

Treball final de grau

Estudi: Grau en Enginyeria Mecànica

Títol: Estudi amb CFD del rendiment d'una turbina d'impulsió d'eix horitzontal i comparació amb dades experimentals.

Document: 1. Memòria i Annexos

Alumne: Àlvar Quirós Rodríguez

Director/tutor: Toni Pujol Sagaró

Departament: Enginyeria Mecànica i de la Construcció Industrial

Àrea: Mecànica de Fluids

Convocatòria (mes/any): Juny 2015

Índex

1- INTRODUCCIÓ	4
1.1- Antecedents	4
1.2- Objecte	4
1.3- Abast	4
2- ESTRUCTURA DEL PROJECTE	5
3- TURBINA DEL LABORATORI	6
3.1- Turbina	6
3.2- Bancada i fre.	7
3.3- Instal·lació hidràulica.	9
3.4- Canvis en el disseny	10
3.5- Característiques teòriques turbina laboratori	10
4- MÈTODE ANALÍTIC	12
4.1- Introducció	12
4.2- Fórmules analítiques.....	12
5- METODOLOGIA	16
5.1- Introducció	16
5.2- Preparació i ús de la turbina	16
5.3- Adquisició de dades	21
6- ASSAJOS LABORATORI.....	23
6.1- Introducció	23
6.2- Resultats experimentals.....	23
7- MODEL CFD	28
7.1- Introducció	28
7.2- Casos simulats.....	29
8- RESULTATS CFD	36
8.1- Introducció	36
8.2- Efecte del mallat	36
8.3- Efecte del diàmetre del doll	41
8.4- Efecte del cabal.	43
8.5- Comparació amb assajos experimentals i mètode analític.....	46
9-RESUM DEL PRESSUPOST	50
10- CONCLUSIONS	51
11- RELACIÓ DE DOCUMENTS	52

12- BIBLIOGRAFIA.....	53
Annex A- MUNTATGE DE LA TURBINA	56
A.1- Muntatge físic al laboratori	56
A.2- Constant cèl·lula de càrrega	60
A.3- Aparells i elements de la instal·lació.....	64
Annex B - CÀLCULS	82
Annex C- TRACTAMENT DADES EXPERIMENTALS	94
Annex D- CONDICIONS DE LA SIMULACIÓ	103
Annex E- TRACTAMENT DADES CFD.....	111

MEMÒRIA

1- INTRODUCCIÓ

1.1- Antecedents

Les turbines d'aigua han estat utilitzades des de l'antiguitat amb diferents finalitats, des de moldre cereals fins actualment produir electricitat. Les turbines d'aigua es poden classificar de diferents maneres, una d'elles per l'orientació del seu eix. Hi ha turbines d'eix horitzontal i d'eix vertical (figura 1).

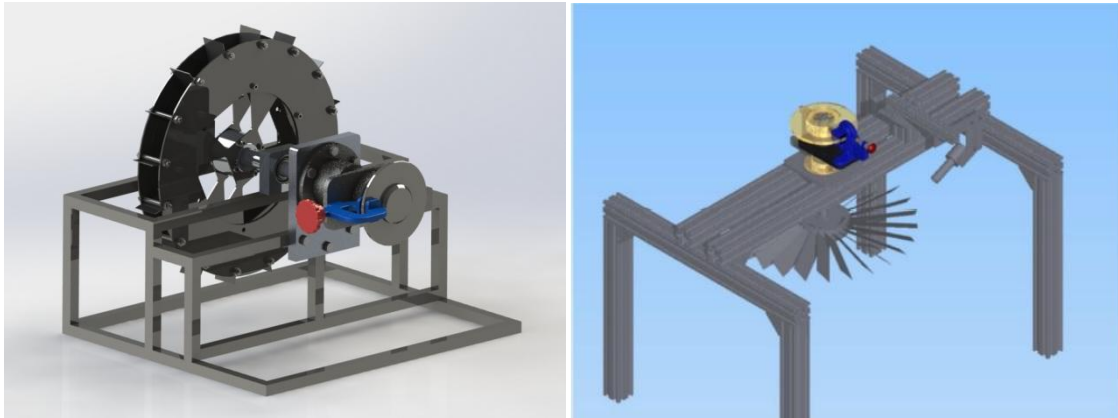


Figura 1. A l'esquerra turbina d'eix horitzontal a la dreta turbina d'eix vertical.

Al laboratori de Mecànica de Fluids de l'Escola Politècnica Superior de la Universitat de Girona es vol instal·lar la turbina d'eix horitzontal dissenyada per en José Manuel Guerrero al seu TFG (2014), la qual pot tenir diferents configuracions d'àleps, nombre d'àleps i alçada del doll. Les dades experimentals que es poden obtenir d'aquesta turbina permetran validar un model de simulació de fluids. D'aquesta forma, el model es podrà utilitzar per estudiar els efectes de canviar els paràmetres geomètrics de la turbina en els valors del parell, potència i rendiment.

1.2- Objecte

L'objecte consisteix en obtenir les corbes característiques de parell, potència i rendiment de la turbina dissenyada per en José Manuel Guerrero (2014) amb un model de dinàmica de fluids computacional. Aquest model es validarà amb els resultats obtinguts experimentalment amb la turbina del laboratori de Mecànica de Fluids de l'EPS. Es simularan diferents condicions de cabal i diàmetre per estudiar-ne la seva influència en el parell, potència i rendiment de la turbina.

1.3- Abast

L'abast del nostre estudi va des de muntar la turbina al laboratori fins a assajar-la per extreure les corbes característiques de parell, potència i rendiment. La simulació computacional es durà a terme amb el programa STAR-CCM+.

2- ESTRUCTURA DEL PROJECTE

El projecte està estructurat de la següent manera:

-Explicació de les característiques generals de la turbina d'eix horitzontal que s'ha instal·lat en el laboratori de Mecànica de Fluids de l'Escola Politècnica Superior de la Universitat de Girona. Aquesta turbina s'ha construït seguint el disseny de Guerrero (2014). Tant l'estudi analític com el numèric amb el model simulació CFD utilitzaran aquesta turbina com a referència.

-Introducció del mètode analític.

-Assaig experimental on s'explicarà una metodologia a seguir per tal de preparar la turbina del laboratori i el sistema d'adquisició de dades. Tot seguit es continuarà amb l'adquisició de dades experimentals: corbes característiques de parell, potència i rendiment en funció de la velocitat de rotació de la turbina.

-Quan es tingui la part experimental completament feta, es passarà a fer la part de simulació. Primer es comentaran els models que s'han utilitzat per més tard tractar el tema d'optimització del mallat. Una vegada estigui clar com realitzar un bon mallat, es faran simulacions variant diferents elements del disseny com el diàmetre de la mànega i cabal. S'analitzaran els resultats comparant-los, també, amb les dades experimentals i el model analític.

-Per últim s'exposarà les principals conclusions extretes de l'actual treball.

3- TURBINA DEL LABORATORI

La turbina que es té al laboratori és una turbina hidràulica d'eix horitzontal a la qual podem variar diferents paràmetres (alçada del doll, nombre àleps, orientació dels àleps, etc.) per tal de fer-ne un estudi complet i trobar la configuració òptima. Consta de dues parts, la turbina pròpiament, que seria les mitges llunes, els suports laterals, eix, és a dir, tota la part mecànica que es troba en contacte amb l'aigua i després es té la part del sistema de fre i bancada.

3.1- Turbina

La turbina que hi ha al laboratori, va ser dissenyada per en Jose Manuel Guerrero al seu Treball de Final de Grau (Guerrero 2014). És una turbina picohidràulica (<1kW). El rodet (figura 2) té un diàmetre exterior (fins a l'extrem de l'àlep) de 450 mm (225 mm de radi), un diàmetre intern (fins l'interior dels àleps) de 175mm i una amplada de 50 mm. La configuració que s'ha estudiat ha estat la de 16 àleps rectes, quadrats de 50mmx50mm que tenen un espàrrec que els travessa de costat a costat i els subjecta per banda i banda.

La turbina es pot desmuntar en dues mitges llunes (figura 3) per tal de treure àleps i posar altres configuracions. I després la part fixa que són els suports laterals, tronc i l'eix. (figura 4)

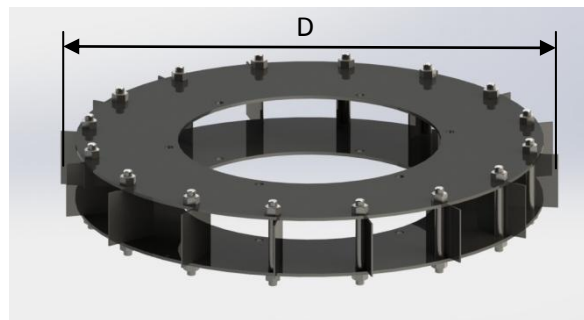


Figura 2. Rodet de la turbina. Diàmetre extern =450 mm.



Figura 3. Mitja lluna del rodets de la turbina.

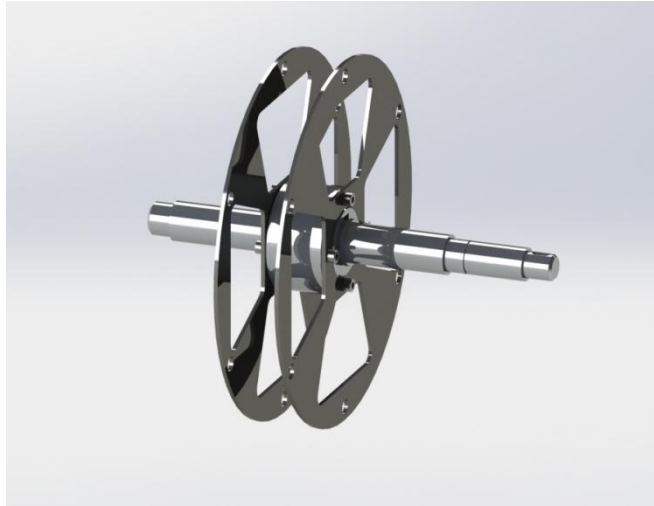


Figura 4. On es veu la part fixa de la turbina, eix, tronc, i suports laterals.

3.2- Bancada i fre.

Aquesta part inclou, des de els suports de rodament, els rodaments, la bancada i el sistema de fre. A la imatge següent (figura 5) es pot veure la part fixa de la turbina fixada a la bancada. L'eix s'uneix amb un acoblament de dos pinyons i corona (figura 6).

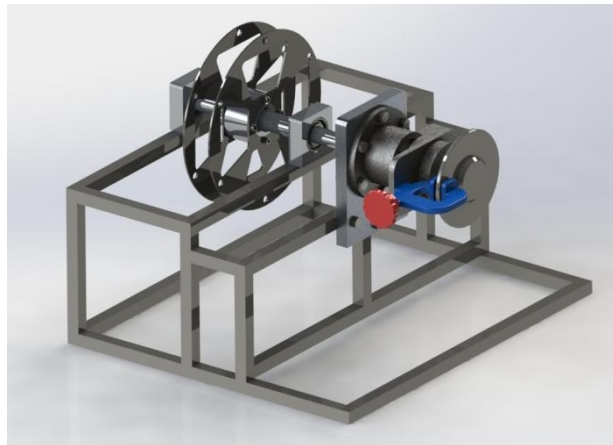


Figura 5. Part fixa de la turbina amb la bancada i fre (Diàmetre disc lateral 275mm).

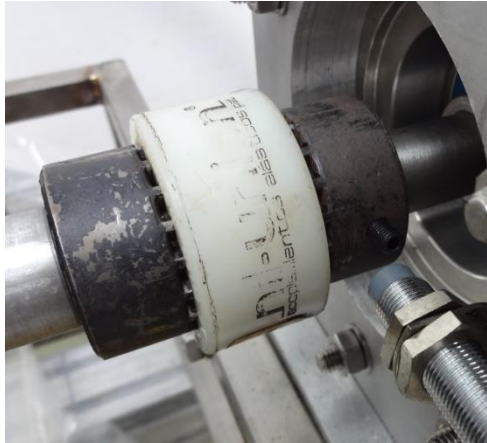


Figura 6. Sistema d'unió de l'eix de la turbina de 25mm (esquerra) amb el fre (dreta).

Tota la turbina, bancada i el fre, es troba fixada amb serjants de forma provisional sobre una bancada d'assaig (figura 8) formada amb perfils d'alumini normalitzats (figura 7), a "l'Annex A – Muntatge turbina" s'adjunta la fulla de característiques de la marca ITEM.



Figura 7. Perfil d'alumini 8 80x80L

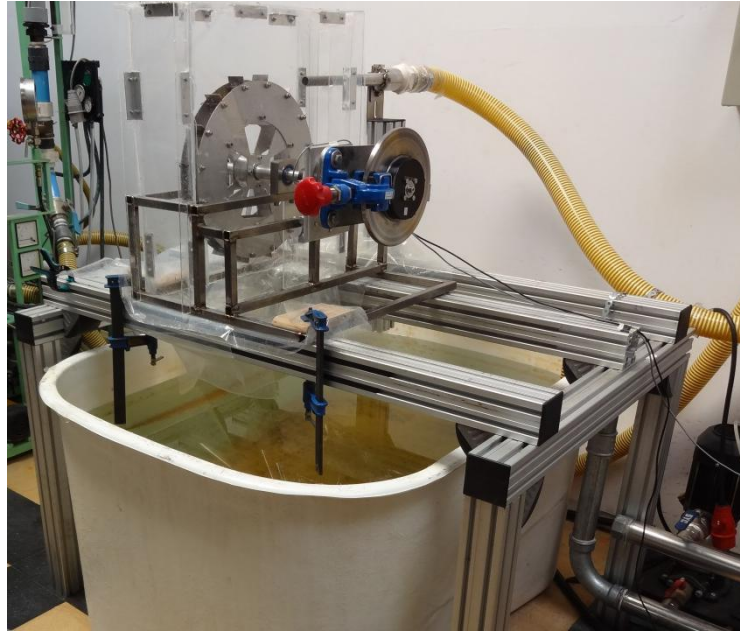


Figura 8. Turbina sobre l'estructura de perfils normalitzats d'alumini.

Tot el sistema de fre es va dissenyar en un projecte anterior de Jordi Matas (2014) i s'ha utilitzat en d'altres treballs final de grau (Aouaj, 2014). El fre consta d'una pinça d'accionament manual mitjançant un cargol que pressiona una molla, aquest fa moure els dos braços de la pinça exercint força sobre el disc metàl·lic. La fitxa tècnica del fre s'adjunta a "l'Annex A – Muntatge turbina" on a més es mostra el detall de la molla comentada anteriorment.

3.3- Instal·lació hidràulica.

La instal·lació hidràulica és tot el que forma el circuit tancat d'aigua que hi ha al laboratori de mecànica de fluids, és a dir, el dipòsit amb una capacitat de 1000 litres, filtre de peu, colzes, dos bombes que formen el grup impulsor, comptador volumètric, vàlvules, canonades i mànega. A "l'Annex A – Muntatge turbina" s'adjunten les fitxes tècniques dels components més importants com són les bombes model MULTI35N de la marca ESPA i el comptador volumètric.

3.4- Canvis en el disseny

En un principi en José Manuel Guerrero (2014) va dissenyar la subjecció del doll d'aigua a la subestructura de la turbina. Per motius del pes i la força de la mànega que hi ha instal·lada al laboratori i de la proximitat de la subestructura a la pròpia turbina es va decidir fer una unió externa de la mànega a la bancada (figura 9). Així també s'incorporava un perfil d'alumini addicional (8 80x80L de la marca ITEM) a la bancada donant més rigidesa i reduint, de forma notable les vibracions. El sistema de posicionament encara es pot modificar en alçada.

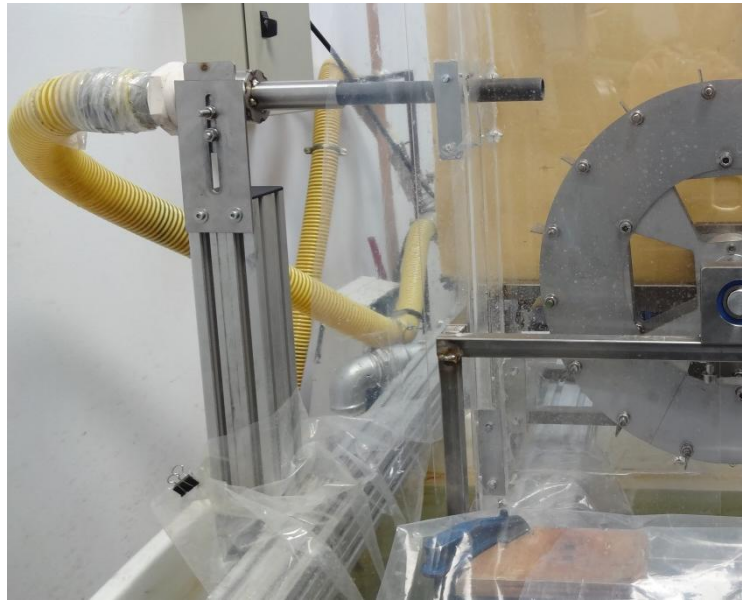


Figura 9. Modificació de la subjecció de la mànega (diàmetre de sortida 20mm).

3.5- Característiques teòriques turbina laboratori

Els càlculs que va fer en José Manuel Guerrero (2014) van aportar que la turbina que s'estudiarà té les següents característiques teòriques.

- Una potència teòrica amb àleps rectes de 215 W.
- Una velocitat màxima de gir teòrica amb àleps rectes de 668 rpm.
- Un parell màxim teòric amb àleps rectes de 12.2 Nm.
- Un rendiment màxim amb àleps rectes de 0.50.

Tots aquest valors teòrics van ser calculats per a una instal·lació d'impulsió amb les següents característiques:

- Diàmetre de la mànega: 20 mm
- Velocitat de sortida doll (Vs): 14m/s
- Cabal proporcionat per les bombes: $4,4 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$

Per tal d'assegurar el valor del cabal proporcionat per les bombes, aquest ha estat mesurat amb l'ajuda d'un comptador volumètric (figura 10), la fitxa tècnica s'adjunta a "l'Annex A – Muntatge turbina", agafant la mesura inicial, i mesurant els metres cúbics que circulen en un període de temps determinat. Una vegada es va fer això, es va veure que el cabal no coincidia amb el teòric proposat per en José Manuel Guerrero (2014). Per tant aquestes seran les dades reals:

- Diàmetre de la mànega: 20 mm
- Velocitat de sortida doll (Vs): $15,4 \pm 0,4 \text{ m/s}$ (Error relatiu del 2,5%)
- Cabal proporcionat per les bombes (700litres \rightarrow 144segons):
 $4,84 \times 10^{-3} \pm 1 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s} \rightarrow 4,84 \pm 0,1 \text{ l/s}$

L'error de la velocitat s'ha calculat amb la teoria de propagació dels errors, les fórmules utilitzades es poden veure a l'apartat "Annex B – Càlculs".

L'error del cabal s'ha extret d'una taula de la fitxa tècnica del comptador volumètric que s'adjunta a "l'Annex A – Muntatge turbina"

Aquestes característiques seran les que s'utilitzaran per a configurar les condicions de simulació amb CFD.



Figura 10. Comptador volumètric en línia a la canonada d'impulsió.

4- MÈTODE ANALÍTIC

4.1- Introducció

El mètode analític permet obtenir les corbes de la turbina amb un rendiment màxim, suposant que es pot arribar a tenir una instal·lació perfecta sense cap tipus de pèrdua, com pot ser vibracions, fregaments, etc.

4.2- Fórmules analítiques

En aquest apartat es comenta les fórmules analítiques obtingudes a "l'Annex B – Càlcul" amb les que s'arriba a crear, per a una suposada instal·lació perfecta, les corbes de parell, potència i rendiment mostrades al final de l'apartat.

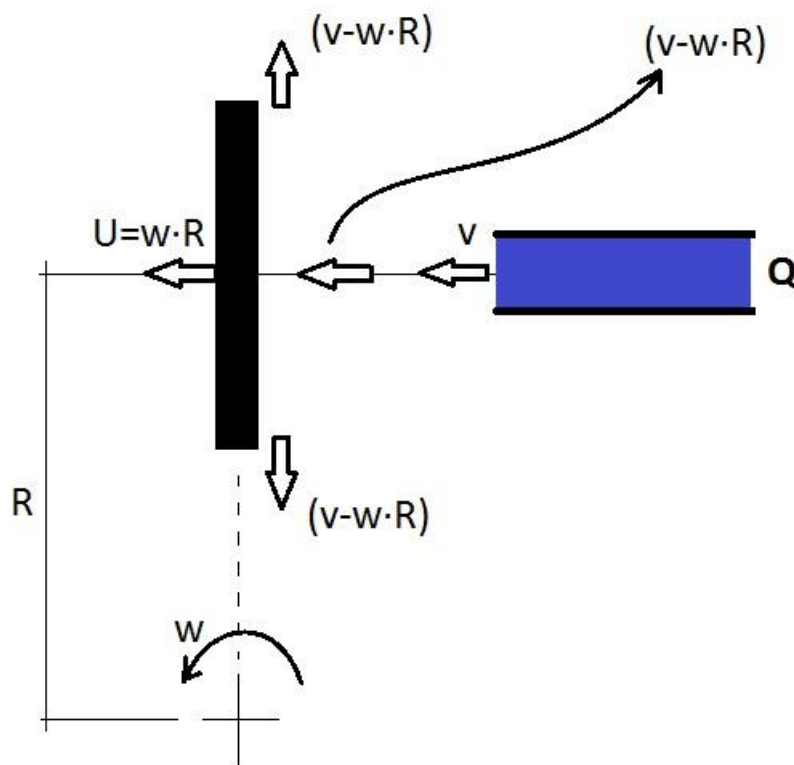


Figura 11. Croquis amb les velocitats.

S'ha de mencionar que la velocitat de l'impacte es produeix a la velocitat del doll, menys la velocitat que porta l'ala (figura 11).

De "l'Annex B – Càlcul" s'extreu la primera fórmula que es necessita per representar la corba de parell:

$$M = Q \cdot \rho \cdot (v - \omega \cdot R) \cdot R \quad (\text{eq. 1})$$

On:

Q: cabal en [m³/s]

ρ : densitat de l'aigua 1000 kg/m³

V= velocitat de sortida del doll d'aigua [m/s]

ω =velocitat angular en [rad/s]

R=radi , distancia des de l'eix fins al punt d'incidència del doll d'aigua a l'àlep en [m].

Si s'assignen valors a l'equació 1, s'obté la gràfica del parell (figura 12):

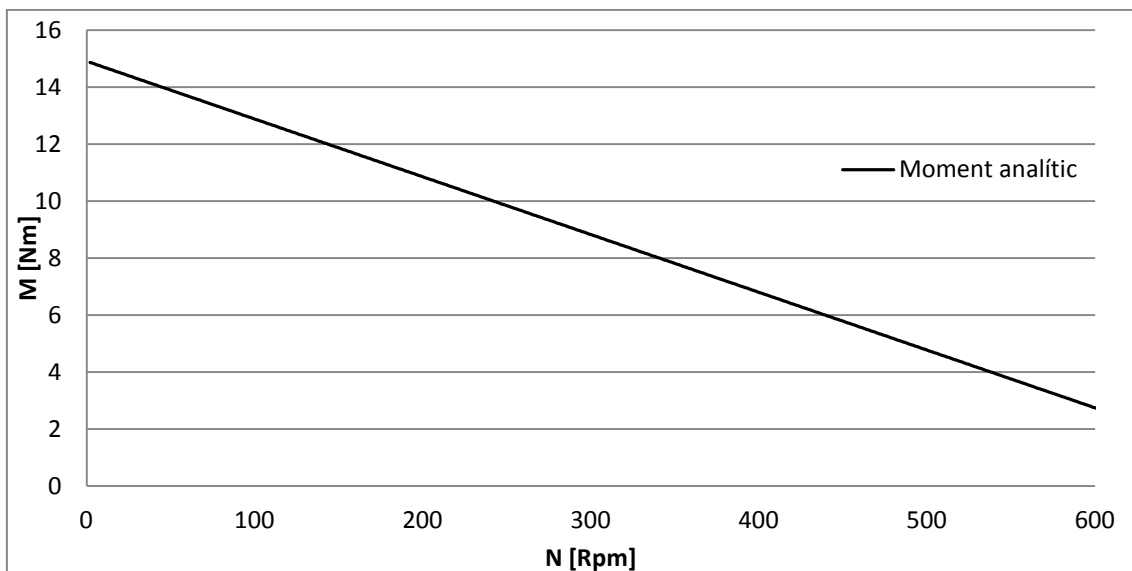


Figura 12. Recta del parell analític associat a l'equació 1.

On el valor màxim de la recta es troba a 0 rpm i correspon a:

$$M_{\text{màx}} = 14,91 \text{ Nm}$$

L'expressió de la potencia ve donada per la següent equació obtinguda de "l'Annex B – Càlcul":

$$P = Q \cdot \rho \cdot (v - \omega \cdot R) \cdot R \cdot \omega \quad (\text{eq. 2})$$

On:

Q: cabal en [m³/s]

ρ : densitat de l'aigua 1000 kg/m³

v= velocitat de sortida del doll d'aigua [m/s]

ω =velocitat angular en [rad/s]

R=radi , distancia des de l'eix fins al punt d'incidència del doll d'aigua a l'àlep en [m].

Si s'assignen valors a l'equació 2 es pot representar el gràfic següent que correspon a la corba de la potència (figura 13):

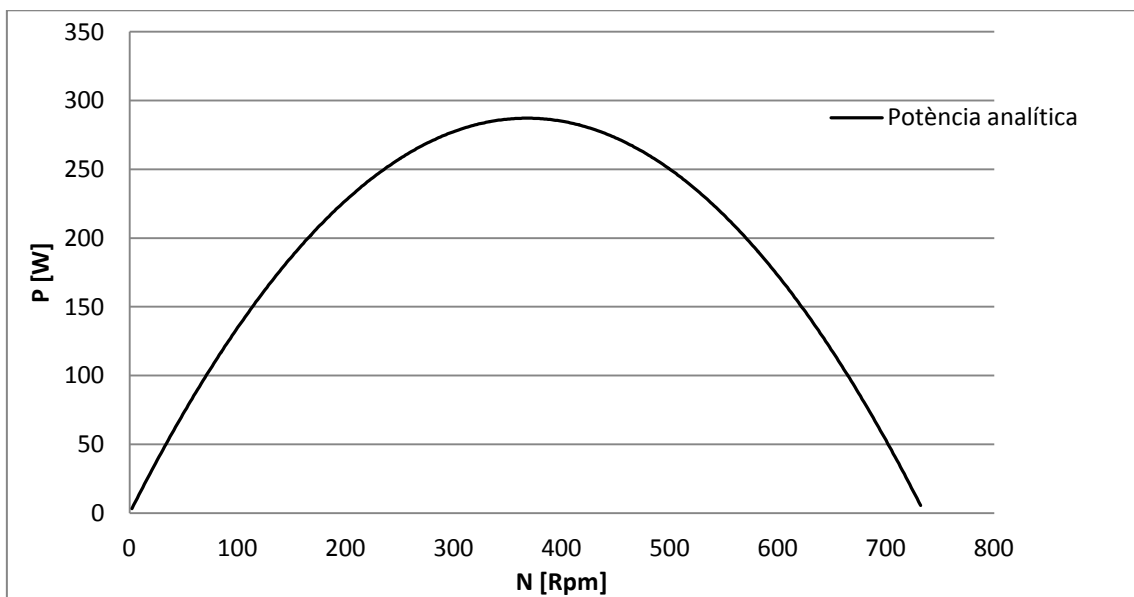


Figura 13. Corba de la potència analítica associada a la corba de l'equació 2.

Per trobar les revolucions a les quals es proporciona la màxima potència s'utilitza l'equació següent, demostrada a "l'Annex B – Càlcul":

$$\omega = \frac{v}{2 \cdot R} \quad (\text{eq. 3})$$

$$\omega = 38,51 \frac{\text{rad}}{\text{s}} = 367,76 \text{ rpm}$$

Si es substitueix la velocitat angular en rad/s a l'equació 2 s'obté el valor màxim en W:

$$P = 287,72 \text{ W}$$

Per acabar queda la fórmula del rendiment, demostrada a "l'Annex B – Càlcul":

$$\eta = \frac{P}{P_h} = \frac{Q \cdot \rho \cdot (v - \omega \cdot R) \cdot R \cdot \omega}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot Q \cdot v^2} = \frac{(v - \omega \cdot R) \cdot R \cdot \omega \cdot 2}{v^2} \quad (\text{eq. 4})$$

On:

v = velocitat de sortida del doll d'aigua m/s

ω =velocitat angular en rad/s

R =radi , distancia des de l'eix fins al punt d'incidència del doll d'aigua a l'àlep 0,2m.

Si s'assignen valors a l'equació 4, s'obté la gràfica del rendiment (figura 14), que és proporcional a la gràfica de la potència de la figura 13 , això és així perquè com es pot veure a l'equació 4, l'expressió és un quocient entre la potència, gràfic figura 13, i la potència hidràulica, aquesta última correspon a un valor constant per a cada velocitat del doll d'aigua.

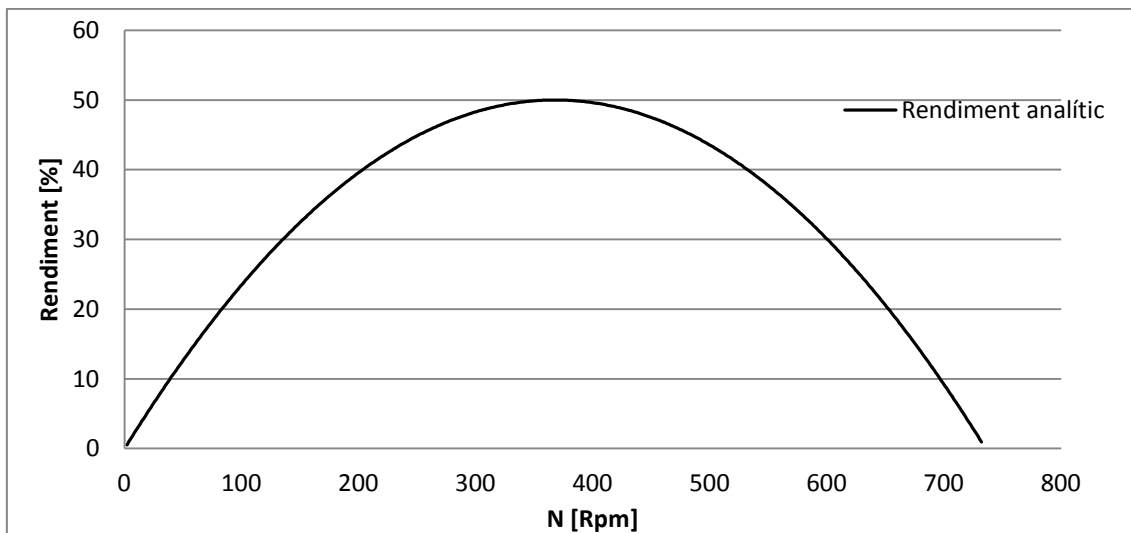


Figura 14. Corba del rendiment analític associat a l'equació 4.

Si es substitueix el valor de la velocitat de gir en rad/s, on es troba la màxima potència s'obté un rendiment de:

$$\eta_{m\grave{a}x} = 0,5$$

5- METODOLOGIA

5.1- Introducció

Aquest capítol tracta des de com preparar la turbina (canviar configuracions d'àleps, alçada doll...) fins a com s'obtenen les dades. Tot això seguint un protocol per tal de tenir seguretat i fer correctament l'adquisició.

5.2- Preparació i ús de la turbina

Sempre que es vulgui modificar o comprovar la turbina s'ha d'assegurar que la instal·lació elèctrica no té corrent. És a dir, que el cable està desconnectat. Ja que es pot posar en marxa per error i fer mal a algú.

Si es vol canviar la configuració d'àleps que hi ha instal·lats, primer s'ha de començar retirant totes les proteccions contra les fuites d'aigua, és a dir tota la capsa de metacrilat amb les extensions de plàstic de la part inferior, aquestes extensions eviten que l'aigua que impacta al dipòsit surti fora i mulli el terra provocant que algú pugui patinar i caure.

Una vegada s'han desmuntat les proteccions. Es descargolen els 3 cargols per banda (figura 15) que té cada mitja lluna i que la subjecta al tronc central. Es repeteix l'operació anterior amb la mitja lluna restant i es vigilarà de no perdre els cargols.

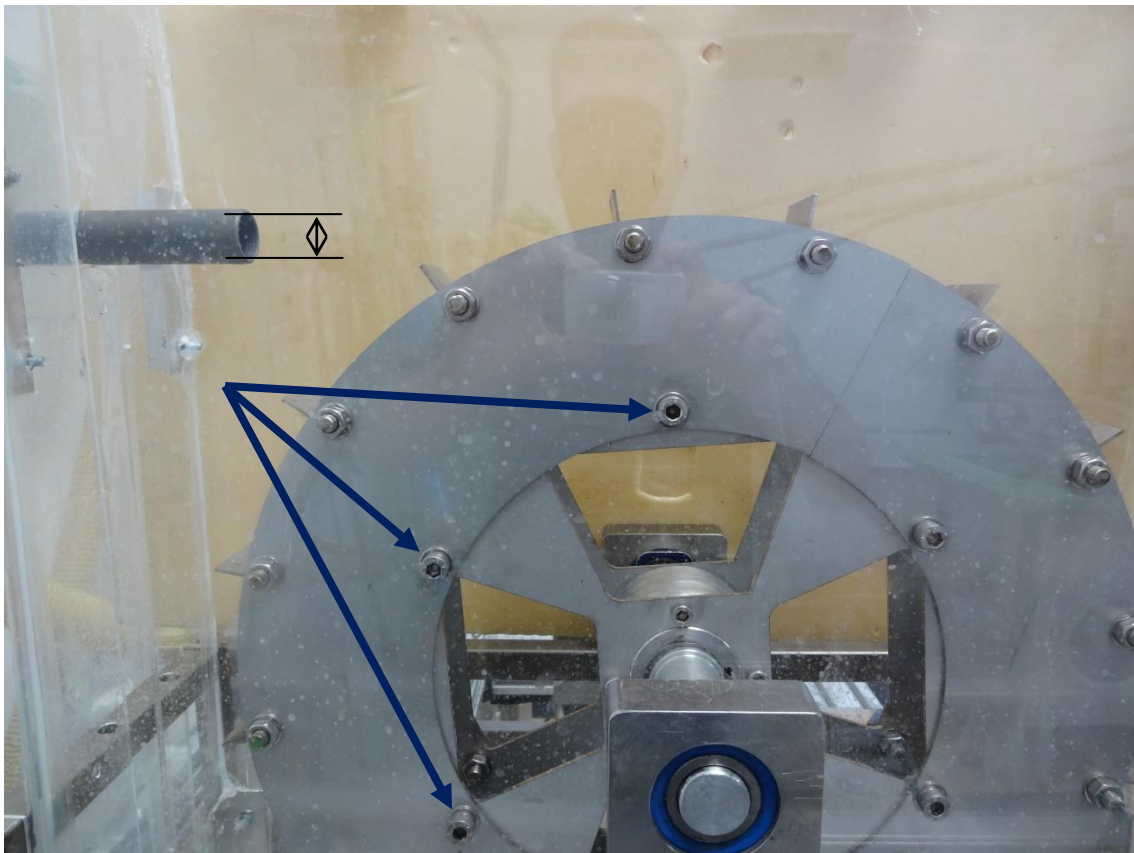


Figura 15. Mitges llunes acoblades al cos de la turbina (diàmetre de sortida 20mm).

Ara només s'ha d'agafar les mitges llunes amb la configuració que es desitgi assajar. Com hi ha varies platines cadascuna amb els seus àleps ja preinstal·lats, no s'ha d'anar desmuntant i posicionant els àleps un per un com a les antigues turbines que hi havia al laboratori.

A continuació es torna a cargolar la nova configuració i a col·locar les proteccions de metacrilat i plàstics.

Tot seguit es posiciona l'alçada del doll d'aigua. Això es possible a dos cargols que van a través d'un trauc colís. S'afluixen els dos cargols i es mou fins a la posició desitjada. Abans de collar els cargols es col·loca un petit nivell a sobre del tub per assegurar que està a nivell (figura 16).



Figura 16. Càlculs per ajustar l'alçada del doll d'aigua, i posicionament a nivell.

Ara es prepararà la part d'electrònica començant per connectar l'*Spider*, que és l'aparell físic juntament amb la cèl·lula de càrrega que s'encarrega de l'adquisició de dades. L'*Spider* es connecta a l'ordinador mitjançant un cable USB, després es connecta la cèl·lula de càrrega (figura 17) al connector "0" que està situat darrera l'*Spider*. Tot seguit s'endolla l'*Spider* a la corrent i el mateix amb cable de corrent del comptador de voltes (figura 18) que s'ha instal·lat amb un sensor inductiu a l'eix. Per últim s'encén l'ordinador. A "l'Annex A – Muntatge turbina" es troba la fitxa tècnica del sensor inductiu, la cèl·lula de càrrega, i la primera fulla i fitxa tècnica del catàleg de l'*Spider 8* d'un model semblant.



Figura 17. Cèl·lula de càrrega.



Figura 18. Comptador de voltes.

Una vegada es tenen els paràmetres número d'àleps, tipus i alçada del doll i totes les connexions del sistema d'adquisició de dades, llavors es pot preparar la part elèctrica de la instal·lació d'impulsió.

És important no tocar l'eix, disc de fre, ni la pròpia turbina, quan s'està preparant la part elèctrica.

Les dues bombes model MULTI 35N de la marca ESPA (figura 19) que hi ha connectades en paral·lel s'alimenten d'una connexió trifàsica, quan es connecta el cable de corrent a l'endoll s'ha de vigilar de tenir les mans seques i que el cable no estigui mullat. La fitxa tècnica de les bombes s'adjunta a "l'Annex A – Muntatge turbina".



Figura 19. Les dues bombes que tenim connectades en paral·lel al laboratori.

Per evitar problemes a l'hora d'encendre la instal·lació, no es connecten a la vegada si no que primer es connecta una i al poc temps l'altre. Això es fa amb el panell elèctric (figura 20) que hi ha darrere de les bombes, amb dos interruptors per a cada bomba, un d'encesa i un de parada.



Figura 20. Panell elèctric que controla les bombes.

Quan s'acaba de fer els experiments sempre es desconectarà l'endoll de la connexió per a més seguretat.

Ara ja es pot executar el software que controla l'*Spider* anomenat "*catman Easy*" (figura 21).

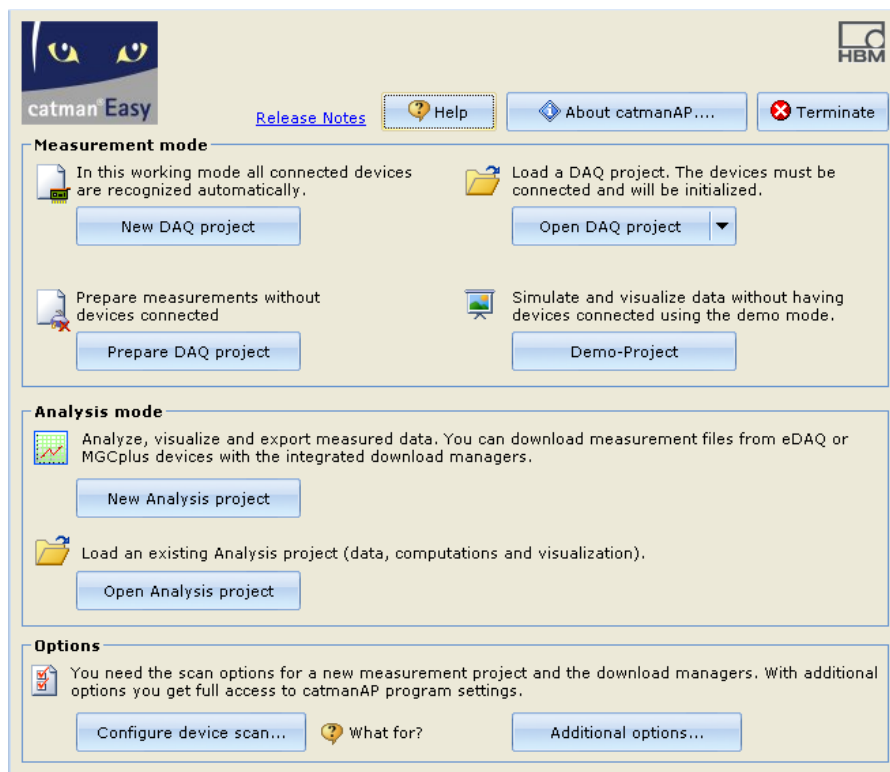


Figura 21. Finestra d'inici del software Catman Easy que controla l'*Spider*.

Tot seguit es modifiquen els valors de la freqüència d'adquisició de dades, en el cas realitzat va ser una freqüència de 5Hz, o el que és el mateix, 5 mostres per segon. Es posa a zero el sensor de la cèl·lula de càrrega fent una tara. Per últim crea un gràfic (figura 22) a temps real, per tal d'anar veient com varien les forces generades pel fre sobre la turbina i així poder graduar la força que s'exerceix amb el fre.

A més es important la creació d'aquest gràfic a temps real per poder anar prenent nota orientativa del valor en mV que apareix al gràfic i així assignar el valor corresponent de la velocitat angular, aquesta calculada amb el comptavoltes i el cronòmetre.

Això ens serà de gran ajuda quan es descarreguin les dades en format Excel, ja que allà no s'enregistra la velocitat angular, i per tant la tenim que relacionar manualment.

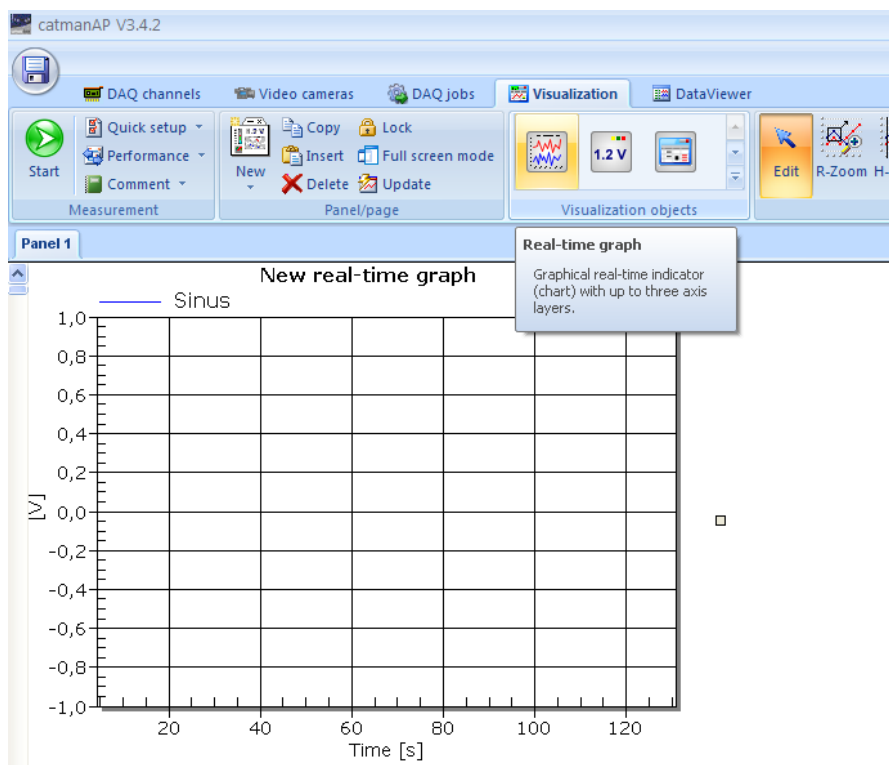


Figura 22. Gràfic a temps real de les mesures de la cèl·lula de càrrega.

Per últim, el fre és un disseny d'en Jordi Matas (2014). El funcionament del fre de disc (figura 23) és senzill: es té un cargol que quan es fa girar, a cada volta va empenyent una molla al seu interior. Aquesta molla exerceix una força sobre un eix que es troba en contacte amb els dos braços de la pinça i fa que pressioni el disc. A l'Annex A – Muntatge turbina” s'adjunta la fitxa tècnica on a més es pot veure el detall intern de la molla.

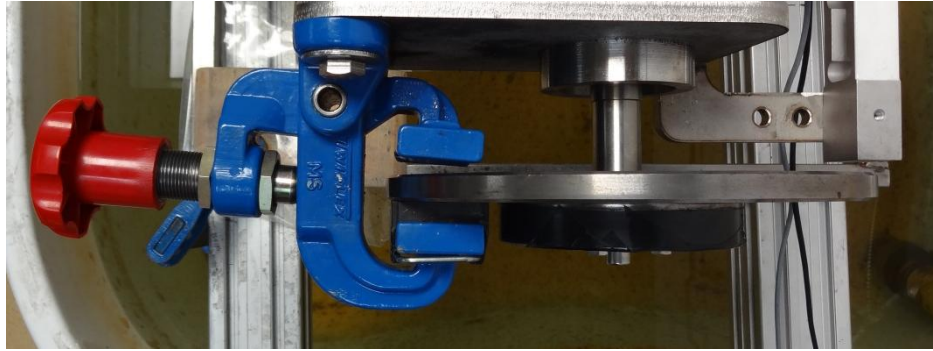


Figura 23. Fre de disc.

Aquest fregament al disc genera una diferència d'esforços a cada costat de la cèl·lula de càrrega que es tradueix en la modificació de les longituds de les resistències del pont de Wheatstone sencer que incorpora, això produeix variacions de voltatge que es mostren al gràfic creat al *catmanEasy*. A "l'Annex A – Muntatge turbina" s'adjunta la fitxa tècnica de la cèl·lula de càrrega, on es pot veure l'estructura mencionada abans del pont.

El pas d'aquest valor en mV a un valor pràctic per a les gràfiques que busquem per al nostre estudi, el trobarem a "l'Annex C – Tractament de dades experimentals" i el valor de la constant de la cèl·lula de càrrega a "l'Annex A – Muntatge turbina".

5.3- Adquisició de dades

Primer de tot s'allibera el fre, és a dir, que la turbina pugui girar lliurement. Una vegada estigui fet, s'encén l'*Spider* i es posa a 0 la mesura, és a dir, fem una tara. Quan estigui tot a 0, llavors s'activa l'adquisició de dades del software *catmanEasy* i s'encenen les bombes hidràuliques, primer una i a l'estona l'altre.

Tot seguit s'agafa la primera mostra, amb el comptavoltes s'apunta el valor inicial tot just quan s'activa manualment el cronòmetre, passats 30 segons o el valor establert prèviament es torna a mirar el comptavoltes i s'anota el valor. A continuació es colla una mica més el cargol del disc de fre i és repeteix l'operació anterior, així successivament fins que la turbina s'acabi parant.

També es pot fer l'assaig al revés, és a dir es posa en marxa la turbina, es cargola al màxim casi fins arribar a parar la turbina, i llavors s'agafa la primera mostra, tot seguit es va afluixant fins que la turbina giri lliure on agafarem l'última mostra.

S'ha de dir que durant els assajos experimentals va haver diferents inconvenients amb la progressivitat del fre quan s'arriben a forces elevades o el que és el mateix, baixes revolucions. Per intentar solucionar-ho es va fer diferents proves, cadascuna d'elles amb intents de millorar la progressivitat.

El primer assaig que es va fer, va consistir en agafar el fre tal qual es va extreure de l'anterior projecte en el que es va utilitzar, és a dir sense modificar res. Es va veure que anava tot molt bé, es podien agafar dades molt esglaonades. El problema va ser quan es volia agafar valors a baixes revolucions, en aquest tram el fre no tenia progressivitat i s'aturava sense arribar a agafar totes les dades que es necessiten per definir els gràfics, sobre tot el gràfic de parell, aquí és on més es nota, ja que les dades a baixes revolucions són les que proporcionen el parell màxim.

Per tant es va decidir canviar la molla interna que porta el fre, a veure si així s'aconseguia més progressivitat a baixes revolucions de la turbina, però no va sorgir efecte.

Abans de començar a modificar físicament el fre, es va intentar lubricar el disc amb un oli especial, però el que es va aconseguir d'aquesta manera va ser perdre fins i tot els esglaons d'altres revolucions que abans si aconseguíem mesurar amb facilitat, ja que patinava.

Finalment es va decidir modificar la pinça de fre. Això vol dir extreure una de les dos pastilles que porta la pinça de fre, una per cada costat. D'aquesta manera la força només actuaria per un cantó del disc. Aquesta opció va fer que el fre fos excessivament progressiu, és a dir per canviar de posició al gràfic del *catmanEasy*, es tenia que girar molt més el cargol, produint unes excessives rampes als gràfics i mai s'acabaven d'estabilitzar del tot, potser perquè el disseny inicial de la pinça es perquè la força actuï per els dos cantons. Tot i així es va poder fer un parell d'assajos però amb pitjors resultats que els inicials.

Per tant finalment, no vam poder aconseguir els valors que desitjàvem a poques revolucions.

Els gràfics que millor van sortir s'adjunten als documents Excel.

6- ASSAJOS LABORATORI

6.1- Introducció

Com s'ha vist a l'apartat anterior, van haver problemes a l'hora d'agafar les dades perquè no s'arribava a la sensibilitat que es volia amb el disc de fre. Es va realitzar assajos de totes les maneres que s'han comentat, tot i així donaven unes dades molt disperses que no proporcionaven precisió per a donar una única i bona corba com a resposta. A més pel tema de la velocitat angular es disposa d'un comptavoltes amb un sensor instal·lat a l'eix de la turbina, el qual s'acompanya amb un cronòmetre digital manual, aquesta manera de mesurar la velocitat angular augmenta molt l'error humà. Primer es va provar a fer amb un tacòmetre i una petita marca blanca al disc, però no donava resultats satisfactoris perquè els valors fluctuaven molt. El correcte seria un sistema de mesura que fos a temps real, és a dir, tant la mesura dels mV com la velocitat angular s'enregistressin al propi Excel mentre fem l'assaig.

6.2- Resultats experimentals

A continuació es presenten les dades que es van poder recollir. El tractament d'aquestes dades, és a dir, el pas de les mesures agafades en mV i rpm's, s'explica a "l'Annex C – Tractament dades experimentals" amb l'única diferència que aquí es representen en un sol gràfic tots els assajos, això es perquè com s'ha dit, al tenir tanta dispersió, no es pot donar un únic assaig com a correcte, així doncs s'opta per mostrar tots els resultats superposats. A la següent gràfica (figura 24) es mostren 5 assajos, els quals tenim explicats a la taula 1.

Veient aquesta gràfica es nota la falta de progressivitat del fre. Com podem veure a la part inicial dels assajos no hi ha molts punts, això és degut a que quant la turbina ja no porta una inèrcia elevada, amb la configuració inicial del fre de dos pastilles amb res que girem el cargol, aquesta es para. Aquest motiu va ser el que va portar a fer les modificacions del fre, tot i que no va donar èxit a baixes revolucions, ja que la configuració d'una pastilla arribat a baixes revolucions i alt parell era pràcticament impossible fer que s'aturés, amb tanta progressivitat es trigava molt a posicionar el cargol en una posició diferent del gràfic i quan s'aconseguia no es mantenia constant, per tant no es podia obtenir punts.

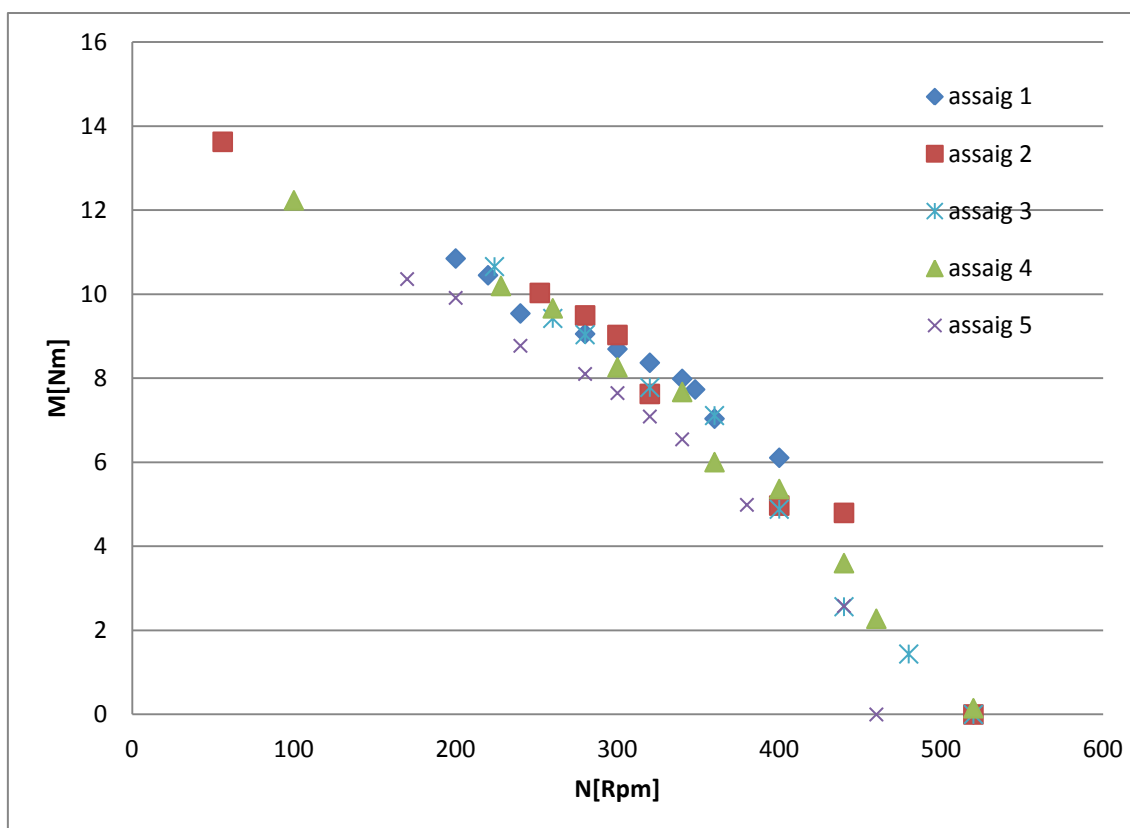


Figura 24. Gràfica de moments, amb 5 dels assajos experimentals que es van realitzar.

Les característiques generals d'aquest assajos es mostren a la taula 1.

Taula 1. Mostra les especificacions generals dels diferents assajos que es mostren a la figura 24.

Assaig	Característica	Procediment
Assaig 1	1 pastilla	Lliure → aturada
Assaig 2	1 pastilla	Aturada → lliure
Assaig 3	1 pastilla	Aturada → lliure
Assaig 4	2 pastilles	Aturada → lliure
Assaig 5	2 pastilles	Lliure → aturada

A més si s'observa aquesta gràfica, es pot afirmar que la precisió és baixa per la clara dispersió que presenten les dades a mateixes velocitats. Per posar un exemple si es mira a 400 rpm, hi ha cinc mostres: 4,38 - 4,88 - 4,97 - 5,36 - 6,11Nm. Amb un error de ± 1 Nm, que no sembla molt, però si es parla d'uns valors que estan al voltant del 5Nm, llavors és una dispersió considerable.

A més dels problemes del fre comentats abans, s'ha de tenir en compte que els aparells de mesura tenen els seus respectius errors com el comptavoltes (± 1 volta) o el cronòmetre (± 0.01 s) o com l'error de la cèl·lula de càrrega que el podem negligir pel baix que és $\pm 0.01\%$ Sn (Sensibilitat nominal $2\pm 10\%$ mV/V). Tot i tenir diversos aparells que cometen errors no són comparables amb l'error humà que es produeix a l'hora d'agafar les dades de la velocitat angular, ja que s'han de relacionar manualment com s'ha comentat a l'apartat "5.3- Adquisició de dades".

Ara es suposa que totes les dades mostrades abans són tots d'un assaig i així es crearà una línia de tendència, amb la finalitat de veure quina seria la recta mitjana dels moments (figura 25). Tot i incorporar a la gràfica una línia de tendència ja s'ha deixat clar a l'apartat anterior que les dades es troben molt disperses i per tant aquesta nova línia només és una mitjana dels assajos.

A la gràfica de parell és on més es nota la manca d'adquisició de dades a baixes rpm's, perquè el que busquem amb més interès és la part inicial de la gràfica, on tenim el parell màxim.

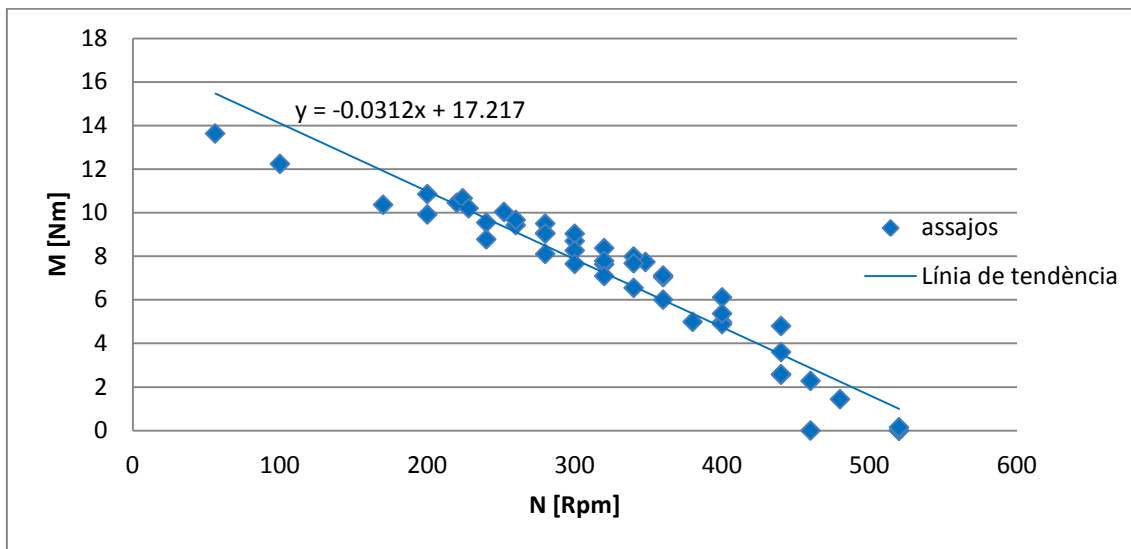


Figura 25. Gràfica de moments de 5 dels assajos escollits que vam realitzar, amb la línia de tendència.

Es segueix el mateix procediment que a l'apartat anterior, ara es farà la gràfica de les potències (figura 26), aquesta corba s'extreu d'agafar els parell i multiplicar-ho per la velocitat angular en rad/s, aquest procés es troba a "l'Annex C – Tractament dades experimentals".

A la gràfica 26, de la potència no es nota tant la manca de dades a baixes revolucions del fre, perquè el que es busca en aquest cas és la potència màxima que es troba per la part central de la corba. De totes maneres encara que es va poder obtenir moltes dades en aquesta zona la dispersió com s'ha comentat, és molt gran.

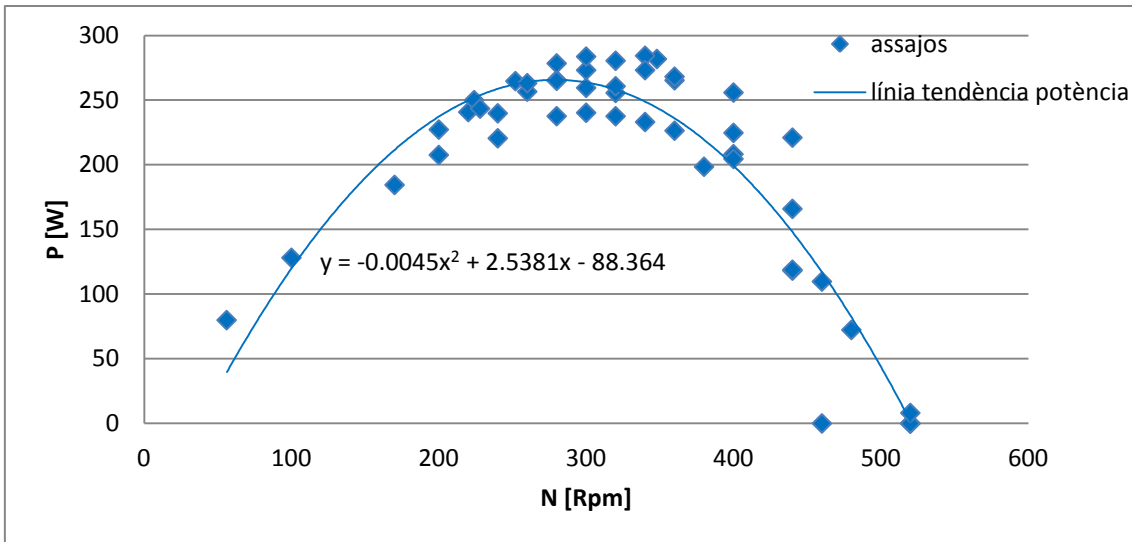


Figura 26. Gràfica de potència dels 5 assajos escollits que vam realitzar, amb la línia de tendència.

Per últim es mostra la gràfica del rendiment (figura 27), aquesta gràfica s'obté d'agafar les potències anteriors i dividir-les per la potència hidràulica, que és el valor màxim de potència que es pot obtenir del doll d'aigua, aquest procediment s'explica a "l'Annex C – Tractament dades experimentals".

En aquesta gràfica passa com a la de potències no notem els problemes del fre, en quant a falta de punts com succeeix a baixes revolucions però d'igual manera hi ha una gran dispersió dels valors centrals de la corba, que en aquest cas són les dades d'interès.

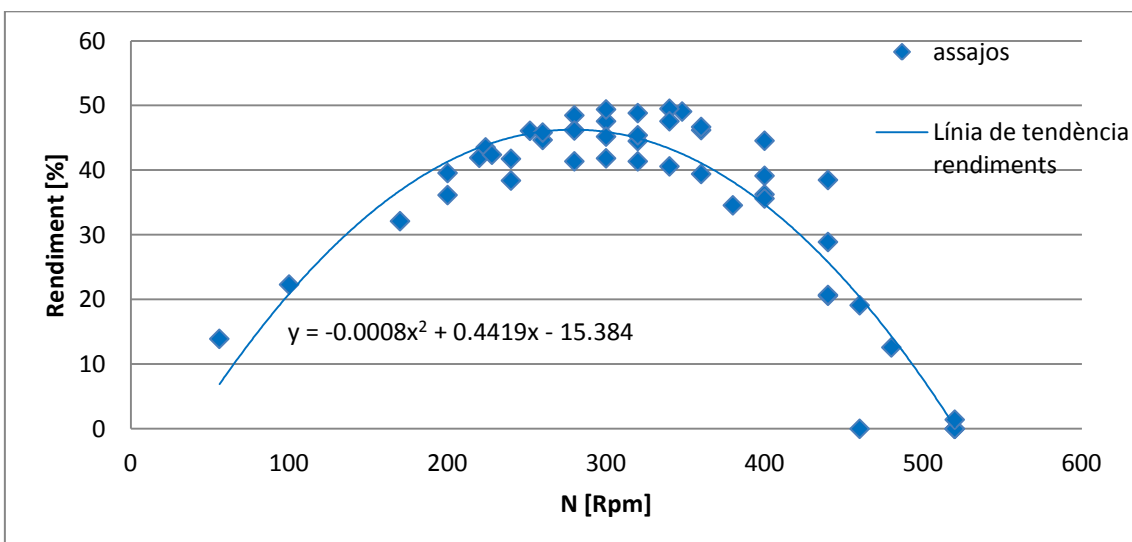


Figura 27. Gràfica dels rendiments dels 5 assajos escollits que vam realitzar, amb la línia de tendència.

Finalment analitzant les corbes característiques obtingudes dels assajos experimentals es pot dir, que la turbina d'eix horitzontal dissenyada per en Jose Manuel Guerrero (2014) amb els paràmetres de la instal·lació següents:

- Número d'àleps i tipus: 16 àleps rectes.
- Alçada del doll: 200 mm.
- Diàmetre de sortida de la mànega: 20 mm.
- Cabal proporcionat per les bombes: 4,83 l/s.

Genera una potència màxima de 260W amb un error de ± 20 W a unes 300rpm ± 5 rpm. El rendiment màxim es troba al 45% amb un error del $\pm 5\%$ a les 300rpm ± 5 rpm. El moment de gir màxim, en canvi, no es pot assegurar per els problemes de progressivitat que s'han comentat anteriorment a les gràfiques i que no va permetre una bona adquisició a baixes revolucions on interessava per l'obtenció del valor del moment de gir màxim. Per tant només es pot presentar un valor de referència observant la línia de tendència, aquest valor seria pròxim als 17 Nm.

7- MODEL CFD

7.1- Introducció

Després d'analitzar els resultats dels estudis analític i experimental. S'observa que la part experimental no dóna els resultats esperats, per tant en aquest apartat procedim a fer l'estudi en simulació de dinàmica de fluids computacional (CFD), per aquest propòsit s'utilitzà el programa de simulació *STAR-CCM+*. Un software que utilitza el mètode de volums finits per calcular les equacions de Navier-Stokes, un conjunt de derivades parcials que descriuen el moviment d'un fluid.

Per tant, primer s'ha d'agafar la geometria de la turbina i dividir-la en finits volums, a aquest procés se l'anomena mallar. Per poder realitzar això s'utilitza el programa de mallar del *ANSYS-Workbench*, aquest programa utilitza tetraedres per omplir tot el volum. Els tetraedres que componen el mallat podem tenir diferents mides, s'ha d'entendre que com menys volums definites es tinguin, menys precisió tindrà la simulació i això repercutirà en els resultats. Per altra banda si es fa una malla amb elements molt petits això influirà en la velocitat de càlcul i per tant en el temps que durarà una simulació, segons els ordinadors que s'utilitzin per realitzar la simulació pot fer que sigui pràcticament impossible. A l'estudi realitzat, cada simulació per obtenir les dades d'un punt i que més endavant, una vegada tractades representaran gràfiques de parell, potència i rendiment, s'ha dedicat de mitjana unes 24 hores de càlcul computacional.

El més correcte a l'hora de fer un mallat, com es veurà més endavant en els diferents mallats que s'han realitzat, seria agafar una mica dels dos conceptes, i fer un mallat irregular, és a dir, utilitzar elements molt petits a les zones de vital importància i utilitzar elements més grans a la resta de la geometria.

Una vegada tinguem el mallat creat, aquest s'importarà de l'*ANSYS-Workbench* a l'*STAR-CCM+* en format ".msh" on es definiran les condicions de contorn, inicials, etc. Això està explicat a "l'Annex D – Condicions de la simulació".

7.2- Casos simulats

S'han estudiat 7 casos diferents per poder veure el comportament de la turbina del laboratori, tots 7 tenen situat el doll d'aigua a la mateixa alçada de 200mm, que proporciona un impacte al centre de l'àlep (taula 2).

Als 5 primers casos a més de per trobar el mallat òptim, s'han realitzat amb un cabal inferior (4,4 l/s) al mesurat al laboratori (4,84 l/s) amb la finalitat de poder comparar un d'ells amb el real i així veure els efectes que produeix a les gràfiques de moment, potència i rendiment. A més els tres primers són amb un diàmetre superior al real, per poder veure com actua la turbina en aquesta situació i comparar-ho amb un altre que tingui el mateix cabal però sense l'augment de diàmetre.

Una vegada s'obté el mallat que resulta més adequat per a la simulació, l'utilitza't al cas 5, on es defineixen zones amb una mida d'elements més petit que a la resta de la geometria, ja que són zones amb un interès especial com pot ser el recorregut del doll. A més s'implanta l'ús de simetries que aporta una optimització de processador i per tant permet incrementar el nombre d'elements a la resta de la geometria. Llavors amb aquest mallat es simula el cas del laboratori, això es troba al cas 6, on s'utilitza el cabal mesurat de 4,84 l/s i el diàmetre de 20 mm.

Finalment es realitza una simulació, cas 7, d'augment del cabal (5,3 l/s) per poder comparar-ho amb el cas en el que l'havíem reduït i amb el real.

A continuació es pot veure els 7 models (taula 2) que s'han assajat amb el programa de simulació.

Taula 2. Els 7 casos que s'han simulat amb CFD, cal recordar que cada valor de rpm, equival a 24 hores de càlcul.

Cas	Q(l/s)	D(mm)	Vs(m/s)	Malla	Rpm's
1	4,4	22	11,57	1	1,50,100,200,300,400
2	4,4	22	11,57	2	1,50,100,200,300,400
3	4,4	22	11,57	3	1,50,100,200,300,400
4	4,4	20	14	4	50,100,200,300,350,400
5	4,4	20	14	5	1,50,100,200,300,400,500
6	4,84	20	15,405	5	1,50,100,200,300,400,500
7	5,3	20	17	5	1,50,100,200,300,350,400

Abans de començar a parlar en concret de cadascun dels casos simulats primer s'ha d'explicar on es situa la simetria de la qual es parla en els casos que s'ha utilitzat. La simetria s'aplica al pla XZ tallant la turbina en dos, donant com a resultat dos laterals idèntics, (figura 28) on es pot veure que hi ha la meitat de la circumferència del doll d'aigua, i els àleps queden tallats per la meitat.

En els casos que s'utilitza la simetria, les imatges que es mostren s'han extret corresponen amb el propi pla de simetria. En els casos que no s'ha utilitzat aquest recurs, s'ha creat un pla de tall que talla la geometria per el mateix lloc, amb la l'única finalitat de poder extreure imatges que ens ajudin a veure la composició del mallat i poder comparar-ho visualment. Per facilitar la comparació visual de totes les imatges extretes s'ha creat la taula 3.

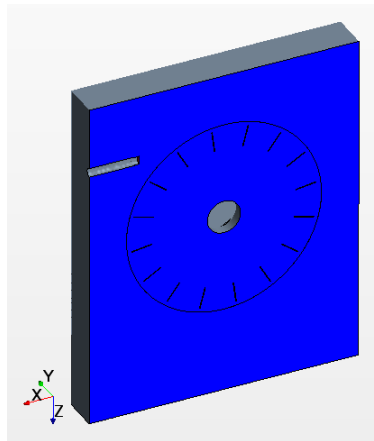
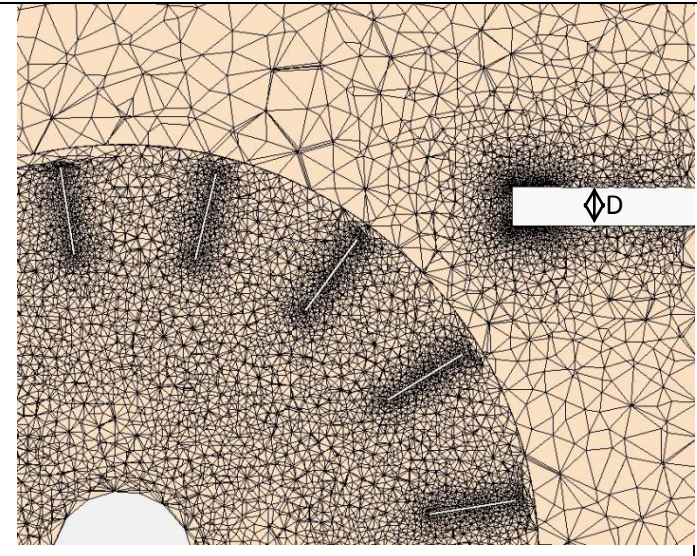
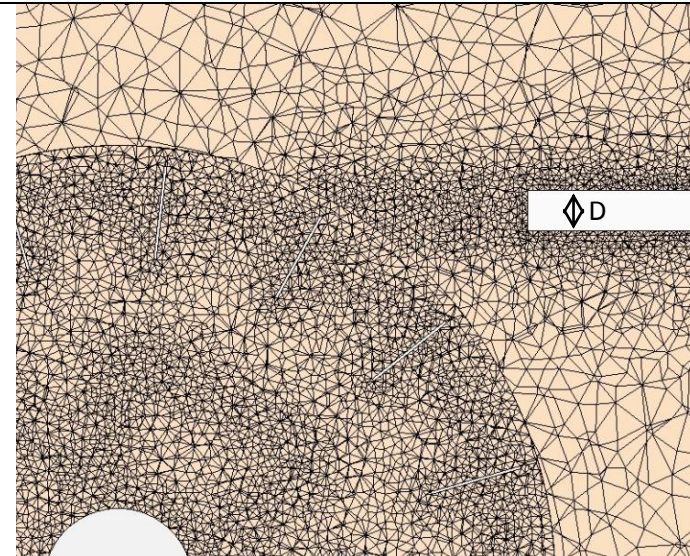
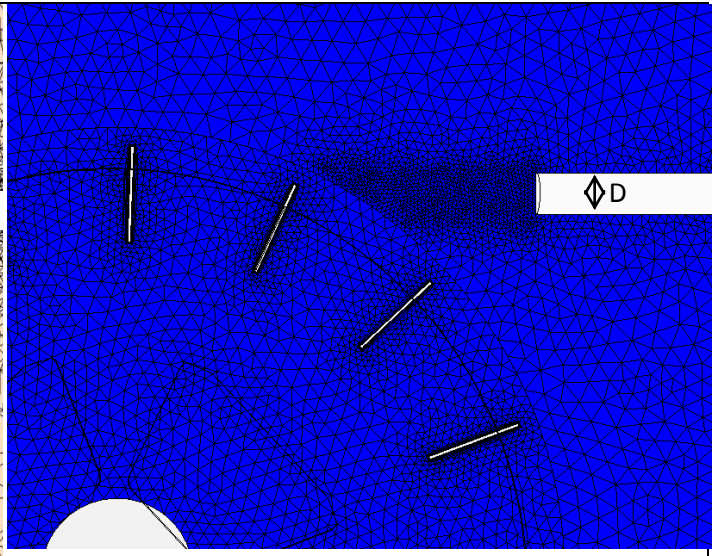
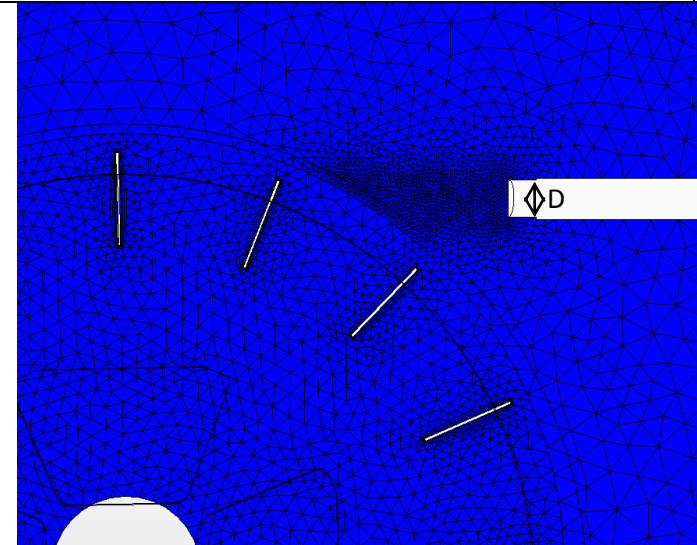
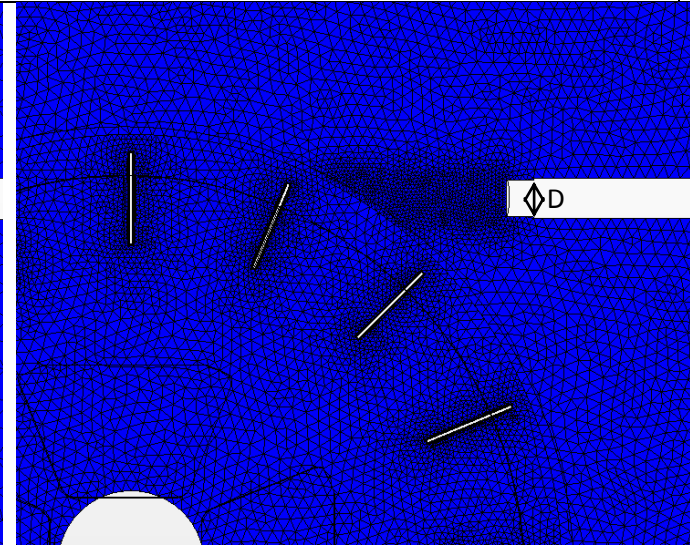


Figura 28. Explicació situació de la simetria.

La resta de dades importants referents a la simulació com són les condicions físiques es troben a "l'Annex D – Condicions de la simulació"

Taula 3. Imatges del pla de simetria o tall XZ per poder visualitzar el mallat.

		
<p>Cas 1: Geometria sencera, mallat automàtic ANSYS-Workbench, 1.888.598 elements. D=22mm, Q=4,4 l/s</p>	<p>Cas 2: Geometria sencera, mallat amb zones més acurades, 2.875.822 elements. D=22 mm, Q=4,4 l/s</p>	<p>Cas 3: Aplicació de simetria i zones amb més detall, 2.041.110 elements. D=22 mm, Q=4,4 l/s</p>
		<p>Al cas 6 s'utilitza el mateix mallat del cas 5 perquè l'únic que es modifica és el cabal, passant a ser de 4,83 l/s.</p> <p>Al cas 7 s'utilitza el mateix mallat del cas 5, amb l'única diferència de canvi de cabal, en aquest cas és de 5,3 l/s.</p>
<p>Cas 4: Es modifica el mallat per el canvi de diàmetre. Aplicació de simetria i zones amb més detall, 479.227 elements. D=20 mm, Q=4,4 l/s</p>	<p>Cas 5: Aplicació de simetria i zones amb més detall, 2.531.528 elements. D=20 mm, Q=4,4 l/s</p>	

Tot seguit l'explicació detallada de cadascun dels casos simulats.

Cal fer recordatori de que els 3 primers casos s'han fet amb un cabal inferior i un diàmetre superior perquè tenen una finalitat extra a part d'optimitzar el mallat, es tracta de veure com el cabal i diàmetre varien les gràfiques de moment, potència i rendiment en comparatives posteriors.

7.2.1- Cas 1

Es el primer mallat, es va fer automàticament amb el programa *ANSYS-Workbench*, conté 1.888.598 elements amb una mida mínima de 0,5mm. A la taula 4, es mostra la resta de característiques tècniques d'aquest cas.

Taula 4. Característiques tècniques simulació cas 1.

Ús de simetria:	No
Nombre d'elements:	1.888.598 elements
Mida mínima dels elements:	0,5 mm
Mida màxima dels elements a la geometria:	20 mm
Ratio (growth ràtio):	1.2
Cabal:	4,4 l/s
Diàmetre:	22 mm
Velocitat sortida del doll:	11,57 m/s

7.2.2- Cas 2

Al segon cas, el mallat ja no era automàtic, es va decidir incrementar el nombre d'elements fins als 2.875.822, amb una mida mínima de 0.5mm i augment de densitat d'elements a les zones d'interès especial com el recorregut del doll d'aigua. Degut a les limitacions computacionals els elements més grans van augmentar de mida. Totes aquestes característiques es poden observar a la taula 5.

Taula 5. Característiques tècniques simulació cas 2.

Ús de simetria:	No
Nombre d'elements:	2.875.822 elements
Mida d'elements:	0,5 mm
Mida màxima dels elements a la geometria:	40 mm
Ratio (growth ràtio):	1.2
Cabal:	4,4 l/s
Diàmetre:	22 mm
Velocitat sortida del doll:	11,57 m/s

7.2.3- Cas 3

Aquest cas, va ser el primer en utilitzar un mallat en el que es va incorporar l'ús de la simetria, un recurs que optimitza el càlcul ja que només s'ha de omplir de volums finits la meitat de la geometria anterior, d'aquesta manera es va poder passar a tenir un nombre d'elements de 2.041.110 en només mitja geometria. S'ha de dir que va augmentar una mica la mida mínima dels elements, fins a 2 mm al diàmetre de sortida del doll d'aigua. A la taula 6 es mostren la resta de dades.

Taula 6. Característiques tècniques simulació cas 3.

Ús de simetria:	Si
Nombre d'elements:	2.041.110 elements
Mida mínima dels elements als àleps:	2,5 mm
Mida mínima dels elements a la mànega:	2 mm
Mida màxima dels elements a la geometria:	10 mm
Ratio (growth ràtio):	1,2
Cabal:	4,4 l/s
Diàmetre:	22 mm
Velocitat sortida del doll:	11,57 m/s

Abans de mostrar les característiques dels casos 4 i 5 cal recordar que aquest tenen a més de la finalitat d'optimització del mallat, el propòsit de crear una comparativa de cabals que es veurà més endavant, per tant aquests casos s'han fet amb un cabal de 4,4 l/s inferior al real i mantenint el diàmetre de sortida real de 20 mm.

7.2.4- Cas 4

Al cas 4, també s'utilitza la simetria, aquí en particular es va reduir considerablement el nombre d'elements, i com es volia continuar mantenint les zones d'interès especial, on es troba una densitat d'elements més gran i per tant cadascun d'ells de mida més petita, indirectament va augmentar la mida màxima dels elements a la resta de la geometria. Totes les dades es poden visualitzar a la taula 7.

Taula 7. Característiques tècniques simulació cas 4.

Ús de simetria:	Si
Nombre d'elements:	479.227 elements
Mida mínima dels elements als àleps:	4,2 mm
Mida mínima dels elements a la mànega:	2 mm
Mida màxima dels elements a la geometria:	15 mm
Ratio (growth ràtio):	1,2
Cabal:	4,4 l/s
Diàmetre:	20 mm
Velocitat sortida del doll:	14 m/s

7.2.5- Cas 5

El cas 5, es va realitzar amb l'ús de simetria, es va voler aprofitar al màxim els recursos computacionals dels que es disposa al laboratori de Mecànica de Fluids, per tant és va augmentar el nombre d'elements fins als 2.531.528, amb una mida dels elements més petits de 2mm. Mentre que es va reduir la mida màxima dels elements als 6,5mm d'aquesta manera s'obté el mallat que aprofita més els recursos que ens proporciona l'ordinador. La resta de dades d'aquest cas es mostren a la taula 8.

Taula 8. Característiques tècniques simulació cas 5.

Ús de simetria:	Si
Nombre d'elements:	2.531.528 elements
Mida mínima dels elements als àleps:	2 mm
Mida mínima dels elements a la mànega:	2 mm
Mida màxima dels elements a la geometria:	6,5 mm
Ratio (growth ràtio):	1,2
Cabal:	4,4 l/s
Diàmetre:	20 mm
Velocitat sortida del doll:	14 m/s

Després de realitzar les simulacions amb els 5 casos anteriors s'arriba a la conclusió de que el mallat més complet és el que s'utilitza al Cas 5, per el que s'ha comentat anteriorment, és a dir, aprofita al màxim els recursos que ens proporcionen els ordinador del laboratori de Mecànica de Fluids. Dit això ara realitzarem la simulació del cas del laboratori amb la malla del cas 5.

7.2.6- Cas 6

El cas 6 l'únic que té de diferent respecte el cas 5 és el cabal amb el que es va realitzar la simulació, el qual passa dels 4,4 l/s als 4,81 l/s, que es el cabal real mesurat amb el comptador volumètric. Això augmenta la velocitat de sortida a 15,405 l/s. Aquestes dades es podem visualitzar a la taula 9.

Taula 9. Característiques tècniques simulació cas 6.

Ús de simetria:	Si
Nombre d'elements:	2.531.528 elements
Mida mínima dels elements als àleps:	2 mm
Mida mínima dels elements a la mànega:	2 mm
Mida màxima dels elements a la geometria:	6,5 mm
Ratio (growth ràtio):	1,2
Cabal:	4,84 l/s
Diàmetre:	20 mm
Velocitat sortida del doll:	15,405 m/s

Finalment per poder crear la comparativa entre cabals que es farà més endavant a l'apartat "8- Resultats CFD", s'ha de fer una última simulació, la d'un cabal superior, per tant realitzem la simulació del cas 7.

7.2.7- Cas 7

L'últim cas, el 7, inclou un augment de cabal fins als 5,3 l/s. Per tant també es modifica la velocitat de sortida del doll. La resta de dades s'inclouen a la taula 10.

Taula 10. Característiques tècniques simulació cas 7.

Ús de simetria:	Si
Nombre d'elements:	2.531.528 elements
Mida mínima dels elements als àleps:	2 mm
Mida mínima dels elements a la mànega:	2 mm
Mida màxima dels elements a la geometria:	6,5 mm
Ratio (growth ràtio):	1,2
Cabal:	5,3 l/s
Diàmetre:	20 mm
Velocitat sortida del doll:	17 m/s

8- RESULTATS CFD

8.1- Introducció

En aquest apartat es veurà i comentarà, des de com es modifiquen les corbes de parell, potència i rendiment amb l' utilització dels diferents mallats, l'efecte d'un increment en el diàmetre del doll d'aigua o fins i tot l'augment o disminució del cabal real.

8.2- Efecte del mallat

Aquest apartat tracta de comparar el mallat que considerem òptim, amb la resta de mallats que hem realitzat. Com ja varem comentar a l'apartat anterior "7.2-Casos simulats" els 5 primers casos tenen a part d'optimitzar el mallat, la finalitat de poder comparar els efectes d'un augment del diàmetre de la mànega (els 3 primers casos) i d'una disminució del cabal (casos 4 i 5), això ho veurem més endavant.

Començarem pels casos 1, 2 i 3:

8.2.1.Casos 1, 2, 3.

Explicat l'ús d'aquest tres primers casos, queda amb les característiques d'un cabal de 4.4l/s i un diàmetre de 22mm que proporciona una velocitat de sortida del doll d'aigua de 11,57m/s.

Primer observem la gràfica del parell (figura 29). Observem on es troba el parell màxim, és a dir a l' inici, ja que a la realitat això es traduiria com l' impacte del doll contra l'àlep que es troba quiet.

Per la simulació la condició de parell màxim s'ha calculat a 1rpm en lloc de a 0 rpm. El motiu d'aquesta modificació és que si es fa a 0 rpm les gràfiques depenen de la posició en la que està fixada la turbina. Per tant és millor simular que té un petit moviment i així s'evita que depengui de la posició.

Una vegada explicat això es pot veure que el parell varia de 7,3 a 9,3Nm del cas 1 al cas 3 respectivament. Per tant es nota l' increment del nombre d'elements en el mallat 3 que incorpora zones amb més densitat i per tant més definició que la resta de geometria també aplica l'ús de simetria en l'eix XZ com es va poder veure a la taula 3 de l'apartat "7.2-Casos simulats".

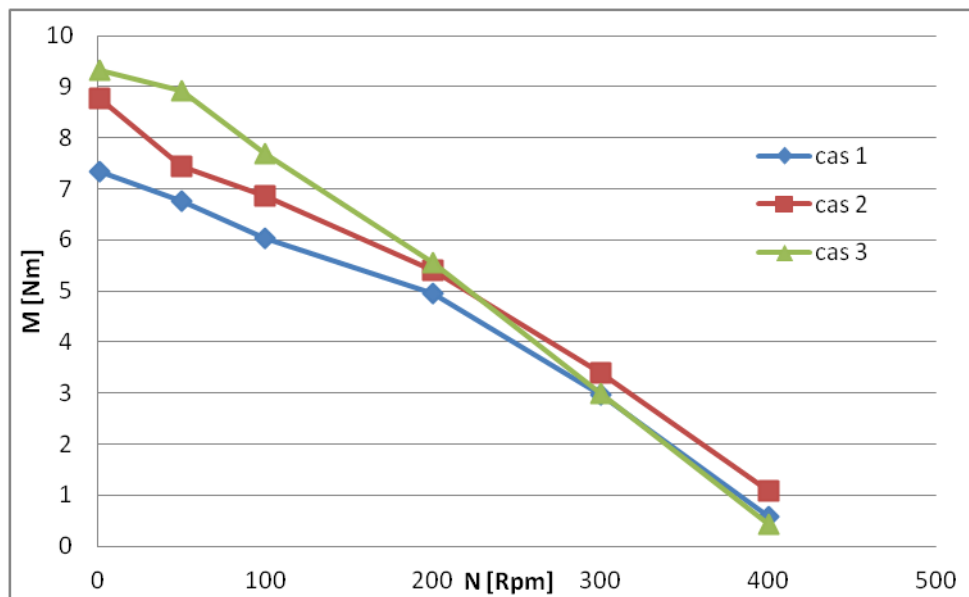


figura 29. Gràfica de moments del cas 1, 2 i 3.

→el cas 1: mallat amb 1.888.595 d'elements.

→el cas 2: mallat amb 2.875.822 d'elements, elements extres en zones importants per la simulació.

→el cas 3: mallat amb ús de simetria, 2.041.110 elements en la meitat de la geometria que hem simulat.

Tot seguit s'observa la gràfica de la potència (figura 30), en aquest cas els valors màxims de les simulacions, es troben a la meitat de la corba, és a dir sobre les 200rpm. A la gràfica s'aprecia que el màxim valor el manté el cas 3, tot i que la diferència s'escurça amb els altres casos. Per tant, tenim un cas 3 ,superior a la resta amb una potència màxima de 116,3 W mentre que el més desfavorable, el cas 1, té 13W menys.

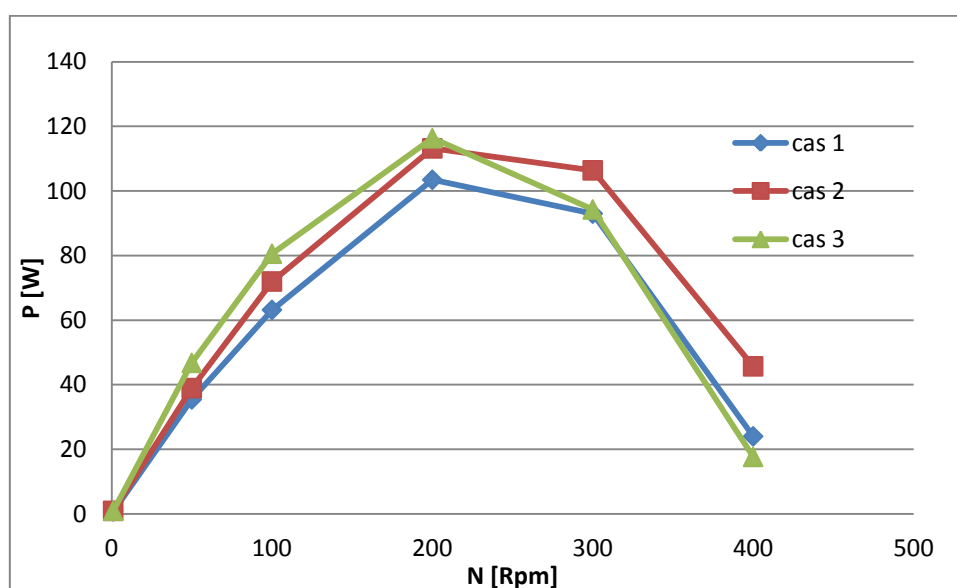


figura 30. A la gràfica es pot veure les potències del cas 1,2 i 3.

Per últim en els casos 1, 2 i 3, es mostra la gràfica de rendiments (figura 31). Es pot veure que la gràfica és proporcional a la gràfica de potència de la figura 30. El perquè d'això es va comentar a la gràfica de rendiment a l'apartat "4-Mètode analític", on es diu que el rendiment és un quocient entre els valors de la figura 30 i la potència hidràulica, aquest últim valor depèn de la velocitat i el cabal, per tant és constant a una mateixa simulació, com tots tres casos tenen el mateix cabal i velocitat de sortida, tenen el mateix valor de potència hidràulica i per tant es com dividir les corbes de la gràfica de potència per una constant. Dit això el rendiment màxim es troba on apareix la potència màxima, sobre les 200rpm amb un valor pròxim al 40%.

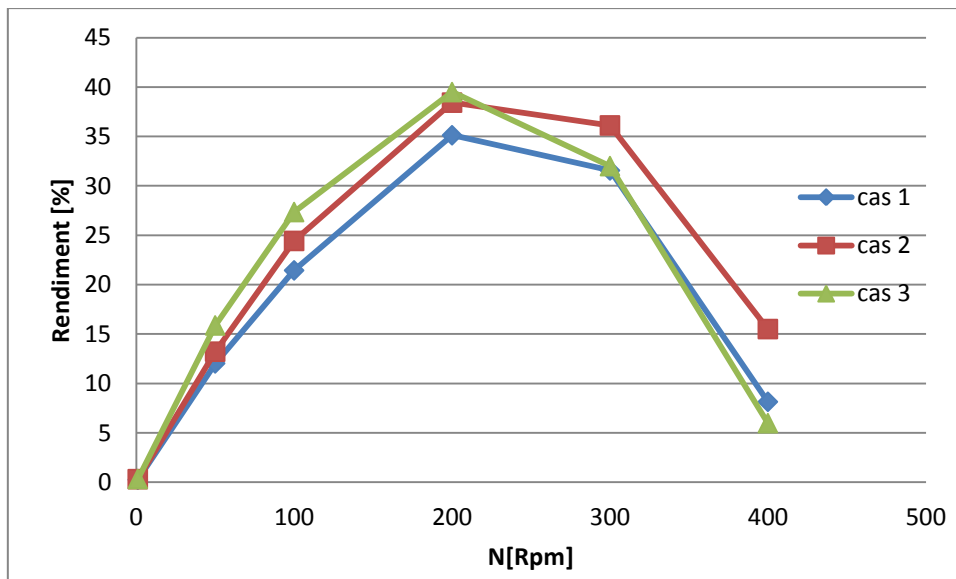


Figura 31. Els rendiments dels casos 1,2 i 3.

A continuació es representen els casos 4 i 5.

8.2.2.Casos 4, 5.

Aquests casos s'han simulat amb un cabal de 4,4 l/s, i el diàmetre real de 20mm, això ens proporciona una velocitat de sortida de 14 m/s.

A la figura 32 es mostra la gràfica dels moments, si s'observa la taula 3 dels mallats de l'apartat "7.2-Casos simulats" es veu que són molt diferents en el nombre d'elements, tenint al cas 5 sobre 2.000.000 d'elements més que el cas 4. Tot i així les corbes de la gràfica surten molt semblants. Això demostra que el nombre d'elements en general, no es tant important com les zones a les que dediquem els elements disponibles, ja que tots dos tenen definides zones d'interès especial amb un increment de la densitat respecte la resta de geometria, a més tots dos utilitzen la simetria al pla XZ. Tot i així sempre que sigui possible s'utilitzarà al màxim els recursos disponibles, i per tant el major nombre d'elements possible.

Per tant a la gràfica dels moments (figura 32) s'obté un valor màxim del moment a 1rpm, pròxim a 10,8Nm per als dos casos.

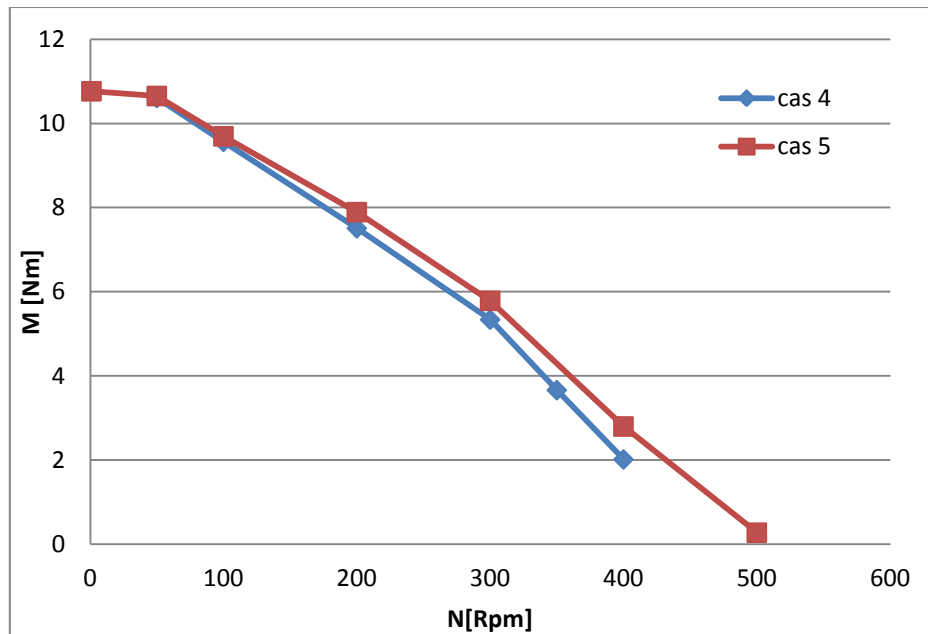


Figura 32. Gràfica amb els moments dels casos 4 i 5.

→Cas 4: mallat amb 479.227 elements i ús de simetria

→Cas 5: mallat amb 2.531.528 elements i ús de simetria

A tots dos casos tenim el elements més petits a les mateixes zones d'importància com seria la el recorregut del doll o al voltant dels àleps.

A continuació es mostra la gràfica de les potències (figura 33), s'ha d'observar on tenim els valors màxims, això succeeix al voltant de les 300 rpm. En aquest cas la petita diferència que hi havia a la gràfica del parell, s'ha incrementat, això és així per que la potència s'obté del producte entre els valors del parell i la velocitat angular. Per tant la falta de definició del cas 4, es fa més notable en aquest cas. Per tant tot i que la disposició dels elements és més important que el nombre en si, sempre és millor l' utilització del nombre màxim d'elements que l'ordinador permeti.

Posant xifres a les diferències comentades abans, es veu que el valor màxim es situa en el cas 5 amb 182 W i el cas 4 amb 14 W menys a 168W, tot això a 300rpm de velocitat angular.

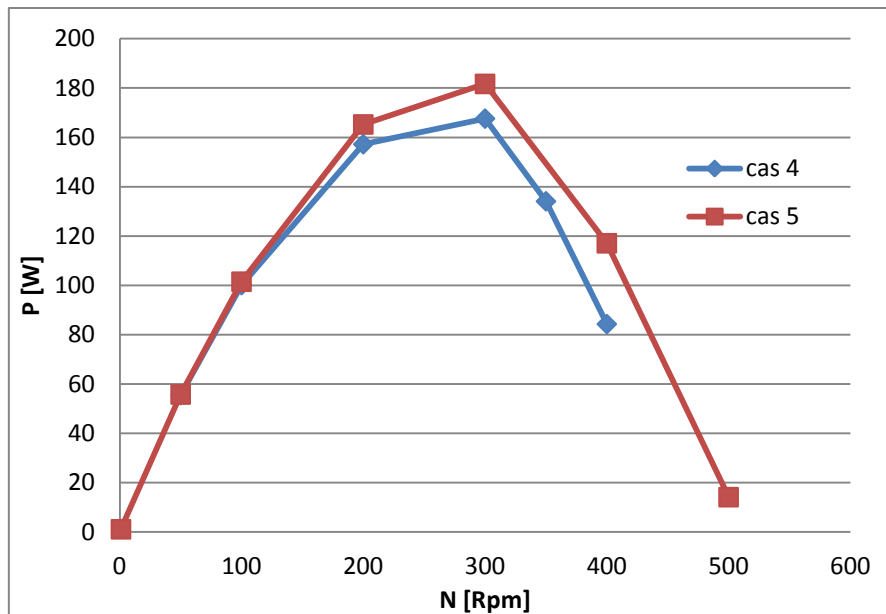


Figura 33. Gràfica amb les potències dels casos 4 i 5.

Ara s'observa la gràfica dels rendiments (figura 34). Aquí com s'ha comentat anteriorment a la gràfica de rendiments dels casos 1, 2 i 3, es manté la proporcionalitat amb la gràfica de les potències. Per tant el valor màxim del rendiment es troba a les mateixes rpm que la potència màxima, és a dir, a les 300 rpm, amb un valor del 42% i 39% al cas 4 i 5 respectivament.

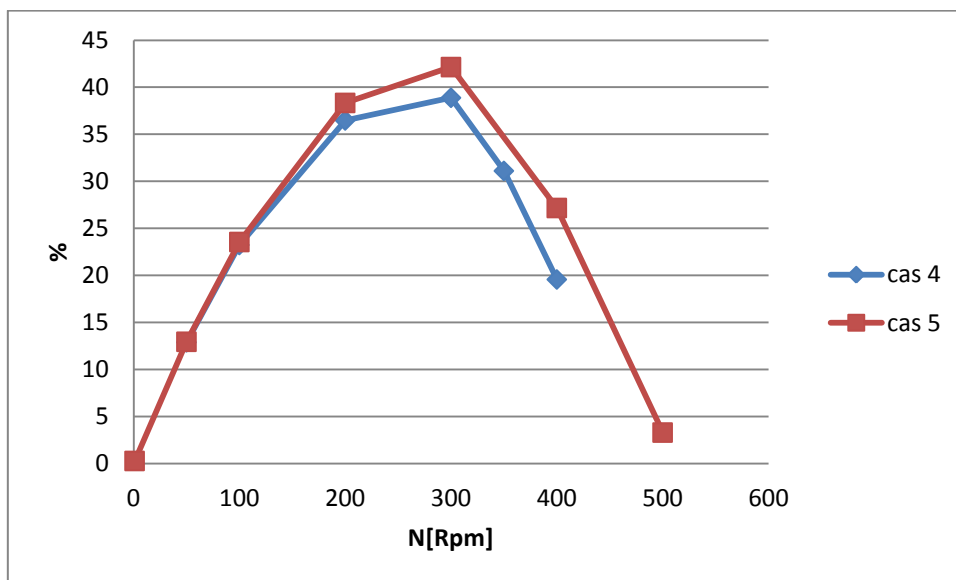


Figura 34. Gràfica dels rendiments dels casos 4 i 5.

Amb tot el comentat anteriorment s'arriba a la conclusió que l' utilització d'un elevat nombre d'elements en el nostre mallat, incrementa la precisió, però en general és més important destinar els recursos computacionals disponibles en assignar elements petits a les zones més crítiques de la simulació.

De totes maneres si es pogués utilitzar un mallat d'infinits elements, s'arribaria a una simulació completament idèntica a la realitat i per tant als resultats experimental. Per tant com a norma general sempre s'utilitzarà el major nombre d'elements que permeti l'ordinador i en aquest sentit ajuda molt l' utilització de recursos com les simetries. Les característiques dels ordinadors, i per tant la limitació de la capacitat de càlcul computacional es troba detallat a l'Annex D – Condicions de la simulació.

8.3- Efecte del diàmetre del doll

A continuació es vol veure com influeix l'augment del diàmetre del doll d'aigua a les gràfiques de parell, potència i rendiment, per aquesta comparativa s'utilitzarà el cas 3, i el cas 5, ja que amb el mateix cabal de 4,4l/s un té un diàmetre de 22mm i l'altre de 20mm respectivament.

A la figura 35 es mostra la gràfica del parell. Quan augmentem el diàmetre del doll d'aigua mantenint el cabal constant, la velocitat disminueix dels 14m/s als 11,57m/s i per tant perd força, això implica una disminució del parell màxim a 1rpm de 10,8Nm a 9,3Nm. Vist així no sembla molt gran la caiguda d' 1,5 Nm amb l'augment del diàmetre, però en realitat 1,5 Nm representa el 14 % del parell màxim que hem arribat a obtenir.

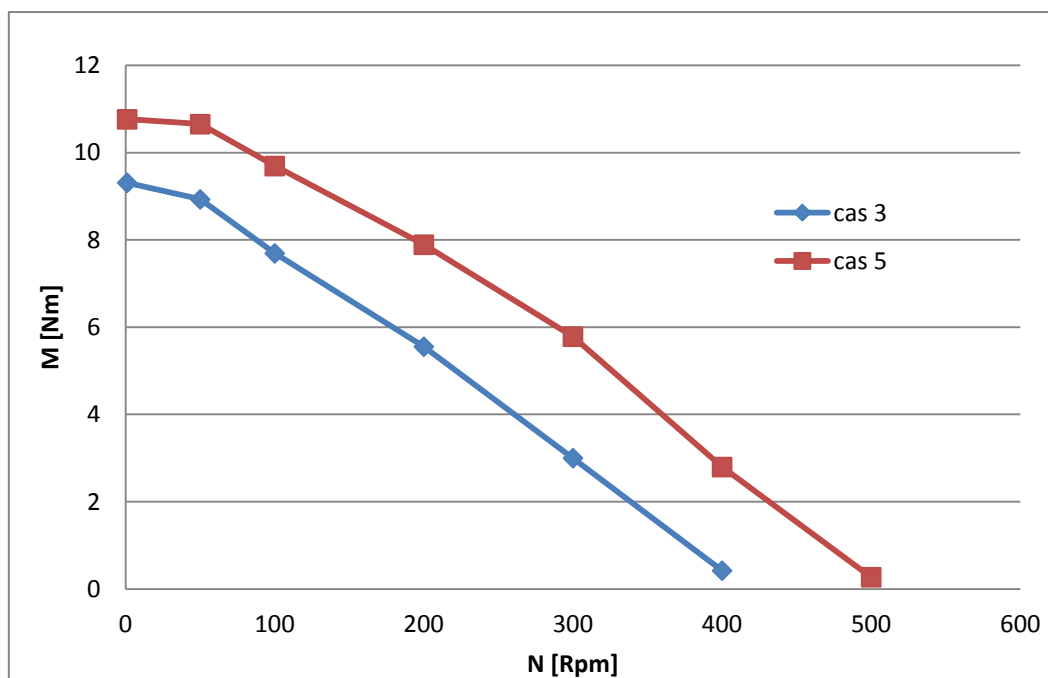


Figura 35. Gràfica comparativa de moments entre els casos 3 i 5.

→Cas 3: Diàmetre del doll 22 mm Q=4,4 l/s. Ús simetria, mallat 2.041.110 elements.

→Cas 5: Diàmetre del doll 20 mm, Q=4,4 l/s. Ús simetria, mallat 2.531.528 elements.

A la figura 36 es pot veure la comparació de les potències. Com s'ha vist anteriorment als gràfics de potències sempre es magnifiquen les diferències que puguin haver entre les diferents corbes del gràfic de moment. Per tant aquí es pot veure com la potència del cas 3 on s'ha augmentat el diàmetre decau considerablement. Si es comparen els valors màxims de cada corba, els quals estan situats a diferents velocitats angulars. Es troba que, en el cas 5, sense augment de cabal s'obté una potència de 182 W a 300 rpm mentre que al cas 3 es situa el màxim a 200 rpm amb un valor de 116 W. És a dir, una diferència de potència de 66 W.

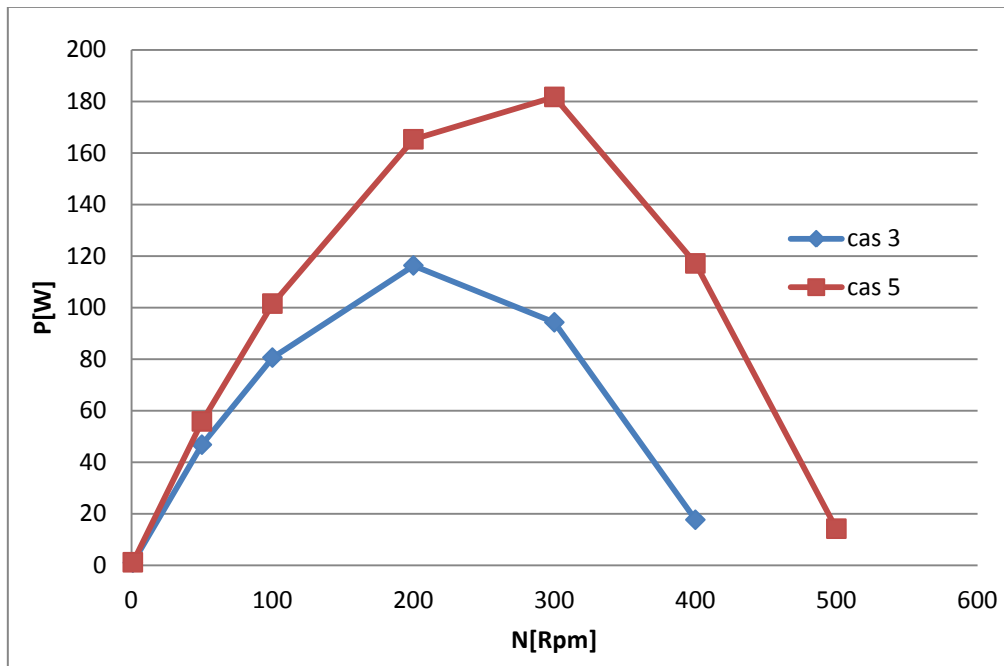


Figura 36. Gràfica comparativa de les potències entre els casos 3 i 5.

Per acabar amb els efectes que provoca a les gràfiques una variació del diàmetre del doll d'aigua, es mostra la figura 37 amb la gràfica de rendiments. En el cas del rendiment les diferències són molt petites situant els rendiments en 42% i 40% als casos 5 i 3 respectivament.

Aquí no es nota la diferència abismal que hi ha al gràfic de potències, perquè com s'ha comentat anteriorment la fórmula del rendiment depèn de la potència hidràulica, aquest valor és constant a cada corba i és diferent a cada cas, al cas 5 és molt més gran que al cas 3 ja que la seva expressió depèn de la velocitat al quadrat, això explica que al fer la divisió d'aquestes xifres surtin valors semblants.

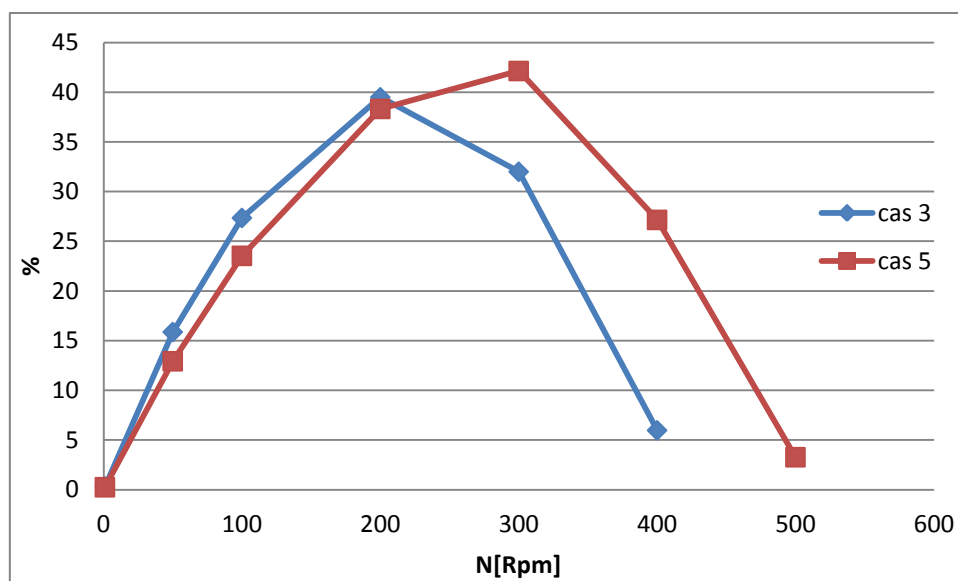


Figura 37. Gràfica comparativa dels rendiments entre el cas 3 i 5.

8.4- Efecte del cabal.

En aquest apartat es comparen els casos 5, 6 i 7, recreats amb el mateix mallat del cas 5 considerat millor que els altres com s'ha demostrat a l'apartat "8.2-Efecte del mallat". La comparativa té la finalitat de mostrar les diferències que produeixen a les gràfiques de parell, potència i rendiment, l' utilització de diferents configuracions de cabals.

S'utilitzarà el cas 6 que com s'ha comentat a l'apartat "7.2.6-Cas 6", correspon a la simulació del cas real, és a dir el cas que hi ha al laboratori. Aquest té unes característiques físiques d'un cabal de 4,84 l/s amb un diàmetre de sortida de 20 mm. Després, el cas 5 amb la simulació d'un cabal inferior de 4,4 l/s i mateix diàmetre de 20 mm. I per últim el cas 7 simulat amb un cabal superior de 5,3 l/s i diàmetre 20 mm.

Ara que està clar el que es compara, es comença amb la gràfica de parell (figura 38), Si s'agafa com a punt de partida el cabal real, cas 6 on trobem un parell màxim de 15Nm, es veu que disminuir el cabal implica una caiguda del parell fins als 10,8Nm del cas 5. Aquesta disminució vista en percentatge equival a un descens del 28% respecte el cas real.

D'igual manera si es compara el punt de partida del cas 6 amb l'augment del cabal al cas 7, el parell al cas 7 passa a tenir un valor de 15,7Nm a 50rpm respecte els 14,2Nm del cas 6 a 50rpm. Igual que abans si es vol veure aquest augment del moment en percentatge, equival a un increment del 10%.

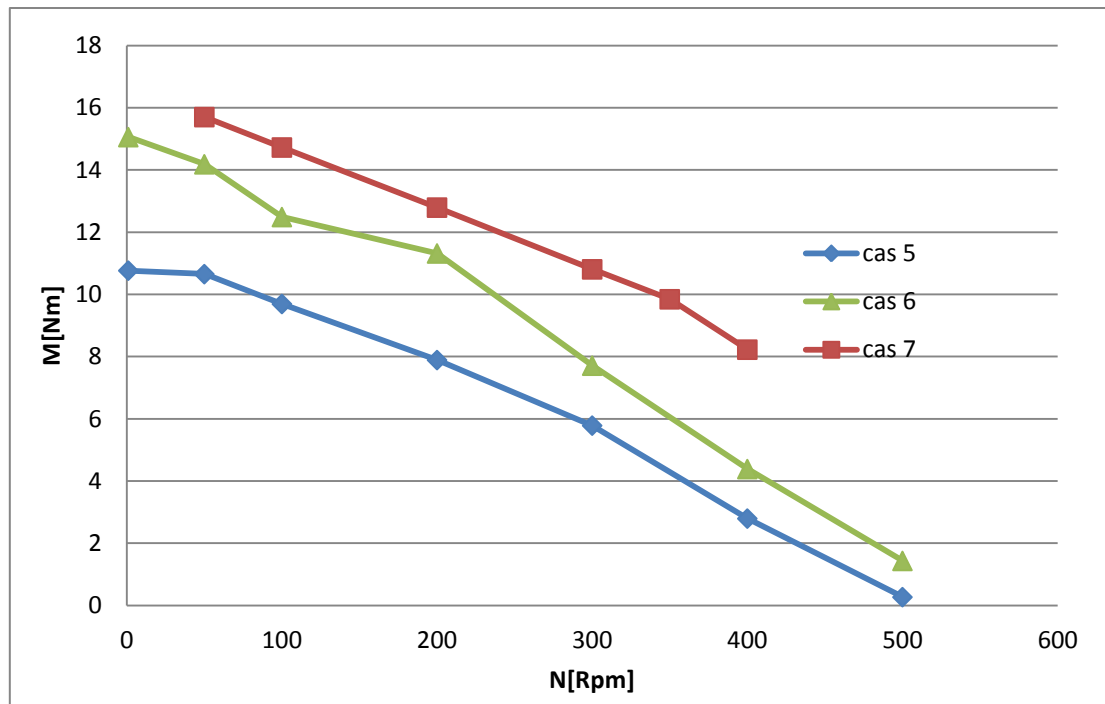


Figura 38. Gràfica comparativa dels moments entre els casos 5, 6 i 7.

Es continua la comparació amb la gràfica de les potències de la figura 39. Com era d'esperar succeeix igual que a la gràfica de moments, si el cabal augmenta la potència augmenta i al revés, si el cabal disminueix la potència disminueix, això és així perquè la potència és el producte del parell per la velocitat angular en radiants.

Per tant s'obté un valor de la simulació real, cas 6, de 242W a 300 rpm mentre que amb la disminució de cabal del cas 5 passa a tenir 182 W a 300rpm. Si s'observa el valor màxim del cas 7, aquest es situa a 350rpm amb 361W.

Aquest increments potser es mostren més fàcilment en percentatge, si el punt de partida és el real, l'augment del cabal incrementa la potència un 50%, mentre que la disminució del cabal produeix una reducció del 25% de la potència inicial.

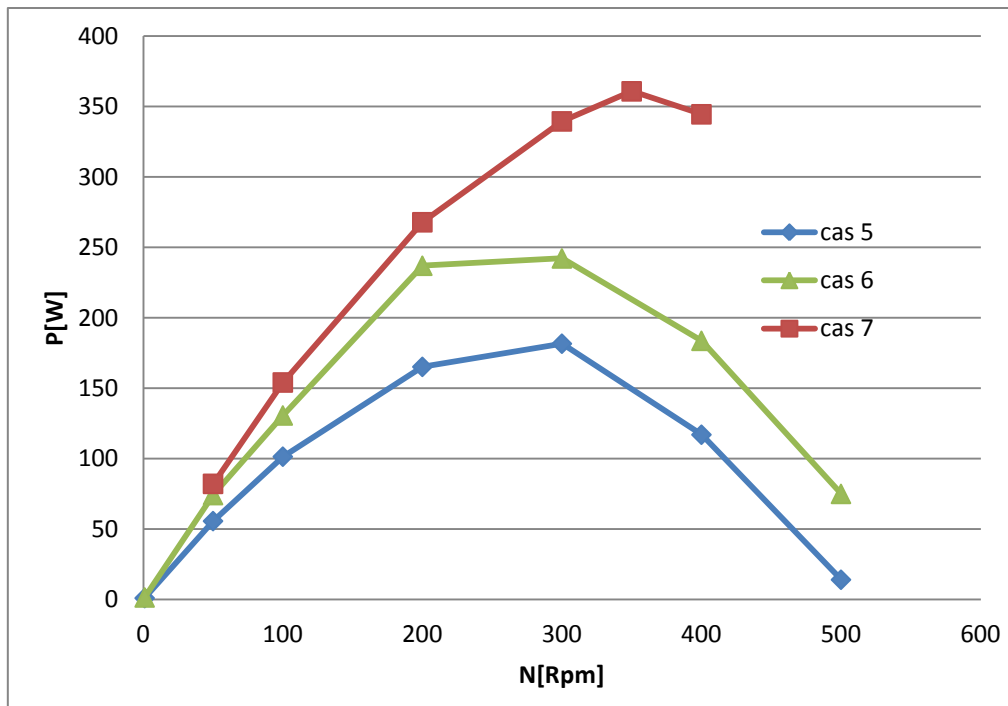


Figura 39. Gràfica comparativa de potències entre els casos 5, 6 i 7.

Per finalitzar la comparativa referent al cabal, es mostra la gràfica del rendiment (figura 40). En aquest cas com ja va succeir a l'apartat "8.3-Efecte del diàmetre del doll" les diferències que s'observaven entre les corbes de la gràfica de potència, no es mantenen a la gràfica del rendiment, en aquest cas perquè es varia el cabal en tots tres casos i això varia a la fórmula del rendiment el terme del denominador que correspon a la potència hidràulica.

Si observem els valors que donen les corbes, es veu que el major rendiment l'obté la corba del cas 7 amb un rendiment del 47% a 350 rpm, mentre que tant el cas 6, el real, com el cas de la disminució del cabal, cas 5, tenen pràcticament el mateix rendiment al voltant del 42%.

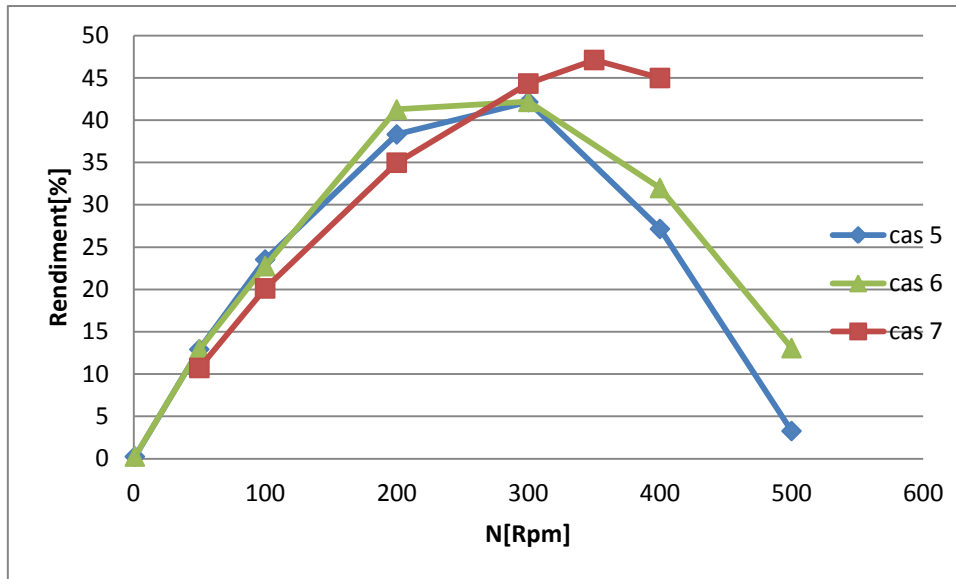


Figura 40. Gràfica comparativa de rendiments entre els casos 5, 6 i 7.

8.5- Comparació amb assajos experimentals i mètode analític.

En aquest apartat es vol posar en comú tots els mètodes que s'han utilitzat, és a dir, per un costat hi ha el mètode analític, calculat amb fórmules de l'apartat "4-Mètode analític", per un altre l'experimental fet amb assajos de laboratori, del qual es superposaran totes les dades dels diferents assajos, per tal de no cometre error dient que un assaig és més correcte que un altre com es va explicar a l'apartat "6.2-Resultats experimentals" ja que es van obtenir dades molt disperses i per tant poc precises. I per últim el cas 6 obtingut mitjançant la simulació de fluids computacional.

Per tant en aquest apartat es comentaran els gràfics on es superposaran tots els resultats amb les característiques reals que té la instal·lació del laboratori de Mecànica de Fluids, és a dir, cabal 4,84l/s, diàmetre 20mm i velocitat de sortida 15,4m/s.

Es comença la comparació amb la gràfica del parell (figura 41). Es pot veure que els resultats de la simulació en CFD del cas 6 coincideixen molt amb el mètode analític extret de l'equació 1. Dels assajos experimentals no es pot extreure grans conclusions tot i que els pocs punts adquirits deixen entreveure una lleugera similitud amb les altres dos corbes. La poca adquisició de dades es va comentar a l'apartat "6.2-Assajos experimentals" on es parla dels problemes de progressivitat del fre de disc a baixes revolucions.

A la part central de la gràfica, la simulació en CFD segueix bastant pròxima a la corba teòrica obtinguda amb el mètode analític, resultat de l'equació 2 de l'apartat "4-Mètode analític", també a aquesta zona es veu que el mètode experimental posiciona diversos punts sobre la recta del mètode analític, però la resta es troben molt dispersos, potser si hagués més precisió es podria parlar de tres corbes molt semblants.

Al tram final tant els assajos experimentals com el mètode de simulació de fluids es separen del teòric, ja que aquest últim no té en compte els fregaments, vibracions, i sobre tot l'interferència dels àleps a altes revolucions. El mètode analític com s'ha vist anteriorment, s'ha calculat per una posició fixa de l'àlep, en aquesta posició no hi ha res entre el recorregut del doll i l'àlep, en canvi a la realitat com els àleps es van movent hi ha una interferència al doll, aquesta interferència augmenta a mesura que s'incrementa la velocitat angular, és a dir, a la part final de la gràfica.

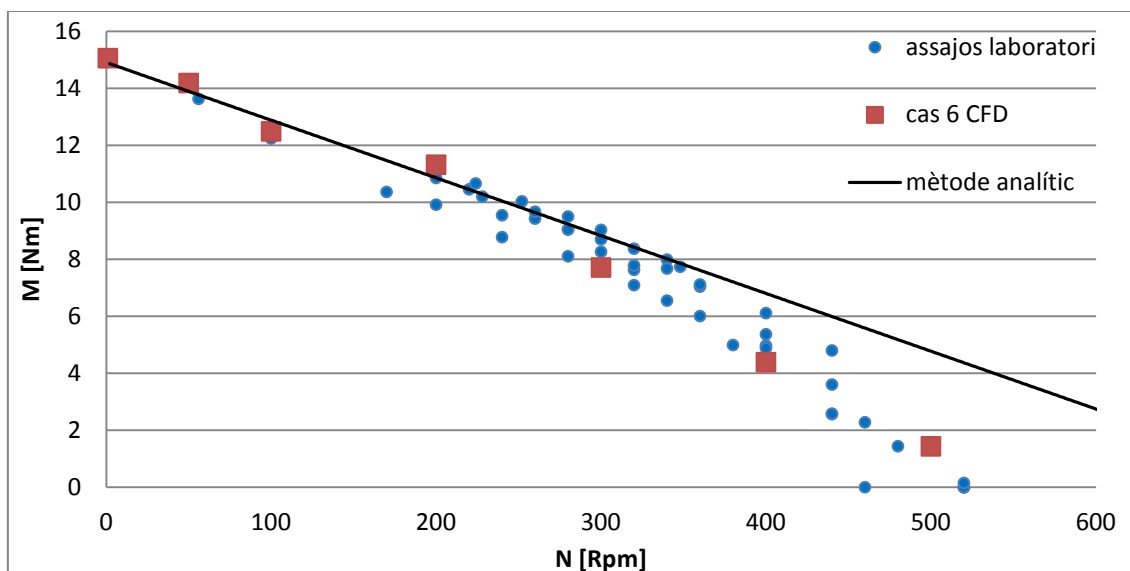


Figura 41. Comparació simulat cas 6, assajos experimentals i analític a la gràfica de parell.

A continuació es comenta la gràfica de les potències (figura 42), un altre cop es mostra que la simulació computacional del cas 6 coincideix bastant a la part inicial de la corba del mètode analític, proporcionada per l'equació 2 de l'apartat "4-Mètode analític". Al mètode experimental en canvi es nota la mancança de dades a baixes revolucions, tema que s'ha comentat al gràfic de parell i es tracta a l'apartat "6.2-Assajos experimentals", tot i això es pot veure un parell de punts pròxims a les corbes d'escrites per els altres dos casos.

A la part central si es va obtenir suficients dades experimentals però aquestes es presenten molt disperses, per exemple podem veure diferències de 50W a 300rpm, i per tant no proporcionen resultats satisfactoris de precisió per poder comparar-los correctament tant amb els resultats analítics i de CFD, tot i que es pot intuir la proximitat.

A la part final de la corba succeeix igual que al gràfic de parell, els assajos experimentals i el simulat a l'ordinador, es distancien del cas teòric, això és causat perquè en el mètode analític trobat amb l'equació 2 no es té en compte inconvenients com els fregaments, que la turbina no estigui equilibrada i produeixi vibracions, que el doll d'aigua no impacti completament al centre de l'àlep, i l'interferència al doll d'aigua que s'ha comentat al gràfic anterior.

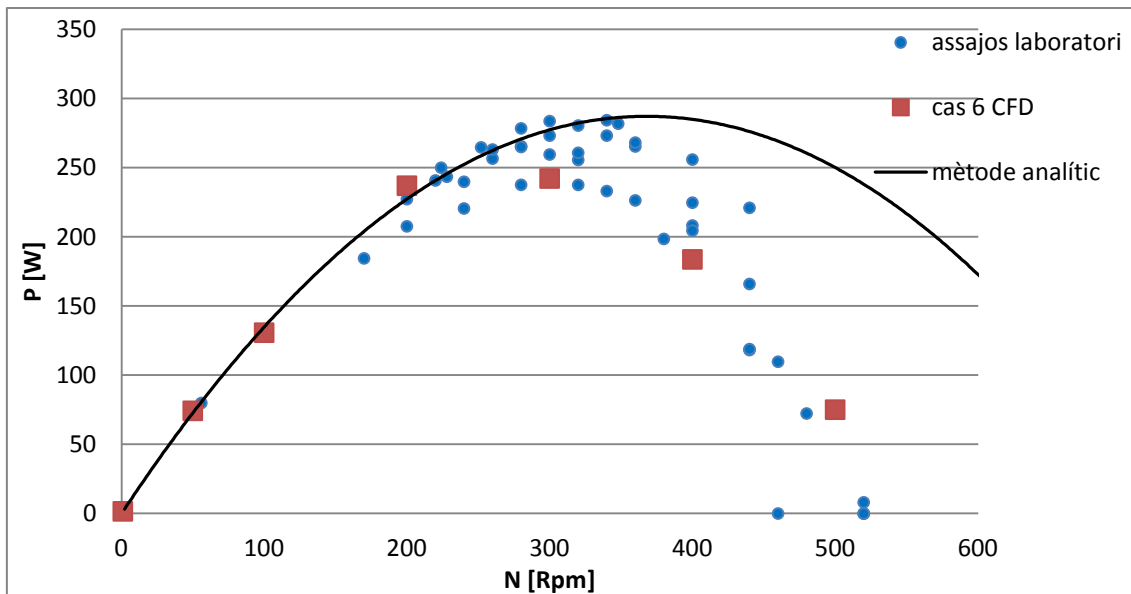


Figura 42. Comparació simulat cas 6, assajos experimentals i analític a la gràfica de potència.

Finalment per concloure les comparacions s'ha de veure la gràfica de rendiment (figura 43). Aquesta gràfica és proporcional a la gràfica de les potències, ja que tots tres casos tenen les mateixes característiques físiques de cabal, velocitat i diàmetre, i per tant el mateix valor de la potència hidràulica que és el terme per el qual s'ha de dividir la gràfica de potència, com es mostra a l'equació 18 de "l'Annex B – Càlculs".

A la gràfica es veu que al principi la simulació CFD i el mètode analític representat amb l'equació 4 de l'apartat "4-Mètode analític" coincideixen. Mentre que a la part final tant el mètode experimental com el simulat computacionalment es distancien de l'analític per els motius comentats anteriorment tant al gràfic de parell com de potència.

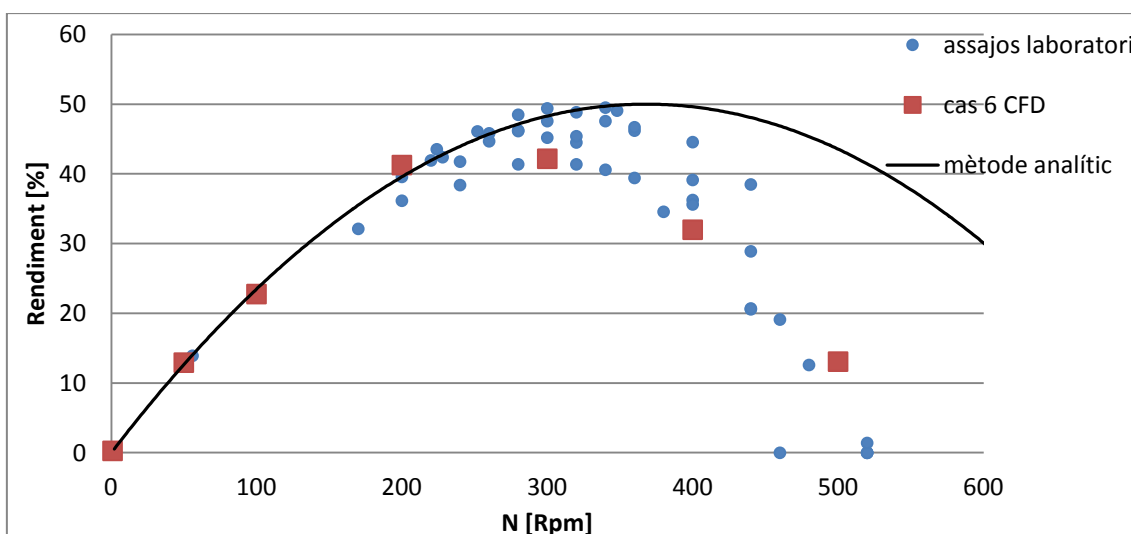


Figura 43. Comparació simulat cas 6, assajos experimentals i analític a la gràfica de rendiment.

Tot i la dispersió comentada de les dades recollides als assajos experimentals, es pot deduir que si es tingues la progressivitat adequada a baixes revolucions per obtenir dades més nombroses i la precisió suficient per evitar l'alta dispersió, les corbes dibuixades tant experimentals com simulades en CFD coincidarien bastant al llarg de totes les rpm's i les experimentals amb les analítiques serien semblants a la meitat inicial del gràfic.

9-RESUM DEL PRESSUPOST

El cost de dur a terme aquest estudi, amb tots els assajos experimentals, simulats, amortització del software utilitzat, anàlisi dels resultats i redacció ascendeix a:

Set mil cent set amb cinquanta-quatre euros (7107,54€)

10- CONCLUSIONS

S'ha dut a terme l'estudi experimental de la turbina d'eix horitzontal de 16 àleps plans de 50 mm x 50 mm amb impacte per doll d'aigua de 20 mm de diàmetre i cabal de 4,84 l/s ubicada al laboratori de Mecànica de Fluids de l'Escola Politècnica Superior de la Universitat de Girona de la que es pot extreure les següents conclusions.

La turbina del laboratori assoleix un rendiment màxim de $45\pm 5\%$ a 300 ± 5 rpm amb una potència màxima de 260 ± 20 W.

S'ha constatat una baixa repetibilitat dels assajos. Es considera que això és degut, en gran part, al sistema de fre. Aquest està sobredimensionat i no té la precisió adient com per obtenir dades a baixes revolucions per al rang de potències en què treballa la turbina del laboratori.

S'han dut a terme diferents simulacions amb el programa de dinàmica de fluids computacional (CFD) STAR-CCM+ per obtenir les corbes característiques de la turbina. La simulació és transitòria, turbulenta, bifàsica (aire-aigua líquida) i amb elements en rotació. Aquesta complexitat fa que cada punt de la corba característica requereixi un elevat temps de càlcul.

S'han estudiat els efectes d'utilitzar diferents mallats en la simulació. Malles amb un nombre d'elements similar però amb regions diferents de concentració d'elements generen resultats molt diferents. Per contra, malles amb nombres d'elements diferents però amb el mateix nivell de detall en la discretització dels àleps, mànega i doll d'aigua, produeixen resultats similars. La malla que es considera més raonable utilitza condicions de simetria per optimitzar el nombre d'elements.

En comparació amb els resultats experimentals, tot i tenir molta dispersió, la simulació prediu el mateix comportament de parell, potència i rendiment. S'ha aplicat, també, un càlcul analític que no prediu correctament el comportament de la turbina a altes rpms degut a que no incorpora cap fenomen d'interferència entre el doll d'aigua incident i els àleps que seqüencialment van situant-se en la seva zona d'influència. A més velocitat de gir és d'esperar que aquest efecte sigui més rellevant i, per tant, la seva omissió (cas analític) pot sobreestimar substancialment el rendiment de la turbina.

Les simulacions per a un mateix cabal però amb diferent diàmetre del doll (i, per tant, diferent velocitat del doll d'aigua), revelen com un augment del 10% en el diàmetre comporta una reducció del 36,3% en la potència màxima, això associat a la reducció en un 17,4% de la velocitat del doll d'aigua incident. Per tant, s'ha d'intentar que aquestes turbines treballin a una velocitat molt alta (superior a 15 m/s).

Les simulacions per a un mateix diàmetre del doll i un augment del cabal revelen com un augment del 10,4% en la velocitat del doll d'aigua incident comporta un augment en 49,1% en la potència màxima.

Finalment, s'ha comprovat amb simulacions que els rendiments màxims d'aquestes turbines d'àleps plans estan al voltant del 45-48%, molt proper al 50% teòric i semblant al rendiment que s'ha obtingut de l'assaig experimental. Qualsevol aplicació que necessiti un rendiment superior caldrà una modificació de la turbina, per exemple, canviant la tipologia dels àleps

11- RELACIÓ DE DOCUMENTS

Tot seguit trobem la llista de tots els documents que formen part d'aquest projecte:

Document 1:

- Memòria
- Annex A- Muntatge turbina.
- Annex B- Càlculs
- Annex C- Tractament dades experimentals.
- Annex D- Condicions de la simulació.
- Annex E- Tractament de dades CFD.

Document 2:

- Pressupost. (Annex al pressupost)

12- BIBLIOGRAFIA

Material docent, estudis i treballs

- Aouaj Moudni, Ismael. "Estudi paramètric del rendiment d'una turbina picohidràulica d'impulsió d'eix vertical" (TFG, GEM) Universitat de Girona, 2014.
- Guerrero Garcia, José Manuel. "Disseny d'una turbina picohidràulica d'impulsió d'eix horitzontal per a assajos de laboratori" (TFG, GEM) Universitat de Girona, 2014.
- Pujol Sagaró, Toni. "Apunts de 2n de carrera", Enginyeria Fluidomecànica.
- Pujol Sagaró, Toni. "Apunts de 3r de carrera", Sistemes i màquines fluidomecàniques .

Pàgines web

(1)Mécánica de fluidos, 15 de març 2015 (http://es.wikipedia.org/wiki/Mecánica_de_fluidos)

(2)Ecuaciones de Navier-Stokes, 20 de març 2015
(http://es.wikipedia.org/wiki/Ecuaciones_de_Navier-Stokes)

(3)Propagacions de errors, Universidad de Valencia, 8 de maig de 2015
(http://www.uv.es/zuniga/3.2_Propagacion_de_errores.pdf)

(4)Rueda hidràulica, 27 de febrer de 2015
(http://fluidos.eia.edu.co/hidraulica/articulos/maquinashidraulicas/rueda_hidraulica/rueda_hidraulica.html)

(5)Water waterwheels, 15 de gener de 2015 (<http://www.british-hydro.org/waterwheels.html>)

(6)Catàleg ESPA, fitxa tècnica, 20 de maig de 2015 (http://global.espa.com/es_es/)

(7)Catàleg UTILCELL, fitxa tècnica, 25 de maig de 2015 (<http://www.utilcell.es/>)

(8)Catàleg ITEM24, fitxa tècnica, 26 de maig de 2015 (<http://www.item24.es/>)

(9)Catàleg ARAD, fitxa tècnica, 26 de maig de 2015 (http://arad.co.il/he/water_wst.html)

(10)Catàleg RECHNER SENSORS, fitxa tècnica, 27 de maig de 2015 (<http://rechner.com.au/>)

Catàleg HBM, fitxa tècnica, 29 de maig de 2015 (<http://www.hbm.com/>)

Annex A

MUNTATGE DE LA TURBINA

Annex A- MUNTATGE DE LA TURBINA

A.1- Muntatge físic al laboratori

A continuació s'explica com muntar la turbina sobre la bancada.

1-Es comença agafant el disc lateral i es colla al cilindre d'unió amb 4 cargols DIN 912 (ISO 4762) A2 – M6X16. Es repeteix l'operació amb el disc de l'altre costat (figura 44).

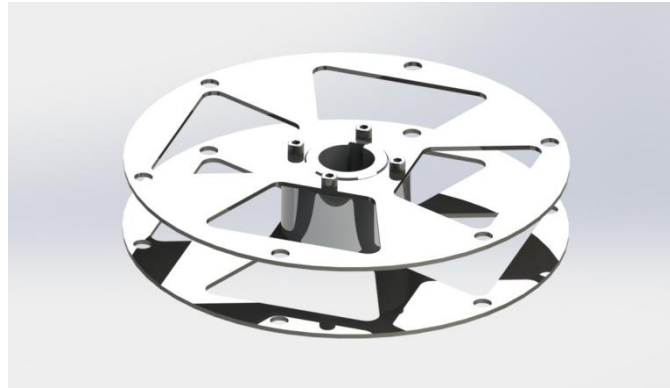


Figura 44. Discs laterals units al cilindre d'unió amb 4 cargols.

2- Una vegada es té el cos principal de la turbina ben collat s'introdueix l'eix. Primer de tot es col·loca una xaveta al xaveter de l'eix. Tot seguit s'agafa l'eix i s'introdueix amb compte, per tal que coincideixi la xaveta de l'eix amb la ranura del cilindre d'unió a l'eix. Una vegada es troba a la seva posició correcta, es fixa el moviment lateral amb dos anells de retenció DIN 471 A2 – d35x1.5 , un per cada costat del cilindre d'unió amb l'eix (figura 45).

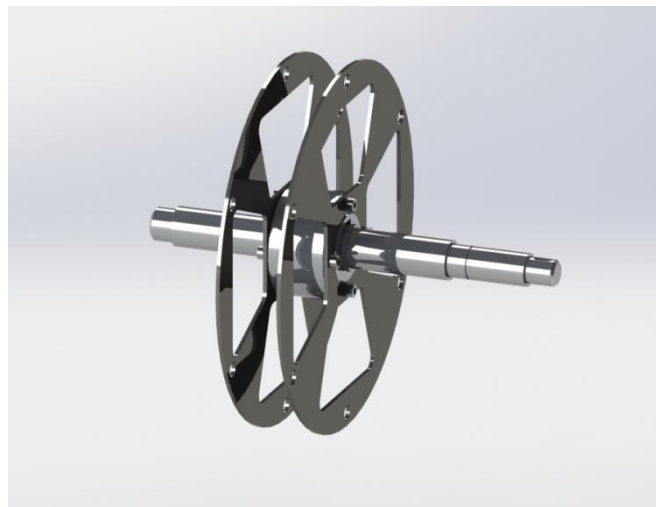


Figura 45. Fixació de l'eix amb el cilindre d'unió.

3-Ara col·locarem els dos rodaments (S6205.2RSR.W203B) cadascun en el seu suport. El rodament que està oposat al costat del fre, porta un anell de retenció (DIN 472 A2 – d52x2 que impedeix el desplaçament lateral (figura 46). El suport que està al costat del fre no porta anell de retenció i l'única funció es la de recolzament vertical.

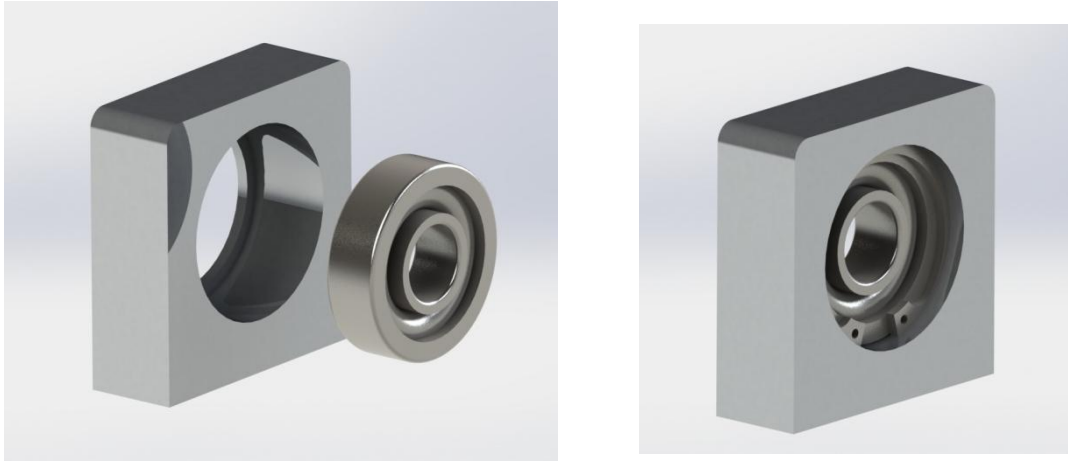


Figura 46. Suport i rodament del costat oposat al fre, es pot veure com porta l'anell de retenció.

4-Ara s'introdueixen a l'eix, per cada cantó el seu respectiu rodament amb el seu suport (figura 47).

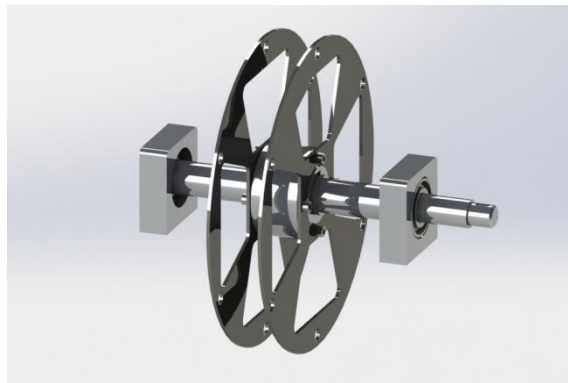


Figura 47. Eix amb rodaments i suports de rodament.

5-Ja es pot col·locar l'estructura principal de la turbina sobre la bancada. Quan estigui a la posició correcte, es fixa amb dos cargols (ISO 4017 A2 – M8x35) per sota de cada suport de rodament, així quedarà ben fixada a la bancada (figura 48).

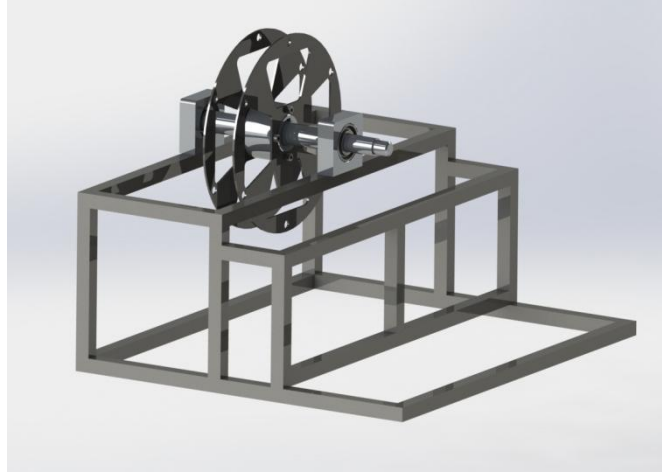


Figura 48. Estructura principal de la turbina fixada a sobre la bancada.

6-Continuem amb la instal·lació del suport de fre (figura 49). Aquest suport és l'encarregat d'aguantar el pes del fre i la cèl·lula de carrega. Va collada a la bancada amb tres cargols (ISO 4017 A2 M10x40).

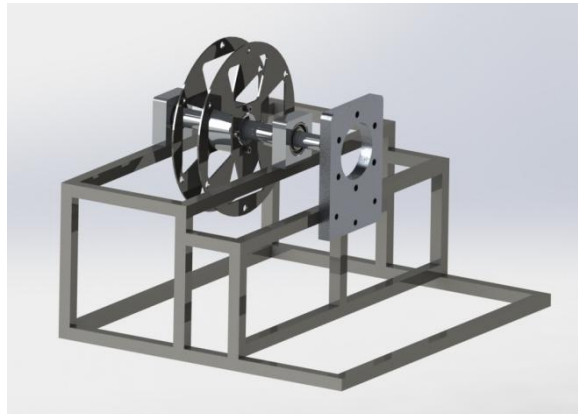


Figura 49. Suport del fre.

7-Tot seguit s'instal·la tot el conjunt del fre. Aquest anirà subjectat amb 6 cargols (ISO 4017 A2 – M8x45) (figura 50).

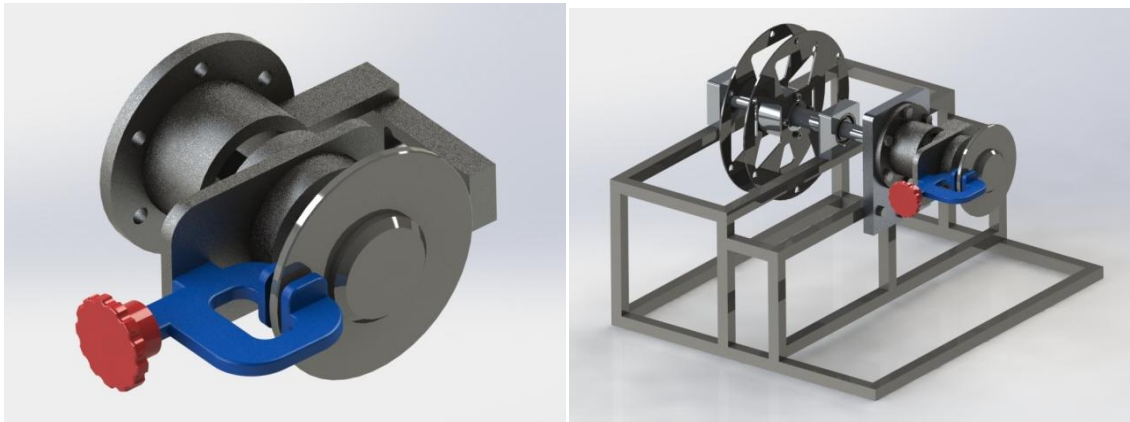


Figura 50. Conjunt del fre i la instal·lació sobre la bancada de la turbina.

8-Una vegada es té el fre instal·lat ja podem preparar les mitges llunes amb la configuració d'àleps que es desitgi (figura 51). Cada àlep porta soldat una barra roscada i aquesta va cargolada per cada cantó a les dos mitges llunes.



Figura 51. Mitja lluna amb la configuració d'àleps desitjada.

9-Per últim es collen les dues mitges llunes, cadascuna amb 3 cargol (DIN 912 (ISO 4762) A2 – M8x20) per banda, per facilitar l'acoblament de les mitges llunes es pot fixar l'eix amb l'ajuda del fre. (figura 52).

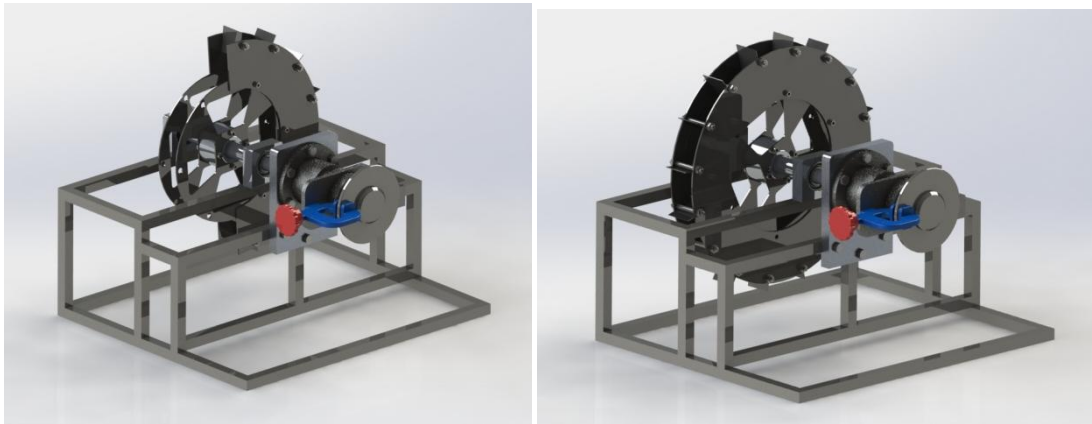


Figura 52. Instal·lació de les mitges llunes.

A.2- Constant cèl·lula de càrrega

Com s'ha comentat anteriorment a l'apartat 5.2 Preparació i ús de la turbina, la cèl·lula de càrrega que s'utilitza(figura 53) només agafa mesures de voltatge. Tot seguit explicarem com passar d'una mesura de força en "mV" a una força en "N".

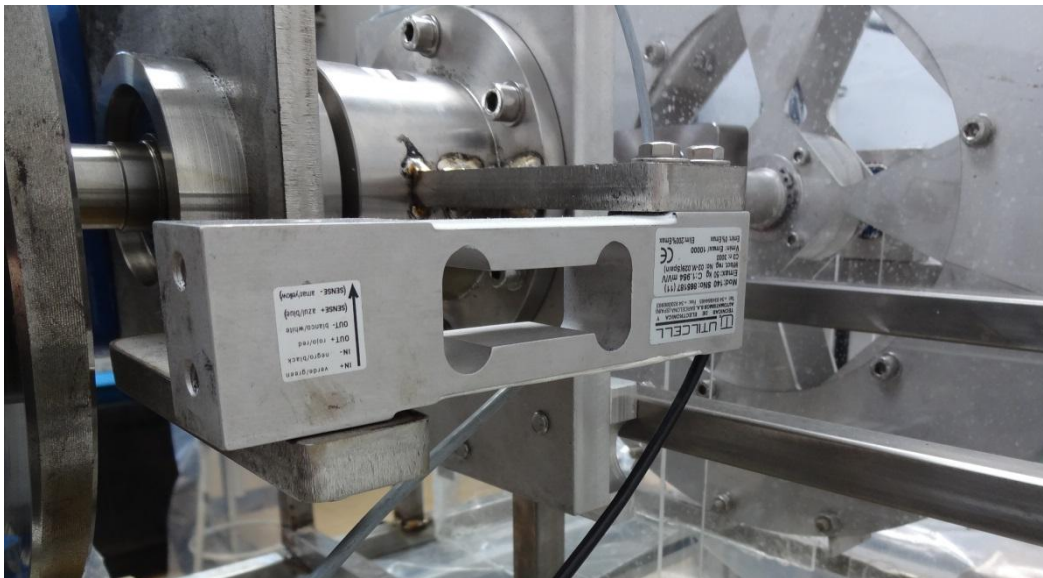


Figura 53. Cel·lula de càrrega situada al montatge.

Per aquesta finalitat es necessita l'ajuda d'un dinamòmetre amb el qual s'aplicarà una força coneguda, mitjançant pesos. Aquests es relacionaran amb la força obtinguda en "mV" de la cèl·lula.

Es comença aplicant de 0.5 en 0.5 kg fins arribar als 5 kg. A cada canvi de pes es manté uns 30 segons perquè la senyal s'estabilitzi, donant com a resultat uns quants valors per a cada pes, així es podrà obtenir la mitjana de la força en mV.

Es representen les dades extretes pel programa en un document Excel i es fa la següent gràfica (figura 54).

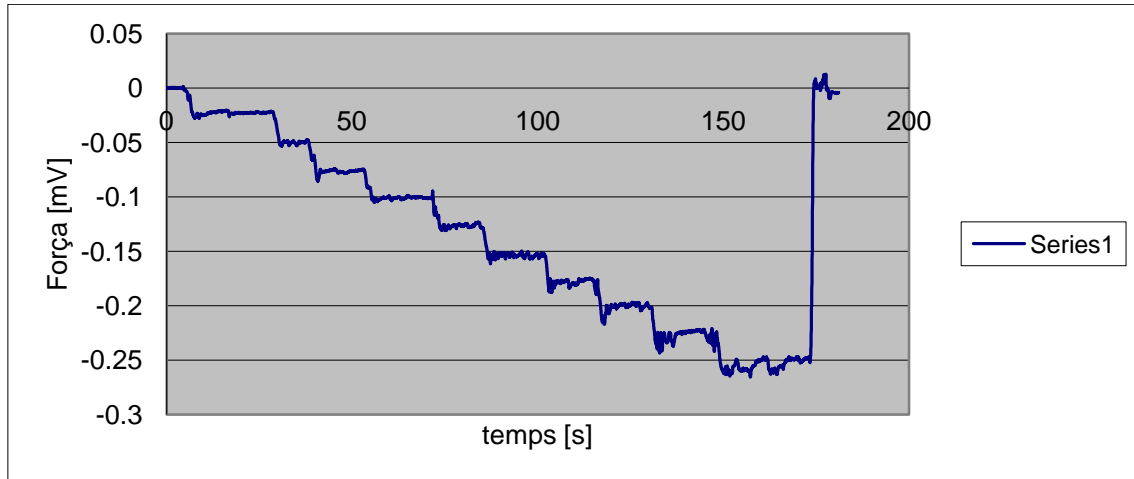


Figura 54. Gràfica on podem veure els esglaons produïts amb el dinamòmetre.

Aquí es pot veure que cada esglaó és l'aplicació de 0.5 kg aplicats amb el dinamòmetre. Els sobre pics que s'observen a principi dels esglaons són deguts al canvi de pes manual, ja que el canvi de pes es sobtat. Tot seguit es farà la mitjana de tots els valors que hi ha a cada esglaó i s'obté un valor promig per a cada pes que es mostra a la taula 12:

Taula 11. Taula amb el valor mitjà en mV per a cada pes aplicat.

Pes (kg)	Fc (mV)
0.5	-0.02268
1	-0.04992
1.5	-0.0762
2	-0.1008
2.5	-0.12636
3	-0.15372
3.5	-0.17712
4	-0.19968
4.5	-0.2238
5	-0.25776

Els valors es poden agafar positius ja que el sentit és indiferent. Només indica que la cèl·lula està posicionada al revés.

Una vegada tenim això es realitzen uns petits càlculs per veure com es relacionen.

Sabem que:

$$M = F \cdot d \quad (\text{eq. 5})$$

$$\text{Moment produït per la massa de calibració} \rightarrow M_m = F_m \cdot d_m \quad (\text{eq. 6})$$

$$\text{Moment resistent a la cèl·lula} \rightarrow M_c = F_c \cdot d_c \quad (\text{eq. 7})$$

On:

F_m = La força que s'ha aplicat en [N], creada per la massa de la calibració amb el dinamòmetre multiplicat per la gravetat.

d_m = 0,222m, és la distància a la qual hem aplicat el dinamòmetre des de l'eix.

F_c = la força resistent en [N] en resposta a la força aplicada pel dinamòmetre.

d_c = 0,148m, és la distància a la qual està posicionada la cèl·lula de càrrega des de l'eix.

Per tant es poden igualar els moments, ja que han de ser iguals degut a que el sumatori en equilibri ha de ser 0:

$$M_m = M_c \quad (\text{eq. 8})$$

$$F_m \cdot d_m = F_c \cdot d_c$$

S'ha d'aïllar el valor que no es coneix:

$$F_c[N] = \frac{F_m[N] \cdot d_m[m]}{d_c[m]} \quad (\text{eq. 9})$$

Substituint els valors de la d_m , d_c i la força creada per la massa de calibració multiplicada per la gravetat, s'obté la columna de la dreta de la taula 12. La columna de l'esquerra són les dades adquirides per la cèl·lula de càrrega mitjançant l'Spider, és a dir, la columna dreta de la taula 11 en positiu.

Taula 12. On podem veure la força en mV corresponent a la força que hi ha a la cèl·lula en N.

Fc (mV)	Fc(N)
0.02268	7.3575
0.04992	14.715
0.0762	22.0725
0.1008	29.43
0.12636	36.7875
0.15372	44.145
0.17712	51.5025
0.19968	58.86
0.2238	66.2175
0.25776	73.575

Una vegada es té la taula anterior es pot representar i queda de la forma següent (figura 55):

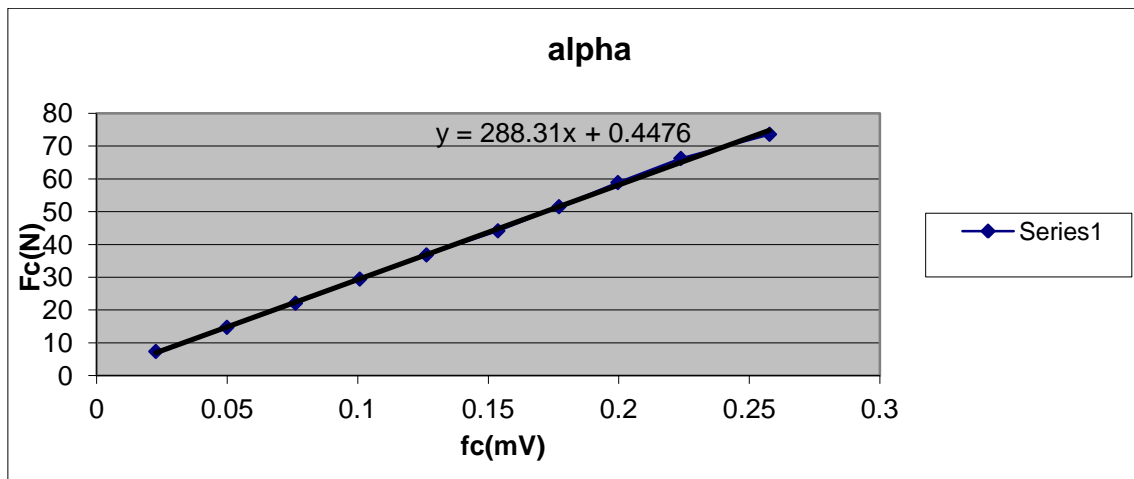


Figura 55. Taula on representem la força de la cèl·lula en mV respecte a la força a la cèl·lula en N.

El pendent de la recta de la figura 55 és la constant α que s'encarrega de relacionar un valor de l'eix de les abscisses "x" amb l'eix de les ordenades "y" així doncs ens queda lo següent:

$$Fc(N) = Fc(mV) \cdot \alpha \quad (\text{eq. 10})$$

Per tant sempre que es vulgui passar un valor de [mV] de la cèl·lula de càrrega a [N] només es té que multiplicar per 288,31 N/mV.

Tots aquest càlculs, i els corresponents gràfics s'han realitzat en un document Excel que s'adjunta en la documentació electrònica dipositada conjuntament amb el TFG.


A.3- Aparells i elements de la instal·lació

Perfil d'alumini

La turbina i la bancada dissenyada per en Guerrero (2014) es troba fixada provisionalment amb serjants sobre una bancada de perfils d'alumini, aquí es mostrarà les característiques tècniques d'aquests perfils de l'empresa ITEM (figura 56):

Perfil 8 80x80 L, natural
N.º ref. 0.0.265.80

En la cesta de la compra



Propiedades		
Serie	=	BR8
Material	=	Al, anodizado
Características	=	natural
Unidad de suministro	=	corte máx. 6000 mm
Sección transversal	A	= 19.75 cm ²
Momento de inercia, eje x	I _x	= 134.06 cm ⁴
Momento de inercia, eje y	I _y	= 134.06 cm ⁴
Momento de inercia, torsional	I _t	= 80.8 cm ⁴
Momento resistente, eje x	W _x	= 33.51 cm ³
Momento resistente, eje y	W _y	= 33.51 cm ³
Peso, espec. Longitud	m	= 5.33 kg/m

Características particulares:




Figura 56. Imatge de la fitxa tècnica que es pot trobar a la plana web de l'empresa ITEM.

Cèl·lula de càrrega

L'encarregat d'enregistrar els esforços és la cèl·lula de càrrega (figura 57), al laboratori es disposa d'una cèl·lula de la marca UTILCELL model 140.

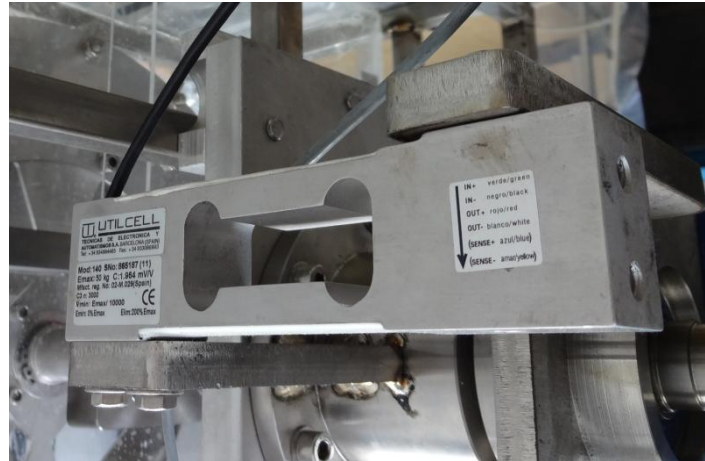


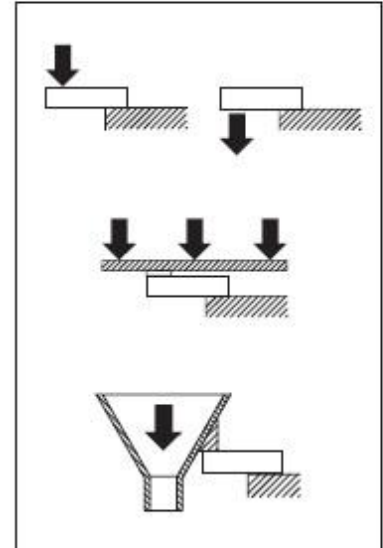
Figura 57. Cèl·lula que tenim instal·lada al laboratori.

Tot seguit s'adjunta la fitxa tècnica que s'ha trobat a la plana web de l'empresa (figura58, 59).



MODELO 140

3kg ... 100kg



- Cèlula de carga de flexión
- Soporte elástico de aluminio
- 3000 divisiones O.I.M.L. R60 clase C
- Protección IP 66 (EN 60529)
- Gran precisión con cargas descentradas
- Aplicaciones:
 - Plataformas monocélula hasta 400 x 400 mm
 - Ensacadoras

- Double bending beam load cell
- Measuring element from aluminium
- 3000 divisions O.I.M.L. R60 class C
- Protected IP 66 (EN 60529)
- Single point load cell. High accuracy with off-center loads
- Applications:
 - Direct platform up to 400 x 400 mm
 - Filling scales

Modelo Model	Carga nominal Nominal capacity Ln	Clase de precisión Accuracy class n. OIML	División mínima Minimum division vmin	Carga de servicio Service load 150 % Ln	Plataforma Platform A x B mm	Precisión Accuracy 1/3 Ln
140 3 kg	3 kg	3000	0.3 g	4.5 kg	400 x 400	3000 v
140 5 kg	5 kg	3000	0.5 g	7.5 kg	400 x 400	3000 v
140 8 kg	8 kg	3000	0.8 g	12 kg	400 x 400	3000 v
140 10 kg	10 kg	3000	1 g	15 kg	400 x 400	3000 v
140 15 kg	15 kg	3000	1.5 g	22.5 kg	400 x 400	3000 v
140 20 kg	20 kg	3000	2 g	30 kg	400 x 400	3000 v
140 30 kg	30 kg	3000	3 g	45 kg	400 x 400	3000 v
140 50 kg	50 kg	3000	5 g	75 kg	400 x 400	3000 v
140 75 kg	75 kg	3000	7.5 g	112.5 kg	400 x 400	3000 v
140 100 kg	100 kg	3000	10 g	150 kg	400 x 400	3000 v

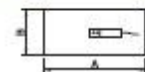
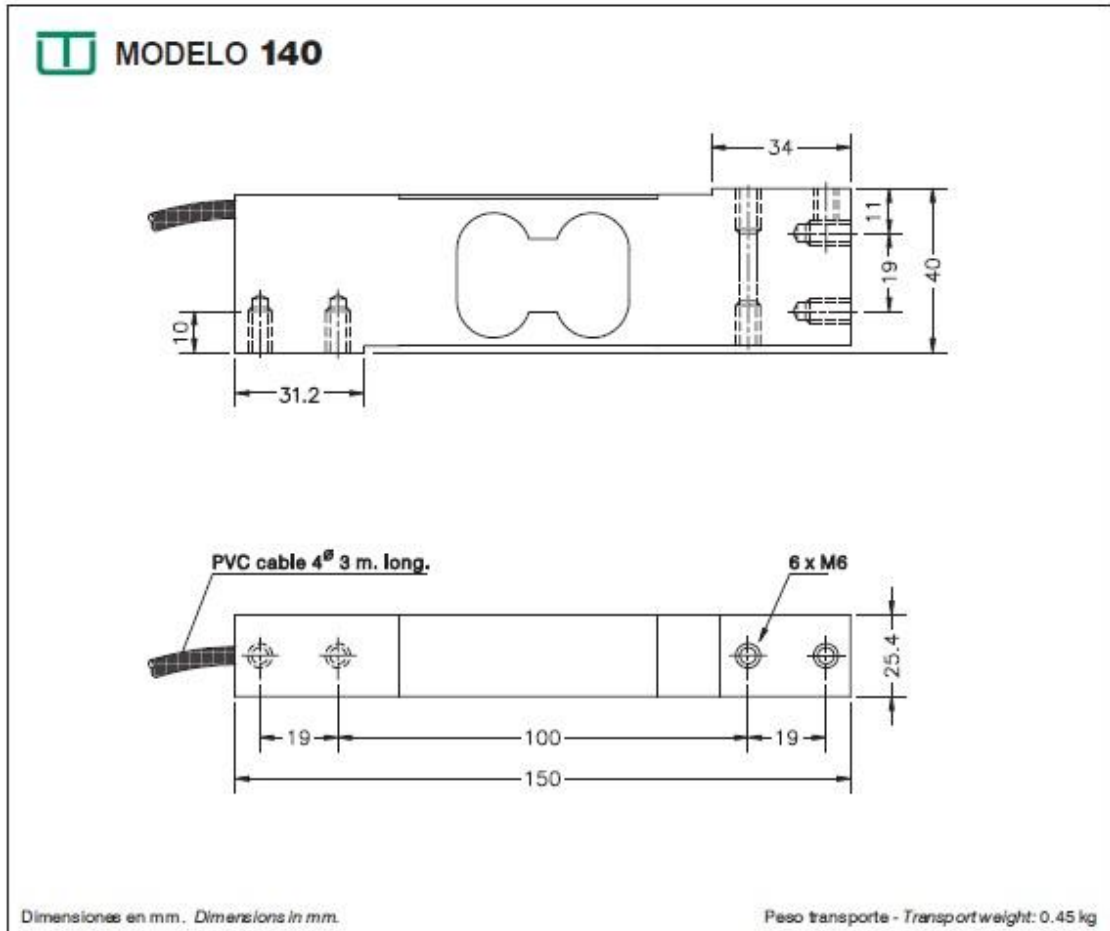


Figura 58. Fulla 1 de la fitxa tècnica de la cèl·lula de càrrega.



ESPECIFICACIONES			SPECIFICATIONS
Cargas nominales (Ln)	3-5-8-10-15-20 30-50-75-100	kg	Nominal capacities (Ln)
Clase de precisión	3000	n. OIML	Accuracy class
Carga mínima	0	%Ln	Minimum dead load
Carga de servicio	150	%Ln (1)	Service load
Cargas límite	200	%Ln (1)	Safe load limit
Error combinado	< ±0.017	%Sn (2)	Total error
Error repetibilidad	< ±0.01	%Sn	Repeatability error
Efecto de la temperatura: en el cero en la sensibilidad	< ±0.01 < ±0.006	%Sn/5°K %Sn/5°K	Temperature effect: on zero on sensitivity
Error de fluencia (30 minutos)	< ±0.016	%Sn	Creep error (30 minutes)
Compensación de temperatura	-10...+40	°C	Temperature compensation
Límites de temperatura	-20...+70	°C	Temperature limits
Sensibilidad nominal (Sn)	2 ±10%	mV/V	Nominal sensitivity (Sn)
Tensión de alimentación nominal	10	V	Nominal input voltage
Tensión de alimentación máxima	15	V	Maximum input voltage
Resistencia de entrada	400 ±20	Ω	Input impedance
Resistencia de salida	350 ±3	Ω	Output impedance
Desequilibrio inicial	< ±2	%Sn	No load output
Resistencia de aislamiento	> 5000	MΩ	Insulation resistance
Deformación máxima (a Ln)	0.3-0.5	mm	Maximum deflection (at Ln)
(1) En carga centrada sobre la célula. No para cargas exocéntricas Only central loads on the load cell. Not for off-center loads (2) Error combinado: No Linealidad e Histéresis / Total error: Non Linearity and Hysteresis			

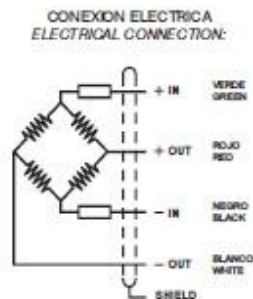


Figura 59. Fulla 2 de la fitxa tècnica de la cèl·lula de càrrega.

Sensor inductiu del comptador de voltes

Per adquirir la velocitat angular es va instal·lar un comptador de voltes i un sensor inductiu. El sensor és el RECHNER IAS-20-A22-S (figura 60). A la següent imatge es mostra instal·lat.

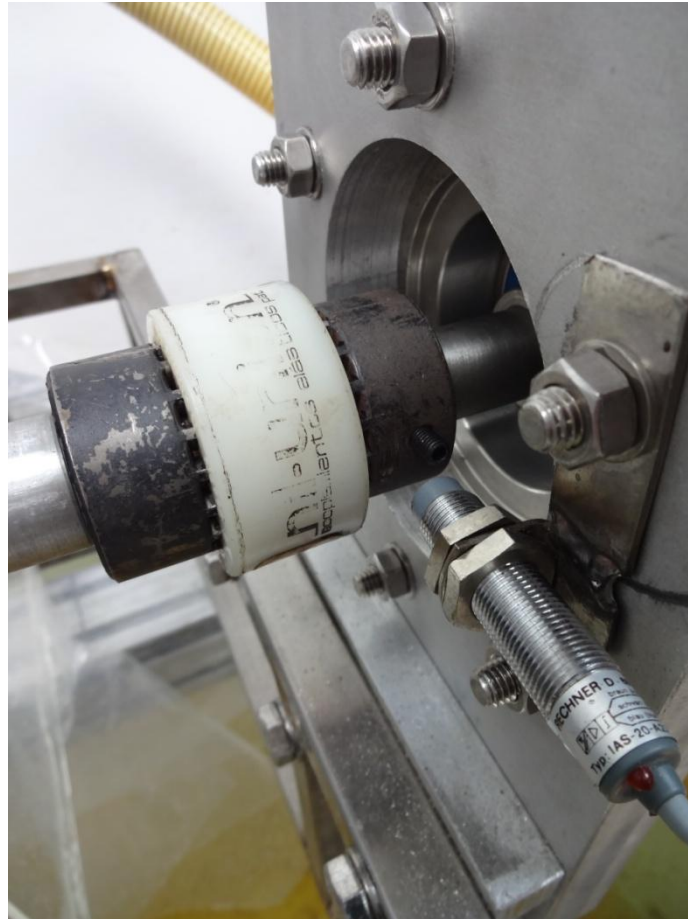


Figura 60. Sensor inductiu RECHNER IAS-20-A22-S instal·lat prop de l'eix.

A continuació s'adjunta la fitxa tècnica del sensor inductiu utilitzat (figura 61).



Inductive Sensors
Series 20 - NPN
Series 10 - PNP

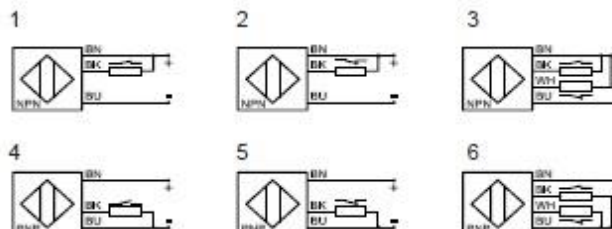
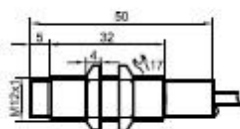
- Housing M12 x 1**
- Housing material: stainless steel VA
 - Non-flush mountable
 - Sensing distance $S_n = 4$ mm

Certificate:



Technical data

Operating distance S_n [mm], flush mounting	4, no	4, no
Electrical version	3-wire DC	3-wire DC
Output	NO	NC
Type NPN	IAS-20-A22-S	IAS-20-A22-O
Art.-No.	202 400	202 500
Connection diagram No.	1	2
Type PNP	IAS-10-A22-S	IAS-10-A22-O
Art.-No.	102 400	102 500
Connection diagram No.	4	5
Operating voltage (U_b)	10...35 V DC	10...35 V DC
Output current max. (I_o)	150 mA	150 mA
Load current min.	-	-
Voltage drop max. (U_o)	≤ 2.5 V	≤ 2.5 V
Permitted residual ripple max.	10 %	10 %
No-load current (I_o)	typ. 15 mA	typ. 15 mA
Frequency of operating cycles max.	2 kHz	2 kHz
Permitted ambient temperature	-25...+70°C	-25...+70°C
LED-display	yellow	yellow
Protective circuit	built-in	built-in
Degree of protection IEC 529	IP 67	IP 67
Connection cable	2 m 3 x 0.14 mm ²	2 m 3 x 0.14 mm ²
Housing material	VA No. 1.4305	VA No. 1.4305
Active surface	PA	PA
Lid	PA	PA



All specifications are subject to change without notice. (11/2003)

Figura 61. Fitxa tècnica del sensor inductiu RECHNER IAS-20-A22-S

Spider 8

Per recollir les dades proporcionades per la cèl·lula de càrrega d'un aparell d'adquisició de dades anomenat *Spider 8* (figura 62), a continuació s'adjunta la primera fulla del catàleg proporcionat pel fabricant i la seva fitxa tècnica on es mostren les característiques (figura 63).

Spider8

The trend in PC measurement technology

Everything you need in one housing

The Spider8 is a multi-channel PC measurement electronics for parallel, dynamic measurement data acquisition using a computer. With Spider8 everything needed for measurement is accommodated in a compact housing no bigger than a notebook. The system is fully PC-controlled, no further controls are required other than the ON/OFF switch.

The Spider8 offers a simple and economic alternative to systems based on PC plug-in modules. Contrary to such systems, the quality of measurements using Spider8 is independent of the electromagnetic conditions inside the PC which can hardly be computed in advance. Furthermore, this requires neither additional installations for connection and wiring nor high configuration effort.



Connect and measure

- 12 V supply voltage makes the system especially fit for mobile applications
- For stationary applications, power is supplied by the included universal power pack for voltages from 110 V through 240 V
- Connection to the PC through included cable on printer port or through optional USB adapter



Professional quality for your measurements

- Separate A/D converter for each channel, absolutely synchronous data acquisition without multiplexers or sample-and-hold stages
- Sampling rates of up to 9,600 values/s per channel
- Analog anti-alias pre-filters, programmable digital filters

Figura 62. Imatge on es mostra la primera fulla del catàleg.

F Specifications

Series		Spider8 / SR55	Spider8-30 / SR30	Spider8-01SR01
Accuracy class		0.1		0.2
Digital resolution in the case of full scale value		Digit	± 25000	
Measurement buffer		Meas	< 20000	
Baud rate			600, 1200, 2400, 4800, 9600 , 19200, 38400, 57600	
serial parallel ¹⁾	Nibble mode	Meas/s	> 6500	
	8Bit mode	Meas/s	> 19000	
	Byte mode (two-way)	Meas/s	> 24000	
	EPP mode	Meas/s	> 76000	
USB	see data sheet USB	-	-	
Sampling rate (21 levels) per channel		1/s	1...9600	
Digital filter			0.1	
Aperiodic		Hz	Sampling rate/8 to sampling rate/4	
Average value		Hz		
Butterworth (4th order)		Hz	0.1...1200	0.1...200
Bessel (4th order)		Hz	0.1...1200	0.1...200
Number of amplifiers			4/1	4/1
Transducers that can be connected			Strain gauge and ind. full bridge/half bridge	S/G full bridge / half bridge/ quarter bridge
			DC voltage sources	
			-	DC power sources Resistors Thermocouples
Channel 0 ²⁾ and 1 ²⁾			Pulse/frequency 2-phase transmitter	-
Transducer current feed		mA	0.25	
Transducer excitation voltage		V _{rms}	2.5	
Carrier-frequency (sine / symmetric)		Hz	4800	600
Transducer resistance		Ω	110...1100	
Compensating resistors		Ω	-	120, 350, 700
Shunt calibration signal		mV/V	-	1
Transducer cable length up to		m	50	200

¹⁾ Depends on the power and hardware of the PC.

Figura 63. Especificacions de l'Spider 8.

Bombes de la instal·lació hidràulica

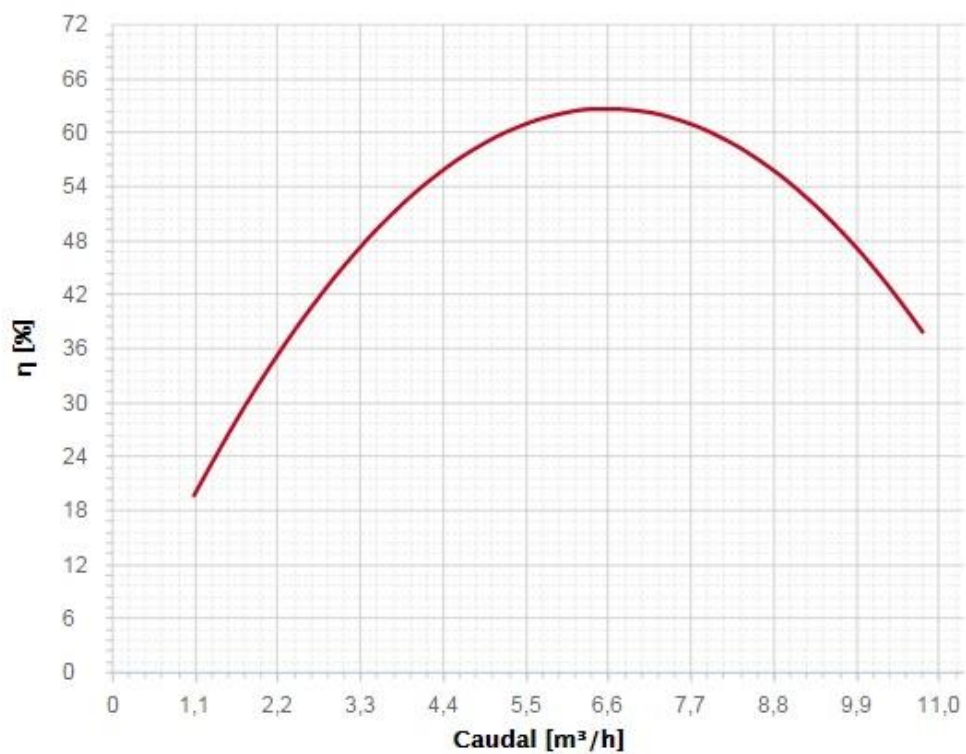
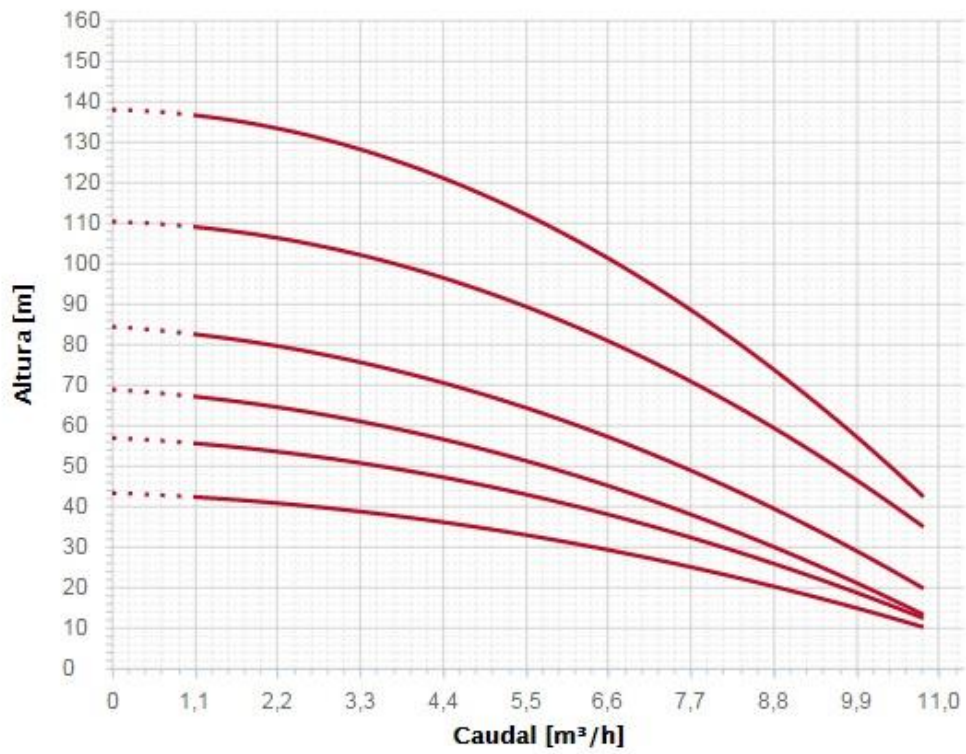
A la instal·lació hidràulica del laboratori hi ha dues bombes de l'empresa ESPA model MULTI 35N connectades en paral·lel, les quals s'encarreguen de subministrar el cabal (figura 64).



Figura 64. Bombes ESPA MULTI35N connectades en paral·lel.

A continuació s'adjunten les gràfiques de les corbes característiques del model de la bomba instal·lada (figura 65):

Curvas de funcionamiento (50Hz)



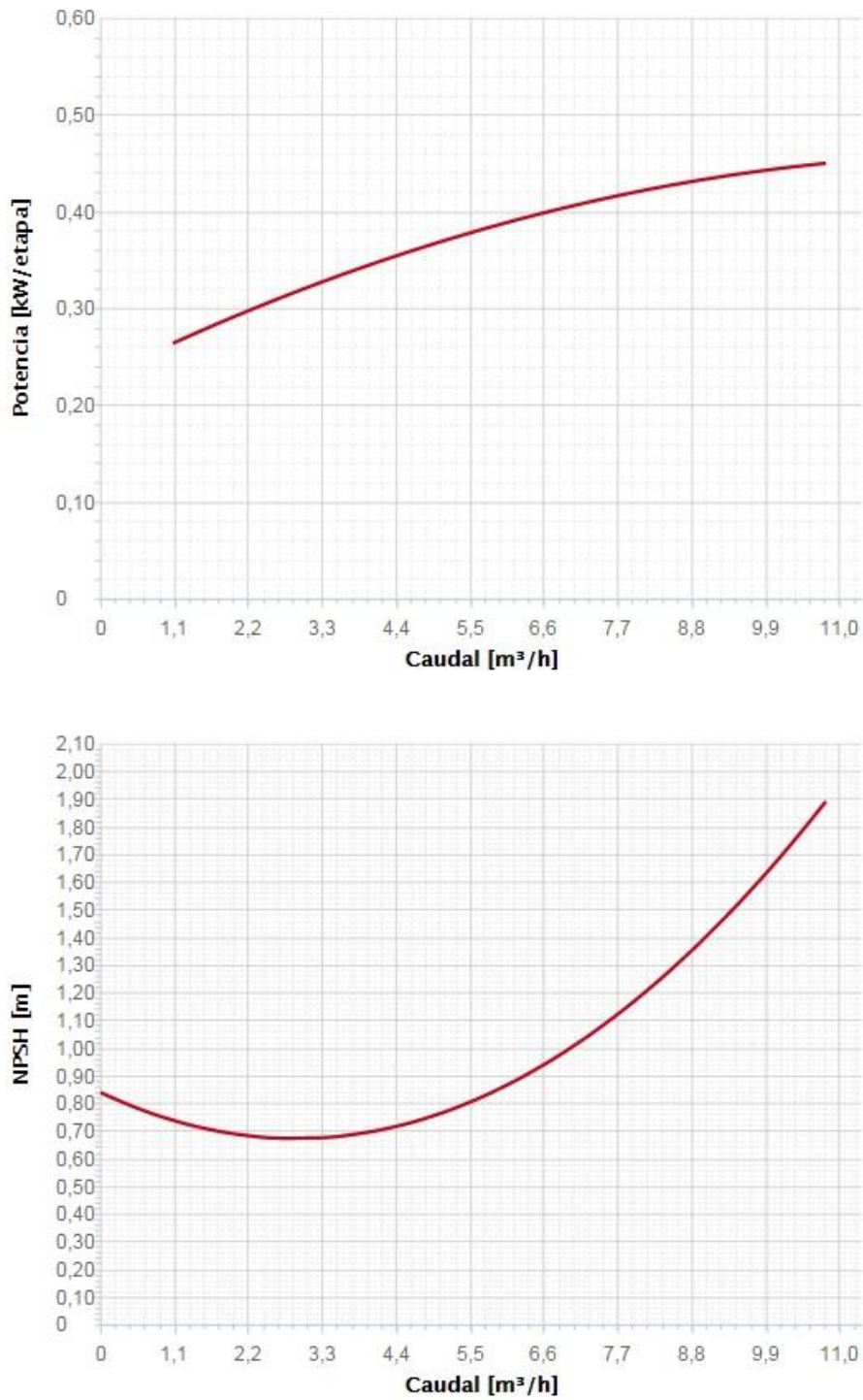


Figura 65. Corbes de: alçada(Q), $\eta(Q)$, Potència(Q) i NPSH(Q).

Comptador volumètric

El comptador volumètric que fa servir la instal·lació del laboratori de Mecànica de Fluids és de la marca ARAD model WST 50 SB (figura 66)



Figura 66. Comptador volumètric utilitzat al nostre estudi sobre la turbina.

Tot seguit s'inclou la fitxa tècnica (figura 67, 68) que s'ha extret de la plana web de l'empresa ARAD.

Woltman Silver Turbo



Modelo WSTsb (Bayoneta) - Medidor de Agua

El Woltman Silver Turbo- WST implementa métodos avanzados y altas tecnologías fueron para presentar un product de primera línea Nuevo con configuración Bayonet's.

- **Aplicaciones**
Redes de abastecimiento de agua, aplicaciones agrícolas y para uso industrial
- **Tamaños disponibles**
2" - 12" (50mm - 300mm)
- **Normas**
MID 2004/22/EC (según OIML R49
EN 14154 y ISO 4064:2005),
EEC (según ISO 4064:1993)



Características:

El Woltman Silver Turbo (WST) ofrece lo siguiente:

- **Precisión** - la curva de precisión del WST es la más amplia en el mercado: El caudal mínimo es de 35%-58% debajo del estándar de ISO para tales medidores y el caudal máximo es de 150%-233% sobre él. La combinación de estas características únicas permite el uso del WST en aplicaciones más amplias y en situaciones extremas.
- **Resistencia** - los cojinetes y los materiales usados en el WST han demostrado asegurar una durabilidad más allá del requisito del estándar de ISO. Esta característica asegura que el medidor pueda funcionar en condiciones extremas donde otros medidores no pueden mantener un suficiente nivel de precisión.
- **Acople Magnético** - El WST tiene una unidad de medición única, en la cual solamente un elemento móvil, la turbina, está en contacto con el agua. Los otros componentes móviles, incluyendo el engranaje de transmisión, se mantienen sellados dentro de un compartimiento seco y no tienen ningún contacto con ninguno de los elementos abrasivos presentes en el agua.
- **El WST tiene imanes de rechazo instalados en el impulsor y en el engranaje de transmisión.** Cojinete deslizante (SB) ofrecen mayor durosidad.
- **Compatibilidad** - El WST está también disponible con EV, EF, Dialog 2G, Dialog 3G, etc. La unidad de medida del WST puede ser instalada en cualquiera de los modelos existentes WT de Arad.

Especificaciones Técnicas

Presión Máxima de Fundonamiento	Estándar - 16 bar Sobre encomienda - 25 bar
Temperatura Máxima	60°C
Cuerpo	Hierro fundido, revestido con poliéster
Conexiones	Bridas que cumplen con ISO, BS 10, ANSI 150 u otros
Registro	IP68



Dial tipo WSTsb

Figura 67. Fulla 1 de la fitxa tècnica del comptador volumètric ARAD model WST 50 SB.

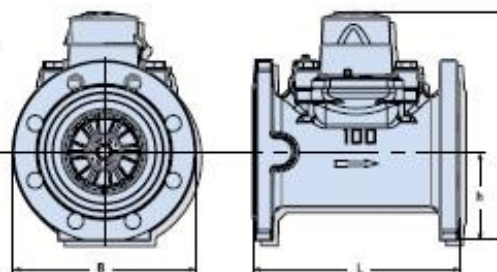
Woltman Silver Turbo



Modelo WSTsb (Bayoneta) - Medidor de Agua

Dimensiones

Model		WST sb							
Tamaño nominal	(mm)	50	65	80	100	150	200	250	300
	(pg)	2	2 1/2	3	4	6	8	10	12
L - Longitud sin acoples (mm)		200	200	230	250	300	350	450	500
B - Anchura (mm)		165	185	200	220	285	340	405	489
H - Altura (mm)		239	254	259	275	344	377	463	505
h - Altura (mm)		70	85	90	106	140	172	203	245
Peso (kg)		12.5	15	15.5	19	35.5	41	80	95



Datos de rendimiento:

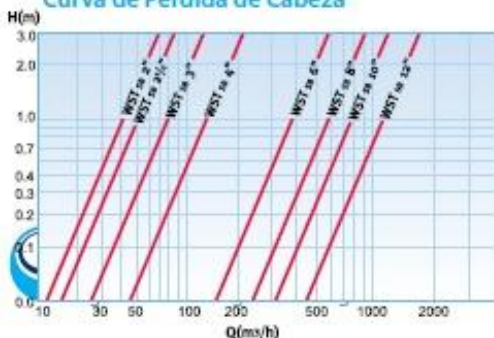
Características metroológicas según EEC (según ISO 4064:1993)

Modelo WST	Qmax Caudal Máximo (m³/h)	Qn ISO 4064 (m³/h)	Qn Caudal Nominal (m³/h)	Qt Caudal de Transición (m³/h)	Qmin Caudal Mínimo (m³/h)	Caudal Inicial (m³/h)	Capacidad Máxima del Registro (m³)	Cantidad mínima leída (liter)	Precisión entre Qmax & Qt	Precisión entre Qt & Qmin
50	100	15	50	0.7	0.3	0.15	10 ⁶	1	±2%	±5%
65	120	25	80	0.8	0.35	0.15	10 ⁶	1		
80	170	40	120	0.8	0.5	0.25	10 ⁶	1		
100	300	60	230	1.8	0.8	0.3	10 ⁷ /10 ⁶	1/10		
150	410	150	260	3.5	2.5	0.8	10 ⁷ /10 ⁶	1/10		
200	730	250	450	15	5	2	10 ⁸	100		
250	1400	400	750	15	6	3	10 ⁸	100		
300	2000	600	1000	40	10	4	10 ⁸	100		

Características metroológicas según MID 2004/22/EC (según OIML R49 EN 14154 y ISO 4064:2005)

Model WSTsb	Q4 Ratio de flujo máximo (m³/h)	Q3 Ratio de flujo nominal (m³/h)	Q2 Ratio de flujo transicional (m³/h)	Q1 Ratio de flujo mínimo (m³/h)	Ratio de flujo inicial (m³/h)	Capacidad de Registro máxima (m³)	Valor R	Unidad legible más pequeña (litro)	Precisión entre Q4 y Q2	Precisión entre Q2 y Q1
50	78.75	63	1.01	0.63	0.15	10 ⁶	100	0.5	±2%	±5%
65	78.75	63	1.01	0.63	0.15	10 ⁶	100	0.5		
80	125	100	1.6	1	0.25	10 ⁶	100	0.5		
100	200	160	2.56	1.6	0.3	10 ⁷ /10 ⁶	100	5		
150	312.5	250	4	2.5	0.8	10 ⁷ /10 ⁶	100	5		
200	787.5	630	20.16	12.6	2	10 ⁸	50	50		
250	1250	1000	32	20	3	10 ⁸	50	50		
300	1250	1000	32	20	4	10 ⁸	50	50		

Curva de Pérdida de Cabeza



Requisitos de Instalación

- El medidor de agua se puede instalar en cualquier posición. Para posiciones no horizontales, el flujo será hacia arriba.
- El medidor debe estar lleno de agua mientras opera.
- Antes de la instalación de un medidor, la tubería debe estar completamente enjuagada.
- Una sección de tubo recto, con longitud de 5D y 2D para 2°-6° y 10D y 5D para 8°-12°, deberá instalarse aguas arriba y abajo del medidor, respectivamente.



Arad Ltd.
Dalia 19239, Israel, Tel: 972-4-9897911, Fax: 972-4-9897960, www.arad.co.il



Figura 68. Fulla 2 de la fitxa tècnica del comptador volumètric ARAD model WST 50 SB.

Fre de disc

El disseny del fre de disc d'en Jordi Matas (2014) que es mostra a la figura 69, inclou la pinça de fre (figura 70) i el disc, dels quals a continuació s'adjunten les fitxes tècniques(figura 71,72).

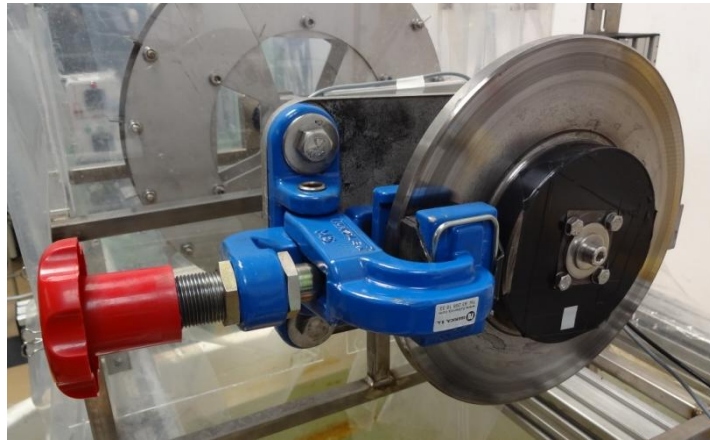


Figura 69. Disseny del fre de disc d'en Jordi Matas (2014).



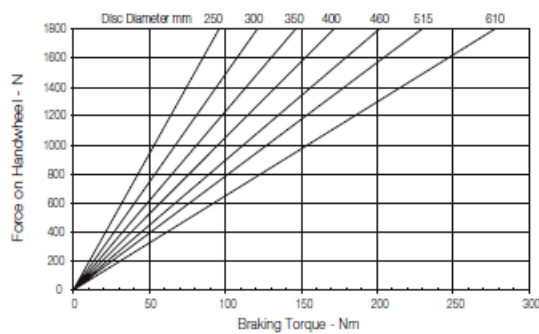
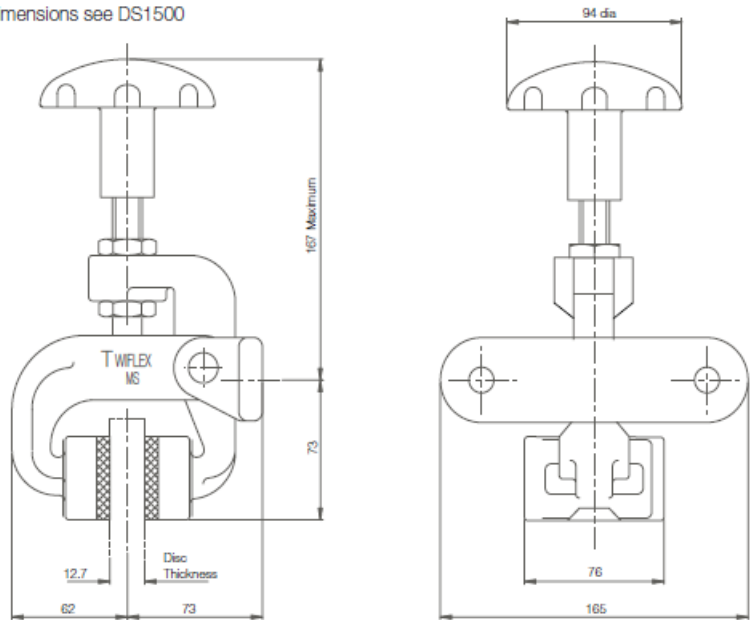
Figura 70. Pinça, component del disseny d'en Jordi Matas (2014) i detall de la molla interna.



DS1506

MSH Disc Brake Caliper - Mechanically Applied, Hand Operated

Nominal Dimensions given
For caliper dimensions see DS1500



Weight (caliper and hand knob) - 2.53kg
(hand knob only) - 1.03kg

1 Turn of Hand Knob = 90N braking force
Maximum Braking Force - 1.01kN

The ratings shown on the above graph are based on fully bedded and conditioned brake pads with nominal friction coefficient $\mu=0.4$.

For bedding-in and conditioning procedures see Publication M1060.

Braking Force is defined as the Tangential Force acting on the brake disc at the Effective Disc Radius.
Braking Torque (Nm) = Braking Force (N) x Effective Disc Radius (m) where Effective Disc Radius = Actual Disc Radius - 0.03.

Twiflex Disc Brakes must be used with Twiflex asbestos free brake pads. The use of any other brake pads will invalidate the warranty. Twiflex Limited reserves the right to modify or change the design without prior notice.

Figura 71. Fitxa tècnica de la pinça de fre.

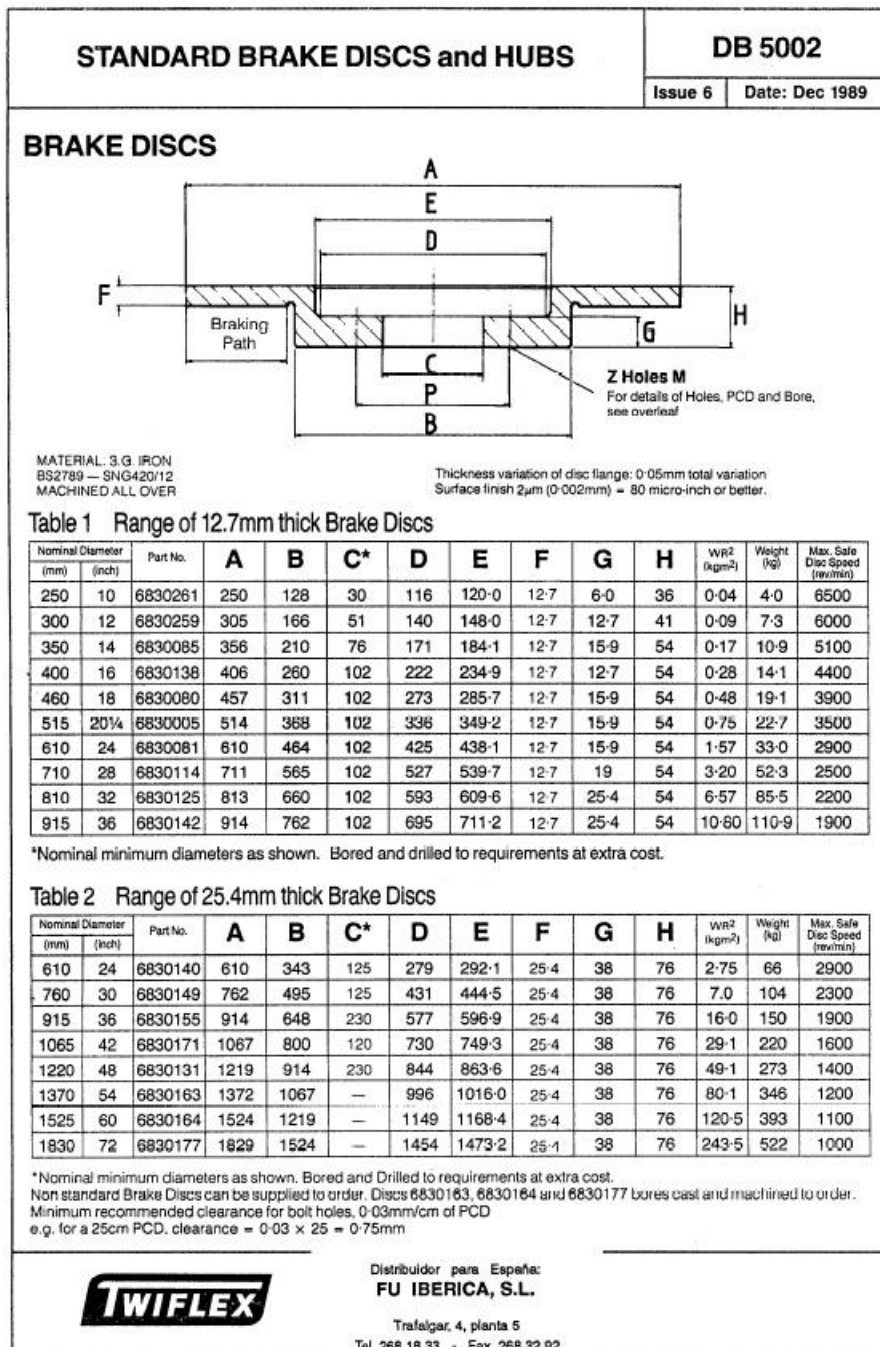


Figura 72. Fitxa tècnica del disc de fre.

Annex B

CÀLCULS

Annex B - CÀLCULS

En aquest annex s'expliquen les fórmules que s'han utilitzat per dur a terme el projecte, i tot seguit el càlcul dels errors absolut i relatiu.

Comencem amb la part de fórmules.

Primer s'ha determinat el cabal que proporcionen les bombes, per trobar-ho es va fixar un volum d'aigua i es va cronometrar a veure el temps que trigava a ser bombejat. Vam fixar un volum de 700 litres, per al qual es va dedicar 144 segons, per tant les bombes proporcionen un cabal de 4,84 l/s.

La fórmula que ens proporciona el cabal en unitats del sistema internacional [m³/s]:

$$Q = \frac{\text{Volum}[\text{litres}]}{\text{Temps}[\text{segons}]} \cdot \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ l}} \quad (\text{eq. 11})$$

Per conèixer el valor de la velocitat de sortida del doll d'aigua:

$$\text{Velocitat} = \frac{Q(\text{Cabal})}{A(\text{Area cercle})} = \frac{Q}{\pi \cdot r^2} \quad (\text{eq. 12})$$

Per calcular la velocitat angular s'utilitza un comptador de voltes amb un sensor col·locat a l'eix de la turbina, i ens ajudem d'un cronòmetre digital manual. La fórmula que ens proporciona la velocitat angular en Rpm's:

$$\omega[\text{rpm}] = \frac{\text{voltes finals} - \text{voltes inicials}}{\text{segons}} \cdot \frac{60 \text{ segons}}{1 \text{ min}} \quad (\text{eq. 13})$$

Aquest valor també s'ha d'expressar en unitats del sistema internacional (rad/s):

$$\omega \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right] = \frac{\text{voltes}}{\text{min}} \cdot \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ segons}} \cdot \frac{360^\circ}{1 \text{ volta}} \cdot \frac{2\pi \text{ rad}}{360^\circ} \quad (\text{eq. 14})$$

Seguidament s'explica la fórmula de la potència hidràulica, que és la potència màxima que pot proporcionar el doll d'aigua.

$$P_{hidràulica} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot Q \cdot v^2 \quad (\text{eq. 15})$$

On:

Q: cabal en [m³/s]

V= velocitat de sortida del doll d'aigua 15,405 m/s

ρ : densitat de l'aigua 1000 kg/m³

Ara es mostren les fórmules per calcular el parell (M), potència (P) i rendiment (η), la força s'extreu directament de la cèl·lula de càrrega en mV i es multiplica per la constant de la cèl·lula de càrrega que s'ha demostrat a "l'Annex A - Muntatge turbina".

Per tant la fórmula del parell és:

$$M = F \cdot d \quad (\text{eq. 16})$$

On:

F → Força obtinguda de la cèl·lula de càrrega en [N]

d → distància des de l'eix fins la cèl·lula de càrrega, 0,148 metres.

La fórmula de la potència s'extreu d'agafar la fórmula del parell (equació 16) i multiplicar-la per la velocitat angular en [rad/s]:

$$P = M \cdot \omega \quad (\text{eq. 17})$$

Per obtenir la fórmula del rendiment s'ha de fer una divisió entre la potència obtinguda amb l'equació 17 i la potència que proporciona el doll d'aigua, és a dir, la potència hidràulica (equació 15).

$$\eta = \frac{P}{P_{hidràulica}} \cdot 100 = \frac{P}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v s^2 \cdot Q} \quad (\text{eq. 18})$$

On:

$\rho \rightarrow$ és la densitat de l'aigua, 1000kg/m^3

$v_s \rightarrow$ la velocitat de sortida del doll d'aigua

$Q \rightarrow$ cabal

Ara es demostren les equacions que s'han utilitzat per a l'obtenció de les fórmules analítiques mostrades a l'apartat "4-Mètode analític". Amb les quals s'arriba a crear les corbes de parell, potència i rendiment amb una suposada instal·lació perfecta.

Primer de tot s'identifica el volum de control. El doll d'aigua quan impacta amb l'àlep es divideix en dos dolls amb la meitat de cabal cadascun (figura 53).

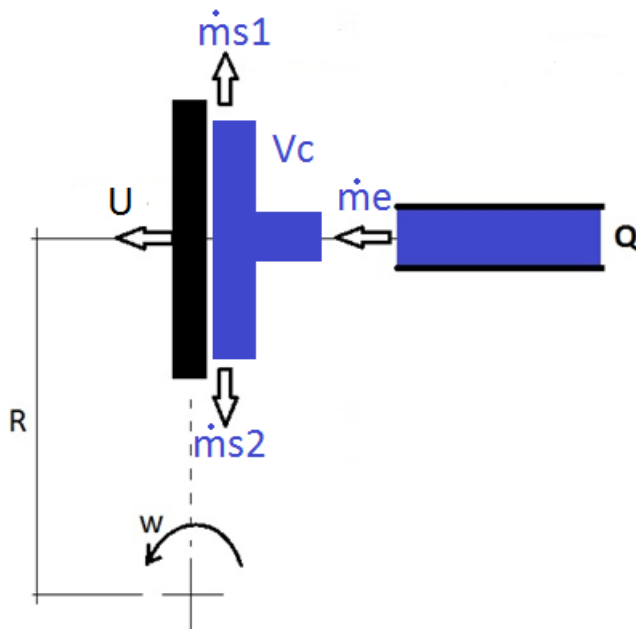


Figura 73. Volum de control.

Tot seguit s'apliquen les equacions de la conservació de massa:

$$\dot{m}_e = \dot{m}_s \rightarrow \dot{m}_e = \dot{m}_{s1} + \dot{m}_{s2} \quad (\text{eq. 19})$$

On la fórmula del cabal màssic és:

$$\dot{m} = Q \cdot \rho \quad (\text{eq. 20})$$

Es calcula cadascun per separat:

$$\dot{m}_e = \rho \cdot Q = 4,84 \times 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 4,84 \text{ Kg/s} \quad (\text{eq. 21})$$

$$\dot{m}_{s1} = \dot{m}_{s2} = \frac{\dot{m}_e}{2} = 2,42 \text{ Kg/s} \quad (\text{eq. 22})$$

Ara s'aplica conservació de la quantitat de moviment:

$$\sum \vec{F} = \dot{m}_s \cdot \vec{v}_s - \dot{m}_e \cdot \vec{v}_e \quad (\text{eq. 23})$$

Veient la imatge anterior (figura 73) es pot observar que les forces verticals es contraresten i per tant són igual a 0, en canvi la força horitzontal és equivalent a multiplicar el cabal màssic (equació 23) per la velocitat d'impacte.

$$\text{eix horitzontal} \rightarrow F = 0 - (-Q \cdot \rho) \cdot v_i$$

Abans de calcular la força s'ha de calcular la velocitat d'impacte ja que no coincideix amb la velocitat de sortida del doll d'aigua degut a que l'àlep es troba en moviment.

Al croquis següent (figura 74) es pot veure que la velocitat d'impacte correspon a la velocitat de sortida del doll menys la velocitat a la que es mou l'àlep, així doncs la velocitat d'impacte és:

$$V_{\text{impacte}} = (v - \omega \cdot R) \quad (\text{eq. 24})$$

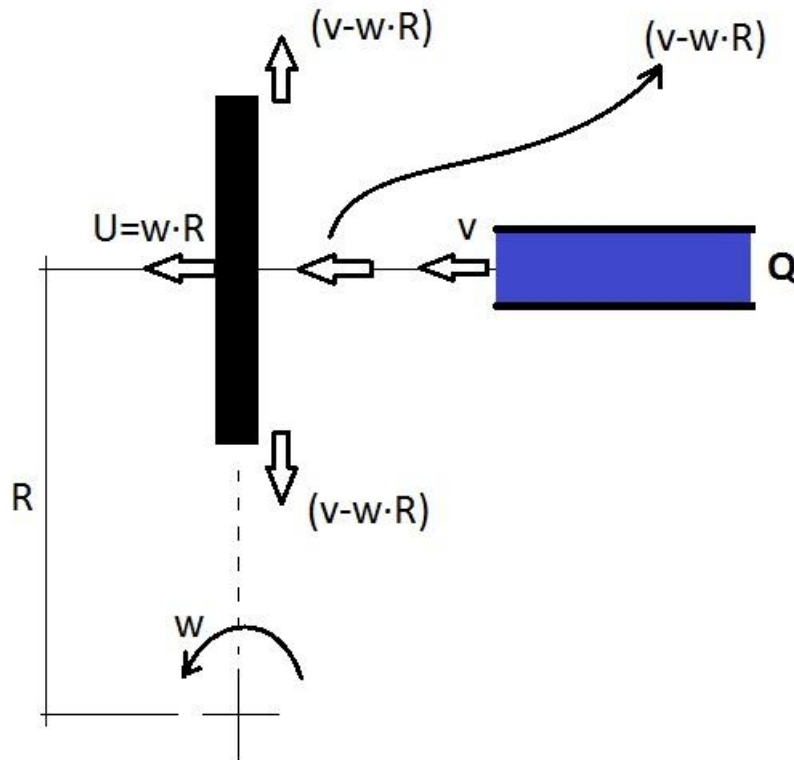


Figura 74. Croquis amb les velocitats.

Ara ja es possible calcular la força a partir del sumatori de conservació de quantitat de moviment substituint el valor de la velocitat d'impacte, ens dona:

$$F = Q \cdot \rho \cdot (v - \omega \cdot R) \quad (\text{eq. 25})$$

Finalment si el que es vol es el parell, sabem que un moment correspon a una força per la distància al punt d'aplicació com s'ha vist a l'equació 16, per tant substituïm l'expressió de l'equació 25 i la fórmula del parell ens queda com:

$$M = F \cdot R \quad (\text{eq. 26})$$

$$M = Q \cdot \rho \cdot (v - \omega \cdot R) \cdot R \quad (\text{eq. 27})$$

On:

Q: cabal en $[m^3/s]$

ρ : densitat de l'aigua $1000 \text{ kg}/m^3$

V = velocitat de sortida del doll d'aigua 15,405 m/s

ω =velocitat angular en [rad/s]

R =radi , distancia des de l'eix fins al punt d'incidència del doll d'aigua a l'àlep 0,2m.

Si es vol trobar el parell màxim analíticament es sap que aquest es troba a l'instant inicial quan la turbina no gira, per tant només tenim que substituir $\omega=0$ a l'equació 27 i es trobarà que correspon a:

$$M = Q \cdot \rho \cdot v \cdot R = 4,84 \times 10^{-3} \cdot 1000 \cdot 15,405 \cdot 0,2 = 14,91 \text{ Nm} \quad (\text{eq. 28})$$

Ara el que es vol es treure la fórmula de la potència, hem de multiplicar l'expressió de l'equació 27, del parell per la velocitat angular en [rad/s].

$$P = M \cdot \omega \quad (\text{eq. 29})$$

$$P = Q \cdot \rho \cdot (v - \omega \cdot R) \cdot R \cdot \omega \quad (\text{eq. 30})$$

D'igual manera que al parell, si es busca quina potència màxima i a quines revolucions ho es troba, en aquest cas s'ha d'agafar l'expressió de la potència (equació 30) i derivar-la, una vegada es tingui derivada, s'igual a 0.

$$\frac{\partial P}{\partial \omega} = \frac{\partial}{\partial \omega} Q \cdot \rho \cdot (v - \omega \cdot R) \cdot R \cdot \omega = Q \cdot \rho \cdot R \cdot \left(\frac{\partial}{\partial \omega} \omega \cdot (v - \omega \cdot R) \right) = \quad (\text{eq. 31})$$

$$\begin{aligned} &= \rho \cdot Q \cdot R \cdot (v - R \cdot \omega) + \rho \cdot Q \cdot R \cdot \omega \cdot R = \\ &= R \cdot Q \cdot \rho \cdot (v - R \cdot \omega - R \cdot \omega) = R \cdot Q \cdot \rho \cdot (v - 2 \cdot R \cdot \omega) \end{aligned}$$

Ara s'igual a 0 i obtenim l'expressió de la velocitat angular a la màxima potència.

$$R \cdot Q \cdot \rho \cdot (v - 2 \cdot R \cdot \omega) = 0 \rightarrow v - 2 \cdot R \cdot \omega = 0 \rightarrow v = 2 \cdot R \cdot \omega \rightarrow \omega = \frac{v}{2 \cdot R} \quad (\text{eq. 32})$$

Per tant es substitueixen els valors, i la màxima potència es troba a:

$$\omega = \frac{v}{2 \cdot R} = \frac{15,405}{2 \cdot 0,2} = 38,51 \frac{\text{rad}}{\text{s}} = 367,76 \text{ rpm}$$

Si es substitueix aquests valor, en [rad/s] a l'equació 30 i s'obté el valor màxim de la potència en [W]:

$$P = Q \cdot \rho \cdot (v - \omega \cdot R) \cdot R \cdot \omega = 4,84 \times 10^{-3} \cdot 1000 \cdot (15,405 - 38,51 \cdot 0,2) \cdot 0,2 \cdot 38,51$$

$$P = 287,72 \text{ W}$$

I finalment queda la fórmula del rendiment que s'obté dividint l'expressió anterior de la potència (equació 30) entre l'expressió de la potència hidràulica del doll d'aigua (equació 15).

$$\eta = \frac{P}{P_h} = \frac{Q \cdot \rho \cdot (v - \omega \cdot R) \cdot R \cdot \omega}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot Q \cdot v^2} = \frac{(v - \omega \cdot R) \cdot R \cdot \omega \cdot 2}{v^2} \quad (\text{eq. 33})$$

Si es substitueix la velocitat de l'impacte, el radi i la velocitat angular on s'ha trobat la potència màxima, que justament coincideix amb el valor del rendiment màxim, finalment ens queda un rendiment de:

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{Q \cdot \rho \cdot (v - \omega \cdot R) \cdot R \cdot \omega}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot Q \cdot v^2} = \frac{(v - \omega \cdot R) \cdot R \cdot \omega \cdot 2}{v^2} \\ &= \frac{(15,405 - 38,51 \cdot 0,2) \cdot 0,2 \cdot 38,51 \cdot 2}{15,405^2} = 0,5 \end{aligned}$$

Les gràfiques de les equacions de parell, potència i rendiment no s'inclouen en aquest annex per que ja s'han mostrat a l'apartat "4-Mètode analític".

Tots aquests càlculs, i els corresponents gràfics s'han realitzat en un document Excel que s'adjunta en la documentació electrònica dipositada conjuntament amb el TFG.

Ara es segueix amb les fórmules dels errors experimentals

A la part experimental per realitzar les mesures s'han utilitzat aparells i cada un d'aquests té un error que es mostra a la taula 13:

Taula 13. Errors dels aparells de mesura emprats.

Aparell de mesura	Error [unitats]
Dinamòmetre ΔF_{din}	± 1 [N]
Comptavoltes ΔV	± 1 [voltes]
Cronòmetre Δt	$\pm 0,01$ [segons]
Cèl·lula de càrrega ΔF_c	Pràcticament nul
Comptador volumètric ΔQ	$\pm 1 \times 10^{-4}$ [m ³ /s] ($\pm 2\%$ trobat a la fitxa tècnica)
Metre Δmet	$\pm 1 \times 10^{-3}$ [m]
Peu de rei Δd	$\pm 5 \times 10^{-5}$ [m]

Les fórmules que s'utilitzaran per calcular els errors provenen de la teoria de propagació dels errors on diu que:

Propagació d'errors en les operacions elementals:

$$\Delta a = \left| \frac{\partial f}{\partial b} \right| \cdot \Delta b + \left| \frac{\partial f}{\partial c} \right| \cdot \Delta c \quad (\text{eq. 34})$$

Multiplicació $a = b \times c \rightarrow \Delta a = b \times \Delta c + c \times \Delta b$

Divisió: $a = b / c \rightarrow$

$$\Delta a = \frac{\Delta b}{c} + b \cdot \frac{\Delta c}{c^2} \quad (\text{eq. 35})$$

Per tant en la formula del parell queda de la següent manera:

$$M = F \cdot d$$

$$\Delta M = F \cdot \Delta d + d \cdot \Delta F \quad (\text{eq. 36})$$

I l'error relatiu del moment:

$$\varepsilon = \frac{\Delta M}{M} \cdot 100 \quad (\text{eq. 37})$$

Ara es calcularà l'error que es fa al calcular la potència de la mateixa manera:

$$P = M \cdot \omega$$

$$\Delta P = M \cdot \Delta\omega + \omega \cdot \Delta M \quad (\text{eq. 38})$$

On la velocitat angular correspon:

$$\omega = \frac{V[\text{voltes}] \cdot 2 \cdot \pi}{t}$$

I l'error de la velocitat angular:

$$\Delta\omega = \frac{\Delta V \cdot 2 \cdot \pi}{t} + \frac{\Delta t}{t^2} \cdot V \cdot 2 \cdot \pi \quad (\text{eq. 39})$$

I d'igual manera l'error relatiu de la potència:

$$\varepsilon = \frac{\Delta P}{P} \cdot 100 \quad (\text{eq. 40})$$

Per calcular l'error absolut que produeix el rendiment es torna a consultar la teoria de la propagació dels errors per a la divisió:

$$\Delta\eta = \frac{\Delta P}{P_h} + \frac{P}{P_h^2} \cdot \Delta P_h \quad (\text{eq. 41})$$

Per facilitar càlculs ho fem per separat primer es calcula l'error absolut de la Potència hidràulica (P_h):

$$P_h = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot Q \cdot v^2 \quad (\text{eq. 42})$$

S'aplica la teoria de la propagació d'errors a l'equació 42:

$$\Delta P_h = \left| \frac{\partial P_h}{\partial Q} \right| \cdot \Delta Q + \left| \frac{\partial P_h}{\partial v} \right| \cdot \Delta v \quad (\text{eq. 43})$$

$$\left| \frac{\partial P_h}{\partial Q} \right| = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2$$

$$\left| \frac{\partial P_h}{\partial v} \right| = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot Q \cdot 2 \cdot v$$

Es substitueixen els valors a l'equació 43 i queda de la següent manera:

$$\Delta P_h = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot \Delta Q + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot Q \cdot 2 \cdot v \cdot \Delta v \quad (\text{eq. 44})$$

Es necessita determinar Δv :

$$v = \frac{Q}{A} \quad (\text{eq. 45})$$

Aplicant la teoria de la propagació d'errors, l'expressió anterior queda:

$$\Delta v = \frac{\Delta Q}{A} + \frac{\Delta A}{A^2} \cdot Q \quad (\text{eq. 46})$$

Ara s'ha de determinar ΔA :

$$A = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad (\text{eq. 47})$$

Es torna a aplicar la teoria de la propagació dels errors:

$$\Delta A = \left| \frac{\partial A}{\partial D} \right| \cdot \Delta D = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot D \cdot \Delta D \quad (\text{eq. 48})$$

Si tot això es substitueix a l'equació 43 de l'error de la potència hidràulica:

$$\Delta P_h = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot \Delta Q + \rho \cdot Q \cdot v \cdot \left(\frac{\Delta Q}{A} + \frac{0,5 \cdot \pi \cdot D \cdot \Delta D}{A^2} \cdot Q \right) \quad (\text{eq. 49})$$

Finalment per trobar el valor de l'error absolut del rendiment es substitueix a l'equació 41 el valor de ΔP_h de l'equació 49.

$$\Delta\eta = \frac{\Delta P}{P_h} + \frac{P}{P_h^2} \cdot \Delta P_h$$

Si volem l'error relatiu s'ha de fer el següent:

$$\varepsilon = \frac{\Delta\eta}{\eta} \cdot 100 \quad (\text{eq. 50})$$

Tots aquests càlculs, i els corresponents gràfics s'han realitzat en un document Excel que s'adjunta en la documentació electrònica dipositada conjuntament amb el TFG.

Annex C

TRACTAMENT DADES EXPERIMENTALS

Annex C- TRACTAMENT DADES EXPERIMENTALS

Sempre que es fa un assaig és recomanable anar agafant les dades en [mV] que es mostren a la pantalla per tenir-les com a referència amb les seves respectives velocitats de gir, per tal de que quan arribi el moment de fer el tractament de dades, es pugui estar segur dels valors de velocitat angular que pertanyen als valors en [mV], ja que es tindrà que relacionar manualment.

A continuació s'explica el tractament de dades experimentals amb l'exemple de l'assaig fet amb una pastilla "referència dades Excel: 1p 21-4-15", que ha sigut el que ha quedat amb els esglaons més marcats. S'ha realitzat començant amb la turbina frenada i alliberant-la progressivament.

Una vegada s'acabi l'assaig i es guardin les dades en un document Excel s'obté la taula següent (taula 14):

Taula 14. Extracte de la taula exportada a Excel del CatmanEasy.

File comment:	
Time 1 - default sample rate	Spider8_1 CH 0
s	mV/V
356.00	-0.23364
356.20	-0.23088
356.40	-0.22752
356.60	-0.22488
356.80	-0.22356
357.00	-0.22308
357.20	-0.22248
357.40	-0.222
357.60	-0.22176
357.80	-0.22152

El que pot veure és una taula on es mostra temps i mV. D'aquí es vol extreure les gràfiques de moments, potència i rendiment.

A continuació, es representa aquesta quantitat de dades per veure com ens ha sortit l'assaig (figura 75).

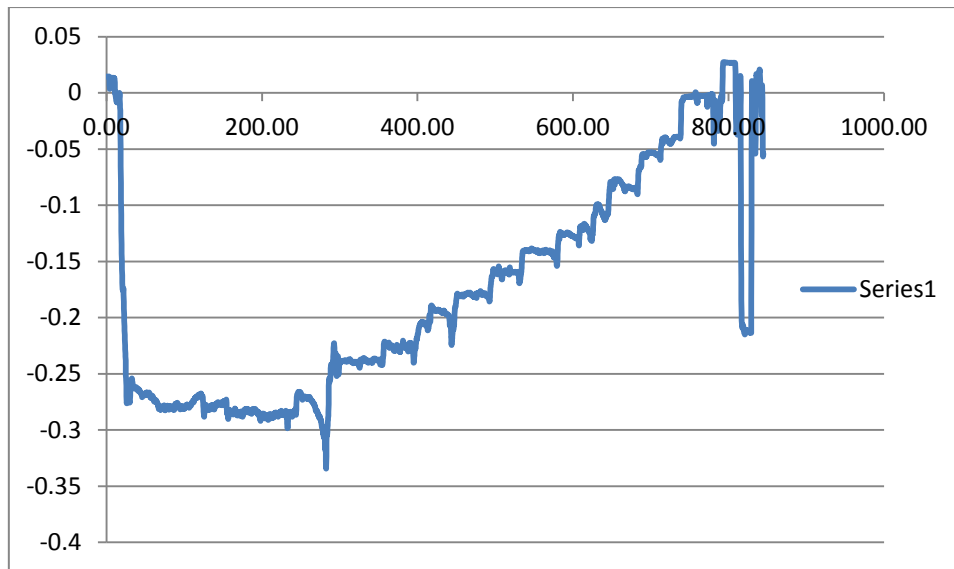


Figura 75. Representació de les dades recollides a l'assaig experimental.

Es pot veure que el començament del gràfic no ha sortit correcte, això es degut al problema de la progressivitat que mostra el fre de disc a baixes revolucions. Per aquest tema de tenir valors que no serveixen, és per el qual s'aconsella recopilar dades manuals orientatives que relacionin la força en [mV] amb la velocitat angular mentre fem l'assaig.

Nosaltres només aprofitarem la part que es veu esglaonada (figura 76).

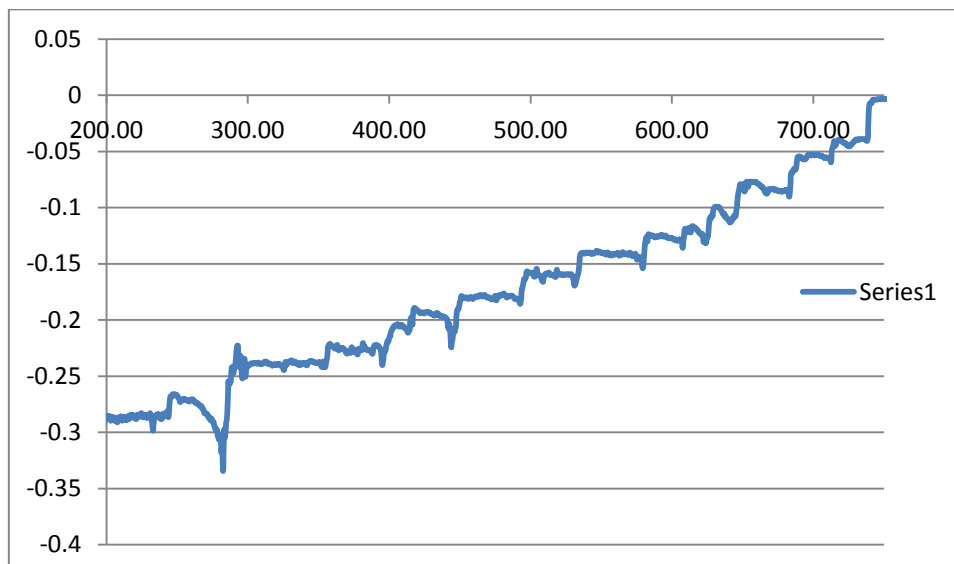


Figura 76. Part del gràfic que aprofitarem.

Una vegada es té la gràfica, es tractaran les dades recollides manualment, és a dir, les rpm's i la força en mV que hem anat apuntant orientativament durant l'assaig (taula 15). Aquestes dades s'agafen apuntant les revolucions inicials del comptador, posant en marxa el cronòmetre, i mentre va passant el temps que s'ha acordat anteriorment 15s, 30 s, etc. s'anoten el valor en [mV] que es mostra a la pantalla de l'ordinador, quan passa el temps decidit es para el cronòmetre i torna a apuntar les revolucions finals. Així doncs queda una taula orientativa, com la següent (taula 15).

Taula 15. Dades orientatives recollides durant l'assaig per poder relacionar els valors de mV amb les rpm's.

DADES						
T.Crono. [s]	Voltes i	Voltes f	voltes	voltes/15s	F(mV)	Mitjana
30	220	270	50	25	0.284	200.4→226.8
30	501	615	114	57	0.24	298.0→320.6
30	670	800	130	65	0.227	363.6→384.0
30	860	1010	150	75	0.2	416.8→436.4
30	1110	1280	170	85	0.18	450.6→474.2
30	1330	1500	170	85	0.16	
30	1580	1760	180	90	0.14	534.8→566.8
15	1860	1960	100	100	0.12	581.8→600.6
15	2180	2290	110	110	0.11	
15	2350	2460	110	110	0.08	663.8→677.6
15	2550	2665	115	115	0.05	694.0→704.0
15	2970	3100	130	130	0	741.4→752.6

Una vegada es té la gràfica i la taula orientativa es pot veure que algunes dades de la velocitat angular no són correctes, degut als errors dels aparells i el factor humà. Per tant s'han de descartar.

Per aquest tema de descartar alguns valors de les velocitats angulars, va bé apuntar les dades durant l'assaig per saber a quins esglaons de la gràfica corresponen i no tenir-los en consideració.

La columna de "Mitjana" que surt a la taula 15 són els valors del gràfic entre els quals es fa la mitjana de la força mesurada en mV per la cèl·lula de càrrega, tot seguit l'exemple del primer cas (figura 77). Es veu que el valor orientatiu de la força en mV que s'havia assignat manualment durant l'assaig ajuda a associar aquest esglaó amb la seva corresponent velocitat angular.

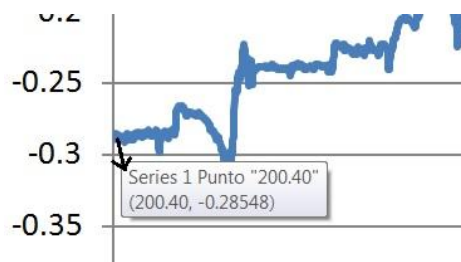


Figura 77. Exemple de com agafar els valor entre els quals farem la mitjana de la força en mV.

Una vegada es fa la mitjana amb l'Excel dels valors que es troben entre els apuntats a la columna "Mitjana" i es passa la velocitat angular a rpm s'obté la taula següent (taula 16).

El càlcul per passar la velocitat angular a rpm és molt simple, ja que en aquest cas les mesures s'han agafat cada 15 segons i cada 30, per tant per fer-ho més simple, es passa les mesures de 30s a 15s dividint les voltes entre 2. D'aquesta manera es té una columna completament en voltes/15 segons. Ara només queda multiplicar aquesta columna per 4 i d'aquesta manera es visualitzarà la velocitat angular en rpm's.

A la taula 16 es pot veure que ha sigut ordenada al revés, només amb la finalitat que les gràfiques comencin per 0 rpm.

Taula 16. Velocitat angular voltes/15 i passat a Rpm's, F(mV) una vegada s'ha fet la mitjana.

Voltes/15s	RPM	mV
130	520	0.00
115	460	-0.05
110	440	-0.08
100	400	-0.13
90	360	-0.14
85	340	-0.18
75	300	-0.19
65	260	-0.23
57	228	-0.24
25	100	-0.29

Quan ja es té la columna de la força en mV, es veu que els valors són negatius, això només indica que la cèl·lula de càrrega està col·locada al revés, però no té cap importància, per facilitar el càlcul es passa els resultats a valor absolut, columna F(mV(+)) de la taula 17. Ja no s'inclou la columna de "voltes /15s" per estalviar espai.

Aquests valors absoluts en mV es poden passar a [N] amb la constant de la cèl·lula de càrrega que va ser demostrada a "l'Annex A - Muntatge turbina". El valor corresponen a la constant és de $\alpha=288,31$. Una vegada multiplicat el valor s'obté la columna F(N) de la taula 17.

Taula 17. Taula actualitzada amb els valors absoluts en mV i la força en N

RPM	mV	F(mV(+))	F(N)
520	0.00	0.00	1.00
460	-0.05	0.05	15.40
440	-0.08	0.08	24.34
400	-0.13	0.13	36.26
360	-0.14	0.14	40.58
340	-0.18	0.18	51.86
300	-0.19	0.19	55.84
260	-0.23	0.23	65.32
228	-0.24	0.24	68.92
100	-0.29	0.29	82.69

Si la columna de la força es multiplica per la d_c (distància entre l'eix i cèl·lula de càrrega) la qual va ser trobada a "l'Annex A – Muntatge turbina" s'obté la columna dels moments $M(Nm)$ (taula 18).

Taula 18. Actualització de la taula on trobem els moments $M(Nm)$.

RPM	mV	F(mW(+))	F(N)	M(Nm)
520	0.00	0.00	1.00	0.15
460	-0.05	0.05	15.40	2.28
440	-0.08	0.08	24.34	3.60
400	-0.13	0.13	36.26	5.37
360	-0.14	0.14	40.58	6.01
340	-0.18	0.18	51.86	7.68
300	-0.19	0.19	55.84	8.26
260	-0.23	0.23	65.32	9.67
228	-0.24	0.24	68.92	10.20
100	-0.29	0.29	82.69	12.24

Una vegada s'ha trobat la columna dels moments obtenir la columna de la potència es molt simple, només s'ha de multiplicar la columna dels moments $M(Nm)$ per la velocitat angular en $[rad/s]$, per tant es fa un canvi d'unitats de la columna de les Rpm's i després es multiplicarà per la columna dels moments. Així s'obté la taula següent (taula 19):

Taula 19. Taula amb la nova columna de la potència $P(W)$ per a la qual es necessita la columna dels rad/s .

rad/s	RPM	mV	F(mW(+))	F(N)	M(Nm)	P(W)
54.45	520	0.00	0.00	1.00	0.15	8.09
48.17	460	-0.05	0.05	15.40	2.28	109.76
46.08	440	-0.08	0.08	24.34	3.60	165.98
41.89	400	-0.13	0.13	36.26	5.37	224.78
37.70	360	-0.14	0.14	40.58	6.01	226.43
35.60	340	-0.18	0.18	51.86	7.68	273.28
31.42	300	-0.19	0.19	55.84	8.26	259.63
27.23	260	-0.23	0.23	65.32	9.67	263.21
23.88	228	-0.24	0.24	68.92	10.20	243.53
10.47	100	-0.29	0.29	82.69	12.24	128.15

Ara es calcula l'última columna de la taula, la columna del rendiment. Per obtenir-ho s'ha de dividir la columna de la potència entre el valor, constant, de la potència hidràulica i multiplicar-ho per 100, així s'expressa en percentatge (taula 20). El valor de la potència hidràulica va ser calculat amb l'equació 15 i donava un valor de 574,37 W per a tots els assajos experimentals, ja que el cabal i el diàmetre és constant a tots.

Taula 20. Taula final amb l' incorporació de la columna del rendiment.

rad/s	RPM	mV	F(mW(+))	F(N)	M(Nm)	P(W)	Rendiment(%)
54.45	520	0.00	0.00	1.00	0.15	8.09	1.41
48.17	460	-0.05	0.05	15.40	2.28	109.76	19.11
46.08	440	-0.08	0.08	24.34	3.60	165.98	28.90
41.89	400	-0.13	0.13	36.26	5.37	224.78	39.13
37.70	360	-0.14	0.14	40.58	6.01	226.43	39.42
35.60	340	-0.18	0.18	51.86	7.68	273.28	47.58
31.42	300	-0.19	0.19	55.84	8.26	259.63	45.20
27.23	260	-0.23	0.23	65.32	9.67	263.21	45.83
23.88	228	-0.24	0.24	68.92	10.20	243.53	42.40
10.47	100	-0.29	0.29	82.69	12.24	128.15	22.31

Una vegada s'obté la taula anterior, per trobar els errors experimentals, tant l'absolut com el relatiu s'apliquen les formules trobades a "l'Annex B – Càlculs", que proporcionen com a resultat la taula 21:

Taula 21. Taula amb els moments, potència, rendiment i els seus respectius errors, tant absolut com relatiu.

M(Nm)	$\Delta M(\pm Nm)$	$\epsilon(M)\%$	P(W)	$\Delta P(\pm W)$	$\epsilon(P)\%$	Rendiment(%)	$\Delta \eta(\pm\%)$	$\epsilon(\eta)\%$
0.15	0.00	0.68	8.09	0.12	1.51	1.41	0.00	0.28
2.28	0.02	0.68	109.76	1.77	1.61	19.11	0.05	0.28
3.60	0.02	0.68	165.98	2.74	1.65	28.90	0.08	0.28
5.37	0.04	0.68	224.78	3.92	1.74	39.13	0.11	0.28
6.01	0.04	0.68	226.43	4.20	1.85	39.42	0.11	0.28
7.68	0.05	0.68	273.28	5.24	1.92	47.58	0.13	0.28
8.26	0.06	0.68	259.63	5.39	2.08	45.20	0.13	0.28
9.67	0.07	0.68	263.21	6.00	2.28	45.83	0.13	0.28
10.20	0.07	0.68	243.53	6.08	2.50	42.40	0.12	0.29
12.24	0.08	0.68	128.15	6.08	4.74	22.31	0.07	0.31

Per finalitzar el tractament de dades amb l'Excel, queda representar els valors de les columnes moment $M(Nm)$, potència $P(W)$ i rendiment $\eta(\%)$ en gràfiques.

Es comença per representar la gràfica del parell. Per aquesta gràfica posicionarem a l'eix X la columna de les rpm, i a l'eix Y la columna del moment $M(Nm)$ (figura 78).

Tots aquests càlculs, i els corresponents gràfics s'han realitzat en un document Excel que s'adjunta en la documentació electrònica dipositada conjuntament amb el TFG.

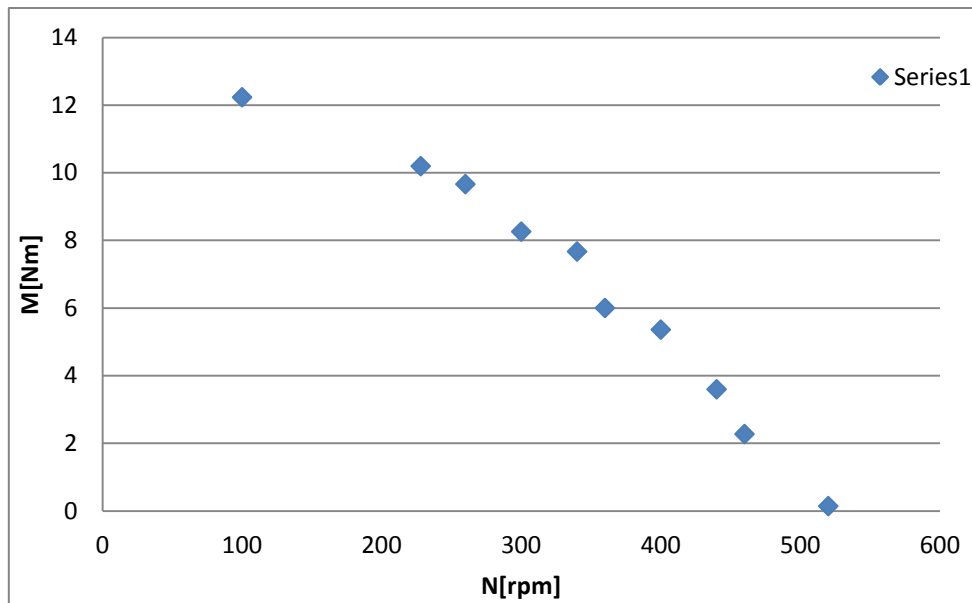


Figura 78. Gràfica on es representen els moments respecte les Rpm's.

La gràfica surt descendent ja que si la turbina gira a poques revolucions és perquè el fre està fent un parell i aquest és visualitzat en [mV] per la cèl·lula de càrrega. Es pot apreciar els problemes de progressivitat a baixes revolucions comentats anteriorment.

Tot seguit es crea la gràfica de la potència seguint el mateix procediment de la gràfica anterior però ara a l'eix Y es posa la columna de la potència P(W) (figura 79).

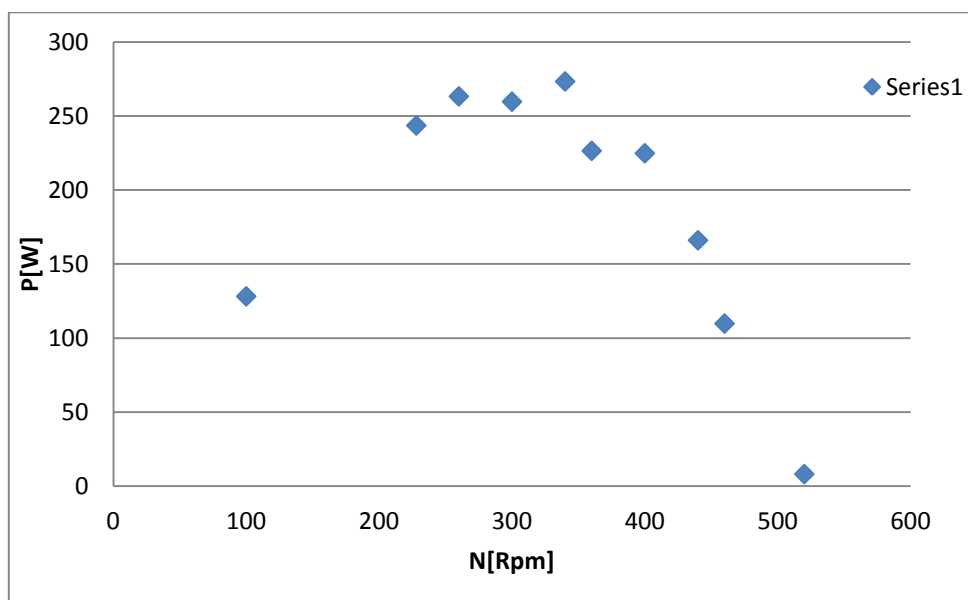


Figura 79. Gràfica on es representa la potència respecte les Rpm's.

En aquesta gràfica es veu que la potència màxima no s'obté a altes revolucions que és el que molta gent podria pensar, això és perquè la potència és resultat del producte dels moments i de la velocitat angular. Per tant si els moments són elevats però la velocitat és baixa no s'aconsegueix valors elevats, d'igual forma, si les velocitats de gir són elevades però els moments són baixos tampoc obtindrem valors màxims a la corba de potència. Per això es busca que els dos valors siguin el màxim de grans i això s'aconsegueix en els valors centrals de la corba.

Finalment es representa la corba del rendiment (figura 80), es veu que és proporcional a la gràfica anterior de la potència, perquè és un quocient entre la potència obtinguda i un valor que es manté constant a tot l'assaig, la potència hidràulica.

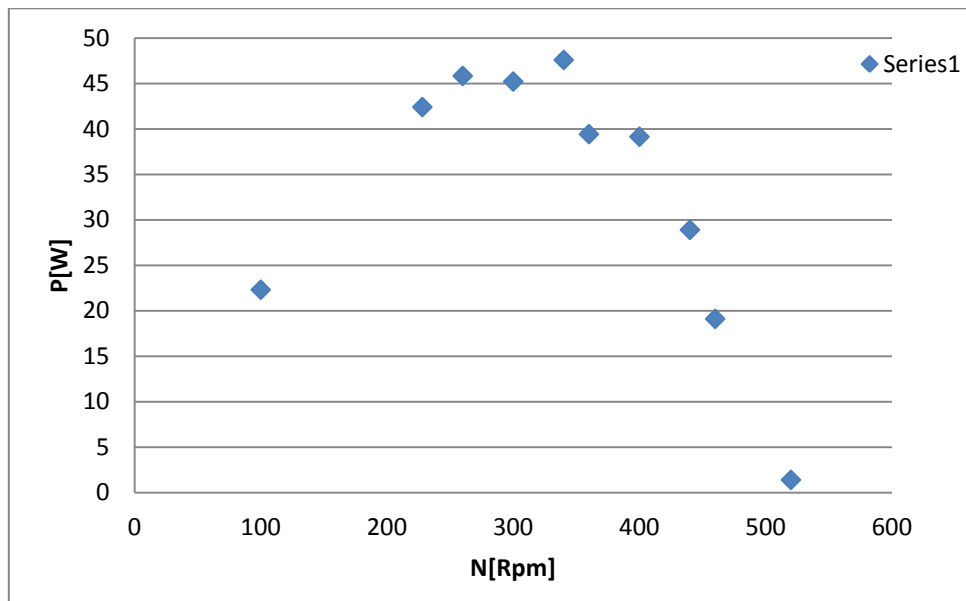


Figura 80. Gràfica on es representa el rendiment respecte les Rpm's.

Annex D

CONDICIONS DE LA SIMULACIÓ

Annex D- CONDICIONS DE LA SIMULACIÓ

Per a realitzar la simulació en CFD al laboratori de Mecànica de fluids computacional es disposa de diversos ordinadors amb les següents característiques:

Processador: 4xCPU a una freqüència de 2,33GHz

Memòria RAM: 4GB

El sistema de CFD és una simulació i l'ordinador no sap si un fluid ha de moure alguna paret contra la que xoca o per on ha d'entrar i sortir el fluid. Per això s'ha d'assignar unes condicions perquè l'ordinador les pugui interpretar.

Una vegada s'ha importat a l'*STAR-CCM+* l'arxiu ".msh" del mallat realitzat amb l'*ANSYS-Workbench* s'assignen les característiques físiques de la nostra geometria que seran les següents:

- 1-Hi haurà una barreja de fluid, bifàsic, d'aigua i aire. Inicialment tot estarà ple d'aire.
- 2-L'aire i l'aigua tindran un règim turbulent.
- 3-Es tindrà en compte la gravetat.
- 4-S'assignarà una velocitat de gir a la turbina i una velocitat de sortida del doll d'aigua.
- 5-La simulació serà transitòria, ja que varia la posició dels àleps en el temps.
- 6-S'assignarà un "time-step", que és el temps que transcorre entre iteració i iteració. Aquest concepte està explicat més endavant.

Tot seguit s'indiquen quines condicions de contorn s'han assignat a les cares més importants de la nostra turbina simulada.

Per exemple a la sortida del doll d'aigua (figura 81) s'ha assignat un "velocity inlet" per indicar que per aquesta cara entra fluid. El programa permet assignar una velocitat de sortida.

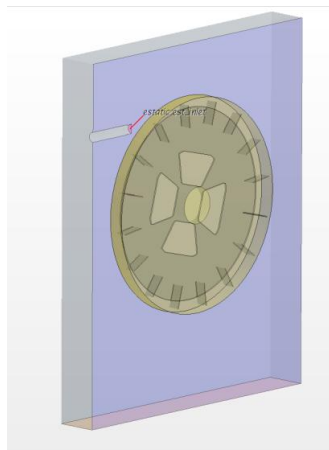


Figura 81. Assignació de l'entrada d'aigua a la turbina.

D'igual manera que abans s'ha assignat una entrada de fluid, ara s'ha d'assignar una sortida, en aquest cas serà la cara inferior (figura 82). Amb el programa s'assigna la condició "pressure outlet". Indicant que es una sortida a pressió ambient.

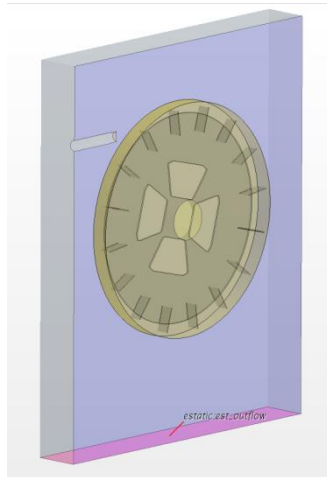


Figura 82. Assignació de la sortida d'aigua de la turbina.

La cara superior i les cares laterals excepte la que conté la simetria actuen com a parets, és a dir, no deixen sortir el fluid, per tant assignem amb el programa la condició de paret "wall" (figura 83).



Figura 83. Assignació de parets, tot el que seria metacrilat a la realitat.

La cara en la que s'ha aplicat simetria a la geometria, se li ha d'assignar la condició de simetria "Symmetry plane", s'ha d'anar amb compte de seleccionar tant la cara del rodet com la cara de la part estàtica que es troben en el mateix pla (figura 84).

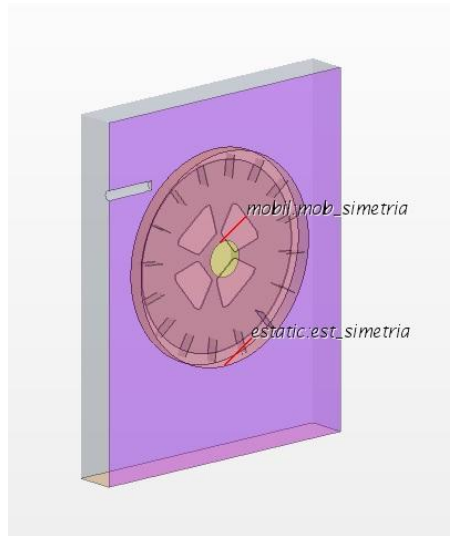


Figura 84. Assignació de la condició de simetria, amb els dos elements seleccionats.

Per últim hi ha la mànega (figura 85) que entra a la capsa de metacrilat per tant a aquest tub se li ha d'assignar la condició de paret "wall", per tal que el fluid no passi a través seu i només pugui sortir per on s'ha assignat anteriorment.

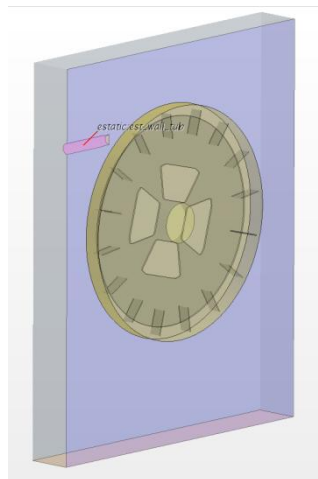


Figura 85. Assignació de la condició paret al tub de la mànega.

De tal manera que l'ordinador no sap per on entra o ha de sortir l'aigua tampoc sap si un impacte d'aigua sobre una paret ha de simular un moviment. Per tant per simular l' impacte de l'aigua contra els àleps de la turbina, i que aquests la facin girar, s'ha d'assignar una velocitat al doll d'aigua que ja s'ha fet anteriorment amb la condició de "velocity inlet" i després donar-li una velocitat de gir a la turbina, simulant un instant de temps.

Per exemple per a fer la simulació de 50 rpm. Una vegada estigui indicada al programa la part corresponent que pot girar, és a dir, el rodet. Només s'haurà d'introduir aquesta velocitat angular. Es fa de la següent manera.

Tools → Motion → Rotation → 50 rpm

I ja estarà la velocitat de gir assignada.

TIME-step

És el temps que transcorre entre iteració i iteració, és a dir entre càlcul i càlcul que realitza l'ordinador i per tant entre adquisició de dada i dada. Per posar un exemple si hi ha dos simulacions, una que té una velocitat angular $1^\circ/\text{s}$ i l'altre de $100^\circ/\text{s}$ (s'utilitza aquestes unitats i no les del Sistema Internacional, perquè sigui més fàcil d'entendre exemple), i es deixa per defecte que entre cada iteració del càlcul transcorri 1 segon (time step). A la primera simulació hi haurà per cada volta realitzada (360°), 360 càlculs i 360 dades recollides, mentre que per l'altre simulació hi haurà 3,6 iteracions per cada 360° . És a dir, mentre que a la primera simulació tindrem una volta amb 360 iteracions i per tant molt definida, al segon cas tindrem només 3 iteracions i per tant poques dades de com s'ha comportat el fluid en aquesta volta. Això és així per que amb la primera velocitat angular els salts són més petits mentre que amb la segona els salts són més grans.

L'exemple anterior s'ha representat a la imatge següent (figura 86) on s'ha simulat el comportament d'una volta entre dos configuracions d'una turbina, la primera gira a la velocitat angular de $1^\circ/\text{s}$ i la segona gira a una velocitat angular de $100^\circ/\text{s}$. Totes dos simulacions amb un time step per defecte d'1 segon.

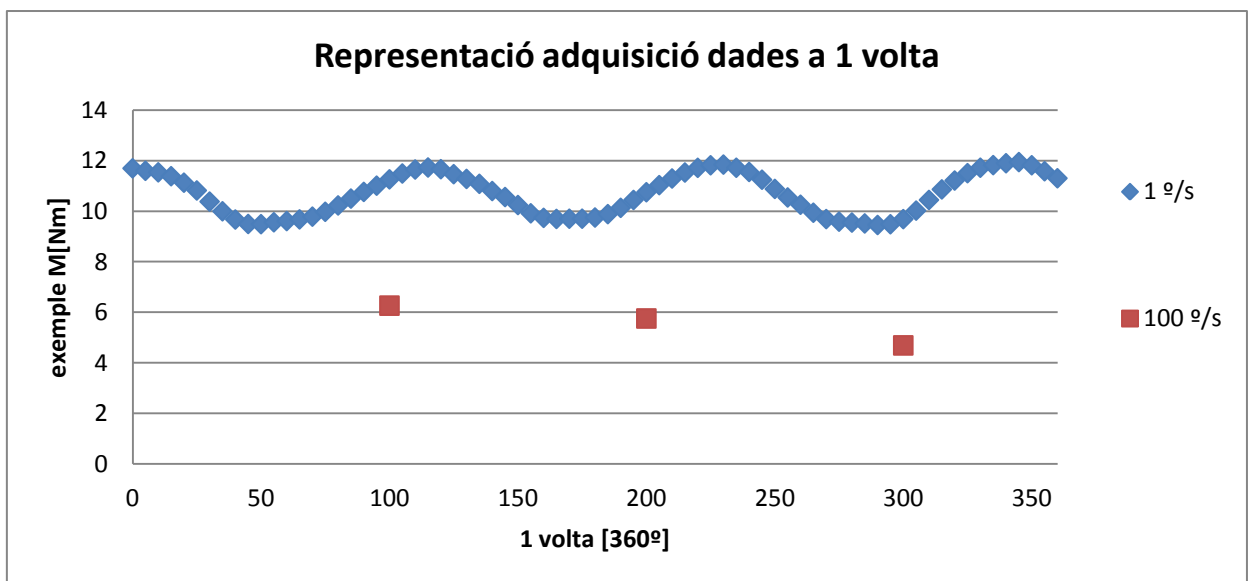


Figura 86. Simulació de les iteracions per volta amb time step 1 segon per a dos velocitats angulars diferents

Per tant s'ha de modificar el temps (time step) entre iteració i iteració per compensar la diferència de velocitats angular.

Resumint s'ha d'aconseguir que facin les mateixes iteracions al recórrer un angle. Com la velocitat no es pot modificar, es modificarà el temps entre iteració i iteració. Per tant es fan els següents càlculs.

Es parteix de:

$$\Delta\theta = N[\text{rpm}] \cdot \Delta t \quad (\text{eq. 51})$$

On es coneix: $\theta = 1^\circ$ i $N=50\text{rpm}$ (exemple, valor en la simulació de 50rpm)

El que es busca és el valor en segons entre iteració i iteració per a cada velocitat angular.

Per tant s'aïlla el temps:

$$\Delta t [s] = \frac{\Delta\theta [^\circ]}{N [\text{rpm}]} \quad (\text{eq. 52})$$

Si es vol el temps en segons s'ha de fer un canvi d'unitats, els graus a radians, i les [rpm] a [rad/s].

$$\Delta t [s] = \frac{\Delta\theta [^\circ] \left(\frac{\pi \text{ rad}}{180^\circ}\right)}{N \left[\frac{\text{rev}}{\text{min}}\right] \left(\frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} \cdot \frac{2 \cdot \pi \text{ rad}}{1 \text{ rev}}\right)} = \frac{\Delta\theta [^\circ] (\pi \cdot 60)}{N \left[\frac{\text{rev}}{\text{min}}\right] (2 \cdot \pi \cdot 180)} = \frac{\Delta\theta [^\circ]}{N \left[\frac{\text{rev}}{\text{min}}\right] \cdot 6} \quad (\text{eq. 53})$$

Ara ja es pot afirmar que fent 1 grau dividit per sis vegades la velocitat angular de la simulació en [rev/min], s'obté el pas de temps en segons. Ja es pot fer una taula Excel on es apareguin totes les velocitats angulars que s'utilitzaran per a les simulacions (taula 22).

Taula 22. Taula on es mostren el "time-step" que haurem d'assignar a cada simulació segons les rpm que tingui.

N (rpm)	Pas de temps (s)
1	$1,67 \times 10^{-1}$
50	$3,33 \times 10^{-3}$
100	$1,67 \times 10^{-3}$
150	$1,11 \times 10^{-3}$
200	$8,33 \times 10^{-4}$
250	$6,67 \times 10^{-4}$
300	$5,56 \times 10^{-4}$
350	$4,76 \times 10^{-4}$
400	$4,17 \times 10^{-4}$

Per últim s'ha d'introduir al programa el valor que toqui a cada simulació. Per això s'ha d'anar a:

Solvers → Implicit Unsteady → Time step

I ja estarà el pas de temps programat.

S'ha de dir que el programa realitza 10 iteracions internes per a cada pas de temps. És a dir, per a cada temps fixat que s'ha trobat a la taula 2, el programa fa 10 càlculs iteratius i després fa el delta de t.

Tots aquest càlculs s'han realitzat en un document Excel que s'adjunta en la documentació electrònica dipositada conjuntament amb el TFG.

Annex E

TRACTAMENT DADES CFD

Annex E- TRACTAMENT DADES CFD

Tot el que es mostra a continuació si no es diu el contrari fa referència a l'obtenció de dades per a la velocitat de 50 rpm del cas 6.

Amb el programa "STAR-CCM+" es pot recopilar molta informació fent la simulació d'una velocitat de gir. Tot seguit s'explicarà com obtenir les taules i gràfiques per a la simulació del cas 6.

Una vegada s'ha tingut l'ordinador calculant 24 hores per una velocitat de gir, s'observa el gràfic dels residuals que serveix per poder dir si la simulació ha convergit (figura 87). Al gràfic es veu que els valors no arriben mai a estabilitzar-se, això és així degut a que la geometria no es troba en repòs i per tant varia la seva posició al llarg del temps.

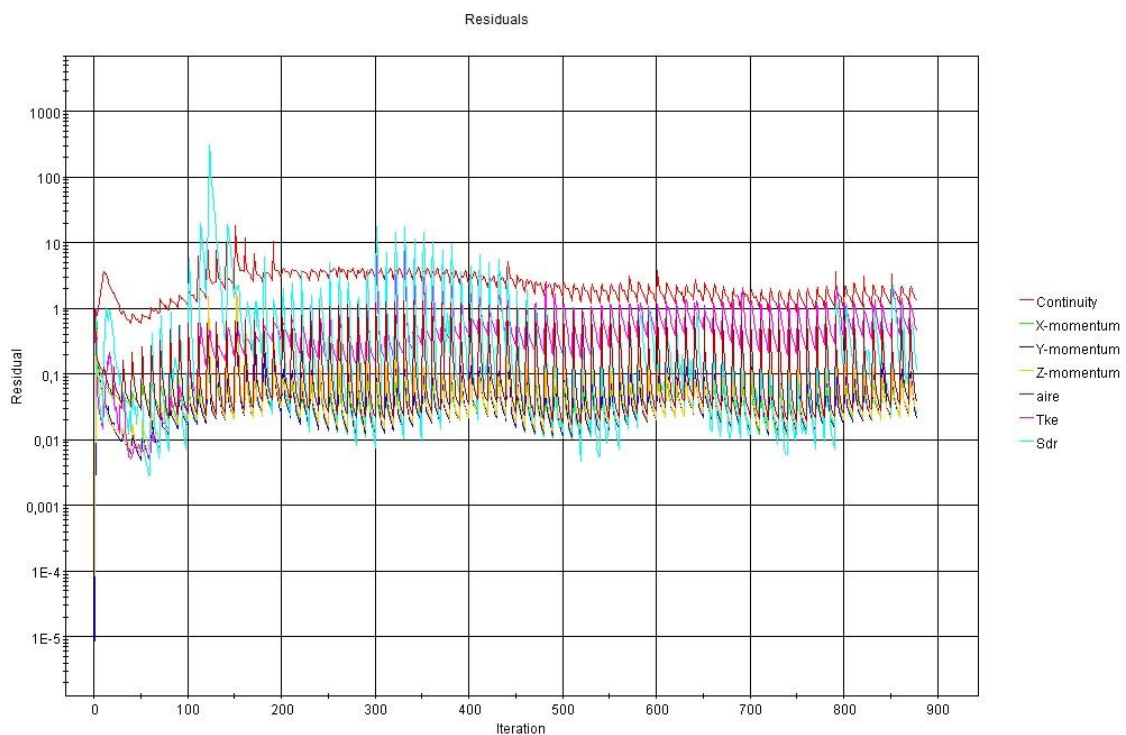


Figura 87. Gràfic dels residuals de la simulació

Arribat a aquests punt, ja es pot extreure les dades. Aquestes són els moments en l'eix de la turbina, és a dir, en l'eix Y (figura 88).

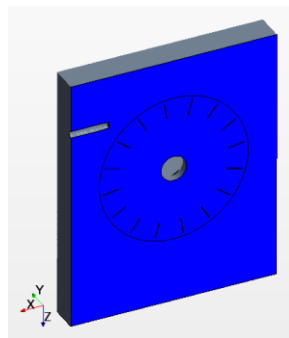


Figura 88. Eixos de la turbina.

Aquestes dades es guarden en una taula Excel (figura 89). Es pot veure que tenim a la columna de l'esquerra el temps transcorregut i al cantó les dades dels moments que vulguem que surtin, en aquest cas només vam calcular el que es necessitava, és a dir, el moment en Y.

Time	Moment_y Monitor: Moment (N-m)	Moment Y "x2"
0.003333333	-0.05667245	-0.1133449
0.006666666	-0.006383064	-0.01276613
0.009999999	0.044170838	0.08834168
0.013333332	0.170279995	0.34055999
0.016666666	0.227470726	0.45494145
0.019999998	0.713962853	1.42792571
0.023333332	2.488197088	4.97639418
0.026666664	4.697320938	9.39464188
0.029999997	6.260558128	12.5211163
0.033333331	6.881018162	13.7620363
0.036666662	7.055543423	14.1110868
0.039999995	7.116571426	14.2331429
0.043333329	7.156490803	14.3129816
0.046666663	7.149302959	14.2986059
0.049999993	7.125911713	14.2518234

Figura 89. Taula Excel exportada del STAR-CCM+ amb les dades del moment a l'eix de la turbina.

En els casos que s'ha aprofitat la simetria de la nostra turbina, com és el cas 6, aquesta columna de moments s'ha de multiplicar per dos (figura 90), ja que aquí només s'ha representat l'esforç d'una meitat.

Time	Moment_y Monitor: Moment (N-m)	Moment Y "x2"
0.003333333	-0.05667245	-0.1133449
0.006666666	-0.006383064	-0.01276613
0.009999999	0.044170838	0.08834168
0.013333332	0.170279995	0.34055999
0.016666666	0.227470726	0.45494145
0.019999998	0.713962853	1.42792571

Figura 90. Multiplicació per 2 de la columna de moments en Y degut a l' utilització de simetria.

Una vegada te s'obté aquesta columna, ja es pot representar en una gràfica (figura 91).

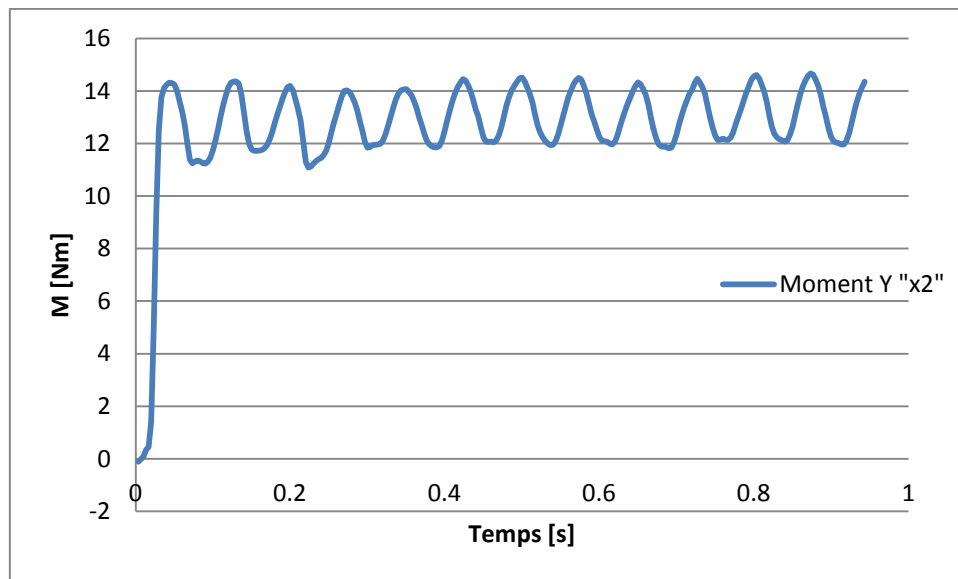


Figura 91. Gràfica del moment Y "x2".

A la imatge anterior (figura 91) es veu com al principi no toca l'aigua i quan ja hi ha contacte la gràfica s'estabilitza fent una ona cíclica. Per tant per obtenir el moment mitjà a aquestes rpm, s'ha de fer la mitjana de l'ona cíclica, sense tenir en compte la part inicial (figura 92).

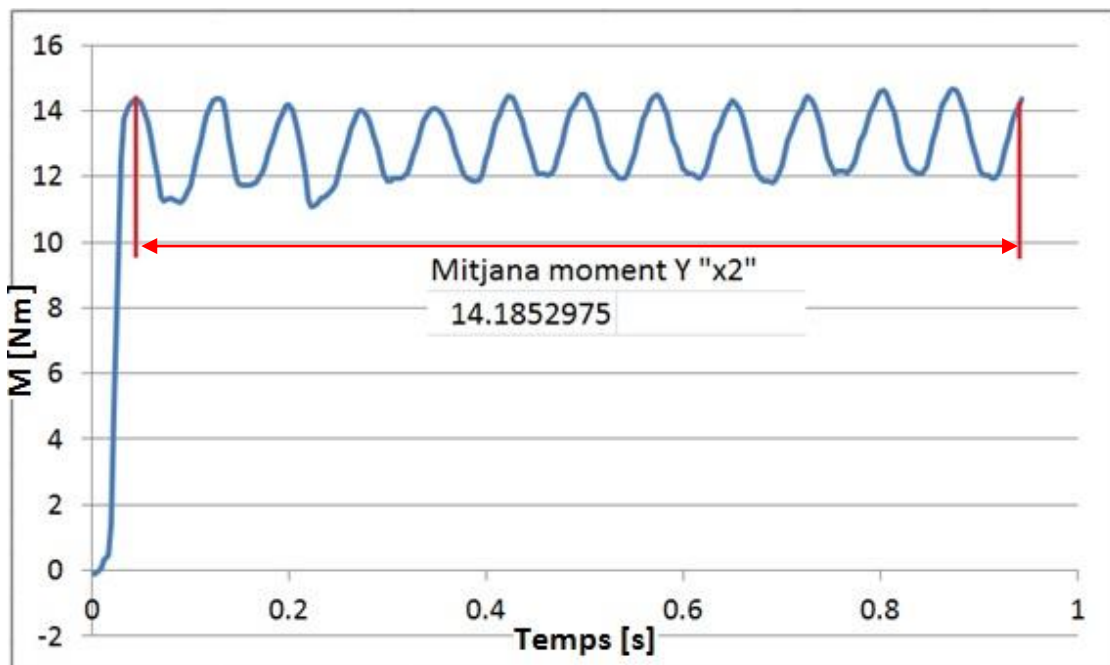


Figura 92. Mitjana del moment a l'eix Y, només es considera la part cíclica.

De tot això, s'obté un punt a la corba característica de la turbina. Per exemple aquest cas seria el punt: 50 rpm \rightarrow 14,18 Nm

A partir d'ara s'explicarà com s'obtenen les taules i gràfiques quan tenim totes les velocitats que es volen calculades amb l'explicació de l'apartat anterior.

Així doncs dels càlculs extrets de l'apartat anterior s'obté una taula on la columna de l'esquerra seria la velocitat de gir y la columna de la dreta seria el moment mitjà a l'eix Y(taula 23), requadrat es pot veure l'exemple que es va explicar a l'anterior apartat.

Taula 23. Taula amb totes les velocitats de gir calculades i els seus respectius moments mitjans.

RPM	Moments [Nm]
1	15.0586004
50	14.1852975
100	12.4890189
200	11.3186154
300	7.7111249
400	4.38735461
500	1.43448633

Si es fa la gràfica de la taula anterior (taula 23) s'obté el gràfic del parell (figura 93).

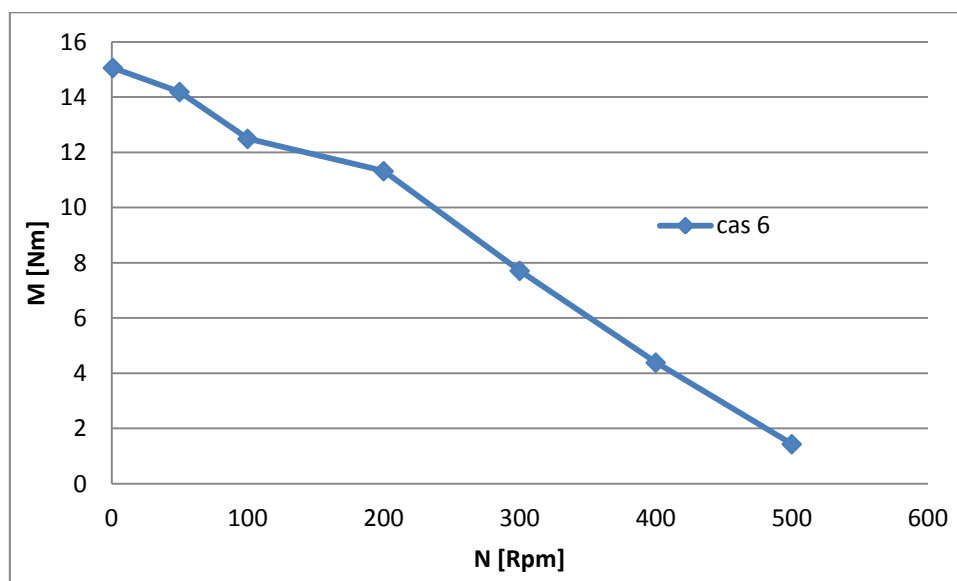


Figura 93. Gràfica de moments.

Una vegada es té la taula dels moments, per construir la taula de potències només s'ha de multiplicar el moment per la velocitat de gir en [rad/s].

Exemple amb el punt ja utilitzat anteriorment.

$$14,18 \text{ Nm} \times 5,23 \text{ rad/s (50 rpm)} = 74,27 \text{ W}$$

Fent això per cadascun dels punts calculats, es crea la següent taula de potències respecte les rpm (taula 24).

Taula 24. Taula amb totes les velocitat de gir calculades i les respectives potències.

RPM	Potència [W]
1	1.57693295
50	74.274044
100	130.7847
200	237.056527
300	242.252133
400	183.77708
500	75.1095286

D'aquesta taula 24 es pot extreure la gràfica de les potències (figura 94).

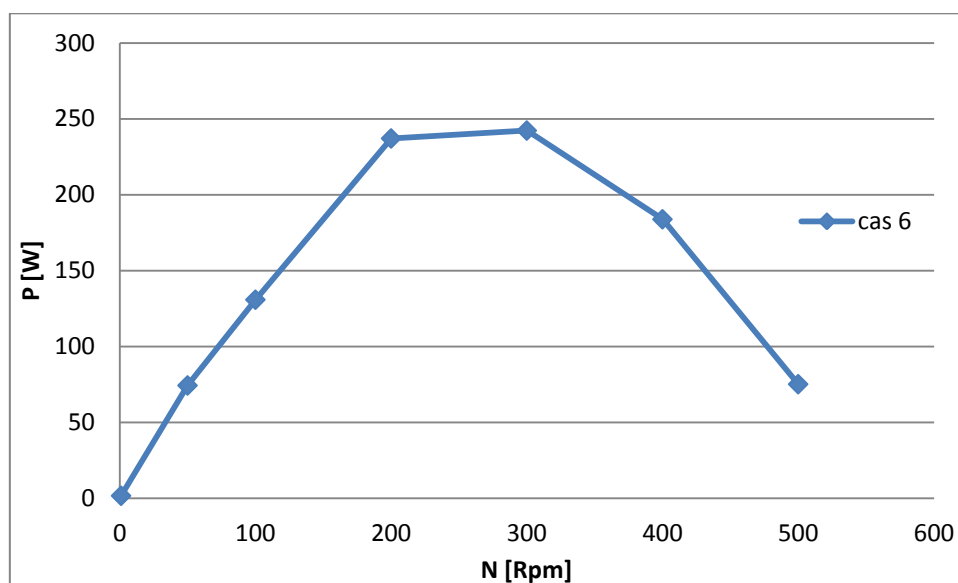


Figura 94. Gràfica de les potències.

Per obtenir la taula dels rendiments es necessiten els valors de les potències que apareixen a la taula 24 i la potència hidràulica.

Primer es calcula la potència hidràulica amb l'equació 15:

Per exemple al cas 6, que és el que s'està explicant en aquest annex, la fórmula de la potència hidràulica donaria el següent valor:

$$P_h = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_s^3 \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} = \frac{1}{2} \cdot 1000 \cdot 15,406^3 \cdot \frac{\pi \cdot (20 \cdot 0.001)^2}{4} = 574,37 \text{ W} \quad (\text{eq. 54})$$

On:

ρ =densitat aigua 1000kg/m³

v_s =velocitat de sortida del doll en [m/s]

Q =Cabal de sortida en [m³/s]

D =diàmetre de sortida [m]

Per crear la taula de rendiments respecte les revolucions només s'ha de dividir el valor de la taula de potències entre el valor que proporciona la fórmula anterior i ho multipliquem per 100 per obtenir el resultat en tant per cent.

$$Rendiment = \frac{Potència\ sub.}{P_h} = \frac{Potència\ sub.}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_s^2 \cdot Q_s} \cdot 100 \quad (\text{eq. 55})$$

Continuant l'exemple de les 50 rpm al cas 6, s'agafa el valor de la potència subministrada a la taula 24, per a 50 rpm la potència val 74,27W, per tant substituïm aquest valor i el valor de l'equació anterior a la fórmula del rendiment i s'obté:

$$Rendiment = \frac{Potència\ sub.}{P_h} = \frac{74,27}{574,37} \cdot 100 = 12,93\% \quad (\text{eq. 56})$$

Si es repeteix els càlculs per a totes les Rpm's del cas 6 es podrà obtenir la següent taula (taula 25) on es veu remarcat el càlcul de 50 rpm:

Taula 25. Taula amb les velocitats angulars calculades i els respectius rendiments.

RPM	Rendiment %
1	0.27454787
50	12.931292
100	22.7699349
200	41.2721188
300	42.1766865
400	31.9960373
500	13.0767519

Finalment només queda representar la taula anterior (taula 25) en una gràfica per tal d'obtenir la corba del rendiment (figura 95).

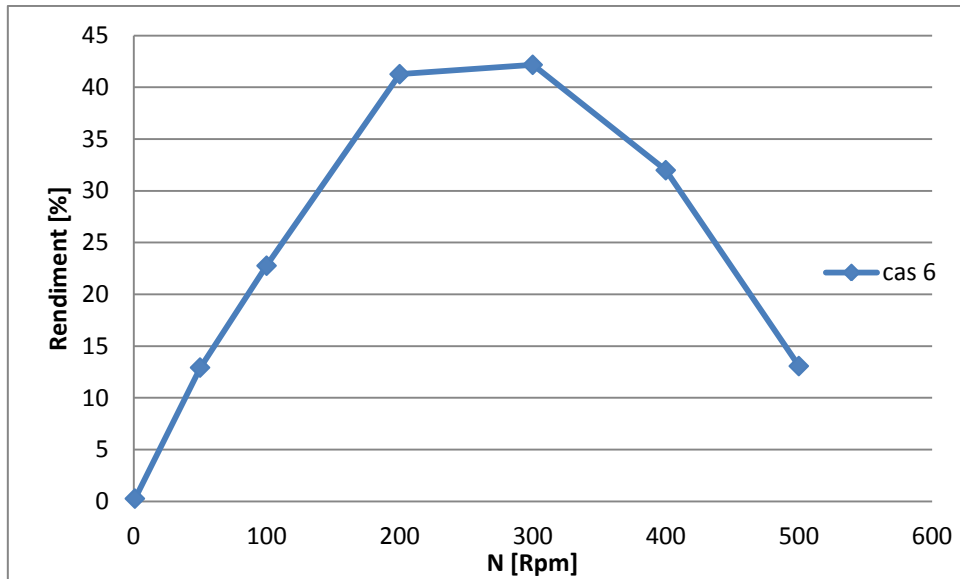


Figura 95. Gràfica de rendiments.

Ara ja s'han representat totes les taules i gràfiques del cas 6.

Tots aquests càlculs, i els corresponents gràfics s'han realitzat en un document Excel que s'adjunta en la documentació electrònica dipositada conjuntament amb el TFG.