



EPS

Escola Politècnica
Superior

Projecte/Treball Fi de Carrera

Estudi: Enginyeria Industrial. Pla 2002

Títol: Desenvolupament d'una metodologia de simulació mitjançant programari CFD per a la optimització d'agitadors

Document: Memòria

Alumne: Francesc Garrido Castells

Director/Tutor: Lino Montoro Moreno

Departament: Eng. Mecànica i de la Construcció Industrial

Àrea: Mecànica de Fluids

Convocatòria (mes/any): Maig 2009

ÍNDEX

MEMÒRIA

| | |
|---|----|
| 1. INTRODUCCIÓ | 4 |
| 1.1. Antecedents..... | 5 |
| 1.2. Objecte | 5 |
| 1.3. Especificacions i abast..... | 5 |
| 2. FONAMENTS D'AGITACIÓ FLUÍDICA..... | 6 |
| 3. VALIDACIÓ DE LA SIMULACIÓ | 11 |
| 3.1. Generació de la geometria | 13 |
| 3.2. Realització dels volums finals..... | 16 |
| 3.3. Unió | 17 |
| 3.4. Definició de les diferents zones..... | 18 |
| 3.5. Mallat dels volums..... | 19 |
| 3.6. Simulació | 22 |
| 3.6.1 Pre – procés | 23 |
| 3.6.2 Solver | 27 |
| 3.6.3 Post – procés..... | 29 |
| 3.7. Resultats..... | 30 |
| 3.7.1 Impulsor de paleta | 30 |
| 3.7.2 Impulsor de turbina plana | 34 |
| 3.7.3 Impulsor de turbina inclinada..... | 38 |
| 3.7.4 Impulsor de turbina de disc | 42 |
| 3.7.5 Sisena part de l'impulsor de turbina de disc..... | 46 |
| 3.8. Comparació de potències..... | 49 |
| 3.9. Conclusions | 51 |
| 4. DESCRIPCIÓ DE LA SOLUCIÓ | 52 |
| 4.1. Impulsor de turbina de disc amb 3 deflectors..... | 53 |
| 4.2. Impulsor de turbina de disc amb 3 deflectors <i>off – wall</i> | 60 |

| | |
|--|----|
| 4.3. Nou disseny..... | 63 |
| 4.4. Nou disseny amb 2 impulsors | 68 |
| 4.5. Nou disseny amb 2 impulsors i silicona..... | 79 |
| 5. RESUM DEL PRESSUPOST | 82 |
| 6. CONCLUSIONS | 83 |
| 7. RELACIÓ DE DOCUMENTS | 85 |
| 8. BIBLIOGRAFIA | 86 |

ANNEXOS

| | |
|---|-----|
| ANNEX A. DEFLECTORS | 89 |
| A.1. Funció dels deflectors | 90 |
| A.2. Tipus de deflectors | 90 |
| A.3. Dimensionament | 91 |
| A.4. Tancs sense deflectors | 92 |
| A.5. Càlcul dels deflectors del projecte | 92 |
| ANNEX B. DIMENSIONAMENT DE L'AGITADOR..... | 93 |
| B.1. Impulsor | 94 |
| B.2. Tanc..... | 94 |
| B.3. Dimensionat dels nous impulsors | 95 |
| ANNEX C. TURBULÈNCIA..... | 96 |
| C.1. Tipus de flux | 97 |
| C.2. Número de Reynolds | 97 |
| C.3. Número de Reynolds per operacions d'agitació | 98 |
| C.4. Determinació del règim experimental | 98 |
| ANNEX D. POTÈNCIA REQUERIDA EN AGITACIÓ..... | 101 |
| D.1. Variables que influeixen en la potència | 102 |
| D.2. Potència teòrica | 102 |
| D.3. Potència experimental | 105 |
| D.4. Potència computacional..... | 107 |

| | |
|---|-----|
| ANNEX E. AGITADOR HEIDOLPH | 112 |
| E.1. Estructura..... | 113 |
| E.2. Característiques tècniques del motor | 113 |
| E.3. Tríptic de l'agitador | 115 |
| E.4. Instruccions d'ús | 115 |
| ANNEX F. ADHESIU NURAL 92 | 124 |
| ANNEX G. SILICONA Q7-9120 | 127 |
| ANNEX H. TAULES | 129 |
| ANNEX I. PRESSUPOST | 131 |

1. INTRODUCCIÓ

L'origen dels agitadors es remunta a finals del segle XIX, concretament a l'any 1870, quan Walter Scott va dissenyar la primera batedora d'ous accionada per una manovella, però no va ser fins l'any 1907 que l'enginyer Herbert Johnson va inventar la primera batedora accionada per un motor elèctric (Figura 1.1). La base tecnològica era la d'un motor acoblat a un eix que a la seva punta incorporava un agitador que causava la mescla del rovell amb la clara de l'ou.



Figura 1.1. Primera batedora d'ous elèctrica
(<http://www.ideafinder.com/history/inventions/mixers.htm>).

No va ser fins més endavant que els agitadors van ser introduïts a la indústria. Un dels primers impulsors va ser la turbina Rushton inventada per J. H. Rushton l'any 1950 (Figura 1.2), un disc equipat amb 6 pales al seu voltant que s'usava sobretot per processos de fermentació, ja que causava la mescla gas – líquid. Aquest impulsor, també conegut com turbina de disc, és àmpliament utilitzat encara avui dia.

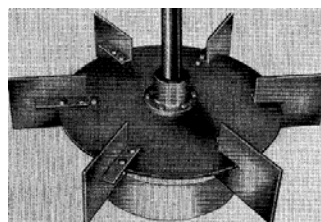


Figura 1.2. Turbina de disc (Rushton).

Durant tot el segle XX i fins a l'actualitat, s'han anat millorant molts aspectes en els agitadors, com ara la geometria dels impulsors, els motors, la posició de l'eix o les formes dels recipients, però el rerefons continua sent el mateix.

Els processos d'agitació tenen una importància cabdal en molts processos, ja que aconseguir mescles homogènies o agitacions efectives no és una tasca senzilla. Degut a aquesta importància, el camp dels processos d'agitació i mescla s'han fet amb un lloc

important en molts llibres d'enginyeria química, així com en d'altres relacionats amb la dinàmica de fluids.

La dinàmica de fluids computacional (CFD) és una eina que serveix per analitzar mitjançant ordinadors diferents problemes que involucren fluxos de fluids. Els programes de CFD usen expressions matemàtiques no lineals que defineixen les equacions fonamentals de fluxos i transport de calor en fluids. Aquestes equacions es resolten de forma iterativa amb complexos algorismes.

Els softwares de CFD no es van comercialitzar fins a principis dels anys 80. La introducció d'aquesta eina a la indústria va ser lenta ja que les empreses confiaven més en l'experimentació física, però actualment moltes de les empreses relacionada amb el món de la dinàmica de fluids, basen els seus dissenys amb les simulacions realitzades amb aquests programes, ja que s'ha demostrat que són fiables i estalvien temps i sobretot diners.

1.1. Antecedents

L'àrea de mecànica de fluids de la EPS té una àmplia experiència en simulacions amb programes de CFD, sobretot en els camps de l'aerodinàmica, la climatització i en bombes centrífugues, en canvi en simulacions d'agitació, l'experiència no és tan gran. Per això i perquè els agitadors tenen una gran importància en les indústries farmacèutica, química i alimentària, es va decidir aprofundir en aquesta àrea específica.

1.2. Objecte

L'objecte del present projecte és determinar els paràmetres òptims per realitzar una simulació fidedigna d'agitacions bifàsiques. El programari de CFD utilitzat serà l'Ansys CFX 11.0. Finalment, la metodologia obtinguda es farà servir per desenvolupar un nou disseny d'impulsor.

1.3. Especificacions i abast

El projecte inclou la validació experimental de la simulació al laboratori mitjançant la geometria de l'impulsor actual, així com d'altres d'estàndards. S'exclou del projecte el mecanitzat i la comprovació experimental de la geometria final.

2. FONAMENTS D'AGITACIÓ FLUÍDICA

Tot i que els termes mescla, agitació i emulsió sovint es confonen, tenen significats diferents. El primer és una distribució aleatòria, dins i a través una de l'altra, de dues o més fases inicialment separades. El segon, en canvi, es refereix al moviment induït d'un material en una manera específica, normalment en un patró circulatori dins algun tipus de contenidor (McCabe et al., 2002). Finalment, emulsió és quan un líquid (fase dispersant) conté petites partícules en suspensió d'un altre líquid (fase dispersa). Això passa, normalment, en fluids immiscibles.

Un agitador sol constar d'un recipient cilíndric, generalment de fons arrodonit per facilitar l'accés als corrents generats, i d'un impulsor mecànic solidari a un eix accionat per un motor elèctric a través de, si cal, un reductor mecànic. Els recipients o tancs poden ser oberts o tancats, tot i que generalment s'usen els tancats.

Les operacions fonamentals de mescla són les següents:

- Homogeneïtzació. S'agita per igualar les propietats del producte en tot el volum a processar. Aquestes propietats poden ser viscositat, concentració, etc. S'usa per exemple en dipòsits d'emmagatzematge de productes intermedis de la producció.
- Intercanvi tèrmic. És un tipus d'homogeneïtzació on l'objectiu és igualar la temperatura. Normalment la transferència de calor és a través de la paret, de manera que s'ha de remoure sobretot aquesta zona. Si el producte té tendència a enganxar-se a les parets es poden acoblar rascadors a l'agitador. Un exemple seria el refredament d'una crema alimentària.
- Suspensió de sòlids en líquids. Serveix per distribuir uniformement petites partícules sòlides immiscibles en un líquid, com és el cas dels pigments de les pintures.
- Dissolució de sòlids en líquids. En aquest cas el sòlid (solut) és miscible, i es barreja en un líquid (dissolvent), de manera que es forma una solució homogènia. Un exemple d'això serien les salmorres utilitzades en la indústria alimentària.
- Dispersió gasosa. Incorporar gas en un líquid en forma de petites bombolles. Això es fa per exemple per transferir oxigen als microorganismes de les basses d'una planta depuradora.

- Emulsió. Dispersió de dues fases líquides immiscibles, una sobre l'altra en forma de petites gotes. Per evitar que el greix se separi de la llet es necessita crear una emulsió. La maionesa també n'és un clar exemple.

Com es pot veure a la Taula 2.1 hi ha una ampli ventall de processos industrials on és necessària la intervenció d'un agitador.

| | | APLICACIONS | | | | |
|-----------|--------------|-------------|----------|---------|------------|------------|
| INDÚSTRIA | Alimentària | Làctics | Sucs | Salses | Melmelades | Gelats |
| | Farmacèutica | Pomades | Crems | Xampús | Xarops | Sèrums |
| | Química | Lubricants | Pintures | Resines | Tintes | Detergents |

Taula 2.1. Aplicacions dels agitadors en diferents sectors de la indústria.

Els agitadors o impulsors poden ser de flux axial o radial. En els de flux axial, les aspes tenen un angle menor a 90° respecte al pla de rotació, de manera que generen corrents paral·lels a l'eix. En els de flux radial les aspes formen un angle recte amb el pla de gir, tot creant corrents en direcció radial o tangencial.

Els impulsors se solen classificar en:

- Rotatius. Consten d'una o varies superfícies que giren solidàries a un eix vertical.
- De borbolleig. El líquid és agitat mitjançant el pas d'un gas pel seu interior.
- De pèndol. L'impulsor oscil·la dins el fluid.
- Barrejadores de flux. S'entrecreuen diferents corrents de líquids a l'interior d'un tub (Figura 2.1). També s'anomenen mescladors en línia.

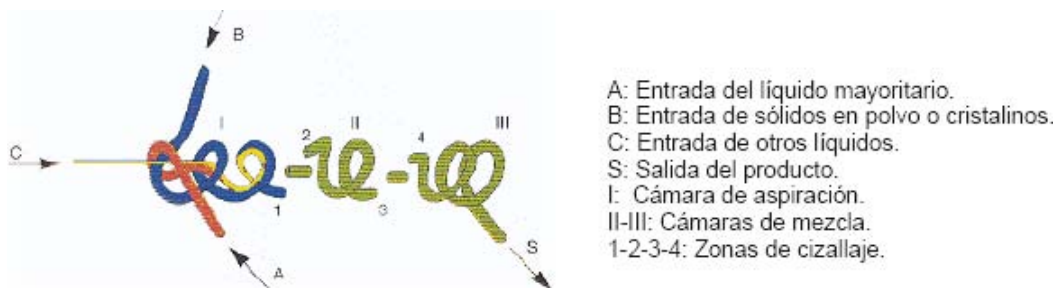


Figura 2.1. Funcionament d'un mesclador en línia (Catàleg comercial de l'empresa Vak Kimsa).

Sense cap mena de dubte, els més utilitzats són els rotatius, la geometria dels quals pot ser molt diversa (Figura 2.2):

- De paleta. Format per una o varies pales planes subjectes a un eix de rotació que genera un flux radial. Els més comuns són els que consten de 2 o 4 fulles. S'usen per líquids poc o moderadament viscosos. Quan augmenta la viscositat del fluid es poden usar pales reixades. També hi ha dissenys de pales que giren per netejar les parets del tanc o agitadors de varies pales girant unes en sentit oposat a les altres. Poden agitar tant de forma laminar com turbulenta.

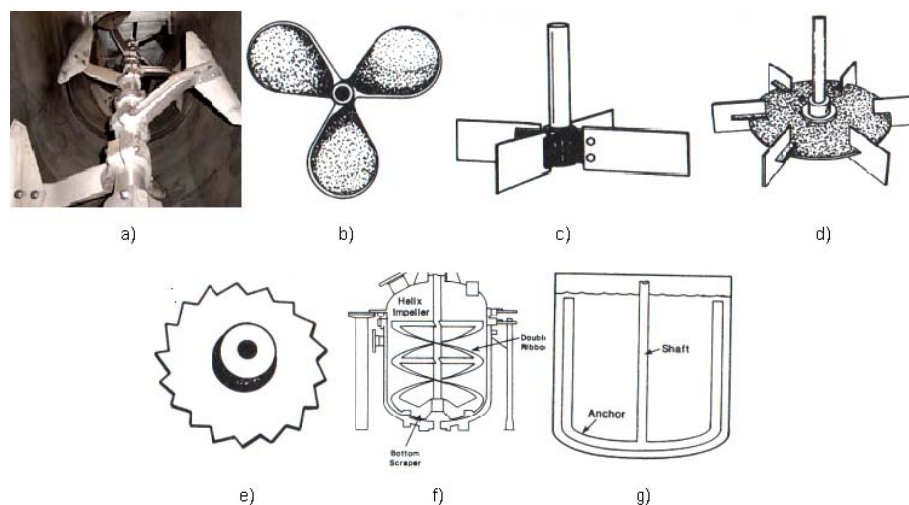


Figura 2.2. Diferents tipus d'impulsors. a) de paletes; b) hèlix marina de tres pales; c) turbina de pales rectes; d) turbina de disc; e) disc de dents de serra; f) cinta doble helicoidal; g) àncora.

- D'hèlix. Agitador de flux axial que consta de fulles curtes que giren a gran velocitat. Els més corrents són les hèlixs marines de tres pales. S'utilitzen per fluids de viscositat moderada. Les hèlixs petites, generalment van acoblades directament a l'eix de sortida del motor i giren a velocitats al voltant de 1.500 rpm. Les grans, necessiten acoblar un reductor per obtenir velocitats d'unes 600 rpm. Es solen muntar descentrats o inclinats respecte del tanc per evitar la formació de remolins. S'utilitzen molt en tancs de grans dimensions ja que generen corrents molt intenses. En aquest cas es solen muntar a través de les parets laterals d'aquest, horitzontalment però formant un cert angle amb el radi del tanc, mai en direcció al centre. S'aplica a líquids immiscibles, solucions molt concentrades, xarops, salmorres, emulsions, etc. Generen fluxos turbulents.

- De turbina. Consten de múltiples i curtes paletes que giren sobre un eix centrat al tanc. S'usen per fluids de viscositat baixa. Poden ser de pales rectes, inclinades, còncaues o de disc entre altres, i ser de rodets tancats, semioberts o oberts. El de pales rectes crea un flux radial, mentre que els altres generen flux axial. El de disc és de tipus semiobert i consta de múltiples pales instal·lades sobre un disc horitzontal. Quan les pales són rectes o còncaues, es pot utilitzar per dispersar un gas en un líquid. Creen flux turbulent.
- De disc. Poden ser de dents de serra, rugosos o simplement un disc acoblat a un eix. S'usen per dispersar partícules fines en líquids, encara que el de disc normal també pot ser usat com a deflector. Generen flux radial i mesclen per turbulència.
- De cinta helicoïdal. Poden ser de cinta simple o doble, tot i que els més efectius són els de cinta doble, en els quals cada cinta gira cap a un costat diferent. El diàmetre de l'hèlix és pràcticament el diàmetre del tanc, de manera que genera corrents en totes direccions. Es fan servir per fluids molt espessos i tenen una velocitat angular molt baixa. S'usa bàsicament en agitacions de flux laminar ja que per flux turbulent el seu cost és molt elevat.
- D'àncora. Tal i com el seu nom indica, tenen forma d'àncora. S'usen per fluids d'alta viscositat, giren a molt poca velocitat, mantenen les parets netes, n'eviten el sobreescalfament i proporcionen una bona agitació al fons del tanc. Tot i això no són gaire recomanables ja que pràcticament no generen flux axial i per tant són mals agitadors. Actualment estan bastant en desús. Solen generar agitacions de flux laminar.

Hi ha diferents sistemes que milloren substancialment l'agitació. Un dels més habituals és equipar el tanc amb deflectors, perpendicularment a la paret, en una distribució simètrica que sol ser de 3 ó 4 pales. Poden tocar la paret o deixar-hi un petit espai perquè circuli el fluid. La seva funció és augmentar el flux vertical per evitar la creació de vòrtexs i augmentar la velocitat de mescla. S'usen sobretot quan tenim impulsors de flux radial que giren a alta velocitat, tipus agitadors de paleta o de turbina de paleta recta, encara que també poden ser útils quan en tenim d'hèlix centrats.

Un altre sistema de millora són els tubs d'aspiració que serveixen per conduir el flux de retorn al rodets, per tal que no arribi un flux tant turbulent. Això resulta útil quan es necessita un elevat esforç constant en l'impulsor, com és el cas de preparació d'algunes emulsions o

quan s'ha de dispersar en un líquid partícules sòlides que tendeixen a flotar. Per agitadors d'hèlix es posen al seu voltant, en canvi pels de turbina es posen a sobre (Figura 2.3).

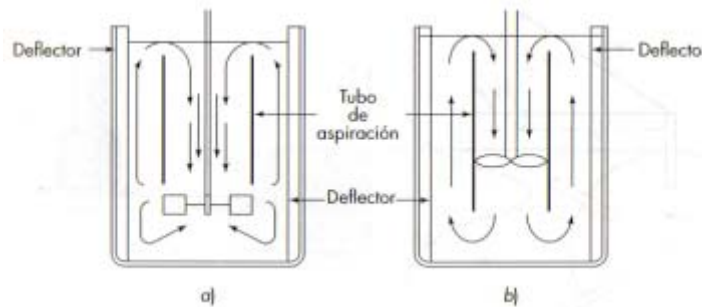


Figura 2.3. Tubs d'aspiració en un tanc amb deflectors: a) turbina; b) hèlix (McCabe et al., 2002).

A l'hora de dissenyar un sistema d'agitació s'han de tenir molt clars els objectius i les limitacions tant d'espai com econòmiques. Un cop la solució està pensada, s'ha de testear per assegurar-nos que funcioni correctament i intentar millorar-ne les prestacions, ja sigui de manera experimental i/o realitzant simulacions amb computadores, ja que els imprevistos solen tenir costos molt elevats. Perquè el disseny sigui bo, s'ha d'assegurar que creï moviment en les 3 dimensions amb el menor consum de potència possible, és a dir, afavorint l'estalvi energètic.

Un mal disseny pot causar molts problemes, com haver de parar una fàbrica, impossibilitat d'arrancar un procés, disminució de la producció o pèrdua de qualitat entre altres. Sobredimensionar, tot i el poc cost econòmic que segurament tingui, no és una bona solució, ja que és molt probable que causi problemes semblants als exposats quan es realitza un mal disseny.

3. VALIDACIÓ DE LA SIMULACIÓ

El primer pas del projecte consisteix en assegurar que el programa de simulació utilitzat, l'Ansys CFX 11.0, recrea l'agitació real. Per comprovar-ho s'utilitzen quatre impulsors diferents girant tots ells a una mateixa velocitat de 800 revolucions per minut. Per tal de poder observar amb claredat què passa en l'agitació s'utilitza un tanc cilíndric de vidre que conté aigua. A aquesta velocitat de gir, en tots els impulsors es crea un vòrtex al voltant de l'eix, el qual té una forma diferent per cadascun d'ells (Figura 3.1).

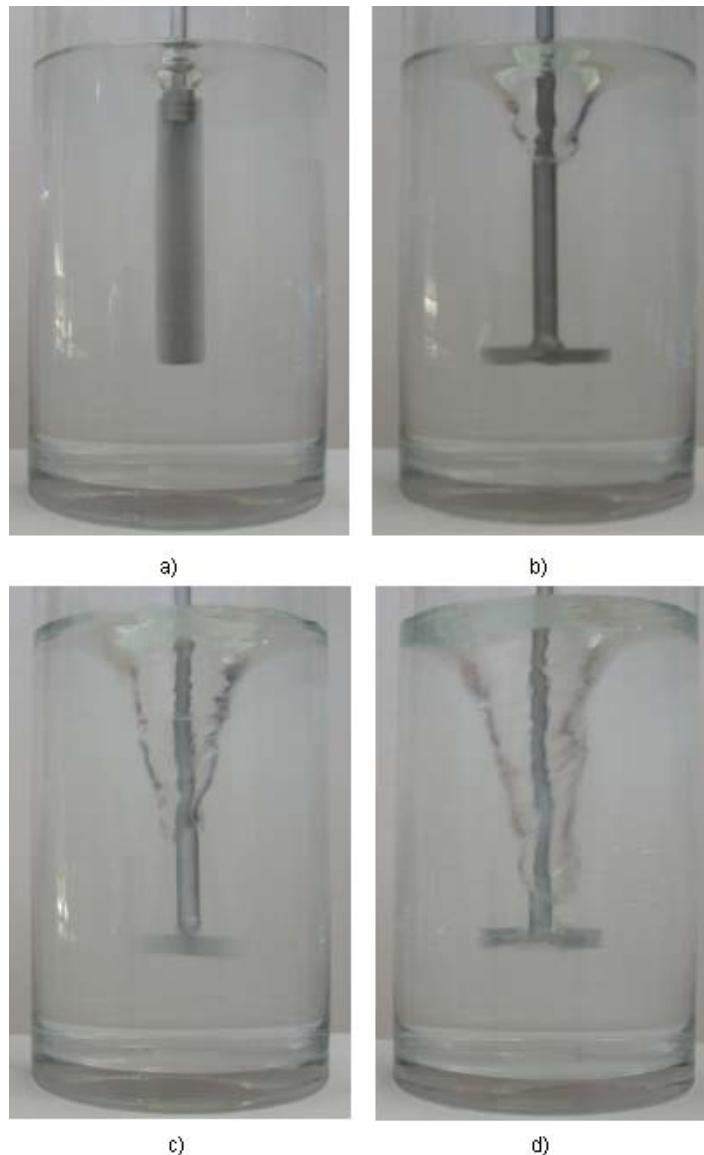


Figura 3.1. Vòrtexs creats en els diferents agitadors: a) paleta; b) turbina de 4 pales inclinades; c) turbina de 2 pales planes; d) turbina de disc de 6 pales.

Els impulsors utilitzats són el de paleta que es disposava inicialment, un de turbina plana, un de turbina inclinada i un altre de turbina de disc. Aquestes tres últimes geometries van ser mecanitzades per un tècnic de laboratori de la Universitat de Girona, al laboratori del departament d'Enginyeria Mecànica i de la Construcció Industrial (EMCI) de l'Escola Politècnica Superior. Els quatre impulsors es poden veure a la Figura 3.2. La justificació del dimensionament d'aquests impulsors es troba a l'Annex B.



Figura 3.2. Impulsors usats per la validació: a) turbina de disc de 6 pales; b) turbina de 2 pales planes; c) turbina de 4 pales inclinades a 45°; d) paleta.

Per validar el programa es realitzarà una comparació entre la forma dels vòrtexs reals i els simulats. També es compararan els patrons de flux obtinguts amb els teòrics i es comprovarà que les potències teòriques, experimentals i les calculades pel programa de simulació siguin semblants. Finalment es realitzarà una comparació entre els resultats obtinguts treballant amb volums enters i parcials.

Els passos seguits durant la validació de la simulació són els que es mostren a la Figura 3.3.

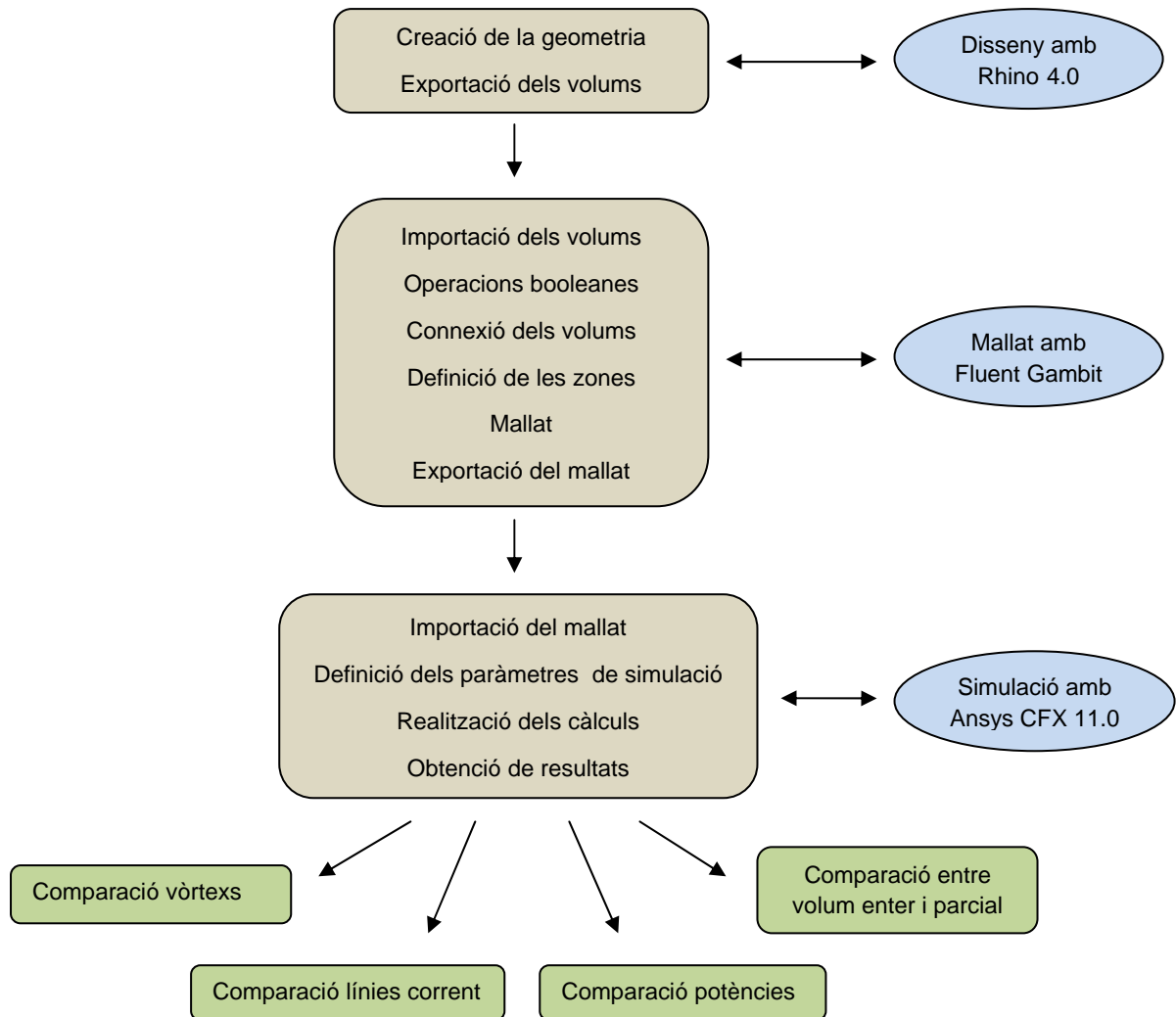


Figura 3.3. Esquema de la validació.

3.1. Generació de la geometria

Per generar els diferents dissenys es fa servir el programa de dibuix assistit per ordinador (CAD), Rhinoceros 4.0. Mitjançant aquest software es realitzen quatre volums independents però que estan en contacte. Els quatre volums creats són els següents:

- Volum 1. És el cos format per l'eix i les pales de l'impulsor. Aquest volum és diferent per cada tipus d'agitador.

- Volum 2. És un cilindre que envolta les pales de l'impulsor (Figura 3.4) i que s'ha de crear perquè posteriorment serà requerit pel programa de simulació per definir quina és l'àrea de rotació de les pales. L'espai que s'ha de deixar entre l'impulsor i el cilindre és de 2 mm per la part superior i 1/8 del diàmetre de pala per cada lateral.

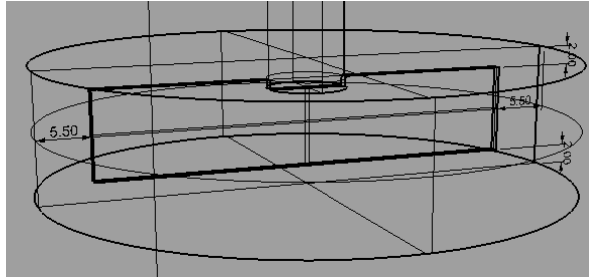


Figura 3.4. Cilindre de rotació creat per l'agitador de turbina plana (diàmetre de 4'4 cm, cotes en mm).

- Volum 3. És la zona del tanc que conté aigua. Aquesta té un volum de 2'5 litres, exactament el mateix que el contingut en el recipient del laboratori.
- Volum 4. És la zona del tanc que conté aire. El volum creat és de 0'6 litres, tot i que no té més importància ja que posteriorment definirem que el tanc resta obert.

L'impulsor se situa a 5'5 cm del fons del tanc (Annex B). A la Figura 3.5 es pot veure un exemple dels diferents volums creats.

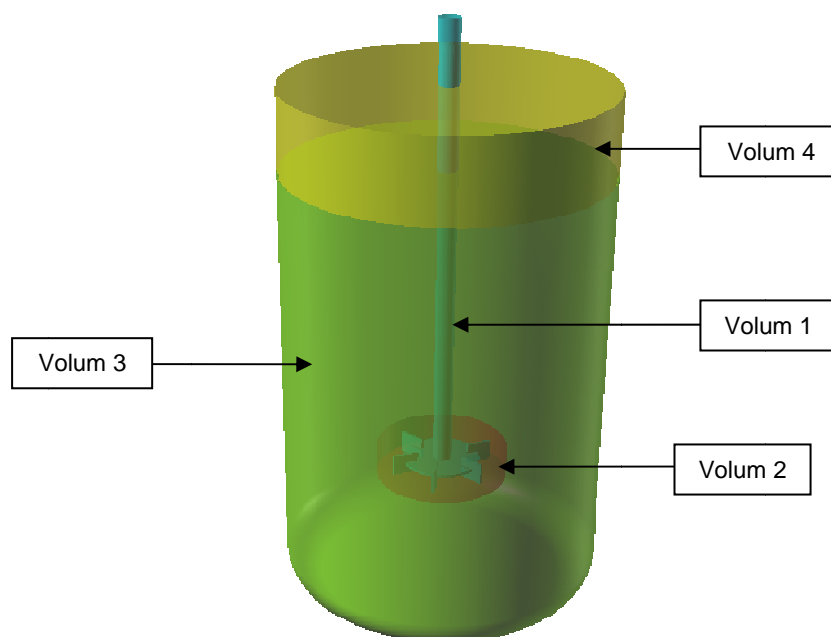


Figura 3.5. Volums generats per l'agitador de turbina de disc.

Per últim s'exporten els diferents volums per separat amb el format IGES (Especificació Inicial d'Intercanvi de Gràfics). Aquest defineix un format de dades neutral que permet l'intercanvi digital d'informació entre programes CAD. Això servirà per després poder importar els volums amb el programa que s'usarà per mallar-los.

El programa de CFD que s'utilitzarà permet tallar el volum pels plans de simetria i treballar només amb una part d'aquest, donant així l'opció de poder treballar, per exemple, amb tant sols un quart de la geometria. Aquest fet presenta l'avantatge de reduir el volum, amb lo qual també es redueix el mallat volumètric i el temps de simulació.

En el nostre cas es podria reduir els volums de tots els impulsors menys el de paleta, ja que no és simètric. Per fer la validació de la simulació interessa treballar en les condicions més semblants possibles amb els 4 impulsors, per tant, en cap cas es tallarà el volum, excepte en la última simulació que es farà amb la sisena part de la turbina de disc (Figura 3.6).

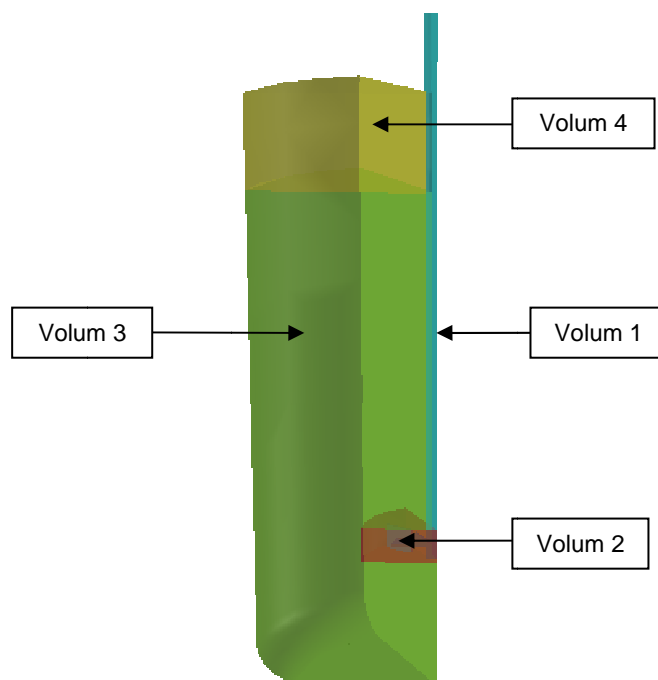


Figura 3.6. Volums generats per la sisena part de l'agitador de turbina de disc.

El procés que s'explicarà en els apartats posteriors serà sempre treballant amb volums sencers, el qual és pràcticament idèntic a quan treballem amb volums parcials. Qualsevol diferència que sorgeixi serà comentada.

3.2. Realització dels volums finals

Per poder realitzar la simulació interessa tenir tant sols tres cossos, en comptes dels quatre que s'han creat, ja que els volums resultants han de ser només de les zones ocupades per el fluid, és a dir, el negatiu del conjunt tanc més impulsor. Per fer operacions booleanes, és millor utilitzar el mateix programa que s'utilitzarà per mallar els volums, ja que així s'evita possibles problemes de compatibilitat d'arxius entre els programes.

Així doncs s'obra una nova sessió amb el programa Fluent Gambit 2.2.30 i s'importen els quatre arxius en format IGES abans creats. Un cop es tenen els quatre volums es tracta de fer un seguit d'operacions de sostracció per aconseguir els tres cossos desitjats. A continuació s'explica quins són aquests tres volums i com s'aconsegueixen:

- Aire. És el resultat de treure el Volum 1 del Volum 4, de manera que queda un cilindre amb un forat al mig.
- Aigua. Resulta d'extreure els Volums 1 i 2 al Volum 3.
- Agitador. S'ha de treure el Volum 1 al Volum 2.

L'últim pas és eliminar el Volum 1, el qual corresponia a l'impulsor. A la Figura 3.7 es poden veure els 3 cossos.

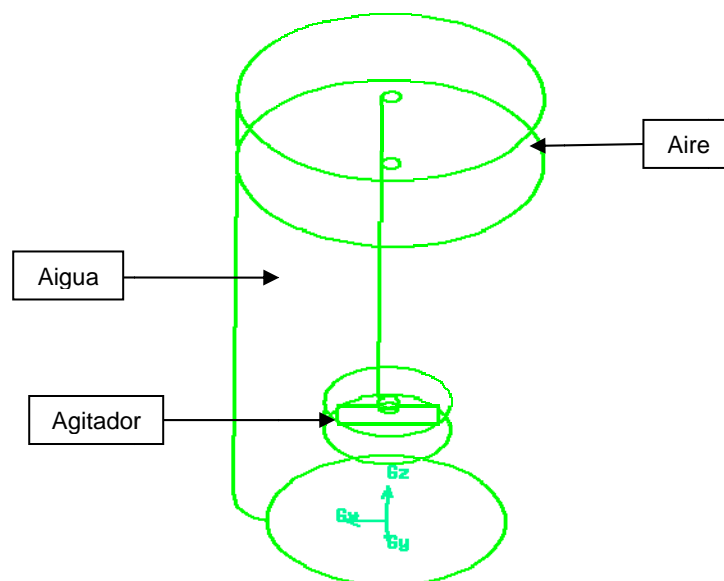


Figura 3.7. Volums definitius.

3.3. Unió

Amb les operacions realitzades fins el moment s'ha aconseguit crear tres volums que estan en contacte però no estan units. Tenir-los units és necessari per poder simular l'agitació, ja que tot i ser 3 volums diferents, el programa els agafa com si fossin un de sol. A l'hora de mallar també presenta l'avantatge de que quan tinguem un canvi de mida de cel·la entre dos volums, el mallat tindrà continuïtat i realitzarà una transició esglaonada d'una mida a l'altra.

No ens interessa fer una unió booleana ja que es passaria de tenir 3 volums a tenir-ne només un. Així doncs s'usarà l'eina de connectar cares del software Fluent Gambit. Les cares a unir són les que es toquen entre els volums Aire i Aigua, i les cares inferior, lateral i superior del volum Agitador amb l'Aigua.

Quan dos cossos estan connectats els eixos de la cara de contacte dels dos es torna de color lila (Figura 3.8).

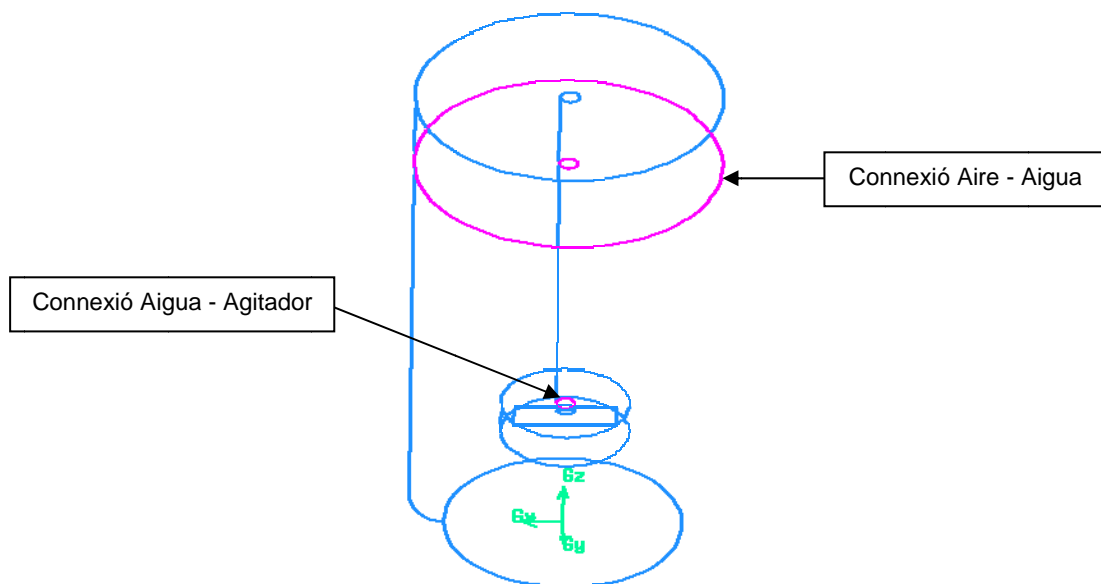


Figura 3.8. Unió dels 3 volums.

S'observa com en la connexió Aire – Agitador, tot i haver realitzat 3 unions diferents (superior, lateral, inferior), només apareix una cara de color lila. Això és degut a que el programa ajunta també les unions que estan en contacte en una única unió.

3.4. Definició de les diferents zones

Fins ara s'han creat i unit tres volums diferents, però encara no s'han definit els detalls de la geometria, com per exemple que el nostre tanc està obert per la part superior. Així doncs, abans de mallar es definiran les zones que interessa diferenciar per la simulació. Això també es realitzarà amb el Fluent Gambit. El programa deixa definir dos tipus de zones, les contínues, que són les corresponents als volums i on s'ha de dir si són de tipus sòlid o fluid, i les de frontera, que corresponen a les cares, on es pot definir si són de tipus paret, interfície, entrada, sortida, etc. Les regions són les que es presenten a continuació.

Regions contínues:

- Aire. Correspon al volum Aire i és de tipus fluid.
- Aigua. Correspon al volum Aigua i és de tipus fluid.
- Agitador. Correspon al volum Agitador i és de tipus fluid.

Regions de frontera:

- Superior. Cara superior de contacte entre els volums Agitador i Aigua. Tipus interfase.
- Lateral. Cara lateral de contacte entre els volums Agitador i Aigua. Tipus interfase.
- Inferior. Cara inferior de contacte entre els volums Agitador i Aigua. Tipus interfase.
- Aire – aigua. Cara de contacte entre els volums Aire i Aigua. Tipus interfase.
- Sortida. Cara superior del volum Aire. Tipus pressió de sortida.
- Eix superior. Cara del forat interior del volum Aire. Tipus paret.
- Eix mig. Cara del forat interior del volum Aigua. Tipus paret.
- Rotació agitador 1 i 2. Cares exteriors del volum Agitador. Tipus paret (Només pel volum parcial).
- Rotació aigua 1 i 2. Cares exteriors del volum Aigua. Tipus paret (Només pel volum parcial).
- Rotació aire 1 i 2. Cares exteriors del volum Aire. Tipus paret (Només pel volum parcial).

Per cada volum, totes les cares que no s'hagin definit, el programa les agafa per defecte com a una única paret. Així doncs, es generaran tres regions extres de tipus frontera tot i no haver-les definit.

A la Figura 3.9 es poden veure les regions de frontera creades manualment.

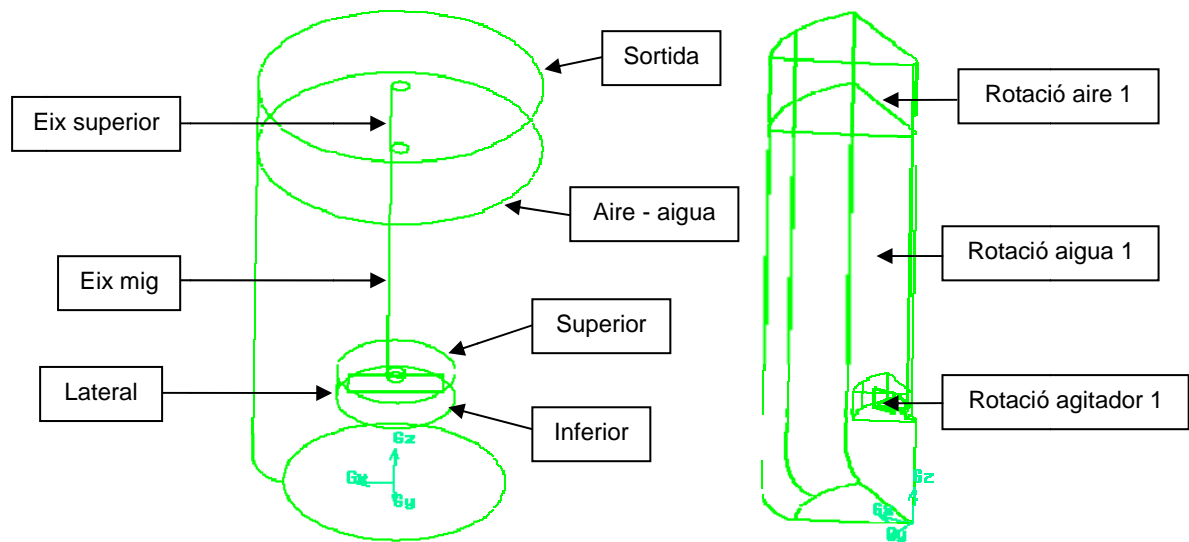


Figura 3.9. Regions de frontera: a) volum sencer; b) regions extres afegides a un costat del volum parcial.

3.5. Mallat dels volums

Un cop definides les diferents zones ja es pot procedir a mallar els volums amb el software Fluent Gambit. El mallat no és més que la divisió d'un volum en molts de més petits relacionats entre ells. Això permet simplificar el càlcul de la computadora ja que els volums creats tenen una geometria menys complexa.

El nombre de cel·les creades influeix en el temps de càlcul de la simulació, de manera que un mallat de molts elements serà més lent que un de pocs elements. És per això que a les zones més rellevants dels volums s'ha de realitzar un mallat més fi, en canvi a les regions menys importants es pot crear un mallat més bast. S'ha d'obtenir un equilibri entre un bon mallat i una velocitat de simulació raonable.

Les regions més rellevants de la nostra geometria són les pales de l'impulsor, la zona de contacte entre l'aire i l'aigua i les parets del tanc. Així doncs s'haurà de tenir una densitat de

mallat més elevada en aquestes regions. Això es farà mitjançant l'eina *Size Function*, la qual permet començar una regió amb un mallat més petit i fer que a mesura que ens allunyem, els elements del mallat es vagin fent més grans fins arribar a la mida del mallat del volum on estan compresos. Per fer aquesta progressió s'ha d'especificar l'origen, les regions on es vol que es dugui a terme, la mida inicial i final dels elements i el factor de creixement.

Per mallar els volums s'usen elements tetraèdrics, ja que són els que s'adapten millor a geometries complexes. El procés de mallat és el mateix pels quatre tipus d'agitadors, ja que són geometries molt semblants. Els passos seguits són els següents:

- Creació d'una nova *Size Function*. L'origen es fixa als eixos verticals del volum Aire i els que formen la interfase Aire – Aigua, que són els de color vermell de la Figura 3.10. Com a volums adjunts Aire i Aigua, mida inicial de 2 mm, factor de creixement de 1'2 i mida final de 6 mm (en el volum parcial s'utilitza una mida inicial de 0'5 mm, un factor de creixement també de 1'2 i una mida final de 3'5 mm).

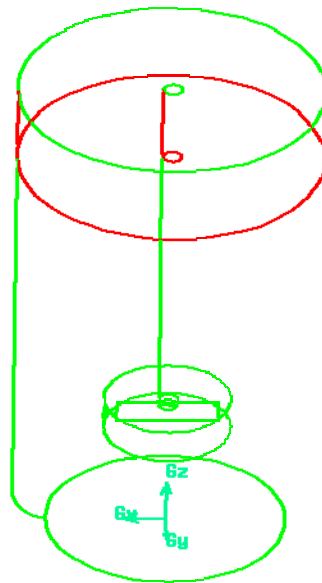


Figura 3.10. Eixos d'origen per la *Size Function*.

- Mallat del volum Agitador. Elements tetraèdrics amb un espaiat de 2 mm (0'5 mm en el volum parcial).
- Mallat del volum Aire. Elements tetraèdrics amb un espaiat de 6 mm (3'5 mm en el volum parcial).

- Mallat del volum Aigua. Elements tetraèdrics amb un espaiat de 6 mm (3'5 mm en el volum parcial).

Tot i haver mallat els 3 volums per separat, gràcies a haver unit anteriorment les cares dels volums en contacte, el programa genera un únic mallat. Per adaptar la mida dels elements entre els volums Aigua i Agitador, el programa genera una zona de transició molt semblant a la que crea l'eina *Size Function* (Figura 3.11).

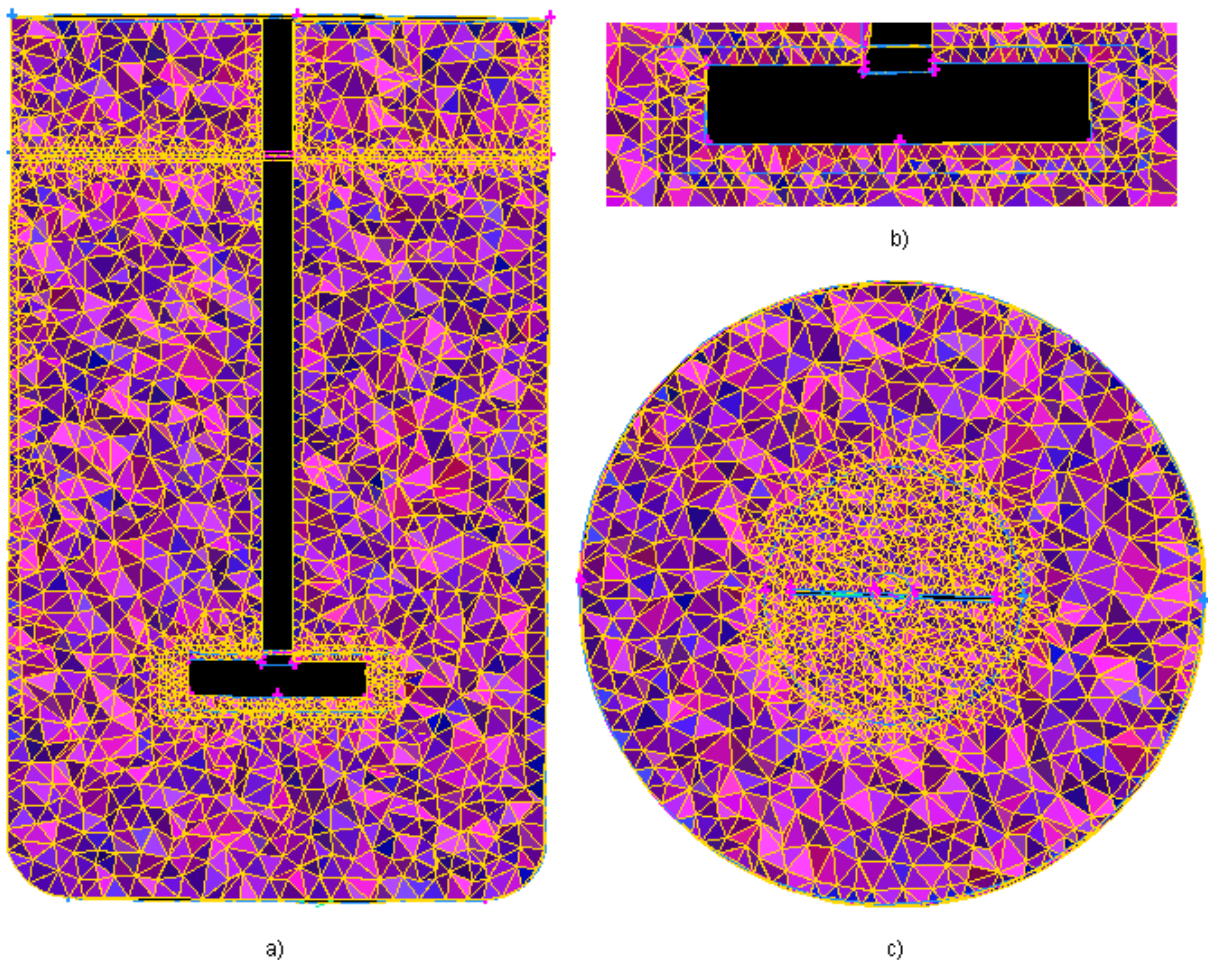


Figura 3.11. Diferents vistes en secció del mallat de l'agitador de turbina plana: a) alçat del centre de l'agitador; b) ampliació de l'alçat a la zona de l'impulsor; c) planta a l'altura de les pales.

El software de Fluent té una opció per examinar la qualitat del mallat en funció de la forma del volum de cada element. El programa treballa amb un rang de qualitat que va entre 0 i 1, de manera que els elements de més qualitat, o que tenen una forma més regular, s'aproximen a 0 i els de menys qualitat a 1.

Com s'observa a la Figura 3.12, el valor 0 s'associa al color blau i el valor 1 al color vermell. En el nostre cas un element perfecte seria una piràmide formada per tres triangles equilàters, seria de color blau i tindria associada una qualitat de 0.

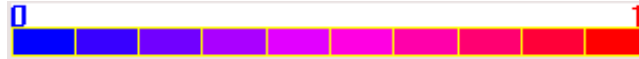


Figura 3.12. Rang de qualitat del mallat.

A la Taula 3.1 es recull la informació dels mallats realitzats pels quatre agitadors.

| | | TIPUS D'AGITADOR | | | | |
|--|-----------|------------------|---------------|-------------------|-----------------|---------------------------------|
| | | Paleta | Turbina plana | Turbina inclinada | Turbina de disc | Turbina de disc (volum parcial) |
| NOMBRE D'ELEMENTS | | 297.101 | 276.922 | 281.778 | 279.518 | 278.558 |
| PERCENTATGE D'ELEMENTS ENTRE ELS DIFERENTS RANGS DE QUALITAT | 0 - 0'1 | 4'39 | 3'89 | 3'73 | 3'75 | 2'62 |
| | 0'1 - 0'2 | 4'41 | 4'49 | 4'64 | 4'53 | 6'97 |
| | 0'2 - 0'3 | 15'13 | 14'18 | 15'01 | 14'38 | 21'78 |
| | 0'3 - 0'4 | 40'02 | 40'22 | 39'82 | 39'79 | 40'61 |
| | 0'4 - 0'5 | 23'31 | 23'99 | 23'67 | 24'14 | 20'66 |
| | 0'5 - 0'6 | 9'95 | 10'18 | 10'17 | 10'31 | 5'68 |
| | 0'6 - 0'7 | 2'5 | 2'73 | 2'67 | 2'78 | 1'45 |
| | 0'7 - 0'8 | 0'29 | 0'33 | 0'3 | 0'32 | 0'24 |
| | 0'8 - 0'9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0'01 |
| | 0'9 - 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Taula 3.1. Rangs de qualitat del mallat pels quatre agitadors.

Com es pot veure, el mallat obtingut per tots els casos és d'uns 300.000 elements i la qualitat del mallat és força bona ja que aproximadament el 85 % dels elements es troben entre el 0 i el 0'5. Així doncs s'ha aconseguit obtenir un mallat no excessivament gran amb una qualitat notable. Finalment s'exporta l'arxiu del mallat.

3.6. Simulació

Hi ha una gran varietat de programes de CFD que permeten realitzar simulacions d'agitacions bifàsiques de fluids, com és el nostre cas, on tenim aigua i aire. A la Universitat de Girona es disposa de llicència per dos d'aquests, l'Star CCM+ de la casa CD – adapco i l'Ansys CFX. Ambdós són programes contrastats i per tant fiables, però depenent del tipus

d'estudi fluídic pot ser millor un o l'altre. Pel nostre cas el més adient és l'Ansys CFX, de manera que s'usarà l'última versió disponible, la 11.0. El funcionament d'aquest software està dividit en tres de diferents, el Pre – procés, el *Solver* i el Post – procés.

3.6.1 Pre – procés

Aquí és on es definiran tots els aspectes de la simulació, com ara la velocitat de gir de l'agitador, la gravetat, la pressió, la rugositat, el tipus de turbulència o les densitats dels fluids entre altres. És la part més important del software. El primer pas és crear una nova simulació i importar el fitxer del mallat del Fluent Gambit. A la Figura 3.13 es pot observar la interfície del programa. A la part esquerra és on es defineixen les característiques de cada una de les regions definides a l'apartat 3.4.

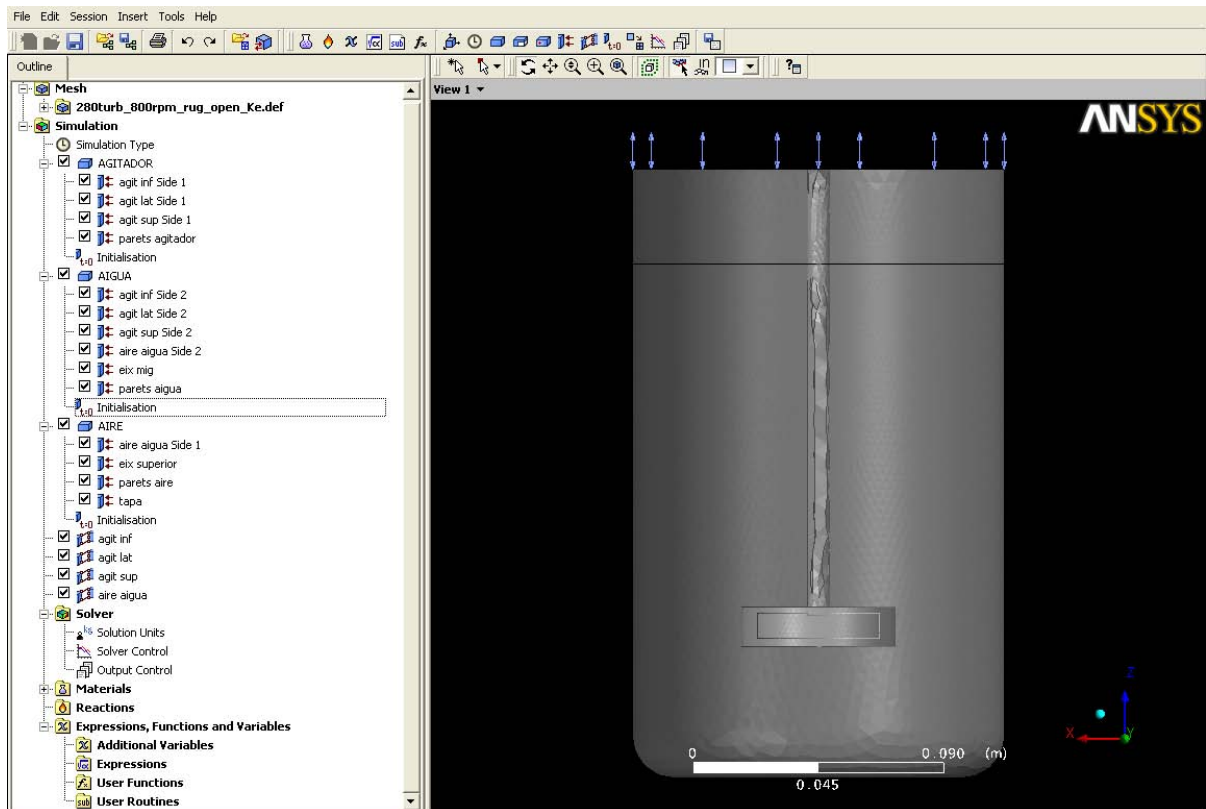


Figura 3.13. Interfície gràfica del Pre – procés del software Ansys CFX 11.0.

La simulació que es portarà a terme serà la mateixa pels 4 tipus d'agitadors i pel model de volum parcial. El tipus de simulació es pot definir com a transitòria o estacionària. La transitòria permet seguir l'evolució del sistema al llarg de petits increments de temps, mentre que l'estacionària dóna el resultat d'equilibri final. Donat que en el nostre cas l'homogeneïtzació del fluid és pràcticament instantània, s'escull l'opció estacionària.

A continuació s'explica per quines zones estan creades cada regió, seguint l'esquema de l'esquerra de la Figura 3.13, i es llisten els paràmetres de simulació més destacats.

- Domini AGITADOR. Volum Agitador.
 - Fluids: Aire a 25 °C i aigua.
 - Pressió de referència: 1 atmosfera.
 - Gravetat: 9'81 m/s².
 - Densitat de referència: 997 kg/m³.
 - Moviment del domini: Rotació a 800 rpm respecte l'eix Z.
 - Tipus de turbulència: k – Epsilon (Per l'impulsor de paleta el règim és de transició, però el número de Reynolds és lo suficientment gran com per considerar turbulència (Annex C)).
 - Flotació.
 - Model de flotació per diferència de densitat: Mescla (1 mm).
 - Model homogeni.
 - Fluid continu.
 - Fracció de volum: aire = 0, aigua = 1.
 - Agit inf Side 1. Cara 1 de la interfase Inferior.
 - Agit lat Side 1. Cara 1 de la interfase Lateral.
 - Agit sup Side 1. Cara 1 de la interfase Superior.
 - Parets agitador. Paret creada per defecte del volum Agitador.
 - Tipus de contorn: Rotació.
 - Influència de la paret en el flux: No lliscant.
 - Rugositat de la paret: 0'05 mm.
 - Rotació agitador 1 Side 1. Paret Rotació agitador 1. (Només en volum parcial).
 - Rotació agitador 2 Side 2. Paret Rotació agitador 2. (Només en volum parcial).
- Domini AIGUA. Volum Aigua.
 - Fluids: Aire a 25 °C i aigua.
 - Pressió de referència: 1 atmosfera.
 - Gravetat: 9'81 m/s².
 - Densitat de referència: 997 kg/m³.
 - Moviment del domini: Estacionari.
 - Tipus de turbulència: k – Epsilon.
 - Flotació.

- Model de flotació per diferència de densitat: Mescla (1 mm).
- Model homogeni.
- Fluid continu.
- Fracció de volum: aire = 0, aigua = 1.
- Agit inf Side 2. Cara 2 de la interfase Inferior.
- Agit lat Side 2. Cara 2 de la interfase Lateral.
- Agit sup Side 2. Cara 2 de la interfase Superior.
- Aire aigua Side 2. Cara 2 de la interfase Aire – aigua.
- Eix mig. Paret Eix mig.
 - Paret rotativa a 800 rpm respecte l'eix Z.
 - Influència de la paret en el flux: No lliscant.
 - Rugositat de la paret: 0'05 mm.
- Parets aigua. Paret creada per defecte del volum Aigua.
 - Paret llisa.
 - Influència de la paret en el flux: No lliscant.
- Rotació aigua 1 Side 1. Paret Rotació aigua 1. (Només en volum parcial).
- Rotació aigua 2 Side 2. Paret Rotació aigua 2. (Només en volum parcial).
- Domini AIRE. Volum Aire.
 - Fluids: Aire a 25 °C i aigua.
 - Pressió de referència: 1 atmosfera.
 - Gravetat: 9'81 m/s².
 - Densitat de referència: 997 kg/m³.
 - Moviment del domini: Estacionari.
 - Tipus de turbulència: k – Epsilon.
 - Flotació.
 - Model de flotació per diferència de densitat: Mescla (1 mm).
 - Model homogeni.
 - Fluid continu.
 - Fracció de volum: aire = 1, aigua = 0.
- Aire aigua Side 1. Cara 1 de la interfase Aire – aigua.
- Eix superior. Paret Eix superior.
 - Paret rotativa a 800 rpm respecte l'eix Z.
 - Influència de la paret en el flux: No lliscant.
 - Rugositat de la paret: 0'05 mm.
- Parets aire. Paret creada per defecte del volum Aire.
 - Paret llisa.

- Influència de la paret en el flux: No lliscant.
- Rotació aire 1 Side 1. Paret Rotació aire 1. (Només en volum parcial).
- Rotació aire 2 Side 2. Paret Rotació aire 2. (Només en volum parcial).
- Tapa. Pressió de sortida Sortida.
 - Tipus de paret: Obertura.
 - Règim de flux: Subsònic.
 - Pressió relativa: 0 atmosferes.
 - Direcció del flux: Perpendicular a la condició de frontera.
 - Turbulència: Mitjana (Intensitat = 5%).
 - Fracció de volum: aire = 1, aigua = 0.
- Interfase agit inf. Interfase Inferior.
 - Tipus: Fluid Fluid.
 - Canvi de contorn / Model de mescla: *Frozen Rotor*.
 - *Pitch change*: Automàtic.
- Interfase agit lat. Interfase Lateral.
 - Tipus: Fluid Fluid.
 - Canvi de contorn / Model de mescla: *Frozen Rotor*.
 - *Pitch change*: Automàtic.
- Interfase agit sup. Interfase Superior.
 - Tipus: Fluid Fluid.
 - Canvi de contorn / Model de mescla: *Frozen Rotor*.
 - *Pitch change*: None.
- Interfase aire aigua. Interfase Aire – aigua.
 - Tipus: Fluid Fluid.
 - *Pitch change*: None.
- Interfase Rotació agitador. Parets Rotació agitador 1 i Rotació agitador 2. (Només en volum parcial).
 - Tipus: Fluid Fluid.
 - Periodicitat rotacional.
- Interfase Rotació aigua. Parets Rotació aigua 1 i Rotació aigua 2. (Només en volum parcial).
 - Tipus: Fluid Fluid.
 - Periodicitat rotacional.
- Interfase Rotació aire. Parets Rotació aire 1 i Rotació aire 2. (Només volum parcial).
 - Tipus: Fluid Fluid.
 - Periodicitat rotacional.

3.6.2 Solver

Una vegada definit tots els paràmetres en el Pre – procés, es guarda l'arxiu i automàticament es llança el Solver (Figura 3.14) on es posa en marxa la simulació. Aquesta part del programa és la que s'encarrega de realitzar càlculs mitjançant algorismes iteratius per després poder recrear les agitacions.

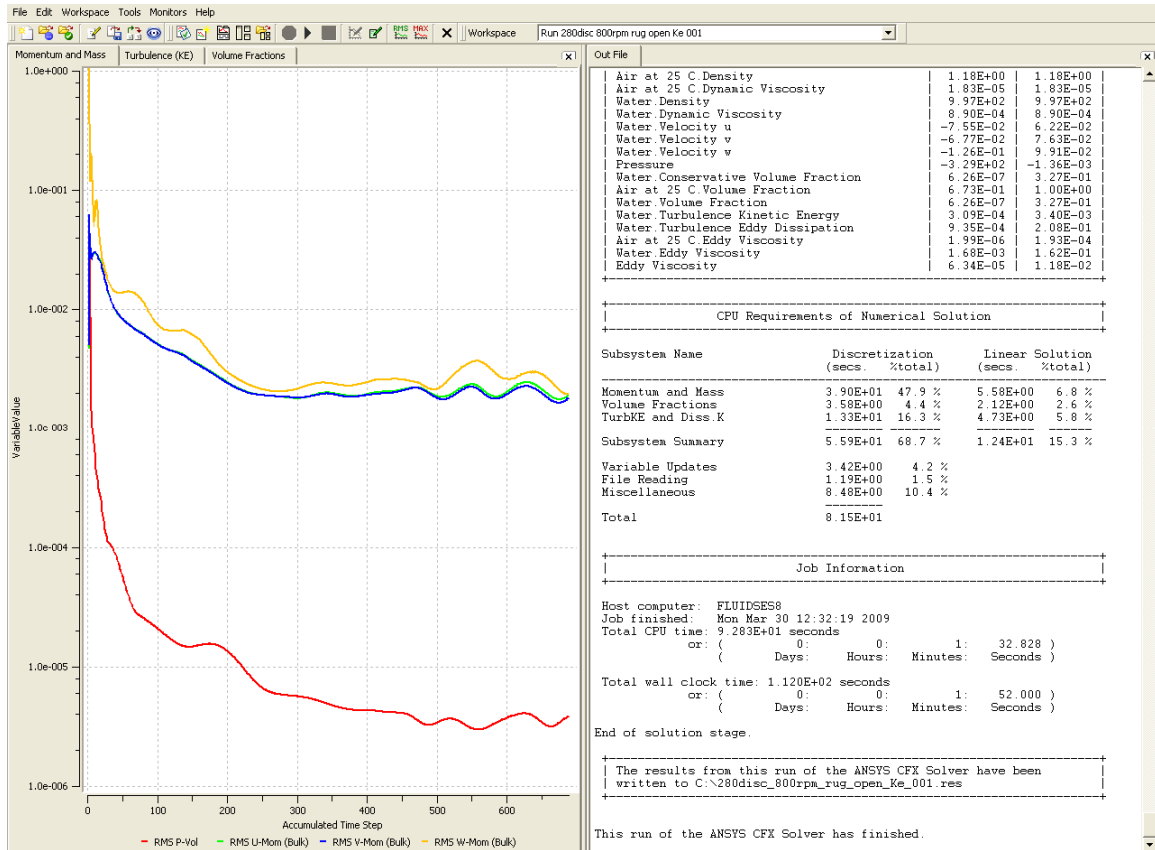


Figura 3.14. Interfície gràfica del Solver del software Ansys CFX 11.0.

Durant el procés de càlcul mostra informació sobre les iteracions de càlcul (part dreta de la Figura 3.14) i genera gràfics de residuals dels valors de càlcul. A la part inferior del gràfic es mostra el nombre d'iteracions que porta realitzades. A la figura anterior es poden veure els residuals de les tres equacions de conservació de moment (U – Mom, V – Mom i W – Mom) i de l'equació de continuïtat del balanç de massa (P – Vol). Aquest últim, en cas de realitzar una simulació d'una sola fase, canvia per l'equació de conservació de massa (P – Mass).

El residual és l'error de càlcul que es produeix en el resultat obtingut per una equació entre dues iteracions. Lo ideal seria que tinguessin un valor de 0, però això mai succeeix. El valor de convergència dels residuals depèn fonamentalment del mallat, de manera que com més

bo és aquest, més s'aproxima a zero. Els criteris per determinar la qualitat de la simulació en funció del valor de convergència dels residuals són els següents:

- $5 \cdot 10^{-4}$. Molt pobre tot i que serveix per tenir una idea de la simulació.
- $5 \cdot 10^{-5}$. Pobra però suficientment bona per la majoria d'aplicacions d'enginyeria.
- $1 \cdot 10^{-5}$. Bona.
- $5 \cdot 10^{-6}$. Ajustada.
- $1 \cdot 10^{-6}$. Molt ajustada.

Intentar aconseguir valors més petits no té molta importància ja que no comporta grans canvis en els resultats obtinguts.

Reduir el valor dels residuals moltes vegades és impossible degut a que es tenen limitacions en el nombre d'elements de mallat. Per un mallat molt gran es necessita una gran capacitat de càlcul de la computadora, que només es pot aconseguir treballant amb vàries en paral·lel.

En el nostre cas el programa també genera tres residuals més, dos relacionats amb la turbulència i un altre de fraccions de volum que es poden veure seleccionant les pestanyes que hi ha sobre el gràfic, tal i com s'aprecia a la Figura 3.15.

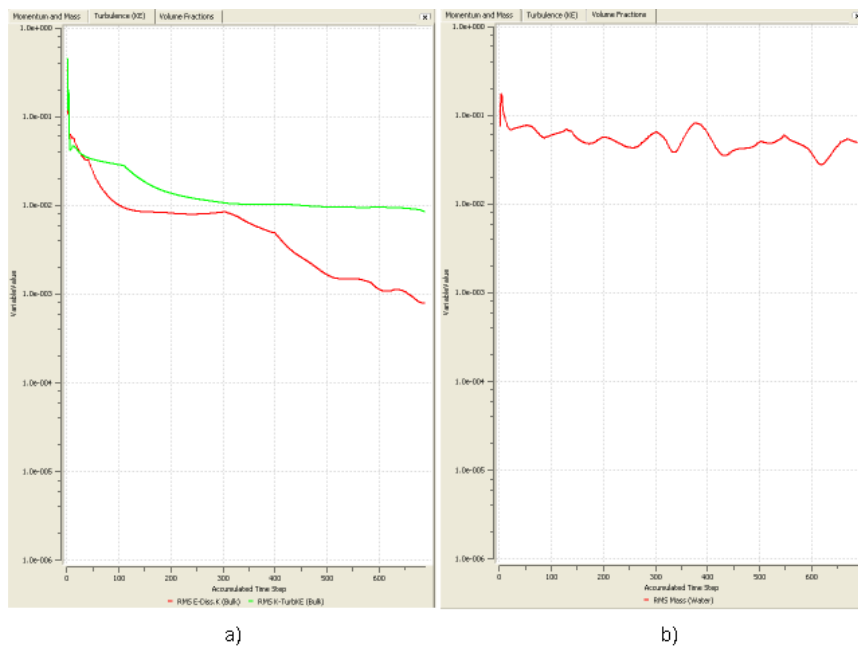


Figura 3.15. Altres residuals generats pel Solver: a) turbulència;
b) fraccions de volum.

Els de turbulència són, un per l'equació de la dissipació dels remolins de la turbulència (E – Diss.K) i una altra per l'equació de l'energia cinètica de la turbulència (K-TurbKE). El de fraccions de volum és per l'equació de quantitat de fluid (Mass (Water)).

Els criteris per parar el *Solver* es defineixen en el Pre – procés. Es pot aturar la simulació en funció d'un nombre màxim d'iteracions o bé segons un valor de convergència de residuals fixat. En el nostre cas, es va posar un nombre d'iteracions de 100.000 i un valor de convergència de $1 \cdot 10^{-10}$, per assegurar que el programa no s'aturés i així poder parar-lo quan semblés convenient de forma manual.

Tots els residuals abans exposats són importants, però els més rellevants són els de moment i massa, els de la Figura 3.14, ja que són els que en cas d'arribar al valor de convergència fixat en el Pre – procés, aturen el programa.

La velocitat de càlcul, tal i com ja s'ha explicat, depèn del nombre d'elements del mallat, però també de la computadora que s'utilitza. En el nostre cas els ordinadors utilitzats són de la casa Dell, concretament el model Dimension 5.000, el qual disposa d'un processador Intel Pentium 4 a 3'2 GHz i una memòria RAM de 3 Gb. El sistema operatiu utilitzat és el Windows XP. Pels mallats abans exposats, els quals rondaven els 300.000 elements, aquestes computadores són capaces de realitzar al voltant de 100 iteracions per hora.

Normalment la convergència de tots els residuals exposats és simultània encara que a valors diferents. Es realitzarà una simulació per cada tipus d'agitador i la seva aturada es condicionarà a la convergència dels residuals de moment i massa, sigui quin sigui el valor al qual convergeixin i el nombre d'iteracions a realitzar.

3.6.3 Post – procés

Un cop acabada la simulació el programa genera un arxiu de resultats que es pot obrir en el Post – procés. Aquest serveix per plasmar gràficament els càlculs realitzats en el *Solver* i per realitzar càlculs de moments, forces, pressions, etc.

També es poden crear escenaris, en els quals es guarda tota la informació referent als gràfics generats en el Post – procés. Això permet carregar exactament els mateixos gràfics

per tots els arxius de resultats del *Solver*, encara que siguin de geometries diferents. Així doncs es crearà un sol escenari que servirà pels diferents tipus d'agitadors.

3.7. Resultats

Durant les simulacions, cada certes iteracions es va parar el *Solver* per observar l'evolució de l'agitació i tenir més informació de contrast. En cap cas es va finalitzar la simulació abans de la convergència dels residuals.

En la simulació al laboratori es va observar que a l'interior dels vòrtexs generats al voltant de l'eix dels diferents agitadors, pràcticament només hi havia aire, de manera que per comprovar si la simulació computacional és correcta es generarà l'opció de gràfic del Post – procés Contorn i es definirà com a variable de contorn la fracció de volum d'aire. Per crear el gràfic abans se li ha de definir un pla de dibuix, el qual serà el tall longitudinal del tanc. En l'agitació hi ha 2 fluids, de manera que una fracció de volum d'aire de 1 significa que és tot aire, en canvi si val 0 és tot aigua.

3.7.1 Impulsor de paleta

En el cas de l'impulsor de paleta es va deixar córrer el *Solver* fins a un total de 10.000 iteracions, on la convergència era ja pràcticament total (Figura 3.16).

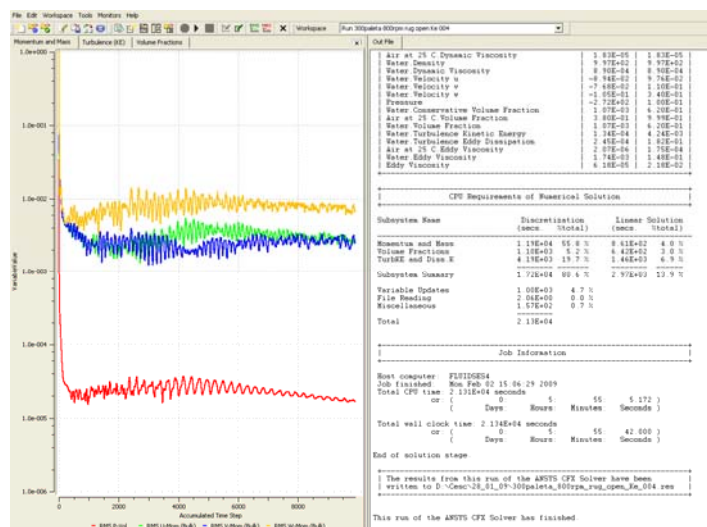


Figura 3.16. Solver de l'agitador de paleta.

Es va aturar la simulació cada 2.500 iteracions, per tant es disposa de 4 estats diferents. A la Figura 3.17 es pot veure els resultats obtinguts.

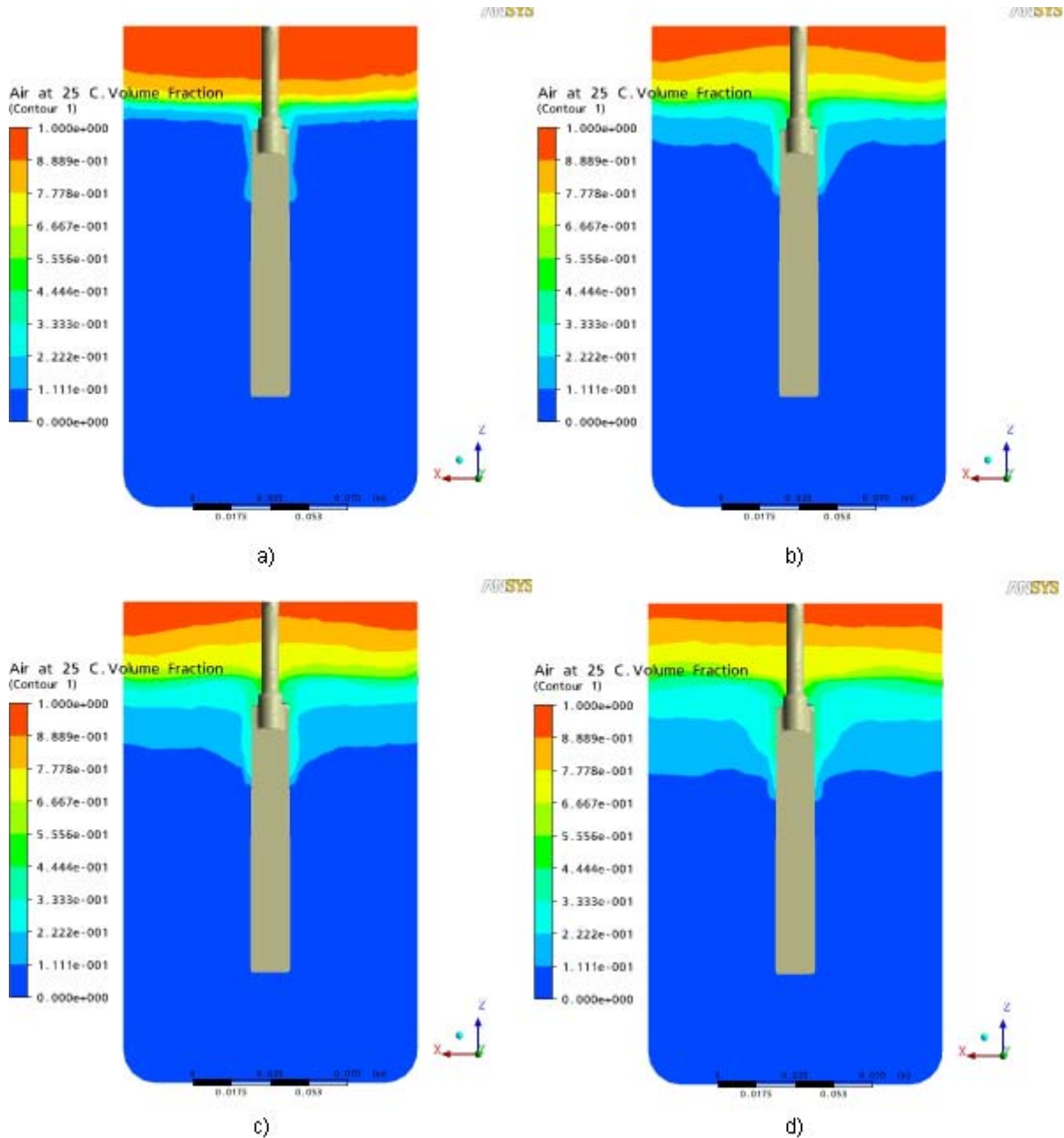


Figura 3.17. Fracció de volum d'aire en l'agitador de pala a diferent nombre d'iteracions: a) 2.500; b) 5.000; c) 7.500; d) 10.000.

S'observa com l'aire va entrant poc a poc a l'interior de l'aigua per l'eix de la pala, ja que la fracció de volum d'aire és cada cop més gran. Es pot intuir la creació d'un vòrtex a la zona de color verd que equival a una fracció d'aire al voltant de 0,5, és a dir, meitat aigua i meitat aire.

El Post - procés disposa de l'eina gràfica *Isosurface*, mitjançant la qual es pot recrear una superfície que passi per punts que tenen un mateix valor de pressió, velocitat, etc. Aquesta opció s'usarà per recrear una superfície que tingui un mateix valor de fracció de volum d'aire (Figura 3.18).

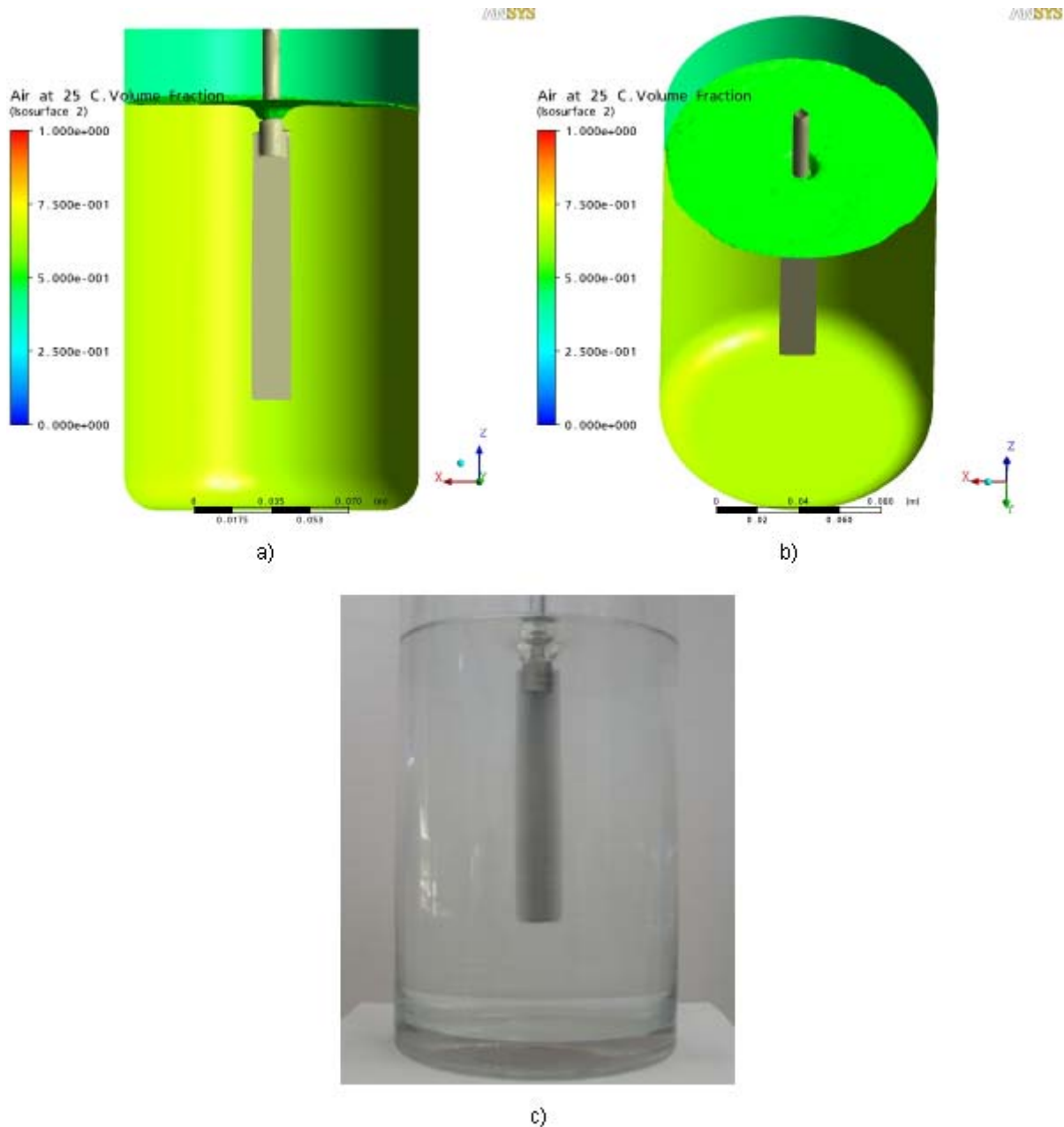


Figura 3.18. Vòrtex format en l'agitador de paleta; a) simulat, vista 1 (fracció de volum d'aire = 0'5); b) simulat, vista 2; c) real.

El vòrtex del model és pràcticament idèntic al real. Ara només falta veure el grau d'agitació. Per fer això s'utilitzarà una *Isosurface*, però ara de velocitat de l'aigua. Definint una velocitat concreta genera un bulb amb totes les zones on l'aigua es mou a aqueta velocitat, de

manera que podem veure les regions més agitades (Figura 3.19). Es definirà l'opció de la *Isosurface* que es vegin les cares del davant perquè sinó només es veuria una bola de color blau. També s'inclourà al gràfic els vectors de velocitat de l'aigua. El pla de dibuix dels vectors serà el mateix que s'ha definit abans pel gràfic de fracció de volum d'aire.

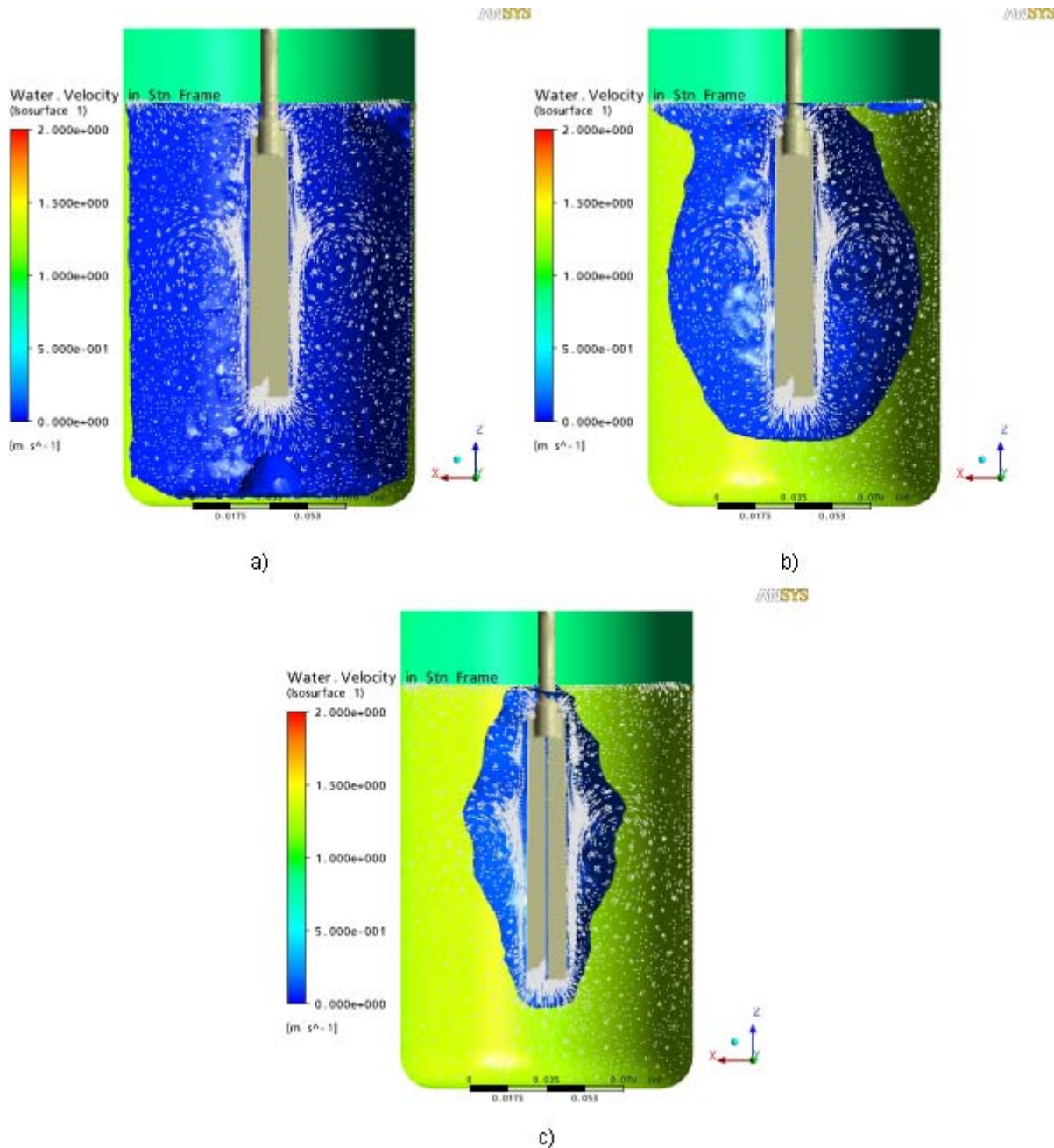


Figura 3.19. *Isosurface* de velocitat d'aigua en l'agitador de paleta:

a) $v = 0'05$ m/s; b) $v = 0'08$ m/s; c) $v = 0'12$ m/s.

El volum d'aigua que engloba aquesta *Isosurface* es mou a una velocitat major o igual a la definida, en canvi la resta es mou a una velocitat inferior. Sabent això s'arriba a la conclusió

que no hi ha gaire moviment dins el tanc, donat que el bulb agafa tot el volum d'aigua a una velocitat de tant sols 0'06 m/s. A la Figura 3.20 es pot veure els vectors de velocitat de la zona més propera a la pala.

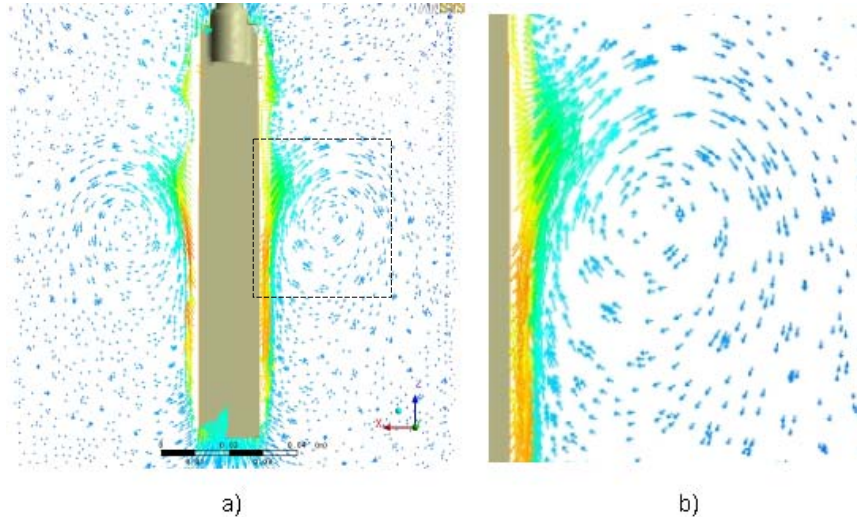


Figura 3.20. Vectors de velocitat de l'aigua de l'agitador de paleta: a) alçat; b) zoom del remolí que es formen al costat dret.

No es disposa de cap model teòric per contrastar el patró de flux ja que no és una geometria estàndard, però la creació dels remolins a la part central de la pala semblen bastant lògics.

3.7.2 Impulsor de turbina plana

En aquest cas la convergència del Solver no va ser tant ràpida, de manera que es va haver d'allargar fins a les 15.000 iteracions, però el valor de convergència va ser més petit, per tant millor (Figura 3.21).

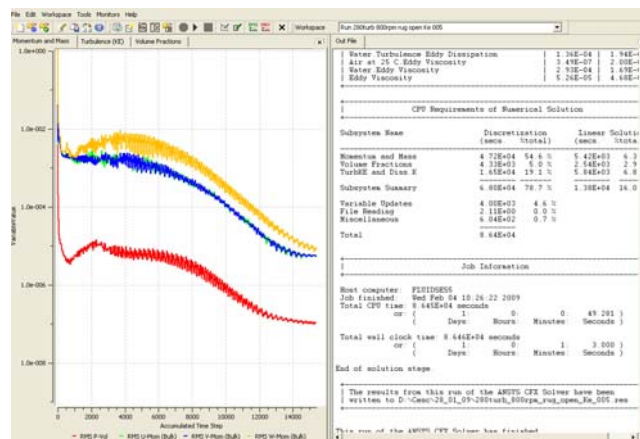


Figura 3.21. Solver de l'agitador de turbina plana.

Per observar l'evolució es va aturar la simulació en diferents instants. Els resultats analitzats amb el Post – procés es poden veure a la Figura 3.22.

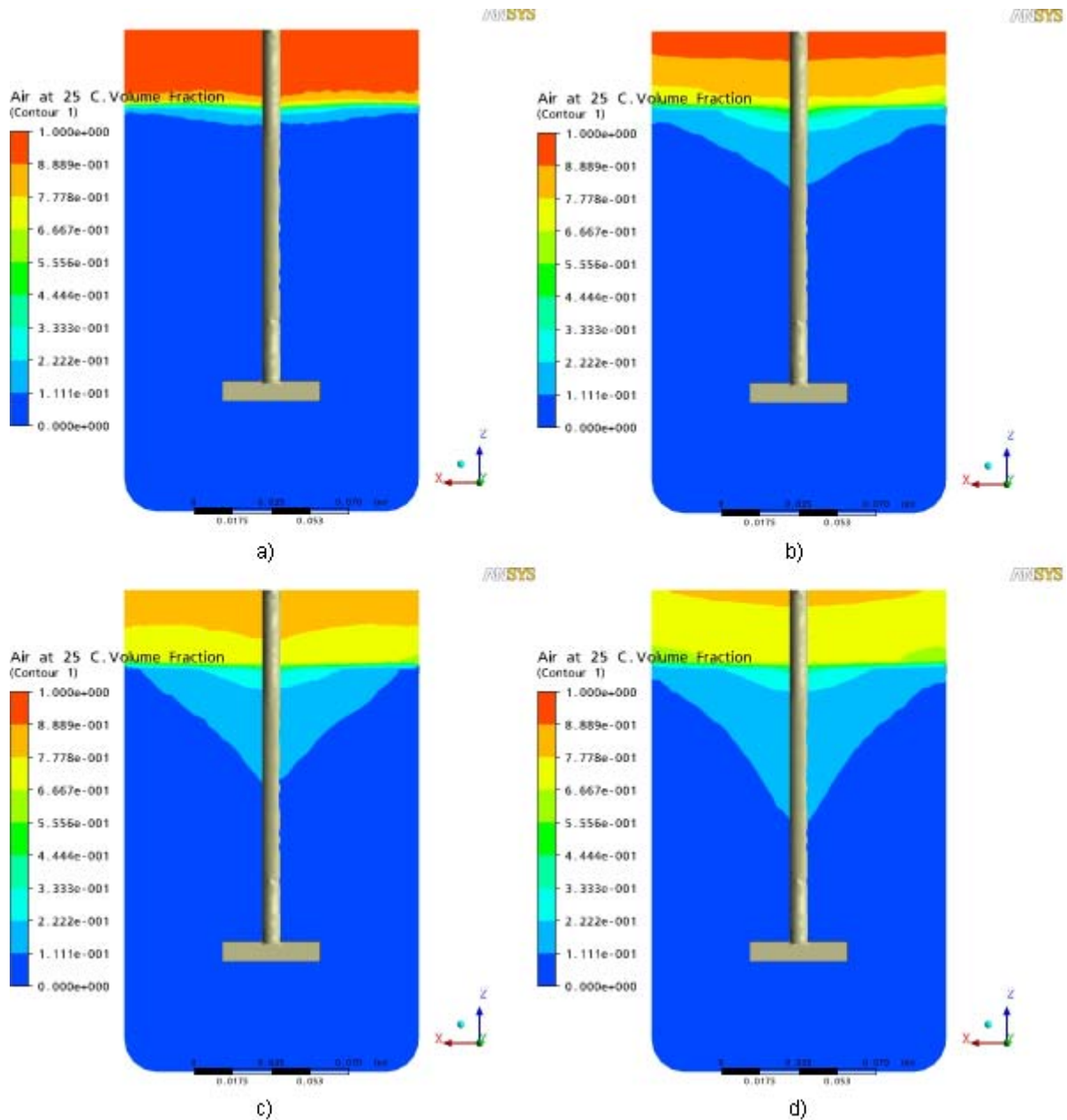


Figura 3.22. Fracció de volum d'aire en l'agitador de turbina plana a diferent nombre d'iteracions: a) 2.500; b) 5.000; c) 10.000; d) 15.000.

Novament s'observa com l'aire va entrant per la zona de l'eix. Aquest cop la quantitat d'aire que entra és menor però la distància que s'endinsa en l'aigua és major. Com es pot veure el nombre d'iteracions afecta en l'aire entrant, per tant al cap de moltes iteracions es tindria la forma que s'observa però amb una major quantitat d'aire, és per això que la fracció de volum

d'aire que s'ha d'associar a la *Isosurface* per recrear el vòrtex és la que surt de la superfície de contacte entre l'aigua i l'aire (Figura 3.23).

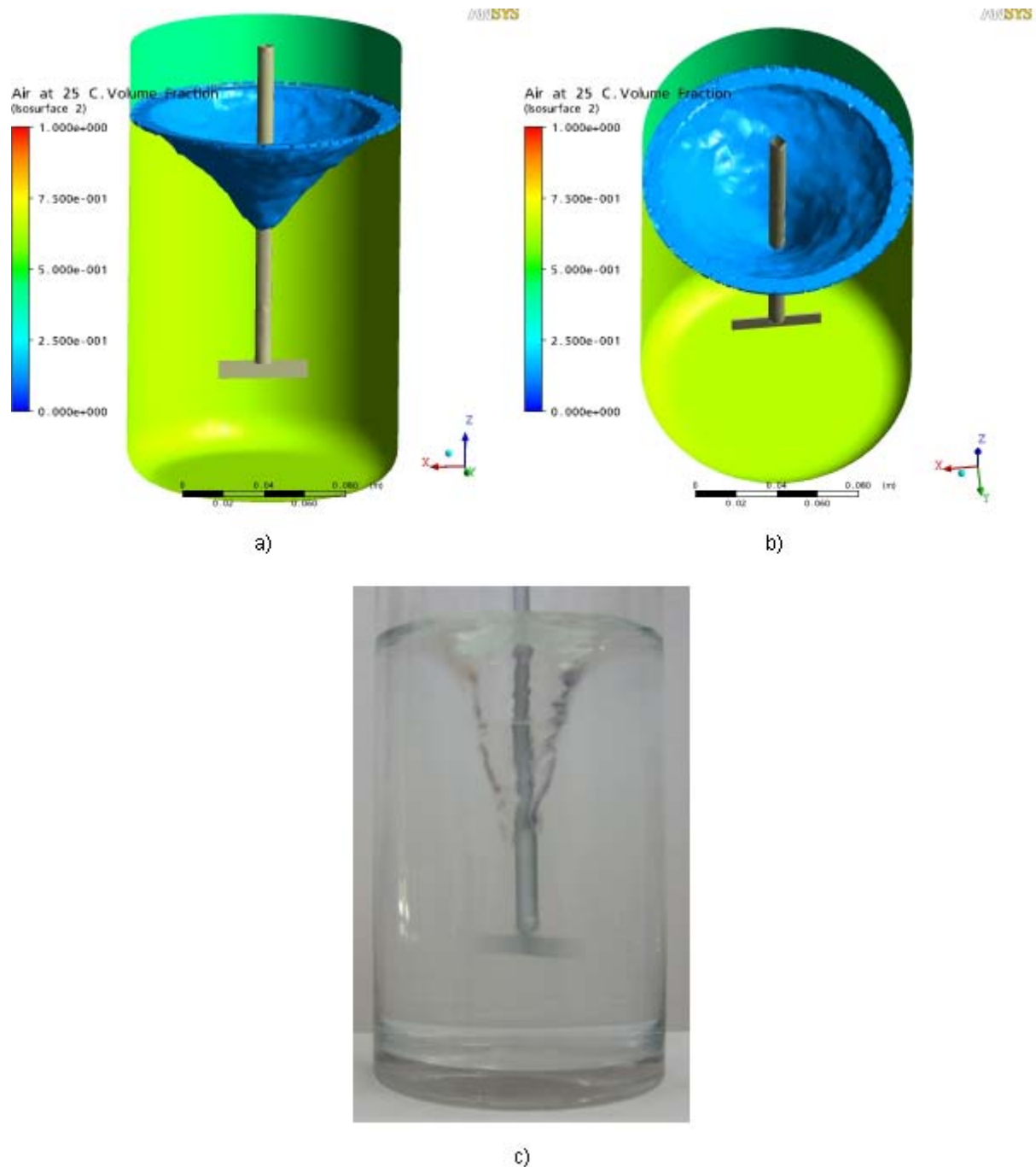


Figura 3.23. Vòrtex format en l'agitador de turbina plana; a) simulat, vista 1 (fracció de volum d'aire = 0'12); b) simulat, vista 2 ; c) real.

La semblança entre els el vòrtex generat per la simulació del software i el real és notable. En aquest cas la intensitat de l'agitació és bastant més elevada que en el cas de l'impulsor de

paleta (Figura 3.24). Aquest fet comporta que el vòrtex sigui major, tal i com hem vist anteriorment.

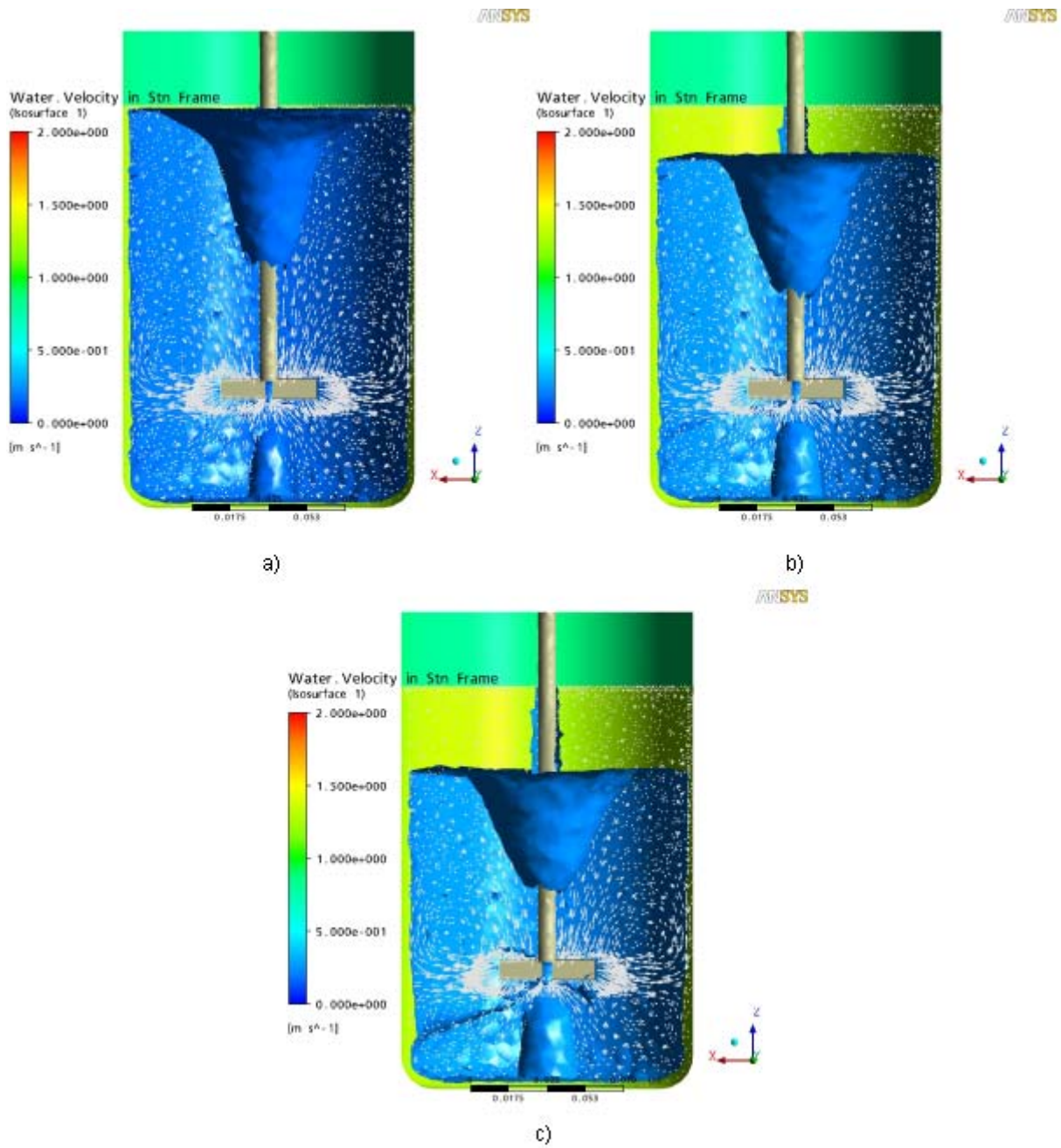


Figura 3.24. *Isosurface* de velocitat d'aigua en l'agitador de turbina plana:
a) $v = 0{,}17$ m/s; b) $v = 0{,}20$ m/s; c) $v = 0{,}22$ m/s.

Tal i com s'observa a la Figura 3.24, la velocitat mínima d'agitació en qualsevol punt del tanc és de 0'17 m/s. La superfície de velocitat que es crea a la zona de l'eix és deguda a la rugositat d'aquest.

Per comparar el patró de flux es disposa del model teòric de l'agitador de turbina de disc, el qual al estar format també per pales planes genera el mateix tipus de flux (Figura 3.25).

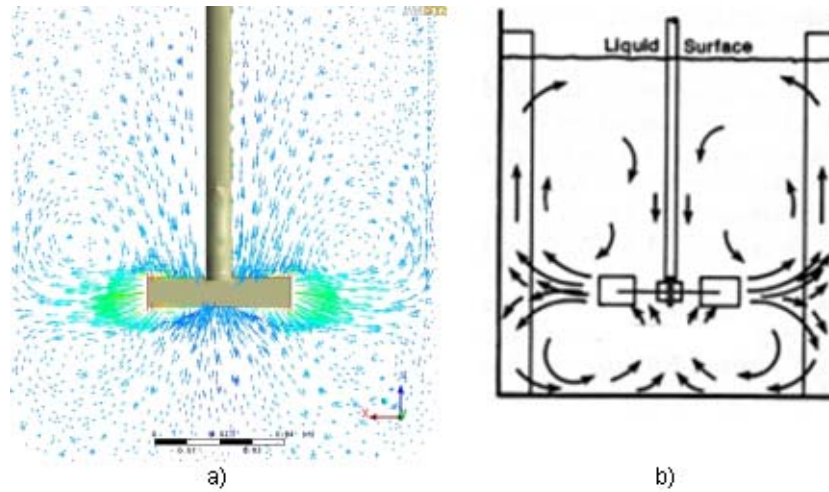


Figura 3.25. Patrons de flux en l'agitador de turbina plana: a) simulat; b) model teòric (Tatterson).

Es pot veure una gran semblança entre les línies de corrent de la simulació i les teòriques. Els remolins que es formen en la simulació són més petits perquè el tanc no incorpora deflectors, els quals fan pujar l'aigua impulsada cap a la superfície.

3.7.3 Impulsor de turbina inclinada

La convergència dels residuals va succeir al voltant de les 5.000 iteracions (Figura 3.26), però es va deixar córrer el programa fins a les 10.000 per obtenir millors resultats.

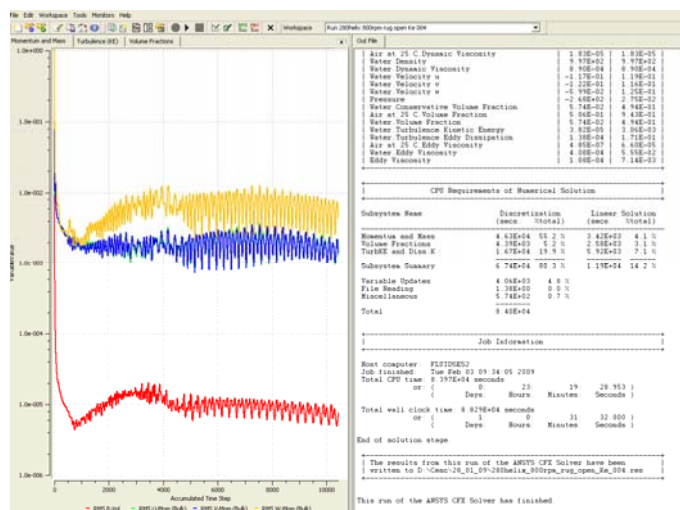


Figura 3.26. Solver de l'agitador de turbina inclinada.

Es va aturar la simulació cada 2.500 iteracions. Els resultats obtinguts es poden veure a la Figura 3.27.

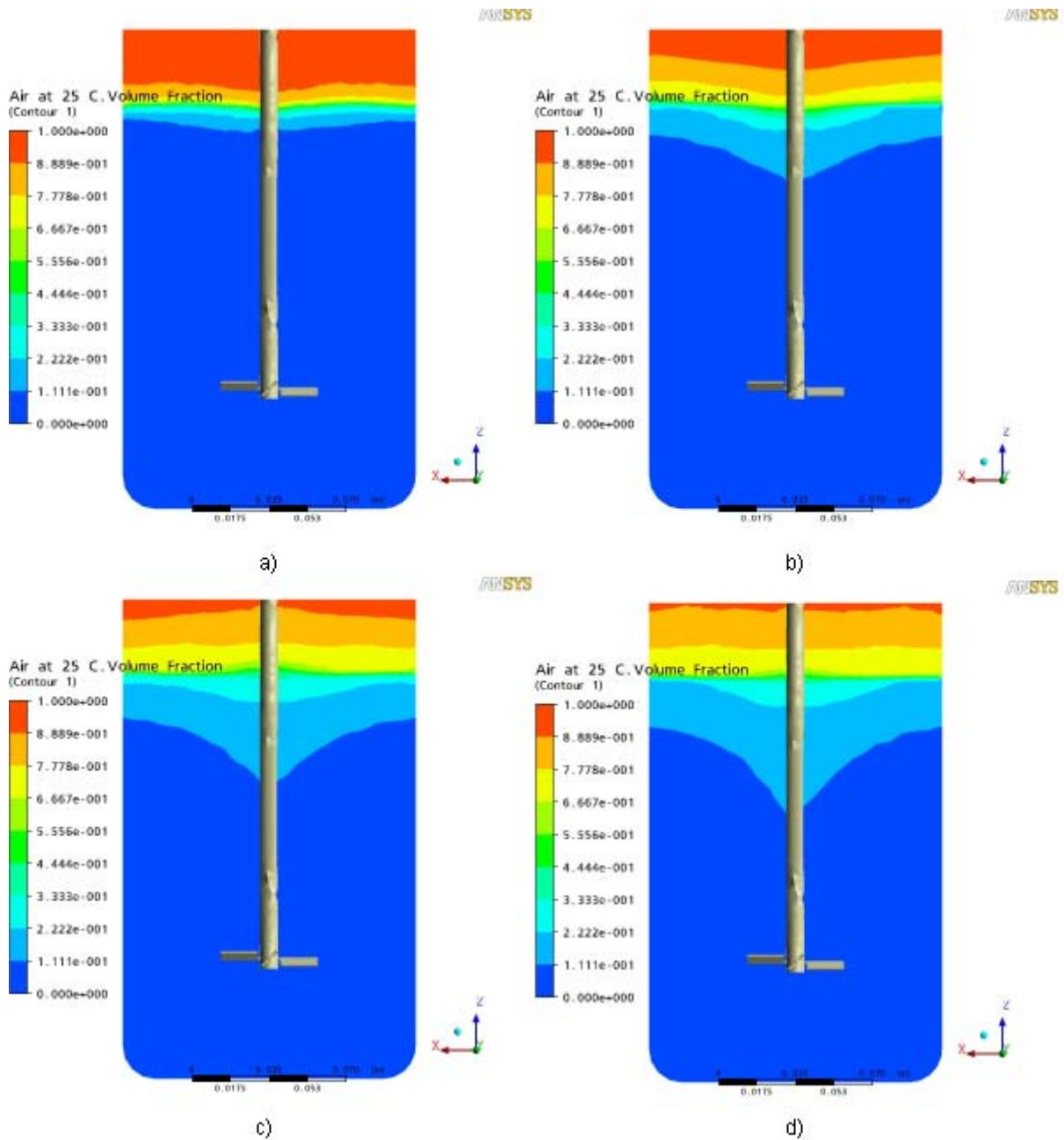


Figura 3.27. Fracció de volum d'aire en l'agitador de turbina inclinada a diferent nombre d'iteracions: a) 2.500; b) 5.000; c) 7.500; d) 10.000.

Es pot veure com el vòrtex que es forma no és excessivament gran. L'entrada d'aire succeeix d'una forma bastant semblant a la de l'agitador de paleta, tot i que en aquest cas el vòrtex sembla tenir una mida major.

A la Figura 3.28 es pot veure diferents vistes de la recreació virtual i la forma real del vòrtex que es genera en l'agitació.

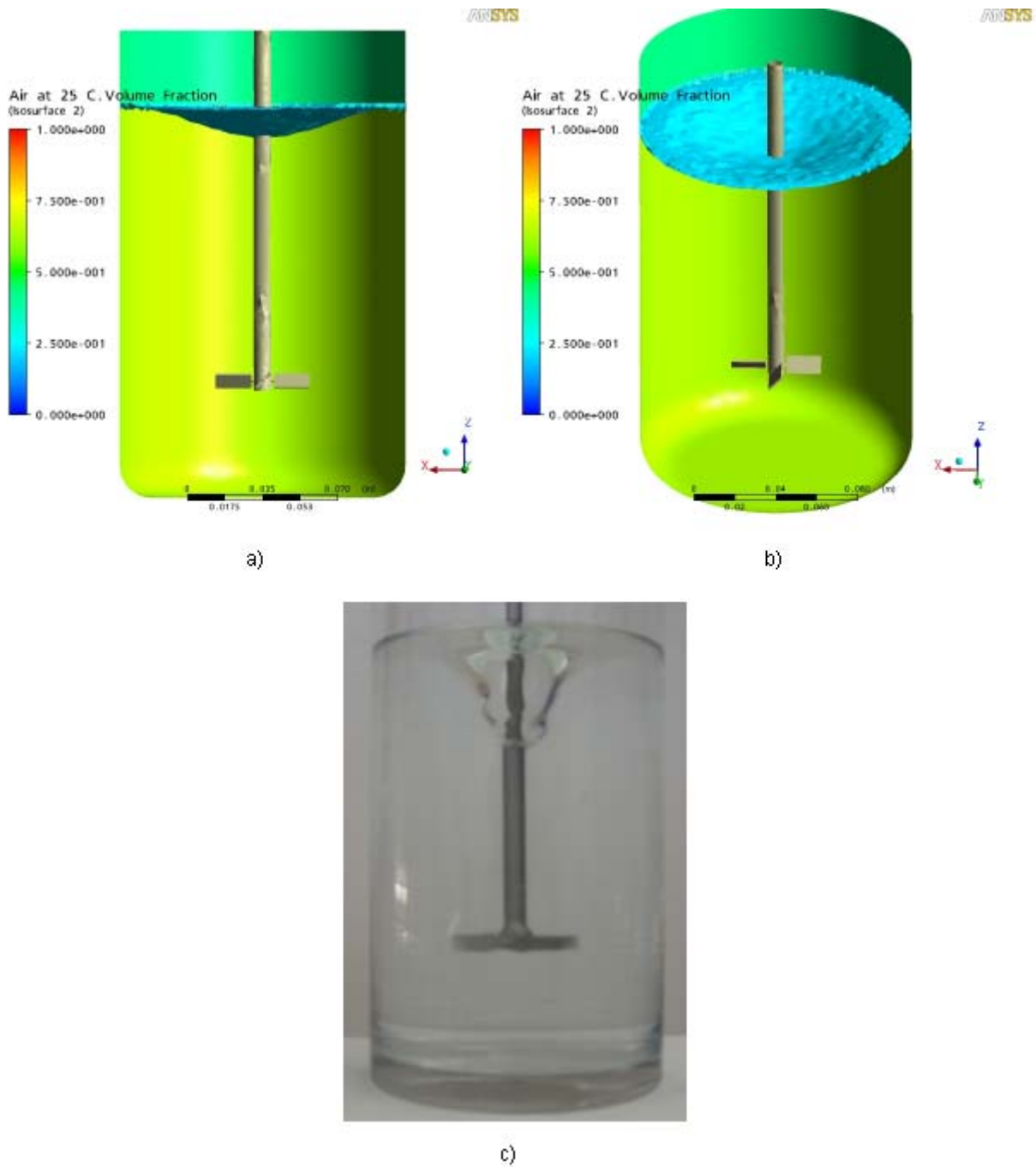


Figura 3.28. Vòrtex format en l'agitador de turbina inclinada; a) simulat, vista 1 (fracció de volum d'aire = 0.2); b) simulat, vista 2 ; c) real.

En aquest cas la simulació no és tant semblant com en els 2 casos anteriors, però la forma del vòrtex donada per la simulació continua sent bastant bona. S'hauria de realitzar un major nombre d'iteracions per obtenir un resultat millor.

La intensitat d'agitació és molt semblant al cas anterior, tot i que les línies de corrent segueixen un patró diferent (Figura 3.29).

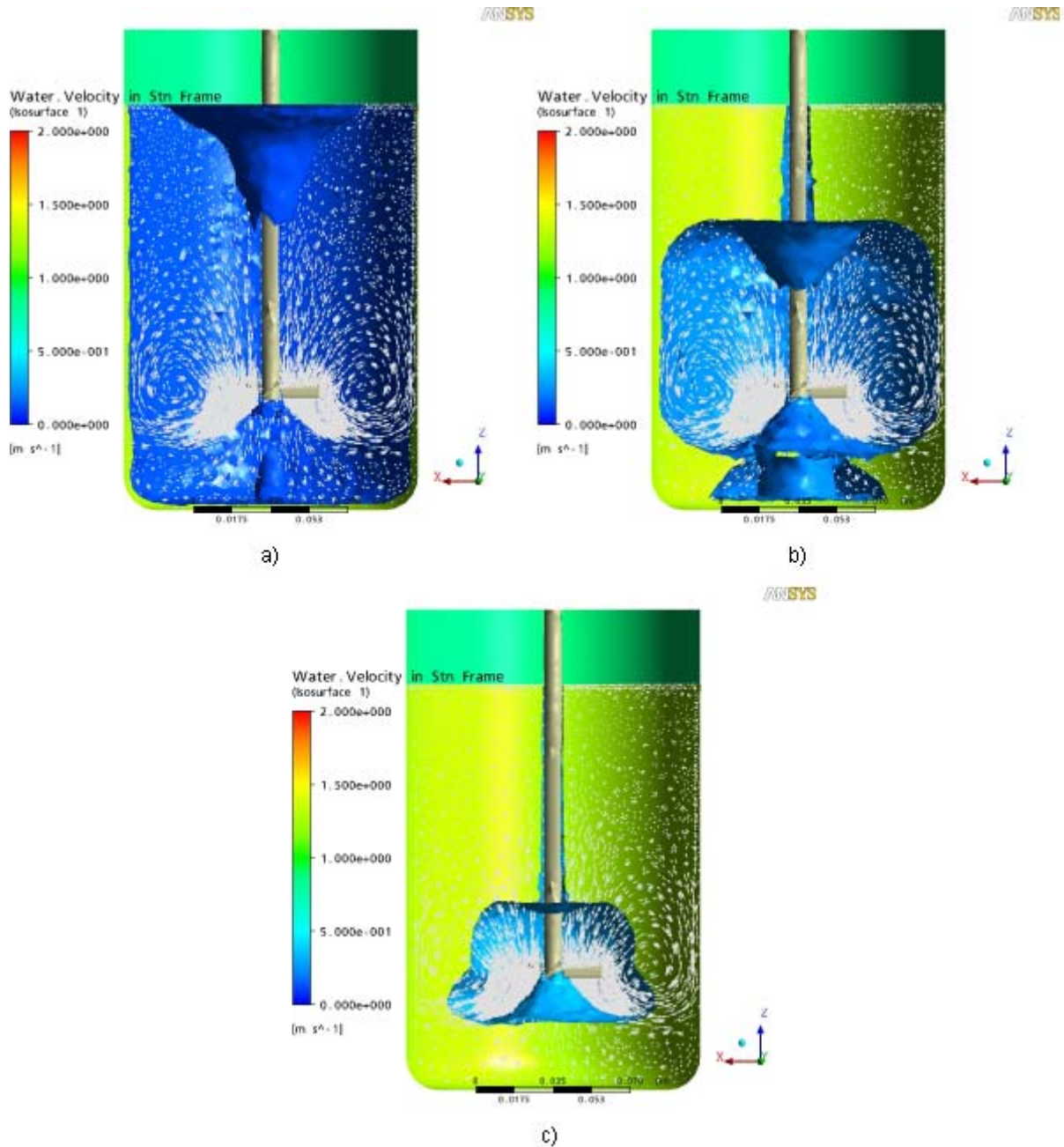


Figura 3.29. *Isosurface* de velocitat d'aigua en l'agitador de turbina inclinada
a) $v = 0'12$ m/s; b) $v = 0'15$ m/s; c) $v = 0'20$ m/s.

La velocitat màxima d'agitació en qualsevol punt del tanc és de 0'12 m/s, una mica inferior a la del cas anterior.

Per aquest tipus d'impulsor es disposa novament d'un patró de flux teòric (Figura 3.30).

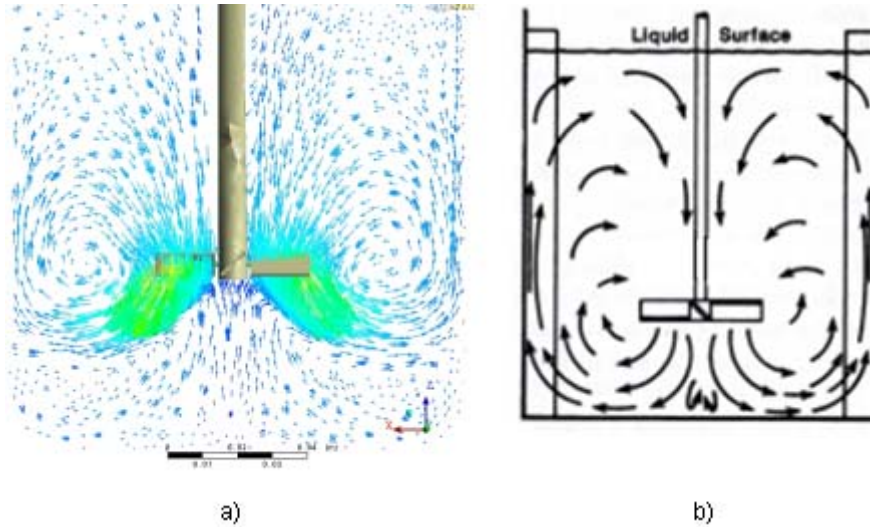


Figura 3.30. Patrons de flux en l'agitador de turbina inclinada: a) simulat; b) model teòric (Tattersson).

Es comprova com les línies de corrent segueixen el mateix recorregut que les del model teòric. Altre cop la mida dels remolins és menor degut a la manca de deflectors.

3.7.4 Impulsor de turbina de disc

La convergència dels residuals va ser força ràpida, al voltant de les 6.000 iteracions, però es va deixar fins a 10.000, com en la majoria dels casos anteriors (Figura 3.31). El valor al qual van tendir els residuals va ser el més petit de tots els casos llançats.

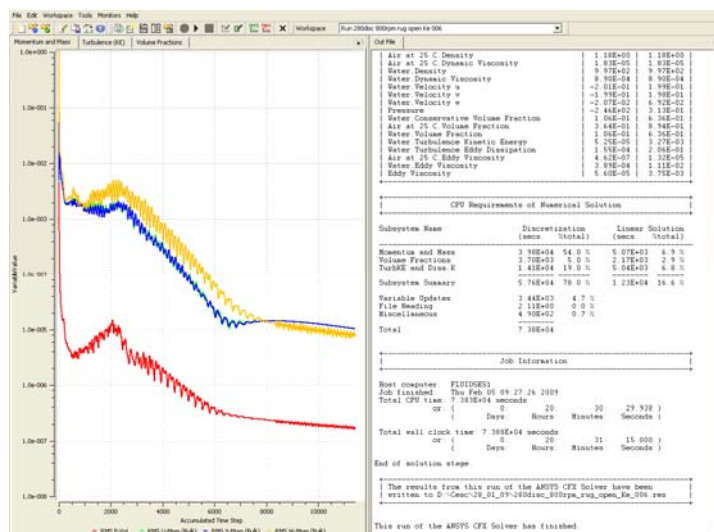


Figura 3.31. Solver de l'agitador de turbina de disc.

Es va aturar la simulació cada 2.500 iteracions per visualitzar-ne l'evolució com en els altres casos (Figura 3.32).

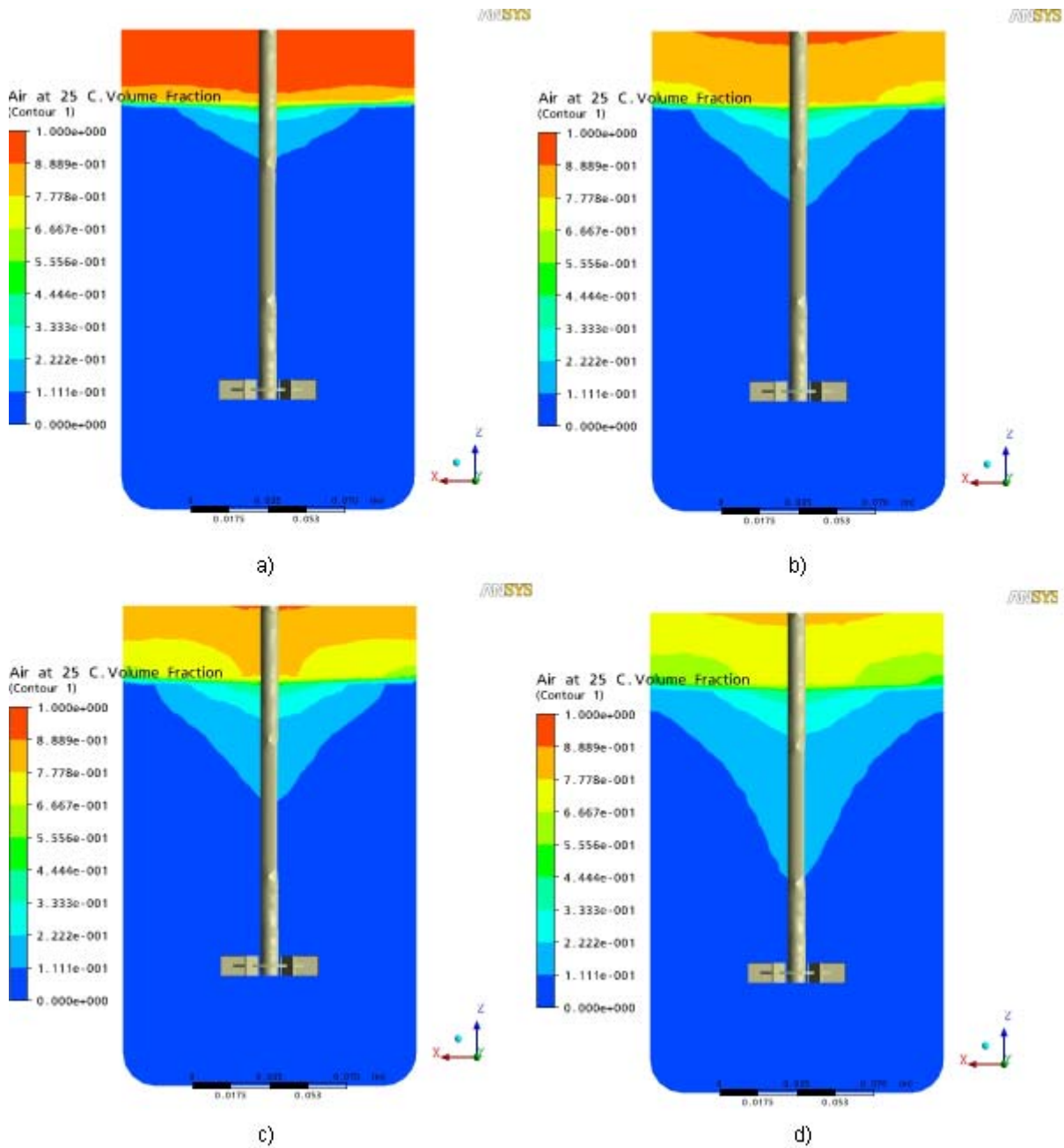


Figura 3.32. Fracció de volum d'aire en l'agitador de turbina de disc a diferent nombre d'iteracions: a) 2.500; b) 5.000; c) 7.500; d) 10.000.

En aquest cas sembla que el vòrtex generat és bastant important, el més gran dels casos vistos fins ara. Es veu com en el canvi entre 7.500 i 10.000 iteracions, l'aire entra molt ràpidament.

En les pràctiques realitzades al laboratori, era l'únic cas que el vòrtex arribava fins a l'impulsor (Figura 3.33).

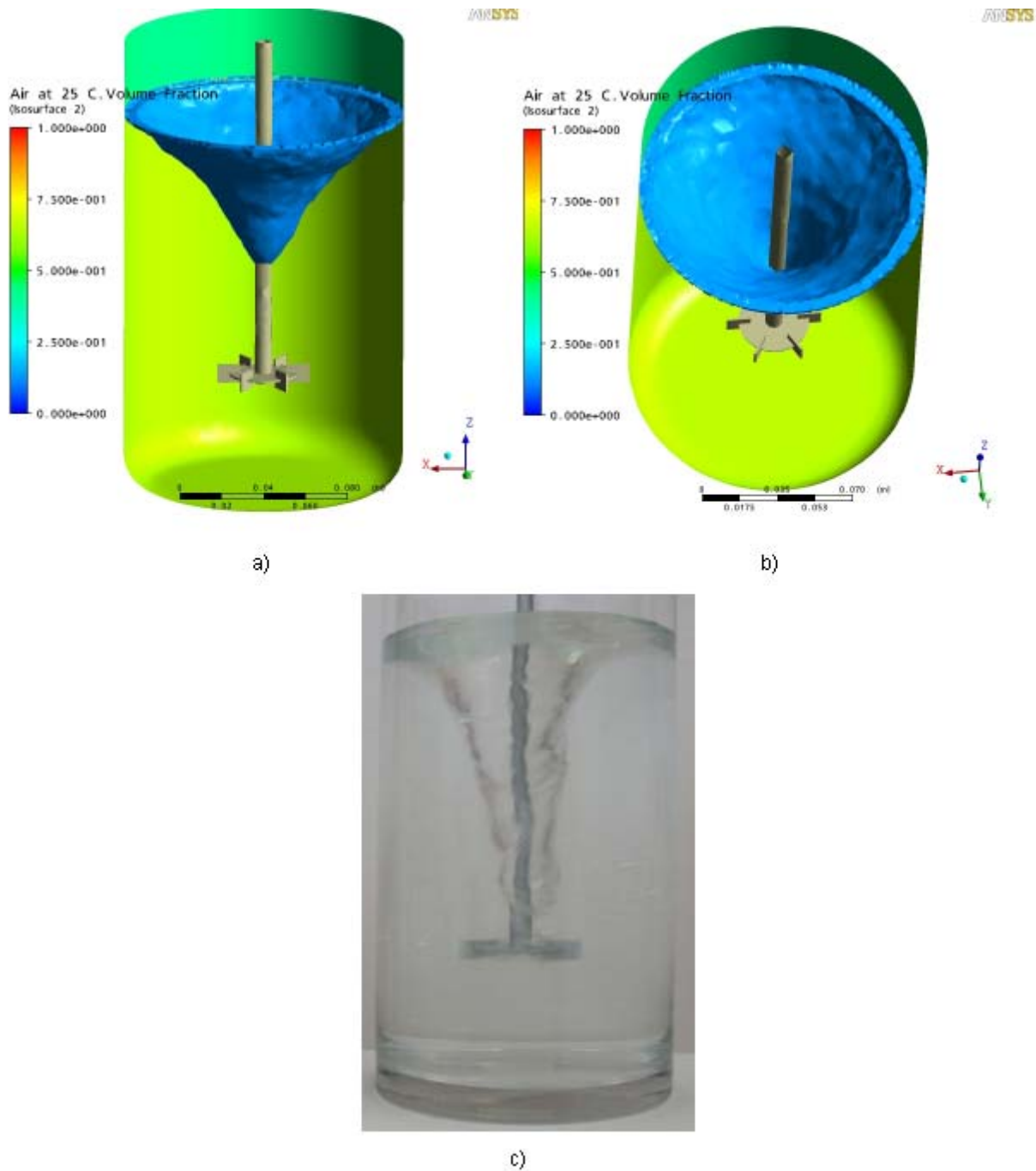


Figura 3.33. Vòrtex format en l'agitador de turbina de disc; a) simulat, vista 1 (fracció de volum d'aire = 0'12); b) simulat, vista 2 ; c) real.

La recreació del Post – procés és força fidel a la realitat, tot i que s'hauria de deixar iterar més el *Solver* perquè l'entrada d'aire fos major i el vòrtex generat fos més gran i estilitzat.

La intensitat d'agitació d'aquest cas és la més elevada de tots els casos exposats (Figura 3.34), la qual cosa és lògica ja que un vòrtex major també ha de comportar un moviment més gran.

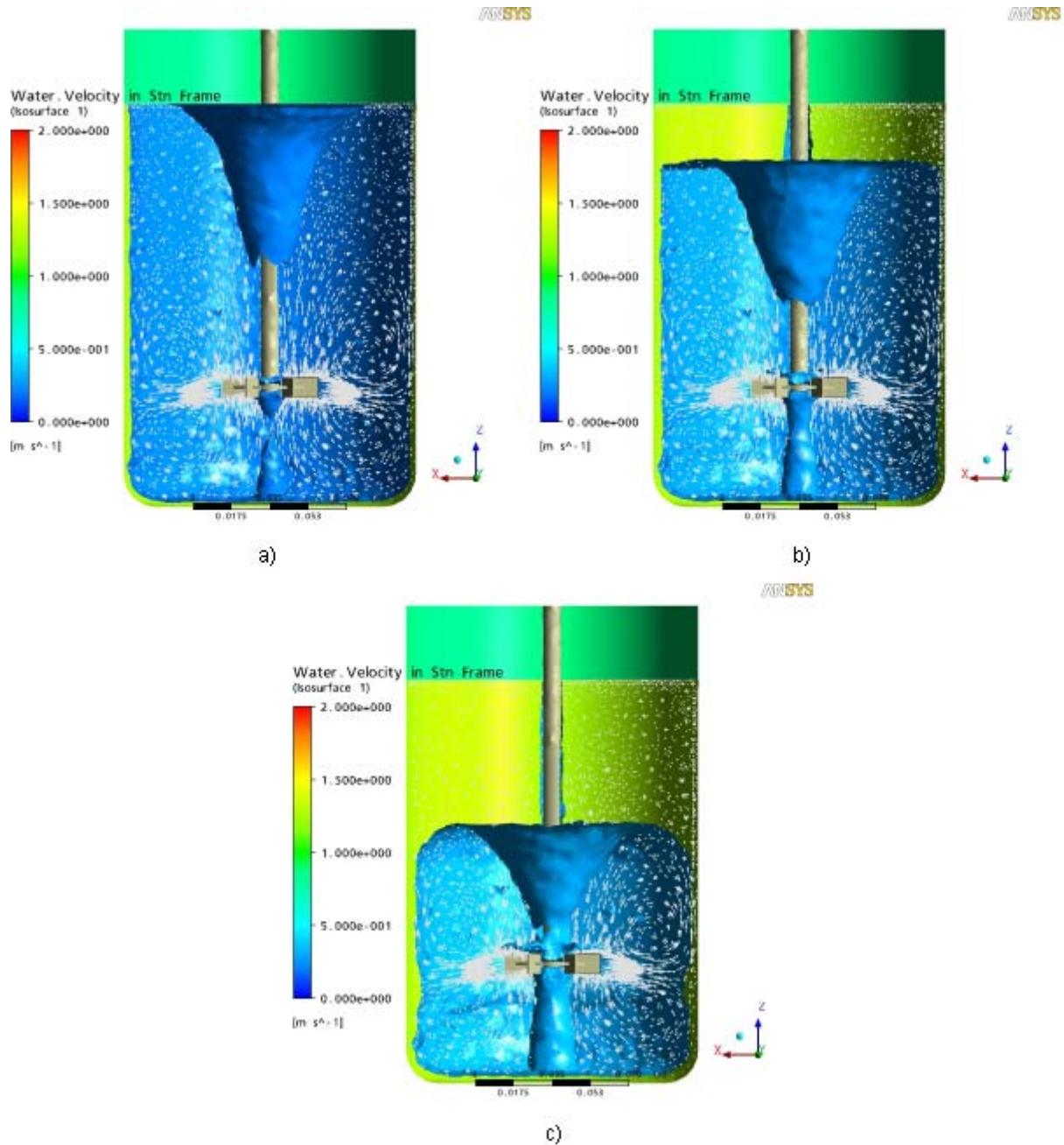


Figura 3.34. Isosurface de velocitat d'aigua en l'agitador de turbina de disc:

a) $v = 0'20$ m/s; b) $v = 0'25$ m/s; c) $v = 0'30$ m/s.

La velocitat mínima a la qual es mou qualsevol zona del volum aigua és de 0'20 m/s.

Per comparar les línies de corrent obtingudes disposem del model teòric per aquesta geometria (Figura 3.35).

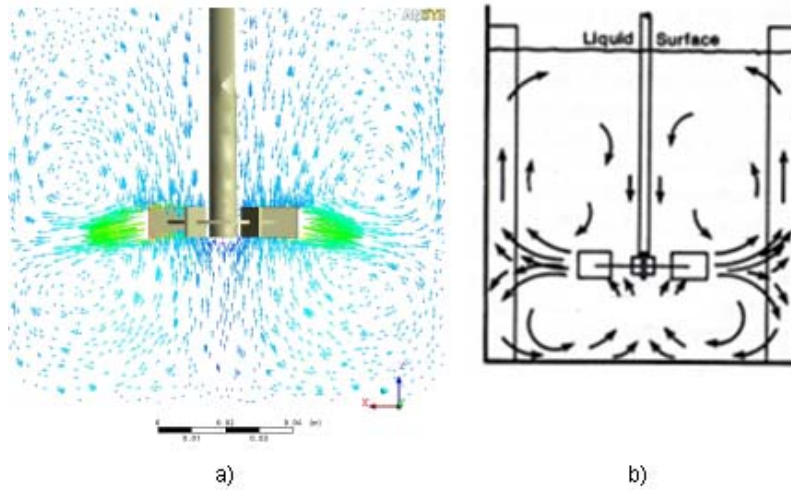


Figura 3.35. Patrons de flux en l'agitador de turbina de disc: a) simulat; b) model teòric (Tatterson).

De nou s'observa com els vectors de velocitat generen 2 remolins, igual que al model teòric.

3.7.5 Sisena part de l'impulsor de turbina de disc

Per poder comparar si treballant amb volums parcials s'obtenen els mateixos resultats que amb volums sencers, es va realitzar el mateix nombre d'iteracions, 10.000. Els valors de convergència són pràcticament idèntics (Figura 3.36), tot i que s'hi arriba més ràpidament que amb el volum complet.

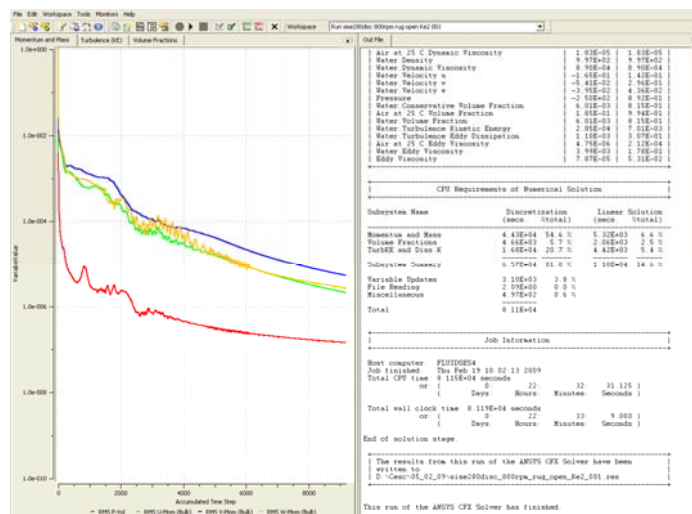


Figura 3.36. Solver de la sisena part de l'agitador de turbina de disc.

En el Post – procés només es disposa d'una sisena part de la geometria, de manera que per generar un volum complet s'ha d'executar l'opció Transformació Determinada del programa, mitjançant la qual es pot crear un volum complet en base a 6 volums com el que tenim.

Es va aturar el *Solver* igual que en el cas anterior, cada 2.500 iteracions (Figura 3.37).

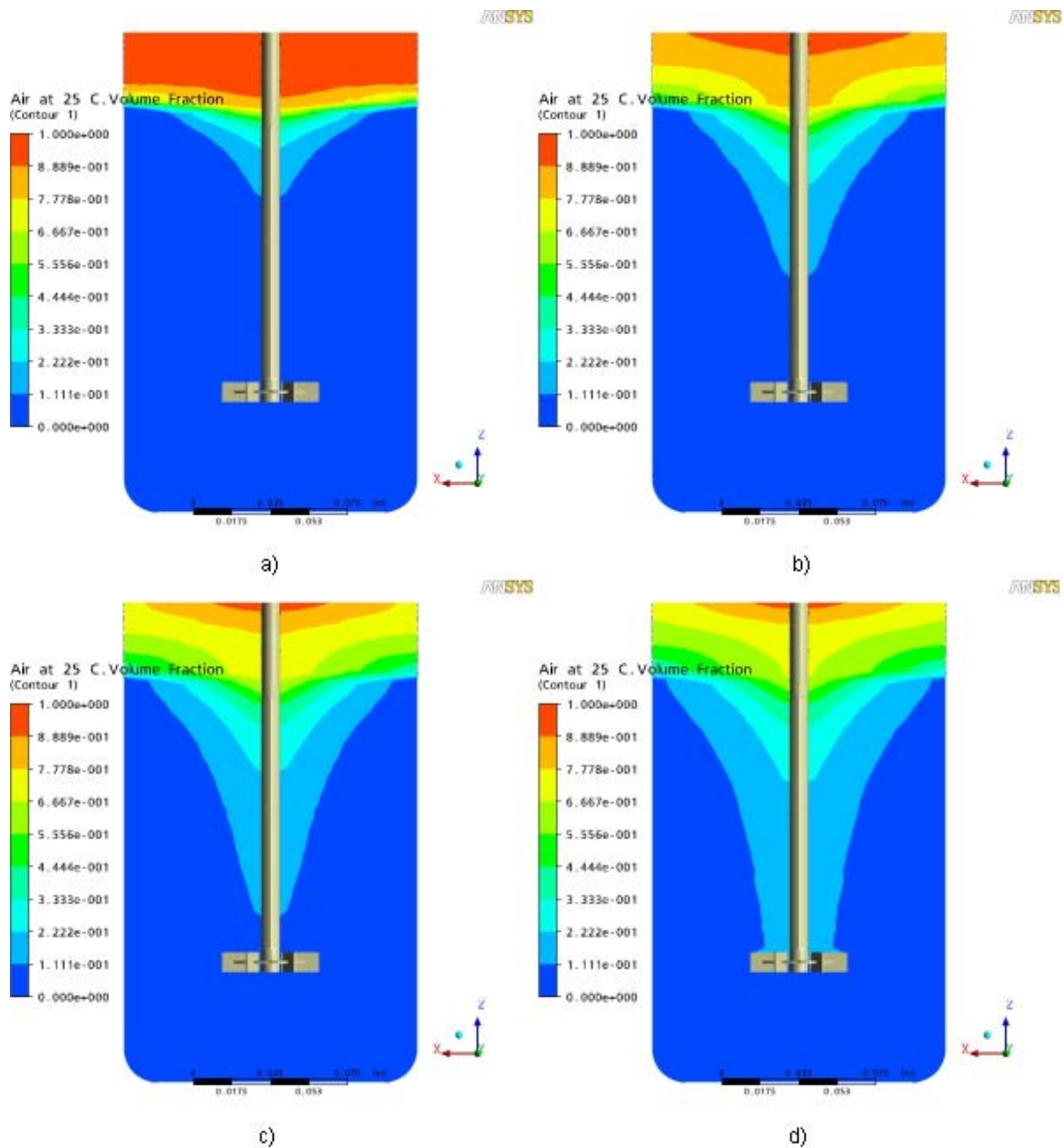


Figura 3.37. Fracció de volum d'aire en la sisena part de l'agitador de turbina de disc a diferent nombre d'iteracions: a) 2.500; b) 5.000; c) 7.500; d) 10.000.

S'observa com el resultat obtingut és el mateix, però el nombre d'iteracions necessàries per arribar a un mateix estat és molt menor. En aquest cas es veu com l'aire arriba fins a

l'impulsor amb tant sols 10.000 iteracions, quan en el cas del volum complet no hi arribava mai. A la Figura 3.38 es poden veure diferents vistes del vòrtex que es genera a la simulació i la captura real en el laboratori.

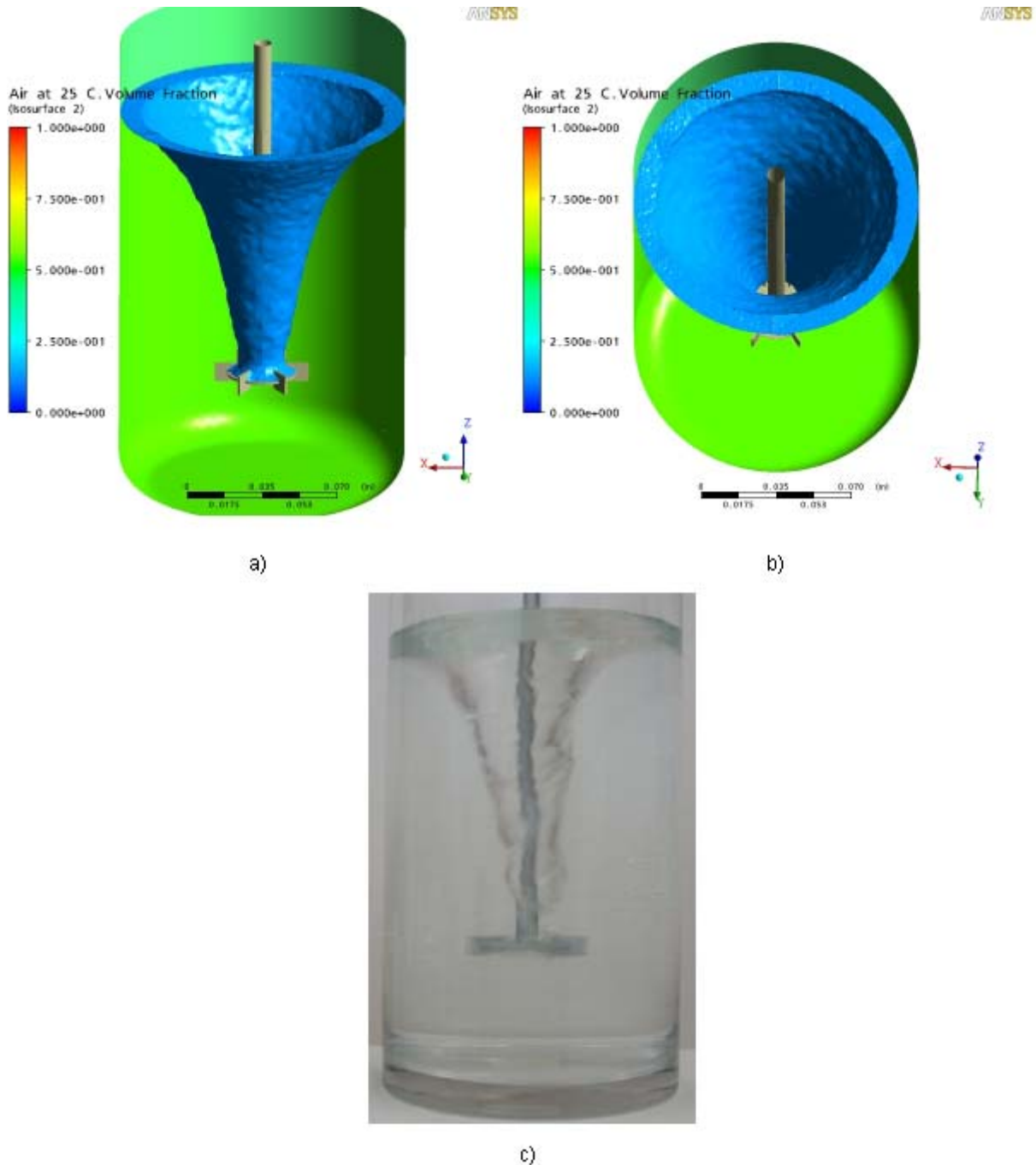


Figura 3.38. Vòrtex format en l'agitador de turbina de disc; a) simulat 1/6, vista 1 (fracció de volum d'aire = 0'12); b) simulat 1/6, vista 2 ; c) real.

La fracció de volum d'aire utilitzada per generar els gràfics és la mateixa que en el cas del volum complet. En aquest cas es pot veure com el vòrtex format s'ha fet més llarg i estret,

exactament igual que a la realitat. Augmentant la fracció de volum d'aire s'obtidria un vòrtex més petit, com el que s'ha obtingut en la simulació amb el volum sencer, la qual cosa confirma la teoria abans exposada que a mesura que s'augmenta el nombre d'iteracions la seva forma segueix sent aproximadament la mateixa però augmenta la quantitat d'aire. De tots els casos considerats aquest és sense cap mena de dubte el que ha donat un millor resultat. A la Figura 3.39 es poden veure els gràfics de velocitat d'agitació de l'aigua.

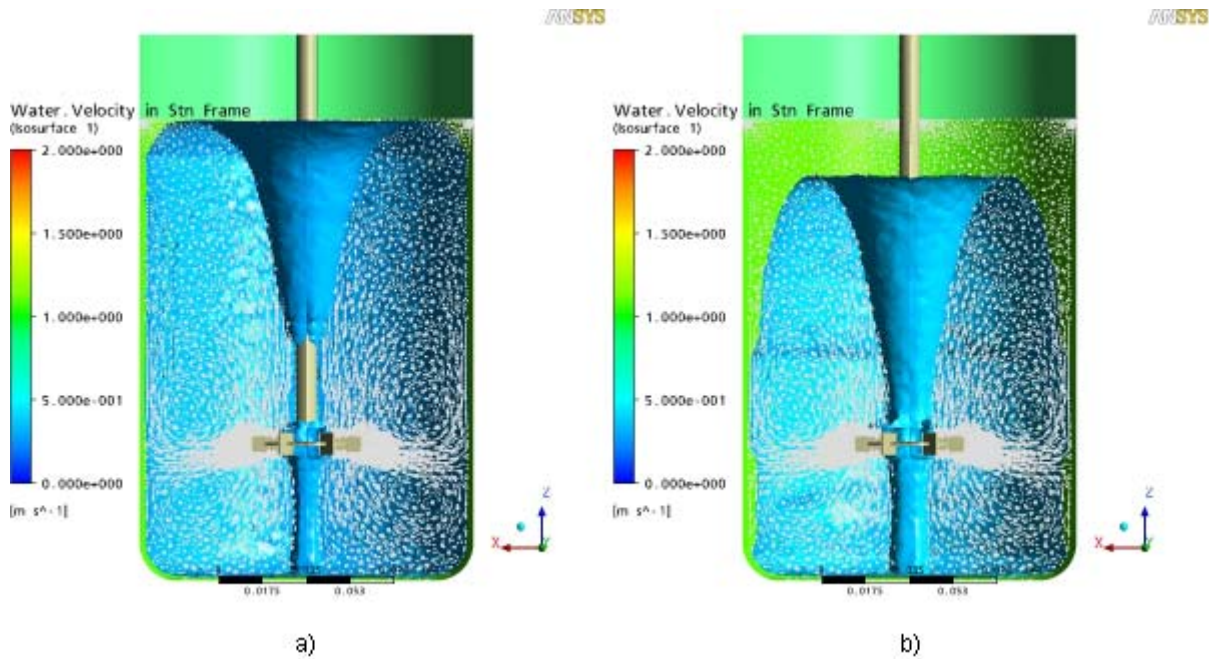


Figura 3.39. *Isosurface* de velocitat d'aigua en la sisena part de l'agitador de turbina de disc: a) $v = 0'30$ m/s; b) $v = 0'35$ m/s.

La velocitat d'agitació és força més gran que treballant amb el volum sencer, la qual cosa demostra que la mida del vòrtex és directament proporcional a la quantitat de moviment. En aquest cas la velocitat mínima de l'aigua és de $0'30$ m/s quan abans era de tant sols $0'20$ m/s, de manera que la diferència és considerable.

Les línies de corrent formen exactament el mateix patró que treballant amb el volum complet.

3.8. Comparació de potències

Finalment es farà una comparació entre la potència teòrica que s'hauria de tenir a l'eix del motor de l'agitador, amb la mesurada experimentalment al laboratori i la calculada pel

programa de simulació Ansys CFX 11.0. Tots els càlculs realitzats es troben a l'Annex D, els resultats dels quals es poden veure resumits a la Taula 3.2.

| | | VALORS DE POTÈNCIA | | |
|------------------|-----------------------------|--------------------|------------------|-------------------|
| | | TEÒRICA (W) | EXPERIMENTAL (W) | COMPUTACIONAL (W) |
| TIPUS D'AGITADOR | Paleta | - | 0'067 | 0'055 |
| | Turbina plana | 0'66 | 0'46 | 0'51 |
| | Turbina inclinada | 0'50 | 0'28 | 0'32 |
| | Turbina de disc | 2'24 | 0'99 | 1'08 |
| | Sisena part turbina de disc | - | - | 1'05 |

Taula 3.2. Potència a l'eix pels diferents agitadors.

Com es pot observar existeix una gran semblança entre els valors de potència experimental i computacional, en canvi entre aquests dos i la teòrica els resultats no són tant similars. L'explicació a aquest fet és que pel càlcul de la potència teòrica s'usen unes constants empíriques que resulten d'agitacions exactament iguals que les nostres, però amb deflectors a les parets del tanc. Aquests deflectors dificulten la circulació del fluid, per tant és lògic que la potència teòrica hagi sortit més gran.

Finalment també s'ha de comentar que la potència obtinguda treballant amb el volum sencer o tant sols un tros de l'agitador de turbina de disc és pràcticament idèntica. Els resultats de la Taula 3.2 es poden veure en forma de diagrama de barres de la Figura 3.40.

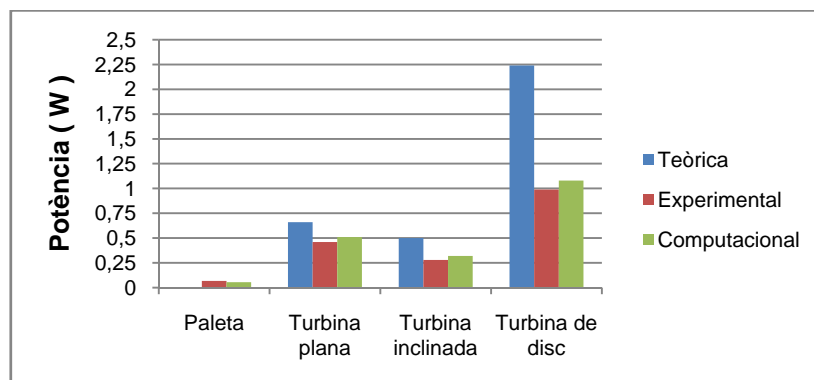


Figura 3.40. Potència a l'eix pels diferents agitadors.

En el gràfic es veu com entre la potència teòrica i les experimental i computacional també existeix una correlació, ja que quan una augmenta les altres també.

3.9. Conclusions

Durant tot aquest apartat del projecte s'ha vist com la generació de vòrtex per cada tipus d'agitador es corresponia en gran mesura amb el que passava experimentalment al laboratori. A continuació s'exposen les principals conclusions que es poden extreure de la validació:

- Al augmentar el nombre d'iteracions també augmenta la quantitat d'aire que entra per l'eix de l'agitador.
- Com més gran és la mida del vòrtex, més quantitat de moviment hi ha en el tanc.
- Els remolins que formen les línies de corrent en la simulació són iguals que els models teòrics.
- Treballar amb volums parcials i un mallat més petit però d'un nombre d'elements semblant, dóna els mateixos resultats però amb menor nombre d'iteracions.
- Com més petit és el valor de convergència del *Solver* i més ràpidament s'hi arriba, millors resultats s'obtenen.
- El moment que s'obté del programa quan es treballa amb volums parcials, s'ha de multiplicar pel nombre de volums parcials que ajuntant-los recreen el volum total, és a dir que si per exemple es treballa amb una quarta part, s'ha de multiplicar per 4.
- Les potències experimental i computacional són pràcticament idèntiques i tenen una correlació important amb la teòrica. Aquesta última és més gran degut a que les constants que s'utilitzen en el càlcul contempnen l'ús de 4 deflectors en el tanc.

Amb tot el que s'ha exposat es pot concloure que la simulació realitzada amb el programa Ansys CFX 11.0 és vàlida.

4. DESCRIPCIÓ DE LA SOLUCIÓ

Un cop demostrat que el programa és vàlid per simulacions d'agitacions bifàsiques, ja es pot generar un nou disseny que millori l'agitació. L'objectiu és evitar l'entrada d'aire dins el líquid, aconseguir que el fluid s'agiti en la seva totalitat de forma homogènia, i tot això fer-ho amb el menor consum de potència possible. Per tal d'evitar l'entrada d'aire es muntaran deflectors en el tanc, amb la qual cosa hauria de desaparèixer el vòrtex que es formava durant la validació. Els deflectors tant poden anar enganxats a les parets del tanc com separats per una petita distància, de manera que es provarà quina de les dues solucions és millor pel nostre cas. Es col·locaran submergits 1 mm dins l'aigua per evitar la creació de remolins darrere d'aquests, la qual cosa provocaria entrada d'aire.

Com que el tanc utilitzat és de vidre, la fixació dels deflectors és complexa, ja que per perforar el vidre es necessita utilitzar unes broques especials i ho ha de realitzar una persona amb una gran destresa i experiència, ja que es pot esquerdar molt fàcilment. És per això que es va pensar fer els deflectors d'un material que es pogués fixar a la paret mitjançant alguna mena de cola d'impacte o silicona. Enganxar vidre amb qualsevol material no és una tasca senzilla, però hi ha un fort adhesiu de plàstics anomenat Nural 92 (Annex F) de la casa Pattex que ho permet. El plàstic pensat per fer els deflectors és el metacrilat ja que té un preu assequible i és fàcilment modelable. El gruix dels deflectors serà de 5 mm.

Per comprovar que realment aquest adhesiu fos suficientment fort com per subjectar els deflectors i si aquests realment fan desaparèixer el vòrtex, es van fixar 3 deflectors a les parets del tanc, es va enrasar d'aigua i es va realitzar l'agitació amb l'impulsor que ens havia creat un vòrtex més gran durant la validació, el de turbina de disc. A la Figura 4.1 es pot veure els resultats obtinguts al laboratori.



Figura 4.1. Agitació de la turbina de disc amb 3 deflectors a 800 rpm.

Com es pot veure el vòrtex desapareix per complet, per tant els deflectors compleixen la seva funció a la perfecció. Els puntets que es mostren a la Figura 4.1 són boletes de paper d'alumini que es van incloure en el tanc per tal d'observar millor el moviment.

Durant aquest apartat es simularà aquesta prova realitzada al laboratori a 800 rpm, tant amb els deflectors enganxats a la paret com separats d'aquesta, per veure, a part de fer desaparèixer el vòrtex, quins canvis comporta en l'agitació. Els deflectors, al crear un obstacle al moviment del fluid, fan augmentar el consum de potència, per tant en les simulacions també es treballarà amb només 3 deflectors ja que és el nombre mínim recomanat. Un cop vist això es realitzarà un nou disseny que millori l'agitació.

Sempre que es pugui es treballarà amb volums parcials ja que hem vist que la convergència de la simulació és més ràpida, degut a que es pot realitzar un mallat millor. El fluid utilitzat serà novament aigua per poder comparar els resultats obtinguts amb els de la validació.

4.1. Impulsor de turbina de disc amb 3 deflectors

Degut a que l'impulsor de turbina de disc incorpora 6 pales i el tanc té 3 deflectors es pot treballar amb tant sols una tercera part del volum, de manera que aquest contingui 2 pales i un deflector. Per generar la geometria es procedirà amb el programa Rhinoceros 4.0. L'única diferència respecte el cas realitzat anteriorment de la sisena part de l'impulsor de turbina de disc és que s'ha de crear un volum extra pel deflector, que és el Volum 5 de la Figura 4.2.

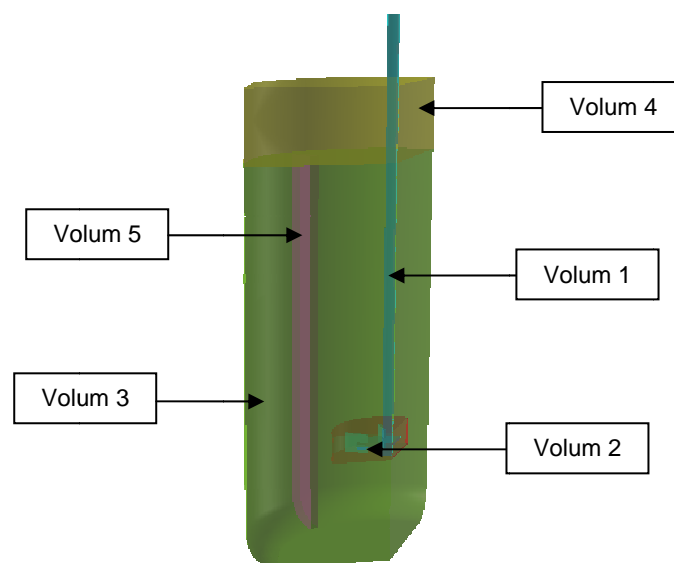


Figura 4.2. Volums generats per la tercera part de l'agitador de turbina de disc amb 3 deflectors.

Un cop realitzats els diferents volums s'exporta cada volum per separat en format IGES. A continuació s'importen amb el Fluent Gambit i es passa a fer les mateixes operacions booleanes que en la validació, però en aquest cas s'ha de realitzar una operació més de sostracció, que és treure el deflector (Volum 5) de l'aigua (Volum 3). Aquest fet no varia el nombre de volums resultants que continua sent de 3, Aire, Aigua i Agitador.

Els processos d'unió de volums i de definició de les diferents zones són exactament iguals, i els deflectors que hem incorporat passen a formar part de la zona de les parets del volum Aigua creada per defecte pel software.

El que es variarà força és el mallat, ja que ara el volum que conté aire no interessa tant com abans degut a que en principi no hi hauria d'haver vòrtex. En el nou mallat es continuarà donant importància a la zona de contacte entre l'aire i l'aigua, a les parets del tanc del volum que conté aigua, a les parets dels deflectors i sobretot a la zona de l'impulsor. El nombre d'elements s'intentarà que sigui d'uns 300.000 elements. Els passos següents són els següents:

- Creació d'una *Size Function*. Com a origen es fixa la interfase Aire – Aigua, totes les cares laterals del volum Aigua i les cares del deflector (cares de color vermell de la Figura 4.3). Els volums adjunts són Aire i Aigua, la mida inicial dels elements del mallat de 2 mm, un factor de creixement de 1'2 i una mida final de 6 mm.



Figura 4.3. Cares d'origen per la *Size Function* de la tercera part de l'agitador de turбина de disc amb 3 deflectors.

- Mallat del volum Agitador. Elements tetraèdrics amb un espaiat de 1 mm.

- Mallat del volum Aire. Elements tetraèdrics amb un espaiat de 6 mm.
- Mallat del volum Aigua. Elements tetraèdrics amb un espaiat de 4 mm.

A la Figura 4.4 es poden veure diferents vistes del mallat resultant.

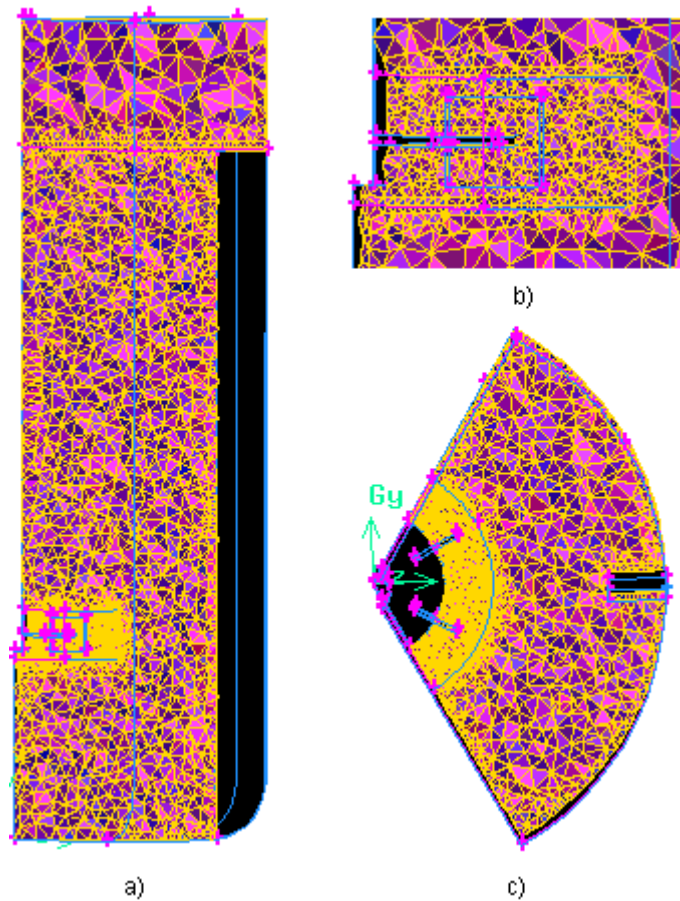


Figura 4.4. Diferents vistes en secció del mallat de la tercera part de l'agitador de turbina de disc amb 3 deflectors: a) alçat; b) ampliació de l'alçat a la zona de l'impulsor; c) planta a l'altura de les pales.

El nombre total d'elements del mallat és de 309.640. El percentatge d'elements de cada rang de qualitat es pot veure a la Taula 4.1.

| PERCENTATGE D'ELEMENTS ENTRE ELS DIFERENTS RANGS DE QUALITAT | | | | | | | | | |
|--|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------|
| 0 - 0'1 | 0'1 - 0'2 | 0'2 - 0'3 | 0'3 - 0'4 | 0'4 - 0'5 | 0'5 - 0'6 | 0'6 - 0'7 | 0'7 - 0'8 | 0'8 - 0'9 | 0'9 - 1 |
| 4'57 | 4'48 | 15'12 | 40'93 | 23'39 | 9'12 | 2'14 | 0'27 | 0 | 0 |

Taula 4.1. Rangs de qualitat del mallat de la tercera part de l'agitador de turbina de disc amb 3 deflectors.

La qualitat del mallat és molt semblant als altres mallats realitzats fins al moment, per tant és prou bona. Un cop acabat el treball amb el Fluent Gambit ja es pot exportar el fitxer del mallat.

La simulació tindrà exactament les mateixes característiques que les realitzades durant la validació del programa per poder comparar resultats. Degut a que el nombre de volums i que les regions definides són les mateixes que amb la simulació de la sisena part del volum de l'impulsor de turbina de disc, en el Pre – procés només caldrà canviar el mallat anterior per l'actual.

Després de canviar el mallat es va llançar el *Solver*, el qual es va aturar a les 5.000 iteracions ja que la convergència va ser molt ràpida (Figura 4.5).

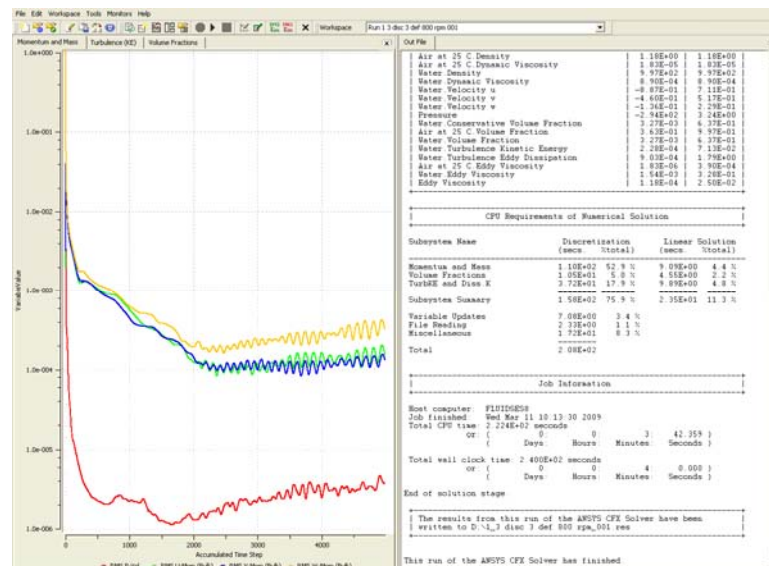


Figura 4.5. Solver de l'agitador de turbina de disc amb 3 deflectors.

Els valors de tendència dels residuals van ser força petits, de l'ordre de $1 \cdot 10^{-4}$, la qual cosa indica que el mallat realitzat és correcte i que la simulació és vàlida. Com es pot veure, el fet de treballar amb volums parcials va permetre estalviar la meitat del nombre d'iteracions. Durant tot aquest apartat del projecte i sempre que sigui possible es realitzaran només 5.000 iteracions per estalviar temps de simulació.

Durant la simulació es va aturar el *Solver* cada 2.500 iteracions per observar l'evolució de l'entrada d'aire dins l'aigua amb l'opció de fracció de volum d'aire del Post – Procés. Per tal d'observar millor la geometria i la distribució dels deflectors, no es realitzarà una vista d'alçat

com en la validació, sinó que es farà en perspectiva (Figura 4.6). Per poder visualitzar el volum complet en els gràfics s'ha d'aplicar l'opció de Transformació Determinada a 3 ja que tenim un terç del volum.

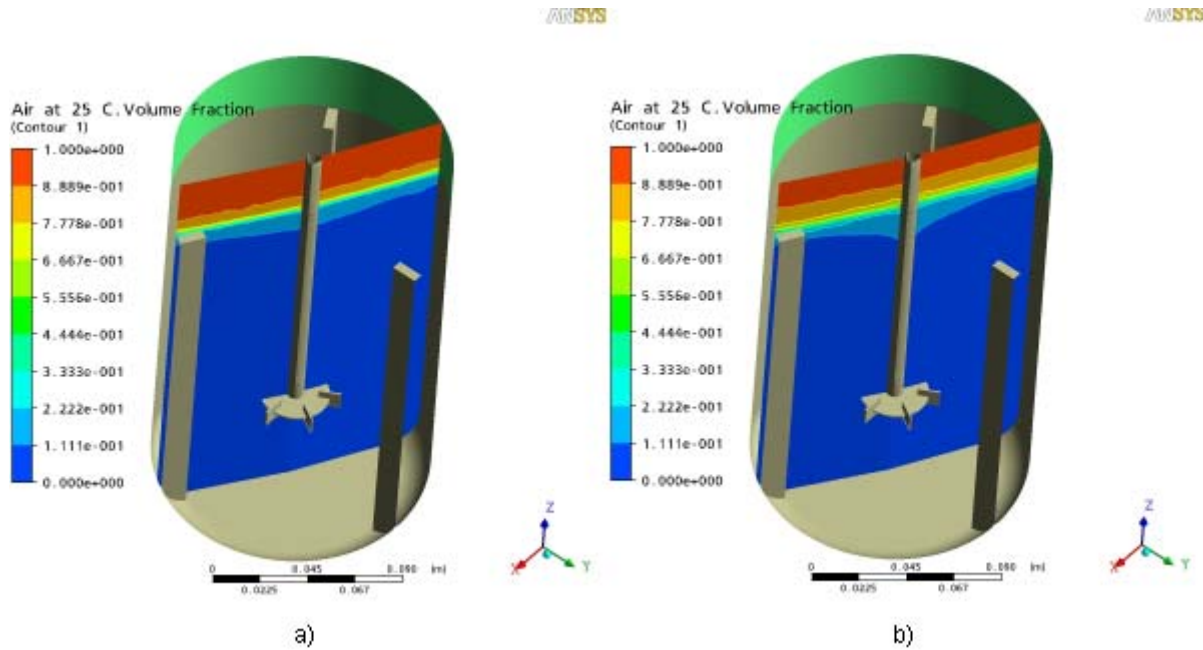


Figura 4.6. Fracció de volum d'aire en l'agitador de turbina de disc amb 3 deflectors a diferent nombre d'iteracions: a) 2.500; b) 5.000.

Durant la validació, amb tant sols 5.000 iteracions ja s'observava com l'aire entrava dins l'aigua i es creava el vòrtex. En aquest cas, gràcies als deflectors incorporats es veu com també entra aire, la qual cosa és del tot inevitable, però ja no hi ha el vòrtex que es formava sense deflectors.

Els vòrtexs, a part de provocar una entrada massiva d'aire en el tanc, fan que el fluid doni voltes al voltant de l'eix, amb lo qual no es barregen les partícules del líquid. L'ús de deflectors, al canviar bruscament les direccions de les línies de corrent, fa que es trenqui aquest flux circular i per tant provoca la mescla de les partícules. Per observar això es crearà un nou pla en el Post – procés que en aquest cas serà transversal en comptes de longitudinal, i es crearan vectors de velocitat d'aigua sobre aquest. Per veure com és el moviment a diferents alçades es pot desplaçar el pla de forma vertical.

A la Figura 4.7 es poden veure els gràfics obtinguts per l'impulsor de turbina de disc amb i sense deflectors.

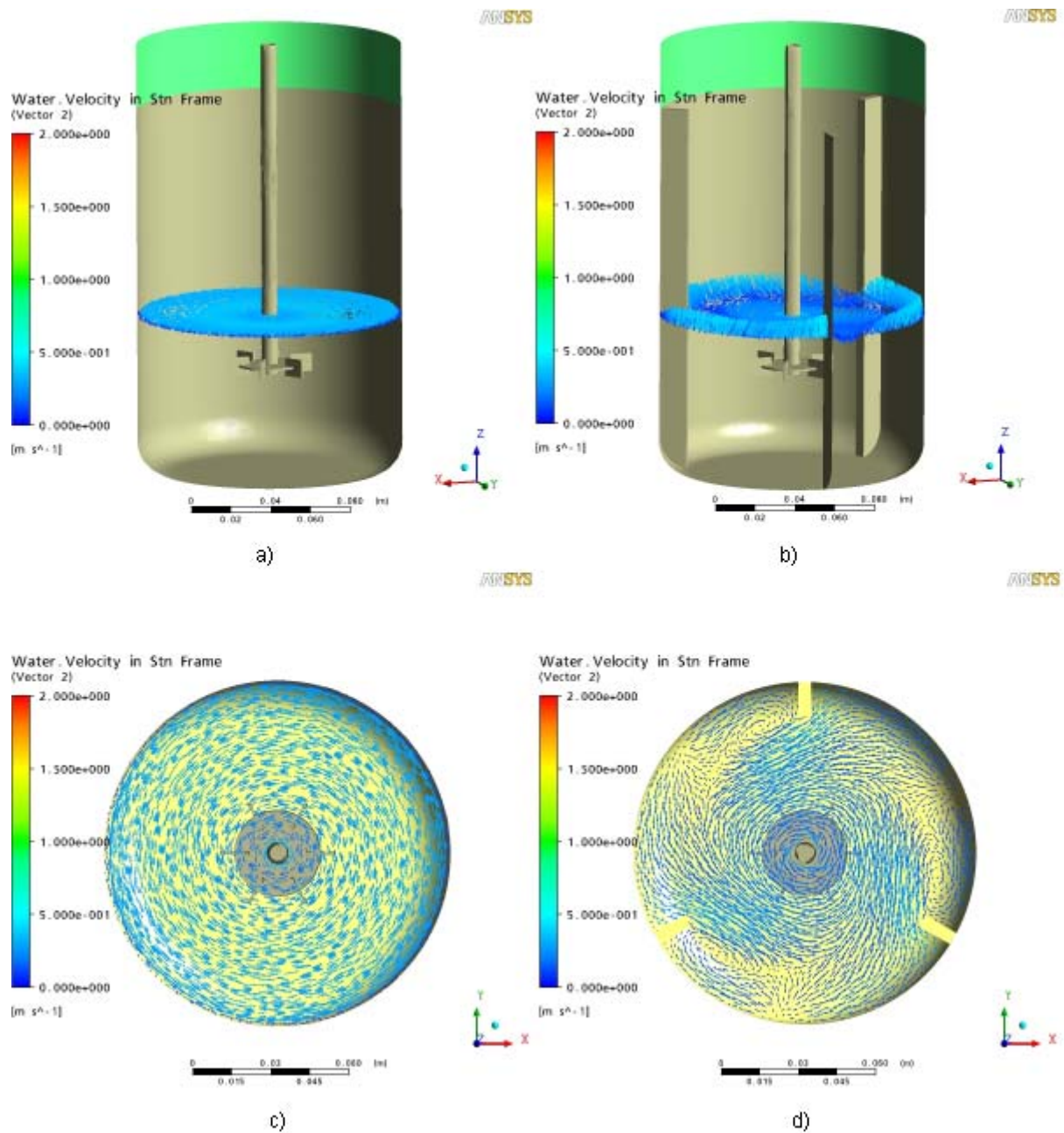


Figura 4.7. Vectors de velocitat d'aigua en el pla transversal per l'agitador de turbina de disc: a) sense deflectors, $h=0.08$ m; b) amb deflectors, $h=0.08$ m; c) sense deflectors, $h=0.13$ m; d) amb deflectors, $h=0.13$ m.

En el gràfic b) de la Figura 4.7 s'observa clarament com els deflectors desplacen l'aigua verticalment, de manera que el moviment en el tanc és més homogeni, és a dir no hi ha tanta agitació a la part inferior però n'hi ha més a la part superior. Els gràfics c) i d) corroboren que els deflectors trenquen el moviment rotacional abans esmentat.

Ara només queda generar la *Isosurface* de velocitat d'aigua per veure a quines zones hi ha més moviment i quina és la velocitat màxima d'agitació de tot el volum d'aigua (Figura 4.8). Durant la validació s'havia activat l'opció de veure les cares del davant que permetia veure l'impulsor, però treballant amb volums parcials és millor desactivar aquesta opció i aplicar transparència a la *Isosurface*, ja que per recrear el volum total el programa genera simetries, amb la qual cosa si el bulb no té una forma massa regular, genera gràfics una mica confusos. La transparència escollida és del 70%.

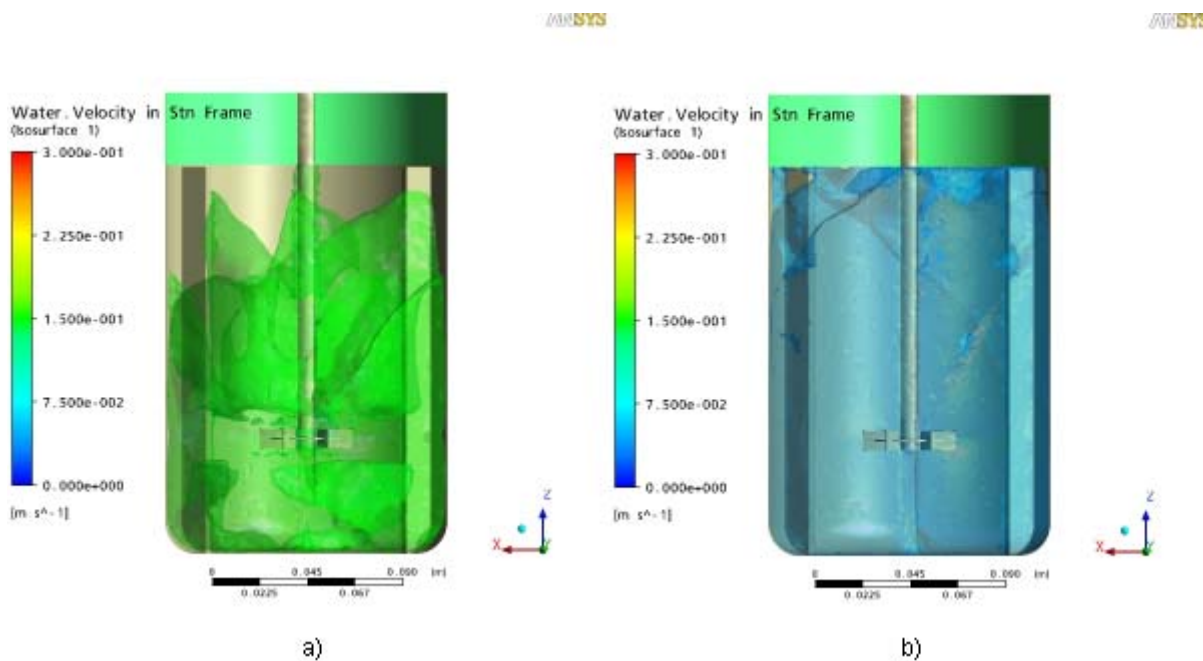


Figura 4.8. *Isosurface* de velocitat d'aigua en l'agitador de turbina de disc amb 3 deflectors: a) $v = 0.15$ m/s; b) $v = 0.04$ m/s.

El fet d'incorporar deflectors ha disminuït considerablement la velocitat màxima d'agitació en tot el volum, durant la validació era de 0.30 m/s i en canvi ara és de tant sols 0.04 m/s. Això és degut a que la velocitat de la validació era de rotació deguda al vòrtex, en canvi ara és velocitat real d'agitació.

La potència necessària a l'eix de l'agitador en aquest cas és de 1.34 W (Annex D). En el cas de la simulació sense deflectors havia donat una potència al voltant de 1.05 W i la teòrica amb 4 deflectors era de 2.24 W. Com era d'esperar el valor obtingut amb 3 deflectors es troba comprès entre els 2, tot i que es troba força lluny del valor teòric amb 4 deflectors. Això demostra que sempre que no es creï vòrtex i l'agitació sigui suficient és millor treballar amb només 3 deflectors.

4.2. Impulsor de turbina de disc amb 3 deflectors *off – wall*

Per col·locar els deflectors separats de la paret s'ha de realitzar una petita estructura de suport. En el nostre cas l'estructura pensada està formada per 4 peces quadrades de metacrilat (Figura 4.9) de 3 mm de costat que s'enganxarien perpendicularment a la paret del tanc amb l'adhesiu Nural 92, el qual també serviria per unir els suports amb els deflectors per la part posterior d'aquests. La part inferior del deflector, al estar en contacte amb el fons del tanc també es podria fixar amb l'adhesiu, augmentant així la superfície d'adhesió i per tant també la resistència. La distància de separació dels deflectors respecte la paret és de 2'6 mm (Annex A).



Figura 4.9. Deflector *off – wall*.

El nombre de volums i el procediment seguit fins a llançar la simulació és el mateix que en el cas anterior. El mallat obtingut és de 315.243 elements, una mica més gran que quan teníem el deflector enganxat a la paret, ja que a l'espai deixat entre la paret del tanc i el deflector el programa realitza un mallat més fi. El percentatge d'elements de cada rang de qualitat es pot veure a la Taula 4.2.

| PERCENTATGE D'ELEMENTS ENTRE ELS DIFERENTS RANGS DE QUALITAT | | | | | | | | | |
|--|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------|
| 0 - 0'1 | 0'1 - 0'2 | 0'2 - 0'3 | 0'3 - 0'4 | 0'4 - 0'5 | 0'5 - 0'6 | 0'6 - 0'7 | 0'7 - 0'8 | 0'8 - 0'9 | 0'9 - 1 |
| 4'68 | 4'52 | 15'14 | 41'15 | 23'04 | 9'11 | 2'07 | 0'28 | 0 | 0 |

Taula 4.2. Rangs de qualitat del mallat de la tercera part de l'agitador de turbina de disc amb 3 deflectors *off - wall*.

En el Pre – procés tant sols cal obrir l'arxiu on s'ha definit la simulació del cas anterior, canviar el mallat i llançar el *Solver*, ja que per poder comparar els resultats i veure quina és la posició més efectiva per els deflectors, els paràmetres seran els mateixos. De nou es va

deixar calcular el programa fins les 5.000 iteracions on la convergència ja era prou bona (Figura 4.10).

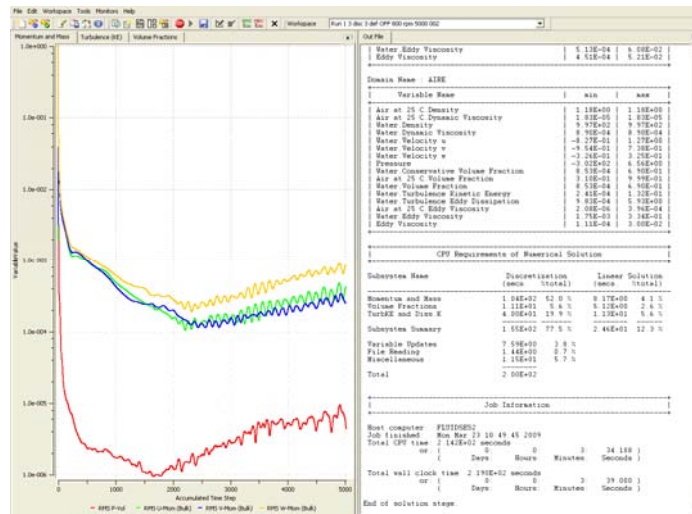


Figura 4.10. Solver de l'agitador de turbina de disc amb 3 deflectors off - wall.

Es van aturar els càlculs a les 2.500 iteracions per poder obtenir 2 estats diferents i veure que succeeix amb l'entrada d'aire a l'aigua (Figura 4.11).

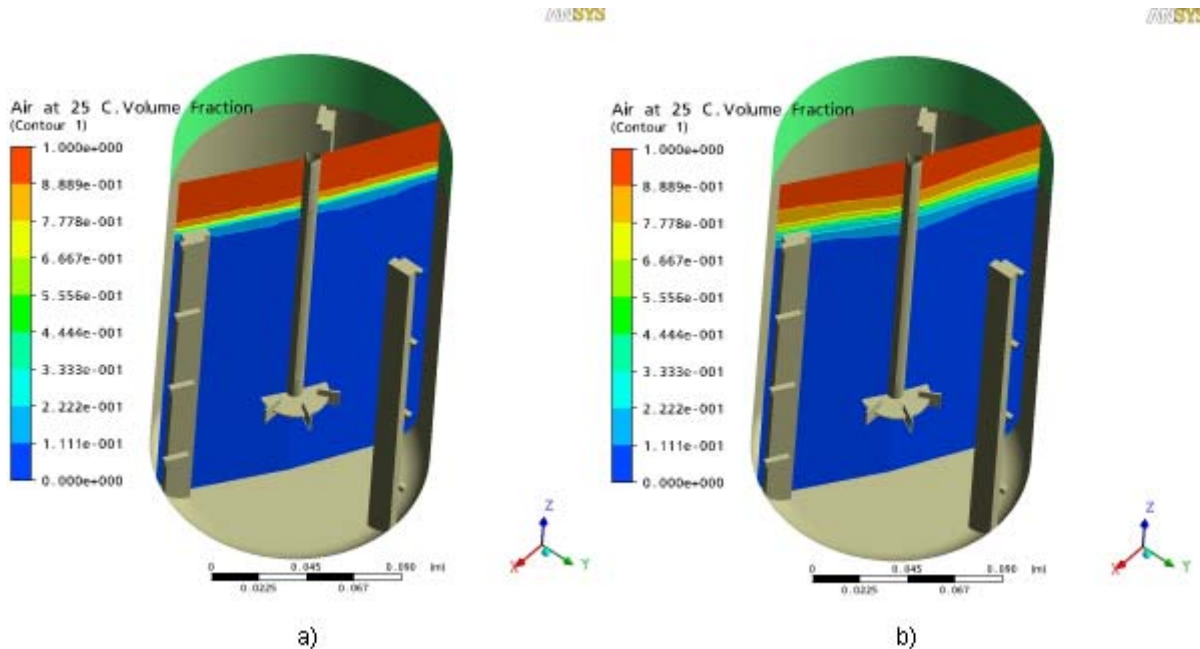


Figura 4.11. Fracció de volum d'aire en l'agitador de turbina de disc amb 3 deflectors off - wall a diferent nombre d'iteracions: a) 2.500; b) 5.000.

Altres cops s'observa com l'aire entra de forma paral·lela a la superfície de l'aigua, de forma molt semblant al cas anterior, per tant en aquest cas tampoc es genera vòrtex. Per veure

què passa amb l'agitació, es creen els vectors de velocitat a les mateixes posicions que abans (Figura 4.12).

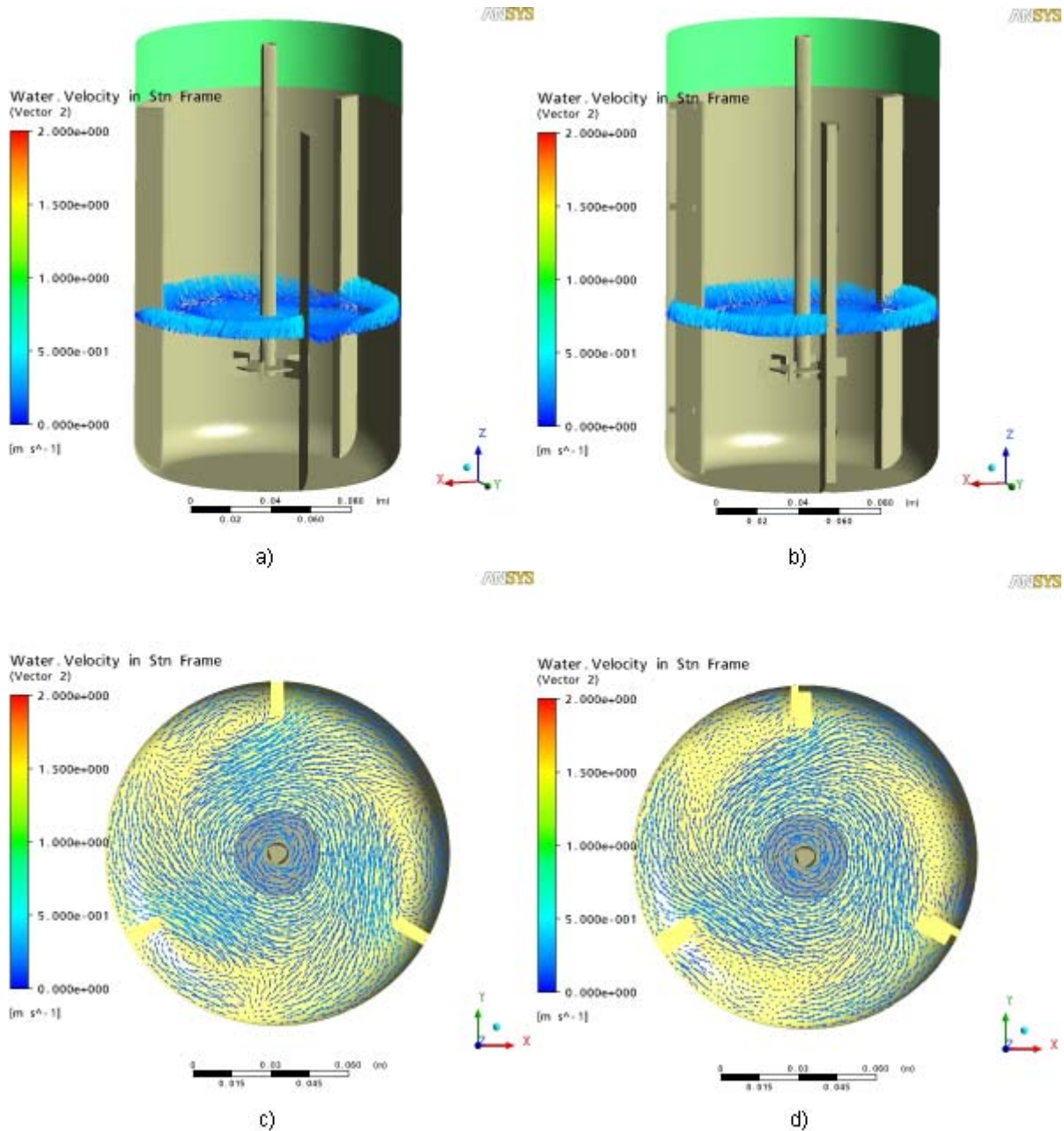


Figura 4.12. Vectors de velocitat d'aigua en el pla transversal per l'agitador de turbina de disc: a) amb deflectors, $h=0.08$ m; b) amb deflectors *off-wall*, $h=0.08$ m; c) amb deflectors, $h=0.13$ m; d) amb deflectors *off-wall*, $h=0.13$ m.

S'observen aproximadament els mateixos fenòmens que amb els deflectors enganxats a la paret, la qual cosa sembla indicar que separar-los de la paret també pot donar bons resultats. Abans de donar l'opció com a bona s'ha de veure si la quantitat de moviment que

hi ha en el tanc és la mateixa. Per veure això es torna a generar els bulbs de velocitat a les mateixes velocitats que abans (Figura 4.13).

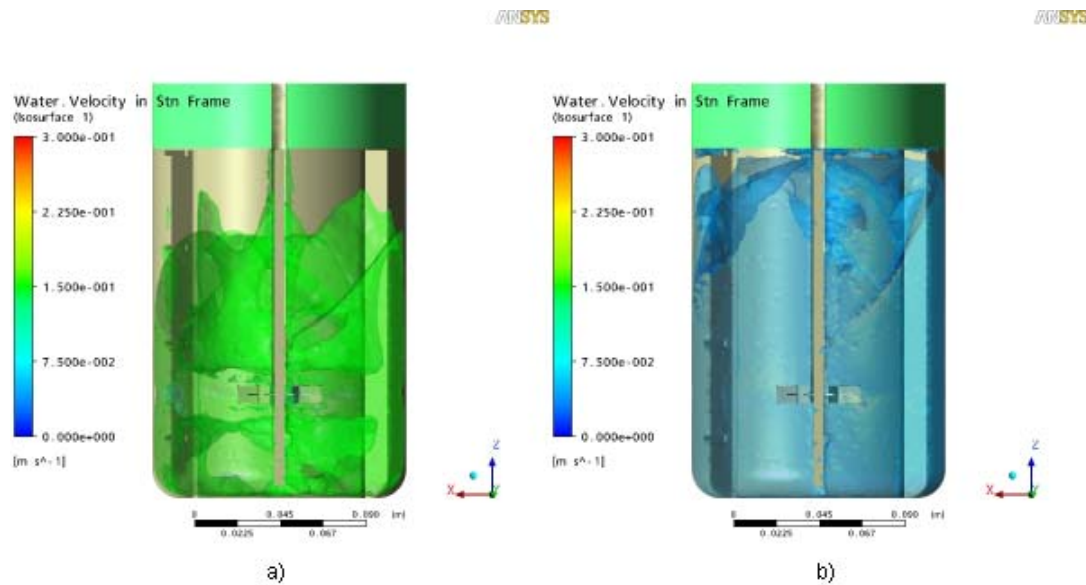


Figura 4.13. *Isosurface* de velocitat d'aigua en l'agitador de turbina de disc amb 3 deflectors *off - wall*: a) $v = 0'15$ m/s; b) $v = 0'04$ m/s.

Els volums que es desplacen tant a 0'15 m/s com a 0'04 m/s són més petits que en el cas anterior. En quant a potència, el consum és de 1'36 W (Annex D), una mica més elevada, segurament degut a que l'impulsor, a part d'haver de vèncer la resistència del deflector, també ha de vèncer la de l'estructura de suport.

Així doncs, separar els deflectors de la paret del recipient per una agitació d'aigua com és el nostre cas, no aporta cap millora respecte tenir-los enganxats a la paret. És per això que es descarta aquesta opció de cares al nou agitador.

Pel nou disseny es fixa com a objectiu aconseguir la mateixa velocitat màxima d'agitació a qualsevol punt del tanc obtinguda amb l'impulsor de turbina de disc (0'04 m/s), reduint el consum de potència obtingut el màxim possible.

4.3. Nou disseny

Un cop vista la repercussió que tenen els deflectors en un tanc agitat, toca dissenyar un nou impulsor que millori l'agitació. Tot i que la velocitat màxima en qualsevol punt del tanc trobada durant la validació s'ha demostrat que era de rotació, comparant-la amb la potència

consumida per cada impulsor pot donar una idea de quin podria ser el més adient pel nostre cas (Taula 4.3).

| | | VALORS DE POTÈNCIA | | |
|------------------|-----------------------------|--------------------|------------------|-------------------|
| | | TEÒRICA (W) | EXPERIMENTAL (W) | COMPUTACIONAL (W) |
| TIPUS D'AGITADOR | Paleta | - | 0'067 | 0'055 |
| | Turbina plana | 0'66 | 0'46 | 0'51 |
| | Turbina inclinada | 0'50 | 0'28 | 0'32 |
| | Turbina de disc | 2'24 | 0'99 | 1'08 |
| | Sisena part turbina de disc | - | - | 1'05 |

Taula 4.3. Resultats obtinguts en la validació.

Com s'observa, l'impulsor que té una millor relació entre la potència consumida i la velocitat d'agitació en tot el tanc és el de turbina de 4 pales inclinades a 45°, segurament degut a que és l'únic que crea flux axial. Així doncs es partirà d'aquesta geometria per dissenyar-ne una de nova, intentant millorar la seva fluidodinàmica per reduir el consum de potència. Per aconseguir-ho es disminuirà l'angle d'inclinació de 45 a 30° i es crearà un angle d'atac a la part superior de les pales que reduirà l'angle de 30 a 10° per millorar la penetració en el fluid i causar menys turbulència darrere les pales (Figura 4.14). Finalment es reduirà el nombre de pales de 4 a 3. El tanc utilitzat tindrà 3 deflectors.

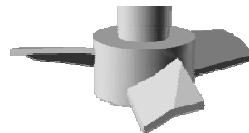


Figura 4.14. Nou disseny.

Com que el nou disseny disposa de 3 pales i el tanc té 3 deflectors, es pot treballar amb una tercera part del volum. Igual que en els casos anteriors, s'ha de crear 5 volums amb el Rhinoceros 4.0, exportar-los en format IGES i importar-los amb el Fluent Gambit. Les operacions de sostracció, unió, definició de zones i mallat seran les mateixes. En aquest cas, el mallat és de 300.203 elements. Els rangs de qualitat es poden veure a la Taula 4.4.

| PERCENTATGE D'ELEMENTS ENTRE ELS DIFERENTS RANGS DE QUALITAT | | | | | | | | | |
|--|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------|
| 0 - 0'1 | 0'1 - 0'2 | 0'2 - 0'3 | 0'3 - 0'4 | 0'4 - 0'5 | 0'5 - 0'6 | 0'6 - 0'7 | 0'7 - 0'8 | 0'8 - 0'9 | 0'9 - 1 |
| 5'24 | 4'28 | 14'63 | 41'72 | 22'62 | 9'07 | 2'13 | 0'31 | 0 | 0 |

Taula 4.4. Rangs de qualitat del mallat de la tercera part del nou disseny d'agitador amb 3 deflectors.

La qualitat del mallat és de nou notable. El següent pas és exportar el fitxer del mallat que es necessitarà després per la simulació amb l'Ansys CFX.

Per tal de comparar com varia l'agitació entre l'impulsor de turbina de disc i el nou disseny es definiran els mateixos paràmetres de simulació. Així doncs, la velocitat de gir de l'impulsor serà altre cop de 800 rpm. En el Pre – procés, només caldrà canviar el mallat de la simulació definida en l'últim cas de la validació per l'actual. Un cop completat el Pre – procés es va executar el Solver fins a les 5.000 iteracions (Figura 4.15).

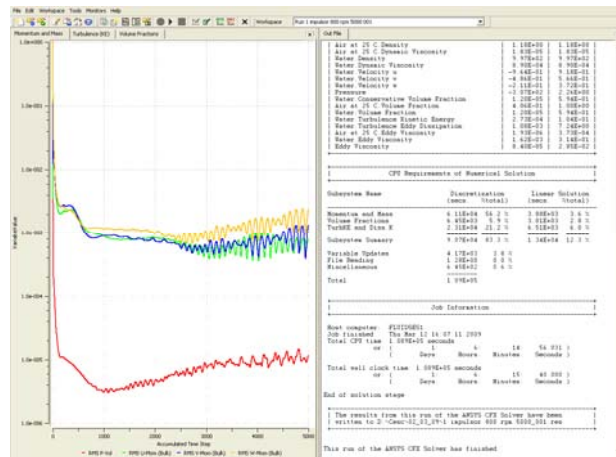


Figura 4.15. Solver del nou disseny d'agitador amb 3 deflectors.

La captura dels gràfics de Contorn de fracció de volum d'aire del Post – procés es va fer a 2.500 i a 5.000 iteracions (Figura 4.16). La Transformació Determinada és novament de 3.

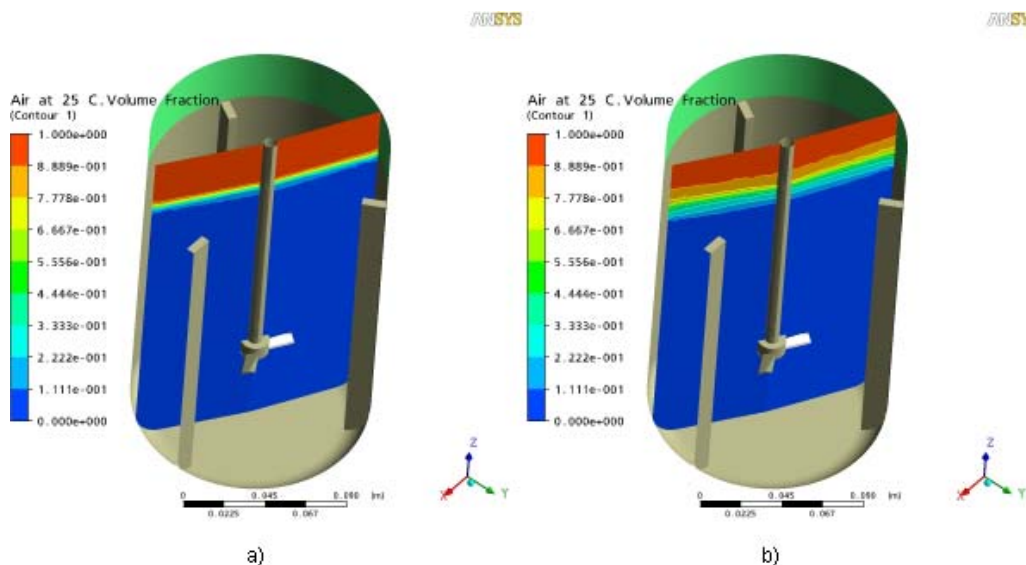


Figura 4.16. Fracció de volum d'aire en el nou disseny d'agitador amb 3 deflectors a diferent nombre d'iteracions: a) 2.500; b) 5.000.

En aquest cas l'entrada d'aire és completament paral·lela a la superfície, per tant el vòrtex és del tot inexistent. A la Figura 4.17 es pot veure el volum d'aigua que es desplaça a les mateixes velocitats que les definides en el gràfic creat per la turbina de disc.

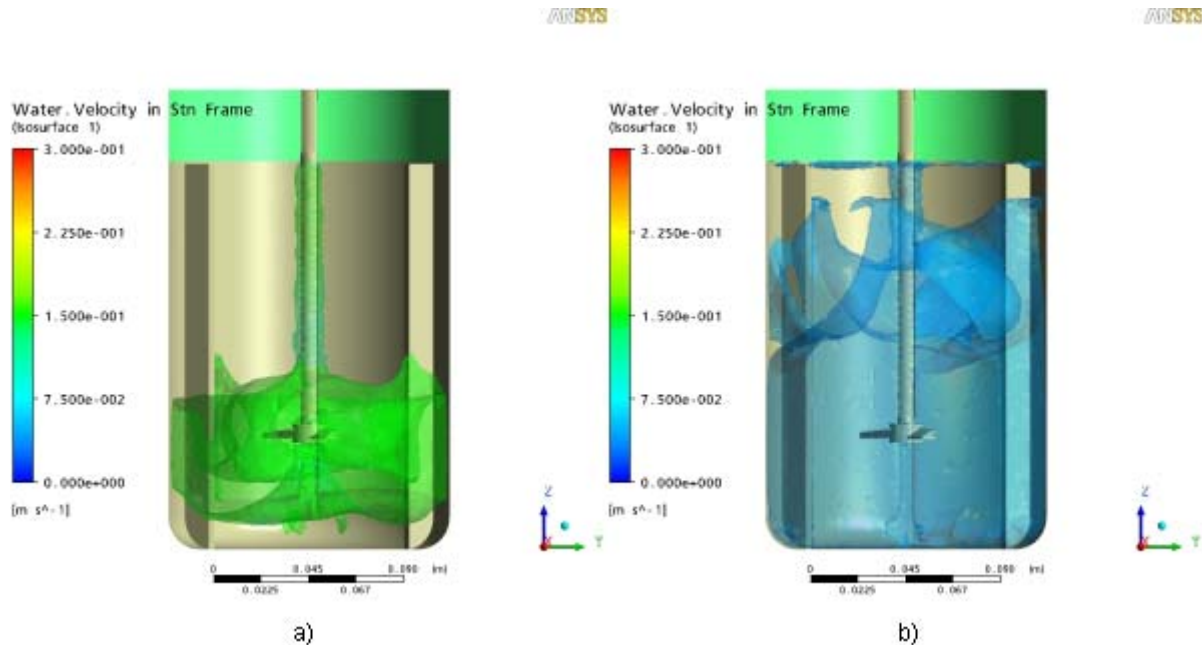


Figura 4.17. *Isosurface* de velocitat d'aigua en el nou disseny d'agitador amb 3 deflectors: a) $v = 0'15$ m/s; b) $v = 0'04$ m/s.

Com era d'esperar els bulbs de la *Isosurface* ara són més petits. Per una velocitat de 0'04 m/s, el nou impulsor tant sols és capaç de moure aproximadament dos terços del volum. No obstant, la potència consumida ha disminuït a tant sols 0'15 W (Annex D), un consum fins i tot inferior al de la turbina inclinada sense deflectors (0'28 W), la qual cosa fa pensar que s'està anant pel bon camí.

El regulador de velocitat del motor de l'agitador que disposem, permet treballar fins a 2.200 rpm. L'augment de la velocitat de gir provoca una major agitació, de manera que el que es farà és provar de fer la simulació a la velocitat màxima per veure si s'arriba a la velocitat objectiu.

Per llançar la simulació a un règim de gir de 2.200 rpm només s'ha de canviar alguns paràmetres del Pre – procés. Aquests són la velocitat de gir del Domini Agitador, de la paret Eix mig del Domini Aigua i de la paret Eix superior del Domini Aire.

El Solver es va llançar altre cop fins a les 5.000 iteracions i es va aturar un cop a la meitat per obtenir 2 estats diferents i poder observar així l'evolució de l'entrada d'aire (Figura 4.18).

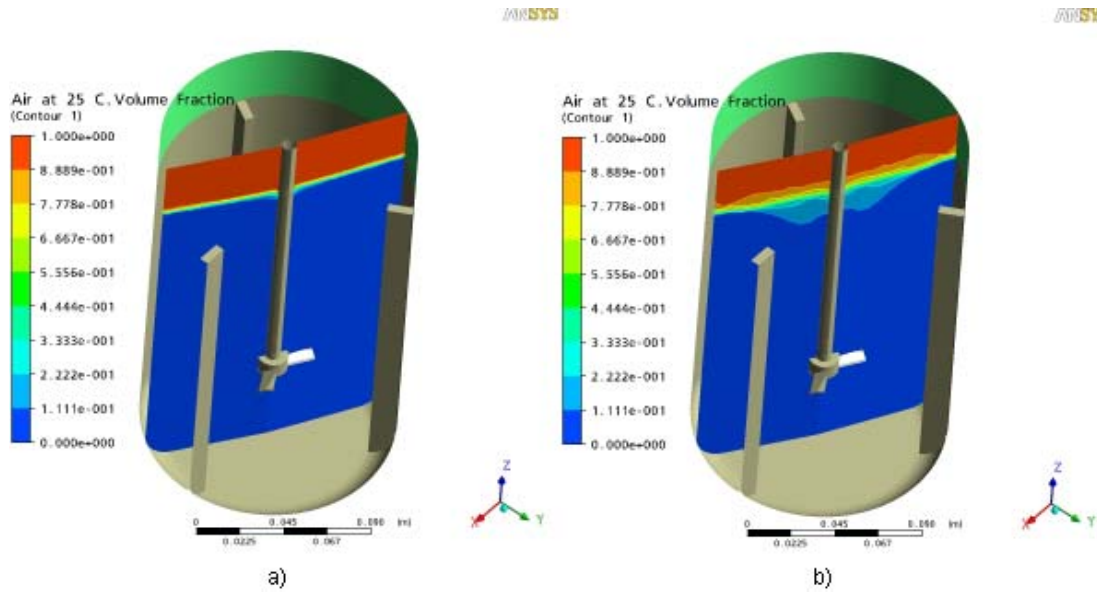


Figura 4.18. Fracció de volum d'aire en el nou disseny d'agitador amb 3 deflectors a 2.200 rpm i diferent nombre d'iteracions: a) 2.500; b) 5.000.

En aquest cas l'entrada d'aire és major que en el cas de l'impulsor de disc, tot i que tampoc s'observa la formació de cap vòrtex. El que sí sembla és com si es crees una mena d'onada a la superfície de l'aigua, la qual cosa pot indicar que hi ha una agitació considerable. A la Figura 4.19 es pot veure les *Isosurface* de velocitat.

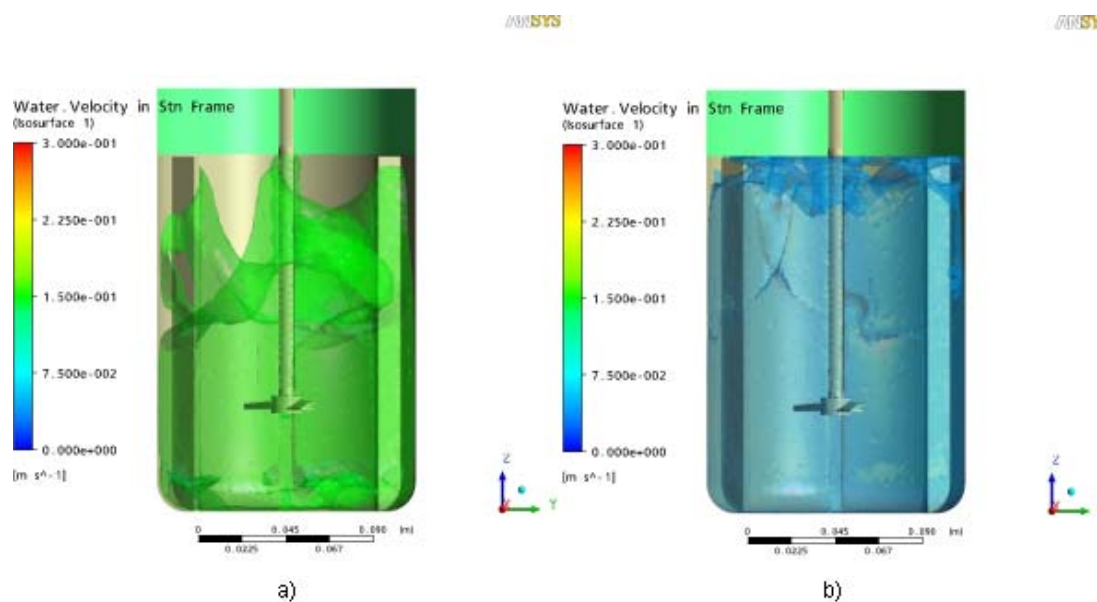


Figura 4.19. *Isosurface* de velocitat d'aigua en el nou disseny d'agitador amb 3 deflectors a 2.200 rpm: a) $v = 0'15$ m/s; b) $v = 0'04$ m/s.

Els bulbs d'agitació tenen una mida molt semblant als obtinguts amb l'impulsor de turbina de disc i s'ha assolit l'objectiu d'obtenir una velocitat d'agitació en tot el volum de 0'04 m/s. En quant a la potència, a 2.200 rpm té un consum de 3'27 W (Annex D). Aquest consum és molt major que amb l'impulsor de turbina de disc, el qual era de 1'34 W, per tant la solució pensada no és bona.

Es veu com al augmentar la velocitat de gir se'ns ha disparat el consum de potència, ja que a 800 rpm era de tant sols 0'15 W. L'explicació d'aquest fenomen rau en la fórmula teòrica del consum de potència d'agitadors en règim turbulent, com és el nostre cas, en la qual la velocitat de gir es troba elevada al cub (Annex D). Així doncs, s'ha d'anar amb compte al augmentar les revolucions de l'impulsor.

Una possible solució per no haver d'augmentar tant la velocitat de gir per aconseguir la velocitat d'agitació objectiu, seria acoblar 2 impulsors com l'usat en aquest apartat en un mateix eix. Això provocaria d'entrada un major consum, però segurament a menor nombre de revolucions s'aconseguiria els mateixos o fins i tot millors resultats que els obtinguts a 2.200 rpm.

4.4. Nou disseny amb 2 impulsors

La teoria diu que quan l'alçada de líquid és molt major que el diàmetre del tanc, és necessari acoblar dos o més rodets a l'eix de l'agitador, normalment un per cada diàmetre d'altura del dipòsit. En el nostre cas el diàmetre és de 13'2 cm i l'alçada de fluid de 18'4 cm, per tant la relació alçada/diàmetre és aproximadament 1'4 i utilitzar un segon rodet està més que justificat.

Quan s'usa més d'un impulsor, no es poden posar en la mateixa posició, sinó que s'han de col·locar amb un cert gir de manera que les pales quedin disposades de forma simètrica. En el nostre cas es disposa de 3 pales, per tant l'angle que les separa és de 120° i el gir de l'impulsor superior respecte l'inferior ha de ser de 60°. Això es fa per compensar les inèrcies generades pels rodets, i perquè al impulsar cadascun en diferents direccions per un mateix instant provoca més agitació en el fluid. També evita la formació de vòrtexs ja que la succió del rodet inferior és diferent a la del superior.

A la Figura 4.20 es pot veure com queda el nou disseny després d'aplicar el gir de 60° a l'impulsor superior.

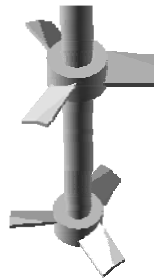


Figura 4.20. Posicionament dels 2 impulsors del nou disseny d'agitador.

Vist això, es procedeix a provar si posant 2 impulsors a l'eix es milloren els resultats obtinguts amb un de sol. Al disposar de 2 impulsors, es situarà l'inferior més proper al fons del tanc, concretament a una distància igual al diàmetre del rodet, tal i com recomana la bibliografia consultada. L'impulsor superior no es pot posar molt proper a la superfície ja que, tot i que igual que en els casos anteriors equiparem el tanc amb 3 deflectors a 120°, podria generar vòrtex. La distribució final dels rodets dins el tanc es pot veure al Document 2. Plànols.

Aquest disseny comporta de nou canvis en tot el procés seguit per poder realitzar la simulació. El nombre de volums que s'han de generar amb el Rhinoceros és ara de 6, ja que necessitem crear 2 cilindres de rotació, un per cada impulsor (Figura 4.21). El volum de treball serà de nou d'una tercera part.

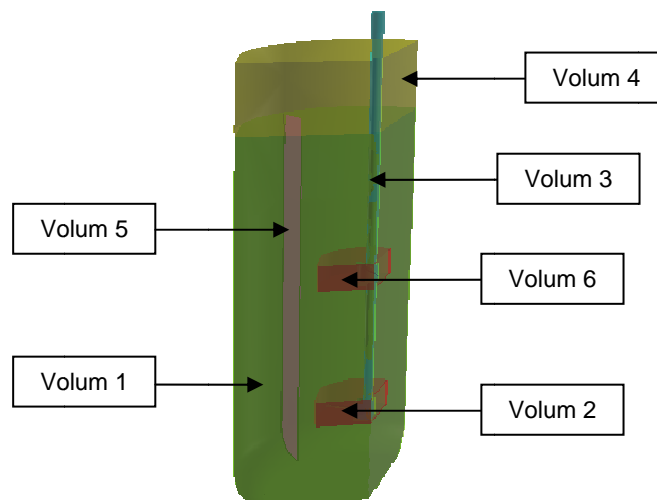


Figura 4.21. Volums generats per la tercera part de el nou disseny d'agitador amb 2 impulsors i 3 deflectors.

Així doncs, s'hauran de realitzar més operacions booleanes amb el Fluent Gambit que en els últims casos exposats. Aquestes són la sostracció de l'impulsor del nou cilindre de rotació i del nou cilindre del volum Aigua. Un cop fet això queden un total de 4 volums (Figura 4.22), Aire, Aigua, Agitador i Agitador 2, un més que en els casos anteriors.

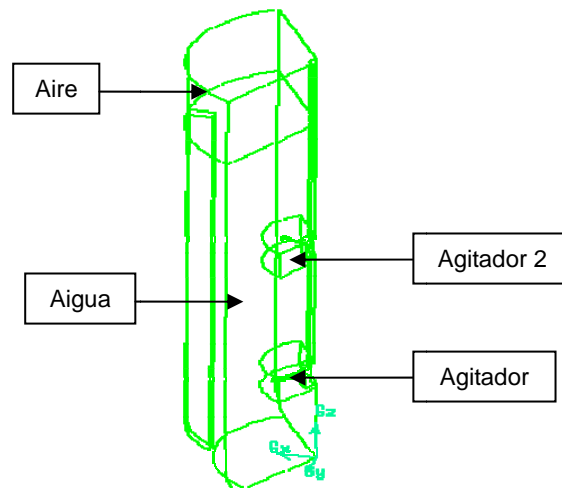


Figura 4.22. Volums definitius.

També s'han de realitzar més operacions d'unió de volums, ja que ara tenim un volum extra. Per fer això, mitjançant l'eina de connectar cares del Fluent Gambit, s'ha d'ajuntar les cares inferior, lateral i superior del volum Agitador 2 amb el volum Aigua. A la Figura 4.23 es pot veure com queda la unió dels volums.

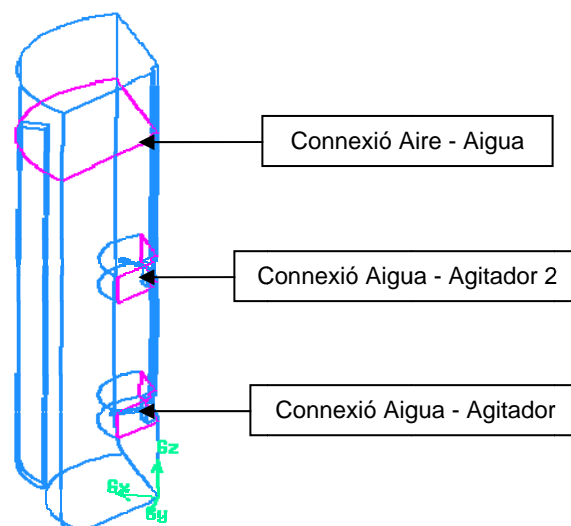


Figura 4.23. Unió dels 4 volums.

El nou volum implica la definició de noves zones, tant de regions contínues com de frontera. Les regions contínues corresponen als volums, per tant n'hi haurà una de nova anomenada Agitador 2 que serà de tipus fluid.

Les regions de frontera són interfases, parets, etc. En aquest cas s'haurà d'afegir les mateixes que les definides pel volum Agitador. El nom d'aquestes serà el mateix però afegirem un codi numèric per distingir-les. Les regions extremes que s'han de definir són:

- Superior 2. Cara superior de contacte entre els volums Agitador 2 i Aigua. Tipus interfase.
- Lateral 2. Cara lateral de contacte entre els volums Agitador 2 i Aigua. Tipus interfase.
- Inferior 2. Cara inferior de contacte entre els volums Agitador 2 i Aigua. Tipus interfase.
- Rotació agitador 1_2 i 2_2. Cares exteriors del volum Agitador 2. Tipus paret.

A la Figura 4.24 es poden veure aquestes regions creades.

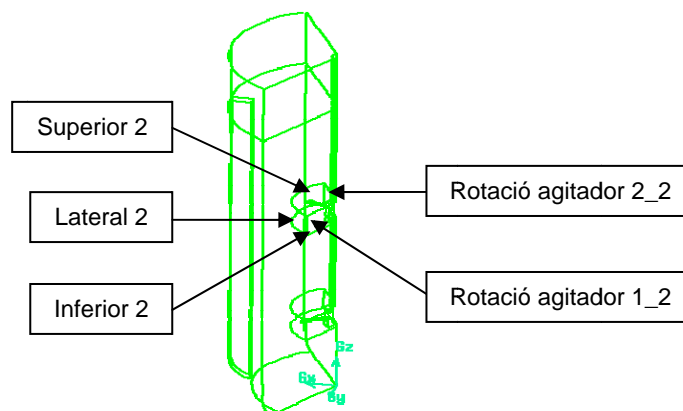


Figura 4.24. Regions extremes definides per el nou disseny d'agitador amb 2 impulsors i 3 deflectors.

Amb el Fluent Gambit ja només queda realitzar el mallat. En aquest cas es disposa de 2 impulsors, en els quals s'ha de realitzar un mallat més fi que en la resta de l'agitador. En els casos anteriors sempre s'havia mallat aquest volum amb elements tetraèdrics de mida 1 mm, per tant ara s'hauria de fer el mateix, tot i que això farà augmentar molt el nombre d'elements del mallat. Per contrarestar aquest augment i continuar tenint un mallat de l'ordre d'uns 300.000 elements, es canviarà la mida inicial de la *Size Function* definida a l'apartat

4.1, que passarà a ser de 2 a 3 mm. Les condicions de factor de creixement, mida final i cares d'origen es mantindran igual. Els volums Aigua i Aire es mallaran també amb elements tetraèdrics de mida 4 i 6 mm respectivament. A la Figura 4.25 es pot veure el mallat obtingut.

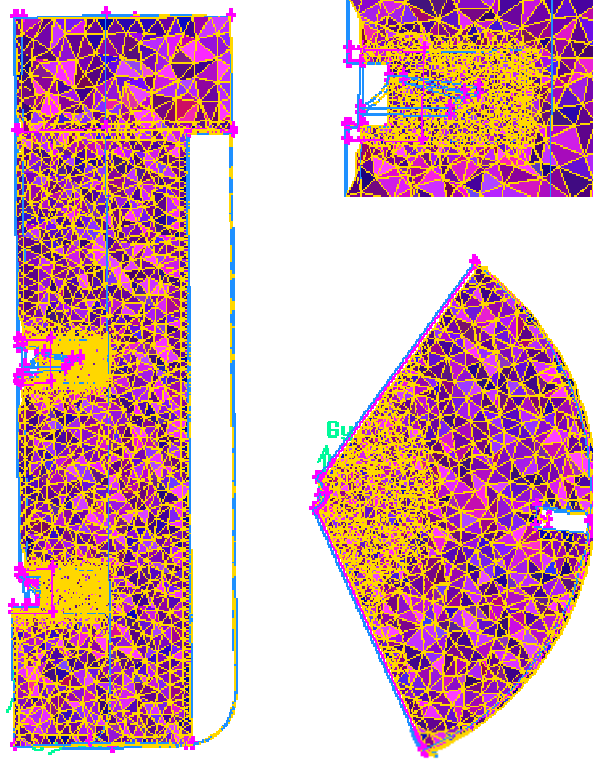


Figura 4.25. Diferents vistes en secció del mallat del nou disseny d'agitador amb 2 impulsors i 3 deflectors: a) alçat; b) ampliació de l'alçat a la zona de l'impulsor superior; c) planta a l'altura de les pales de l'impulsor superior.

El nombre total d'elements del mallat és de 319.775. El percentatge d'elements de cada rang de qualitat es pot veure a la Taula 4.5.

| PERCENTATGE D'ELEMENTS ENTRE ELS DIFERENTS RANGS DE QUALITAT | | | | | | | | | |
|--|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------|
| 0 - 0'1 | 0'1 - 0'2 | 0'2 - 0'3 | 0'3 - 0'4 | 0'4 - 0'5 | 0'5 - 0'6 | 0'6 - 0'7 | 0'7 - 0'8 | 0'8 - 0'9 | 0'9 - 1 |
| 4'50 | 4'65 | 15'61 | 42'08 | 22'79 | 8'16 | 1'96 | 0'25 | 0'01 | 0 |

Taula 4.5. Rangs de qualitat del mallat del nou disseny amb 2 impulsors i 3 deflectors.

En aquest cas, pel Pre – procés, no n'hi ha prou amb agafar la simulació definida per la sisena part de l'impulsor de turbina de disc i canviar el mallat per l'actual, ja que s'ha de crear un nou domini i vàries interfases. La velocitat de gir escollida en aquest cas torna a ser

de 800 rpm. A continuació es presenten els canvis introduïts en la simulació i els seus paràmetres principals:

- Domini AGITADOR 2. Volum Agitador 2.
 - Fluids: Aire a 25 °C i aigua.
 - Pressió de referència: 1 atmosfera.
 - Gravetat: 9'81 m/s².
 - Densitat de referència: 997 kg/m³.
 - Moviment del domini: Rotació a 800 rpm respecte l'eix Z.
 - Tipus de turbulència: k – Epsilon.
 - Flotació.
 - Model de flotació per diferència de densitat: Mescla (1 mm).
 - Model homogeni.
 - Fluid continu.
 - Fracció de volum: aire = 0, aigua = 1.
 - Agit inf 2 Side 1. Cara 1 de la interfase Inferior 2.
 - Agit lat 2 Side 1. Cara 1 de la interfase Lateral 2.
 - Agit sup 2 Side 1. Cara 1 de la interfase Superior 2.
 - Parets agitador 2. Paret creada per defecte del volum Agitador 2.
 - Tipus de contorn: Rotació.
 - Influència de la paret en el flux: No lliscant.
 - Rugositat de la paret: 0'05 mm.
 - Rotació agitador 1_2 Side 1. Paret Rotació agitador 1_2.
 - Rotació agitador 2_2 Side 2. Paret Rotació agitador 2_2.
- Interfase agit inf 2. Interfase Inferior 2.
 - Tipus: Fluid Fluid.
 - Canvi de contorn / Model de mescla: *Frozen Rotor*.
 - *Pitch change*: Automàtic.
- Interfase agit lat 2. Interfase Lateral 2.
 - Tipus: Fluid Fluid.
 - Canvi de contorn / Model de mescla: *Frozen Rotor*.
 - *Pitch change*: Automàtic.
- Interfase agit sup 2. Interfase Superior 2.
 - Tipus: Fluid Fluid.
 - Canvi de contorn / Model de mescla: *Frozen Rotor*.
 - *Pitch change*: None.

- Interfase Rotació agitador 2. Parets Rotació agitador 1_2 i Rotació agitador 2_2.
 - Tipus: Fluid Fluid.
 - Periodicitat rotacional.

Un cop definits tots els paràmetres ja només queda llançar el *Solver*. Novament, la convergència va ser lo suficientment ràpida com per aturar la simulació a les 5.000 iteracions (Figura 4.26).

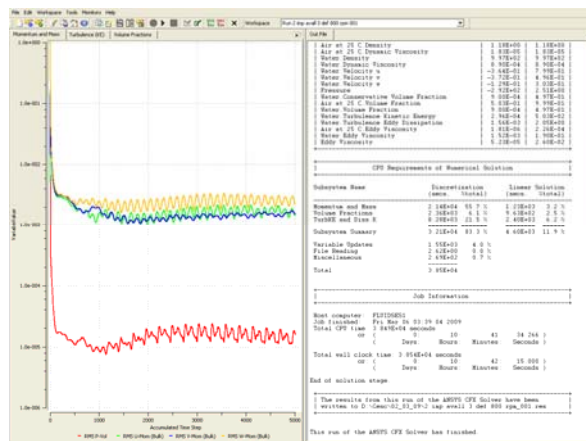


Figura 4.26. Solver del nou disseny d'agitador amb 2 impulsors i 3 deflectors.

A la Figura 4.27 podem veure els resultats de fracció de volum d'aire obtinguts a la meitat i al final de la simulació.

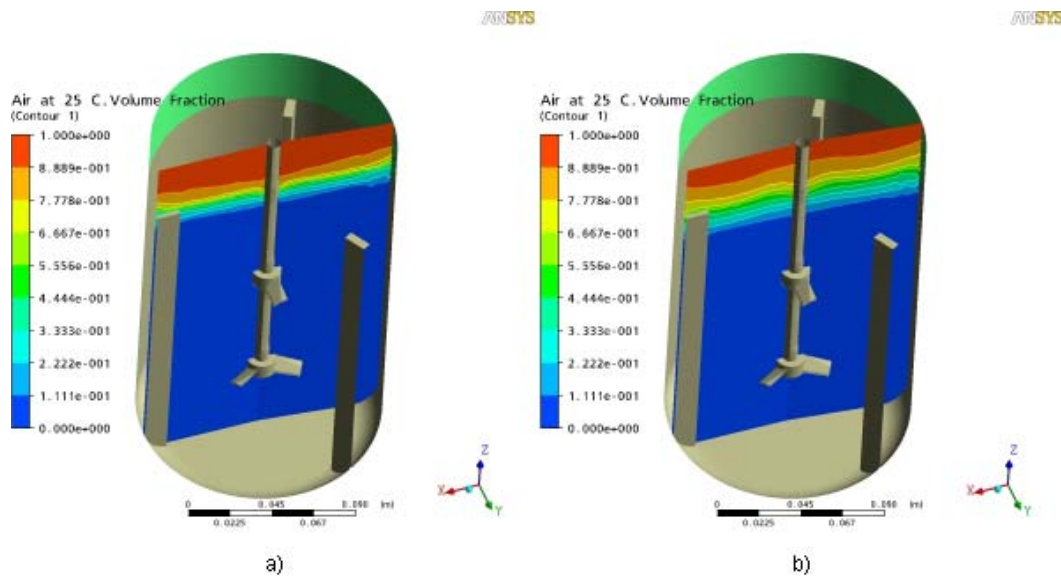


Figura 4.27. Fracció de volum d'aire en el nou disseny d'agitador amb 2 impulsors i 3 deflectors a 800 rpm i diferent nombre d'iteracions: a) 2.500; b) 5.000.

Sembla que la distribució escollida dels 2 impulsors és correcta ja que no es crea vòrtex. Ara falta veure si amb 2 impulsors girant a 800 rpm és suficient com per aconseguir la velocitat que ens havíem fixat de 0'04 m/s. Per fer això crearem de nou una *Isosurface* de velocitat d'aigua (Figura 4.28).

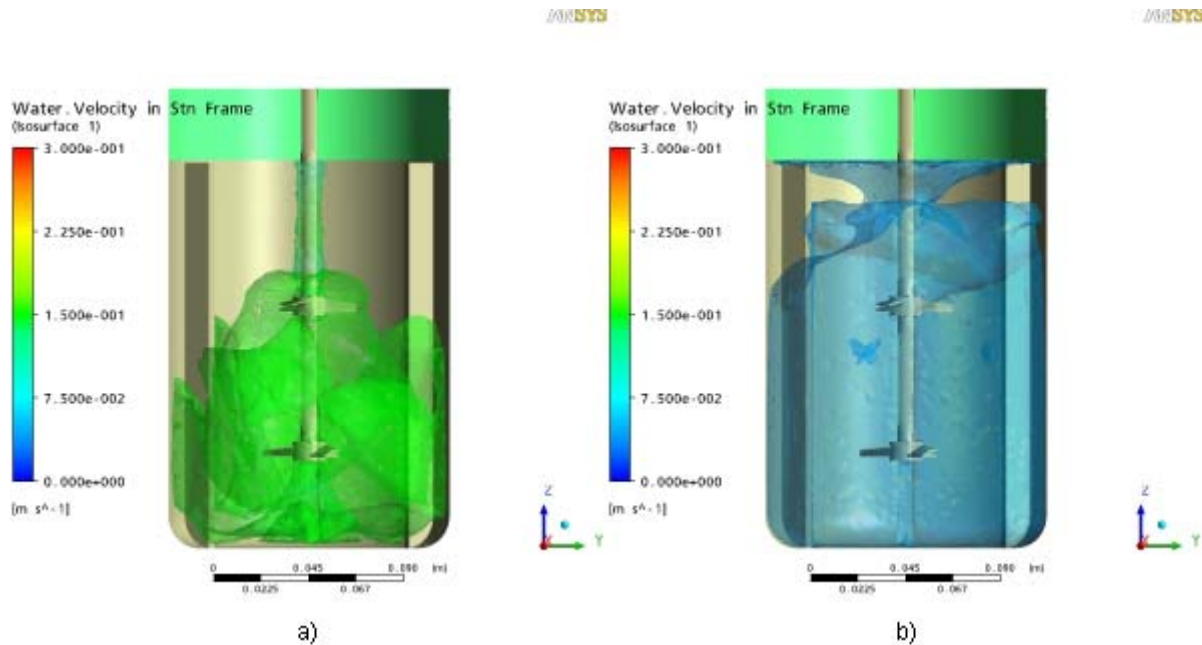


Figura 4.28. *Isosurface* de velocitat d'aigua en el nou disseny d'agitador amb 2 impulsors i 3 deflectors a 800 rpm: a) $v = 0'15$ m/s; b) $v = 0'04$ m/s.

La regió on el moviment de l'aigua és igual o major a 0'15 m/s ha augmentat considerablement respecte a quan només teníem un impulsor a 800 rpm, però comparant-la amb l'aconseguida per la turbina de disc encara segueix sent una mica més petita. També es veu com ha crescut força la zona que es mou a 0'04 m/s, però encara no agafa la totalitat del volum. En aquest cas la potència necessària a l'eix de l'agitador és altre cop molt baixa, 0'27 W (Annex D).

Així doncs, s'haurà d'augmentar una mica la velocitat de gir dels impulsors, però amb molta cautela perquè sinó es tornarà a disparar la potència consumida com ha passat anteriorment al augmentar la velocitat fins les 2.200 rpm. Es provarà d'augmentar-la menys, fins a les 1.300 rpm per observar què succeeix.

Per la simulació es pot aprofitar la que s'ha definit per l'últim cas, només cal canviar la velocitat del Domini Agitador, de la paret Eix mig del Domini Aigua i de la paret Eix superior

del Domini Aire de 800 a 1.300 rpm. A la Figura 4.29 es pot veure els gràfics de fracció de volum d'aire obtinguts.

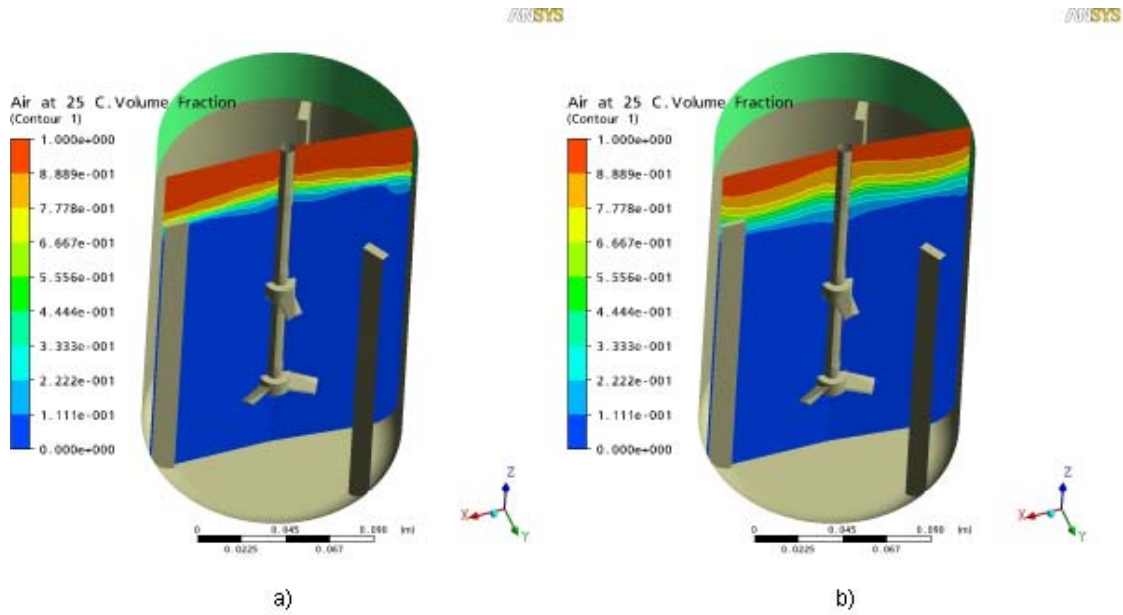


Figura 4.29. Fracció de volum d'aire en el nou disseny d'agitador amb 2 impulsors i 3 deflectors a 1.300 rpm i diferent nombre d'iteracions: a) 2.500; b) 5.000.

Es veu com els deflectors continuen evitant l'entrada d'aire per l'eix de l'agitador. Anem a veure si el fet d'augmentar la el règim de gir ha millorat l'agitació en el tanc (Figura 4.30).

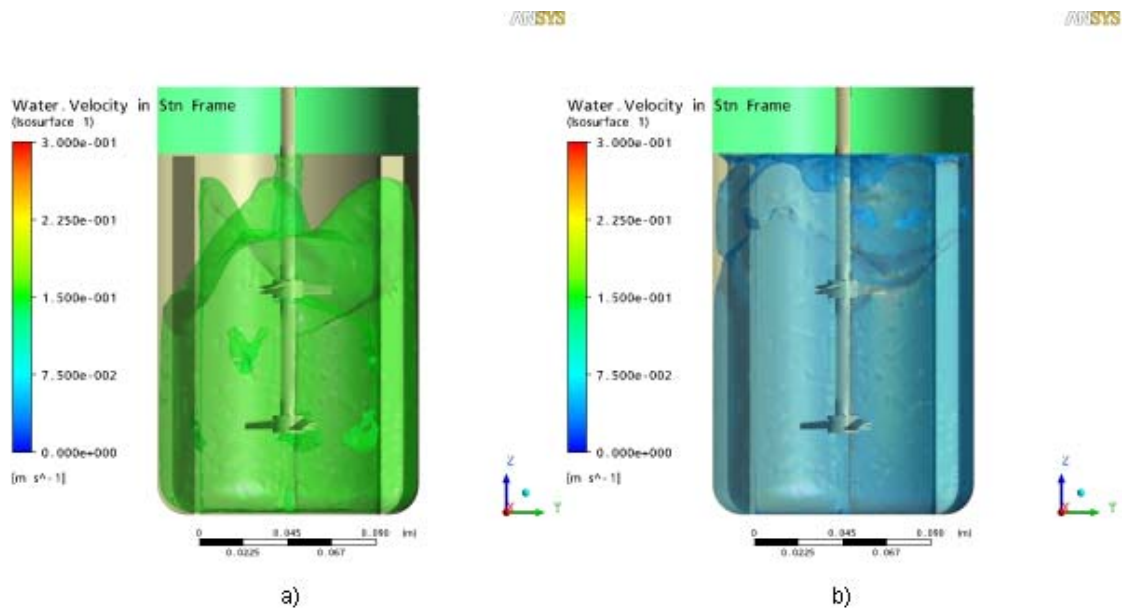


Figura 4.30. Isosurface de velocitat d'aigua en el nou disseny d'agitador amb 2 impulsors i 3 deflectors a 1.300 rpm: a) $v = 0'15$ m/s; b) $v = 0'04$ m/s.

La millora és considerable ja a aquesta velocitat s'ha assolit l'objectiu que tota l'aigua es desplaçés a com a mínim 0'04 m/s. La zona agitada a 0'15 m/s és fins i tot major que la obtinguda amb la turbina de disc, però sobretot, i el que és més important, a aquesta velocitat de 0'15 m/s la part central del tanc s'agita de manera molt més uniforme. Amb la turbina de disc hi havia molta agitació a les parets però no tanta a la part central ja que el gràfic no era tant nítid com aquest últim.

El Post – procés té una opció de gràfic anomenada *Streamline* que, especificant-li un punt de partida, genera una línia que és el recorregut que seguiria una partícula del fluid dins el tanc. Així doncs, perquè l'agitació sigui bona, aquesta línia hauria de desplaçar-se per tot el volum.

En el nostre es definirà com a punt de partida les cares superiors del cilindre de rotació de cada impulsor (Figura 4.31). El nombre de punts de partida seran 10 repartits de manera equidistant sobre la cara.

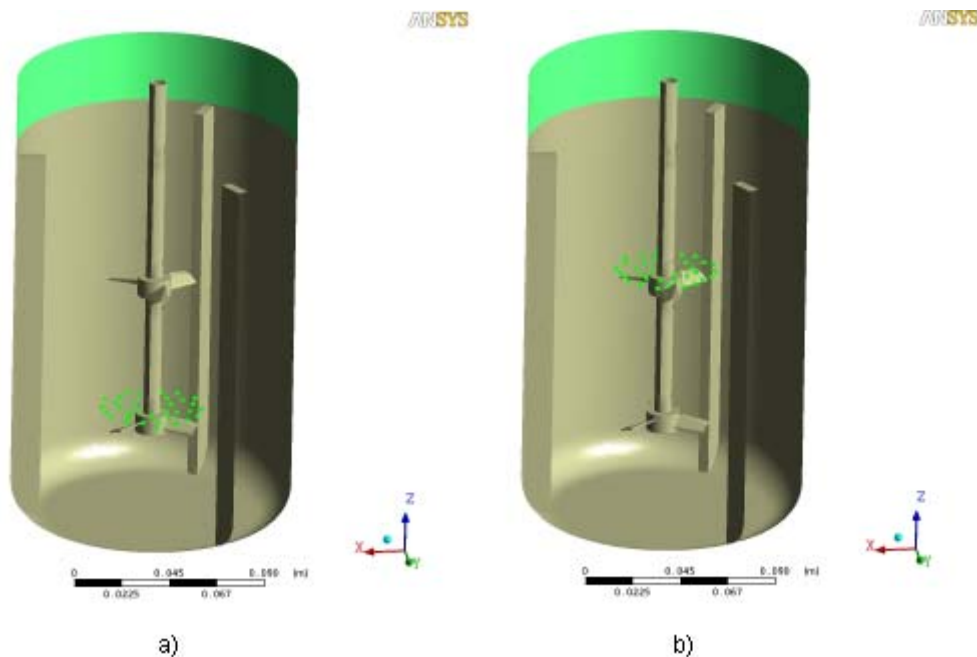


Figura 4.31. Punts de partida de la *Streamline* en el nou disseny d'agitador amb 2 impulsors i 3 deflectors a 1.300 rpm: a) impulsor inferior; b) impulsor superior.

Al tenir un terç del volum, genera aquests 10 punts 3 vegades, per tant el nombre total de punts és de 30, tal i com es pot veure a la figura anterior. Aquestes línies de corrent

permeten que se'ls associï una variable. En el nostre cas aquesta serà altre cop la velocitat de l'aigua en estat estacionari (Figura 4.32).

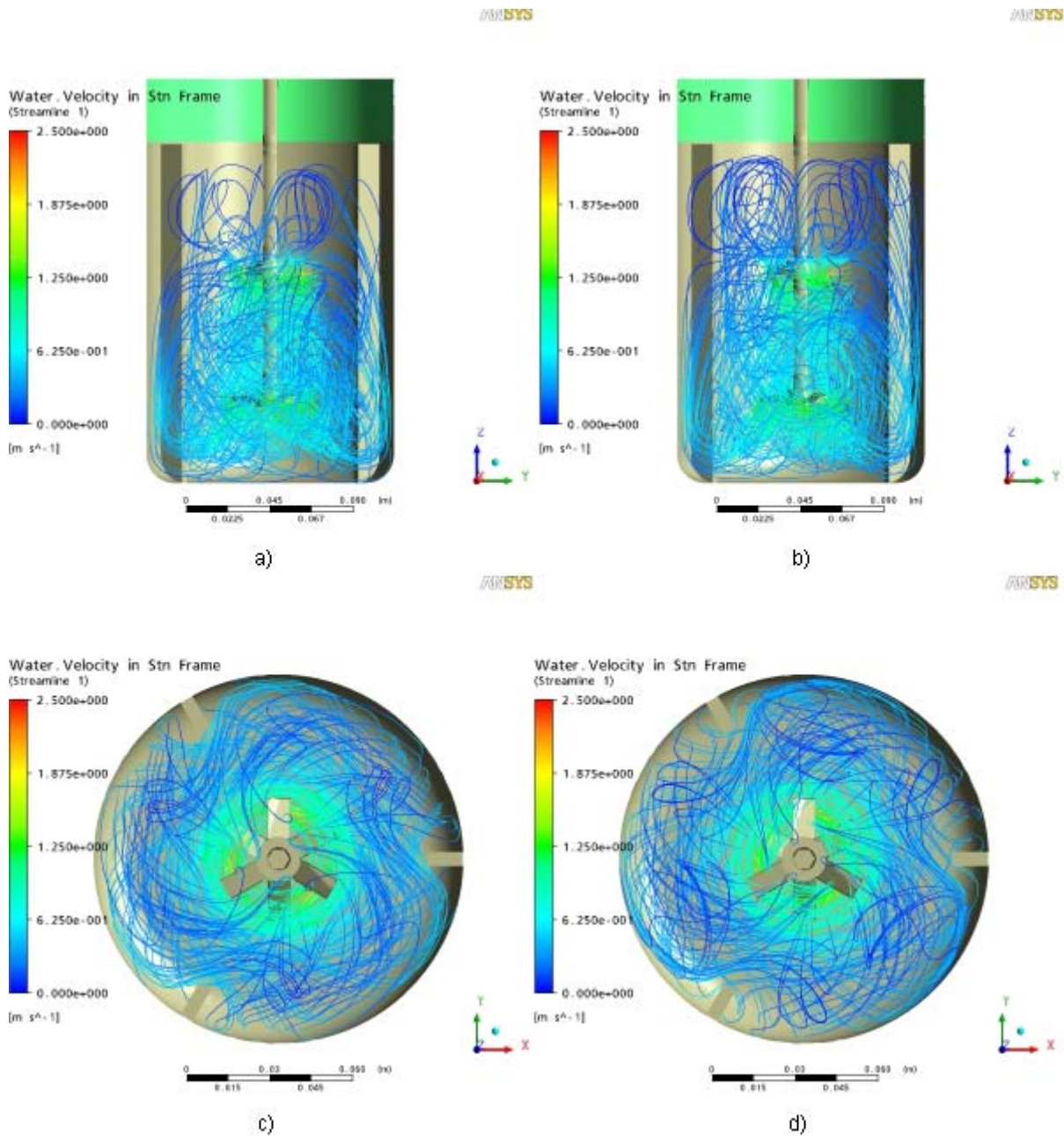


Figura 4.32. Diferents vistes de la *Streamline* per diferents punts de partida en el nou disseny d'agitador amb 2 impulsors i 3 deflectors a 1.300 rpm: a) alçat impulsor inferior; b) alçat impulsor superior; c) planta impulsor inferior; d) planta impulsor superior.

En el gràfic s'observa clarament com la zona on aquestes línies tenen més velocitat és a la part inferior del tanc. També es veu com l'impulsor superior ajuda a agitar la part de dalt del

tanc, ja que les línies que parteixen d'aquest pugen més que les de l'inferior. Els canvis de direcció que provoquen els deflectors queden clarament reflectits a la figura.

La potència donada pel software és de 1'14 W (Annex D), per tant s'ha aconseguit reduir el consum aproximadament un 18% respecte l'impulsor de turbina de disc (1'34 W). Així doncs es pot donar com a bo aquest últim disseny amb 2 impulsors.

4.5. Nou disseny amb 2 impulsors i silicona

Finalment es farà una prova amb el nou agitador girant a la mateixa velocitat, però canviant l'aigua per un altre líquid de viscositat i densitat semblant. El fluid escollit és la silicona Q7-9120 de viscositat 20 cSt i densitat 951 kg/m³ de l'empresa Dow Corning que s'usa en la fabricació de cosmètics (Annex G).

Per fer això es pot agafar la última simulació que s'ha definit en el Pre – procés, ja que la velocitat de gir serà també de 1.300 rpm, l'ample dels deflectors serà el mateix que quan s'utilitzava aigua ja que la silicona també té una viscositat molt baixa, i de nou s'usarà el model de turbulència k – Epsilon tot i trobar-nos en un règim de transició (Annex C). Només cal canviar el fluid aigua per la silicona. Com és lògic la base de dades de materials del programa no conté el nostre, per tant s'ha de definir un nou material de tipus fluid amb les característiques de densitat i viscositat abans esmentades.

Un cop fet això es va executar el Solver fins a 5.000 iteracions, on la convergència també va ser prou bona (Figura 4.33).

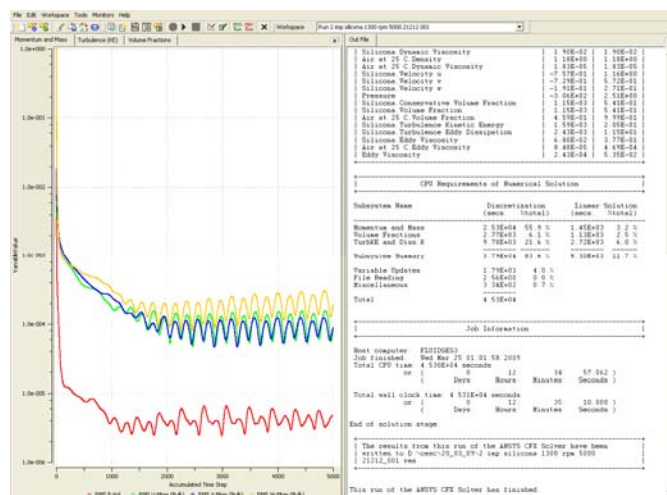


Figura 4.33. Solver de la simulació amb silicona.

Es va aturar el software a la meitat per tenir 2 arxius de resultats diferents i poder veure si entra aire (Figura 4.34).

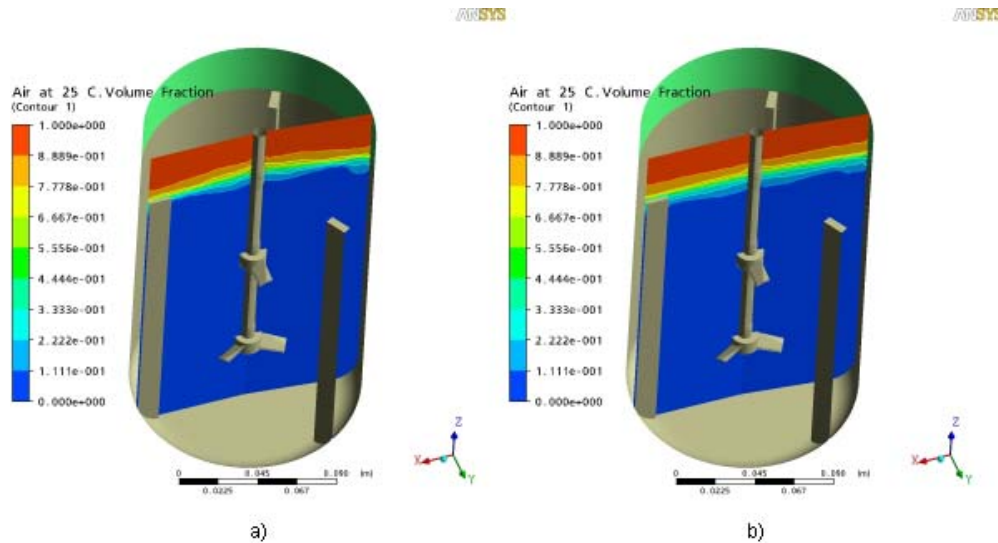


Figura 4.34. Fracció de volum d'aire en la simulació amb silicona a 1.300 rpm i diferent nombre d'iteracions: a) 2.500; b) 5.000.

Com era d'esperar la quantitat d'aire que entra en el tanc és molt petita. Per veure com ha afectat el canvi de fluid en l'agitació es creen els gràfics de velocitat (Figura 4.35).

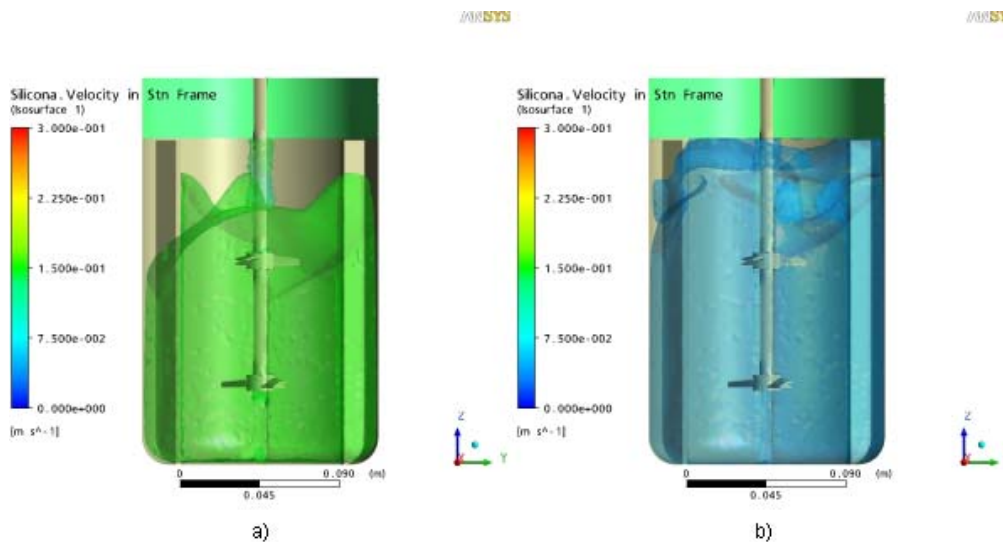


Figura 4.35. *Isosurface* de velocitat d'aigua en la simulació amb silicona a 1.300 rpm: a) $v = 0'15$ m/s; b) $v = 0'04$ m/s.

Els resultats obtinguts són molt semblants als d'abans, tot i que en aquest cas la mida dels bulbs és una mica més petita, degut a que la viscositat del fluid és més elevada. La potència també ha augmentat una mica, de 1'14 a 1'18 W (Annex D).

A la Figura 4.36 es pot veure les línies de corrent que es generen en aquest cas. Els punts de partida i el nombre de punts són els mateixos que en l'apartat anterior.

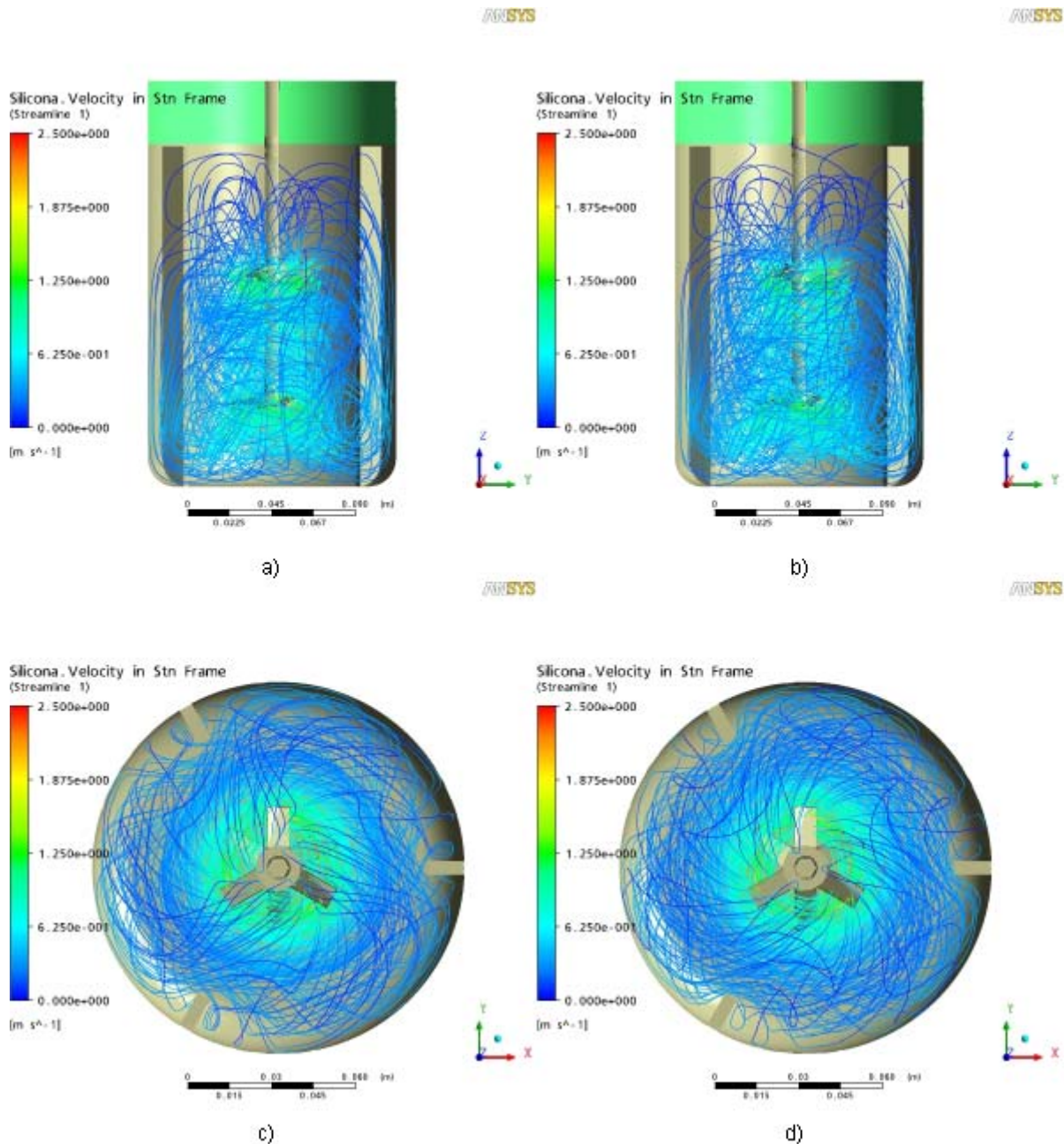


Figura 4.36. Diferents vistes de la *Streamline* per diferents punts de partida en la simulació amb silicona a 1.300 rpm: a) alçat impulsor inferior; b) alçat impulsor superior; c) planta impulsor inferior; d) planta impulsor superior.

S'observa com hi ha menys densitat de línies a la part superior del tanc. A la zona inferior els resultats obtinguts són pràcticament idèntics a quan usàvem aigua, encara que s'ha reduït la velocitat ja que les línies són d'un color blau més fosc que abans. Això és perquè a les partícules els hi costa més desplaçar-se.

5. RESUM DEL PRESSUPOST

El projecte contempla les següents despeses:

| DESCRIPCIÓ | IMPORT |
|-------------------|----------------------|
| Personal | 3.125 € |
| Equipament | 340 € |
| Consums | 35 € |
| Costos Indirectes | <u>525 €</u> |
| | 4.025 € TOTAL |

L'import final del projecte és de quatre mil vint-i-cinc euros (4.025 €).

Signat:

Francesc Garrido Castells
Girona, 30 de març de 2009

6. CONCLUSIONS

Després de totes les proves realitzades amb les diferents geometries, tant de recipients com d'impulsors, es pot arribar a les següents conclusions.

- El software permet treballar amb volums parcials sempre i quan la geometria de l'agitador sigui simètrica, la qual cosa permet realitzar un mallat més fi per un mateix nombre d'elements. Això comporta que la convergència dels residuals del *Solver* sigui més ràpida. Com més petits són els valors als quals tendeixen els residuals, més fiables són els resultats obtinguts.
- Quan tant sols es té una part del volum, els resultats dels càlculs de força, moments, etc. que ens dona el Post – procés, s'han de multiplicar pel nombre de volums com els que tenim que, ajuntant-los, generarien el volum complet.
- L'ús de deflectors en el recipient del fluid evita la creació de vòrtexs a l'eix de l'impulsor i per tant l'entrada massiva d'aire. Per agitacions poc intenses es pot utilitzar tant sols 3 deflectors, amb la qual cosa es redueix considerablement el consum de potència. Posar els deflectors separats de la paret en fluids poc viscosos no implica obtenir una agitació més efectiva. Aquest muntatge segurament s'utilitzi per evitar tenir una zona d'acumulació en el cas de fluids de viscositat més elevada.
- Augmentar la velocitat de gir de l'agitador comporta elevar considerablement la potència consumida, de manera que a l'hora de dissenyar un impulsor pot ser més adequat que aquest tingui una fluidodinàmica no tant eficient, però que en canvi no necessiti un règim de gir tant gran com un altre que sigui més eficient però necessiti de més velocitat. S'ha de buscar l'equilibri entre aquestes dues variables per trobar els resultats òptims.
- El nou disseny amb 2 impulsors té un bon comportament per fluids de molt baixa viscositat com ara l'aigua o la silicona Q7-9120. La comparació feta a la mateixa velocitat de gir dels impulsors entre els 2 fluids ha mostrat com al augmentar la viscositat (silicona), disminueix l'agitació en el tanc i augmenta la potència. Això implica que en el cas que es volgués agitar fluids més viscosos, s'hauria d'acabar augmentant la velocitat de gir, per tant la potència seria molt més elevada i probablement s'obtindrien resultats de més qualitat amb, per exemple, la turbina de disc, ja que amb una velocitat menor es podria desplaçar tot el volum. És per això que es creu que aquest disseny no donaria bons resultats per líquids excessivament viscosos.

Durant el projecte ha quedat demostrat el bon funcionament del programa Ansys CFX 11.0 en agitacions bifàsiques i s'han determinat els paràmetres a utilitzar en aquest tipus de simulacions. Posteriorment s'ha dissenyat un nou agitador mitjançant el qual s'ha aconseguit una agitació més homogènia amb un baix consum de potència, de manera que s'han assolit totalment els objectius del projecte.

Signat:

Francesc Garrido Castells

Girona, 30 de març de 2009

7. RELACIÓ DE DOCUMENTS

El present Projecte consta dels següents Documents:

Document 1. Memòria i annexos.

Annex A. Deflectors.

Annex B. Dimensionament de l'agitador.

Annex C. Turbulència.

Annex D. Potència requerida en agitació.

Annex E. Agitador Heidolph.

Annex F. Adhesiu Nural 92.

Annex G. Silicona Q7-9120.

Annex H. Taules.

Annex I. Pressupost.

Document 2. Plànols.

8. BIBLIOGRAFIA

Llibres i articles:

CHUNG, T.J. Computational fluid dynamics. Cambridge University Press. 2002.

COULSON, J.M., Richardson, J.F. Coulson & Richardson's chemical engineering. Butterworth Heinemann. Oxford. 2002.

CRESPO, A. Mecánica de fluidos. Editorial Thompson. Madrid. 2006.

DEPLON, D.A. CFD modelling of stirred tanks: Numerical considerations. Minerals engineering. Vol. 19. No. 10. P. 1059-1068. 2006.

LEVENSPIEL, O. Engineering flow and heat exchange. Plenum Press. Nova York. 1984.

MOTT, R. L. Mecánica de fluidos. Prentice Hall. Mèxic. 2006.

MCCABE, W.L., SMITH, J.C., HARRIOT, P. Operaciones unitarias en ingeniería química. McGraw – Hill. Madrid. 2002.

PERRY, R.H., GREEN, D.W., MALONEY, J.O. Manual del ingeniero químico. McGraw-Hill. México. 1992.

PETERS, M.S, TIMMERHAUS, K.D., WEST, R.E. Plant design and economics for chemical engineers. McGraw-Hill. Nova York. 2003.

PETRILA, T., Trif, D. Basic of fluid mechanics and introduction to computational fluid dynamics. Springer. Nova York. 2005.

REVILLA, A. Acotación. Editorial Donostiarra. San Sebastian. 1990.

RUSHTON, J.H. Mixing of liquids in chemical processing. Industrial and Engineering Chemistry. Vol. 44. No. 12. P. 2931-2936. 1952.

TATTERSON, G.B. Scaleup and design of industrial mixing processes. McGraw-Hill New York. 1994.

Pàgines web:

<http://www.es.rhino3d.com>. Conté tutorials del software de dibuix assistit per ordinador Rhinoceros, 10 de gener de 2009.

<http://www.fluent.com>. Conté informació sobre el programa Fluent Gambit utilitzat per realitzar els mallats de les geometries, així com sobre història de programes de CFD, 21 de gener de 2009.

<http://www.ansys.com>. Disposa d'informació i exemples del software de dinàmica de fluids computacional CFX, 5 de febrer de 2009.

www.cfd-online.com. Web que disposa de fòrums relacionats amb temes de simulació computacional, 8 de febrer de 2009.

<http://www.chemineer.com>. Web del fabricant d'agitadors Chemineer, 19 de febrer de 2009.

<http://www.agitadores.com/toc.htm>. Pàgina amb informació sobre tipus d'agitadors, usos i potència consumida per aquests, 20 de febrer de 2009.

http://www.marionmixers.com/ESP_agitator.asp. Web amb exemples i fotografies de diferents tipus d'agitadors utilitzats a la indústria, 24 de febrer de 2009.

<http://www.postmixing.com/mixing%20forum/baffles/baffles.htm>. Conté informació sobre deflectors en tancs, 25 de febrer de 2009.

<http://www.haywardgordon.com/documents/Baffles.pdf>. Disposa de documentació sobre dimensionament i posicionament de deflectors, 25 de febrer de 2009.

<http://www.ideafinder.com/history/inventions/mixers.htm>. Pàgina on s'explica alguns fets rellevants de la història dels agitadors, 3 de març de 2009.

Catàlegs

Catàleg comercial de l'empresa Vak Kimsa.

ANNEX A. DEFLECTORS.

A.1. Funció dels deflectors

Els deflectors són obstacles usats per millorar la distribució de les línies de corrent en agitacions de flux turbulent i fer que aquestes arribin a tot el fluid. Generalment són usats quan tenim impulsors de flux radial com els de tipus turbina de pales rectes, ja que fan que aquest flux perpendicular a la paret canviï de direcció, i vagi de forma paral·lela fins arribar a la superfície de contacte amb l'aire el que puja i amb el fons del tanc el que baixa, on tornen a canviar de direcció tot creant dos remolins, tal i com s'observa a la Figura A.1. La presència d'aquests deflectors també evita, sobretot en impulsors de flux radial centrats en el tanc, la creació d'un vòrtex al voltant de l'eix, el qual crea un efecte centrífug que fa que les partícules donin voltes però no es barregin.

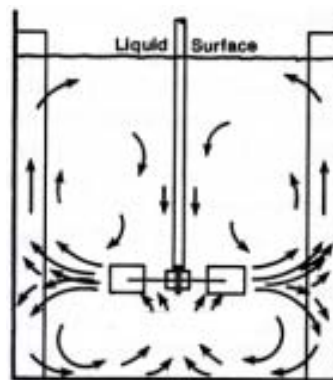


Figura A.1. Línies de corrent generades en un impulsor de turbina de pales rectes amb deflectors (Tatterson).

A.2. Tipus de deflectors

Els més comuns són els anomenats deflectors de paret, els quals estan formats per una placa metàl·lica rectangular, fixada perpendicular al llarg de la vertical de la paret del contenidor del fluid, tot i que hi ha moltes variants. Poden anar de punta a punta de la paret del tanc, només de la superfície del fluid fins a l'alçada de l'impulsor, estar enganxats a la paret o deixar un espai entre la paret i el deflector, encara que la majoria solen deixar un petit espai per evitar zones d'estancament darrere els deflectors, assegurant així una agitació completa en el menor temps possible. Aquesta distància ha de ser aproximadament $1/5$ de l'amplada del deflector.

També hi ha altres tipus de deflectors que no van contigus a les parets dels tancs com poden ser els de dit, de triangle, de superfície, de partició o els de fons, els quals es poden

veure a la Figura A.2. Els de superfície són útils quan s'ha d'evitar o limitar l'entrada superficial de gas. Els de fons es fan servir per incrementar la suspensió de sòlids, encara que acostumen a retenir sòlids a la seva superfície.

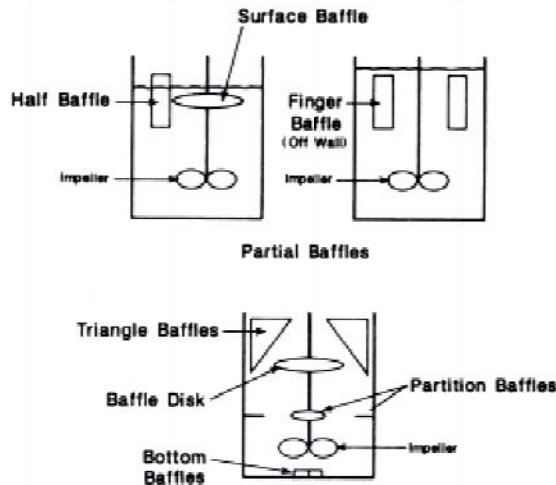


Figura A.2. Diferents tipus de deflectors (Tatterson).

En general els tancs que incorporen deflectors, en solen equipar com a mínim tres a 120°, encara que el més normal és que en tinguin quatre a 90°. Posar-ne més de quatre, tot i que la seva influència en la potència necessària dels impulsors pràcticament no varia, no és gaire habitual ja que no acostuma a millorar l'agitació.

A.3. Dimensionament

L'ample del deflector és funció de la viscositat del fluid. Per líquids d'alta viscositat no són necessaris, i a mesura que aquesta disminueix, l'ample necessari augmenta de forma lineal, tal i com es pot veure a la Figura A.3.

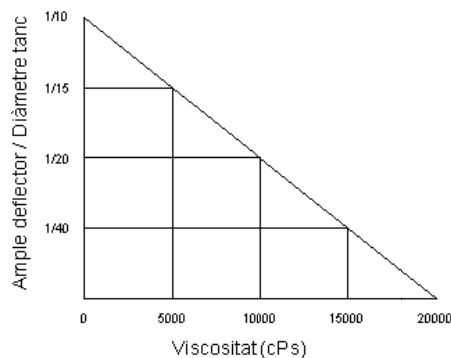


Figura A.3. Amplada dels deflectors en funció de la viscositat per tancs amb quatre deflectors (<http://www.haywardgordon.com/documents/Baffles.pdf>).

En quant a l'alçada de disseny, es sol aconsellar que vagin des del fons del tanc o des del punt de tangència del fons del tanc amb la paret, fins a l'alçada del fluid, i que no sobrepassin aquesta a menys que es vulgui que entri aire al fluid, ja que poden crear vòrtexs just darrere el deflector.

A.4. Tancs sense deflectors

Es poden donar casos on sigui complicat muntar deflectors. En aquests casos existeixen altres solucions per reduir els remolins, com pot ser descentrar l'impulsor una cinquena part del diàmetre del tanc per contenidors de fins a 1'5 metres de diàmetre o una quarta part per tancs de diàmetre més gran. Una altra solució pot ser inclinar l'eix de l'impulsor de manera que no vagi paral·lel a la paret.

A.5. Càlcul dels deflectors del projecte

Degut a que l'aigua té una baixa viscositat, necessitem incorporar deflectors d'amplada 1/10 del diàmetre del tanc, el qual és de 13'2 cm.

$$\text{Amplada dels deflectors} = \frac{1}{10} \cdot 13'2 = \mathbf{1'32 \text{ cm}}$$

La distància entre la paret del tanc i els deflectors ha de ser una cinquena part de l'ample d'aquests.

$$\text{Distància de separació} = \frac{1}{5} \cdot 1'32 = \mathbf{0'26 \text{ cm}}$$

El gruix dels deflectors serà de 5 mm i l'estructura de suport en els deflectors separats de la paret estarà formada per quatre peces de secció quadrada de 3x3 mm.

ANNEX B. DIMENSIONAMENT DE L'AGITADOR.

B.1. Impulsor

Les geometries estàndard per agitacions en règim turbulent, que són les més comunes i les que s'han usat per fer el present projecte, són les següents:

- L'alçada de fluid ha de ser igual al diàmetre del tanc.
- El diàmetre de l'impulsor ha de ser de $1/4$ a $1/2$ del diàmetre del tanc.
- L'amplada de la fulla o pala de l'impulsor ha de ser de $1/4$ a $1/6$ del diàmetre de l'impulsor.
- La distància del fons del tanc a l'impulsor ha de ser de $1/6$ a $1/2$ del diàmetre del tanc.

Aquestes mesures de referència, les quals es poden veure esquematitzades a la Figura B.1, han estat àmpliament aplicades i solen funcionar bé en la majoria de casos. Val a dir que solen ser les que usen els fabricants d'agitadors a l'hora de fer els fulls de característiques dels seus productes. Aquestes mesures no tenen perquè funcionar sempre, però poden servir per tenir un ordre de magnitud.

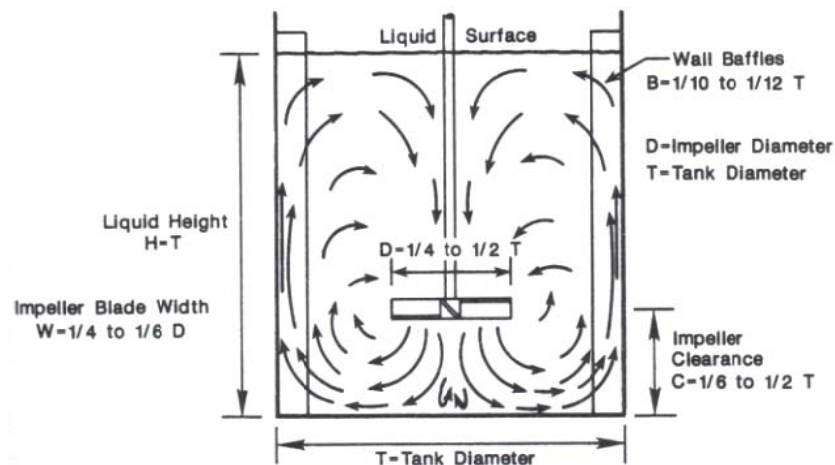


Figura B.1 Geometria estàndard per un agitador de turbina de pales inclinades en règim turbulent (Tatterson).

B.2. Tanc

Normalment, la fondària de fluid en un tanc ha de ser igual o una mica més gran que el diàmetre del recipient. Si l'alçada de líquid sobrepassa en molt el diàmetre, és necessari

acoblar dos o més rodets a l'eix de l'agitador. Generalment es posa un rodet per cada diàmetre d'altura del dipòsit.

B.3. Dimensionat dels nous impulsors

El tanc utilitzat al laboratori per realitzar les agitacions té un diàmetre interior de 13'2 cm. Tal i com s'ha vist anteriorment, el diàmetre de l'impulsor ha d'estar entre 1/4 i 1/2 del diàmetre del tanc. S'agafarà un terme mig, així doncs ha de ser 1/3.

$$D_{impulsor} = \frac{1}{3} \cdot 13'2 = 4'4cm$$

L'altra cota que fa falta és l'amplada de la pala que havia d'estar compresa entre 1/4 i 1/6 del diàmetre de l'impulsor. Agafant el mateix criteri d'abans s'agafa un valor de 1/5.

$$W_{pala} = \frac{1}{5} \cdot 4'4 \approx 0'9cm$$

La distància de l'impulsor al fons del tanc ha de ser entre 1/6 i 1/2 del diàmetre d'aquest. Degut a que l'alçada d'aigua (18'4 cm) és bastant major al diàmetre del tanc (13'2 cm), no seguirem el criteri d'agafar el punt mig del rang, sinó que situarem l'impulsor a una distància major del fons del tanc. La meitat del diàmetre són 6'6 cm i la sisena part són 2'2 cm, de manera que situarem els impulsors a 5'5 centímetres del fons del tanc.

En el disseny amb 2 impulsors, l'inferior es disposarà més pròxim al fons del tanc que en els altres casos, ja que el superior ja agitarà la zona de dalt del tanc. Tornem a seguir el criteri d'agafar el punt mig del rang que és a 1/4 del diàmetre del tanc, 4'4 cm.

ANNEX C. TURBULÈNCIA.

C.1. Tipus de flux

Els fluids poden circular per un conducte de dues maneres diferents, laminar o turbulentament. El flux laminar es dona quan el líquid té una velocitat baixa, de manera que circula axialment, paral·lelament a la superfície del fluid. Quan la velocitat augmenta, el fluid ja no es desplaça de forma tant lineal sinó que es mou a l'atzar, generant un flux turbulent, com es pot veure a la Figura C.1. La velocitat en la qual un fluid passa de flux laminar a turbulent és coneguda com a velocitat crítica.

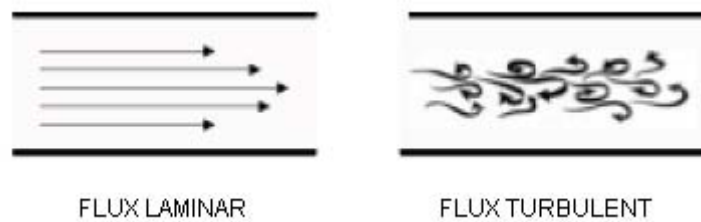


Figura C.1. Diferents tipus de flux.

C.2. Número de Reynolds

A finals del segle XIX, el matemàtic britànic Osborne Reynolds va estudiar les condicions per les quals un determinat fluid passa d'un tipus de flux a un altre, arribant a la conclusió que la velocitat crítica depenia de quatre factors, que eren el diàmetre del conducte, la viscositat, la densitat i la velocitat lineal del fluid, combinant els quals va trobar un determinat valor adimensional pel qual es passava de règim laminar a turbulent. Aquest valor es va anomenar número de Reynolds, que es determina com:

$$Re = \frac{D \cdot v \cdot \rho}{\mu} = \frac{D \cdot v}{\nu}$$

(Eq. C.1)

On: Re = número de Reynolds

D = diàmetre intern del conducte (m)

v = velocitat mitja del líquid (m/s)

ρ = densitat del líquid (kg/m^3)

μ = viscositat del líquid ($kg/m \cdot s$)

ν = viscositat cinemàtica del líquid (m^2/s)

Quan el nombre de Reynolds és igual o inferior a 2.100, el flux és laminar, quan és superior a 4.000 és turbulent i entre 2.100 i 4.000 s'anomena regió de transició, perquè el flux tant pot ser laminar com turbulent. En quant a agitació és altament recomanable no treballar mai en la regió de transició, ja que el seu comportament pot variar moltíssim i és difícil de predir.

C.3. Número de Reynolds per operacions d'agitació

El càlcul del número de Reynolds per agitadors és semblant al de conductes, ja que depèn dels mateixos paràmetres, però s'expressa una mica diferent:

$$Re = \frac{D_a^2 \cdot N \cdot \rho}{\mu} = \frac{D_a^2 \cdot N}{\nu} \quad (\text{Eq. C.2})$$

On: Re = número de Reynolds

D_a = diàmetre de l'agitador (m)

N = velocitat angular de l'agitador (rev/s)

ρ = densitat del líquid (kg/m^3)

μ = viscositat del líquid ($\text{kg}/\text{m} \cdot \text{s}$)

ν = viscositat cinemàtica del líquid (m^2/s)

En aquest cas, quan el número de Reynolds és inferior a 10, el règim és laminar, quan és superior a 10.000 és turbulent, i quan està entremig és de transició.

C.4. Determinació del règim experimental

➤ Validació

Totes les simulacions s'han realitzat amb fluid aigua i a una velocitat de gir de 800 revolucions per minut, de manera que entre els diferents agitadors només varia el diàmetre de l'agitador. La viscositat i la densitat de l'aigua a 25 °C són $0,894 \cdot 10^{-3} \text{ kg}/\text{m} \cdot \text{s}$ i $997,045 \text{ kg}/\text{m}^3$ respectivament (Annex H). Les 800 rpm s'han de passar a revolucions per segon.

$$N = 800 \frac{\text{rev}}{\text{min}} \cdot \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} = \frac{40 \text{ rev}}{3 \text{ s}}$$

- Impulsor de paleta.

L'impulsor de paleta té un diàmetre d'agitació de 17'8 mm.

$$D_a = 17'8 \text{ mm} \cdot \frac{1 \text{ m}}{1000 \text{ mm}} = 1'78 \cdot 10^{-2} \text{ m}$$

$$Re = \frac{D_a^2 \cdot N \cdot \rho}{\mu} = \frac{(1'78 \cdot 10^{-2})^2 \cdot \frac{40}{3} \cdot 997'045}{0'894 \cdot 10^{-3}} = \mathbf{4.712}$$

El número de Reynolds està entre 10 i 10.000, per tant hi ha un règim de transició.

- Impulsor de turbina plana.

L'impulsor de turbina plana té un diàmetre d'agitació de 44 mm.

$$D_a = 44 \text{ mm} \cdot \frac{1 \text{ m}}{1000 \text{ mm}} = 4'4 \cdot 10^{-2} \text{ m}$$

$$Re = \frac{D_a^2 \cdot N \cdot \rho}{\mu} = \frac{(4'4 \cdot 10^{-2})^2 \cdot \frac{40}{3} \cdot 997'045}{0'894 \cdot 10^{-3}} = \mathbf{28.789}$$

El número de Reynolds és superior a 10.000, per tant hi ha un règim turbulent.

- Altres impulsors.

La resta d'impulsors utilitzats tenen tots el mateix diàmetre que el de turbina plana, de manera que tindran el mateix número de Reynolds i per tant també generaran un règim turbulent.

- Millora

Tots els dissenys d'impulsors realitzats en la millora també tenen un diàmetre de 44 mm i el règim de gir és sempre igual o superior a 800 rpm per tant, mentre s'utilitzi com a fluid l'aigua, el règim serà sempre turbulent.

Només resta de veure que passa en el cas on s'utilitza silicona. La velocitat de gir és de 1.300 rpm, el diàmetre de l'impulsor de 44 mm, la viscositat cinemàtica a 25 °C és de 20 cSt i la densitat de 951 kg/m³ (Annex G).

$$v = 20 \text{ cSt} \cdot \frac{10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}}{1 \text{ cSt}} = 2 \cdot 10^{-5} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

$$N = 1300 \frac{\text{rev}}{\text{min}} \cdot \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} = \frac{65 \text{ rev}}{3 \text{ s}}$$

$$Re = \frac{D_a^2 \cdot N}{v} = \frac{(44 \cdot 10^{-2})^2 \cdot \frac{65}{3}}{2 \cdot 10^{-5}} = \mathbf{2.097}$$

El número de Reynolds està entre 10 i 10.000, per tant hi ha un règim de transició.

ANNEX D. POTÈNCIA REQUERIDA EN AGITACIÓ.

D.1. Variables que influeixen en la potència

Les variables geomètriques que determinen la potència necessària en un agitador són les següents:

- Tanc. Diàmetre, distància del fons del tanc fins al rodet, altura de líquid i amplada dels deflectors.
- Rodet. Diàmetre, velocitat de gir i dimensions de les paletes
- Fluid. Viscositat i densitat.

D.2. Potència teòrica

La potència es determina mitjançant les següents fórmules:

$$P = K_L \cdot N^2 \cdot D_a^3 \cdot \mu \quad \text{per } \text{Re} < 10 \quad (\text{Eq. D.1})$$

$$P = K_T \cdot N^3 \cdot D_a^5 \cdot \rho \quad \text{per } \text{Re} > 10.000 \quad (\text{Eq. D.2})$$

On: $P = \text{potència (W)}$

$K_L = \text{constant de flux laminar}$

$N = \text{velocitat angular de l'agitador (rev/s)}$

$D_a = \text{diàmetre de l'agitador (m)}$

$\mu = \text{viscositat del líquid (kg/m} \cdot \text{s)}$

$K_T = \text{constant de flux turbulent}$

$\rho = \text{densitat del líquid (kg/m}^3\text{)}$

Les constants K_L i K_T són funció dels paràmetres geomètrics S_1 , S_2 , S_3 , S_4 , S_5 i S_6 , anomenats factors de forma, i solen estar tabulades segons el tipus d'impulsor que tenim i del nombre de deflectors que incorpora el tanc. Aquests paràmetres geomètrics són nombres adimensionals que resulten de fer el quocient d'algunes de les variables que influeixen en el càlcul de la potència abans esmentades.

La Taula D.1 conté les constants K_L i K_T per diferents geometries estàndards.

| Tipo de impulsor | K_L | K_T |
|--|-------|-------|
| Impulsor hélice, tres palas | | |
| Paso 1.0 ⁴³ | 41 | 0.32 |
| Paso 1.5 ³⁷ | 48 | 0.87 |
| Turbina | | |
| Disco de seis palas ³⁷ ($S_3 = 0.25$, $S_4 = 0.2$) | 65 | 5.75 |
| Seis palas inclinadas ⁴² (45° , $S_4 = 0.2$) | — | 1.63 |
| Cuatro palas inclinadas ³⁷ (45° , $S_4 = 0.2$) | 44.5 | 1.27 |
| Paleta plana, dos palas ⁴³ ($S_4 = 0.2$) | 36.5 | 1.70 |

Taula D.1. Constants de flux laminar i turbulent per tancs amb 4 deflectors a la paret i un factor de forma $S_5 = 0'1$ (McCabe et al., 2002).

Com es pot observar, les constants són per tancs amb 4 deflectors. Durant la validació de la simulació no hem usat deflectors ja que aquests ens haurien evitat la creació del vòrtex. Lògicament, el fet d'afegir aquests obstacles per augmentar la turbulència fa augmentar la potència consumida pel motor de l'agitador, de manera que el càlcul de la potència teòrica ens hauria de sortir més gran que l'experimental i la computacional. La manera de calcular els factors de forma es pot veure a la Figura D.1.

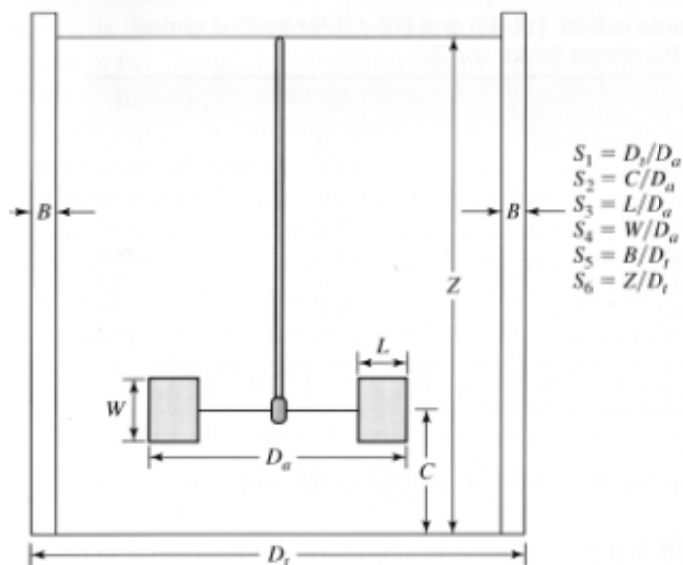


Figura D.1. Factors de forma d'un agitador de turbina (PETERS et al., 2003).

- Impulsor de paleta.

A l'Annex C s'ha determinat que l'impulsor de paleta genera un règim de transició, de manera que no podem utilitzar cap de les dues equacions abans esmentades. Tampoc disposem de les constants K_L i K_T , ja que aquestes només es troben tabulades per geometries estàndards.

- Impulsor de turbina plana.

En aquest cas ens trobem en règim turbulent, de manera que haurem d'aplicar l'Equació D.2. La velocitat de gir és de 800 rpm, la densitat de l'aigua a 25 °C és de 997'045 kg/m³ (Annex H). La constant de turbulència té un valor de 1'70 per un factor de forma $S_4 = 0'2$. El diàmetre de l'agitador és de 44 mm i l'ample de la pala de 9 mm.

$$800 \frac{rev}{min} \cdot \frac{1 min}{60 s} = \frac{40 rev}{3 s}$$

$$S_4 = \frac{W}{D_a} = \frac{9}{44} = 0'2$$

$$P = K_T \cdot N^3 \cdot D_a^5 \cdot \rho = 1'70 \cdot \left(\frac{40}{3}\right)^3 \cdot (4'4 \cdot 10^{-2})^5 \cdot 997'045 = \mathbf{0'66 W}$$

- Impulsor de turbina inclinada.

Estem en les mateixes condicions que el cas anterior, l'únic que canvia és la constant de turbulència, que és de 1'27 per un factor de forma $S_4 = 0'2$.

$$S_4 = \frac{W}{D_a} = \frac{9}{44} = 0'2$$

$$P = K_T \cdot N^3 \cdot D_a^5 \cdot \rho = 1'27 \cdot \left(\frac{40}{3}\right)^3 \cdot (4'4 \cdot 10^{-2})^5 \cdot 997'045 = \mathbf{0'50 W}$$

- Impulsor de turbina de disc.

Novament l'únic que canvia és la constant de turbulència, que té un valor de 5'75 pels factors de forma $S_3 = 0'25$ i $S_4 = 0'2$. Les pales del disc tenen unes dimensions de 11 x 9 mm.

$$S_3 = \frac{L}{D_a} = \frac{11}{44} = 0'25$$

$$S_4 = \frac{W}{D_a} = \frac{9}{44} = 0'2$$

$$P = K_T \cdot N^3 \cdot D_a^5 \cdot \rho = 5'75 \cdot \left(\frac{40}{3}\right)^3 \cdot (4'4 \cdot 10^{-2})^5 \cdot 997'045 = \mathbf{2'24 \text{ W}}$$

D.3. Potència experimental

La potència de sortida a l'eix d'un motor monofàsic de corrent alterna com el que tenim acoblat a l'eix del nostre agitador, es pot calcular de la següent manera:

$$P = V \cdot I \cdot \eta_m$$

(Eq. D.3)

On: $P = \text{potència a l'eix (W)}$

$V = \text{voltage (V)}$

$I = \text{intensitat (A)}$

$\eta_m = \text{rendiment mecànic}$

El nostre motor té una potència màxima de 18 W a l'eix quan se subministren 77 W al motor (Annex E).

$$\eta_m = \frac{P_{eix}}{P_{entrada}} = \frac{18}{77} = 0'234$$

Per assegurar-nos que la velocitat de gir experimental sigui la mateixa que la teòrica, i per tant poder comparar-les, enganxarem un gomet a l'acoblament del motor amb l'eix de l'impulsor, posarem en marxa l'agitador i mesurarem les revolucions per minut del gomet mitjançant un tacòmetre digital de raig làser. El motor incorpora un variador de velocitat mecànic de con, de manera que girant una rodeta s'augmenta o es disminueix la velocitat de gir del rodet. Així doncs es regularà aquesta velocitat fins a obtenir la mateixa que s'ha usat per fer el càlcul teòric. Tant aquest variador de velocitat com el tacòmetre digital es poden veure a la Figura D.2.

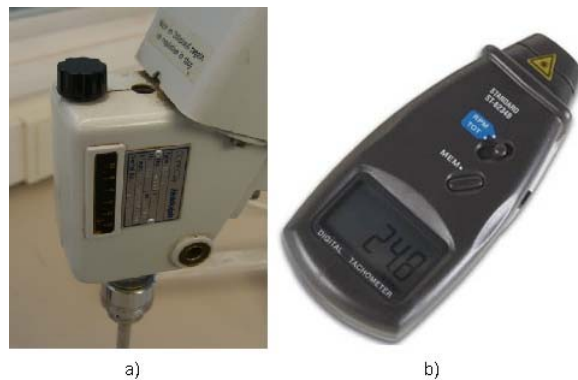


Figura D.2. a) variador de velocitat mecànic; b) tacòmetre.

Per determinar el voltatge i la intensitat consumida pel motor es fa servir un multímetre. Per fer la lectura de voltatge s'ha de connectar l'aparell en paral·lel, és a dir posant una pinça al cable neutre i una altra al cable fase. El voltatge és constant i té un valor de 233'7 V.

Per fer la lectura d'intensitat s'ha de connectar el multímetre en sèrie, de manera que s'ha de tallar i pelar el cable fase o neutre i posar una pinça a cada extrem. El multímetre i les formes de connexió es poden veure representades a la Figura D.3.

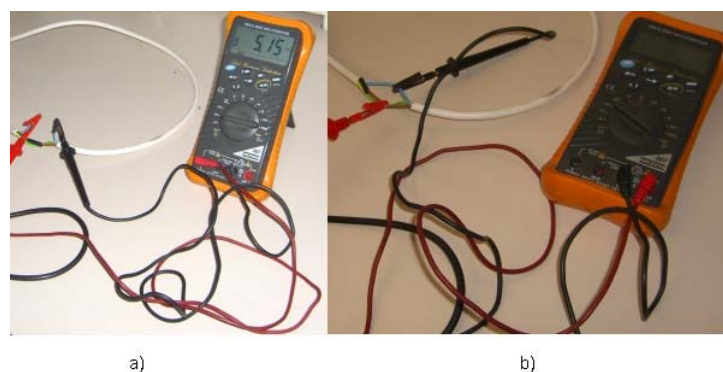


Figura D.3. a) Connexió en sèrie; b) Connexió en paral·lel.

- Impulsor de paleta.

La intensitat mesurada va ser de 1'23 mA.

$$P = V \cdot I \cdot \eta_m = 233'7 \cdot 1'23 \cdot 10^{-3} \cdot 0'234 = \mathbf{0'067 W}$$

- Impulsor de turbina plana.

La intensitat mesurada va ser de 8'41 mA.

$$P = V \cdot I \cdot \eta_m = 233'7 \cdot 8'41 \cdot 10^{-3} \cdot 0'234 = \mathbf{0'46 W}$$

- Impulsor de turbina inclinada.

La intensitat mesurada va ser de 5'15 mA.

$$P = V \cdot I \cdot \eta_m = 233'7 \cdot 5'15 \cdot 10^{-3} \cdot 0'234 = \mathbf{0'28 W}$$

- Impulsor de turbina de disc.

La intensitat mesurada va ser de 18'16 mA.

$$P = V \cdot I \cdot \eta_m = 233'7 \cdot 18'16 \cdot 10^{-3} \cdot 0'234 = \mathbf{0'99 W}$$

D.4. Potència computacional

El programa Ansys CFX 11.0 té una gran varietat d'opcions de càlcul, entre les quals s'inclou el moment. Com que la potència és funció del moment, es pot obtenir un tercer càlcul per poder comparar les potències.

$$P = M \cdot w$$

(Eq. D.4)

On: $P = \text{potència (W)}$

$$M = \text{moment } (N \cdot m)$$

$$w = \text{velocitat de rotació } (\text{rad/s})$$

Al programa se li ha de definir la variable de càlcul, a quina zona s'ha de calcular, respecte quin eix i en quins fluids (Figura D.4). La nostra variable és el moment (*torque*), la zona de càlcul són les pales de l'agitador (parets agitador), l'eix de referència el Z i com a fluids posem tots.

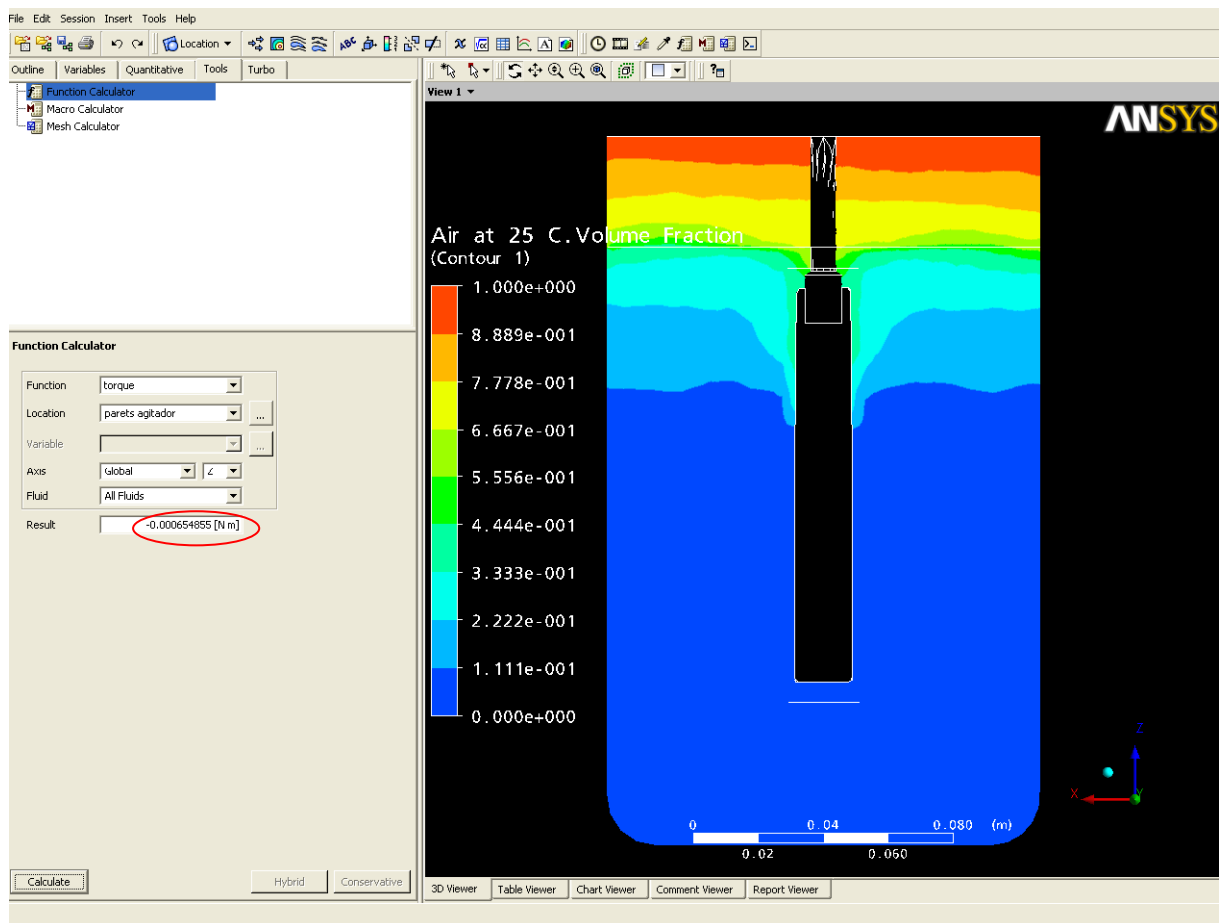


Figura D.4. Càlcul del moment necessari a la pala de l'agitador de paleta amb el programa Ansys CFX 11.0.

El signe del moment no té cap importància ja que depèn del sentit de gir de l'agitador. Degut a que s'ha definit l'eix de rotació com a Global Z i la velocitat de gir és de 800 rpm, el moment generat resulta negatiu (regla de la mà dreta). Així doncs per realitzar els càlculs de potència s'agafarà tant la velocitat de gir del motor com el moment en valor absolut, ja que una potència negativa no té cap sentit.

➤ Impulsor de paleta.

En tots els casos la velocitat de gir és la mateixa, de 800 rpm. Com es pot apreciar a la Figura D.4, el moment calculat pel programa a la paleta de l'agitador, en valor absolut, és de $6'55 \cdot 10^{-4}$ N·m.

$$w = 800 \frac{\text{rev}}{\text{min}} \cdot \frac{2 \cdot \pi \text{ rad}}{1 \text{ rev}} \cdot \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} = \frac{80 \cdot \pi}{3} \text{ rad/s}$$

$$P = M \cdot w = 6'55 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{80 \cdot \pi}{3} = \mathbf{0'055 \text{ W}}$$

➤ Impulsor de turbina plana.

En aquest cas el moment que ens dóna el programa és aproximadament 10 vegades més gran, $6'06 \cdot 10^{-3}$ N·m.

$$P = M \cdot w = 6'06 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{80 \cdot \pi}{3} = \mathbf{0'51 \text{ W}}$$

➤ Impulsor de turbina inclinada.

En aquest cas el moment calculat és força inferior al de la turbina plana, tant sols $3'79 \cdot 10^{-3}$ N·m.

$$P = M \cdot w = 3'79 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{80 \cdot \pi}{3} = \mathbf{0'32 \text{ W}}$$

➤ Impulsor de turbina de disc.

Treballant amb el volum complet el moment és de $1'29 \cdot 10^{-2}$ N·m. En la simulació realitzada amb una sisena part del volum ens dóna un moment de $2'09 \cdot 10^{-3}$ N·m.

Per realitzar la mesura del moment en el volum parcial, el programa fa el càlcul amb el volum que disposa, que inclou tant sols una de les 6 pales que conté l'impulsor real. Així

doncs el resultat obtingut s'ha de multiplicar per 6 per recrear les 6 pales del volum complet de l'impulsor de disc.

$$P_{volum\ sencera} = M \cdot w = 1'29 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{80 \cdot \pi}{3} = \mathbf{1'08\ W}$$

$$P_{volum\ parcial} = 6 \cdot M \cdot w = 6 \cdot 2'09 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{80 \cdot \pi}{3} = \mathbf{1'05\ W}$$

En el cas de la tercera part de l'impulsor de turbina de disc amb 3 deflectors ha donat un moment de $5'32 \cdot 10^{-3}$ N·m quan aquests estan enganxats a la paret, i de $5'42 \cdot 10^{-3}$ N·m quan es troben separats. Aquests moments s'han de multiplicar per 3 per obtenir el moment necessari per agitar tot el volum.

$$P_{volum\ parcial\ amb\ 3\ deflectors} = 3 \cdot M \cdot w = 3 \cdot 5'32 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{80 \cdot \pi}{3} = \mathbf{1'34\ W}$$

$$P_{volum\ parcial\ amb\ 3\ deflectors\ separats} = 3 \cdot M \cdot w = 3 \cdot 5'42 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{80 \cdot \pi}{3} = \mathbf{1'36\ W}$$

➤ Nou disseny.

S'han realitzat dues simulacions amb el nou disseny una a 800 rpm i l'altra a 2.200 rpm. En el primer cas ha donat un moment de $6'05 \cdot 10^{-4}$ N·m. En el segon cas el moment obtingut és de $4'74 \cdot 10^{-3}$ N·m. Aquests s'hauran de multiplicar per 3 ja que treballem amb només una tercera part del volum.

$$P_{nou\ disseny\ amb\ 3\ deflectors\ a\ 800\ rpm} = 3 \cdot M \cdot w = 3 \cdot 6'05 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{80 \cdot \pi}{3} = \mathbf{0'15\ W}$$

$$\begin{aligned} P_{nou\ disseny\ amb\ 3\ deflectors\ a\ 2.200\ rpm} &= 3 \cdot M \cdot w = \\ &= 3 \cdot 4'74 \cdot 10^{-3} \cdot 2200 \frac{rev}{min} \cdot \frac{2 \cdot \pi\ rad}{1\ rev} \cdot \frac{1\ min}{60\ s} = \mathbf{3'27\ W} \end{aligned}$$

- Nou disseny amb 2 impulsors.

Al tenir 2 impulsors, el moment serà la suma dels calculats pel programa a les parets de l'agitador inferior i superior. En total es van realitzar dues simulacions, una a 800 rpm i una altra a 1.300 rpm. En el primer cas el moment obtingut a l'impulsor inferior va ser de $5'54 \cdot 10^{-4}$ N·m i en el superior de $5'02 \cdot 10^{-4}$ N·m. En el segon cas van ser de $1'47 \cdot 10^{-3}$ N·m i $1'32 \cdot 10^{-3}$ N·m respectivament. La simulació es va realitzar amb una tercera part del volum, de manera que en el càlcul de la potència, el moment s'haurà de multiplicar per 3.

$$\begin{aligned}
 P_{\text{nou disseny amb 2 impulsors i 3 deflectors a 800 rpm}} &= 3 \cdot (M_1 + M_2) \cdot \omega = \\
 &= 3 \cdot (5'54 \cdot 10^{-4} + 5'02 \cdot 10^{-4}) \cdot \frac{80 \cdot \pi}{3} = \mathbf{0'27 \text{ W}}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P_{\text{nou disseny amb 2 impulsors i 3 deflectors a 1.300 rpm}} &= 3 \cdot (M_1 + M_2) \cdot \omega = \\
 &= 3 \cdot (1'47 \cdot 10^{-3} + 1'32 \cdot 10^{-3}) \cdot 1300 \frac{\text{rev}}{\text{min}} \cdot \frac{2 \cdot \pi \text{ rad}}{1 \text{ rev}} \cdot \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} = \mathbf{1'14 \text{ W}}
 \end{aligned}$$

- Simulació amb silicona.

Aquesta s'ha realitzat amb el nou disseny de 2 impulsors i 3 deflectors, per tant també s'ha de sumar els moments de les parets de l'agitador inferior i superior. Els moments obtinguts respectivament són de $1'42 \cdot 10^{-3}$ N·m i $1'48 \cdot 10^{-3}$ N·m. La velocitat de gir és de 1.300 rpm i només tenim un terç del volum per tant la suma dels moments s'ha de multiplicar per 3.

$$\begin{aligned}
 P_{\text{simulació amb silicona a 1.300 rpm}} &= 3 \cdot (M_1 + M_2) \cdot \omega = \\
 &= 3 \cdot (1'42 \cdot 10^{-3} + 1'48 \cdot 10^{-3}) \cdot 1300 \frac{\text{rev}}{\text{min}} \cdot \frac{2 \cdot \pi \text{ rad}}{1 \text{ rev}} \cdot \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} = \mathbf{1'18 \text{ W}}
 \end{aligned}$$

ANNEX E. AGITADOR HEIDOLPH.

E.1. Estructura

Per realitzar la part pràctica del projecte s'ha usat un agitador de paleta de la casa Heidolph que es troba al laboratori d'olis i lubricants de la Universitat de Girona. Normalment s'usa per dispersar oxigen en olis, usats per fer pràctiques o projectes de fi de carrera.

Consta d'una bancada formada per un suport de doble T que incorpora un eix vertical de 13 mm de diàmetre que serveix per regular l'alçada de treball de l'impulsor. El motor es fixa a aquest eix mitjançant una pinça de fixació de cargol. El motor disposa de dos eixos de sortida i d'un variador mecànic de velocitat per regular la velocitat de gir d'ambdós. En aquests eixos s'hi acobla un mandrí que serveix per acoblar-hi l'eix de l'impulsor, el qual pot albergar-ne de fins a 8'5 mm de diàmetre. L'aparell es pot veure a la Figura E.1.



Figura E.1. Agitador Heidolph RZR 1

E.2. Característiques tècniques del motor

El motor està dissenyat per treballar a 220 V, una freqüència de 50 Hz i consumeix una potència màxima de 77 W, encara que a l'eix només pot donar 18 W degut a les pèrdues mecàniques. Pel primer eix de sortida té un règim de treball de 35 a 250 rpm i pel segon eix de 280 a 2.200 rpm, de manera que combinant els dos pot treballar de 35 a 2.200 rpm sense problemes. Per fer el canvi d'eix de treball s'ha de girar el motor 90° ja que són

perpendiculars. El pes del motor és de tant sols 2'7 kg i té un rang de treball de 0 a 40 °C. El volum màxim d'agitació d'aigua són 20 litres i està capacitat per moure fluids amb una viscositat de fins a 40.000 Pa s. La Figura E.2 mostra la placa de característiques del motor.

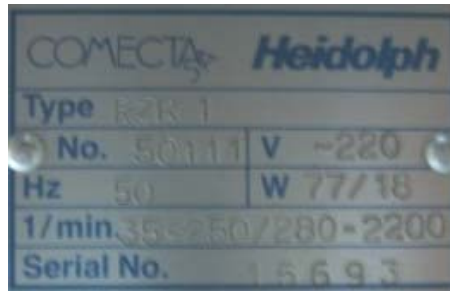


Figura E.2. Placa de característiques

L'especejament dels components mecànics del motor de l'agitador es pot veure a la Figura E.3.

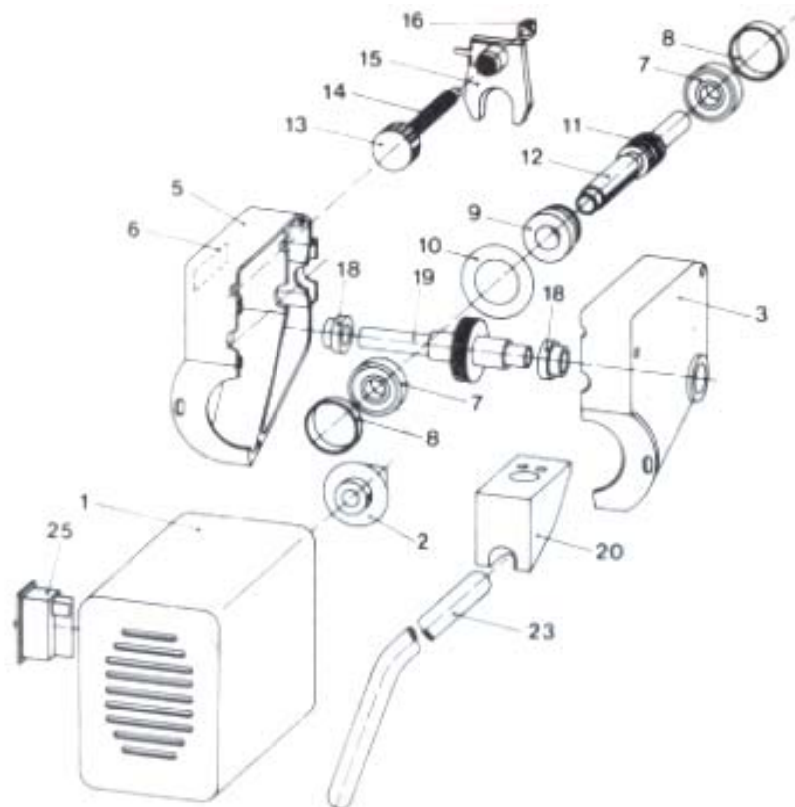


Figura E.3. Components del motor

E.3. Tríptic de l'agitador

A la Figura E.4 es mostra el tríptic que contenia l'aparell el dia de la seva compra. Aquest conté una petita explicació de les característiques tècniques i dels elements que constitueixen l'aparell, així com consideracions que s'han de tenir en compte a l'hora d'usar l'aparell.

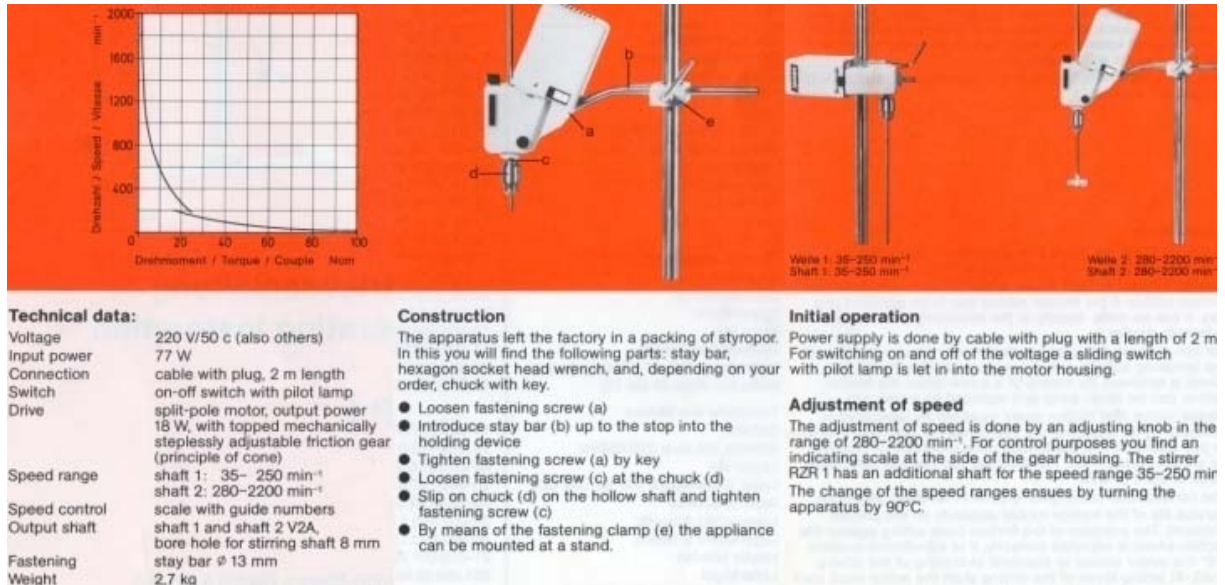


Figura E.4. Tríptic de l'agitador Heidolph RZR 1.

E.4. Instruccions d'ús

A continuació s'adjunta el manual d'ús de l'aparell.



RZR 1



**Instrucciones de
Empleo**

CONTENIDO DEL SUMINISTRO Y ACCESORIOS







Contenido del suministro

| | Denominación | Cantidad | Número de pedido 230V / 50Hz | Número de pedido 115V / 60Hz |
|--|----------------------------|----------|---------------------------------|---------------------------------|
| | RZR 1 | 1 | 501-11000-00 | 501-11000-04 |
| | Montante | 1 | 22-02-14-01-14 | 22-02-14-01-14 |
| | 4 mm llave macho hexagonal | 1 | 02-07-01-01-01 | 02-07-01-01-01 |
| | Mandril de sujeción 8,5 | 1 | 509-01000-00 | 509-01000-00 |
| | Llave mandril de sujeción | 1 | 02-07-03-01-01 | 02-07-03-01-01 |
| | Manual de instrucciones | 1 | 01-005-001-16 | 01-005-001-16 |










Accesorios y paletas agitadoras (opcionales)

| | Denominación | Número de pedido |
|--|--------------------------------|------------------|
| | Trípode | 570-12000-00 |
| | Borne | 570-22000-00 |
| | Acoplamiento agitador flexible | 509-03000-00 |
| | Agitador de hoja BR10 | 509-10000-00 |
| | Agitador de hoja BR11 | 509-11000-00 |
| | Agitador de hoja BR12 | 509-12000-00 |
| | Agitador de hoja BR13 | 509-13000-00 |
| | Agitador de hoja BR14 | 509-14000-00 |
| | Agitador de hélice PR30 | 509-30000-00 |
| | Agitador de hélice PR31 | 509-31000-00 |
| | Agitador de hélice PR32 | 509-32000-00 |
| | Agitador de hélice PR33 | 509-33000-00 |
| | Agitador de turbina TR20 | 509-20000-00 |
| | Agitador de turbina TR21 | 509-21000-00 |
| | Agitador de media luna HR18 | 509-18000-00 |
| | Agitador de anclaje AR19 | 509-19000-00 |
| | Agitador de hélice PR39 | 509-39000-00 |
| | Bloqueo del agitador NS 29/32 | 509-09000-00 |

ADVERTENCIAS GENERALES

-  Desempaquete el aparato cuidadosamente. Compruebe el contenido del suministro y, si se da el caso, informe inmediatamente al proveedor de los posibles daños o piezas que falten.
-  Lea las instrucciones de empleo detallada y atentamente y asegúrese de que cada uno de los operarios del aparato haya leído cuidadosamente las instrucciones antes de la puesta en marcha.
-  Guarde las instrucciones de empleo en un lugar accesible para todos.
-  Los aparatos vienen provistos de forma estándar con un enchufe EURO (DIN 49441 CEE 7/II 10/ 16 A 250 V). Para Norteamérica, con un enchufe US.NORM (NEMA Pub.No.WDI.1961 ASA C 73.1 . 1961 página 8 15A 125V).
-  Si en algún país, el aparato debe utilizarse con otro sistema de enchufe para su funcionamiento, es necesario un adaptador homologado o bien que un profesional sustituya el enchufe suministrado por un enchufe autorizado y adecuado a esta red.
-  En el suministro estándar, el equipo está puesto a tierra. ¡Al sustituir el enchufe original, sobre todo tenga en cuenta que el conductor de seguridad quede conectado al nuevo enchufe!

ADVERTENCIAS DE SEGURIDAD

-  Respete todas las disposiciones de seguridad y prevención de accidentes vigentes en laboratorios!
-  Extrema precaución al manipular medios fácilmente inflamables. Observe las hojas de datos de seguridad.
-  Precaución al emplear materiales fácilmente inflamables o explosivos en la proximidad del aparato. Aunque los motores trabajan sin emisión de chispas, el aparato no está protegido contra explosión.
-  Antes de la conexión del equipo a la red eléctrica se ha de tener cuidado de que la tensión de la red coincida con los datos de la placa del modelo.
-  Conecte la herramienta agitadora únicamente a un enchufe con toma de tierra.
-  Apague el enchufe a red cuando el aparato no esté en funcionamiento o antes de que sea tomado por la red.
-  Las reparaciones únicamente deben ser llevadas a cabo por un especialista autorizado por Heidolph Instruments.
-  Tenga presentes las disposiciones de seguridad correspondientes para el funcionamiento de equipos con ejes rotatorios.
-  Compruebe que el aparato esté colocado en un lugar seguro y estable.

ESTRUCTURA

Montar la barra soporte

Depositar el agitador sobre una superficie plana y estable.
Aflojar el tornillo de fijación (A).
Introducir la barra soporte (B) hasta el tope en el alojamiento.
Apretar el tornillo de fijación (A) con una llave.

Montar el mandril

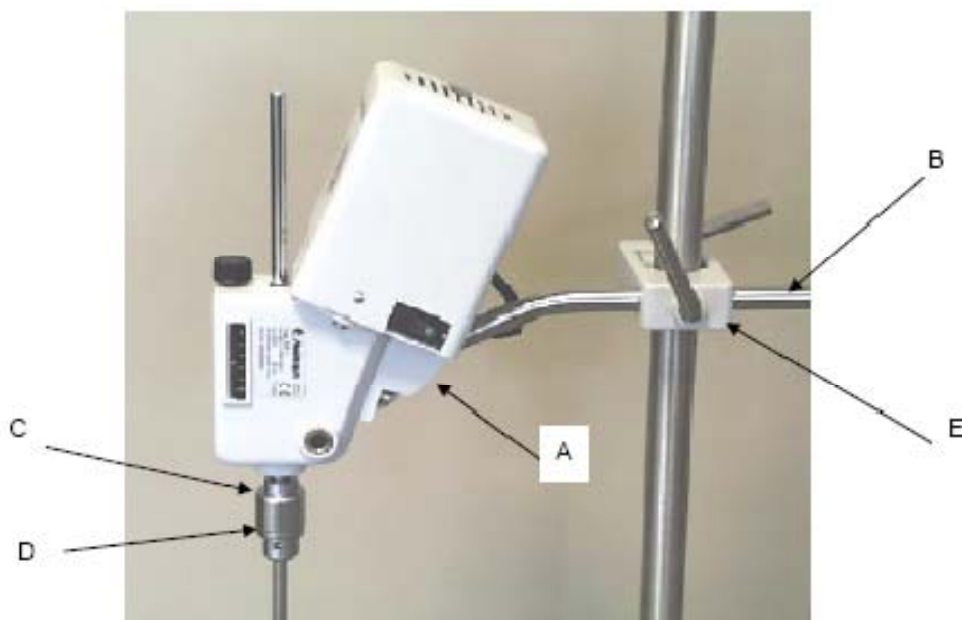
Pasar el mandril (D) por el eje hueco motriz y apretar el tornillo de fijación (C) con una llave Allen. Obsérvese que el tornillo de fijación (C) agarra en la escotadura del eje hueco motriz.

Fijar el agitador al trípode

Si se emplea el trípode Heidolph se ha de fijar el dispositivo de apriete (E) al trípode.
Introducir la barra soporte (B) y el agitador fijado en el orificio cilíndrico del dispositivo de apriete. A continuación, fijar el agitador suspendido con las manivelas dispuestas a derecha e izquierda del dispositivo de apriete.

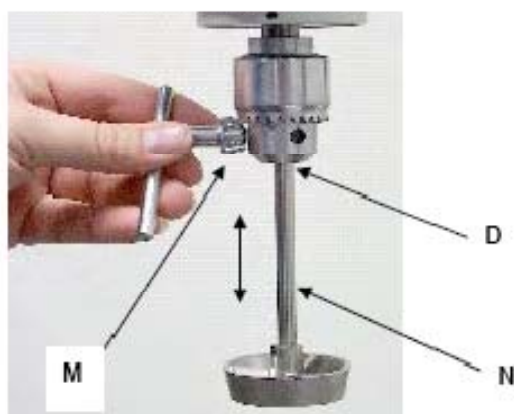


Tenga presentes las disposiciones de seguridad correspondientes para el funcionamiento de equipos con ejes rotatorios



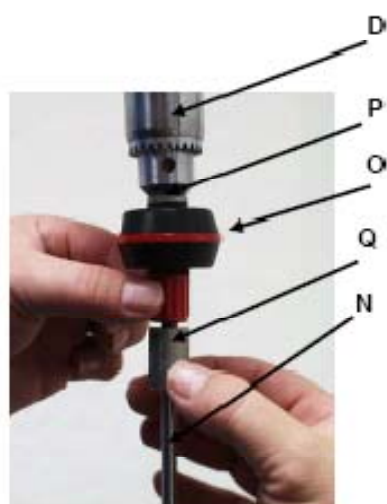
Montar el útil agitador

Introducir la varilla de la paleta agitadora (N) en el mandril abierto (D), justar la altura prevista y enroscar el anillo de cierre del mandril manualmente y apretarlo con la llave (M).



Introducir el acoplamiento agitador flexible

Introducir el acoplamiento flexible del agitador (O) con el pivote (P) en el mandril (D) y apretar con la llave de mandril (M). A continuación, introducir el útil agitador (N) con el extremo de la varilla en la sujeción receptora (Q) del acoplamiento flexible del agitador, y apretarla fuertemente (girar a la derecha).



MANEJO Y FUNCIONAMIENTO



- Antes de conectar el cable de corriente a la red eléctrica, obsérvese que:
- la tensión y la frecuencia del aparato coincide con la de la red eléctrica. (los datos de la tensión del aparato figuran en la placa de modelo).
 - el interruptor esté en la posición "0".

Puesta en marcha

La conexión a la red eléctrica tiene lugar por medio de un cable de 2 m con enchufe. Para conectar y desconectar la alimentación de la red eléctrica se ha previsto un interruptor en la carcasa del motor con un testigo de control. Un testigo de control verde advierte que el aparato está conectado.

Ajustar las revoluciones

El ajuste de las revoluciones se realiza por medio de una ruedecilla de regulación (F) en regímenes de 280 - 2.200 rpm.

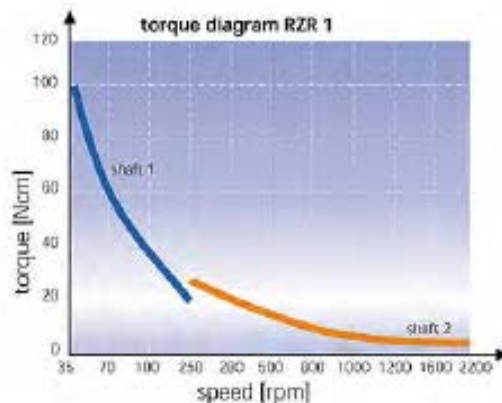
Para el control de las revoluciones se ha previsto una escala (G) en el lateral de la carcasa del engranaje. El agitador RZR 1 posee un eje auxiliar (1) para los regímenes de revoluciones 35 - 250 rpm. El cambio de régimen de revoluciones tiene lugar pivotando el aparato 90° (véase ilustración)



eje 1 : 35-250 min⁻¹



eje 2 : 280-2200 min⁻¹



LIMPIEZA Y MANTENIMIENTO

Para la limpieza puede pasar un paño húmedo (agua de jabón suave) por la carcasa y la superficie del aparato.



Advertencia

No utilice en ningún caso lejías clóricas, productos de limpieza con base de cloro, medios abrasivos, amoníaco, lana para limpiar o medios de limpieza con componentes metálicos. Podría dañarse la superficie del aparato.

Mantenimiento

El motor y el engranaje están equipados con cojinetes que no necesitan mantenimiento y están dimensionados para un funcionamiento continuo. El desgaste depende en este tipo de engranajes del forro de fricción, en esta versión en forma de rueda de fricción sintética. La sustitución de dicha rueda puede realizarse fácilmente en el mismo laboratorio. Para ello se ha de abrir la carcasa del engranaje, aflojando el tornillo de fijación y extrayendo el eje principal junto a la rueda de fricción. La rueda de fricción se desmonta con un destornillador, y se sustituye por una nueva. Obsérvese que los engranajes de fricción no se han de engrasar o lubricar. Por ello, al realizar el cambio de la rueda de fricción, obsérvese que el cono de fricción no presente ni siquiera una capa fina de grasa o aceite. Para eliminar la grasa utilizar gasolina de lavado o alcohol. El montaje del engranaje se realizará en el orden inverso al del desmontaje. La vida útil de la rueda de fricción depende de la presión de contacto. La presión de contacto del cono de fricción sobre la rueda de fricción estará correctamente ajustada, si el motor se detiene al frenar el eje motriz en la posición de regulación „10“. Al volver a liberar el eje motriz el motor tiene que volver a moverse inmediatamente. Para comprobarlo, controlar a través de la ranura de la tapa del motor.

El aparato no necesita mantenimiento. En caso de una posible reparación, ésta será realizada exclusivamente por un especialista autorizado por Heidolph Instruments. Diríjase en este caso a su distribuidor Heidolph Instruments o a una representación de Heidolph Instruments

DESMONTAJE, TRANSPORTE Y ALMACENAMIENTO

Desmontaje

1. Desconectar el aparato y retirar el enchufe de la corriente eléctrica.
2. Retirar todo el material que se encuentre en el entorno del agitador para poder desmontar el aparato sin complicaciones.
3. Desmontar la hélice agitadora con la llave de mandril (d).
4. Aflojar las manivelas del dispositivo de apriete y extraer el agitador.
5. Aflojar el tornillo de sujeción (c) con una llave Allen y desmontar el mandril.

Transporte y Almacenamiento

1. Para evitar daños en el transporte, depositar el aparato y sus componentes en el embalaje original o en un recipiente adecuado. Cerrar el embalaje con precinto.
2. El aparato se almacenará en lugar seco.

ELIMINACION DE DESECHOS

Deseche los aparatos viejos o los componentes defectuosos en un puesto de recogida especializado. Separe también el material viejo en metal, vidrio, plástico, etc.
El embalaje también debe desecharse de acuerdo con el medio ambiente (separación de materiales).

FALLOS Y SU SOLUCION

Las reparaciones en los componentes eléctricos o electrónicos las ha de llevar a cabo personal cualificado.

El interruptor de puesta en marcha del agitador permanece apagado

1. Medida : revisar el cable de corriente.

El agitador no funciona (el interruptor de puesta en marcha está encendido)

2. La protección de sobrecalentamiento ha reaccionado por sobrecarga
Medida: dejar que el aparato se enfríe durante al menos 20 minutos.

El motor está en marcha, pero el eje motriz no gira

3. La arandela de goma o el cono de fricción están desgastados
Medidas: sustituir la arandela o el cono de fricción y reajustar la presión

DATOS TÉCNICOS

RZR 1

| | | |
|---|-------|---|
| <i>Modelo</i> | | RZR 1 |
| <i>Potencia de entrada / de salida del motor</i> | (W) | 77/18 |
| <i>Velocidades del engranaje</i> | | 2 |
| <i>Area n° revoluciones</i> | (rpm) | 35-250 und 280-2200 |
| <i>Indicación del núm. de revoluciones</i> | | escala |
| <i>Par de giro máximo</i> | (Ncm) | 100 |
| <i>Par de giro (1000 min⁻¹)</i> | (Ncm) | 8 |
| <i>Medidas (en mm) (BxHxT)</i> | | 71x250x172 |
| <i>Medidas montante (en mm) (ØxL)</i> | | 13x300 |
| <i>Peso RZR1</i> | (kg) | 2.5 |
| <i>Diám. de la varilla de la paleta del agitador (introducible)</i> | (mm) | 8,0 máx, |
| <i>Temperatura de servicio</i> | (°C) | 0-40 |
| <i>Humedad relativa del aire</i> | | max.80% ohne Betauung |
| <i>Tipo de proteccion</i> | | IP 20 |
| <i>Eliminación de Interferencias vïa radio</i> | | Segùn EN 50081 |
| <i>Protección del motor</i> | | Prot. sobrecalentamiento con autoconexión |
| <i>Tipo de servicio</i> | | 100% tiempo de conexión |

ANNEX F. ADHESIU NURAL 92.



NURAL 92

Hoja de Datos técnicos
Versión:

Adhesivo reparador de plásticos.

Tipo de adhesivo:

Pattex Nural 92 es un adhesivo rápido y transparente, de gran resistencia, especial para pegar y reparar la mayoría de los plásticos.

Campo de aplicación:

Pattex Nural 92 pega, repara y rellena de forma permanente. Una vez endurecido puede ser lijado, pulido, taladrado y mecanizado. Se adhiere a PVC, ABS, metacrilato, formica, baquelita, policarbonato, poliuretano expandido, poliestireno, baquelita, skay, nylon, hule y telas plastificadas. También se adhiere a otros materiales metálicos, madera, cerámica y vidrio. No es apto para polietileno, polipropileno ni teflonR.

Características de empleo:

- Modo de empleo:

1. Las superficies a unir deben estar secas y limpias de polvo y grasa. Para ello pueden limpiarse con alcohol o acetona.
2. Lijar las superficies siempre que sea posible. La adherencia sobre superficies rugosas es mayor que sobre superficies lisas.
3. Sobre una superficie plana medir partes iguales en volumen (igual longitud) de A y de B.
4. Mezclar los dos componentes con la ayuda de la espátula hasta conseguir un color uniforme.
5. Aplicar una capa fina sobre una de las superficies y unir ambas.

- Peso específico:

Componente A: 1,2 g/ml

Componente B: 1,15 g/ml

- **Tiempo de mezcla y manipulación:**
1. Se dispone de 2 minutos para mezclar y aplicar el producto.
 2. Tiempo de manipulación: 10 minutos. No mover ni someter a tensiones hasta pasado este tiempo.

- **Tiempo de endurecimiento:**
- Al cabo de 1 hora resiste 100 Kg/cm². Esta resistencia permite lijar, mecanizar o taladrar el producto. Estos valores son válidos para temperaturas entre 20 y 25°C. Para acelerar el endurecimiento se puede someter la unión o la reparación a una temperatura de unos 70°C; por el contrario, temperaturas bajas retrasan el endurecimiento. Mientras endurece, se recomienda mantener la pieza unida o reparada por encima de 15°C.

Propiedades del adhesivo endurecido:

- **Color:** Transparente.
- **Resistencia térmica:** -30 °C a 150 °C. En uniones sometidas a grandes esfuerzos se recomienda no sobrepasar +60 °C.
- **Resistencia a tracción por cizalla: (EN 1465)** 115 Kg/cm² (4 horas, 23°C, acero); 50 Kg/cm² (4 horas, 23°C, plásticos como PVC rígido y ABS).

Otras propiedades: No contiene disolventes y no altera su volumen al endurecer. Resistente al agua, al aceite y a los disolventes usuales. También resiste a los ácidos y álcalis diluidos.

Presentación: Tubos de 22 ml y 120 ml (parte A + parte B).

Condiciones de almacenamiento: El producto debe ser almacenado entre 10 °C y 25 °C.

Plazo de validez: El plazo de validez de este producto, conservado dentro de su envase original cerrado y en correctas condiciones de almacenamiento es de 3 años. Pasado este plazo, el producto aún puede encontrarse en buen estado; se recomienda comprobarlo mediante un ensayo previo o consultando a nuestro Servicio de Asistencia al Cliente.

ANNEX G. SILICONA Q7-9120.

Product Information
Healthcare



DOW CORNING® Q7-9120 Silicone Fluid (20, 100, 350, 1000 and 12,500 cSt)

BENEFITS

Formulation dependant

- Smooth, silky feel
- Non-greasy
- Skin protection
- High spreadability
- Lubricity
- Good leveling and easy rub-out
- Emollient
- Water repellent
- Non-occlusive
- Non-stinging on skin
- Low odor
- Meets the tentative skin protectancy monograph (21 CFR Part 347.10)
- Meets the non-parenteral requirements for Dimethicone and the Dimeticonum EP monographs

COMPOSITION

- Polydimethylsiloxane

Excipient for pharmaceutical applications

APPLICATIONS

Areas of potential use for DOW CORNING Q7-9120 encompass a wide range of skincare or topical delivery applications including:

- Excipient for pharmaceutical topical formulations
- Oral care
- Skincare
- Suncare

As a skin protectant active ingredient for Dimethicone NF (complies with the FDA tentative monograph) and as an active in OTC skin care products, helps prevent and temporarily protects skin and lips against chafing, chapping, cracking and windburn in accordance with FDA guidelines.

TYPICAL PROPERTIES

Specification writers: These values are not intended for use in preparing specifications. Please contact your local Dow Corning sales representative prior to writing specifications on this product.

| Parameter | Unit | Value | | | | |
|---|------------|--------|--------|--------|--------|------------|
| Viscosity ¹ at 25°C (77°F) | cSt | 20 | 100 | 350 | 1000 | 12,500 |
| Refractive index at 25°C (77°F) | | 1.4018 | 1.4032 | 1.4042 | 1.4046 | 1.4047 |
| Specific gravity at 25°C (77°F) | | 0.951 | 0.967 | 0.971 | 0.973 | Not tested |
| Color (APHA) | | 5 | 3 | 1.7 | 1.7 | <0.01 |
| Volatile content | % | 2.0 | 0.07 | 0.05 | 0.01 | 0.17 |
| Acid number (BPB, Bromophenyl blue) | mg KOH / g | <0.02 | <0.02 | <0.02 | <0.02 | <0.02 |
| Infrared identification (match standard spectrum) | | 710 | 710 | 710 | 710 | 710 |

1. Viscosity is ± 5 % except for 20 cSt, which is ± 10 %.

DESCRIPTION

DOW CORNING Q7-9120 Silicone Fluid is a clear, colorless polydimethylsiloxane liquid, available in a range of five standard viscosity from 20 to 12,500 cSt.

Each lot of DOW CORNING Q7-9120 Silicone Fluid is tested and certified to meet the non-parenteral monograph requirements of the National Formulary for Dimethicone

NF, the European Pharmacopoeia monographs for Dimeticonum EP, and/or Silicone Oil Used As a Lubricant EP, depending on the fluid viscosity.

DOW CORNING Q7-9120 Silicone Fluid can provide long-lasting lubrication, smooth feel, emolliency, ease of spreading and reduced tackiness.

| t, °C | ρ, kg/m ³ | | | | | | | | | |
|-------|----------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | 0,0 | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,9 |
| 0 | 999,839 | 999,846 | 999,852 | 999,859 | 999,865 | 999,871 | 999,877 | 999,882 | 999,888 | 999,893 |
| 1 | 999,898 | 999,903 | 999,908 | 999,913 | 999,917 | 999,921 | 999,925 | 999,929 | 999,933 | 999,936 |
| 2 | 999,940 | 999,943 | 999,946 | 999,949 | 999,952 | 999,954 | 999,956 | 999,959 | 999,961 | 999,962 |
| 3 | 999,964 | 999,966 | 999,967 | 999,968 | 999,969 | 999,970 | 999,971 | 999,971 | 999,972 | 999,972 |
| 4 | 999,972 | 999,972 | 999,972 | 999,971 | 999,971 | 999,970 | 999,969 | 999,968 | 999,967 | 999,965 |
| 5 | 999,964 | 999,962 | 999,960 | 999,958 | 999,956 | 999,954 | 999,951 | 999,949 | 999,946 | 999,943 |
| 6 | 999,940 | 999,937 | 999,934 | 999,930 | 999,926 | 999,923 | 999,919 | 999,915 | 999,910 | 999,906 |
| 7 | 999,901 | 999,897 | 999,892 | 999,887 | 999,882 | 999,877 | 999,871 | 999,866 | 999,860 | 999,854 |
| 8 | 999,848 | 999,842 | 999,836 | 999,829 | 999,823 | 999,816 | 999,809 | 999,802 | 999,795 | 999,788 |
| 9 | 999,781 | 999,773 | 999,765 | 999,758 | 999,750 | 999,742 | 999,734 | 999,725 | 999,717 | 999,708 |
| 10 | 999,699 | 999,691 | 999,682 | 999,672 | 999,663 | 999,654 | 999,644 | 999,635 | 999,625 | 999,615 |
| 11 | 999,605 | 999,595 | 999,584 | 999,574 | 999,563 | 999,553 | 999,542 | 999,531 | 999,520 | 999,509 |
| 12 | 999,497 | 999,486 | 999,474 | 999,462 | 999,451 | 999,439 | 999,426 | 999,414 | 999,402 | 999,389 |
| 13 | 999,377 | 999,364 | 999,351 | 999,338 | 999,325 | 999,312 | 999,299 | 999,285 | 999,272 | 999,258 |
| 14 | 999,244 | 999,230 | 999,216 | 999,202 | 999,188 | 999,173 | 999,159 | 999,144 | 999,129 | 999,114 |
| 15 | 999,099 | 999,084 | 999,069 | 999,054 | 999,038 | 999,022 | 999,007 | 998,991 | 998,975 | 998,958 |
| 16 | 998,943 | 998,926 | 998,910 | 998,894 | 998,877 | 998,860 | 998,843 | 998,826 | 998,809 | 998,792 |
| 17 | 998,775 | 998,757 | 998,740 | 998,722 | 998,704 | 998,686 | 998,668 | 998,650 | 998,632 | 998,614 |
| 18 | 998,595 | 998,577 | 998,558 | 998,539 | 998,520 | 998,502 | 998,482 | 998,463 | 998,444 | 998,425 |
| 19 | 998,405 | 998,385 | 998,366 | 998,346 | 998,326 | 998,306 | 998,286 | 998,265 | 998,245 | 998,224 |
| 20 | 998,204 | 998,183 | 998,162 | 998,141 | 998,120 | 998,099 | 998,078 | 998,057 | 998,035 | 998,014 |
| 21 | 997,992 | 997,971 | 997,949 | 997,927 | 997,905 | 997,883 | 997,860 | 997,838 | 997,816 | 997,793 |
| 22 | 997,770 | 997,747 | 997,725 | 997,702 | 997,679 | 997,656 | 997,632 | 997,609 | 997,585 | 997,562 |
| 23 | 997,538 | 997,515 | 997,491 | 997,467 | 997,443 | 997,419 | 997,394 | 997,370 | 997,345 | 997,321 |
| 24 | 997,296 | 997,272 | 997,247 | 997,222 | 997,197 | 997,172 | 997,146 | 997,121 | 997,096 | 997,070 |
| 25 | 997,045 | 997,019 | 996,993 | 996,967 | 996,941 | 996,915 | 996,889 | 996,863 | 996,836 | 996,810 |
| 26 | 996,783 | 996,757 | 996,730 | 996,703 | 996,676 | 996,649 | 996,622 | 996,595 | 996,568 | 996,540 |
| 27 | 996,513 | 996,485 | 996,458 | 996,430 | 996,402 | 996,374 | 996,346 | 996,318 | 996,290 | 996,262 |
| 28 | 996,233 | 996,205 | 996,176 | 996,148 | 996,119 | 996,090 | 996,061 | 996,032 | 996,003 | 995,974 |
| 29 | 995,945 | 995,915 | 995,886 | 995,856 | 995,827 | 995,797 | 995,767 | 995,737 | 995,707 | 995,677 |
| 30 | 995,647 | 995,617 | 995,586 | 995,556 | 995,526 | 995,495 | 995,464 | 995,433 | 995,403 | 995,372 |
| 31 | 995,341 | 995,310 | 995,278 | 995,247 | 995,216 | 995,184 | 995,153 | 995,121 | 995,090 | 995,058 |
| 32 | 995,026 | 994,997 | 994,962 | 994,930 | 994,898 | 994,865 | 994,833 | 994,801 | 994,768 | 994,735 |
| 33 | 994,703 | 994,670 | 994,637 | 994,604 | 994,571 | 994,538 | 994,505 | 994,472 | 994,438 | 994,405 |
| 34 | 994,371 | 994,338 | 994,304 | 994,270 | 994,236 | 994,202 | 994,168 | 994,134 | 994,100 | 994,066 |
| 35 | 994,032 | 993,997 | 993,963 | 993,928 | 993,893 | 993,859 | 993,824 | 993,789 | 993,754 | 993,719 |
| 36 | 993,684 | 993,648 | 993,613 | 993,578 | 993,543 | 993,507 | 993,471 | 993,436 | 993,400 | 993,364 |
| 37 | 993,328 | 993,292 | 993,256 | 993,220 | 993,184 | 993,148 | 993,111 | 993,075 | 993,038 | 993,002 |
| 38 | 992,965 | 992,928 | 992,891 | 992,855 | 992,818 | 992,780 | 992,743 | 992,706 | 992,669 | 992,631 |
| 39 | 992,594 | 992,557 | 992,519 | 992,481 | 992,444 | 992,406 | 992,368 | 992,330 | 992,292 | 992,254 |
| 40 | 992,215 | 992,177 | 992,139 | 992,100 | 992,062 | 992,023 | 991,985 | 991,946 | 991,907 | 992,868 |
| 41 | 991,830 | 991,791 | 991,751 | 991,712 | 992,673 | 991,634 | 991,594 | 991,555 | 991,515 | 991,476 |
| 42 | 991,436 | 991,396 | 991,357 | 991,317 | 991,277 | 991,237 | 991,197 | 991,157 | 991,116 | 991,076 |
| 43 | 991,036 | 990,995 | 990,955 | 990,914 | 990,873 | 990,833 | 990,792 | 990,751 | 990,710 | 990,669 |
| 44 | 990,628 | 990,587 | 990,546 | 990,504 | 990,463 | 990,421 | 990,380 | 990,338 | 990,297 | 990,255 |

Taula H.1. Densitat de l'aigua en funció de la temperatura (Perry).

| Temperature, °C | μ, kg/m s |
|-----------------|------------------------|
| 0 | 1.79×10^{-3} |
| 5 | 1.52×10^{-3} |
| 10 | 1.31×10^{-3} |
| 15 | 1.14×10^{-3} |
| 20 | 1.00×10^{-3} |
| 25 | 0.894×10^{-3} |
| 30 | 0.801×10^{-3} |
| 40 | 0.656×10^{-3} |
| 50 | 0.549×10^{-3} |
| 60 | 0.469×10^{-3} |
| 70 | 0.406×10^{-3} |
| 80 | 0.357×10^{-3} |
| 90 | 0.317×10^{-3} |
| 100 | 0.284×10^{-3} |

Taula H.2. Viscositat de l'aigua en funció de la temperatura (Levenspiel).

ANNEX I. PRESSUPOST.

Les despeses associades a la realització del projecte es divideixen en quatre de diferents; personal, equipament, consums i costos indirectes. A continuació es presenta el llistat de les diferents partides que contempla cadascuna, així com els preus associats:

➤ Personal.

- Estudi previ. Són les hores destinades a recerca d'informació i per preparar el desenvolupament del projecte. No es considera cap cost per aquesta partida.
- Preparació de material. Fabricació dels impulsors usats durant la validació del software. El cost de l'operari és de 6 €/h.
- Modelització. Utilització del programa de CAD per crear els agitadors virtuals. Això ho realitza una persona amb coneixements específics del programari. Es considera un cost de 9 €/h.
- Realització de l'estudi. Temps destinat a decidir, preparar i llançar els diferents casos de la simulació. Això ho ha de fer una persona qualificada i el cost associat és de 15 €/h.
- Interpretació de resultats. Observar i entendre les dades obtingudes de les simulacions. El preu considerat és de 15€/h.
- Redacció. Hores destinades a la redacció de la memòria del projecte. El cost és de 6 €/h.
- Verificació. Temps de supervisió del projecte per una persona altament qualificada a un preu de 20 €/h.

➤ Equipament.

- Hardware. Desgast de les computadores utilitzades per la simulació. Els equips tenen un cost de 1.200 € i l'amortització de l'equip durant la realització del projecte és del 5 %.
- Software. Cost de les llicències dels programes Rhinoceros 4.0, Fluent Gambit i Ansys CFX 11.0. El cost anual és de 5.300 € i l'amortització és del 5 %.
- Agitador. Desgast de l'agitador del laboratori. Aquest té un cost de 750 € i l'amortització de l'aparell és del 2 %.

- Consums.
 - Usos varis. Contempla les despeses d'impressió i enquadernat dels diferents documents del projecte. El cost associat és de 35 €
- Costos indirectes. Són un 15 % del cost total de realització del projecte i inclouen despeses com consum d'electricitat per part dels equips informàtics, de l'agitador i de la il·luminació de la zona de treball, o la compra dels recipients de vidre per la realització dels assajos entre d'altres.

| DESCRIPCIÓ | PREU UNITARI | DURADA | IMPORT |
|---------------------------------|--------------|--------|-------------------------|
| PERSONAL | | | |
| Estudi previ | 0 €/h | 20 h | 0 € |
| Preparació de material | 6 €/h | 5 h | 30 € |
| Modelització | 9 €/h | 30 h | 270 € |
| Realització de l'estudi | 15 €/h | 70 h | 1.050 € |
| Interpretació de resultats | 15 €/h | 45 h | 675 € |
| Redacció | 6 €/h | 100 h | 600 € |
| Verificació | 20 €/h | 25 h | 500 € |
| EQUIPAMENT | | | |
| Hardware | 60 | - | 60 € |
| Software | 265 | - | 265 € |
| Agitador | 15 | - | 15 € |
| CONSUMS | | | |
| Usos varis | 35 | - | 35 € |
| | | | 3.500 € SUBTOTAL |
| COSTOS INDIRECTES (15 %) | - | - | 525 € |
| | | | 4.025 € TOTAL |

L'import final del projecte és de quatre mil vint-i-cinc euros (4.025 €).

Signat:

Francesc Garrido Castells

Girona, 30 de març de 2009