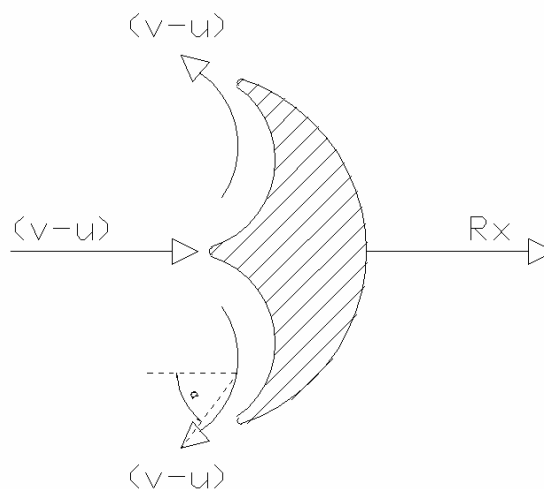


Figura 20: Velocitats relatives en la doble cullera d'una turbina Pelton.

On u és la velocitat lineal de la cullera i v és la velocitat incident del doll d'aigua. A la figura 20, R_x representa la reacció que fa l'àlep sobre el fluid.

La velocitat de l'àlep u la podem expressar a partir de la velocitat angular de rotació del rodet:

$$u = \omega \cdot r \quad (\text{eq. 14})$$

On:

ω = velocitat angular del rodet (rad/s)

r = radi del rodet (des del centre fins a la meitat de l'àlep) (m)

L'aplicació de l'equació de conservació de la quantitat de moviment en la direcció del flux incident en un volum de control solidari amb l'àlep porta a la següent relació (Fogiel, 1992):

$$R_x = -\underbrace{(v-u) \cdot Q \cdot \rho}_{\text{Quant. de moviment fluid que entra}} + \left[\underbrace{-(v-u) \cdot \cos \theta \cdot Q \cdot \rho}_{\text{Quant. de moviment fluid que surt}} \right] \quad (\text{eq. 15})$$

On:

- R_x = reacció que fa l'àlep sobre el fluid(N)
- v = velocitat del doll d'aigua (m/s)
- u = velocitat de l'àlep (m/s)
- Q = cabal del doll d'aigua (m³/s)
- ρ = densitat de l'aigua (kg/m³)
- θ = angle de sortida del doll d'aigua (veieu la fig. 20) (rad)

D'aquesta forma, la força que fa el fluid sobre l'àlep en direcció del flux incident és $F_x = -R_x$ i, de l'equació (15) tenim:

$$F_x = (v-u) \cdot Q \cdot \rho \cdot (1 + \cos \theta) \quad (\text{eq. 16})$$

Un cop coneixem la força que fa el fluid sobre l'àlep, podem trobar el moment de gir provocat pel doll d'aigua.

$$M = r \cdot F_x = r \cdot (v-u) \cdot Q \cdot \rho \cdot (1 + \cos \theta) \quad (\text{eq. 17})$$

On:

- M = moment produït per la força F_x (N m)
- r = radi del rodet (m)

En el nostre problema tenim els següents valors de les variables:

$$Q = v \cdot A = 6 \cdot 0,2 \cdot 0,14 = 0,168 \frac{m^3}{s} \quad (\text{eq. 18a})$$

$$\rho = 1.000 \frac{kg}{m^3} \quad (\text{eq. 18b})$$

$$v = 6,0 \frac{m}{s} \quad (\text{eq. 18c})$$

$$r = 0,550 \text{ m} \quad (\text{eq. 18d})$$

Hem de tenir present, però, que els nostres àleps no tenen forma de doble cullera com a la figura 20. En efecte, els àleps del rodet del molí fariner provoquen una sortida d'aigua gairebé paral·lela a la superfície amb el que l'angle de sortida del doll d'aigua es pot aproximar a $\theta = 90^\circ$. Amb tot l'anterior, les equacions (16)-(17) amb els valors de les equacions (18a-d) donen:

$$F_x = (6 - \omega \cdot 0,55) \cdot 0,168 \cdot 1000 \quad (\text{eq. 19})$$

$$M = 0,55 \cdot (6 - \omega \cdot 0,55) \cdot 0,168 \cdot 1000 \quad (\text{eq. 20})$$

D'aquesta forma, obtenim diferents valors del moment en funció de la velocitat angular del rodet. Amb aquests valors del moment, podem calcular la potència hidràulica extreta pel rodet d'acord P amb l'equació:

$$P = \omega \cdot M \quad (\text{eq. 21})$$

A la taula 1 es mostren els valors obtinguts per als règims de gir simulats en els apartats següents (0, 30, 60 i 90 rpm; aquesta última coincideix amb la velocitat calculada en un rodet similar actualment en funcionament a la Vall de Bianya).

n (rpm)	ω (rad/s)	F_x (N)	M (Nm)	P (W)
0	0,00	1008	554	0,00
30	3,14	718	395	1240
60	6,28	427	235	1477
90	9,42	137	75	711

Taula 1: Valors per a una turbina Pelton amb $\theta = 90^\circ$ i altres valors idèntics al del rodet estudiat.

Amb el moment hidràulic de l'equació (20) per a la turbina Pelton podem extreure la figura 21, que representa el moment en funció de les revolucions per minut del rodet.

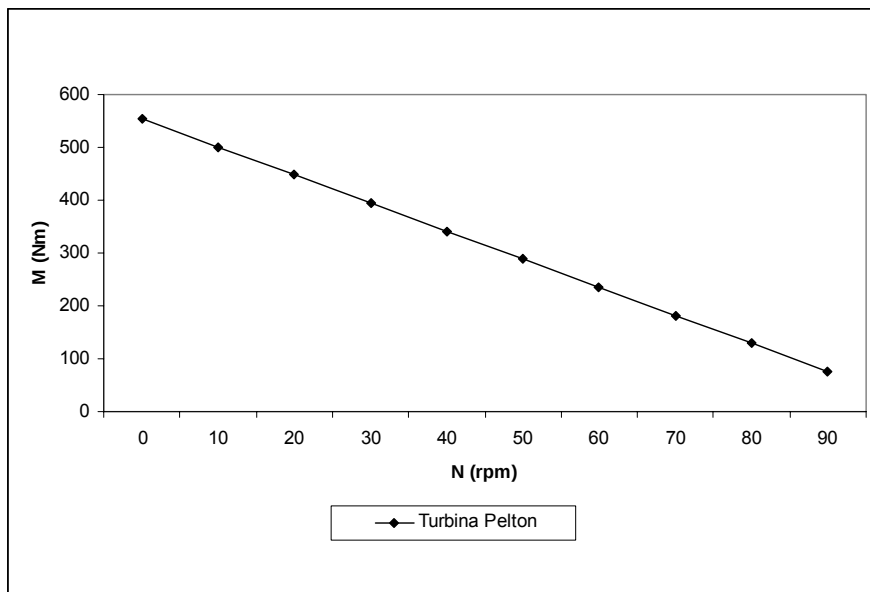


Figura 21: Moment produït per una turbina Pelton en funció del règim de gir del rodet ($\theta = 90^\circ$).

Al mateix temps podem obtenir la corba característica de la potència hidràulica d'una turbina Pelton, figura 22.

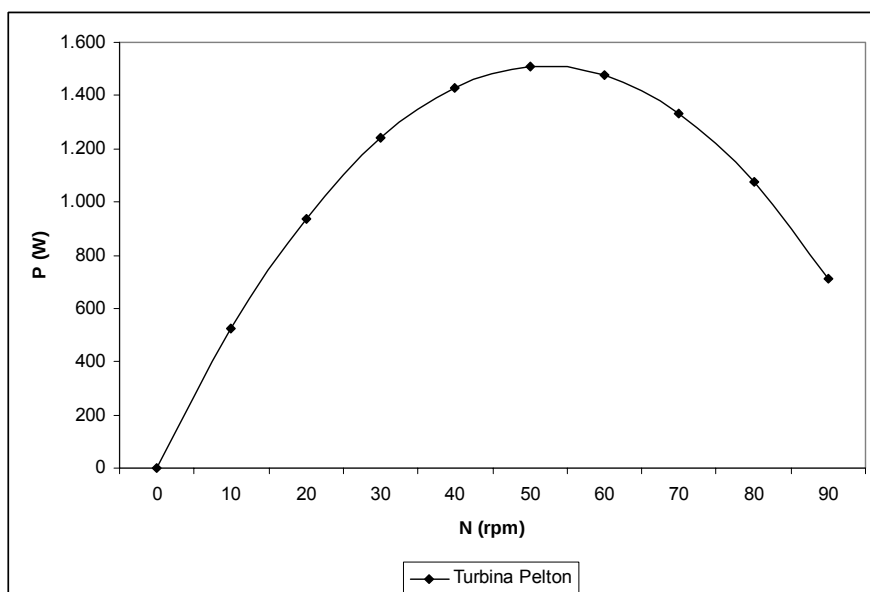


Figura 22: Corba de potència d'una turbina Pelton en funció del règim de gir del rodet ($\theta = 90^\circ$).

Aquestes dues gràfiques ens serviran de referència per poder comparar els resultats obtinguts en l'anàlisi dels nostres rodets mitjançant simulacions CFD. Aquí cal dir que tots els estudis previs sobre la hidràulica dels rodets de molins fariners s'han basat en símilis amb una turbina Pelton (Rojas-Sola i López-García, 2005 i 2007). La gran diferència del nostre projecte amb aquests estudis és que, aquí, nosaltres simulem el comportament hidràulic de la geometria real del rodet. Això comporta importants variacions respecte a la suposició d'utilitzar una turbina Pelton, tal i com mostrem en el l'apartat 3.4 i els capítols 4 i 5.

3.2.4. Parell resistent produït per les moles

Una vegada conegut el moment hidràulic que és capaç de generar el rodet aquí calculem el moment resistent M_r que crea el fregament entre les dues moles. En un petit element d'àrea dA situat a una distància r del centre de les moles es satisfà l'equació:

$$dM_r = r \cdot dF_r \quad (\text{eq. 22})$$

On:

- M_r = moment resistent (N m)
- F_r = força de fregament entre les dues moles (N)

Aquesta força de fregament dF_r es pot expressar com

$$dF_r = \mu \cdot dN = \mu \cdot g \cdot dm \quad (\text{eq. 23})$$

On:

- N = força normal (N)
- μ = coeficient de fricció
- g = acceleració de la gravetat (9,81 m/s²)

El diferencial de la massa dm de l'equació (23) és funció de les dimensions de la mola i de la seva densitat:

$$dm = \rho_m \cdot H \cdot dA \quad (\text{eq. 24})$$

On:

- ρ_m = densitat de la mola (kg/m^3)
- H = altura de la mola (suposada constant, per simplificar) (m)

La densitat de la mola la podem expressar en termes de la seva massa i el seu volum:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m}{H \cdot \pi (re^2 - ri^2)} \quad (\text{eq. 25})$$

On:

- re = radi exterior de la mola (m)
- ri = radi interior de la mola (m)
- m = massa total de la mola volandera (kg)
- V = volum de la mola (m^3)

S'ha de tenir present, però, que no tota la superfície de la mola volandera toca amb la mola solera. En efecte, només toquen 12 franges d'uns 2 cm d'amplada tal i com s'observa en la figura 23. Això és degut a les ranures que tenen les moles per tal de facilitar el recorregut del gra.

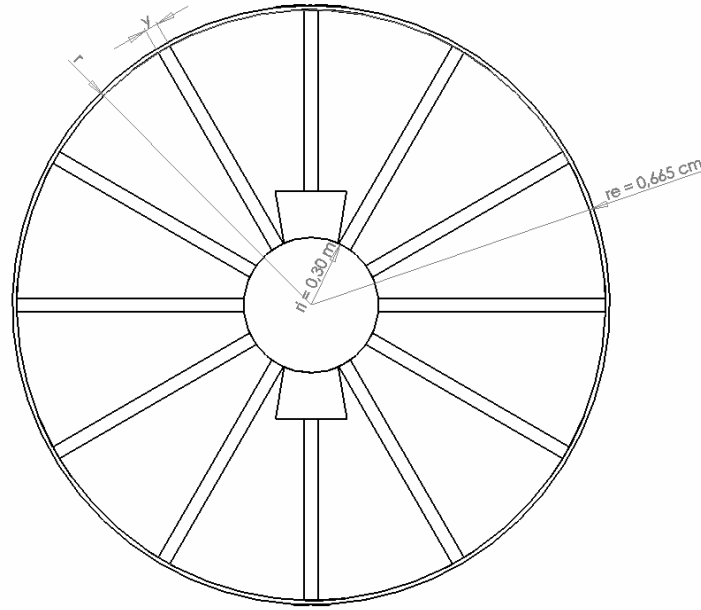


Figura 23: Superfície de contacte de la mola volandera amb la mola solera (12 franges).

Podem calcular el moment resistent en funció del coeficient de fricció que hi ha entre les dues pedres a partir de substituir l'equació (24) en (23) utilitzant (25):

$$dF_r = \mu \cdot g \cdot \frac{m}{\pi(re^2 - ri^2)} \cdot dA \quad (\text{eq. 26})$$

que, introduïda en (22) i integrada per a tota la superfície de contacte queda com:

$$M_r = \mu \cdot g \cdot \frac{m}{\pi(re^2 - ri^2)} \int_{ri}^{re} r \cdot dA = \mu \cdot g \cdot \frac{m}{\pi(re^2 - ri^2)} \int_{ri}^{re} n \cdot r \cdot y \cdot dr = \mu \cdot g \cdot \frac{m}{\pi(re^2 - ri^2)} n \cdot y \cdot \frac{(re^2 - ri^2)}{2} \quad (\text{eq. 27})$$

On:

- m = massa de la mola (500 kg aproximadament)
- y = amplada de les franges de contacte (constant) (2 cm)
- n = numero de franges (12)

amb els valors de les variables, l'equació (27) esdevé:

$$M_r = \mu \cdot g \cdot \frac{m}{\pi} \cdot y \cdot \frac{n}{2} = \mu \cdot 187 \quad (\text{eq. 28})$$

L'equació (28) expressa el moment resistent únicament en funció del coeficient de fregament. Aquí podem estudiar dos casos: 1) en l'instant d'arrancar (coeficient estàtic μ_e) i 2) en el règim de funcionament (coeficient dinàmic μ_d). S'ha de tenir present que (Hibbeler, 1996).

$$\mu_e \geq \mu_d$$

On, per a uns valors típics d'aquests coeficients utilitzats per blocs de pedra (Hibbeler, 1996), obtenim:

- $\mu_e = 0,4 \rightarrow M_r = 80 \text{ Nm}$ (moment resistent d'arrancada)
- $\mu_d = 0,3 \rightarrow M_r = 56 \text{ Nm}$ (moment resistent en règim de funcionament)

S'ha de tenir present que els valors del moment resistent d'arrancada i del moment resistent en règim de funcionament són aproximats ja que depèn, entre d'altres, del valor exacte per al coeficient de fricció. Tanmateix, els considerem vàlids per proporcionar-nos l'ordre de magnitud d'aquestes variables.

3.3. SIMULACIÓ

3.3.1. Introducció

Un cop coneguts els valors dels paràmetres bàsics del sistema ja podem començar amb el procés de simulació mitjançant el programa Star-CCM+.

Aquest programa utilitza mètodes numèrics per tal de resoldre les equacions de Navier-Stokes, que són les lleis que governen la dinàmica dels fluids. Això ho aconsegueix aplicant el mètode dels volums finits resolent el sistema d'equacions diferencials en derivades parcials que defineixen el moviment dels fluids en l'espai i en el temps.

El primer pas de la simulació numèrica, però, correspon al modelat en elements discrets del volum analitzat. Aquesta discretització és una divisió del volum de càlcul en petits elements geomètrics. El conjunt d'aquests elements s'anomena malla. El nombre d'elements i la qualitat de la malla condicionen directament els resultats obtinguts en la simulació. En efecte, una malla pobre (pocs elements o molts elements però distribuïts erròniament) pot comportar l'obtenció de resultats poc representatius del comportament general. Per això és fonamental dedicar una part important del treball a obtenir una malla de qualitat.

En general, les malles es generen amb programes específics denominats malladors. Aquí, utilitzem el programari ICEM d'ANSYS.

S'ha de tenir present que, quan més gran sigui el nombre d'elements a utilitzar, més precís serà el resultat obtingut en la simulació. En contrapartida, però, el procés de resolució serà lent i l'anàlisi de resultats més difícil. Considerant tots aquests aspectes, es dedueix que cal optimitzar la malla en funció dels resultats que es volen obtenir. Per això sovint s'han de simplificar les geometries reals, menyspreant elements que poden condicionar de manera important el tipus de malla però que no són crítics en el comportament hidràulic del sistema.

Una vegada s'ha obtingut el mallat ja podem utilitzar el programa de simulació, en el qual determinarem les condicions de contorn del sistema, les condicions inicials i els models de dinàmica de fluids aplicats. A partir d'aquí obtindrem els resultats que es

mostraran com evolucions de les variables d'interès al llarg del temps. Això ens permetrà observar el comportament del fluid i del sistema durant un període de temps determinat.

A la figura 24, podem veure un diagrama de blocs que ens mostra la metodologia de treball que seguirem per tal de simular cada un dels diferents casos.

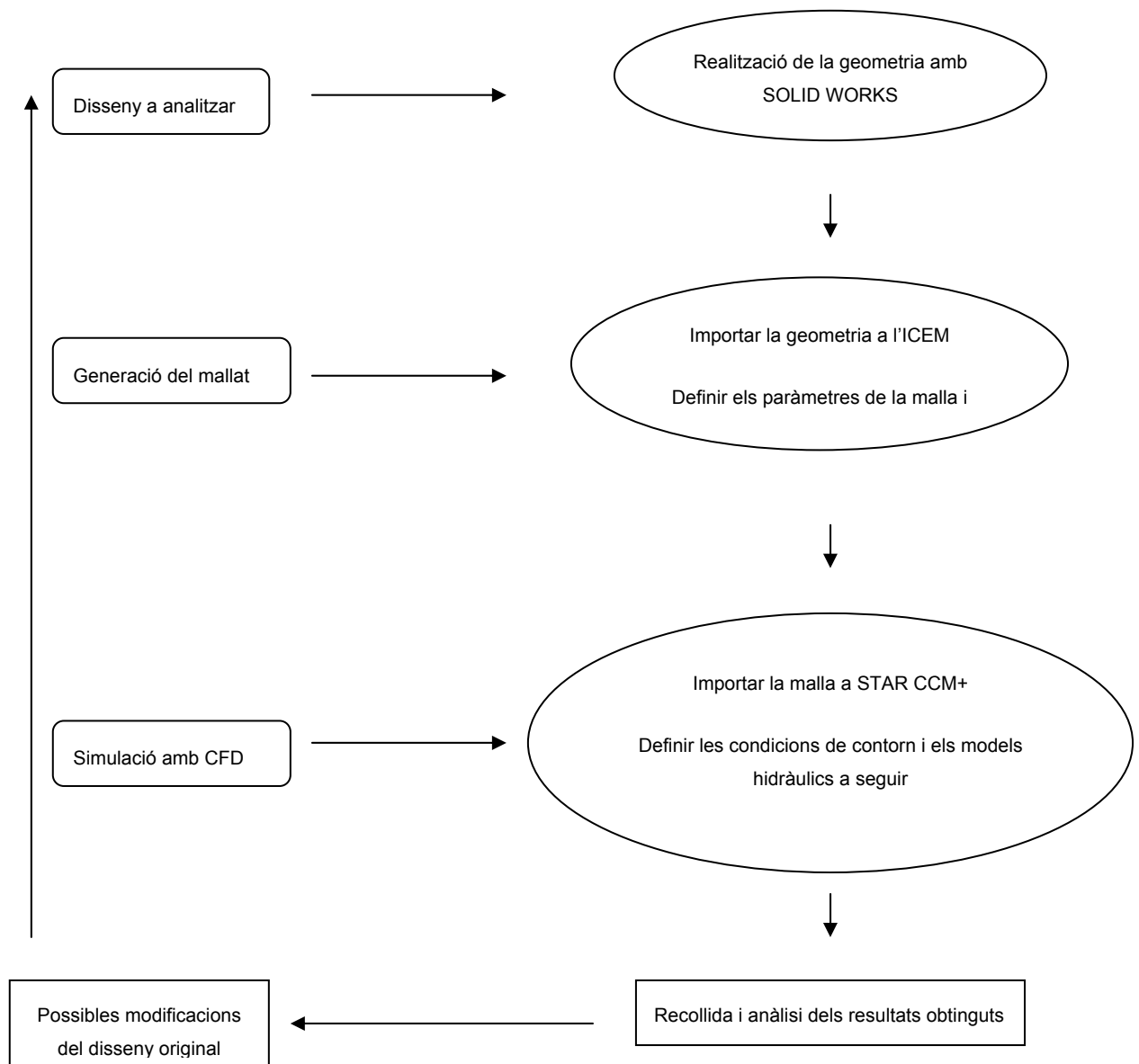


Figura 24: Diagrama de blocs amb la metodologia de treball a seguir.

3.3.2. Generació del mallat

A continuació descriurem les principals característiques de la malla utilitzada per simular el rodet clàssic de 30 àleps. Cal destacar que el procediment de mallar és el mateix per als diferents casos que s'analitzen en aquest projecte, amb petites variacions produïdes per les diferències entre les geometries proposades.

En l'annex A d'aquest projecte es troba la informació pas a pas sobre la realització del mallat.

S'ha de tenir present que per elaborar el mallat s'ha importat la geometria del rodet de 30 àleps amb algunes simplifcacions geomètriques. S'ha mantingut, però, les formes arrodonides dels àleps (o culleres).

A més, per estudiar l'impacte de l'aigua en el rodet, estudiem un volum delimitat per un espai rectangular de 2 m x 2 m x 1 m (veieu la figura 25). Aquest espai (on hi haurà tant aire com aigua) conté la zona d'acció on es produeix el xoc del doll d'aigua amb els àleps. A més, considerem que aquest volum és suficientment gran com per no condicionar la simulació. A la figura 25, la petita finestra correspon a l'orifici d'entrada d'aigua. D'ara en endavant, aquesta "caixa" l'anomenarem "túnel", ja que fa una funció similar als túnels de vent virtuals quan s'analitza l'aerodinàmica externa de vehicles.

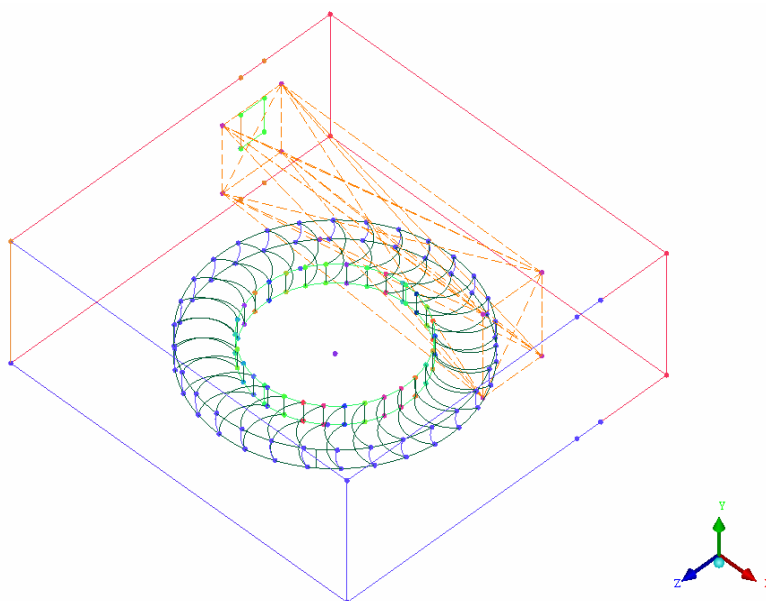


Figura 25: Visualització de la geometria utilitzada per mallar.

Totes les superfícies que formen el rodet s'han mallat amb una dimensió de l'element petita per tal de millorar la precisió en aquests punts (veure Annex A per a més detalls). Les parets que delimiten l'espai a estudiar s'han mallat amb un tipus d'element més bast per així reduir el nombre d'elements finals.

Per mallar el volum, s'han creat dues tipologies; el volum general (inicialment suposat com només aire) que hi ha dins el túnel i un volum que es genera entre àlep i àlep que és molt més fi (mida d'element més petita).

En el volum general, a més, s'ha creat una zona on la densitat dels elements és major (el petit túnel interior observat a la figura 25). Aquesta zona correspon a l'espai que, a priori, esperem que ocupi el doll d'aigua en el seu recorregut (veure Annex A per a més detalls). D'aquesta forma, aconseguim uns resultats més precisos allà on més ens interessa (en la descripció de la trajectòria de l'aigua).

Gràcies a totes aquestes consideracions s'ha optimitzat substancialment el mallat, obtenint un nombre total d'elements de 1.700.000 aproximadament. La forma bàsica dels elements emprats en aquest mallat correspon a tetraedres en el volum i a triangles en la superfície. En la figura 26, podem veure totes les superfícies mallades.

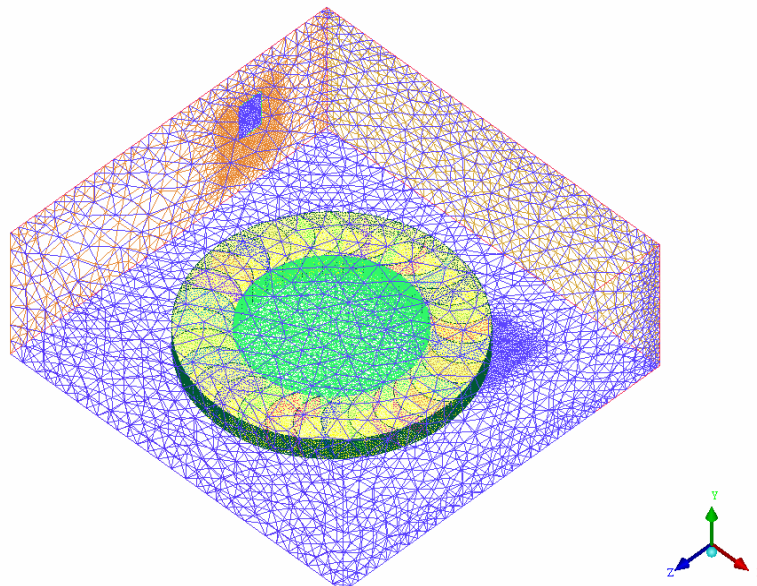


Figura 26: Visualització del mallat de totes les superfícies (triangles).

La part més difícil de mallar, però, ha estat la zona dels àleps i l'anella que els envolta degut a la seva complexa geometria. A continuació es mostra un detall del mallat d'aquesta zona en la figura 27.

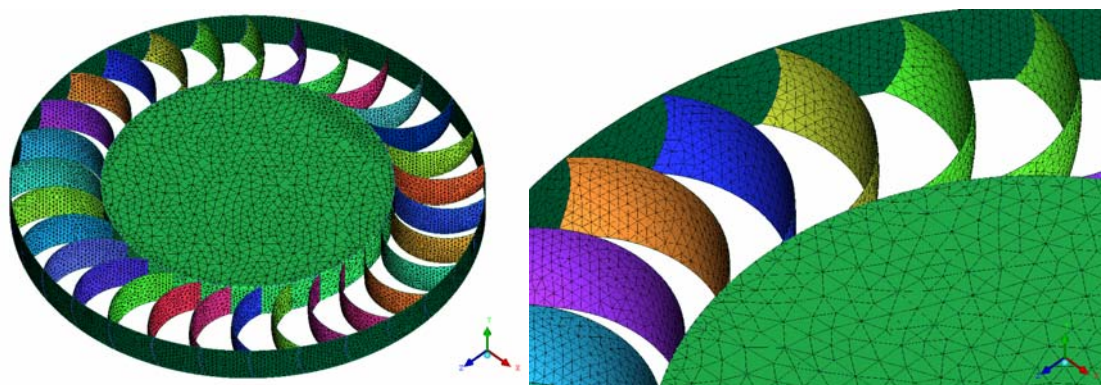


Figura 27: Detall de la malla en la zona del rodet i (a la dreta) més concretament en els àleps.

Finalment s'han descrit les condicions de contorn dels diferents elements. Considerant totes les superfícies del rodet com a elements sòlids (paret). Els diferents volums d'aire es consideren cossos que poden contenir tant aire com aigua. Per motius d'estabilitat del codi, les parets laterals i el terra del túnel també es descriuen com elements sòlids (parets). L'entrada d'aigua és considera un punt d'entrada de velocitat i el sostre com l'únic punt de sortida.

Amb totes aquestes consideracions ja tenim el mallat definit, incloent les condicions de contorn. El pas següent és importar la malla amb les condicions de contorn al programa de simulació Star-CCM+.

3.3.3. Simulació

S'ha de tenir present que aquí es vol simular l'acció del doll d'aigua colpejant el rodet i analitzar-ne les conseqüències. Així, analitzarem la força que es genera a la superfície dels àleps i el moment de gir que això provoca al centre del rodet.

A l'hora de simular s'intenta reproduir les mateixes condicions físiques que es produeixen a la realitat. En el nostre cas, es tracta d'un sistema molt complex, ja que tenim una geometria en 3D, una mescla de dos fluids (aire i aigua), intervén l'efecte de

la gravetat, el doll d'aigua segueix un règim turbulent, la simulació és transitòria i tenim moviment entre elements sòlids (el rodet respecte al túnel).

En aquest sistema amb superfície lliure no tot el volum està ocupat per un únic fluid. Tanmateix, en les condicions inicials de la simulació acceptem que tot el volum del túnel és aire i que per la finestra d'entrada l'aigua té una velocitat de 6 m/s, ocupant la totalitat de la secció.

Per aconseguir uns resultats més complets i significatius, s'estudiaran quatre règims de gir del rodet:

- o 0 rpm, rodet parat.
- o 30 rpm
- o 60 rpm
- o 90 rpm, regim de funcionament normal del molí.

D'aquesta manera podrem conèixer el moment d'arrancada i la corba de potència hidràulica del rodet fins a arribar al règim de treball del molí.

Amb la selecció dels corresponent models, per tal d'aconseguir les condicions descrites en aquest apartat, ja podem iniciar la simulació. En aquest cas cal realitzar quatre simulacions diferents, corresponents als quatre règims de gir que hem escollit.

Un cop s'ha arrancat la simulació, el programa realitza una verificació inicial per comprovar la compatibilitat dels models seleccionats. Fet això comença a generar càlculs iteratius per tal de resoldre les equacions de la dinàmica de fluids amb la màxima precisió.

En general (encara que no per a totes les simulacions) hem decidit que realitzi cinc iteracions internes abans d'avançar un pas de temps de 0,002 segons (cada pas de temps, el rodet canvia de posició d'acord amb la seva velocitat de gir). Això comporta que l'ordinador realitzi entre unes 1.200 i 4.000 iteracions per tal d'arribar a una situació d'estabilització on el rodet hagi donat com a mínim una o dues voltes complertes (en funció del règim de gir).

En l'annex B d'aquest projecte es troba la informació pas a pas de com s'ha realitzat la simulació i de tots els models que s'han escollit.

Amb els mitjans que es disposen, els ordinadors Pentium IV del laboratori de Mecànica de Fluids Computacional, necessitem d'unes 20 hores per realitzar 1.000 iteracions. Això comporta un temps de càlcul de 2 a 4 dies per simulació per a un total de 12 simulacions diferents que es presenten en aquest projecte.

3.4. RESULTATS

Per poder determinar els efectes del doll d'aigua sobre el rodet, utilitzarem els valors obtinguts en la simulació. En aquest cas calcularem el sumatori de la forces que, en un instant, fa l'aigua sobre la totalitat dels àleps que reben el seu efecte, més la força que rep l'anella de ferro que els envolta. En concret només tindrem en compte la força que va en la direcció x ja que aquesta provoca el moment de gir que el molí utilitza. Aquí no tindrem en compte la resta de forces que van en les altres direccions. L'annex C es mostren resultats més detallats.

El programa de simulació ens permet veure l'evolució tant de les forces com dels moments al llarg del temps. D'aquesta forma, podem veure en quin instant els valors es comencen a estabilitzar i prendre una mitjana dels valors durant un cert interval de temps com a representatius. En la figura 28 i 29 s'observa un d'aquests gràfics per al cas concret del rodet clàssic.

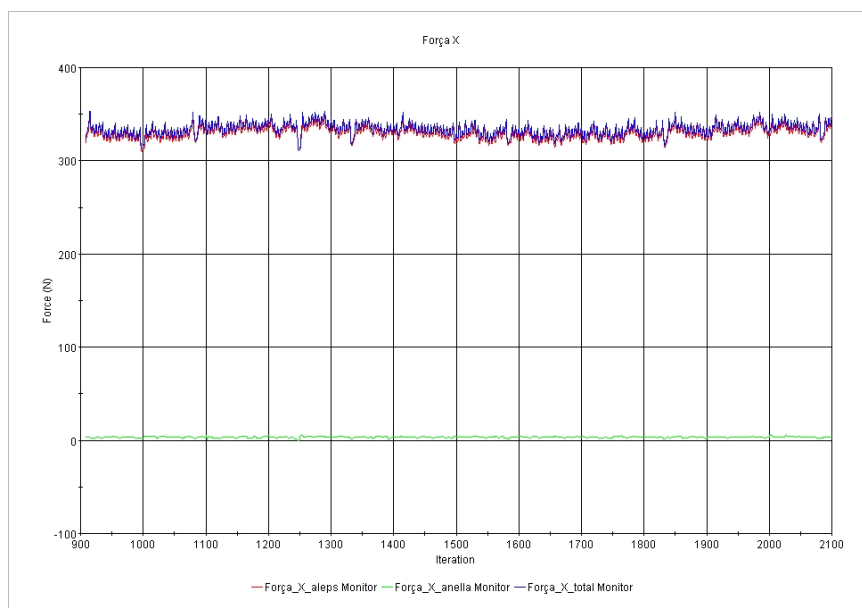


Figura 28: Gràfica de la força x (N) en funció del nombre d'iteracions (cada 5 iteracions = 0,002 s). Cas del rodet girant a 60 rpm.

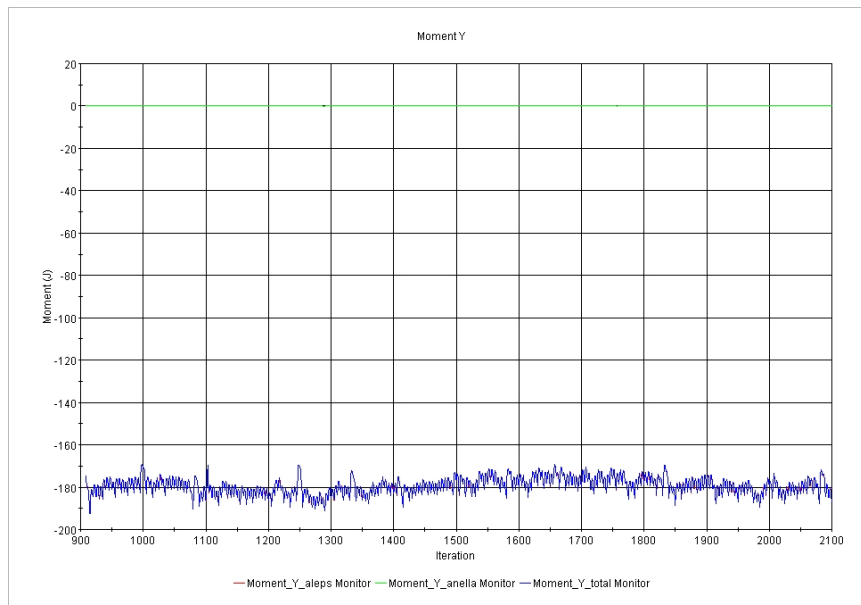


Figura 29: Gràfica del moment Y (N m) en funció del nombre d'iteracions (cada 5 iteracions = 0,002 s).
Cas del rodet girant a 60 rpm. Noteu el signe negatiu d'acord amb el sistema d'eixos coordenats de la
figura 26.

Coneixent la velocitat angular del rodet en cada cas i el moment M obtingut en la simulació podem obtenir la potència P en funció del nombre de revolucions per minut (rpm).

A la taula 2, observem els valors de la força x i del moment associat y , obtinguts en cada un dels règims de gir simulats. La darrera columna de la taula 2 mostra el valor de la potència hidràulica extreta per al rodet clàssic mitjançant l'aplicació de l'equació (21). S'ha de tenir present que els valors de la taula 2 s'obtenen com a valors promitjats en el temps una vegada s'ha assolit un estat assimilable a l'estacionari.

	Força X	Moment Y	Potència
	(N)	(N m)	(W)
0 rpm	480	281	0
30 rpm	450	253	795
60 rpm	340	179	1.125
90 rpm	95	33	311

Taula 2: Valors obtinguts en la simulació del rodet clàssic

Aquestes dades les representem a la figura 30, on mostrem el moment hidràulic en funció de les revolucions per minut del rodet N . Comparant la corba del rodet clàssic amb la corba obtinguda del càlcul teòric d'una turbina Pelton mostrada en l'apartat anterior, podem observar les diferències de rendiment hidràulic entre els dos casos.

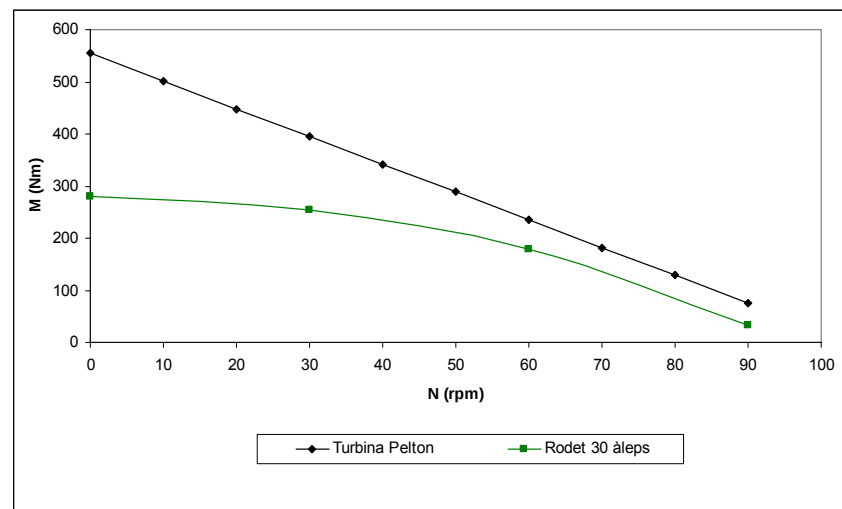


Figura 30: Moment generat pel rodet clàssic comparat amb la turbina Pelton en funció de les rpm del rodet.

En la figura 31, es compara la corba de potència del rodet clàssic amb la d'una turbina Pelton.

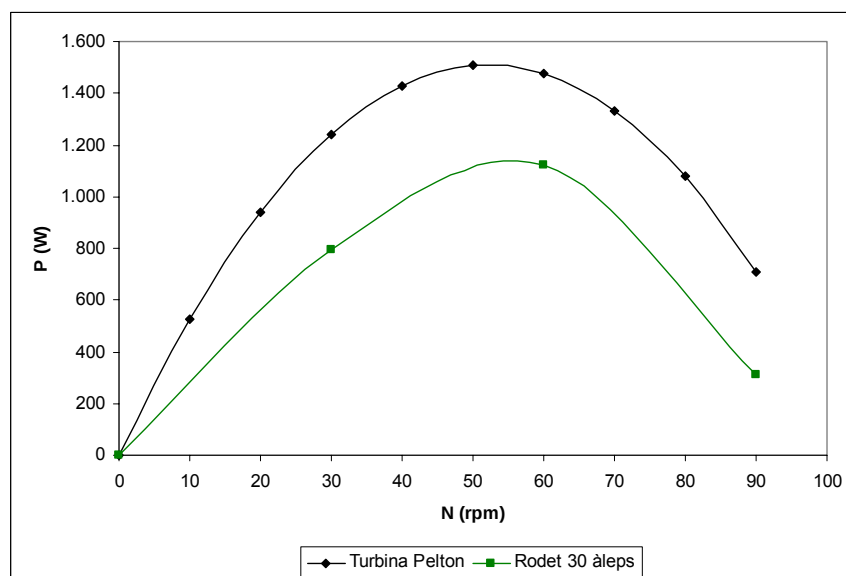


Figura 31: Corba de potència del rodet clàssic comparada amb la de la turbina Pelton en funció de les rpm del rodet.

Paral·lelament a aquests resultats numèrics, el programa és capaç de generar solucions gràfiques que ens permeten visualitzar diferents variables. Aquest és el cas, per exemple, dels gràfics que mitjançant una escala gradual de colors permeten apreciar zones on hi ha un diferencial de pressió, mòdul de la velocitat, concentració d'aigua, etc.

La figura 32 ens mostra la fracció d'aigua (1 equival a tot aigua, 0 equival a tot aire) que hi ha en dues seccions determinades.

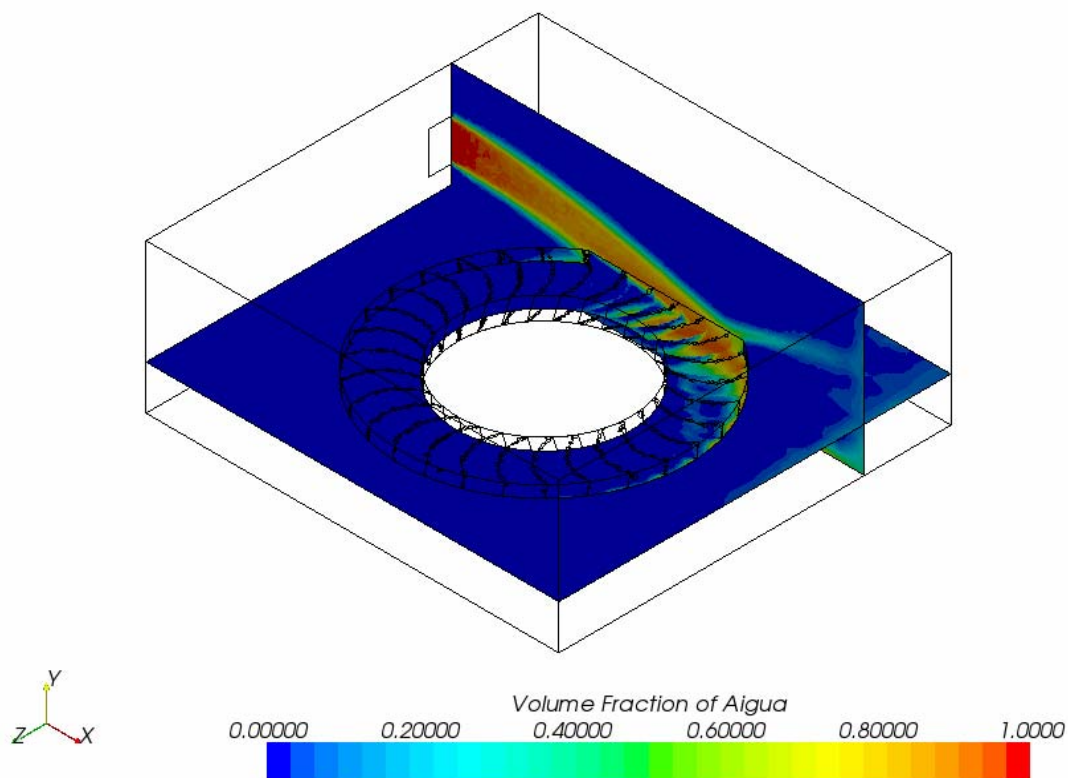


Figura 32: Fracció del volum d'aigua en dos plans en la situació estimada com estacionària.

Cal notar que hem escollit dues seccions molt significatives. La primera, talla el doll d'aigua longitudinalment, mostrada també a la figura 33, i la segona talla el rodet transversalment figura 34.

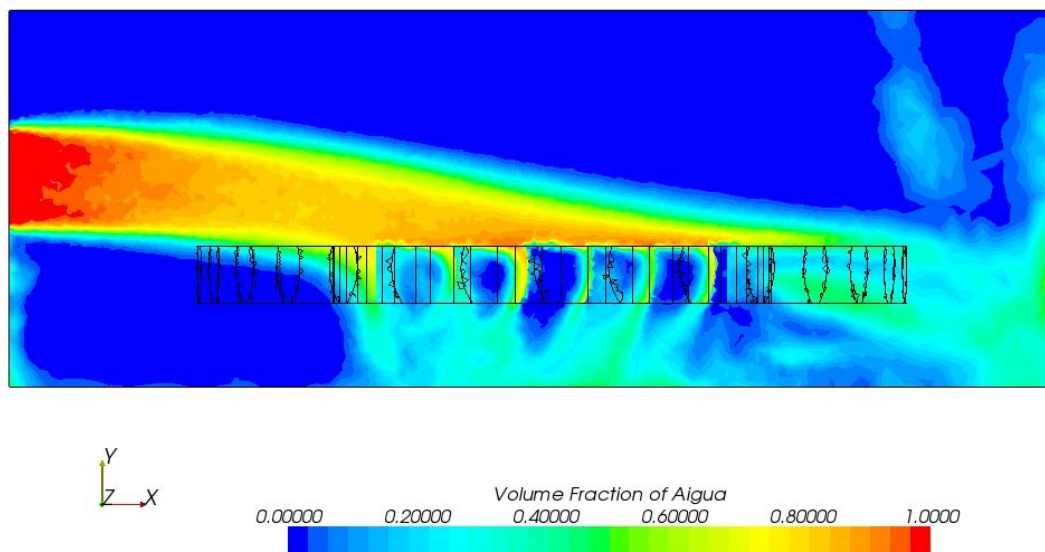


Figura 33: Fracció en volum en la secció longitudinal de la figura 32. És interessant observar el recorregut de l'aigua en els àleps.

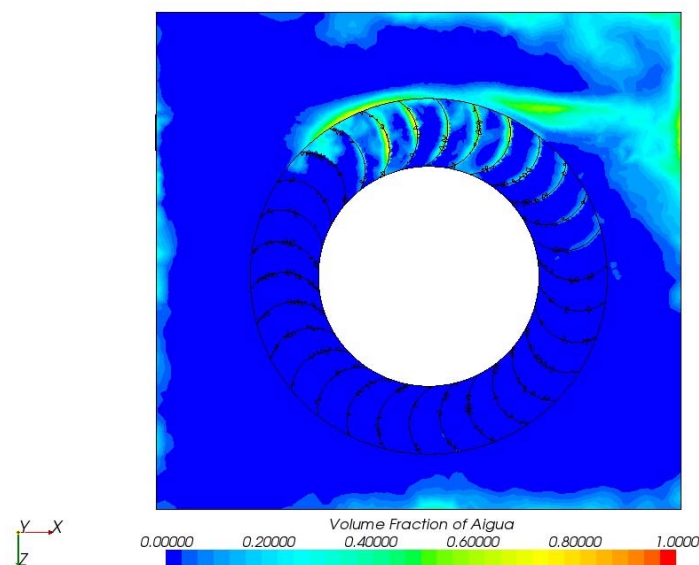


Figura 34: Fracció en volum d'aigua en la secció transversal de la figura 32. Notar com part de l'aigua impacta per la part exterior de l'anella de ferro i no entra en contacte amb els àleps.

També podem obtenir gràfics vectorials, que ens permeten visualitzar magnituds vectorials com la velocitat. Aquesta és molt útil per estudiar les possibles turbulències que es produeixen entre àleps. La figura 35 és una mostra d'aquest tipus de resultats gràfics.

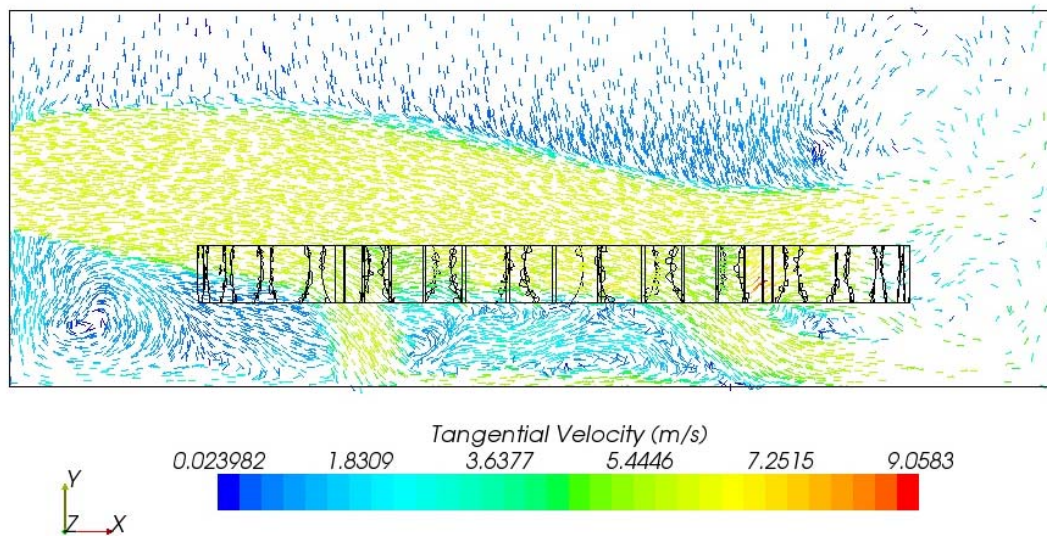


Figura 35: Visualització dels vectors de velocitat en la secció del doll d'aigua de la figura 33.

En el cas del rodet clàssic, hem analitzat també les forces que actuen sobre l'àlep número 1 i el seu simètric, l'àlep 16 en funció del temps. En la figura 36 es mostren els àleps que estudiem.

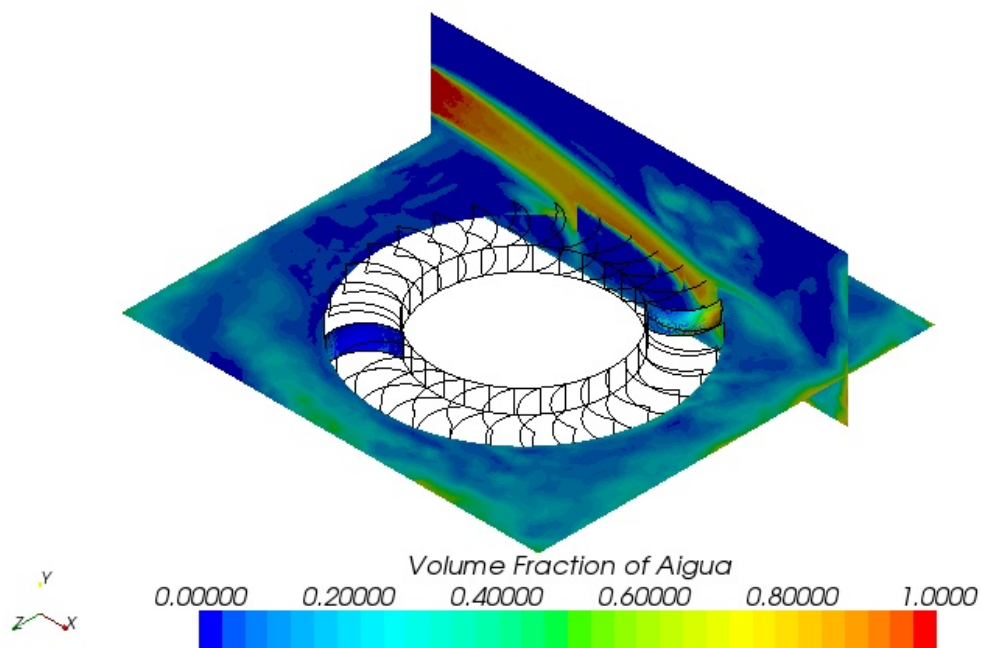


Figura 36: Visualització dels dos àleps simètrics analitzats.

D'aquesta manera hem obtingut un gràfic que mostra l'evolució de la força x i del moment y, que provoca el doll d'aigua sobre els àleps des del moment que comença a colpejar-lo fins que ja no el toca quan el rodet gira a 90 rpm. Això es pot veure en la següent figura 37 i 38.

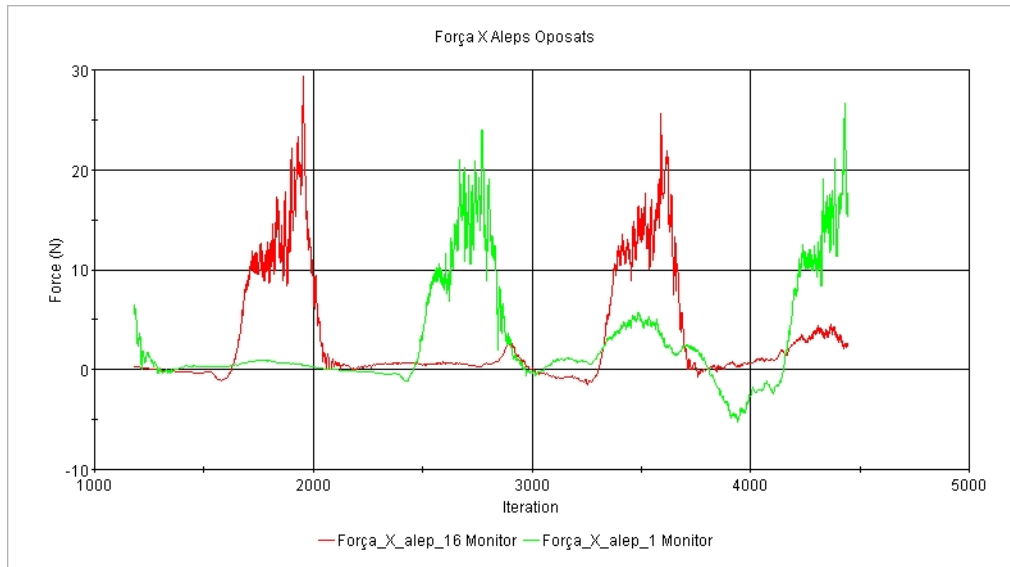


Figura 37: Força X aplicada sobre els dos àleps oposats mostrats a la figura 36 en funció de la iteració. Observar que cada 1.800 iteracions, aproximadament, el rodet fa una volta (el pas de temps, aquí, era de 0,002 s amb 5 iteracions per a cada pas de temps; el rodet gira a 90 rpm).

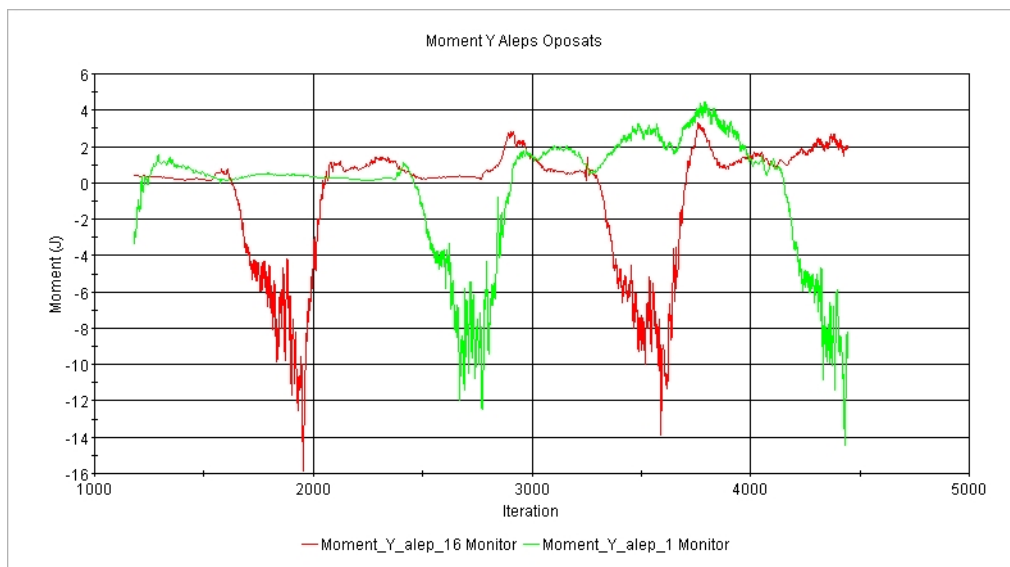


Figura 38: Moment Y generat pels dos àleps oposats en funció de la iteració (veieu, també, el gràfic de forces de la figura 37).

En l'annex D d'aquest projecte es recullen més resultats numèrics i gràfics obtinguts en l'estudi del rodet clàssic de 30 àleps.

3.5. CONCLUSIONS

La primera etapa del nostre estudi del rodet clàssic ha consistit en una anàlisi analítica del sistema. Això ha permès assimilar les fórmules clàssiques sobre moment i potència hidràulica associada de turbines d'acció tipus Pelton. Aquest procediment ja ha estat aplicat anteriorment per Rojas-Sola i López-García (2005) en l'estudi de rodets de molins fariners. Aquest procediment, però, deixa moltes incògnites obertes ja que els rodets d'aquests molins de ben segur que no disposen d'una eficiència tan elevada com els de les turbines Pelton.

Per això, i per primera vegada, s'ha simulat el comportament d'un rodet clàssic de 30 àleps mitjançant la dinàmica de fluids computacional. El problema és molt complex des del punt de vista computacional ja que incorpora dos tipus de fluids (aire i aigua), un element mòbil (el rodet), un flux turbulent, l'acció de la gravetat, etc. En general, la simulació realitzada amb el rodet clàssic de 30 àleps ha estat molt satisfactòria, ja que ha servit per comprovar que tot l'extens pre-procés que s'ha fet abans d'aconseguir simular, ha estat correcta.

Un cop comprovat la coherència dels resultats obtinguts, podem començar a analitzar amb més profunditat tots els paràmetres hidràulics. Pel que fa al moment produït pel rodet de 30 àleps, aquest és substancialment menor que el valor teòric de la turbina Pelton, tal i com era d'esperar. En efecte, entre d'altres diferències amb una turbina Pelton, la incidència del doll d'aigua no es produeix d'una manera tan efectiva en el rodet real del molí.

Aquesta diferència s'accentua al moment de l'arrancada on hi ha una diferència de 260 Nm. Aquest fet ens fa pensar que l'elevat nombre d'àleps perjudica la trajectòria del doll d'aigua en l'instant inicial. Per això es realitzarà un estudi d'un rodet amb la meitat d'àleps en el capítol següent.

Finalment podem observar que la corba de potència també és inferior a la turbina Pelton. A diferència del cas anterior, aquí la diferència més important es produeix en la zona mitja de les revolucions de treball, mantenint la mateixa tendència fins al regim de 90 rpm. Aquesta falta de potència davant l'obtinguda per una turbina Pelton comporta la necessitat d'intentar millorar el rendiment del rodet.

4.RODET MODIFICAT 1: REDUCCIÓ D'ÀLEPS

4.1. INTRODUCCIÓ

Després d'analitzar els resultats obtinguts en la simulació del rodet clàssic, s'ha observat que en el moment d'arrancada, el doll d'aigua impacte d'una manera molt violenta sobre el rodet.

Per tal de reduir aquest impacte tan fort, s'ha optat per reduir el nombre d'àleps a la meitat, de 30 a 15, considerant que un menor nombre d'àleps facilitarà el pas del doll d'aigua de la part superior del rodet a la part inferior. Amb això és vol aconseguir reduir l'impacte vertical en el rodet (força y) i millorar el moment d'arrancada, ja que el doll podrà impactar millor sobre la superfície de cada un dels àleps.

A continuació utilitzarem la mateixa metodologia de treball que en el cas anterior, per tal d'intentar verificar si aquestes hipòtesis inicials es compleixen.

4.2. SIMULACIÓ

4.2.1. Introducció

Gràcies al treball realitzat en l'estudi del rodet clàssic (capítol 3), la simulació del rodet modificat de 15 àleps és molt més fàcil i ràpida.

Partirem de la geometria del rodet clàssic i eliminarem la meitat dels àleps, creant un nou rodet molt més senzill. Aquest procediment ens permetrà estalviar temps de pre-procés i guanyarem hores de simulació, alhora que repercutirà directament en la precisió dels resultats obtinguts.

4.2.2. Generació de mallat

La geometria que introduïm en el programa mallador serà la mateixa, però amb menor nombre de línies i superfícies.

Tots els paràmetres utilitzats en el procés de mallar són els mateixos que en el cas del rodet clàssic (i, per tant, no cal comentar-los). Gràcies al menor nombre d'àleps,

podem reduir el nombre total d'elements que conformen la malla fins a 1.400.000 elements. Això provoca una reducció directa en el temps de càlcul.

4.2.3. Simulació

Les condicions de contorn d'aquest sistema són exactament iguals a les del cas anterior, això facilita l'elecció dels models que cal escollir. Per això ens limitarem a seguir els passos que indica l'annex B d'aquest projecte on s'especifica com realitzar la simulació.

La velocitat d'entrada de l'aigua seguirà essent de 6 m/s.

Per tal d'aconseguir uns resultats que permetin ésser comparats amb els del capítol anterior, realitzarem el mateix nombre de simulacions que en el cas del rodet clàssic. Així, realitzem simulacions per a quatre règims de gir diferents del rodet:

- o 0 rpm, rodet parat.
- o 30 rpm
- o 60 rpm
- o 90 rpm, règim de funcionament normal del molí.

Tal i com s'ha comentat anteriorment, a conseqüència del menor nombre d'elements que té aquesta geometria, les iteracions que realitza el programa de simular es produeixen a una velocitat més elevada. Fet que ens permet realitzar un nombre més gran d'iteracions, aconseguint unes 4.000 iteracions per a cada cas. Això augmenta la precisió dels resultats obtinguts.

A continuació, la figura 39 mostra la simulació del rodet de 15 àleps, just abans que el doll d'aigua arribi a impactar amb el rodet. En aquest cas el programa de simulació havia realitzat 180 iteracions.

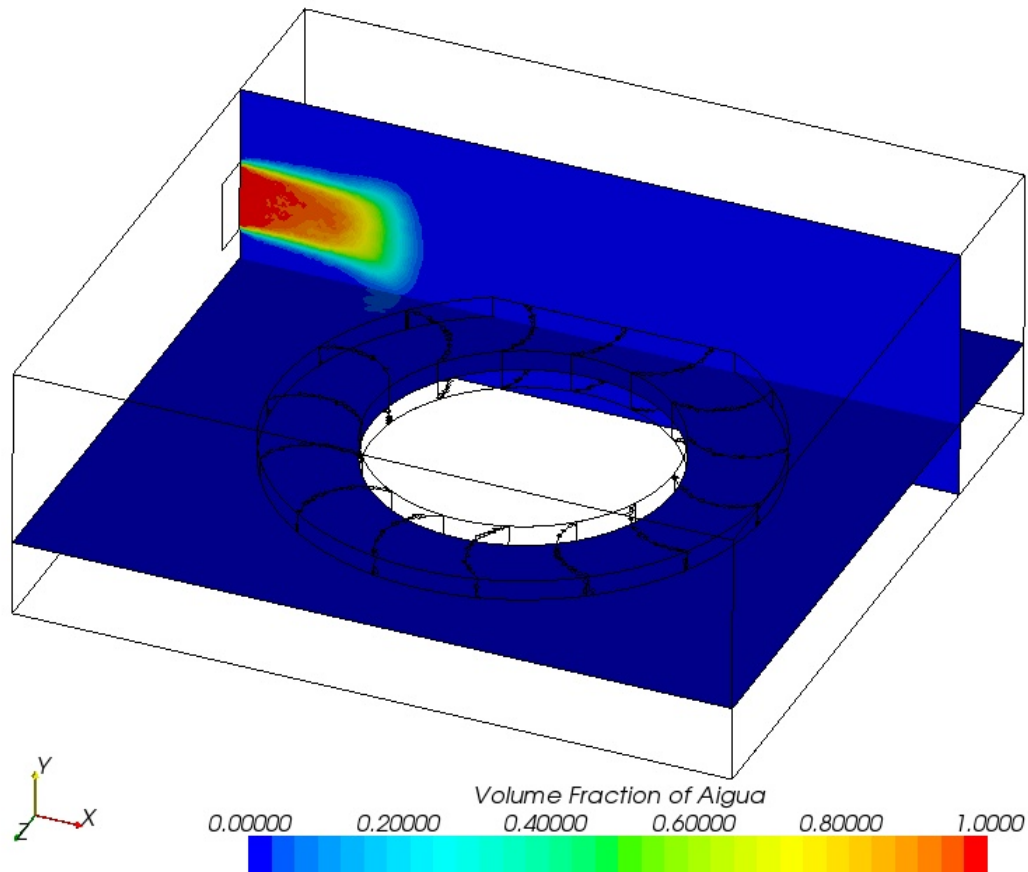


Figura 39: Fracció en volum d'aigua just abans d'impactar amb el rodet de 15 àleps.

En la figura 39, es pot observar clarament que la distància entre àleps és molt més gran que en el cas del rodet de 30 àleps.

4.3. RESULTATS

Per al rodet de 15 àleps analitzem les mateixes variables que en el rodet clàssic (i que en la turbina Pelton).

Els resultats obtinguts de la força x, moment y i potència són els que es mostren a la taula 3 (promitjats durant un cert interval temporal una vegada s'ha assolit un estat estacionari). També adjuntem el valor en % de la variació respecte el rodet clàssic.

	Força X (N)	Moment Y (N m)	Potència (W)	Variació %
0 rpm	600	360	0	+28,1
30 rpm	400	218	685	-13,8
60 rpm	250	138	867	-22,9
90 rpm	50	18	170	-45,5

Taula 3: Valors obtinguts en la simulació del rodet de 15 àleps.

Igual que en el cas anterior del rodet clàssic, representem els valors de la taula 3 en la figura 40, on també comparem amb les corbes de la turbina Pelton i del rodet de 30 àleps.

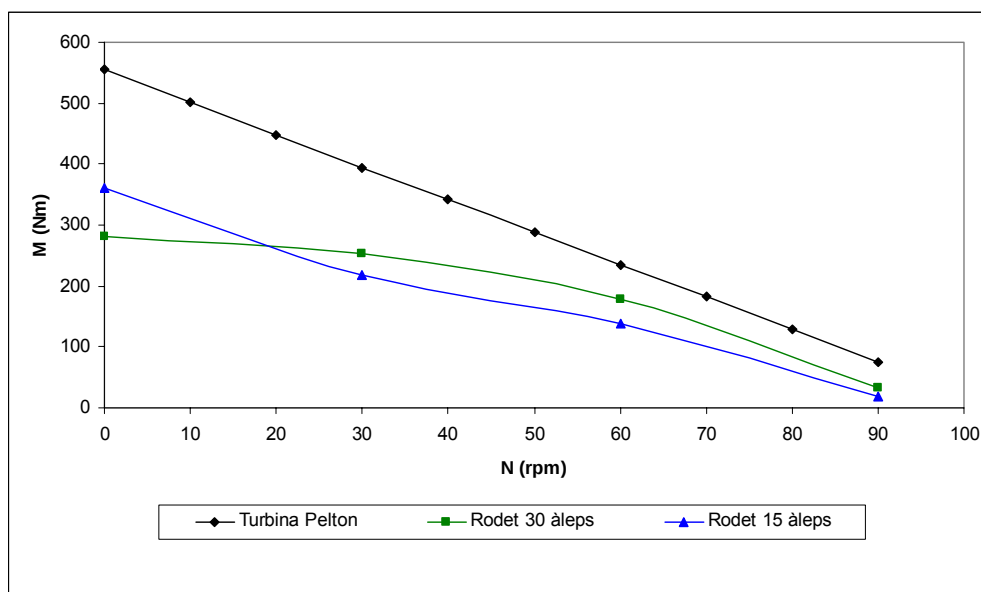


Figura 40: Moment hidràulic (M) en funció de les revolucions de gir del rodet (N).

Observem a la figura 40 com, en efecte, per a la situació d'arrancada el rodet de 15 àleps proporciona un moment superior al clàssic de 30 àleps. Tanmateix, per al rodet de 15 àleps el moment es redueix de forma quasi lineal amb les rpm. Això comporta

que per a règims de gir més elevats, el comportament no sigui tan bo com per al rodet clàssic analitzat al capítol 3. Això és més evident en l'estudi de la potència obtinguda per aquest rodet.

En efecte, la figura 41 mostra la corba de potència del rodet de 15 àleps, també en comparació amb les corbes de potència dels casos anteriors (capítol 3). Els resultats no són tan satisfactoris com per la cas del capítol 3.

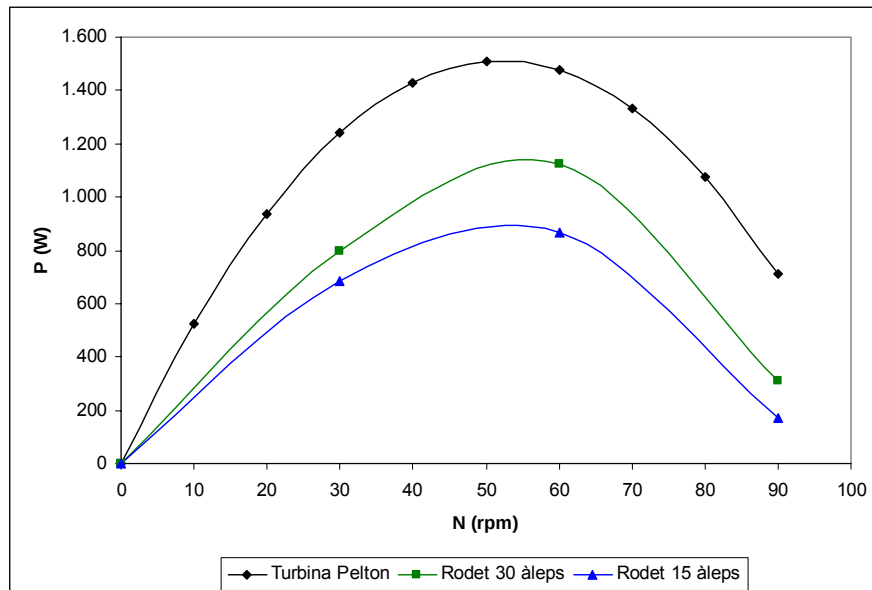


Figura 41: Corba de potència del rodet (W) de 15 àleps en funció de les revolucions de gir del rodet (N).

4.4. CONCLUSIONS

Després d'haver realitzat quatre simulacions diferents per a un rodet modificat que consisteix en 15 àleps, podem concloure que aquest no ha complert totes les expectatives que s'esperaven del seu comportament hidràulic.

Tanmateix, cal destacar que aquest rodet sí ha millorat el moment d'arrancada del rodet, augmentant en 79 Nm (+28,1%) respecte al rodet clàssic.

Ara bé, s'observa que el moment generat pel rodet disminueix ràpidament a mesura que augmenta la seva velocitat angular, essent molt més petit que el valor obtingut en el rodet clàssic.

Això es pot explicar considerant que en el moment d'arrancada el doll d'aigua impacte d'una manera més directa sobre els àleps, aconseguint una major superfície de contacte. A mesura que augmenta la velocitat angular, però, al tenir un nombre menor d'àleps disminueix la superfície de contacte i això repercuteix negativament en el moment generat pel rodet.

Finalment, s'ha observat que la corba de potència del rodet de 15 àleps està molt per sota de l'aconseguida pel rodet clàssic.

Per tot l'anterior, es conclou que el rodet de 15 àleps té una millor arrancada, però al règim de treball de 90 rpm té un rendiment hidràulic menor. Això ens fa descartar aquest model, ja que el nombre d'engegades d'un molí d'aquestes característiques és insignificant davant les hores d'ús a règim constant.

5.RODET MODIFICAT 2: VARIACIÓ EN L'ORIENTACIÓ DELS ÀLEPS

5.1. INTRODUCCIÓ

Tal i com s'ha obtingut en el capítol 3, el rodet clàssic mostra una falta de potència hidràulica important en comparació amb els càlculs teòrics d'una turbina Pelton. per intentar augmentar la potència útil, aquí s'ha optat per realitzar una modificació a nivell de geometria dels àleps.

Analitzant tots els càlculs analítics fets en apartats anteriors d'aquest projecte, i coneguts els resultats del rodet clàssic, s'ha observat que el paràmetre real que no s'ajusta tant a les suposicions dels càlculs teòrics és l'angle d'inclinació dels àleps.

Aprofitant el càlcul de la trajectòria del doll d'aigua que s'ha realitzat prèviament en el capítol 3, sabem que el doll d'aigua impacte amb una inclinació de 15° sobre la superfície dels àleps. Tanmateix, si analitzem la geometria dels àleps del rodet clàssic, veurem que la seva inclinació, respecta la vertical, és de tan sols 5° .

Això provoca que el doll d'aigua no impacti perpendicularment en l'àlep, produint una pèrdua de superfície útil, amb la conseqüent reducció de potència.

Per això aquí hem dissenyat un rodet de 30 àleps (mateix nombre que en el cas clàssic analitzat en el capítol 3) on aquests estiguin inclinats 15° respecte la vertical. Això comporta que la superfície del rodet i la del doll d'aigua siguin perpendiculars.

5.2. SIMULACIÓ

5.2.1. Introducció

En aquest cas, no podrem utilitzar la geometria del rodet clàssic, ja que les modificacions requereixen que es dibuixi de nou. Per això hem hagut de començar tot el procés de disseny des del principi.

S'ha optat per un rodet de 30 àleps i no de 15 (com en el capítol 4), perquè la seva corba de potència és més propera a la corba de la turbina Pelton (veieu el capítol 4).

La resta d'operacions que formen el pre-procés han estat idèntiques als casos anteriors estudiats en els capítols 4 i 5. Per això, aquí no s'exposen.

En definitiva, simulem un rodet de 30 àleps amb una inclinació de 15° (perpendicular al flux d'aigua incident) per tal d'esbrinar si aquest canvi en la geometria augmenta el seu rendiment hidràulic.

5.2.2. Generació de malla

La generació de la malla requereix un nombre d'elements molt similar al rodet de 30 àleps (1.700.000 d'elements aproximadament), ja que només variem l'angle d'inclinació d'aquests, i en cap moment augmentem la superfície.

Finalment, s'ha aconseguit una malla amb 1.900.000 elements aproximadament, augmentant lleugerament el nombre d'elements que tenia el rodet clàssic. Això és degut a un augment de precisió en el volum existent entre àleps.

5.2.3. Simulació

Les condicions físiques d'aquest sistema són exactament iguals a les del cas anterior, això facilita l'elecció dels models que cal escollir. Per això ens limitarem a seguir els passos que indica l'annex B d'aquest projecte on s'especifica com realitzar la simulació.

Per tal d'aconseguir uns resultats comparables als dels capítols 4 i 5, realitzarem el mateix nombre de simulacions que en el cas del rodet clàssic i del rodet de 15 àleps. Així, hem utilitzat quatre règims de gir del rodet:

- o 0 rpm, rodet parat.
- o 30 rpm
- o 60 rpm
- o 90 rpm, règim de funcionament normal del molí.

Gràcies a l'experiència adquirida en les simulacions anteriors, s'ha observat que no cal que el rodet arribi a donar cap volta completa per tal d'aconseguir resultats

significatius. Aquest fet ens permet parar la simulació quan aquesta ha realitzat unes 2.000 iteracions per al cas de 90 rpm.

Aprofitant el temps que ens estalviem en realitzar menys iteracions, disminuïrem el salt de temps que es produeix cada 5 iteracions, per tal d'augmentar la precisió dels resultats i tenir una visió més definida del doll d'aigua. D'aquesta manera passem d'un esglaó de temps de 0,002 s a 0,001 s.

5.3. **RESULTATS**

Els resultats obtinguts de la força x, moment y i potència en funció de la velocitat de gir del rodet són els que es mostren a la taula 4. També adjuntem la variació en %, respecte el rodet clàssic.

	Força X (N)	Moment Y (N m)	Potència (W)	Variació %
0 rpm	780	481	0	+71,2
30 rpm	630	366	1.150	+44,6
60 rpm	450	257	1.615	+43,6
90 rpm	110	56	528	+69,7

Taula 4: Valors obtinguts en la simulació del rodet de 30 àleps a 15° amb geometria modificada.

D'igual forma que en els capítols 3 i 4, mostrem la figura 42 a partir dels resultats de la taula 4 on representem el moment hidràulic en funció de la velocitat angular. Per tal d'aconseguir una visió comparativa més general, en aquest cas comparem tots els casos fets anteriorment: la turbina Pelton, el rodet clàssic de 30 àleps, el rodet de 15 àleps i el rodet amb 30 àleps inclinats 15°.

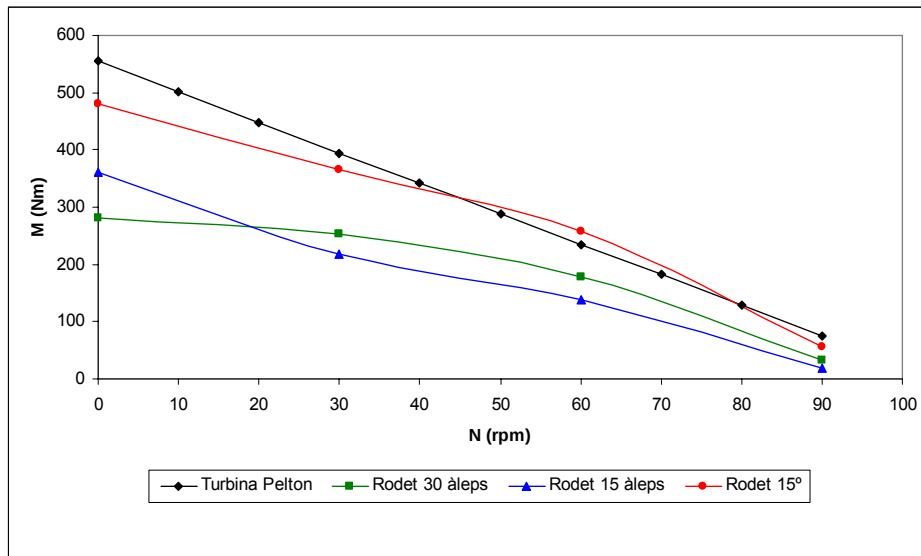


Figura 42: Comparativa del moment produït en cada rodet simulat en el present projecte en funció de la velocitat de gir del rodet (rpm).

Observem en la figura 42 com la millora amb el nou rodet és molt significativa per a tots els règims de gir en què treballa el rodet. El moment d'arrancada és especialment elevat en comparació amb el rodet clàssic. També augmenta de forma significativa el moment a altes rpm. La figura 43 mostra la corba de potència del rodet en comparació amb les corbes de potència dels casos anteriors.

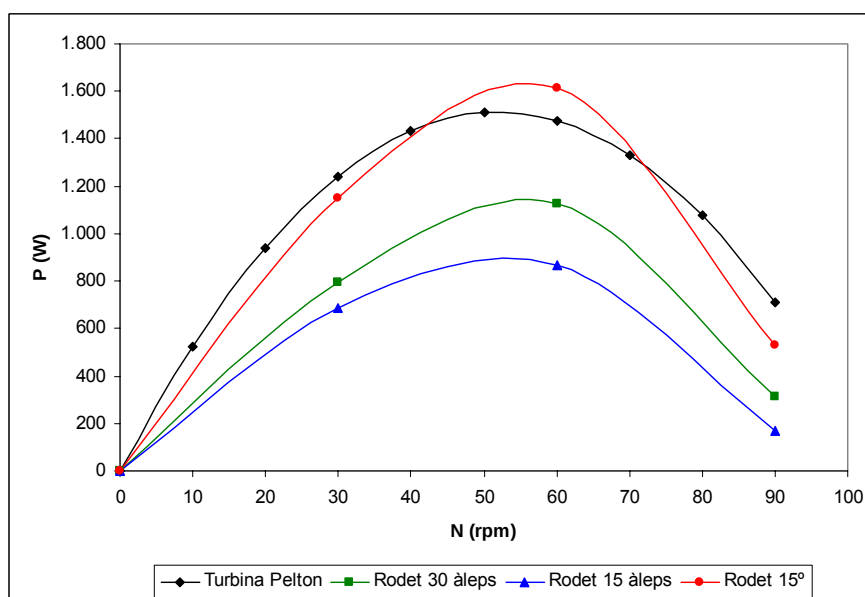


Figura 43: Comparativa de les corbes de potència de cada rodet simulat en el present projecte en funció de la velocitat de gir del rodet (rpm).

També a la figura 43 s'observa com la potència hidràulica obtinguda del nou redisseny és molt més elevada que la del rodet clàssic (i també que la del rodet a 15 àleps). S'observa que, en alguns casos, la potència obtinguda supera la teòrica associada a una turbina Pelton amb angles de sortida de la cullera de 90°.

5.4. **CONCLUSIONS**

S'han realitzat quatre simulacions d'un rodet de 30 àleps modificat amb una inclinació de 15° respecte a la vertical per tal de presentar una superfície més perpendicular al doll d'aigua incident. Els resultats han estat molt satisfactoris ja que la seva potència útil ha augmentat significativament en comparació amb la del rodet clàssic, igualant-se a la corba de potència d'una turbina Pelton amb angles de sortida de la cullera de 90°.

En efecte, Podem observar que el moment generat per aquest rodet és molt superior al rodet clàssic, augmentant fins a un 71% el parell d'arrancada i en un 55% superior el parell per a la mitjana del règims de gir analitzats. A més, la seva progressió a mesura que augmenta la velocitat angular és molt més lineal i progressiva que en els casos estudiats anteriorment.

La potència hidràulica, per la seva banda, ha augmentat un 48% de mitjana respecte a la potència del rodet clàssic. La corba de potència–revolucions de gir per al nou redisseny és molt similar a la d'una turbina Pelton amb angle de sortida de la cullera de 90°.

Tots aquest resultats ens permeten afirmar que el factor més significatiu en el correcte funcionament d'un rodet hidràulic horitzontal és l'angle d'inclinació dels àleps respecte al doll d'aigua incident. D'aquesta forma, podem concloure que, per a cada molí en concret, s'ha d'aconseguir una orientació dels àleps el més perpendicular possible al doll d'aigua incident. Això garanteix un rendiment hidràulic molt elevat.

6.RESUM DEL PRESSUPOST

El pressupost global del disseny i optimització d'un rodet hidràulic d'un molí fariner de meitat del segle XX situat a Besalú, inclosos els costos de desenvolupament i recerca, costos d'amortització i costos de redactat, puja a la quantitat de:

4.235,39 euros

Quatre mil dos-cents trenta-cinc euros i trenta-nou cèntims

7.CONCLUSIONS

El primer objectiu d'aquest projecte ha estat l'estudi hidràulic del rodet del molí fariner de Can Subirós a Besalú que, actualment, es troba en procés de reconstrucció.

Cal destacar que en èpoques passades, l'existència d'aquest molí significava un símbol de poder i modernitat que gràcies a l'experiència dels artesans d'aquella època permetia consolidar Besalú entre les capitals més importants de Catalunya.

Un cop estudiat el funcionament del molí hidràulic i coneguts els detalls constructius, hem pogut constatar que tots els molins existents a la zona tenen un grau de semblança molt elevat. Aquest fet ens permet afirmar que la gran majoria eren construïts pel mateix grup de persones i seguint pautes constructives idèntiques. Això és especialment interessant pel que respecte al rodet, ja que s'utilitzava un model únic per als diferents molins fariners. Aquest model de rodet l'anomenem clàssic o estàndard.

A banda dels estudis analítics que s'han fet per al model estàndard, aquí apliquem les tècniques més recents de simulació de dinàmica de fluids computacional (CFD). La utilització de programari CFD ens ha permès analitzar en detall les conseqüències d'utilitzar diferents redissenys del rodet.

S'ha de tenir present que una simulació d'aquestes característiques és particularment complexa ja que correspon a un cas transitori bifàsic de superfície lliure (aire i aigua), amb turbulència, i amb parts sòlides en moviment (el rodet). Tot això comporta uns requisits computacionals importants, que s'han pogut assolir mitjançant la utilització dels ordinadors Pentium IV amb 4 Gb de memòria RAM que disposa el laboratori de Mecànica de Fluids Computacional de l'àrea de Mecànica de Fluids. Amb tot, una simulació completa pot trigar de 2 a 4 dies en funció del règim de gir, del pes de la geometria, etc. Aquí, a banda de simulacions de dissenys preliminars no mostrats en la present memòria, s'han dut a terme un total de 12 simulacions completes.

Una vegada analitzat el rodet clàssic, i obtinguts els valors de moment hidràulic (utilitzat per fer girar la mola) i potència hidràulica, l'objectiu ha estat millorar-ne l'eficiència hidràulica, proposant una sèrie de millores que han estat provades virtualment.

En primer lloc s'ha proposat una reducció en el nombre d'àleps (mantenint la forma) per tal d'augmentar el parell d'arrancada. Les simulacions per a un rodet de 15 àleps en comptes del de 30 àleps del rodet clàssic mostren, en efecte, un augment en el

parell d'arrancada significatiu. Tanmateix, el comportament per a règims de gir de funcionament no és tan bo com per al rodet clàssic.

La segona modificació proposada ha consistit en modificar la geometria però mantenint el mateix nombre d'àleps que en el rodet clàssic. En aquest cas, els àleps del rodet s'han canviat d'orientació per tal de presentar una superfície el més perpendicular possible al flux d'aigua incident.

Els resultats són especialment satisfactoris per aquest redisseny ja que mostra un augment de parell (i de potència hidràulica) molt substancial en comparació amb el del disseny clàssic (un 55% superior en mitjana per al moment hidràulic). D'aquesta forma, el redisseny proposat obté una distribució de moments i potència hidràuliques molt semblants als que s'obtenen en el símil d'una turbina Pelton amb angle de sortida de les culleres de 90°.

D'aquesta forma, les simulacions amb CFD ens permeten afirmar que la principal millora en el rendiment hidràulic del rodet correspon a un disseny dels àleps amb una superfície central que sigui el més perpendicular possible al doll incident d'aigua. Això, però, no permet una estandarització del rodet ja que la velocitat de sortida de l'aigua i, en conseqüència, la seva trajectòria, depenen de cada molí fariner.

Finalment, cal comentar que aquest projecte ha permès demostrar que la combinació de les noves tècniques de càlcul amb CFD i els nombrosos recursos computacionals que disposa en l'actualitat l'Àrea de Mecànica de Fluids de l'Escola Politècnica Superior són més que suficients per realitzar complexes simulacions que, d'altra banda, només podríem obtenir realitzant càlculs analítics que només serien aproximacions al cas real.

Besalú, juny de 2008

Jordi Solà i Codony

8.RELACIÓ DE DOCUMENTS

La relació de documents que formen aquest projecte és la següent:

I. MEMÒRIA

Amb els següents annexes:

- o Annex A: Generació de mallat amb ICEM “ ANSYS”
- o Annex B: Simulació CFD amb STAR CCM+
- o Annex C: Resultats del rodet clàssic
- o Annex D: Resultats del rodet modificat 1
- o Annex E: Resultats del rodet modificat 2
- o Annex F: Esquemes de disseny

II. PRESSUPOST

- o Pressupost

9.BIBLIOGRAFIA

Llibres i articles:

- Fogiel, M. (Director) *The Fluid Mechanics and Dynamics Problem Solver*. REA ed., New Jersey, 1992.
- Hibbeler, R.C. *Ingeniería mecánica. Estática*. 7ed. Prentice-Hall, Nova York, 1996.
- Mataix, C. *Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas*. Ediciones el Castillo, S, 1982.
- Munson, B. R., Young, D.F., Okiishi, T. H. *Fundamentos de Mecánica de Fluidos*. Edición Limusa Wiley, Nova York, 1999.
- Rojas-Sola, J. I., López-García, R. *Interciencia*, 30, 745-751, 2005.
- Rojas-Sola, J. I., López-García, R. *Renewable Energy*, 32, 2019-2033, 2007.
- White, F. M. *Mecánica de fluidos*. Mc Graw-Hill, Nova York, 1983.

Adreces web:

- www.cfd-online.com, web de recursos relacionats amb CFD, (21/02/08).
- <http://www.solidworks.es>, web relacionada amb el programa Solid Works, (14/06/08).
- <http://www.ansys.com>, web relacionada amb elements finits, (21/02/08).
- http://www.cd-adapco.com/products/STAR-CCM_plus/, web relacionada amb el programa de simulació numèric, (21/02/08).
- www.cd-adapco.com/minisites/ugm_us/seattle-agenda.pdf, web relacionada amb el programa de simulació numèric, (21/02/08).
- <http://www.ansys.com/products/icemcfd.asp>, web relacionada amb el programa de mallar, (16/04/08).
- <http://www.ingeciber.com/productos/icem.php>, web relacionada amb el programa ANSYS ICEM CFD™/AI*Environment™, (16/04/08).

ANNEX A: GENERACIÓ DE MALLAT AMB ICEM “ANSYS”

A.1. ICEM "ANSYS" 11.0

En aquest annex descriurem els passos principals que hem seguit a l'hora de mallar la geometria que volem analitzar.

El programa mallador que s'ha utilitzat en aquest projecte és l'ICEM d'ANSYS en la versió 11.0.

En la figura 44, podem veure la icona que hem de seleccionar en l'escriptori del nostre ordinador de l'aula d'informàtica que actualment disposa l'Àrea de Mecànica de Fluid del Departament d'Enginyeria Mecànica i de la Construcció Industrial de la Universitat de Girona.



Figura 44: Icona corresponent al programa mallador, ICEM.

Quan executem el programa, ens apareix una pantalla principal, on podem trobar totes les eines necessàries per tal de modificar la geometria, el mallat, les condicions de contorn, etc. En la figura 45, es mostra aquesta pantalla.

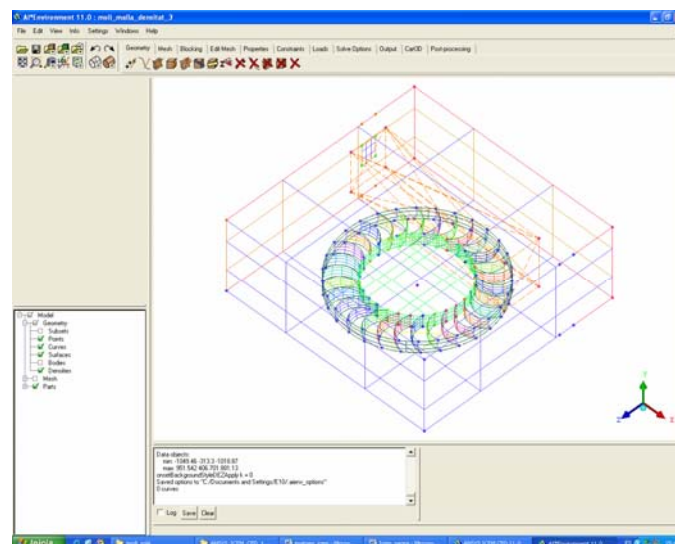


Figura 45: Visualització de la pantalla de treball de l'ICEM.

Primerament cal importar la geometria que es vol mallar. En el nostre cas provenia d'un dibuix en 3D de SOLID WORKS, en format ".iges".

Cal destacar que la nostre geometria estava formada per diferents volums i per tal de facilitar la simulació només utilitzàvem superfícies, per això cal realitzar un procés d'eliminar tots els volums convertint-los en línies i superfícies, emprant les eines que es veuen en la figura 46.

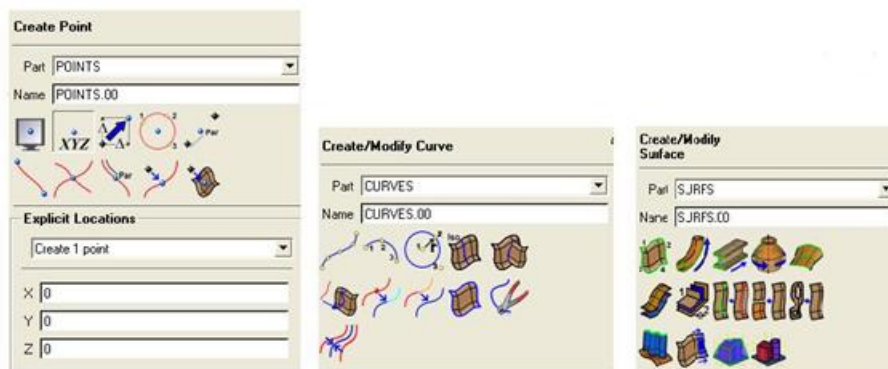


Figura 46: Mostra de les diferents eines utilitzades per tractar la geometria.

Aquestes eines també ens serveixen per definir el "túnel" que envolta el rodet. Creant nous punts, línies i superfícies directament sobre la geometria existent.

En segon lloc cal definir totes les superfícies per tal de distingir els diferents elements. Aquest procés ens permet numerar tots els àleps i definir-los com a elements individuals.

També cal crear els volums que hi ha dins la nostra geometria. Aquest és el cas del volum "aire" que és el volum que conté el túnel. Per tal d'aconseguir un mallat ben definit en la zona dels àleps cal crear uns volums més petits entre àlep i àlep, d'aquesta manera facilitem la homogeneïtat de les unions entre els àleps i l'anella de ferro.

Posteriorment cal escollir el tipus i dimensió d'element que volem utilitzar per mallar la nostre geometria. En el cas de les superfícies utilitzarem triangles i en els volums tetràedres. La dimensió màxima d'aquests elements depèn directament de la dimensió de la geometria a mallar. Per això utilitzarem una mida més petita en la zona dels àleps i del rodet, i una dimensió més gran per el volum general del túnel. Aquestes

diferències es poden apreciar en la figura 47, la dimensió màxima de l'element està expressada en mil·límetres.

Part	Prism	Hexa Core	Max Size	Height	Height Ratio	Num Layers	Tetra Size Ratio	Tetra Width	Min Size Limit	Max Deviation	Int'l wall	Split wall
AIRE_ALEP_1,1	☐		15	0	0	0	0	0	0	0	☐	☐
ALEP_3	☐		15	0	0	0	0	0	0	0	☐	☐
ALEP_5	☐		15	0	0	0	0	0	0	0	☐	☐
ALEP_7	☐		15	0	0	0	0	0	0	0	☐	☐
ALEP_9	☐		15	0	0	0	0	0	0	0	☐	☐
ALEP_11	☐		15	0	0	0	0	0	0	0	☐	☐
ALEP_13	☐		15	0	0	0	0	0	0	0	☐	☐
ALEP_15	☐		15	0	0	0	0	0	0	0	☐	☐
ALEP_17	☐		15	0	0	0	0	0	0	0	☐	☐
ALEP_19	☐		15	0	0	0	0	0	0	0	☐	☐
ALEP_21	☐		15	0	0	0	0	0	0	0	☐	☐
ALEP_23	☐		15	0	0	0	0	0	0	0	☐	☐
ALEP_25	☐		15	0	0	0	0	0	0	0	☐	☐
ALEP_27	☐		15	0	0	0	0	0	0	0	☐	☐
ALEP_29	☐		15	0	0	0	0	0	0	0	☐	☐
ANELLA_FERRO	☐		15	0	0	0	0	0	0	0	☐	☐
DENS	☐		0	0	0	0	0	0	0	0	☐	☐
GEOM	☐		30	0	0	0	0	0	0	0	☐	☐

☒ Show size params using rel size
☐ Apply inflation parameters to curves
☐ Remove inflation parameters from curves

Please Note that highlighted families have at least one blank field because not all entities in that family have identical entity parameters.

Apply Dimiss

Figura 47: Taula informativa on es mostra les dimensions del diferents elements.

Finalment podem donar l'ordre de mellar, que requereix uns minuts de càlcul, on l'ordinador calcula el nombre d'elements i genera tot l'entramat. En la figura 48 s'observa el resultat obtingut.

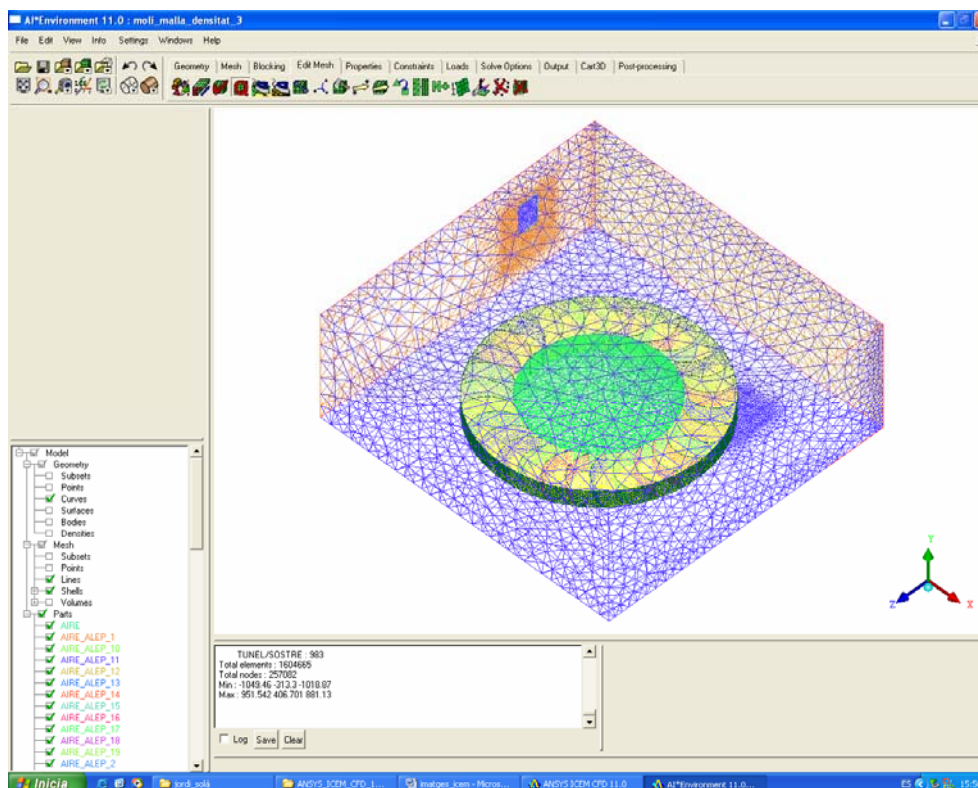


Figura 48: Visualització de la malla, 1.604.665 elements.

Per tal de visualitzar, de manera més precisa, els elements en cada zona podem utilitzar dos tipus de visualitzacions: superfícies (figura 49) i plans de tall (figura 50).

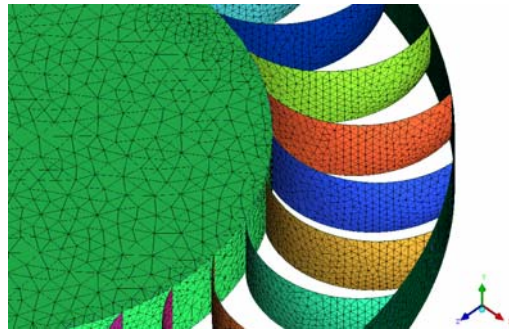


Figura 49: Visualització dels elements generats a la zona dels àleps i rodet, amb una dimensió màxima d'element de 15 mm.

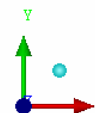
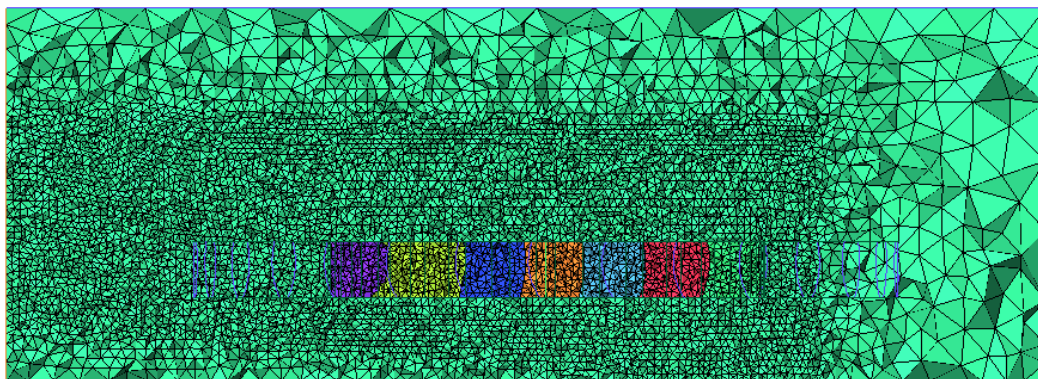
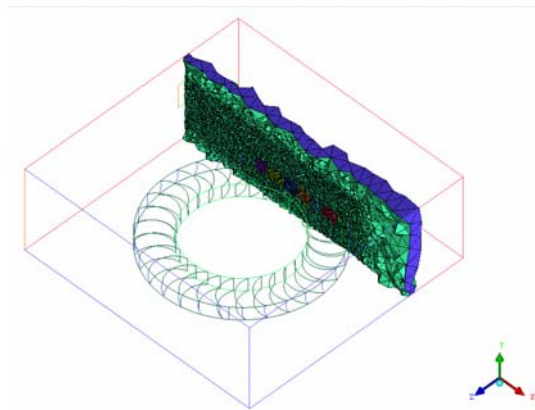


Figura 50: Visualització d'un pla de tall on s'aprecia la diferència entre el mallat del volum general i el mallat entre àleps.

Per tal de d'augmentar la qualitat del mallat, “planxarem” la malla, d'aquesta manera eliminarem possibles vèrtex innecessaris i suavitzarem els contorns.

Finalment només ens resta definir les diferents superfícies. Tots els elements és consideren sòlids (parets) menys l'entrada d'aigua que la definirem coma a punt d'entrada de velocitat i el sostre que serà el punt de sortida. En la figura 51, observem els diferents elements que hem definit i la seva tipologia.

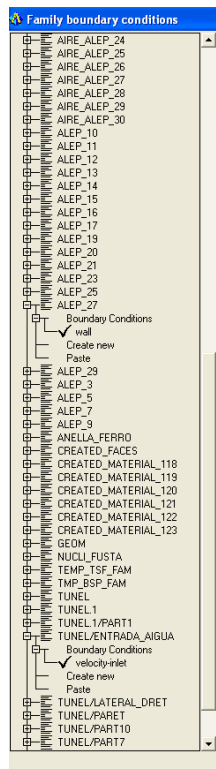


Figura 51: Visualització dels diferents elements que conformen la nostre geometria i la seva característica física.

Només ens manca, adequar l'arxiu de sortida, al format que ens permeti treballar amb el programa de simulació que utilitzem, que en aquest cas és l'STAR-CCM+.

ANNEX B: SIMULACIÓ CFD AMB STAR CCM+

B.1. STAR CCM+

En aquest annex descriurem els passos principals que hem seguit a l'hora de simular els diferents casos analitzats, utilitzant un programa de dinàmica de fluids computacional (CFD). El programa de simulació que s'ha utilitzat en aquest projecte és l'STAR CCM+.

En la figura 52, podem veure la icona que hem de seleccionar en l'escriptori del nostre ordinador de l'aula d'informàtica que actualment disposa l'Àrea de Mecànica de Fluid del Departament d'Enginyeria Mecànica i de la Construcció Industrial de la Universitat de Girona.



Figura 52: Icona corresponent al programa de simulació, STAR CCM+.

Un cop executem el programa, el primer que cal fer és importar la malla que hem realitzant prèviament. La pantalla de treball que obtindrem és similar a la que s'observa en la figura 53.

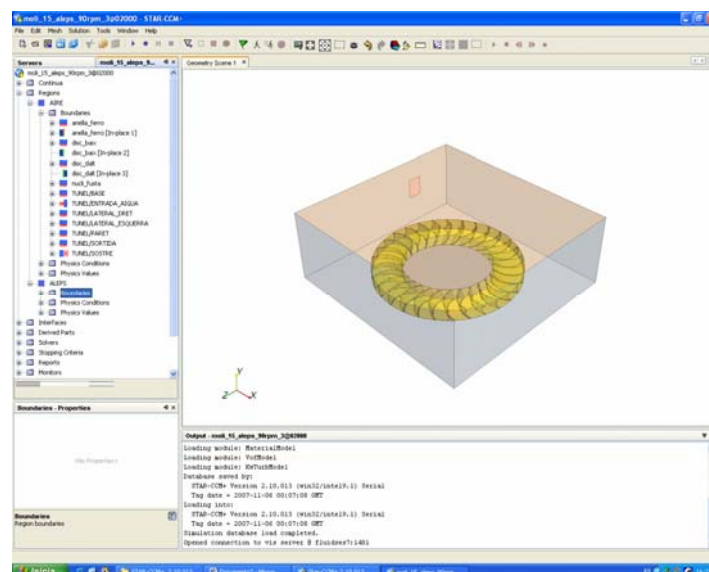


Figura 53: Visualització de la pantalla de treball de l'STAR CCM+

En segon lloc cal escollir els models físics que permeten reproduir les mateixes condicions que hi ha en la realitat. En la figura 54, es pot veure tots els models que hem seleccionat.

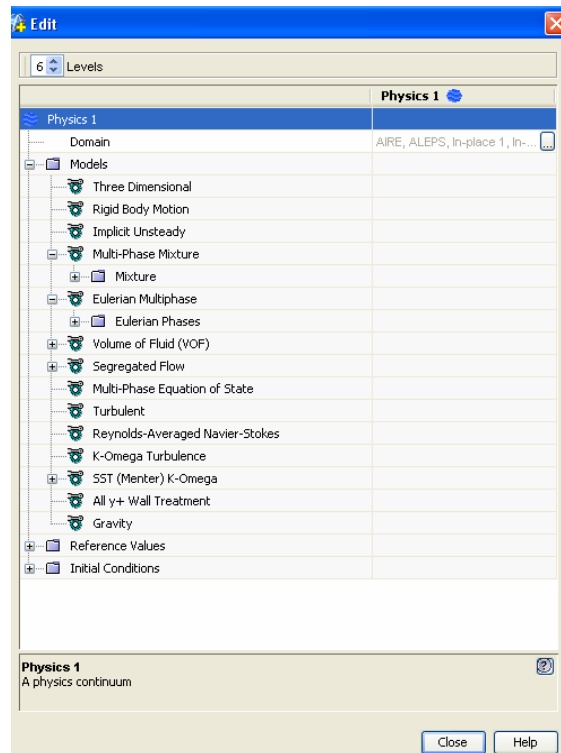


Figura 54: Models escollits per tal de simular amb el màxim rigor les característiques reals.

Per altre banda definirem els paràmetres de càlcul, que en aquest cas consistiran en 5 iteracions repetitives i un salt de temps de 0,002 s (figura 55)

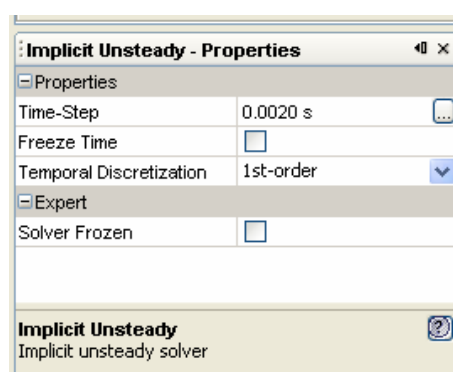


Figura 55: Escaló de temps de 0,002 s per cada 5 iteracions.

Per tal d'obtenir resultats, cal definir quins paràmetres es volen calcular. En el nostre cas calcularem el sumatori de la força que fa el doll d'aigua sobre les superfícies dels

diferents àleps i l'anella de ferro, en les direccions x, y i z. Al mateix temps calcularem el moment produït per aquestes forces. Aquest resultats els podem obtenir en forma de gràfica x-y o en forma de taula de valors, fet molt útil a l'hora de tractar aquestes dades amb una fulla de càlcul.

Per poder visualitzar resultats gràfics cal crear els plans que es volen estudiar. D'aquesta manera obtindrem dues seccions molt significatives, una talla longitudinalment el doll d'aigua i l'altre transversalment el rodet. Això es pot observar en la figura 56.

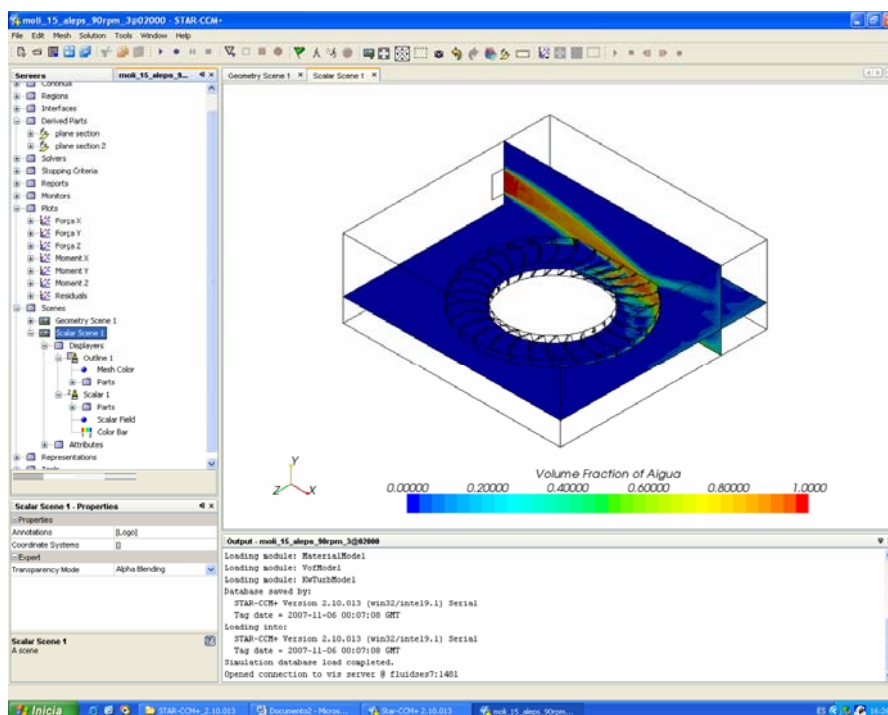


Figura 56: Visualització gràfica dels resultats, mitjançant dos plans de tall.

Finalment només cal iniciar la simulació i esperar els resultats. Per tal d'assegurar la recollida de la informació periòdicament, programem còpies de seguretat cada 20 iteracions, amb un nombre màxim de dues còpies emmagatzemades en la memòria. D'aquesta manera en cas d'incident podem reiniciar la simulació des de l'últim arxiu guardat.

ANNEX C: RESULTATS DEL RODET CLÀSSIC

C.1. INTRODUCCIÓ

Aquest annex conté un recull dels resultats gràfics i numèrics obtinguts durant la simulació del rodet clàssic.

Cal destacar que s'han realitzat quatre simulacions diferents, corresponents a les quatre velocitats indicades en apartats anteriors. Això comporta la obtenció de nombrosos resultats gràfics i numèrics, que degut a la seva extensió no mostrarem en la seva totalitat.

Els resultats numèrics no es mostraran en aquest annex, ja que es veuen recollits en els corresponents apartats de resultats de cada rodet. Paral·lelament a la obtenció dels valors de la força x i moment y , s'han obtingut els resultats de les forces i moments corresponents a les altres direccions, menyspreant el seu valor per ser poc significatius en el sistema que nosaltres estudiem.

A continuació mostrarem gràfics corresponents a la fracció de volum d'aigua en els quatre casos de velocitats i en les dues seccions analitzades, (1 equival a tot aigua, 0 equival a tot aire), figura 57 i 58.

En segon lloc podrem veure el gràfic corresponent al diagrama de pressions del rodet clàssic girant a 90 rpm (figura 59).

Finalment mostrarem un gràfic vectorial on es pot observar els diferents vectors de velocitat corresponents a la velocitat angular de 90 rpm (figura 60).

C.2. FRACCIÓ DE VOLUM D'AIGUA

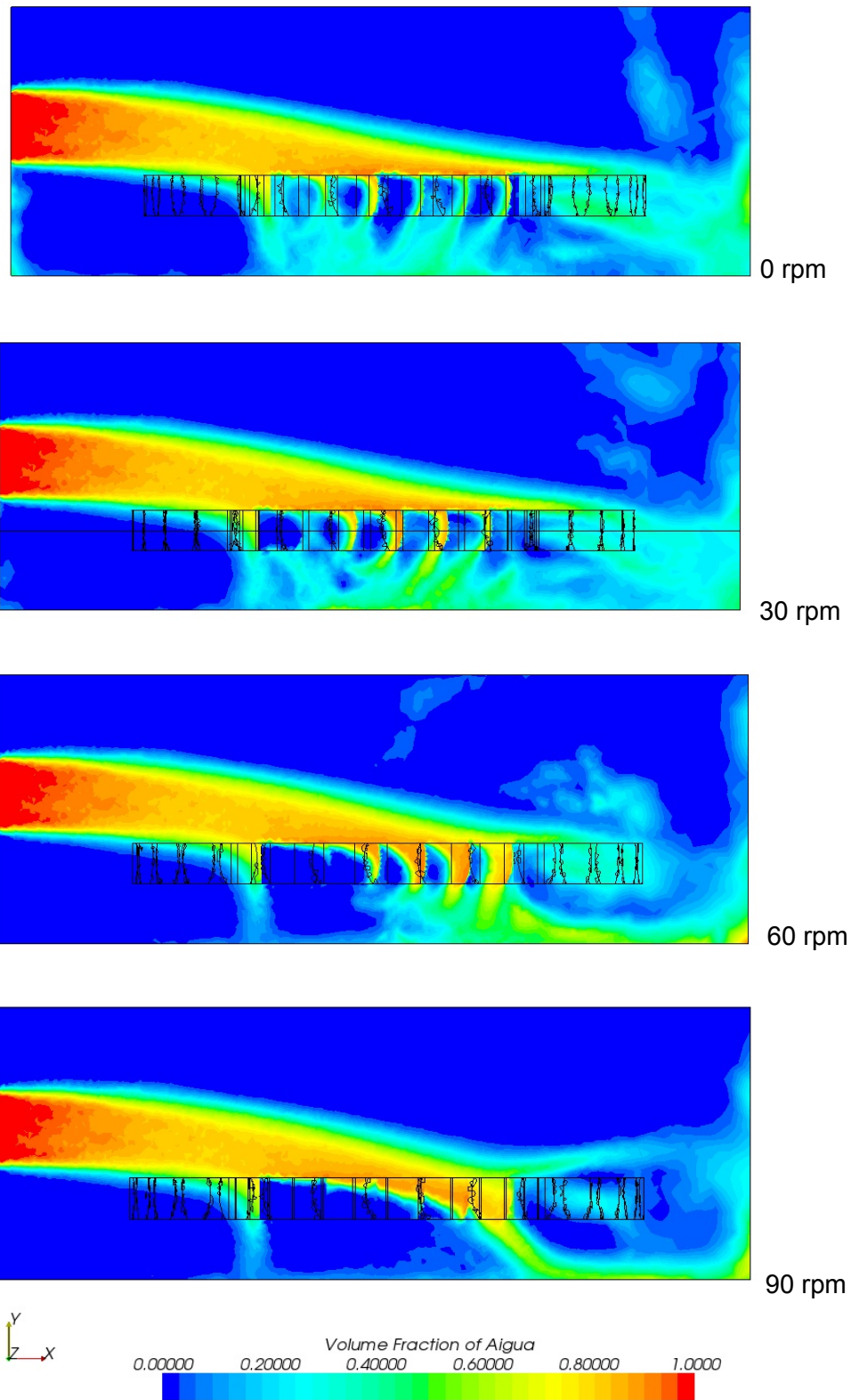


Figura 57: Detall de la trajectòria del doll d'aigua entre àlep i àlep en funció de la velocitat angular.

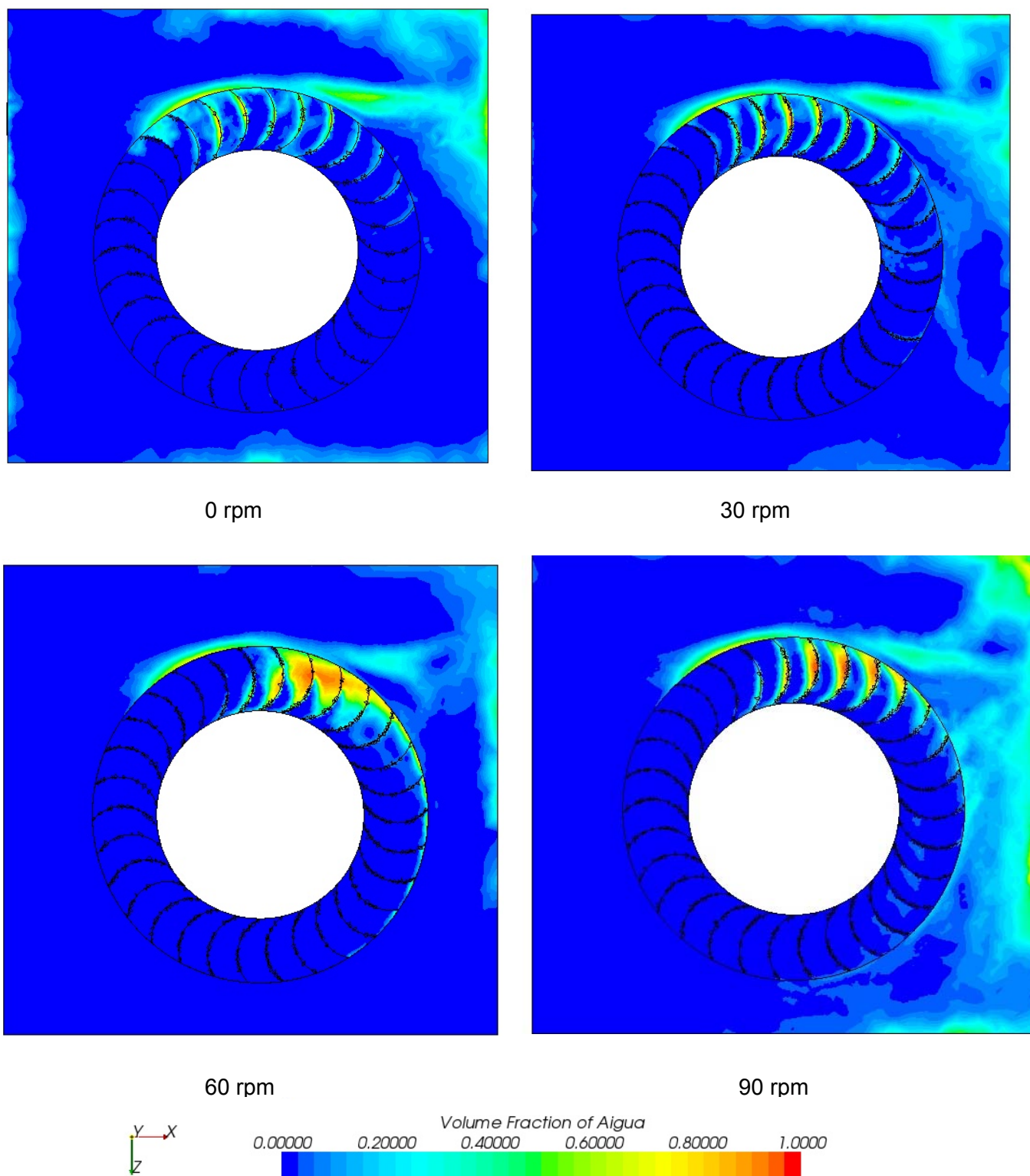


Figura 58: Detall de l'aigua empalada per els àleps en funció de la velocitat angular.

C.3. PRESSIÓ

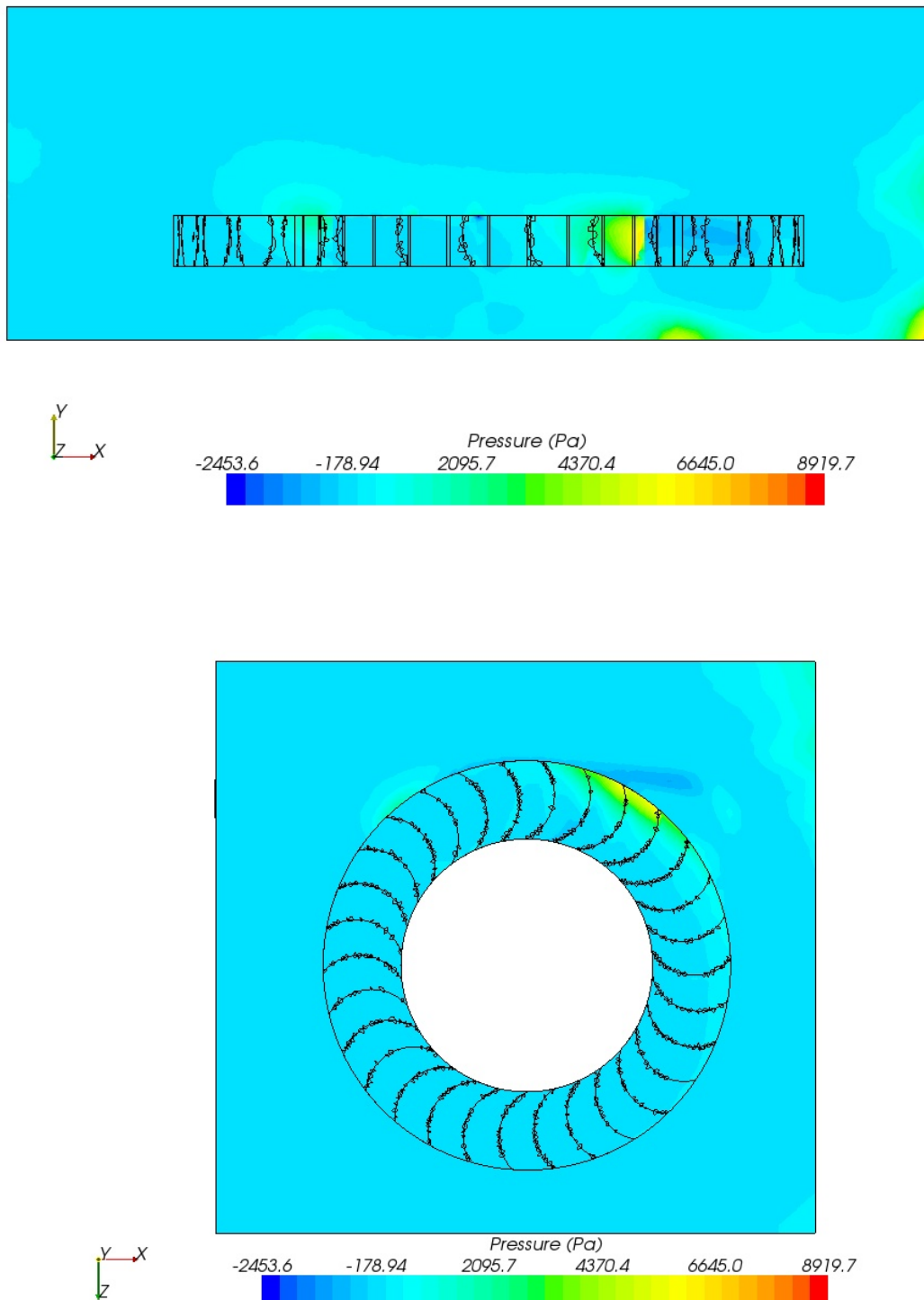


Figura 59: Gràfics de pressió, diferenciant els punts de màxima pressió gràcies a una escala gradual de color.

C.4. VECTORS VELOCITAT

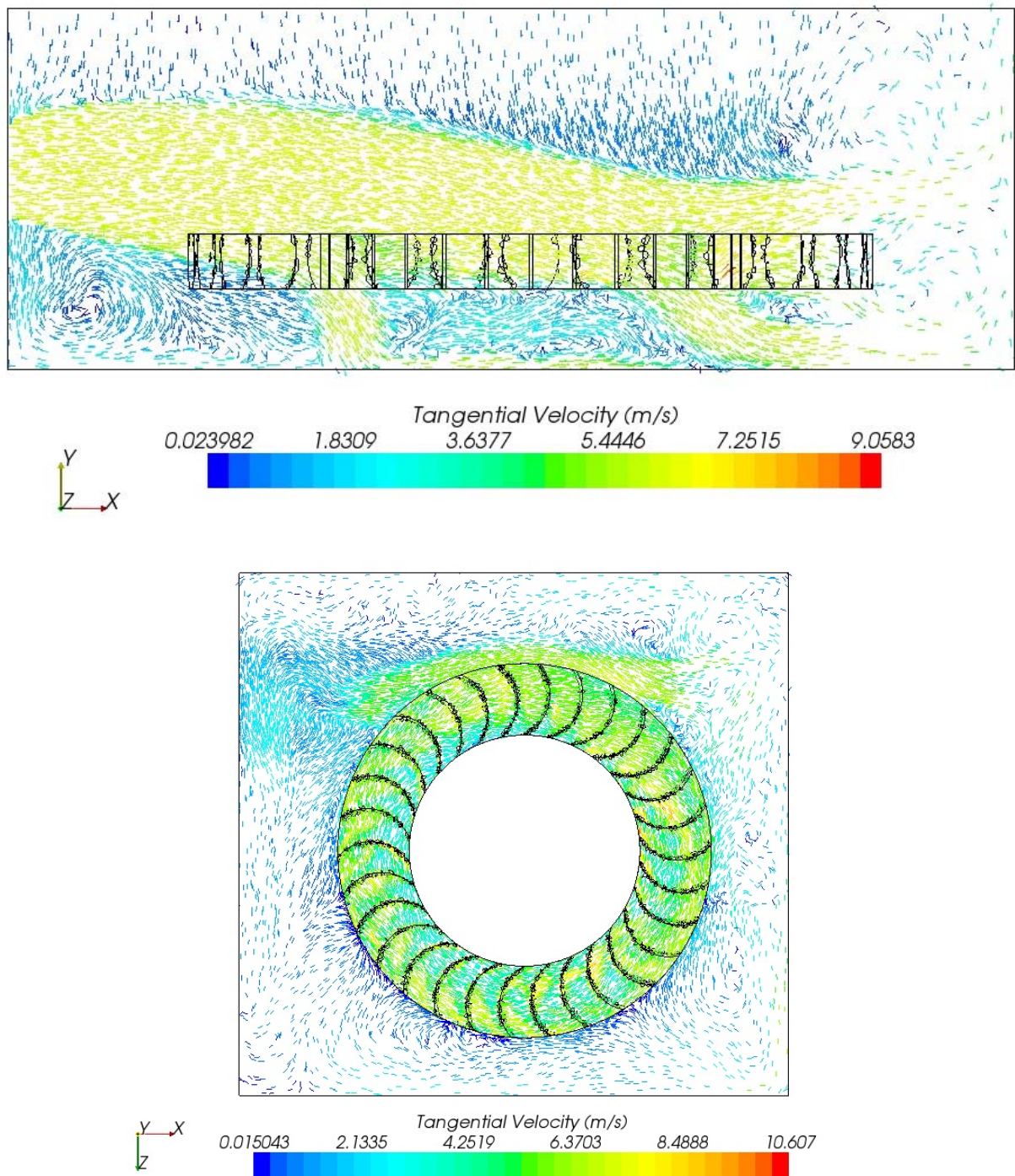


Figura 60: Projectió de la velocitat sobre els plans seleccionats, apreciament la direcció del fluid en cada zona, mitjançant una escala de colors.

ANNEX D: RESULTATS DEL RODET MODIFICAT 1

D.1. INTRODUCCIÓ

Aquest annex recull els mateixos resultats gràfics que l'annex anterior amb la diferència que aquests corresponent al rodet modificat 1, que està format per 15 àleps.

A continuació mostrarem gràfics corresponents a la fracció de volum d'aigua en els quatre casos de velocitats i en les dues seccions analitzades, (1 equival a tot aigua, 0 equival a tot aire), figura 61 i 62.

En segon lloc podrem veure el gràfic corresponent al diagrama de pressions del rodet clàssic girant a 90 rpm (figura 63).

Finalment mostrarem un gràfic vectorial on es pot observar els diferents vectors de velocitat corresponents a la projecció d'aquesta, sobre els nostres plans de visió a una velocitat angular de 90 rpm (figura 64).

D.2. FRACCIÓ DE VOLUM D'AIGUA

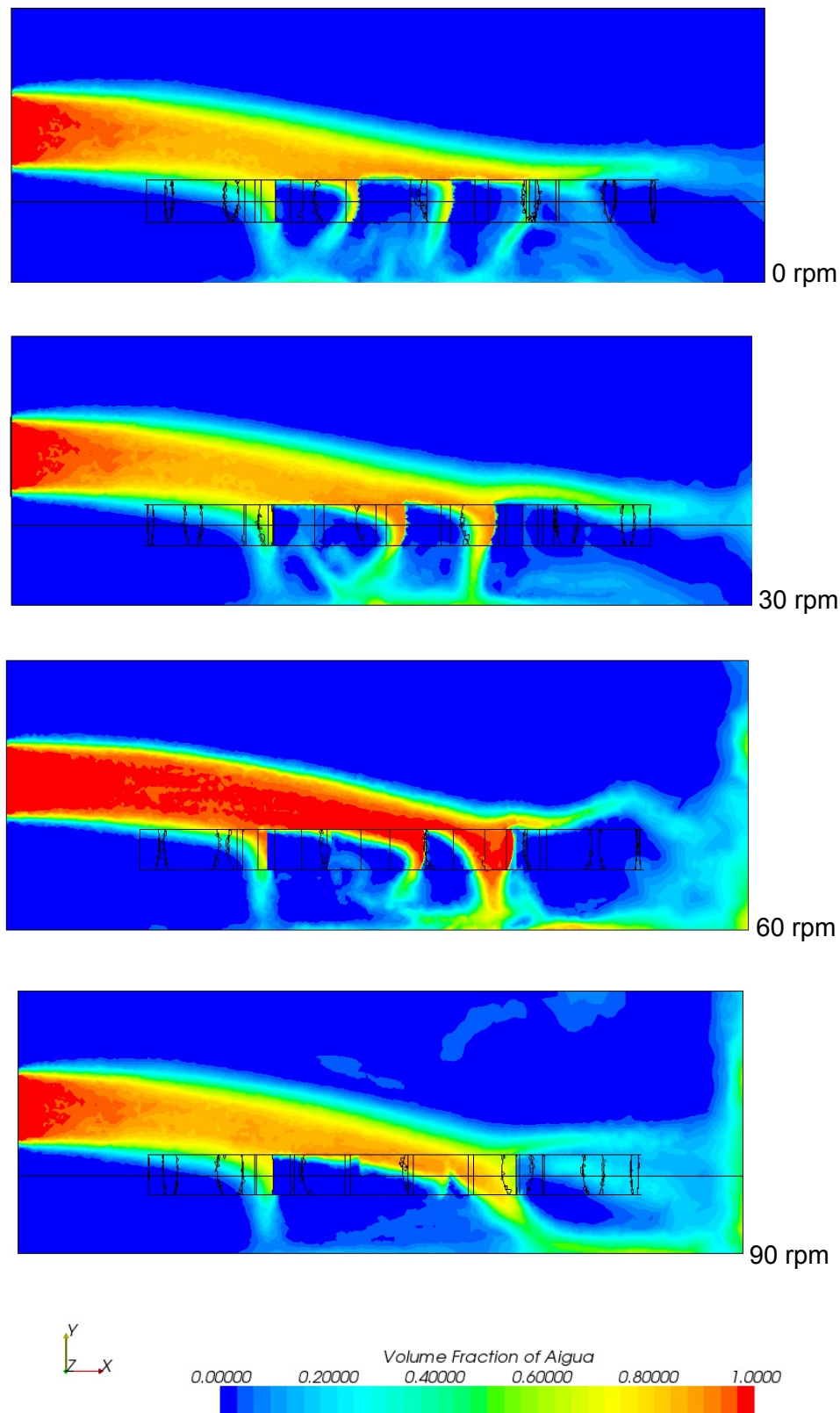


Figura 61: Detall de la trajectòria del doll d'aigua entre àlep i àlep en funció de la velocitat angular.

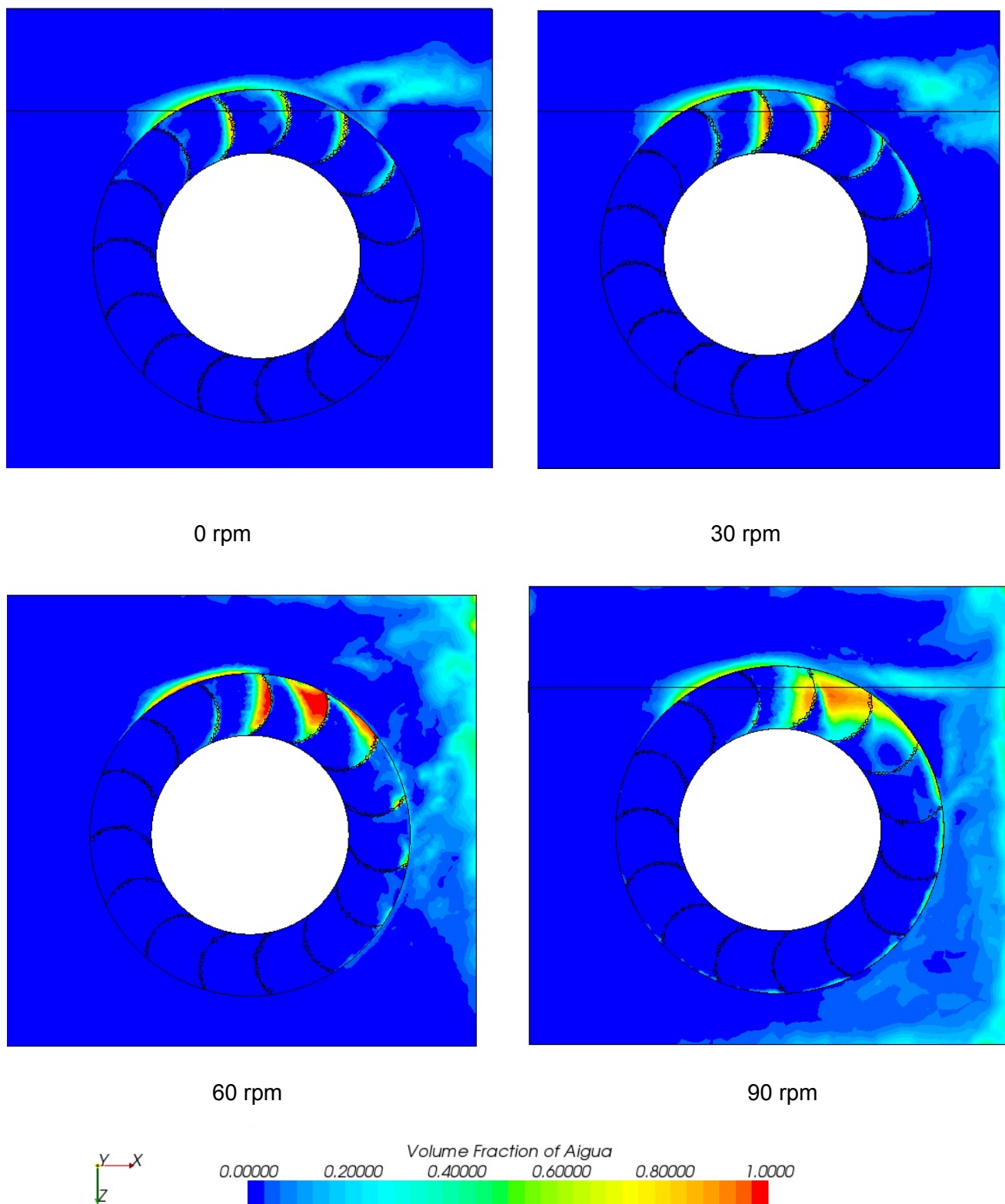


Figura 62: Detall de l'aigua empalada per els àleps en funció de la velocitat angular.

D.3. PRESSIÓ

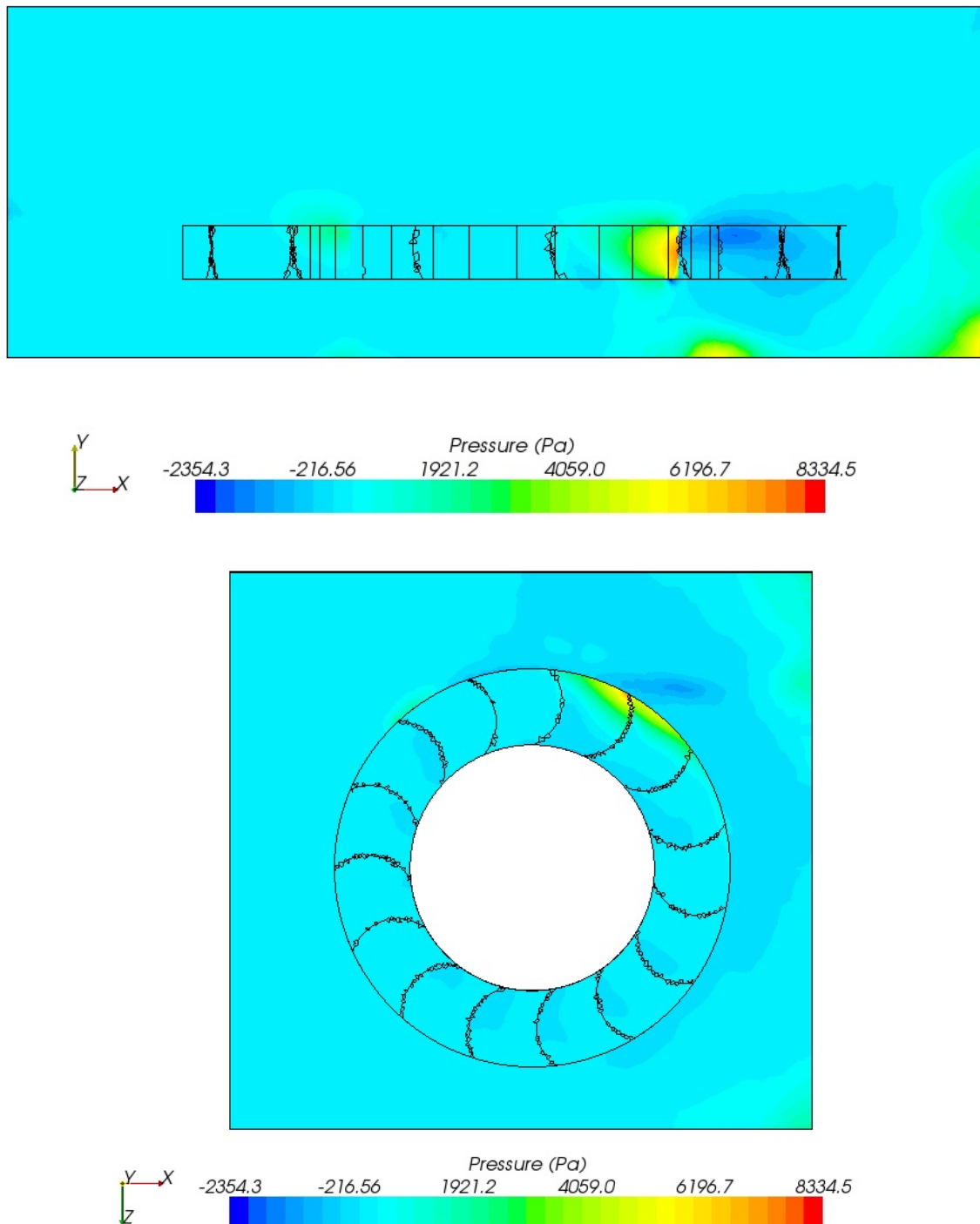


Figura 63: Gràfics de pressió, diferenciant els punts de màxima pressió gràcies a una escala gradual de color.

D.4. VECTORS VELOCITAT

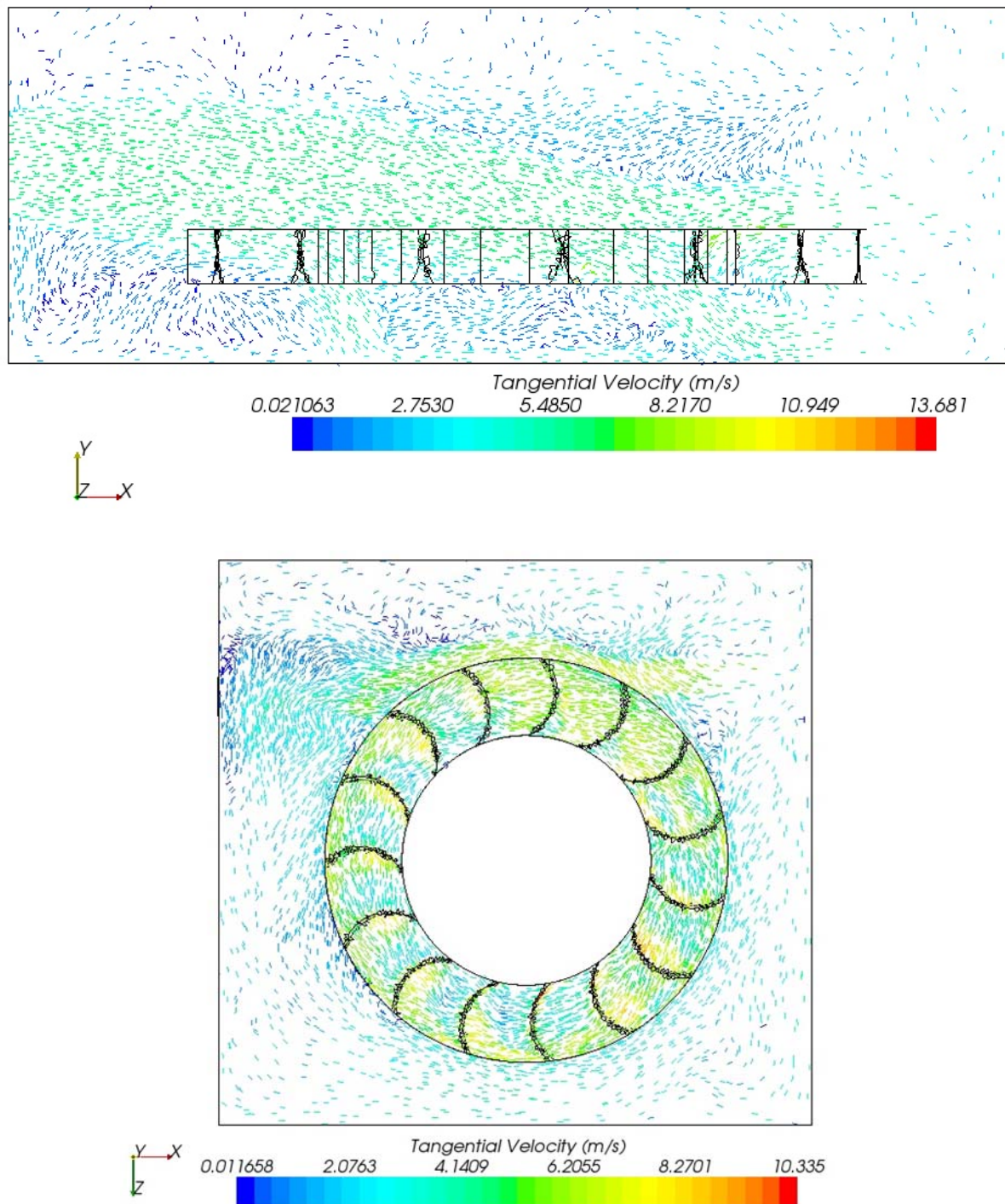


Figura 64: Projectió de la velocitat sobre els plans seleccionats, apreciint la direcció del fluid en cada zona, mitjançant una escala de colors.

ANNEX E: RESULTATS DEL RODET MODIFICAT 2

E.1. INTRODUCCIÓ

Aquest annex recull els mateixos resultats gràfics que l'annex anterior amb la diferència que aquests corresponent al rodet modificat 2, que està format per 30 àleps amb una inclinació de 15° respecte la vertical.

A continuació mostrarem gràfics corresponents a la fracció de volum d'aigua en els quatre casos de velocitats i en les dues seccions analitzades, (1 equival a tot aigua, 0 equival a tot aire), figura 65 i 66.

En segon lloc podrem veure el gràfic corresponent al diagrama de pressions del rodet clàssic girant a 90 rpm (figura 67).

Finalment mostrarem un gràfic vectorial on es pot observar els diferents vectors de velocitat corresponents a la projecció d'aquesta, sobre els nostres plans de visió a una velocitat angular de 90 rpm (figura 68).

E.2. FRACCIÓ DE VOLUM D'AIGUA

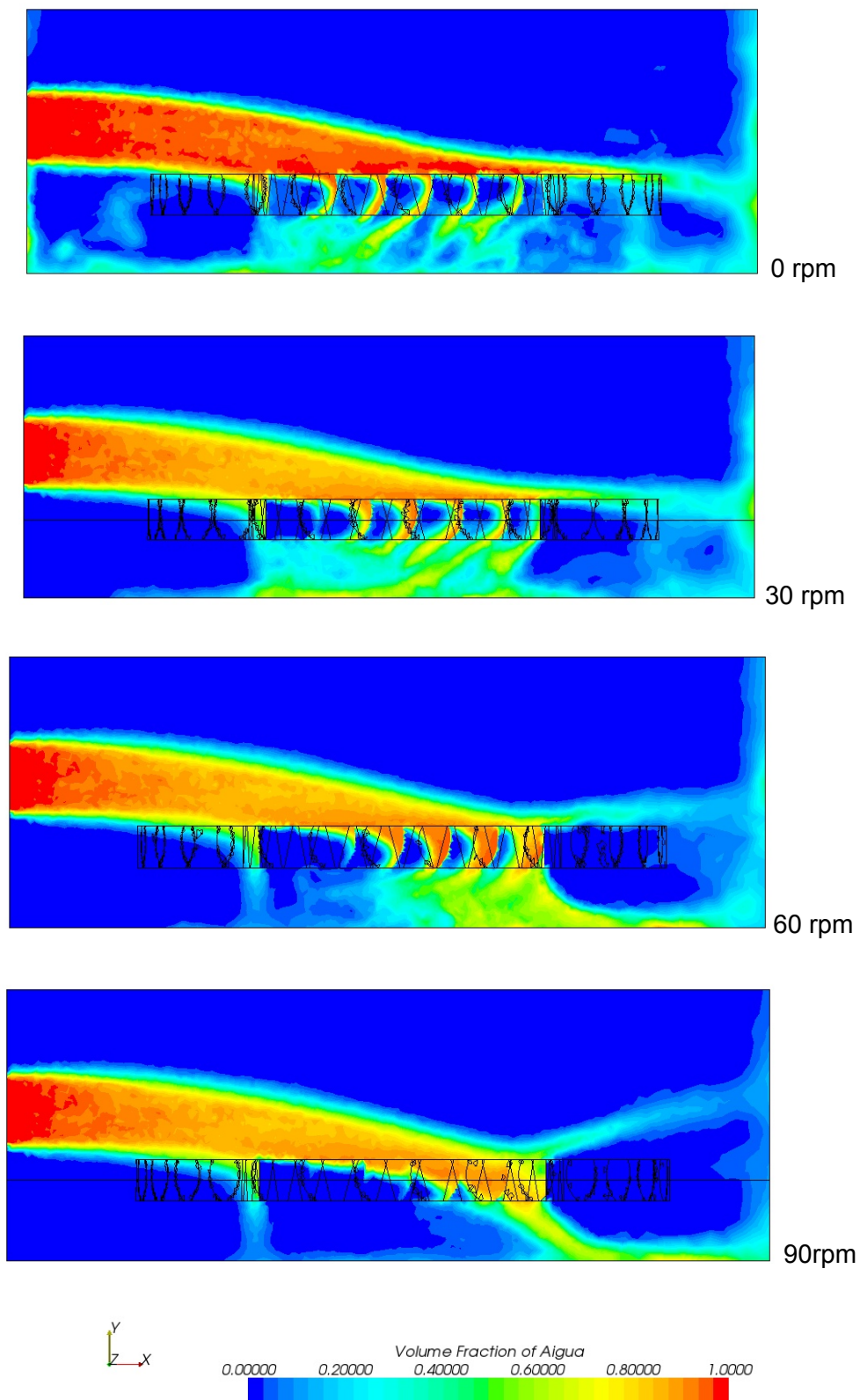


Figura 65: Detall de la trajectòria del doll d'aigua entre àlep i àlep en funció de la velocitat angular.

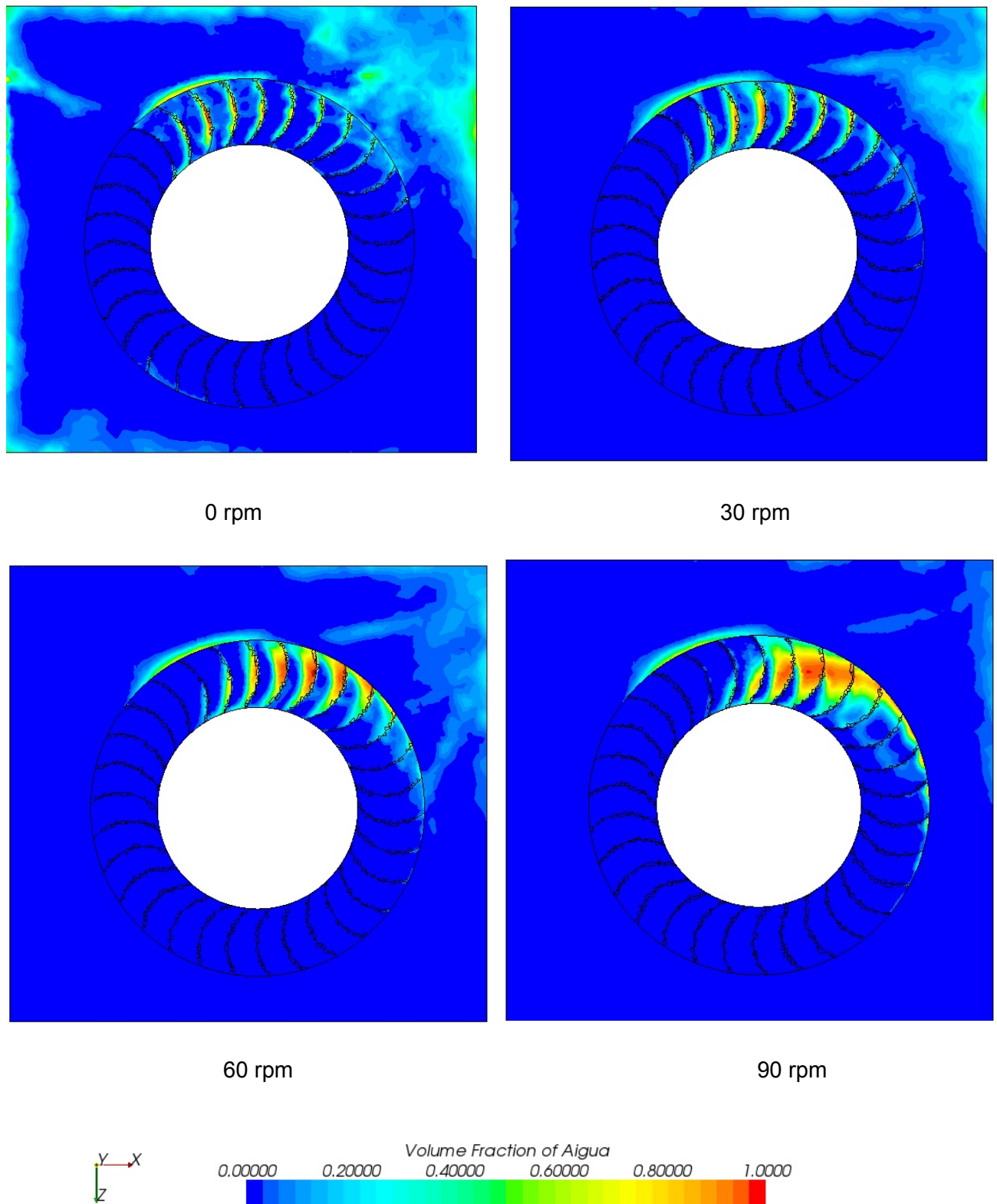


Figura 66: Detall de l'aigua empalada per els àleps en funció de la velocitat angular.

E.3. PRESSIÓ

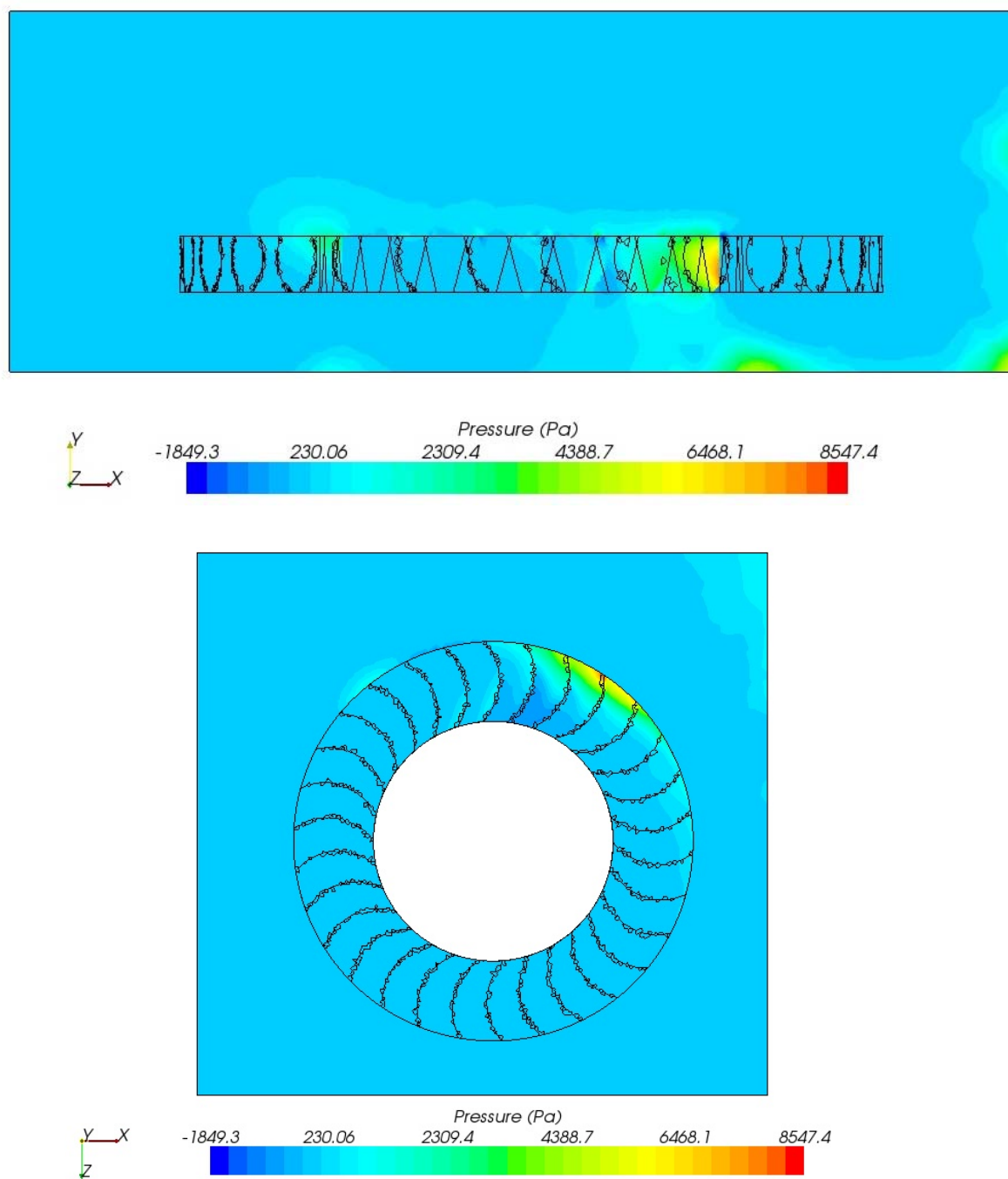


Figura 67: Gràfics de pressió, diferenciant els punts de màxima pressió gràcies a una escala gradual de color.

E.4. VECTORS VELOCITAT

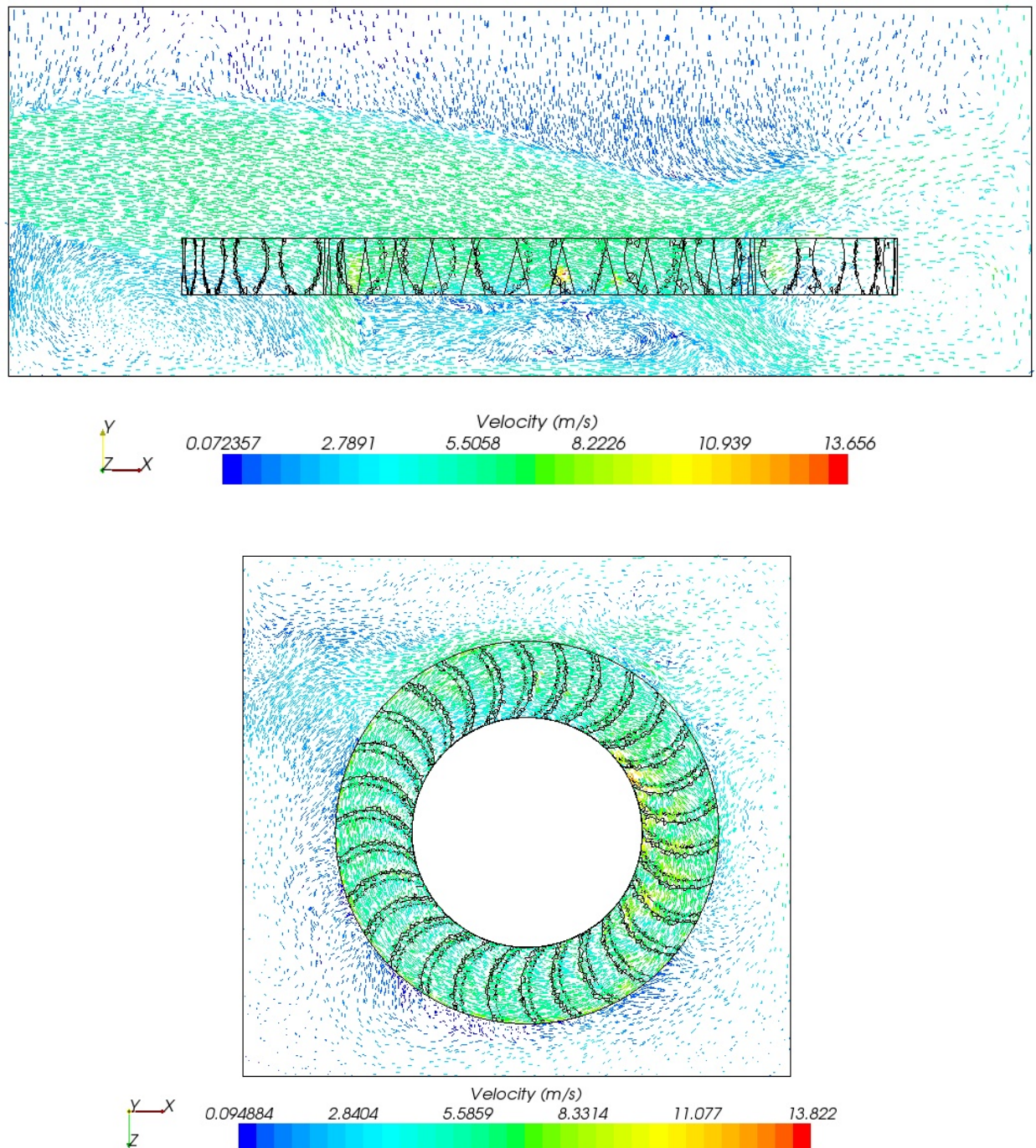


Figura 68: Projectió de la velocitat sobre els plans seleccionats, apreciament la direcció del fluid en cada zona, mitjançant una escala de colors.

ANNEX F: ESQUEMES DE DISSENY

A continuació es mostra la geometria dels tres rodets analitzats en aquest projecte. Les cotes generals són les mateixes per els tres rodets, només varia el nombre d'àleps i la seva inclinació.

Aquestes geometries estan simplificades, per tal de facilitar la simulació virtual. S'han eliminat elements poc significatius per el seu comportament hidràulic.

F.1. RODET CLÀSSIC

Rodet clàssic utilitzat en els molins de l'època. Està format per 30 àleps amb una inclinació de 5° cada un, respecte la vertical. En la figura 69, es mostra les principals característiques.

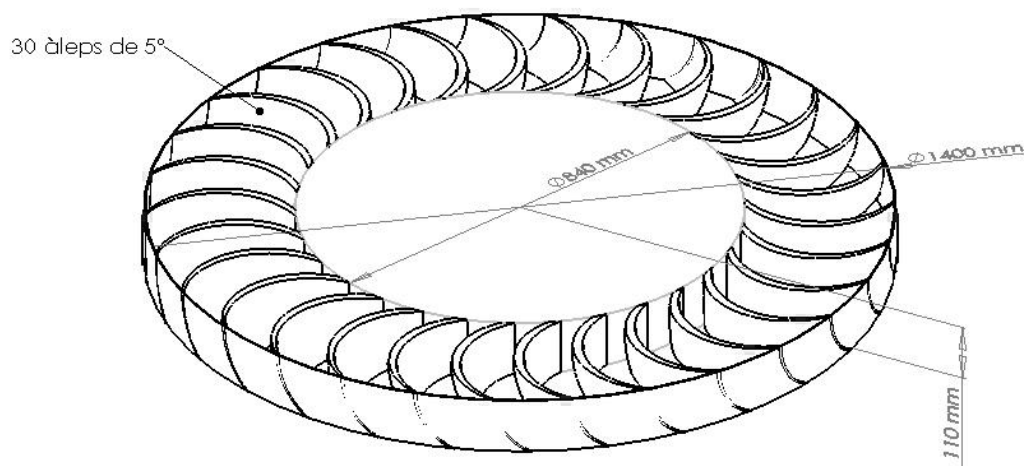


Figura 69: Rodet clàssic de 30 àleps.

En la figura 70, podem veure el detall d'un dels àleps del rodet clàssic, amb una inclinació respecte la vertical de 5° .

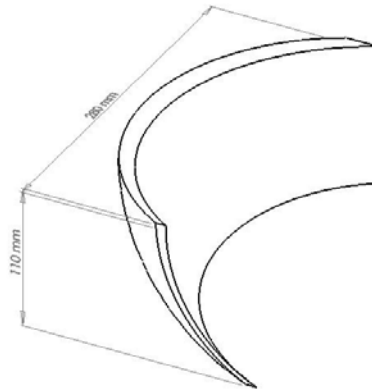


Figura 70: Detall d'un àlep del rodet clàssic.

F.2. RODET MODIFICAT 1: REDUCCIÓ D'ÀLEPS

Rodet idèntic a l'anterior amb la eliminació de la meitat dels àleps. En la figura 71, es pot observar el rodet clàssic amb només 15 àleps.

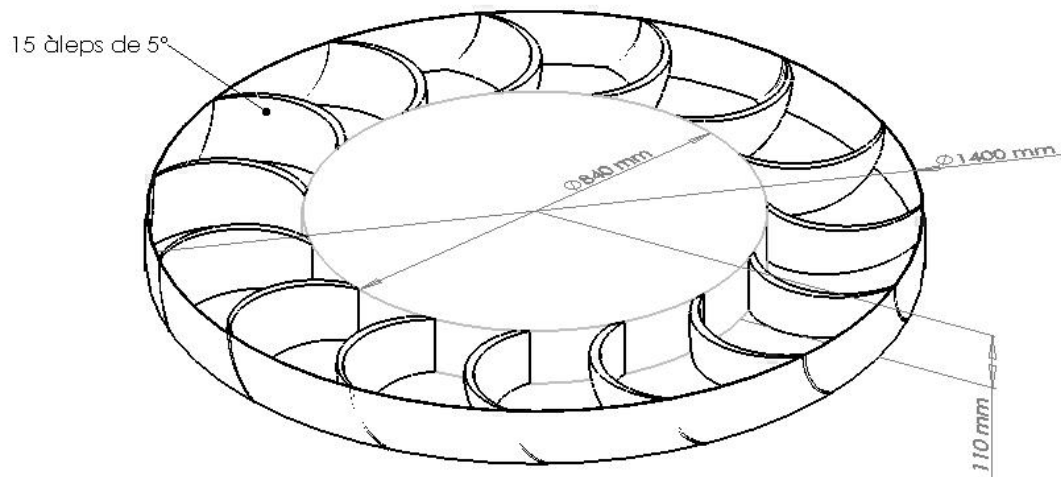


Figura 71: Rodet clàssic de 15 àleps.

F.3. RODET MODIFICAT 2: VARIACIÓ EN L'ORIENTACIÓ DELS ÀLEPS

En el tercer cas s'ha dissenyat un rodet amb 30 àleps, molt similar al rodet clàssic, amb la variació de l'inclinació dels àleps. Passant d'una inclinació de 5° en el rodet clàssic a 15° del rodet modificat. En la figura 72, es pot observar que les dimensions generals són les mateixes que el rodet clàssic.

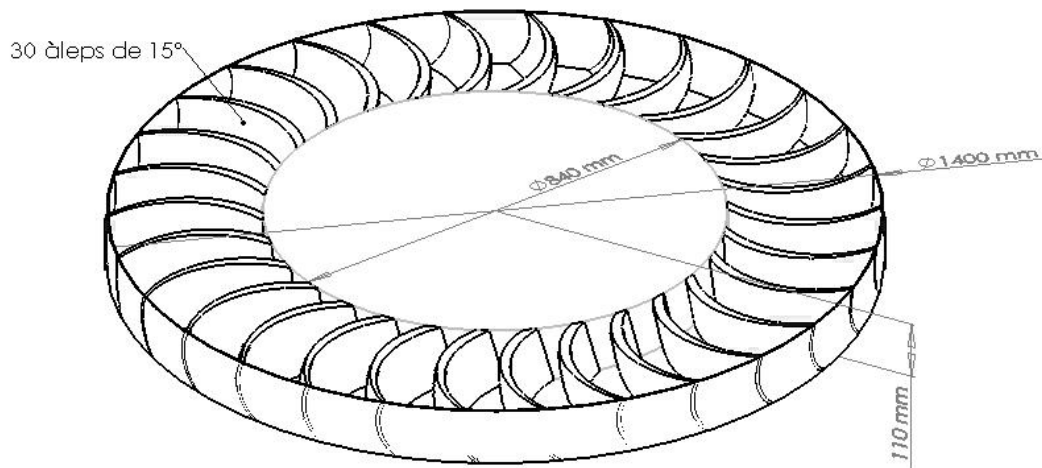


Figura 72: Rodet de 30 àleps amb una inclinació de 15° .

Finalment en la figura 73, es mostra un detall de l'àlep inclinat 15° . Cal destacar que la superfície de l'àlep té forma de "cullera" i és molt difícil observar la variació d'inclinació a simple vista, ja que l'angle que variem és respecte el centre de la superfície corba que té la cara frontal.

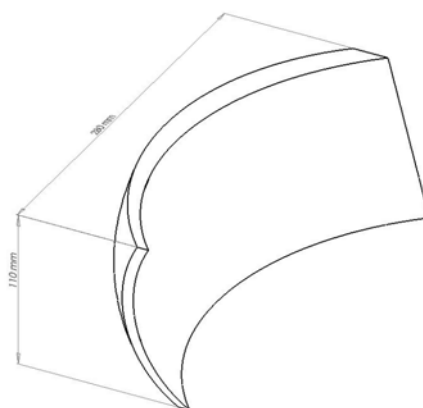


Figura 73: Detall de l'àlep modificat a 15° .