



TecnoCampus
Escola Superior
Politécnica

Centre adscrit a la



Universitat
Pompeu Fabra
Barcelona

Grau en Enginyeria Mecànica

Disseny d'una turbina de Kaplan per abastir d'energia elèctrica a un petit poble al costat d'un riu

Projecte final

Joaquim Urpí i Agustí

TUTORA: Klára Vékony

PRIMAVERA 2023



TecnoCampus
Mataró-Maresme

Resum

En aquest projecte es mostra el procés de disseny d'una turbina hidràulica Kaplan per a l'aprofitament òptim de l'energia hidràulica que té un salt d'aigua. Aquest procés comença determinant un lloc adequat on instal·lar aquesta turbina, en aquest cas s'ha escollit Astúries a causa de ser una zona plujosa. Seguidament, es fan càlculs teòrics amb les característiques del lloc per tal d'extreure un model teòric òptim, calculant les dimensions del perfil alar, estructura de la turbina i el tub. Aquest model teòric es crea amb un programa de 3D per tal de poder fer una simulació del seu funcionament fent ús de CFD. Per acabar s'ha extret uns resultats i s'han analitzat obtenint resultats satisfactoris.

Resumen

En este proyecto se muestra el proceso de diseño de una turbina hidráulica Kaplan para el óptimo aprovechamiento de la energía hidráulica que te da una salto de agua. Este proceso comienza determinando un lugar adecuado al instalar esta turbina, en este caso se ha escogido Asturias debido a ser una zona pluviosa. A continuación se realizan cálculos teóricos con las características del lecho para así conseguir un modelo teórico óptimo, calculando las dimensiones del perfil alar, estructura de la turbina y el tubo. Este modelo teórico se crea con un programa de 3D para poder hacer una simulación de su funcionamiento mediante CFD. Para acabar se han extraído unos resultados y se han analizado obteniendo resultados satisfactorios.

Abstract

This project shows the design process of a Kaplan hydraulic turbine for the optimal use of the hydraulic energy provided by a waterfall. This process begins by determining a suitable place to install this turbine, in this case Asturias has been chosen because it is a rainy area. Theoretical calculations are then carried out with the characteristics of the bed in order to obtain an optimal theoretical model, calculating the dimensions of the airfoil, the turbine structure and the tube. This theoretical model is created with a 3D program in order to simulate its operation by means of CFD. Finally, some results have been extracted and analyzed, obtaining satisfactory results.

Índex

Índex de figures	IX
Índex de taules	XIII
Glossari de nomenclatura	XV
Glossari d'abreviacions	XVII
1. Objectius	1
1.1. Propòsit.....	1
1.2. Finalitat.....	1
1.3. Objecte	1
1.4. Abast.....	1
1.5. Context en les línies de recerca i transferència de coneixement del TecnoCampus	2
2. Introducció a les turbines hidràuliques	3
2.1. Evolució històrica de les turbines hidràuliques	3
2.2. Tipus de centrals hidràuliques segons el sistema utilitzat.....	4
2.2.1. Aigua fluent.....	4
2.2.2. Centrals d'embassament.....	5
2.2.3. Centrals de bombeig.....	6
2.3. Tipus de turbines hidràuliques	6
2.3.1. Turbina de Francis.....	6
2.3.2. Turbina de Pelton	8

2.3.3. Turbina de Kaplan.....	9
2.4. Teoria de les turbines hidràuliques.....	11
2.4.1. Triangle de velocitats	11
2.4.2. Equació d'Euler.....	13
2.4.3. Alçada de pressió i alçada dinàmica del rotor.....	15
2.4.4. Grau de reacció.....	16
2.4.5. Rendiment i potència.....	17
2.4.6. Cavitació en les turbines Kaplan i mètodes per afrontar-la	18
2.5. Normativa.....	21
2.6. Patents	25
3. Objectius i especificacions tècniques	27
4. Selecció de la ubicació.....	29
4.1. Consum del municipi	33
5. Disseny de la turbina.....	35
5.1. Càlcul de potència	35
5.2. Càlcul d'alçada de saturació.....	36
5.3. Càlcul teòric del rodet	36
5.4. Càlcul dels perfil alar	39
5.5. Càlcul teòric de la geometria de la carcassa de la turbina.....	45
5.6. Càlcul de la coberta cònica.....	49
5.7. Disseny del perfil alar en SolidWorks.....	50

6.	Simulació CFD.....	55
6.1.	Preparació per la simulació	55
6.1.1.	Mallat	58
6.2.	Anàlisi del disseny teòric amb CFD	60
6.2.1.	Comportament del flux al llarg del conducte	60
6.2.2.	Velocitat tangencial.....	62
6.2.3.	Pressió en la turbina	66
6.2.4.	Capacitat de generació de potència	69
6.2.5.	Rendiment de la turbina a diferents cabals.....	71
7.	Perspectiva de gènere.....	77
8.	Impacte mediambiental	79
9.	Planificació del projecte.....	81
9.1.	Justificació dels punts de control	82
9.2.	Punts de control.....	83
10.	Conclusions.....	85
11.	Bibliografia	87

Índex de figures

Fig. 2.1 Turbina hidràulica proposada per Euler [1]	4
Fig. 2.2 Central d'aigua fluent [4]	5
Fig. 2.3 Central d'embassament [4].....	6
Fig. 2.4 Central de bombeig [4]	6
Fig. 2.5 Tall de secció de la càmera espiral, turbina Francis [6].....	7
Fig. 2.6 Turbina Francis, direcció aigua i sentit de rotació turbina [6]	8
Fig. 2.7 Turbina Pelton [6]	9
Fig. 2.8 Vista interna de la turbina Pelton [6]	9
Fig. 2.9 Rendiment turbines respecte desviació cabal nominal [6].....	10
Fig. 2.10 Vista interna turbina Kaplan [5]	11
Fig. 2.11 Cub [6]	11
Fig. 2.12 Components de la velocitat en una turbina [6]	12
Fig. 2.13 Velocitat d'embalament [16]	12
Fig. 2.14 Velocitat absoluta desglossada [6].....	13
Fig. 2.15 Trajectòria relativa (discontínua); Trajectòria absoluta (continua) [6].....	13
Fig. 2.16 Gràfica de relació grau reacció i radi del rodet [font pròpia]	17
Fig. 2.17 Evolució microscòpica del fenomen de la cavitació [7]	18
Fig. 2.18 Destrucció per cavitació, conegut com a pitting [7]	19
Fig. 2.19 Zones de l'àlep on es manifesta la cavitació [7].....	19
Fig. 2.20 Gràfica coeficient de cavitació i velocitat específica en turbines Kaplan [8].....	20

Fig. 2.21 Gràfica de relació temperatura i pressió saturació aigua [9].....	20
Fig. 2.22 Xarxa Natura 2000 Espanya [11].....	22
Fig. 2.23 Rius controlats per la <i>Confederacion Hidrografica del Cantabrico</i> [14].....	22
Fig. 2.24 Procediment posada en servei Tipus A [30]	24
Fig. 2.25 Procediment posada en servei Tipus A [30]	25
Fig. 4.1 Mapa d'Espanya amb representació gràfica de precipitacions [18]	29
Fig. 4.2 Gràfic de pluges i temperatures mensuals al Cangues d'Onis [19]	30
Fig. 4.3 Vista satèl·lit de la zona on està la central antiga [font pròpia].....	31
Fig. 4.4 Canal de derivació [2]	31
Fig. 4.5 Assut [2].....	32
Fig. 4.6 Central hidràulica, de 1928 [2]	32
Fig. 5.1 Dimensions del rodet [5].....	36
Fig. 5.2 Resta de dimensions del rodet [5]	43
Fig. 5.3 Dimensions de la carcassa espiral [5]	46
Fig. 5.4 Resta dimensions de la carcassa espiral [5]	46
Fig. 5.5 Dimensions tub d'aspiració [5]	47
Fig. 5.6 Dimensions tub d'aspiració [5].....	48
Fig. 5.7 Corba de la coberta cònica [font pròpia].....	50
Fig. 5.8 Programa Python [font pròpia]	51
Fig. 5.9 Perfil alar exportat en forma de CURVA XYZ [font pròpia].....	51
Fig. 5.10 Procés de modelatge [font pròpia]	52

Fig. 5.11 Render del resultat [font pròpia]	52
Fig. 5.12 Model final [font pròpia]	53
Fig. 5.13 Render del model final [font pròpia]	53
Fig. 5.14 Tub de desfogament [font pròpia].....	54
Fig. 5.15 Render del tub de desfogament [font pròpia]	54
Fig. 6.1 Selecció tipus de simulació [font pròpia].....	55
Fig. 6.2 Material de la simulació [font pròpia]	55
Fig. 6.3 Condició d'entrada (Pressió) [font pròpia]	56
Fig. 6.4 Condició de sortida (cabal) [font pròpia].....	57
Fig. 6.5 Zona de rotació [font pròpia]	57
Fig. 6.6 Energia cinètica de turbulència [font pròpia].....	57
Fig. 6.7 Taxa de dissipació específica [font pròpia]	58
Fig. 6.8 Característiques del mallat [font pròpia].....	58
Fig. 6.9 Configuració capes límit automàtiques [font pròpia]	59
Fig. 6.10 Resultat del mallat de l'estructura [font pròpia]	59
Fig. 6.11 Resultat del mallat de l'hèlix [font pròpia].....	60
Fig. 6.12 Línies de velocitat del flux (m/s) a través del disseny teòric [font pròpia].....	61
Fig. 6.13 Pla de l'entrada per mesurar la velocitat tangencial (m/s) [font pròpia].....	62
Fig. 6.14 Velocitat tangencial a l'entrada(x:distancia/y:velocitat) [font pròpia]	63
Fig. 6.15 Pla del mitj per mesurar la velocitat tangencial (m/s) [font pròpia]	63
Fig. 6.16 Velocitat tangencial al mitj (x:distancia/y:velocitat) [font pròpia].....	64

Fig. 6.17 Pla de la sortida per mesurar la velocitat tangencial (m/s) [font pròpia]	64
Fig. 6.18 Velocitat tangencial a la sortida (x:distància/y:velocitat) [font pròpia].....	65
Fig. 6.19 Vista general de les tes capes respecte hèlix [font pròpia]	66
Fig. 6.20 Pressió total a la part superior de la turbina (Pa) [font pròpia].....	67
Fig. 6.21 Pressió a la part inferior de la turbina (Pa) [font pròpia]	67
Fig. 6.22 Plans per la mesura de la caiguda de pressió a través de la turbina [font pròpia] ...	68
Fig. 6.23 Moment axial sobre l'hèlix (x:temps/y:moment) [font pròpia]	69
Fig. 6.24 Moment axial sobre l'hèlix amb $Q=10,3\text{m}^3/\text{s}$ (x:temps/y:moment) [font pròpia] ...	71
Fig. 6.25 Moment axial sobre l'hèlix amb $Q=9,3\text{m}^3/\text{s}$ (x:temps/y:moment) [font pròpia]	72
Fig. 6.26 Moment axial sobre l'hèlix amb $Q=6,3\text{m}^3/\text{s}$ (x:temps/y:moment) [font pròpia]	73
Fig. 6.27 Moment axial sobre l'hèlix amb $Q=2,5\text{m}^3/\text{s}$ (x:temps/y:moment) [font pròpia]	74
Fig. 6.28 Taula del rendiment en funció de la relació del cabal amb el nominal [font pròpia]	75
Fig. 9.1 Diagrama de Gantt [font pròpia].....	82
Fig. 9.2 Diagrama de Gantt actualitzat [font pròpia]	84

Índex de taules

Taula 5.1 Dades teòriques [font pròpia].....	44
Taula 5.2 Dimensions de l'estructura [font pròpia]	49
Taula 6.1 Taula de resultats de les mesures de la velocitat [font pròpia]	65
Taula 6.2 Caiguda de pressió a la turbina [font pròpia]	69
Taula 6.3 Taula de rendiments per cabals [font pròpia].....	75
Taula 8.1 Reducció emissions [font pròpia].....	80
Taula 8.2 Taula d'equivalències [font pròpia]	80
Taula 9.1 Activitats i duració [font pròpia].....	81
Taula 9.2 Freqüència de punts de control [font pròpia]	82
Taula 9.3 Punts de control escollits [font pròpia]	82
Taula 9.4 Observacions punts de control [font pròpia]	83
Taula 9.5 Activitats i duració actualitzada [font pròpia].....	84

Glossari de nomenclatura

A	Àrea [m^2]
c/v	Velocitat absoluta de l'aigua [m/s]
D	Diàmetre del àlep [m]
g	Gravetat [m^2/s]
H	Salt [m]
Ku	Coeficient de velocitat perifèrica
L	Longitud de la corda del perfil alar [m]
m	Massa [kg]
M	Moment [$N*m$]
n	Velocitat angular en revolucions per minut [rpm]
ns	Velocitat específica [rpm]
P	Potència [W]
p	Pressió [Pa]
Q	Cabal [m^3/s]
r	Radi [m]
R	Radi del àlep [m]
t	Temps [s]
U	Velocitat tangencial del rotor [m/s]
V	Volum [m^3]
w	Velocitat relativa de l'aigua [rad/s]

Z	Nombre d'àleps
α	Angle que forma u amb c [rad]
β	Angle que forma u amb w [rad]
η	Rendiment
ν	Relació geomètrica entre el diàmetre exterior i interior del rodet
ξ	Relació entre energia cinètica i energia de pressió
ρ	Densitat [kg/m^3]
ω	Velocitat angular [rad/s]

Glossari d'abreviacions

BOE	Bolletí oficial del estat
IEC	Comissió Electrotècnica Internacional
CFD	Mecànica de fluids computacional
3D	Tres dimensions
TFG	Treball final de carrera
MGE	Modulo de generació d'electricitat
IEC	Comissió electrotècnica internacional
BOE	Bolletí oficial de l'estat

1. Objectius

1.1. Propòsit

Disseny d'una turbina de Kaplan per abastir d'energia elèctrica a un petit poble al costat d'un riu.

1.2. Finalitat

Aconseguir fer el disseny d'una turbina de Kaplan per abastir d'energia a un poble, fer-ho personalitzat per tal de tenir una màxima eficiència, i així poder reduir el consum d'electricitat generada a través de fonts no renovables.

1.3. Objecte

Una memòria completa pel disseny d'una turbina Kaplan personalitzada per una zona en concret.

1.4. Abast

El treball comença amb l'anàlisi de les necessitats energètiques del poble i la ubicació de la turbina, també s'inclou el disseny de la turbina, incloent-hi la seva geometria. Es faran simulacions de CFD per tal d'entendre el comportament de la turbina depenent del cabal. No es faran càlculs de la resistència als esforços provocats pel flux de l'aigua. Tampoc es determinarà el material del qual estarà feta la carcassa de la turbina i l'hèlix.

1.5. Context en les línies de recerca i transferència de coneixement del TecnoCampus

Per poder fer aquest TFG es fa ús de les matèries donades durant tota la carrera al TecnoCampus, concretament el que s'ha après en les assignatures de: enginyeria de fluids, gestió de projectes, i modelització i simulació.

2. Introducció a les turbines hidràuliques

L'ús de l'energia hidràulica ha anat augmentant al llarg de la història, permetent una evolució per part de la humanitat. A través de l'evolució de l'enginyeria s'han desenvolupat diferents tipus de turbines i centrals, cadascuna pensada per a un propòsit i per a unes circumstàncies diferents. A continuació, en aquest apartat del projecte es farà una introducció als diferents tipus de centrals i també als diferents tipus de turbines que s'utilitzen. Hi haurà una major explicació en l'apartat de les turbines de Kaplan, ja que és el tema que es tracta en aquest projecte.

2.1. Evolució històrica de les turbines hidràuliques

L'energia hidràulica ha sigut utilitzada pels éssers humans des de ja fa molts segles. Antigament, era feta servir pels grecs i pels romans, que feien servir molins d'aigua per a poder moldre el gra, o per produir paper. El material del qual estava fet el molí estava lluny de ser el que s'usa ara, ja que es feia ús de fusta i amb la humitat i l'aigua aquesta s'infla, no com el ferro que s'usa actualment.

Una de les causes per les quals l'energia hidràulica es desenvolupava d'una forma lenta era degut al fet que tenia com a competidora a la màquina de vapor, aquesta, a diferència de la turbina hidràulica, que només es podia col·locar al costat de rius, es podia col·locar en qualsevol lloc. En el moment que la tecnologia de la transmissió elèctrica va evolucionar, es va permetre un gran desenvolupament de les plantes hidroelèctriques i d'igual manera de les seves turbines. Les rodes hidràuliques tenien dos principals desavantatges, ja que l'aigua que entra no empenta tota la roda, sinó que en una part de la seva circumferència. Això fa que el rendiment sigui molt baix i que la seva velocitat de rotació molt lenta (4-10 rpm). A causa d'aquesta necessitat de millora van aparèixer les turbines hidràuliques, que l'aigua travessa tota la circumferència. Aquestes han anat evolucionant amb l'objectiu de millorar el rendiment (fins al 90% actualment) i la velocitat de rotació, per tal de tenir potències específiques més altes, el qual permet generació d'electricitat a més baix cost. [1]

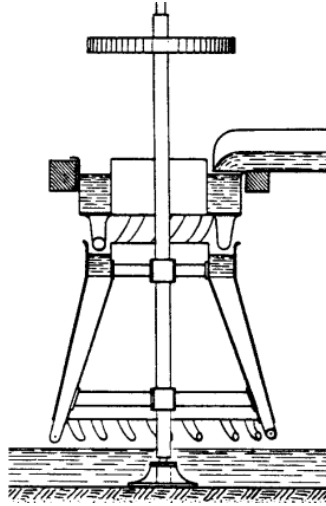


Fig. 2.1 Turbina hidràulica proposada per Euler [1]

2.2. Tipus de centrals hidràuliques segons el sistema utilitzat

L'objectiu d'una central hidroelèctrica és convertir l'energia hidràulica que conté un riu, en energia elèctrica. El procés es du a terme mitjançant diversos passos, que transformen l'energia potencial continguda per la massa d'aigua del riu que es troba a major alçada respecte a la central hidroelèctrica, en energia rotativa en l'eix d'una turbina que finalment ho transforma en energia elèctrica mitjançant un alternador incorporat en el mateix eix. [3]

2.2.1. Aigua fluent

A les centrals d'aigua fluent s'utilitza la velocitat del cabal natural d'un riu situat en un salt d'aigua. L'aigua es transporta a través d'un túnel de derivació sense ajut de canonades forçades i arriba fins a les turbines. Així, doncs, la potència de la central depèn principalment de la velocitat de l'aigua que passa pel salt i del cabal del riu.

Aquestes centrals estan compostes per: [4]

- Assut de derivació, per ajudar a elevar el nivell del cabal
- Cambra de càrrega, on arriba l'aigua de la canal
- Una canonada forçada que condueix l'aigua fins a la turbina a gran pressió

- Edifici de la central
- Turbina, generador, transformador
- Canal de descàrrega, per retornar l'aigua al riu.

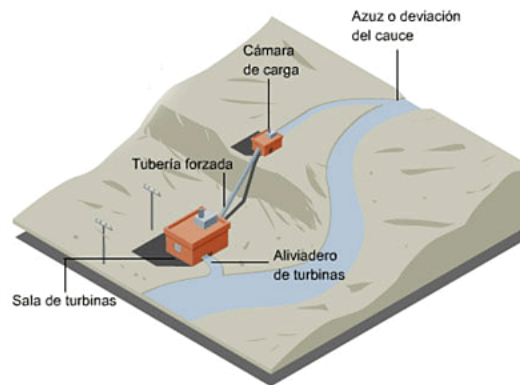


Fig. 2.2 Central d'aigua fluent [4]

2.2.2. Centrals d'emassament

En aquest tipus de central s'utilitza un embasament d'aigua a certa alçada. Aquest pot ser tant un llac natural o un pantà artificial, que fa ús d'una presa. L'aigua es transporta des de l'embasament fins a la turbina a través d'unes canonades forçades. Això genera energia mecànica de rotació sobre l'eix de la turbina i després es converteix en electricitat a través d'un alternador.

Ja que hi ha un embasament, es té un major control del cabal d'aigua, i directament un major control de l'electricitat generada, a diferència de les centrals d'aigua fluent que no ofereixen aquest control.

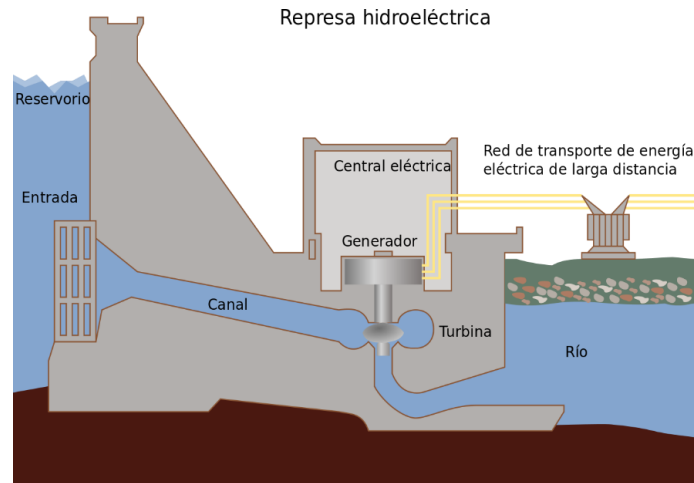


Fig. 2.3 Central d'embassament [4]

2.2.3. Centrals de bombeig

Les centrals de bombeig són com les d'embassament, però amb la diferència que aquestes tenen un segon dipòsit a una alçada inferior a la central. D'aquesta manera, en haver-hi algun moment de menor demanda elèctrica es bomba l'aigua de l'embassament inferior al superior. D'aquesta manera es pot estar segur de tenir aigua per a generar energia en els moments d'alta demanda.

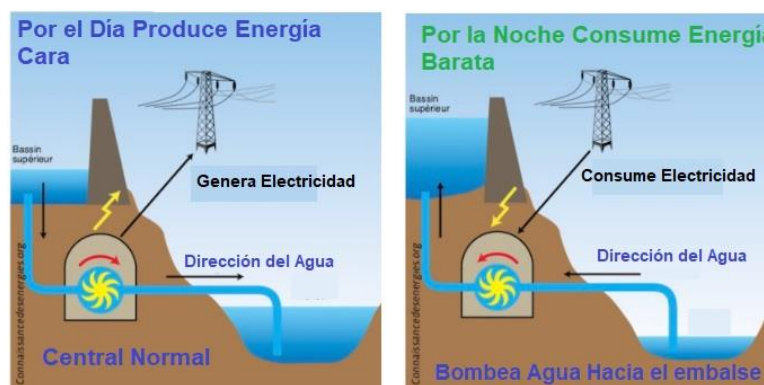


Fig. 2.4 Central de bombeig [4]

2.3. Tipus de turbines hidràuliques

2.3.1. Turbina de Francis

La turbina de Francis és el tipus de turbina que més s'utilitza a causa de la seva gran variabilitat d'ús respecte, salts d'aigua i potència generada. Es troba dins de la categoria de turbines

semiaxials, és a dir, el flux té un component que no és paral·lela a l'eix de la turbina. Aquesta turbina funciona amb un flux centrípet en el qual l'aigua arriba al rotor a través d'un conducte en forma d'espiral; després unes pales guia en la part fixa dirigeixen el cabal per tal de fer girar les pales del rotor. S'usa en salts amb una alçada de 10 fins a 700 metres, per cabals de 2 a 100 metres cúbics d'aigua per segon. Pot generar entre 100 kW i 1000 MW. Aquest tipus de turbina presenta un disseny hidrodinàmic que garanteix un gran rendiment. Tenen un baix cost de manteniment, encara que no són les turbines idònies en casos on hi ha una gran variació de cabal. Un problema que s'ha de tenir controlat amb aquestes instal·lacions és la cavitació. [6]

Elements que formen part d'una turbina Francis:

- **Conducció d'entrada:** Entrada per on s'alimenta la turbina.
- **Càmera espiral:** Caixa metàl·lica troncocònica que s'encarrega de distribuir el flux de forma uniforme a través del distribuïdor. Transforma part de l'energia de pressió en energia cinètica.
- **Distribuïdor:** Està format per un conjunt de pales mòbils, que forma un anell, que s'encarreguen de seguir transformant part de la pressió en energia cinètica. Tanmateix, s'encarrega de regular el cabal d'entrada a la turbina.
- **Rotor:** És l'encarregat d'absorbir l'energia del líquid i transmetre aquesta energia per un eix fins al generador.
- **Tub d'aspiració:** És l'encarregat de connectar el rotor amb la càmera de descàrrega.



Fig. 2.5 Tall de secció de la càmera espiral, turbina Francis [6]

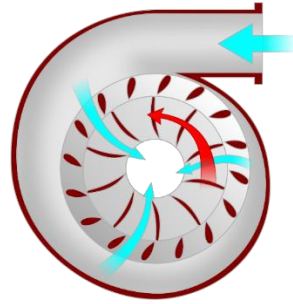


Fig. 2.6 Turbina Francis, direcció aigua i sentit de rotació turbina [6]

2.3.2. Turbina de Pelton

El principi de funcionament és el mateix que el del clàssic molí d'aigua, encara que el disseny actual està redissenyat per augmentar la seva eficiència. Actualment, l'aigua es transporta per una canonada forçada, que consta d'un filtre a la sortida, aquest fa que augmenti la velocitat de l'aigua. Aquesta aigua que surt impacta directament les pales del rotor, que normalment tenen forma de cullera per tal de tenir una major eficiència.

La turbina de Pelton es troba dins de la categoria de turbines tangencials, és a dir, que el líquid impacta de forma tangencial al rotor. S'instal·len en zones on hi ha grans desnivells amb un cabal relativament baix, aquestes turbines giren a una velocitat relativament baixa. S'utilitza en salts amb una alçada de 140 fins a 1700 metres, per cabals de menys de 50 metres cúbics d'aigua per segon. Pot generar entre 500 kW i 400 MW.

Elements que formen part d'una turbina Pelton:

- **Conducció d'entrada:** Entrada per on s'alimenta la turbina.
- **Cambra de distribució:** Té la missió de distribuir el fluid als diferents distribuïdors que hi ha. Té una clau de pas que permet aturar completament l'entrada de flux a la turbina.
- **Distribuïdor:** Té la tasca de conduir el fluid fins al filtre.
- **Filtre:** Encarregat de transformar l'energia de pressió del fluid en energia cinètica.
- **Rotor:** Encarregat de transformar l'energia cinètica en energia mecànica, finalment transmetre aquesta energia per un eix fins al generador.



Fig. 2.7 Turbina Pelton [6]

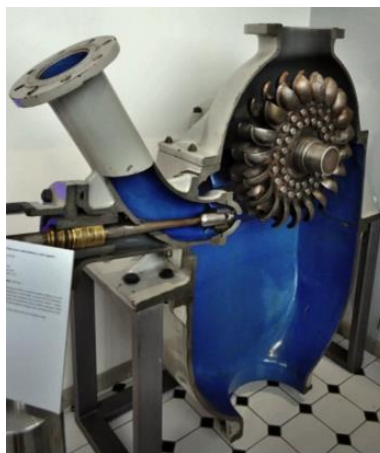


Fig. 2.8 Vista interna de la turbina Pelton [6]

2.3.3. Turbina de Kaplan

Es troba dintre de la categoria de turbines de flux axial. És a dir, la direcció del fluid és paral·lela a l'eix de rotació de la turbina. Treballa amb altes velocitats específiques, superiors a 400 rpm, ja que es deixa d'utilitzar la turbina Francis, perquè l'aigua no es pot guiar i conduir amb precisió. El marge d'ús de les turbines de Kaplan és de salts d'aigua d'entre 5 i 70 metres i cabals des d'1 a 1000 m³/s. Aquests marges ofereixen una capacitat de generació d'energia d'entre 50 kW fins a 200 MW.

El rotor consta normalment de poques pales, les quals tenen forma d'hèlix de vaixell. En alguns casos el rotor arriba a tenir un diàmetre de fins a 0,4 vegades el diàmetre del tub d'aspiració. En el cas en què les pales fossin fixes se li diu turbina d'hèlix; en canvi, si són orientables es denomina turbina Kaplan.

Gràcies a aquesta capacitat d'orientació de les hèlixs, aquesta turbina pot mantenir un alt rendiment per desviacions sobre els valors de flux nominal.

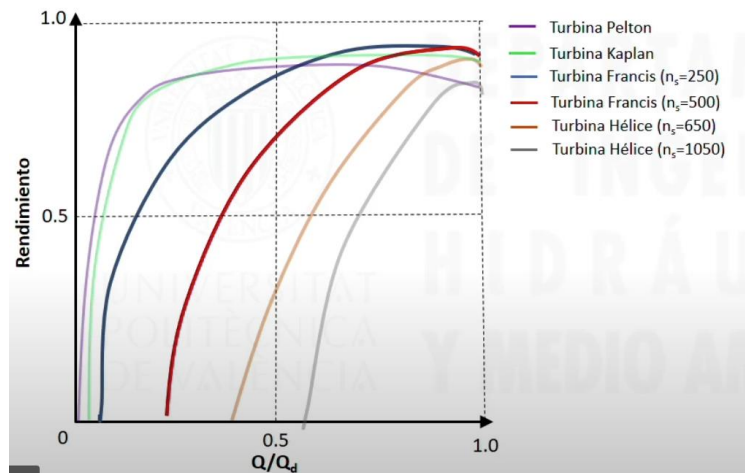


Fig. 2.9 Rendiment turbines respecte desviació cabal nominal [6]

Elements que formen part d'una turbina Kaplan:

- **Conducció d'entrada:** Entrada per on s'alimenta la turbina.
- **Càmera espiral:** Caixa metàl·lica troncocònica que s'encarrega de distribuir el flux de forma uniforme a través del distribuïdor. Transforma part de l'energia de pressió en energia cinètica.
- **Distribuïdor:** Està format per un conjunt de pales mòbils, que forma un anell, que s'encarreguen de seguir transformant part de la pressió en energia cinètica. Tanmateix, s'encarrega de regular el cabal d'entrada a la turbina.
- **Rotor:** És l'encarregat d'absorbir l'energia del líquid i transmetre aquesta energia per un eix fins al generador. En aquest cas té forma d'hèlix de vaixell i es pot variar la seva orientació.
- **Cub:** Encarregat de tenir els mecanismes mòbils per tal de fer que la turbina d'hèlix sigui una turbina Kaplan.
- **Tub d'aspiració:** És l'encarregat de connectar el rotor amb la càmera de descàrrega.



Fig. 2.10 Vista interna turbina Kaplan [5]



Fig. 2.11 Cub [6]

Aquesta turbina serà la que es dissenyarà, i posteriorment se simularà en aquest projecte fent ús de CFD, degut principalment a la gran polivalència i capacitat d'adaptació a diferents entorns.

2.4. Teoria de les turbines hidràuliques

2.4.1. Triangle de velocitats

Per tal d'estudiar el moviment de l'aigua en les turbines hidràuliques, s'utilitza una nomenclatura que defineix els triangles de velocitat a l'entrada i a la sortida del rotor:

- u = velocitat tangencial del rotor
- c / v = velocitat absoluta de l'aigua
- w = velocitat relativa de l'aigua

- α = angle que forma el vector u amb el vector c
- β = angle que forma el vector u amb el vector w

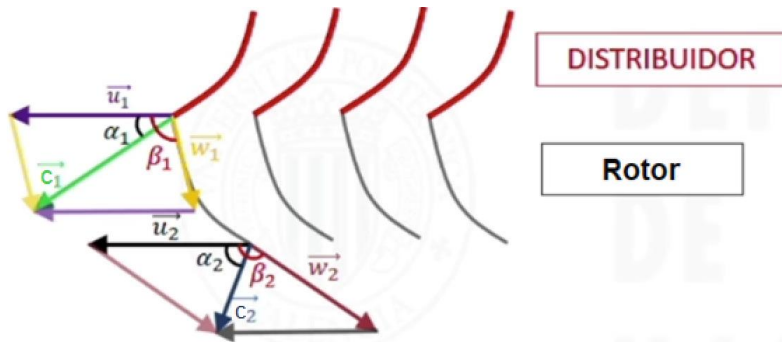


Fig. 2.12 Components de la velocitat en una turbina [6]

- El subíndex 1 és per referir-se a l'entrada d'aigua al rotor
- El subíndex 2 és per referir-se a la sortida d'aigua al rotor

En el cas de la turbina Kaplan sempre se n'intentarà tenir un α_2 de 90° , rotant els àleps, per tal de maximitzar l'alçada d'Euler recuperada. Més endavant s'explica en quina fórmula es basa.

Pot haver-hi un cas en què el rotor pateixi un augment de la velocitat tangencial ($u' > u_1$). Aquesta nova velocitat es dirà velocitat d'embalament; en desviar-se la velocitat relativa w_1 en relació amb la tangent de l'àlep hi haurà un xoc de l'aigua amb la cara posterior dels àleps, d'aquesta manera la força tangencial es veu afectada per la força de xo. Així que, encara que el rotor giri sense control existeix una velocitat límit d'embalament (2.1). Per tant, el rotor no augmenta la seva velocitat fins a l'infinit.

$$u'_1 = (1,8 \div 2,2) u_1 \quad (2.1)$$

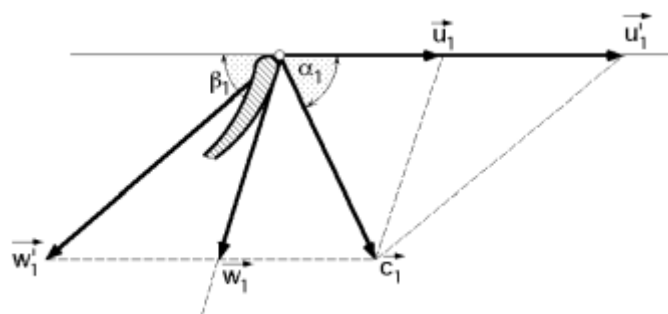


Fig. 2.13 Velocitat d'embalament [16]

El vector velocitat absoluta es pot desglossar, tenint en compte l'angle α , en:

- La velocitat perifèrica (v_u), que és paral·lela a la velocitat tangencial.
- La velocitat meridional (v_m), que és perpendicular a la velocitat perifèrica.

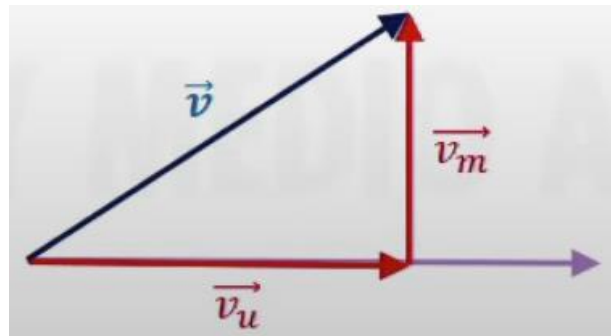


Fig. 2.14 Velocitat absoluta desglossada [6]

2.4.2. Equació d'Euler

En les turbines hidràuliques, l'intercanvi d'energia es dona en el rotor. Aquest intercanvi es produeix per acció entre les parets de l'àlep i l'aigua.

Aquest intercanvi és causat per l'Equació d'Euler, que forma el principi bàsic de les turbomàquines hidràuliques.

Per tal d'extreure aquesta equació es té en compte que es troba en règim permanent, el flux és ideal, irrotacional, unidimensional i que el rotor té un nombre infinit d'àleps.

Al moment d'analitzar el moviment que té una partícula d'aigua en un rotor ideal es pot veure una trajectòria relativa dins del rotor i una d'absoluta a causa de la seva rotació.

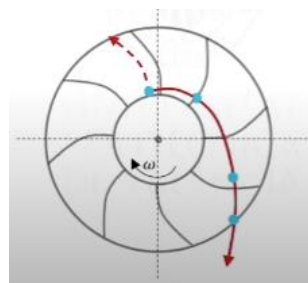


Fig. 2.15 Trajectòria relativa (discontínua); Trajectòria absoluta (continua) [6]

Analitzem el moment cinètic fixant-nos en un determinat volum de control, aquest serà el rotor. Ens basarem en el Teorema d'Arrossegament de Reynolds, aplicant el moment cinètic que actua sobre un eix, tenint en compte els fluxos màxims d'entrada i de sortida del rotor. [5]

$$\left(\frac{d\vec{B}}{dt}\right)_{SIST} = \frac{d}{dt} \int_{VC} \vec{\beta}(\vec{r}, t) \rho(\vec{r}, t) dV + \int_{sc} \vec{\beta}(\vec{r}, t) \rho(\vec{r}, t) (\vec{v}_{r,sc}(\vec{r}, t) * \vec{dA}) \quad (2.2)$$

$$\left(\frac{d\vec{B}}{dt}\right)_{SIST} = \sum \vec{M}_{ext} \quad (2.3)$$

$$\vec{\beta}(\vec{r}, t) = \frac{d\vec{B}}{dm} = (\vec{r} \times \vec{v}) \quad (2.4)$$

$$\sum \vec{M}_{ext} = \sum_{sal,i} [\rho Q (\vec{r} \times \vec{v})]_i - \sum_{ent,i} [\rho Q (\vec{r} \times \vec{v})]_j \quad (2.5)$$

Aquesta fórmula es pot aplicar amb el flux d'entrada i de sortida que s'obté amb el rotor ideal que s'ha proposat inicialment. Tenint en compte les transformacions matemàtiques del producte vectorial $\vec{r} \times \vec{v}$:

$$\vec{r} \times \vec{v} = rv \sin(90 + \alpha) = rv \cos(\alpha) \quad (2.6)$$

S'arriba a la següent equació:

$$M_{ext} = \rho Q r_2 v_2 \cos \alpha_2 - \rho Q r_1 v_1 \cos \alpha_1 \quad (2.7)$$

Multiplicant per velocitat angular (ω) a les dues bandes de l'equació i sabent que:

$$M_{ext} \omega = P = \rho g Q H_u \quad (2.8)$$

$$v_{1u} = v_1 \cos \alpha_1 \quad (2.9)$$

$$v_{2u} = v_2 \cos \alpha_2 \quad (2.10)$$

$$u_1 = \omega r_1 \quad (2.11)$$

$$u_2 = \omega r_2 \quad (2.12)$$

S'obté l'equació final d'Euler:

$$H_u = \frac{u_2 v_{2u} - u_1 v_{1u}}{g} \quad (2.13)$$

Aquesta determina l'alçada incorporada en funció de les components de velocitat tant en la sortida com a l'entrada. Aquesta equació és per a bombes hidràuliques, així que en el cas de turbines l'alçada serà negativa, per tant, l'alçada és extreta del sistema.

Si s'aplica el teorema del cosinus tenint en compte el triangle de velocitats, es pot obtenir la relació que hi ha entre la velocitat tangencial i la velocitat perifèrica. Substituint sobre l'equació d'Euler, s'obté l'equació d'Euler en la seva segona forma.

$$H_u = \frac{u_2^2 - u_1^2}{2g} + \frac{w_1^2 - w_2^2}{2g} + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} \quad (2.14)$$

Els dos primers termes de l'equació corresponen amb l'alçada de pressió aportada al fluid pel rotor. L'últim terme es correspon amb l'alçada dinàmica aportada del fluid al rotor en el cas de les turbines.

2.4.3. Alçada de pressió i alçada dinàmica del rotor

L'alçada de pressió és una mesura de l'eficiència d'una turbina hidroelèctrica. Es defineix com la diferència entre la pressió de l'aigua en la part superior de la turbina i la pressió de l'aigua en la part inferior de la turbina. Aquesta diferència de pressió es converteix en energia mecànica a través de les palanques o dents del rotor de la turbina, que fa girar el generador per produir electricitat.

$$H_p = \frac{p_1 - p_2}{\rho g} = \frac{u_2^2 - u_1^2}{2g} + \frac{w_1^2 - w_2^2}{2g} \quad (2.15)$$

L'alçada dinàmica és una mesura de l'energia potencial de l'aigua que es converteix en energia cinètica en passar a través de la turbina. Es defineix com la diferència entre l'alçada de l'aigua a la part superior de la turbina i l'alçada de l'aigua a la part inferior de la turbina. Aquesta diferència d'alçada es converteix en energia cinètica en passar a través de la turbina, que després es converteix en energia mecànica a través del rotor.

$$H_d = \frac{v_1^2 - v_2^2}{2g} \quad (2.16)$$

L'alçada de pressió i l'alçada dinàmica són importants per a la selecció i disseny de les turbines hidroelèctriques, ja que afecten la quantitat d'energia que es pot produir a partir de l'aigua. Les turbines amb una alçada de pressió i alçada dinàmica més altes tendeixen a ser més eficients i a produir més energia elèctrica que les turbines amb una alçada de pressió i alçada dinàmica més baixes.

$$H_u = H_p + H_d \quad (2.17)$$

2.4.4. Grau de reacció

El grau de reacció és un paràmetre que ens indica principalment com treballa el rodet en les turbomàquines. Segons el valor del grau de reacció, es poden observar diferents situacions.

$$\sigma = \frac{H_p}{H_u} \quad (2.18)$$

Així doncs, podem definir-lo com a la relació entre l'alçada de pressió del rodet i l'alçada hidràulica d'Euler, és a dir, la relació entre l'energia que el fluid cedeix al rodet en forma de pressió i l'energia que posteriorment se subministra a la màquina. [7]

Substituint en l'equació es veu en què en l'equació resultant, que a mesura que augmenta el radi, augmenta també el grau de reacció.

$$\sigma(r) = \frac{\frac{u_1 v_{1u} - u_2 v_{2u}}{g} - \frac{v_1^2 - v_2^2}{2g}}{\frac{u_1 v_{1u} - u_2 v_{2u}}{g}} \quad (2.19)$$

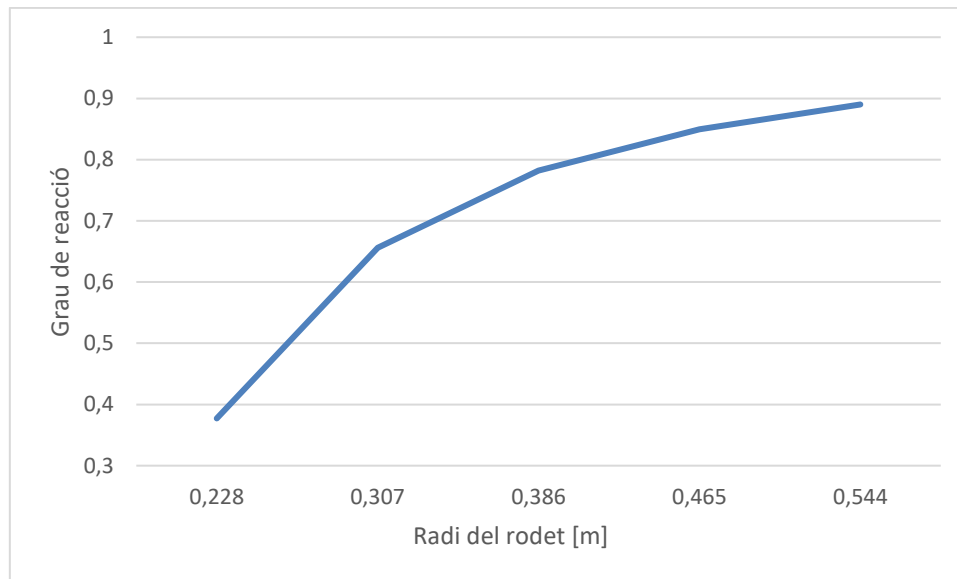


Fig. 2.16 Gràfica de relació grau reacció i radi del rodet [font pròpia]

2.4.5. Rendiment i potència

La potència teòrica un cop se sap el salt i cabal de la central ve calculada per la següent equació: [5]

$$P_{Teòrica} = QgH_n\rho \quad (2.20)$$

Amb aquesta potència teòrica es treu la potència a instal·lar tenint en compte les pèrdues per rendiment mecàniques i elèctriques.

$$P_{útil} = \frac{P_{instalada}}{\eta_{electric}} \quad (2.21)$$

$$P_{interna} = P_{útil}(2 - \eta_{mecanic}) \quad (2.22)$$

A partir de la potència interna es calculen les dades de dimensionament de la turbina. Si la potència interna fos major a la teòrica, s'hauria de reduir la potència instal·lada i tornar a comprovar.

2.4.6. Cavitació en les turbines Kaplan i mètodes per afrontar-la

La cavitació és un fenomen que es produeix en les turbines hidroelèctriques i altres tipus de maquinària que impliquen la circulació de fluids a alta velocitat. La cavitació es produeix quan la pressió del fluid disminueix per sota de la pressió de vapor i es produeixen buits o cavitats en el fluid.

Aquestes cavitats es col·lapsen ràpidament, generant ones de pressió alta que poden causar danys en les parets dels conductes o components de la màquina, com ara el rodet o la carcassa. A més, la cavitació també pot disminuir l'eficiència de la màquina i augmentar el seu desgast.

Per prevenir la cavitació, és important controlar les condicions de funcionament de la màquina, com ara la pressió i la velocitat del fluid, i utilitzar materials resistents a la cavitació en el disseny de la maquinària. També es pot fer servir tecnologies com el control de la geometria del rodet o el disseny de la carcassa per minimitzar la cavitació.

En resum, la cavitació és un fenomen complex que pot afectar negativament les turbines hidroelèctriques i altres tipus de maquinària que impliquen la circulació de fluids a alta velocitat, i és crucial prendre mesures per prevenir-lo.

Les turbines de Kaplan són les que més perill de cavitació pateixen, ja que tenen una diferència de pressió molt gran entre l'entrada i la sortida del rodet. [7]

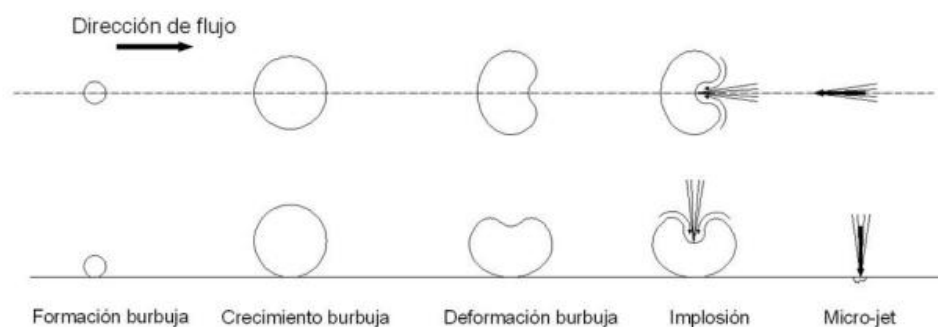


Fig. 2.17 Evolució microscòpica del fenomen de la cavitació [7]



Fig. 2.18 Destrucció per cavitació, conegut com a pitting [7]

La cavitació és un fenomen que no es pot evitar, però sí que es pot augmentar el temps fins a la seva aparició i preveure danys. Per tal d'assolir-ho s'han de cuidar certs aspectes en el disseny de la turbina, com mantenir una pressió alta sobre el perfil, evitar les arestes en les cantonades dels àleps, reduir la rugositat de les superfícies, evitar irregularitats en les unions del rodet, etc. [8][9]

Es pot conèixer a partir del cabal i de la velocitat absoluta a l'entrada de l'àlep on es produirà la cavitació dins de la superfície de l'àlep. Per això prendrem la referència de la següent imatge:

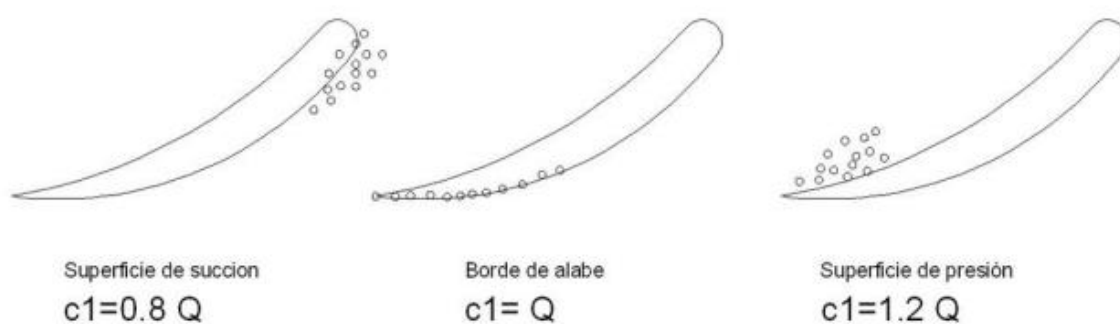


Fig. 2.19 Zones de l'àlep on es manifesta la cavitació [7]

El que més s'adequa al cas del projecte és el tercer, així que la part on més cavitació es produeix és en la part inferior de la cara superior de la pala del rodet.

Per saber l'alçada de succió òptima per tal que no aparegui cavitació, es busca inicialment el coeficient de Thoma o de cavitació, expressat a partir de la velocitat específica. Aquesta correlació ve d'unes anàlisis fetes sobre turbines instal·lades:

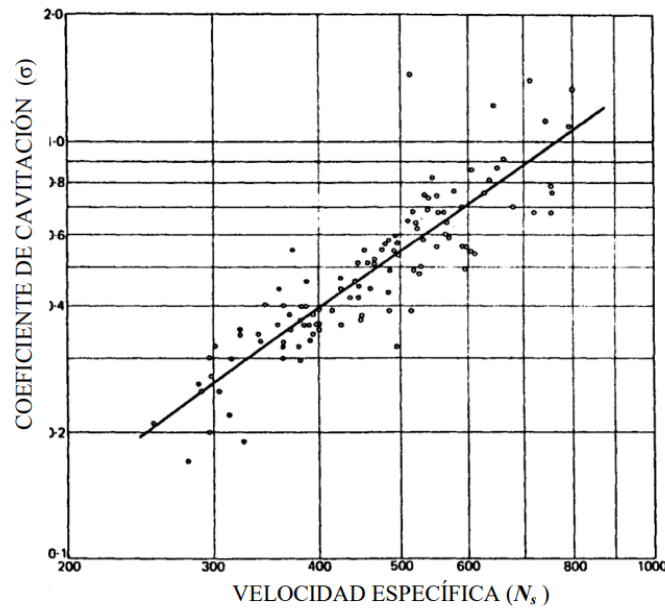


Fig. 2.20 Gràfica coeficient de cavitació i velocitat específica en turbines Kaplan [8]

$$\sigma = 6 \times 10^{-5} N_s^{1,46} \tag{2.23}$$

D'aquesta fórmula s'extreu el coeficient de cavitació.

També fa falta trobar la pressió de saturació de l'aigua:

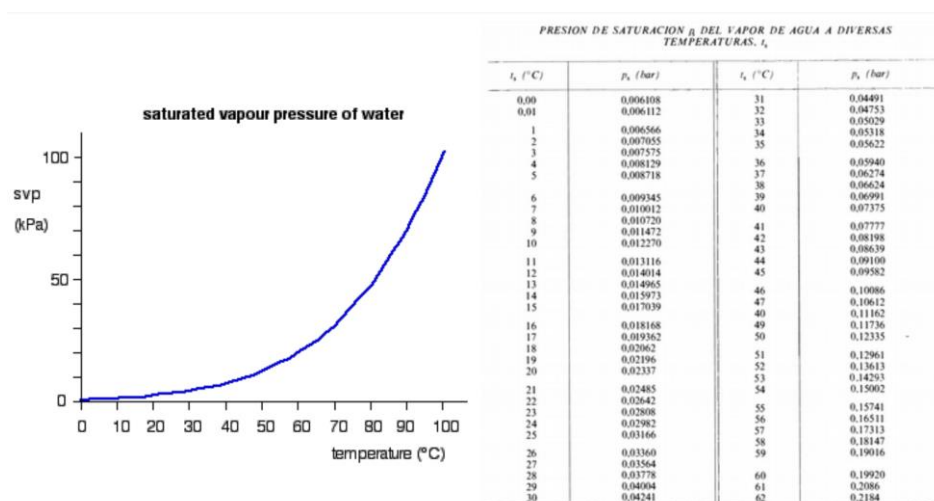


Fig. 2.21 Gràfica de relació temperatura i pressió saturació aigua [9]

Un cop es té el coeficient de cavitació i la pressió de saturació es tenen totes les dades per aplicar la següent fórmula que permet trobar l'alçada de succió màxima abans de començar a tenir problemes amb la cavitació. [10]

$$\sigma \leq \frac{\frac{p_{atm} - p_{sat}}{\rho g} - H_s}{H_n} \quad (2.24)$$

2.5. Normativa

La normativa espanyola amb relació a la construcció de centrals hidroelèctriques és regulada per la Llei de les Aigües, la Llei del Sector Elèctric i el seu Reglament, així com per la normativa ambiental, incloent-hi la Directiva d'Avaluació d'Impacte Ambiental i la Directiva d'Habitats. A més, és necessari obtenir una autorització i una concessió administrativa abans de començar la construcció, i complir amb els requisits i estàndards de qualitat i seguretat establerts per la Unió Europea.

Hi ha una norma internacional (IEC 60041 Ed 3.0) per la determinació de les diferents altures que té la màquina, sent aquest un paràmetre decisiu en la determinació de les corbes de rendiment de la turbina. Els elements mecànics es dimensionen aplicant resistència de materials, tenint en compte les condicions més desfavorables i aplicant coeficients de seguretat d'acord amb la Norma ASME VIII en els elements exposats a condicions de pressió. Un altre norma pel disseny de les turbines hidràuliques és la IEC 60609 Ed 1.0. Aquesta norma exposa els mínims necessaris perquè la turbina no es faci malbé a causa de la cavitació. La turbina ha de complir, per tant, uns paràmetres tècnics per evitar zones de cavitació i a la vegada determinar un punt de garantia, en cas d'existir tràmit de reclamació. També hi ha una normativa per a la Reglamentació d'Aparells a Pressió anomenada MIE-AP2 (BOE-A-1979-13414) que determina com han de ser les diferents canonades de líquid que hi ha a una central hidroelèctrica. La regulació de l'ús d'aigua pel seu aprofitament elèctric ve a través del BOE num. 72 de 2015, on es parla de l'article 29 de la Llei 15/2012, que es refereix a la *Ley de Aguas* d'Espanya. La llei, en l'àmbit mediambiental, que s'ha de seguir és la Llei 21/2013, del 9 de desembre, que parla de la Llei d'Avaluació d'Impacte Ambiental de projectes. També s'ha de respectar la normativa de 'Natura 2000' (Llei 42/2007 del patrimoni natural i de la

biodiversitat), ja que s'està en una zona pertanyent. Concret aquest salt d'aigua el fan servir els salmons per a pujar a deixar els seus ous més amunt. [11]

Per tal de tenir la concessió de les aigües de la zona del *Salto del Caño*, s'ha de fer una sol·licitud de delimitació del domini públic hidràulic a la *Confederacion Hidrografica del Cantabrico*. [12][13]

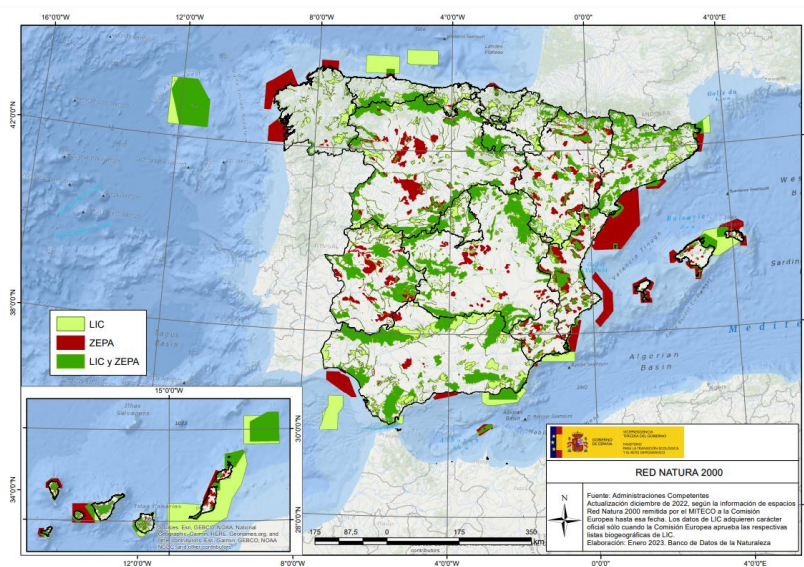


Fig. 2.22 Xarxa Natura 2000 Espanya [11]



Fig. 2.23 Rius controlats per la *Confederacion Hidrografica del Cantabrico* [14]

Per tal de donar d'alta la planta generadora d'electricitat i connectar-la a la Red de Distribució Espanola s'ha de seguir el Real decret 647/2020, de 7 de juliol, pel qual es regulen aspectes necessaris per a la implementació dels codis de xarxa de connexió de determinades

instal·lacions elèctriques. En aquest cas les instal·lacions de generació elèctrica a través d'energia hidràulica queden encapsades dins d'aquest decret. [31]

Segons l'article 8 del Reial Decret 647/2020, els MGE connectats al Sistema Elèctric Peninsular (SEPE) tenen un nivell de significativitat segons la capacitat màxima i la tensió del punt de connexió que s'estableixen a continuació: [30]

- **Tipus A:** MGE el punt de connexió del qual sigui inferior a 110 kV i la capacitat màxima del qual sigui igual o superior a 0,8 kW i igual o inferior a 100 kW.
- **Tipus B:** MGE el punt de connexió del qual sigui inferior a 110 kV i la capacitat màxima del qual sigui superior a 100 kW i igual o inferior a 5 MW.
- **Tipus C:** MGE el punt de connexió del qual sigui inferior a 110 kV i la capacitat màxima del qual sigui superior a 5 MW i igual o inferior a 50 MW.
- **Tipus D:** MGE el punt de connexió del qual sigui igual o superior a 110 kV o la capacitat màxima del qual sigui superior a 50 MW.

El titular del MGE ha de sol·licitar al GRD quatre notificacions operacionals definides a l'article 2 del Reglament (UE) 2016/631: [30]

- **Notificació Operacional d'Energització (EON):** una notificació emesa pel GRD al titular d'un MGE abans de l'energització de la seva xarxa interna.
- **Notificació Operacional Provisional (ION):** una notificació emesa pel GRD al titular d'un MGE que li permet operar mitjançant l'ús de la connexió a la xarxa durant un període de temps limitat, així com iniciar les proves de conformitat per garantir el compliment de les especificacions i dels requisits pertinents.
- **Notificació Operacional Definitiva (FON):** notificació emesa pel GRD al titular d'un MGE i li permet operar un MGE mitjançant l'ús de la connexió a la xarxa. El titular ha d'aportar el "Certificat Final de MGE" segons està definit en la Norma Tècnica de

Supervisió de la Conformitat per a generadors. Per a aquells titulars de MGE que hagin d'aportar un "Certificat Final de MGE" emès per un instal·lador autoritzat, et facilitem la següent plantilla d'exemple.

- **Notificació Operacional Limitada (LON) (DT 1a RD 647/2020):** notificació emesa pel GRD al titular d'un MGE segons la disposició transitòria primera del Reial decret 647/2020 que estableix la concessió transitòria de notificacions operacionals limitades fins a l'acreditació de compliment dels requisits derivats dels codis de xarxa de connexió europeus segons està definit en la Norma Tècnica de Supervisió de la Conformitat per a generadors.

A continuació està representat el procediment per a la posada en servei dels MGE segons el seu nivell de significativitat: [30]

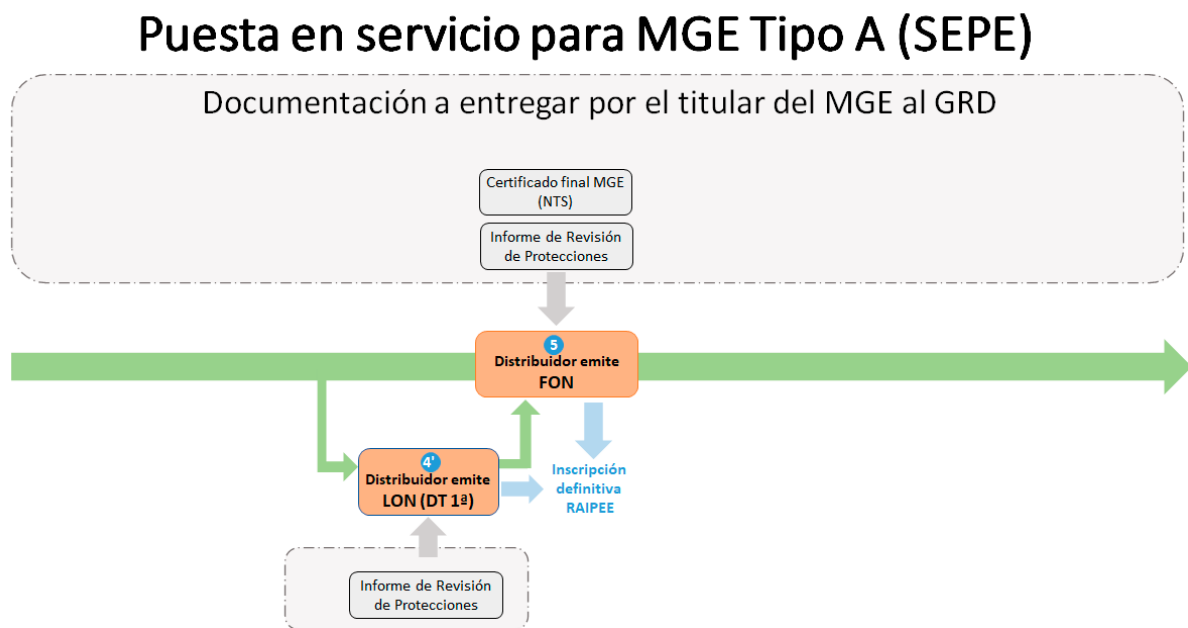


Fig. 2.24 Procediment posada en servei Tipus A [30]

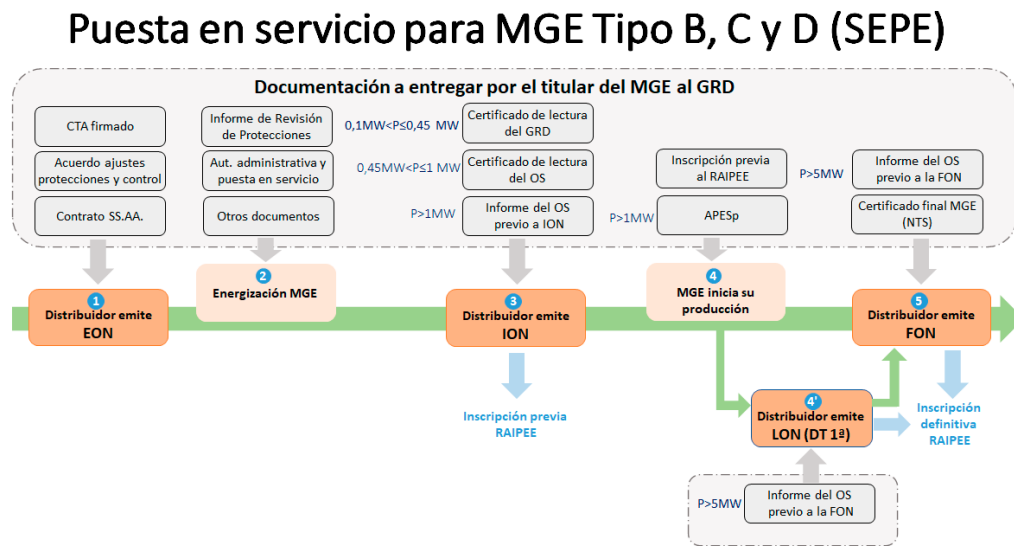


Fig. 2.25 Procediment posada en servei Tipus A [30]

Una vegada es té l'autorització i s'està connectat a la xarxa, s'ha de negociar acords de venda d'energia amb comercialitzadores d'electricitat o altres agents del mercat. Hi ha diferents formes de comercialitzar l'energia generada, com ara a través de contractes bilaterals o mitjançant subastes.

2.6. Patents

Després de diversos anys d'investigació i experimentació, Victor Kaplan va dissenyar una nova turbina hidràulica que superava algunes de les limitacions de les turbines existents en aquell moment. La patent que cobriria el que avui es coneix com la turbina Kaplan va ser l'emesa el 7 d'agost de 1913. [15]

Com que ja han passat varis anys, no hi ha problema per fer ús de la patent. Ja que passats vint anys es transforma en domini públic i qualsevol persona pot fer-ne ús lliurement. [32]

3. Objectius i especificacions tècniques

En aquest apartat es parlarà sobre els principals objectius que es volen assolir amb aquest projecte i les seves respectives especificacions tècniques per a cada un d'ells. La principal finalitat del projecte és donar energia elèctrica renovable i neta a la població d'un poble perquè siguin més autosuficients de les xarxes de transport d'electricitat.

El principal objectiu d'aquest projecte és dissenyar una turbina Kaplan per a un petit poble, com bé diu el seu nom. Per assolir aquest objectiu es valoren els següents objectius i les seves respectives especificacions.

- Objectiu 1 - Abastir d'energia elèctrica a un petit poble al costat del riu
- Objectiu 2 - Dissenyar la turbina
- Objectiu 3 - Fer simulacions de CFD amb Simscale per fer un estudi del comportament de la turbina.

Objectiu 1 - Abastir d'energia elèctrica a un petit poble al costat del riu

Abastir al poble a partir d'energia elèctrica creada en zones properes, per tal de no tenir una dependència completa de fonts d'energia provinents de fora del territori. S'ha d'escollir un poble amb les condicions geogràfiques òptimes per tal de poder fer el muntatge d'una turbina de Kaplan capaç de produir l'energia elèctrica necessària de forma renovable per a no generar residus pel medi ambient. D'aquesta manera es té un model de poble més sostenible i menys dependent d'energies fòssils no renovables.

- Buscar un riu relativament a prop d'un poble per tal de reduir el cost del transport d'energia.
- Reduir emissions al medi ambient fent ús d'energia neta gràcies a l'energia hidràulica.
- Fer un estudi de la variació del cabal del riu per tal de saber la variació de caudal que la turbina ha d'acceptar per treballar a ple rendiment.
- Estudiar les característiques geogràfiques del riu per tal de trobar un salt brut d'aigua capaç de generar l'energia desitjada.

Objectiu 2 - Dissenyar la turbina

Càlcul teòric de la geometria de la turbina junt amb la geometria que ha de tenir cadascuna de les ales de la turbina per tal d'augmentar l'eficiència.

- Calcular les mides de la turbina per tal de generar la potència desitjada.
- Determinar el grau d'orientació que ha de tenir l'àlep de la turbina per tal de poder oferir un màxim rendiment davant el cabal nominal.
- Calcular la potència elèctrica generada per la central hidroelèctrica davant de les variacions de cabal seleccionades.
- Determinar el rendiment de la turbina dissenyada davant de les variacions de cabal seleccionades.
- Fer un model 3D basat en els resultats teòrics de la turbina amb el programa Solidworks per tal de poder fer simulacions posteriors amb el programa Simscale.

Objectiu 3 - Fer simulacions de CFD amb Simscale per fer un estudi del comportament de la turbina

Utilitzar Simscale per a fer el CFD de la turbina Kaplan dissenyada, així veure la reacció que té l'aigua amb la turbina. A partir dels resultats es podran extreure diverses conclusions.

- Veure la reacció de l'aigua en impactar amb les pales de la turbina i la seva direcció durant el procés de la simulació.
- A partir de la simulació, calcular la potència generada en un cas controlat.
- Veure la velocitat de gir de rotor pel cabal seleccionat.
- Comparar els càlculs en el procés de disseny de la turbina amb els resultats que dona la simulació.
- Veure la diferència de pressió entre l'entrada de la turbina i la seva sortida, així poder veure de forma més aproximada el perill que té la cavitació en un cas real de turbina.
- Veure la pressió que patirà la turbina dissenyada.

4. Selecció de la ubicació

L'objectiu del projecte és fer una petita central hidroelèctrica capaç de produir energia per a una petita població.

Per tal que el lloc escollit tingui millor característiques per a instal·lar una central hidroelèctrica, s'ha mirat un mapa d'Espanya des del qual es pot veure on hi ha majors precipitacions d'aigua al llarg de l'any.



Fig. 4.1 Mapa d'Espanya amb representació gràfica de precipitacions [18]

En la Fig 4.1 es pot veure com la zona nord és la més afectada per les pluges al llarg de l'any, per tant, és on hi haurà més abundància de cabal al riu i més constància. Per tant, és la zona on tindrà lloc el projecte.

La zona que hem designat és molt extensa, en aquesta zona molts rius tenen característiques tècniques correctes per a la instal·lació d'una turbina hidroelèctrica. El que més s'adequava al projecte a causa del seu alt cabal i la seva estabilitat al llarg de l'any és el riu Sella, ubicat a Astúries. Té el seu naixement en els 'Picos d'Europa' i desemboca al municipi de 'Ribadesella'.

Amb aquesta instal·lació es produirà energia pel municipi de 'Cangas de Onís', amb una població de 6.260 habitants. Observant la següent gràfica s'observa les pluges i la temperatura els diferents mesos de l'any, els mesos amb menys precipitacions són el juliol, agost i el

setembre. Per aquesta raó se suposarà que durant aquests tres mesos la central hidroelèctrica no estarà en funcionament per insuficiència de cabal.

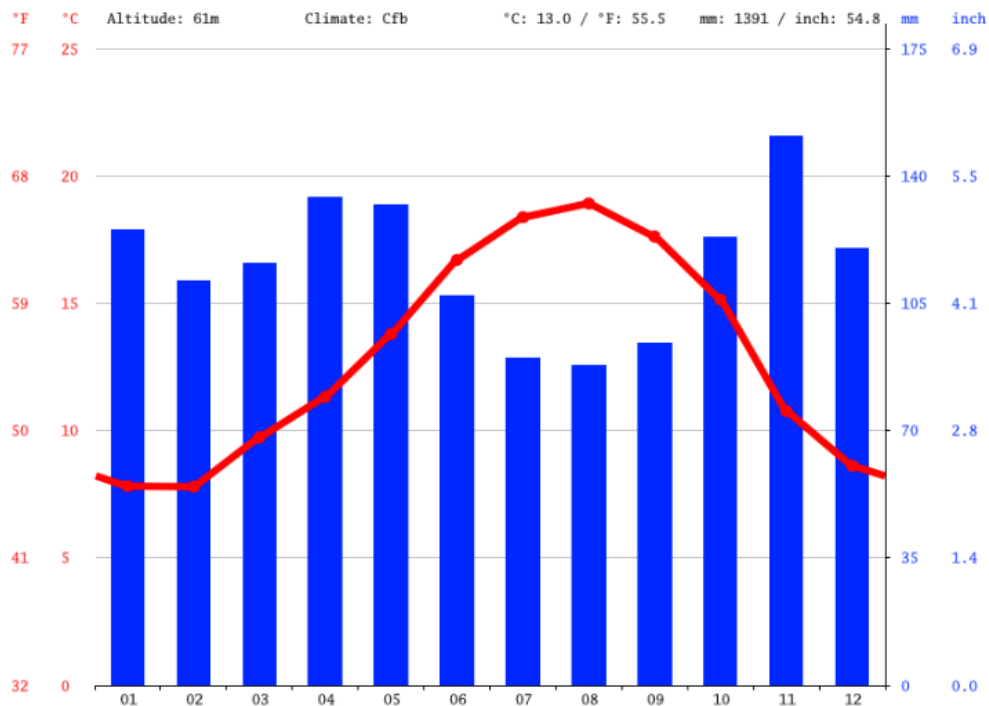


Fig. 4.2 Gràfic de pluges i temperatures mensuals al Cangues d'Onis [19]

Després de fer una recerca sobre els salts disponibles en la zona, s'ha trobat un antic salt en desús (Salto del Caño). És un salt d'aigua que en el passat ja s'ha utilitzat amb una central hidroelèctrica. Fent ús de l'Equació 4.1 s'obté la potència teòrica del salt d'aigua, així s'obté que aquesta central en funcionament, sense tenir en compte les pèrdues de rendiment, és capaç de produir una potència de 781,66 kW. Per tant, s'instal·larà un generador amb una potència de 700 kW, tenint en compte que mai s'arribarà a una potència major a causa de les pèrdues per rendiment.

$$\begin{aligned}
 P_{hidraulica} &= QgH_n\rho = 8,3 \frac{m^3}{s} * 9,81 \frac{m}{s^2} * 9,6m * 1000 \frac{kg}{m^3} \\
 &= 781,66 kW
 \end{aligned}
 \tag{4.1}$$



Fig. 4.3 Vista satèl·lit de la zona on està la central antiga [font pròpia]

En la Fig 4.3 es veu marcat amb una fletxa el lloc exacte on es trobaria la turbina, es pot veure com en el marge esquerre del riu se situa la toma del canal de derivació al costat d'assut. El canal de derivació té una capacitat màxima de $9 \text{ m}^3/\text{s}$. Al final del canal es troba la càmera de càrrega i seguidament la canonada forçada direcció a la turbina.



Fig. 4.4 Canal de derivació [2]



Fig. 4.5 Assut [2]



Fig. 4.6 Central hidràulica, de 1928 [2]

Aquesta zona té la particularitat de ser una estació de fresa de salmons, per tant, s'ha de deixar un recorregut perquè puguin pujar si volen, això, fa que no es pugui aprofitar el 100% del cabal. Es pot observar en el fons de la Fig 4.5, on estan construïdes una mena d'escalas perquè els salmons pugui pujar.

Les dades de l'antiga central són: [2]

Municipi i Província: Cangas d'Onís (Astúries)

Lloc: Puente del Caño

Coordenades: X: 326.542,0150 Y: 4.798.987,7358 Z: 92,8(U.T.M: ETRS 89)

Tipus de central: Fluent

Temperatura mitjana de l'aigua: 13 °C

Cabal mitja: 8,3 m³/s

Desnivell (Hb) : 12 m (Hn=9,6 m)

4.1. Consum del municipi

En aquest apartat es farà un petit estudi sobre el consum elèctric que té el municipi de Cangas d'Onís.

Com que no hi ha dades específiques del consum del municipi, s'agafaran dades generals d'Espanya. Per fer els càlculs es tindrà en compte que hi viuen 6260 habitants, hi ha un centre de salut, un col·legi/institut i també s'ha decidit tenir en compte que hi ha 161 locals d'hostaleria. [20][21][24]

Segons dades de l'Ajuntament del municipi, hi ha actualment 2709 habitatges actius a Cangas d'Onís. Tenint en compte que el consum mitja mensual d'Espanya és de 270 kWh per habitatge, s'arriba a la conclusió de què hi ha un consum anual en habitatges de 9,46 GWh. [25][26]

En els centres de salut el consum mitjà es calcula de forma aproximada segons els llits que hi ha a l'hospital. Sabent que la mitja espanyola de llits d'hospital per cada 1000 habitants és de 3,01, s'arriba a la conclusió que el centre de salut del municipi compta amb 19 llits. A cada llit se li associa un consum anual de 29199 kWh anual, per tant, el consum elèctric anual de l'hospital seria aproximadament de 554,781 MWh. [22][23]

El col·legi/institut té una superfície construïda de 2553 m², sabent que el consum anual mig per metre quadrat d'escola és de 26,24 kWh. Es calcula que l'escola del municipi té un consum anual aproximat de 93,23 MWh. [24][27][28]

Per últim, es tindrà en compte el consum dels establiments d'hostaleria, ja que són els que predominen per diferència en el municipi. Tenint en compte locals amb una cuina d'una àrea normal (20-30m²) i un consum de 300 kWh/m², s'obté una energia anual consumida de 6 MWh

per local. Sabent que actualment hi ha 161 locals, el consum total aproximat del sector de l'hostaleria seria de 966 MWh. [29]

Sumant totes les dades obtingudes s'obté una aproximació del consum elèctric anual del municipi d'**11,074 GWh**.

Sabent el consum del municipi podem dir que, la instal·lació de la central tindria un gran impacte en el municipi, ja que té la capacitat de proporcionar gairebé un 60% d'energia que es consumeix, tenint en compte que en els mesos de juliol, agost i setembre la central no estaria en funcionament per falta de pluges/cabal.

5. Disseny de la turbina

En aquest apartat es mostrarà el mètode seguit per dissenyar la turbina. S'han fet càlculs per al cabal de $8,3 \frac{m^3}{s}$ (per tal d'obtenir el màxim rendiment de la turbina Fig 2.9), amb una altura neta de 9,6 m, tal com en les dades de l'antiga central indica.

En el tercer punt dels annexos es mostren els resultats dels càlculs per a cabals diferents a l'anteriorment comentat.

A continuació es procedirà a mostrar els càlculs.

5.1. Càlcul de potència

Per trobar la potència teòrica de la central s'aplica l'equació (5.1). Suposant una potència instal·lada en l'equació (5.2) i tenint en compte les pèrdues elèctriques i mecàniques, en el cas de la nostra central, s'agafa un 4% de pèrdues elèctriques i un 6% de mecàniques. Són els valors entremitjos en les turbines hidràuliques. Amb l'equació (5.3) troba la potència interna, la potència mínima que s'ha de generar per transformar energia amb la potència instal·lada.

$$P_{hidraulica} = QgH_n\rho = 8,3 \frac{m^3}{s} * 9,81 \frac{m}{s^2} * 9,6m * 1000 \frac{kg}{m^3} \quad (5.1)$$

$$= 781,66 kW$$

$$P_{útil} = \frac{P_{instalada}}{\eta_{electric}} = \frac{700 kW}{0,96} = 729,16 kW \quad (5.2)$$

$$P_{interna} = P_{útil}(2 - \eta_{mecanic}) = 729,16 kW * (2 - 0,94) \quad (5.3)$$

$$= 772,92 kW$$

5.2. Càlcul d'alçada de saturació

Per a trobar l'alçada de saturació primer es busca l'índex de saturació a partir de l'equació (5.4) amb el valor de les revolucions específiques, calculat en l'equació (5.62) més endavant.

El resultat de la segona equació dirà a quina alçada ha d'estar la turbina respecte del nivell d'aigua de la sortida del tub d'aspiració.

$$\sigma = 6 \times 10^{-5} n_{\text{especific}}^{1,46} = 6 \times 10^{-5} * 693,17 \text{ rpm}^{1,46} = 0,843 \quad (5.4)$$

$$H_s = \frac{p_{\text{atm}} - p_{\text{sat}}}{\rho g} - \sigma H_n = \frac{101325 \text{ Pa} - 15 \text{ Pa}}{1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} - 0,843 * 9,6 \text{ m} = 2,23 \text{ m} \quad (5.5)$$

Amb aquest càlcul es demostra que el salt net té un valor estimat de 9,6m ($12\text{m} - 2,23\text{m} \approx 9,6\text{m}$).

5.3. Càlcul teòric del rodet

En aquest apartat s'obtenen els radis intern i extern del rodet, així com els angles d'entrada i sortida dels àleps, del rodet. Això serà possible fent ús de l'Equació d'Euler. Addicionalment, també cal destacar, que per a aquesta primera part es farà ús de la teoria dels àleps infinits per simplificar la resolució de les equacions d'Euler.

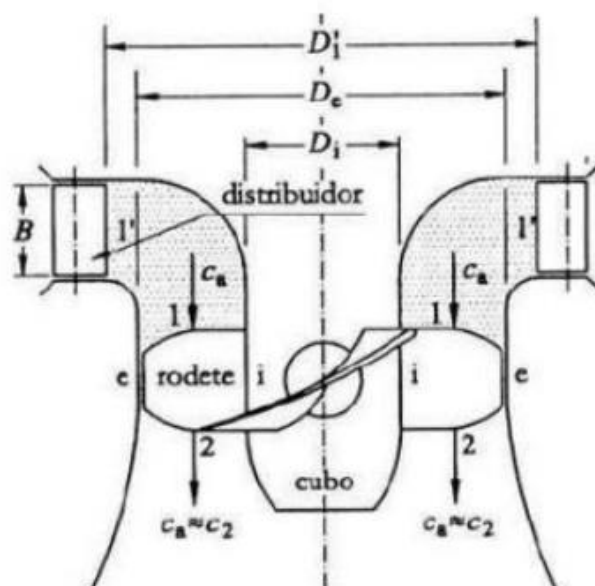


Fig. 5.1 Dimensions del rodet [5]

Gràcies als estudis fets per Adolph i F. Schweiger, es pot escollir una relació geomètrica entre el diàmetre exterior i interior del rodet. Els valors han de trobar-se entre 0,35 i 0,67 per a un correcte funcionament de la màquina. En aquest cas s'escollirà un valor de 0,42 (5.6). Un altre valor serà el coeficient de proporcionalitat, que defineix la relació entre energia cinètica i energia de pressió. Aquest valor s'ha de trobar entre 0,35 i 0,45. En aquest cas s'escollirà un valor de 0,375 (5.7). Aquests valors s'han escollit respectant que han de trobar-se entre els marges preestablerts.

$$v = \frac{D_{interior}}{D_{exterior}} = 0,42 \quad (5.6)$$

$$\xi = \frac{E_{cinetica}}{E_{pressió}} = 0,375 \quad (5.7)$$

Amb aquests valors escollits es pot calcular el primer paràmetre necessari, la velocitat absoluta de l'aigua a l'entrada de la turbina.

$$C_1 = \sqrt{H_n * 2 * g * (1 - \xi)} = \sqrt{9,6m * 2 * 9,81 \frac{m}{s^2} * (1 - 0,375)} = 10,85 \text{ m/s} \quad (5.8)$$

Com que el disseny és d'una turbina de Kaplan, la velocitat tangencial del rodet serà igual a l'entrada que a la sortida. Ara es procedeix al càlcul de la velocitat tangencial, per a aquest càlcul fa falta l'ús del coeficient K_u amb un valor d'1,5.

$$u \approx K_u \sqrt{H_n * 2 * g} = 1,5 \sqrt{9,6 \text{ m} * 2 * 9,81 \frac{m}{s^2}} = 20,59 \text{ m/s} \quad (5.9)$$

Un cop obtinguda la velocitat tangencial, ja es poden calcular els diàmetres del rodet. Per assolir-les fa falta un sistema d'equacions amb l'equació del cabal i les equacions d'Euler, també es farà ús de les relacions geomètriques en el triangle de velocitats. Amb aquest sistema s'aconseguirà el diàmetre exterior i l'angle alfa d'entrada, però amb la relació entre diàmetres dita al principi es podrà assolir també el diàmetre interior.

Substituint les relacions geomètriques dels triangles de velocitat sobre l'equació d'Euler i la del cabal s'obté el següent sistema:

$$P_{interna} = Q * \rho * \frac{u}{2} * \left[\frac{D_e}{2} * C_1 * \cos(\alpha_1) \right] \quad (5.10)$$

$$Q = \frac{\pi}{4} * [D_e^2 - (D_e * v)^2] * C_1 * \sin(\alpha_1) \quad (5.11)$$

Es tenen dues equacions amb dues incògnites, per tant, el resultat és:

$$D_e = 1,09 \text{ m} \quad (5.12)$$

$$\alpha_1 = 65,36^\circ \quad (5.13)$$

Fent ús de la relació geomètrica entre diàmetres s'obté:

$$D_i = 0,46 \text{ m} \quad (5.14)$$

El següent pas serà obtenir els angles beta. A partir del triangle de velocitats i concretament de les velocitats absolutes, les seves projeccions i les velocitats tangencials, s'obtenen les següents equacions:

$$\beta_1 = \tan^{-1} \left[\frac{C_1 * \sin(\alpha_1)}{u - C_1 \cos(\alpha_1)} \right] = 31,55^\circ \quad (5.15)$$

$$\beta_2 = \tan^{-1} \left[\frac{C_1 * \sin(\alpha_1)}{u} \right] = 25,6^\circ \quad (5.16)$$

Finalment, s'obté la velocitat angular fent ús de la velocitat tangencial i així obtenir la velocitat angular específica del cabal:

$$w = \frac{u}{\frac{D_e}{2}} = 37,86 \text{ rad} \quad (5.17)$$

$$n = \frac{w * 30}{\pi} = 361,54 \text{ rpm} \quad (5.18)$$

$$n_{cabal} = \frac{n * \sqrt{Q}}{\sqrt[4]{H_n^3}} = 190,98 \text{ rpm} \quad (5.19)$$

5.4. Càlcul dels perfil alar

Per tal de tenir més precisió en el disseny dels àleps, s'ha optat per separar-los en 5 seccions equidistants. D'aquesta manera aconseguint un model matemàticament més correcte i, per tant, obtenir una eficiència més alta. Es tindran dues seccions a una distància respecte al centre igual al radi interior i el radi exterior, les altres 3 seccions estaran entre aquest dos.

El que es farà inicialment serà calcular la separació entre seccions:

$$R_i = \frac{D_i}{2} = 0,228 \text{ m} \quad (5.20)$$

$$R_e = \frac{D_e}{2} = 0,544 \text{ m} \quad (5.21)$$

$$\Delta R = \frac{R_e - R_i}{4} = 0,079 \text{ m} \quad (5.22)$$

$$R_1 = R_i + \Delta R = 0,307 \text{ m} \quad (5.23)$$

$$R_2 = R_1 + \Delta R = 0,386 \text{ m} \quad (5.24)$$

$$R_3 = R_2 + \Delta R = 0,465 \text{ m} \quad (5.25)$$

A partir d'ara, cada cop que es calculi un angle o una velocitat, es calcularà per a cada secció.

Primer de tot es calcula la velocitat tangencial d'entrada, aquest pas és necessari per poder començar a fer els altres càlculs:

$$u_{1i} = R_i * \omega = 8,65 \text{ m/s} \quad (5.26)$$

$$u_{11} = R_1 * \omega = 11,63 \text{ m/s} \quad (5.27)$$

$$u_{12} = R_2 * \omega = 14,62 \text{ m/s} \quad (5.28)$$

$$u_{13} = R_3 * \omega = 17,60 \text{ m/s} \quad (5.29)$$

$$u_{1e} = R_e * \omega = 20,59 \text{ m/s} \quad (5.30)$$

Un cop obtingudes les velocitats tangencials d'entrada i, per tant, també de sortida, es calculen les velocitats absolutes d'entrada. Per poder fer els càlculs fa falta calcular abans el rendiment hidràulic de la turbina, ja que forma part de l'equació:

$$C1_{ue} = C1_e * \cos(\alpha_1) = 4,52 \text{ m/s} \quad (5.31)$$

$$\eta_{hidraulic} = \frac{u_{1e} * C1_{ue}}{H_n * g} * 100 = 98,88 \% \quad (5.32)$$

$$C1_{ui} = \frac{H_n * g * \eta_{hidraulic}}{u_{1i}} = 10,77 \text{ m/s} \quad (5.33)$$

$$C1_{u1} = \frac{H_n * g * \eta_{hidraulic}}{u_{11}} = 8,00 \text{ m/s} \quad (5.34)$$

$$C1_{u2} = \frac{H_n * g * \eta_{hidraulic}}{u_{12}} = 6,37 \text{ m/s} \quad (5.35)$$

$$C1_{u3} = \frac{H_n * g * \eta_{hidraulic}}{u_{13}} = 5,29 \text{ m/s} \quad (5.36)$$

Amb aquests resultats es poden calcular ara els angles alfa de cada secció, només s'han de calcular els d'entrada, ja que els de sortida, com ja s'ha vist a la teoria, són de 90°. Les equacions per calcular els angles alfa d'entrada són les següents:

$$\alpha_{1i} = \cos^{-1}\left(\frac{C1_{ui}}{C1_e}\right) = 6,94^\circ \quad (5.37)$$

$$\alpha_{11} = \cos^{-1}\left(\frac{C1_{u1}}{C1_e}\right) = 42,44^\circ \quad (5.38)$$

$$\alpha_{12} = \cos^{-1}\left(\frac{C1_{u2}}{C1_e}\right) = 54,04^\circ \quad (5.39)$$

$$\alpha_{13} = \cos^{-1}\left(\frac{C1_{u3}}{C1_e}\right) = 60,82^\circ \quad (5.40)$$

$$\alpha_{1e} = \cos^{-1}\left(\frac{C1_{ue}}{C1_e}\right) = 65,36^\circ \quad (5.41)$$

Es calculen ara els angles beta d'entrada:

$$\beta_{1i} = \tan^{-1} \left[\frac{C1_e}{u_{1i} - C1_{u1i}} \right] = 77,84^\circ \quad (5.42)$$

$$\beta_{11} = \tan^{-1} \left[\frac{C1_e}{u_{11} - C1_{u11}} \right] = 69,82^\circ \quad (5.43)$$

$$\beta_{12} = \tan^{-1} \left[\frac{C1_e}{u_{12} - C1_{u12}} \right] = 50,10^\circ \quad (5.44)$$

$$\beta_{13} = \tan^{-1} \left[\frac{C1_e}{u_{13} - C1_{u13}} \right] = 38,69^\circ \quad (5.45)$$

$$\beta_{1e} = \tan^{-1} \left[\frac{C1_e}{u_{1e} - C1_{u1e}} \right] = 31,55^\circ \quad (5.46)$$

Com es pot veure en els resultats, l'angle beta de decreixent fins a arribar al seu mínim valor en la secció més allunyada. Això és molt important, ja que això permet que no es generin zones de turbulència de fluid, que produiria una baixada de rendiment.

A continuació es calculen els angles beta de sortida:

$$\beta_{2i} = \tan^{-1} \left[\frac{C1_e}{u_{1i}} \right] = 48,76^\circ \quad (5.47)$$

$$\beta_{21} = \tan^{-1} \left[\frac{C1_e}{u_{11}} \right] = 40,29^\circ \quad (5.48)$$

$$\beta_{22} = \tan^{-1} \left[\frac{C1_e}{u_{12}} \right] = 34,01^\circ \quad (5.49)$$

$$\beta_{23} = \tan^{-1} \left[\frac{C1_e}{u_{13}} \right] = 29,26^\circ \quad (5.50)$$

$$\beta_{2e} = \tan^{-1} \left[\frac{C1_e}{u_{1e}} \right] = 25,59^\circ \quad (5.51)$$

Ara es calcularan les velocitats relatives del fluid respecte del rodet. Aquest càlcul serveix per comprovar que els càlculs tenen coherència i que els càlculs corresponen als d'una turbina:

$$w_{1i} = \frac{C1_e}{\sin(\beta_{1i})} = 10,09 \text{ m/s} \quad (5.52)$$

$$w_{11} = \frac{C1_e}{\sin(\beta_{11})} = 10,51 \text{ m/s} \quad (5.53)$$

$$w_{12} = \frac{C1_e}{\sin(\beta_{12})} = 12,85 \text{ m/s} \quad (5.54)$$

$$w_{13} = \frac{C1_e}{\sin(\beta_{13})} = 15,77 \text{ m/s} \quad (5.55)$$

$$w_{1e} = \frac{C1_e}{\sin(\beta_{1e})} = 18,85 \text{ m/s} \quad (5.56)$$

$$w_{2i} = \frac{C1_e}{\sin(\beta_{2i})} = 13,12 \text{ m/s} \quad (5.57)$$

$$w_{21} = \frac{C1_e}{\sin(\beta_{21})} = 15,25 \text{ m/s} \quad (5.58)$$

$$w_{22} = \frac{C1_e}{\sin(\beta_{22})} = 17,63 \text{ m/s} \quad (5.59)$$

$$w_{23} = \frac{C1_e}{\sin(\beta_{23})} = 20,18 \text{ m/s} \quad (5.60)$$

$$w_{2e} = \frac{C1_e}{\sin(\beta_{2e})} = 22,83 \text{ m/s} \quad (5.61)$$

Ara queda calcular les dimensions estructurals, tals com l'alçada dels àleps o el nombre d'àleps que tindrà. Per fer aquests càlculs el primer que s'ha d'obtenir són les revolucions específiques.

$$n_{especifiques} = 3,65 * \sqrt{\eta_{Hidraulic}} * n_{cabal} = 693,17 \text{ rpm} \quad (5.62)$$

Pels càlculs de continuació s'utilitzaran les equacions obtingudes per F. De Leva i F. de Siervo en els seus estudis sobre una gran quantitat de turbines. Les equacions són les següents:

$$H_m = 6,94 * D_e * n_{especifiques}^{-0,403} = 0,541 \text{ m} \quad (5.63)$$

$$H_1 = (0,38 + (5,17 * 10^{-5}) * n_{especifiques}) D_e = 0,452 \text{ m} \quad (5.64)$$

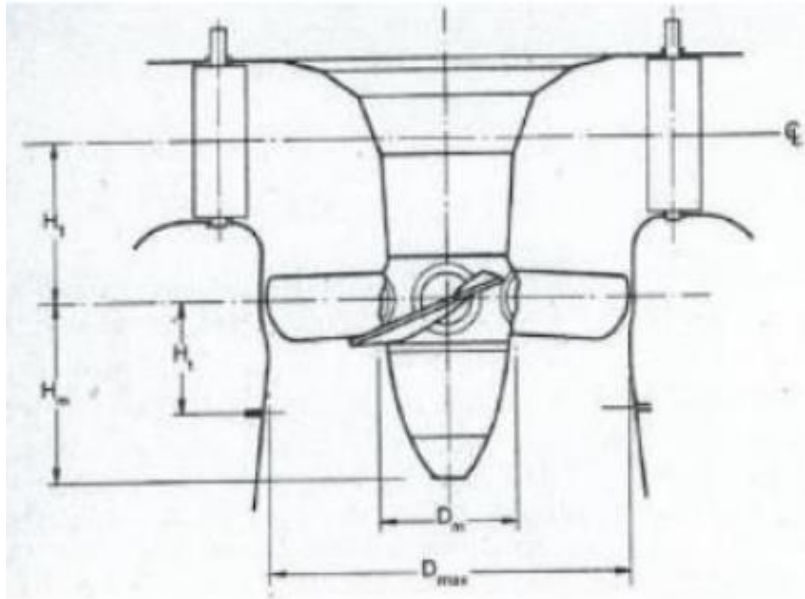


Fig. 5.2 Resta de dimensions del rodet [5]

L'alçada del rodet, serà, per tant:

$$H_a = \frac{H_m + H_1}{3} = 0,331 \text{ m} \quad (5.65)$$

Ara es calcula l'espai que ocupa cada àlep al llarg del diàmetre exterior i posteriorment es calcula el nombre d'àleps que te la turbina:

$$\text{espaiat} = \frac{H_a}{\tan(\beta_{1e})} = 0,539 \text{ m} \quad (5.66)$$

$$Z = \frac{\pi * D_e}{\text{espaiat}} \approx 6 \text{ alabs} \quad (5.67)$$

Per acabar amb aquest apartat es calcularan la corda dels àleps en cada secció:

$$L_i = \sqrt{H_a^2 + \left(\frac{H_a}{2 * \sin(\beta_{1i})} + \frac{H_a}{2 * \sin(\beta_{2i})} \right)^2} = 0,511 \text{ m} \quad (5.68)$$

$$L_1 = \sqrt{H_a^2 + \left(\frac{H_a}{2 * \sin(\beta_{11})} + \frac{H_a}{2 * \sin(\beta_{21})} \right)^2} = 0,544 \text{ m} \quad (5.69)$$

$$L_2 = \sqrt{H_a^2 + \left(\frac{H_a}{2 \cdot \sin(\beta_{12})} + \frac{H_a}{2 \cdot \sin(\beta_{22})} \right)^2} = 0,609 \text{ m} \quad (5.70)$$

$$L_3 = \sqrt{H_a^2 + \left(\frac{H_a}{2 \cdot \sin(\beta_{13})} + \frac{H_a}{2 \cdot \sin(\beta_{23})} \right)^2} = 0,688 \text{ m} \quad (5.71)$$

$$L_e = \sqrt{H_a^2 + \left(\frac{H_a}{2 \cdot \sin(\beta_{1e})} + \frac{H_a}{2 \cdot \sin(\beta_{2e})} \right)^2} = 0,774 \text{ m} \quad (5.72)$$

Fent ús d'aquestes dades calculades es podrà fer el model 3D dels àleps amb SolidWorks.

	D_i	D₁	D₂	D₃	D_e	UNITATS
D	456,744	614,429	772,115	929,800	1.087,485	m
U	8,646	11,631	14,616	17,601	20,586	m/s
cu₁	10,770	8,006	6,371	5,291	4,524	m/s
w_{1u}	10,088	10,507	12,854	15,774	18,849	m/s
w_{2u}	13,115	15,249	17,632	20,176	22,827	m/s
Δwu	3,027	4,742	4,778	4,402	3,978	m/s
α₁	6,943	42,446	54,041	60,815	65,360	Graus
β₁	77,845	69,818	50,103	38,698	31,548	Graus
β₂	48,758	40,294	34,009	29,262	25,597	Graus
L	0,335	0,544	0,609	0,688	0,774	m

Taula 5.1 Dades teòriques [font pròpia]

A partir de les dades que hi ha dins de la taula superior i la fórmula d'Euler, la potència teòrica que tindrà la turbina amb les operacions fetes i les dades extretes s'obté de la següent forma:

$$P_{turbina} = V(u_1 c_{u1} - u_2 c_{u2}) = Vu \Delta w_u \quad (5.73)$$

$$V = \rho A c_0 = \rho \frac{1}{4} \pi (D_e^2 - D_i^2) c_0 \quad (5.74)$$

$$P_{turbina} = \rho \frac{1}{4} \pi (D_e^2 - D_i^2) c_1 U \Delta w_u \quad (5.75)$$

$$P_{turbina} = 1000 \frac{kg}{m^3} \frac{1}{4} \pi (1,087 m^2 - 0,457 m^2) 10,85 \frac{m}{s} * 14,616 \frac{m}{s} * 4,778 \frac{m}{s} \quad (5.76)$$

$$P_{turbina} = 579,013 kW \quad (5.77)$$

L'eficiència teòrica és definida per:

$$\eta = \frac{P_{turbina}}{P_{hidraulica}} 100 = 74,1\% \quad (5.78)$$

Això confirma la precisió dels càlculs teòrics. Més endavant aquestes dades teòriques són comparades amb el CFD, això es fa analitzant un model 3D de la turbina fet amb les característiques calculades i simulant-ho a un simulador de CFD.

5.5. Càlcul teòric de la geometria de la carcassa de la turbina

Càlculs per a trobar la geometria de la carcassa de la turbina. L'objectiu d'aquesta part de la turbina és convertir força de pressió de l'aigua en velocitat per a la turbina. És una part molt important i requereix tenir un càlcul precís de les dimensions. Les equacions que s'han fet servir per fer els càlculs de les dimensions són obtingudes per F. de Leva i F. de Siervo a partir d'un meticulós estudi experimental desenvolupat sobre una gran quantitat de turbines Kaplan. D'aquest estudi s'extreuen les següents correlacions per una carcassa d'acer.

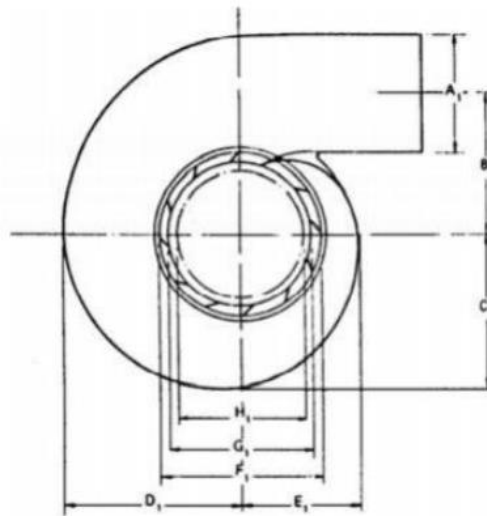


Fig. 5.3 Dimensions de la carcassa espiral [5]

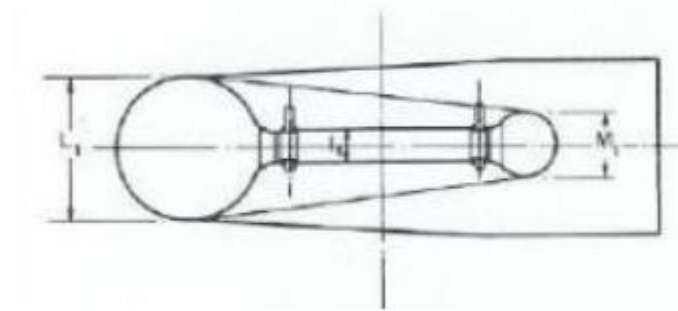


Fig. 5.4 Resta dimensions de la carcassa espiral [5]

$$n_{especifica} = 693,17 \text{ rpm} \quad (5.79)$$

$$A = (0,4 * n_{especifica}^{0,2}) * D_e = 1,609 \text{ m} \quad (5.80)$$

$$B = (1,26 + 3,79 * 10^{-4} * n_{especifica}) * D_e = 1,656 \text{ m} \quad (5.81)$$

$$C = (1,46 + 3,24 * 10^{-4} * n_{especifica}) * D_e = 1,832 \text{ m} \quad (5.82)$$

$$D = (1,59 + 5,74 * 10^{-4} * n_{especifica}) * D_e = 2,162 \text{ m} \quad (5.83)$$

$$E = (1,21 + 2,71 * 10^{-4} * n_{especifica}) * D_e = 1,520 \text{ m} \quad (5.84)$$

$$F = \left(1,45 + \frac{72,17}{n_{\text{específica}}} \right) * D_e = 1,690 \text{ m} \quad (5.85)$$

$$G = \left(1,29 + \frac{41,63}{n_{\text{específica}}} \right) * D_e = 1,468 \text{ m} \quad (5.86)$$

$$H = \left(1,13 + \frac{31,86}{n_{\text{específica}}} \right) * D_e = 1,279 \text{ m} \quad (5.87)$$

$$I = \left(0,45 - \frac{31,8}{n_{\text{específica}}} \right) * D_e = 0,539 \text{ m} \quad (5.88)$$

$$L = (0,74 + 8,7 * 10^{-4} * n_{\text{específica}}) * D_e = 1,460 \text{ m} \quad (5.89)$$

$$M = \frac{D_e}{(2,06 - 1,2 * 10^{-3} * n_{\text{específica}})} = 0,885 \text{ m} \quad (5.90)$$

Els càlculs de les dimensions del tub d'aspiració es basen sobre nombrosos estudis realitzats sobre turbines Kaplan. Amb el diàmetre exterior i la velocitat específica es poden obtenir els paràmetres.

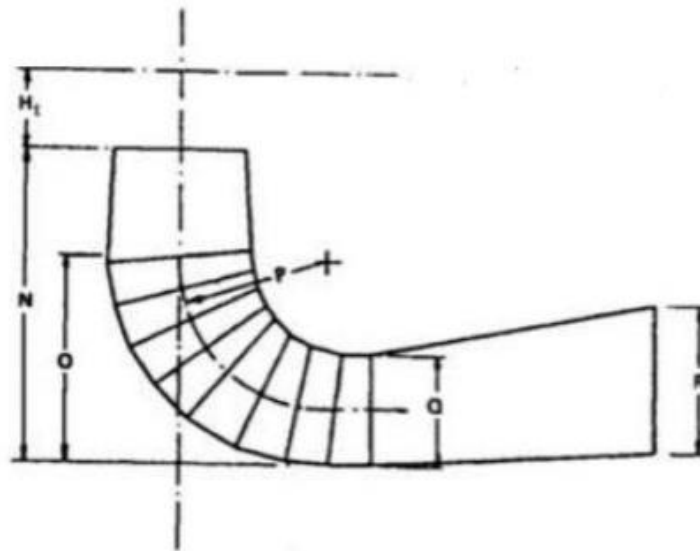


Fig. 5.5 Dimensions tub d'aspiració [5]

$$N = (2 - 2,14 * 10^{-6} * n_{especifica}) * D_e = 2,173 \text{ m} \quad (5.91)$$

$$O = (1,4 - 1,67 * 10^{-5} * n_{especifica}) * D_e = 1,509 \text{ m} \quad (5.92)$$

$$P = \left(1,26 - \frac{16,35}{n_{especifica}}\right) * D_e = 1,344 \text{ m} \quad (5.93)$$

$$Q = \left(0,66 - \frac{18,4}{n_{especifica}}\right) * D_e = 0,689 \text{ m} \quad (5.94)$$

$$R = (1,25 - 1,67 * 10^{-5} * n_{especifica}) * D_e = 1,347 \text{ m} \quad (5.95)$$

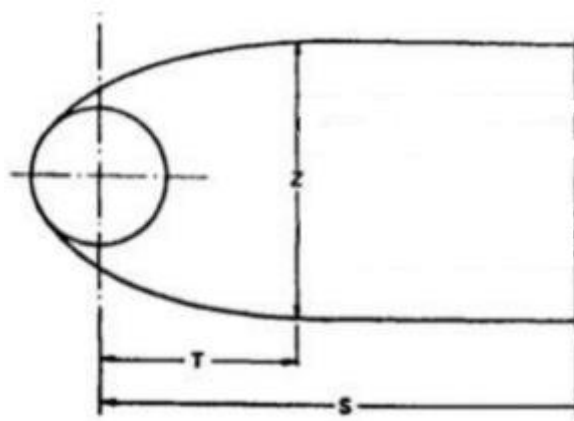


Fig. 5.6 Dimensions tub d'aspiració [5]

$$S = \left(4,26 - \frac{201,51}{n_{especifica}}\right) * D_e = 4,948 \text{ m} \quad (5.96)$$

$$T = (1,2 + 5,12 * 10^{-4} * n_{especifica}) * D_e = 1,690 \text{ m} \quad (5.97)$$

$$Z = \left(2,58 + \frac{102,66}{n_{especifica}}\right) * D_e = 2,967 \text{ m} \quad (5.98)$$

A[m]	1,60935322
B[m]	1,6559264
C[m]	1,83196375
D[m]	2,16178999
E[m]	1,52014037
F[m]	1,69007801
G[m]	1,46816748
H[m]	1,27884211
I[m]	0,53925801
L[m]	1,46055607
M[m]	0,88543337
N[m]	2,17335733
O[m]	1,50989067
P[m]	1,3445806
Q[m]	0,68887329
R[m]	1,34676789
T[m]	1,69093436
S[m]	4,9488275
Z[m]	2,96677078

Taula 5.2 Dimensions de l'estructura [font pròpia]

5.6. Càlcul de la coberta cònica

La coberta cònica és l'encarregada de facilitar l'evacuació de l'aigua per tal d'augment l'eficiència. Per tal d'obtenir la seva forma s'ha de calcular la corba.

Primer s'hauran de fer una aproximació en el següent valor (5.90). Amb aquest valor aproximat més Hm es pot fer l'equació (5.91) i obtenir Hm' .

$$\Delta i = 0,1125 \text{ m} \quad (5.99)$$

$$Hm' = Hm - \Delta i = 0,428 \text{ m} \quad (5.100)$$

Ara l'equació parabòlica quedarà definida de la següent forma:

$$A * X^2 + B * X + C = 0,428 \quad (5.101)$$

Per tal de trobar les incògnites de l'equació s'estableixen condicions de contorn conegudes ($X=Di/2$), condicionant la paràbola a l'eix de coordenades queda:

$$A * X^2 = 0,428 \quad (5.102)$$

$$A = 8,209 \rightarrow Y = 8,209 * X^2 \quad (5.103)$$

La corba que dona forma a la coberta cònica seria, per tant:

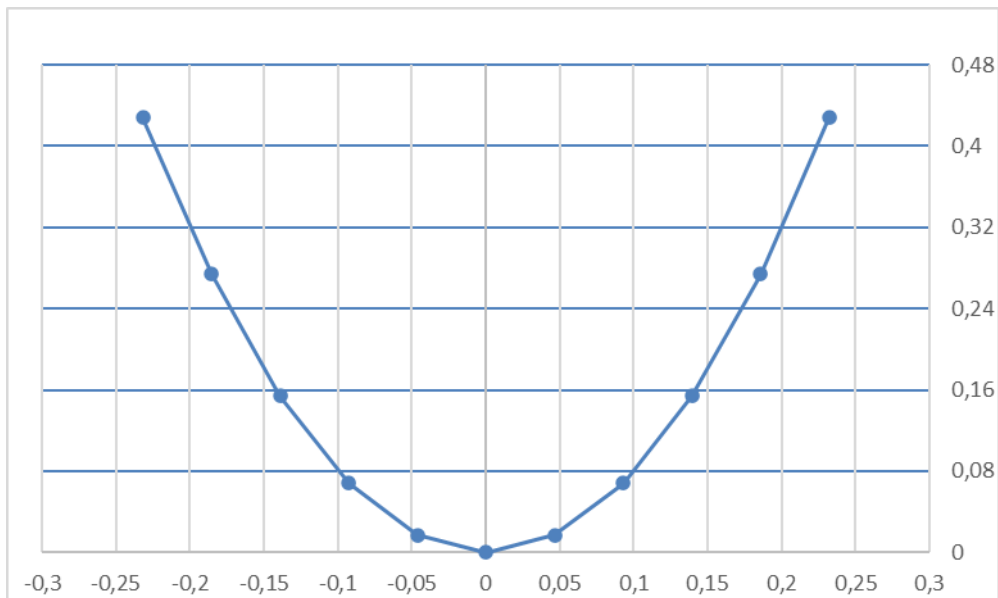


Fig. 5.7 Corba de la coberta cònica [font pròpia]

5.7. Disseny del perfil alar en SolidWorks

En aquest apartat es farà una explicació del procés d'obtenció del model de la turbina en SolidWorks.

Fent ús dels càlculs anteriorment realitzats es pot crear un programa en Python per tal de crear un arxiu amb coordenades que formen el perfil alar desitjat, d'aquesta manera poder-ho exportar en forma de CURVA XYZ en SolidWorks. Aquest programa es troba en el primer punt dels annexos explicat.

```
1  #!/usr/bin/python
2  import math
3
4  filenameNaca = "goe248.txt"
5  filenameData = "ala.txt"
6
7  nacaCoords = []
8  aerofoil = []
9
10 with open(filenameNaca) as f:
11     for line in f:
12         nacaCoords.append([float(n) for n in line.strip().split(' ')])
13
14 with open(filenameData) as f:
15     for line in f:
16         aerofoil.append([float(n) for n in line.strip().split(' ')])
17
18 for dimension in aerofoil:
19     filenameOut = "perfil_" + str(int(dimension[0])) + ".txt"
20     beta, w, l, d = dimension[1], dimension[2], dimension[3], dimension[4]
21     with open(filenameOut, 'w') as f:
22         for pair in nacaCoords:
23             x,y = pair[0], pair[1]
24             if x == 0 : alfa = 0
25             else: alfa = math.atan(y/x)
26             x *= l
27             y *= w/0.12
28             r = math.hypot(x, y)
29             betaRad = beta*3.1415/180
30             f.write(str(r*math.cos(alfa+betaRad))+', '+str(r*math.sin(alfa+betaRad))+', '+str(d)+'\n')
```

Fig. 5.8 Programa Python [font pròpia]

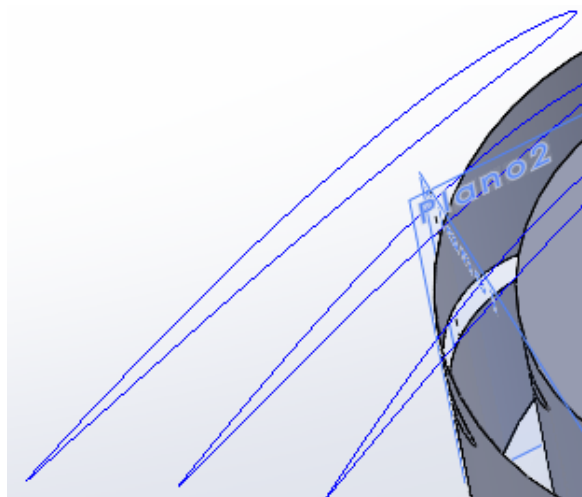


Fig. 5.9 Perfil alar exportat en forma de CURVA XYZ [font pròpia]

Aquestes corbes exportades s'han hagut d'anar col·locant a la distància del radi que pertoca per cadascuna. S'han hagut de corbar respecte del seu radi de posició per tal de tenir un model més precís. Això s'ha aconseguit amb l'operació *Envolver* del programa. Per fer la unió entre seccions i així crear l'àlep s'ha utilitzat la funció *Recubrir* que permet crear una superfície entre dues cares.

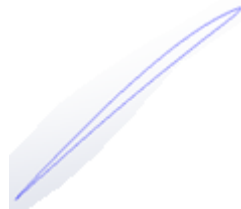


Fig. 5.10 Procés de modelatge [font pròpia]

Un cop es té fet un àlep, es fa ús de l'operació *Matriz circular* que permet fer tants àleps com calguin al voltant del radi interior.

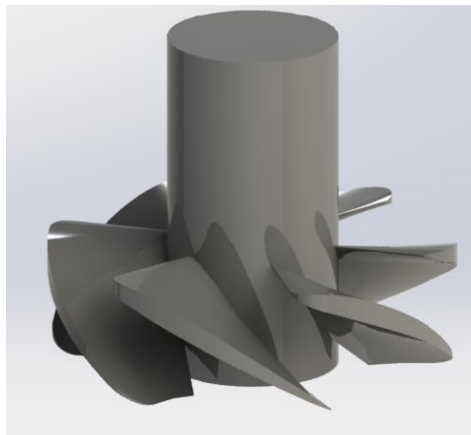


Fig. 5.11 Render del resultat [font pròpia]

Per acabar de fer el model s'ha afegit la coberta cònica, per tal de tenir més endavant simulacions més precises. Això s'ha pogut fer amb l'ús de l'operació *Curva conducida por equación* que permet fer una corba a partir de la seva equació. Un cop posada, s'utilitza l'operació, *Revolución de saliente/base* i es crea la superfície a partir de fer una revolució respecte al centre de la corba.

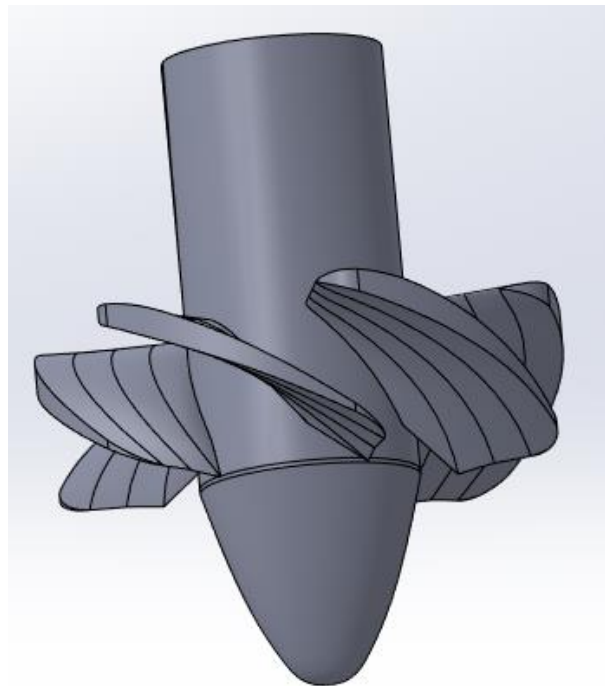


Fig. 5.12 Model final [font pròpia]

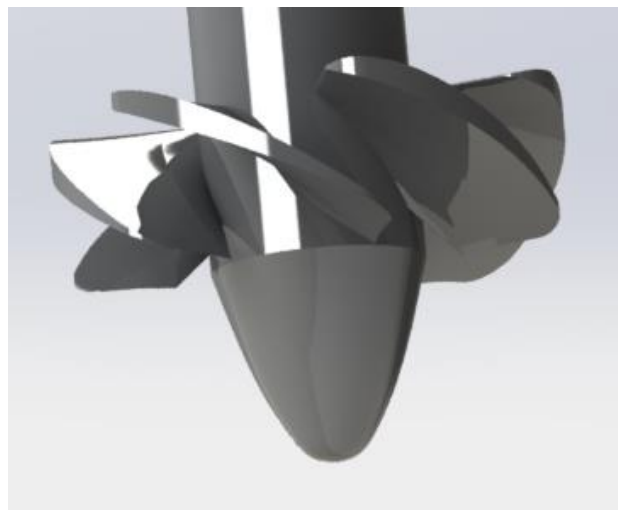


Fig. 5.13 Render del model final [font pròpia]

Aquest model de la Fig. 4.12 és l'obtingut fent els càlculs amb una alçada de salt net de 9,6 m i $8,3 \frac{m^3}{s}$.

A part del model de l'hèlix, també es modela 3D el tub de desfogament, per tal de simular el comportament de la turbina amb major precisió.

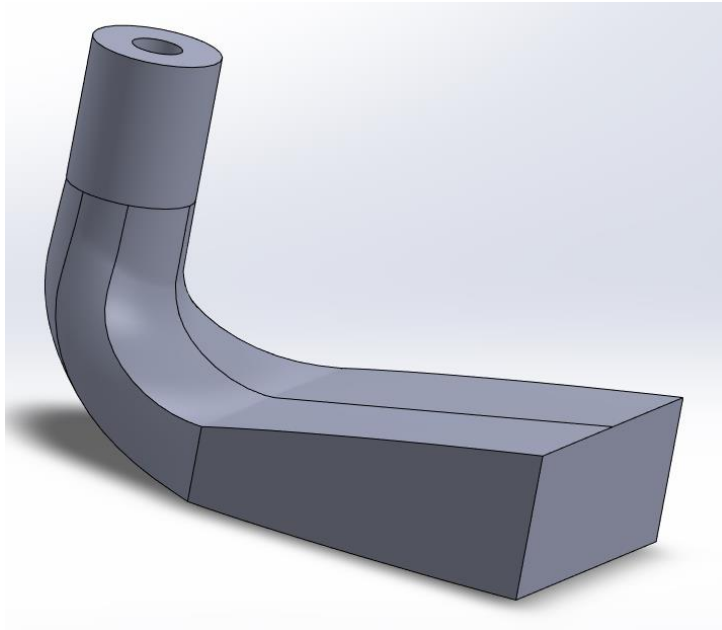


Fig. 5.14 Tub de desfogament [font pròpia]

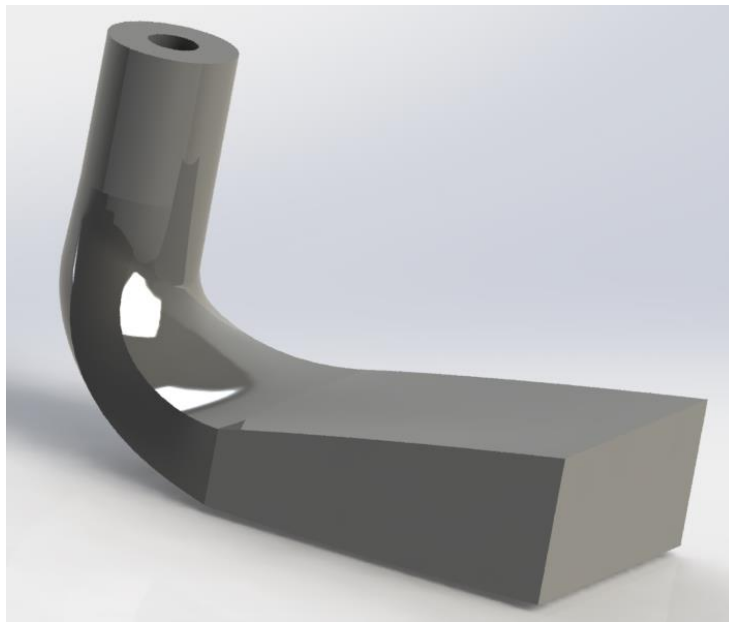


Fig. 5.15 Render del tub de desfogament [font pròpia]

6. Simulació CFD

6.1. Preparació per la simulació

Un cop es té el model 3D fet a partir de les dades teòriques, es procedeix a aplicar les característiques del cas d'estudi.

Primer de tot es defineix el tipus de simulació que es farà en aquest cas. Com que en aquest projecte l'aigua va a baixes velocitats, queda justificat assumir que es comporta com un material incompressible, el tipus de simulació que es farà serà la d'un flux de fluid incompressible.

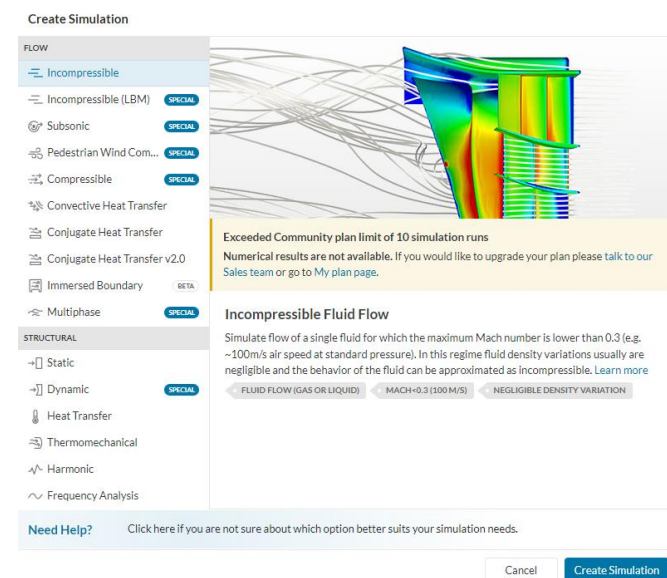


Fig. 6.1 Selecció tipus de simulació [font pròpia]

A tot el volum de la canonada se li dona les característiques de l'aigua.

Water	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Viscosity model	Newtonian	▼
(v) Kinematic viscosity	9.338e-7	m ² /s ▼
(ρ) Density	997.3	kg/m ³ ▼

Fig. 6.2 Material de la simulació [font pròpia]

Per tal de simular l'entrada d'aigua a la turbina de la manera més pròxima a la realitat possible, es defineix una la pressió total d'entrada com a condició de contorn.

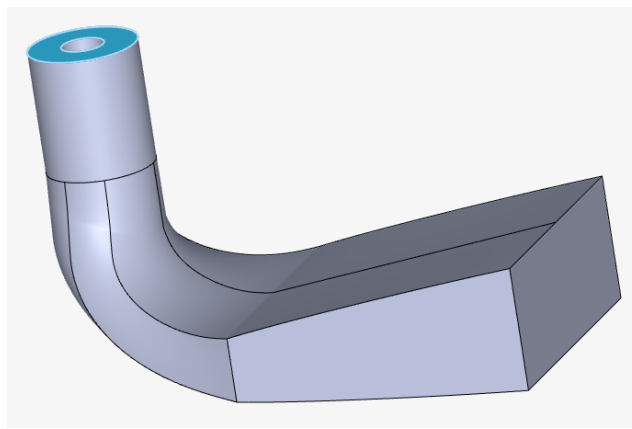


Fig. 6.3 Condició d'entrada (Pressió) [font pròpia]

Aquest número es calcula a través de l'equació (6.3):

$$P_T = P_h + P_{DINAMICA} + P_{Atm} \quad (6.1)$$

$$P_T = \rho g H_n + \frac{u^2}{2} \rho + P_{Atm} \quad (6.2)$$

$$P_T = 1.000 \frac{kg}{m^3} * 9,81 \frac{m}{s^2} * 9,6 m + \frac{20,586 \frac{m^2}{s}}{2} 1.000 \frac{kg}{m^3} + 101.300 Pa = 407.367,7 Pa \quad (6.3)$$

Per tal de garantir el caudal teòric de $8,3 \frac{m^3}{s}$ es defineix aquest valor com a flux de sortida del tub de desfogament.

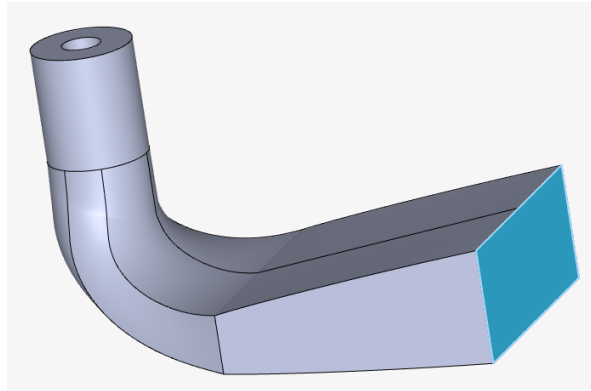


Fig. 6.4 Condió de sortida (cabal) [font pròpia]

Es defineix una zona de rotació per tal de simular la velocitat de gir de la turbina, la qual té el mateix valor que la calculada teòricament.

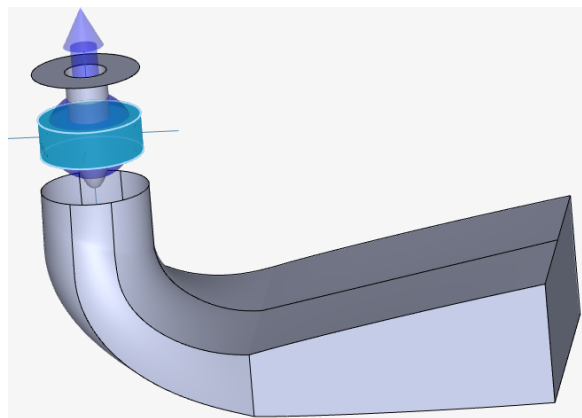


Fig. 6.5 Zona de rotació [font pròpia]

Les condicions inicials de l'energia cinètica de turbulència i la taxa de dissipació específica tenen uns valors ja definits dins de SimScale, aquests són:

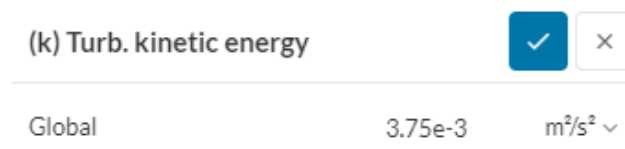


Fig. 6.6 Energia cinètica de turbulència [font pròpia]

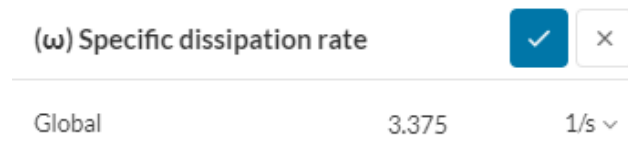


Fig. 6.7 Taxa de dissipació específica [font pròpia]

6.1.1. Mallat

Per a crear el mallat, es farà ús de l'algoritme *Estàndard* amb els *ajustaments estàndards* d'igual manera. S'activa el mallat basat en les físiques, això permet al mallat fer-se més precís en les zones definides amb condicions fronteres. També s'activa el nucli d'elements hexaèdrics, això fa que l'interior dels sòlids s'empleni de forma automàtica d'hexaedres. L'opció de capes límit automàtiques, quan està activada, crea cel·les de malla en capes al costat només de les superfícies del model de SolidWorks a les quals se'ls assigna una condició de límit de paret.

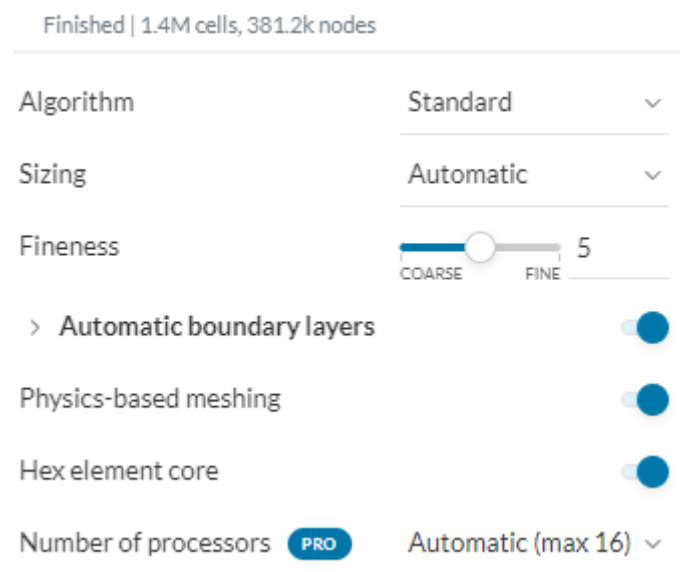


Fig. 6.8 Característiques del mallat [font pròpia]

∨ Automatic boundary layers	<input checked="" type="checkbox"/>
Number of layers	3
Overall relative thickness	0.4
Layer gradation control	Specify growth rate ∨
Growth rate	1.5

Fig. 6.9 Configuració capes límit automàtiques [font pròpia]

Un cop es té les característiques de la malla com es volen, se li dona a *Generar* la malla i en 30 min ja està feta. El model que més endavant es simula és d'1,4 milions de cel·les i 381.200 nodes.

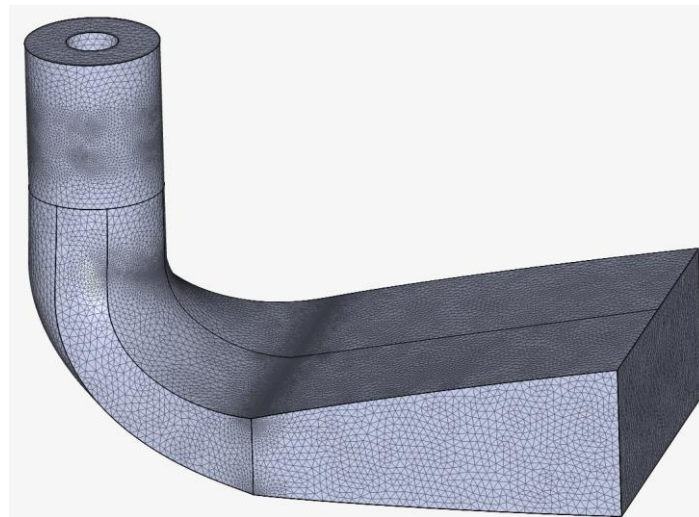


Fig. 6.10 Resultat del mallat de l'estructura [font pròpia]

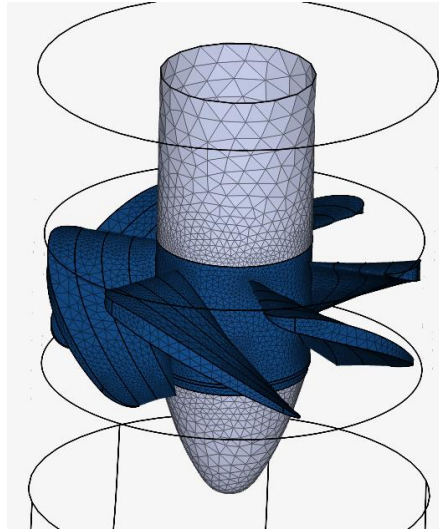


Fig. 6.11 Resultat del mallat de l'hèlix [font pròpia]

6.2. Anàlisi del disseny teòric amb CFD

L'eina utilitzada per fer les simulacions i l'anàlisi del comportament de l'aigua és una eina gratuïta anomenada SimScale. Dintre de les seves diferents classes de simulació, en té una preparada per simular el flux d'un fluid incompressible a través d'un volum, en el cas d'aquesta simulació aquest fluid és l'aigua i el volum és el que ocupa l'aigua dins la canonada de la turbina Kaplan dissenyada. La rotació de les pales de la turbina no es pot definir de forma directa, per tal de fer una aproximació el màxim precisa del que seria un cas real, es defineix un volum en forma de cilindre que engloba les pales, al qual se'l defineix com una zona de rotació, finalment amb els càlculs teòrics se li posa la velocitat de rotació de la turbina.

6.2.1. Comportament del flux al llarg del conducte

Les dimensions del model 3D simulat són exactament les mateixes que el model teòric calculat anteriorment. Els diferents colors que es mostren en la Fig. 6.1 mostren els diferents rangs de velocitat de l'aigua al llarg del volum. Aquest rang de mòduls de velocitat es mostra en la llegenda que es troba en l'inferior de la Fig. 6.1. Es pot veure clarament, gràcies a la simulació, com la zona on hi ha major mòdul de velocitat per diferència és la secció on es troben les pales giratòries.

Observant els resultats del mòdul velocitat del flux, es pot veure com la màxima velocitat absoluta segons la llegenda és de 51,77 m/s.

Com s'ha dit a l'apartat anterior, el programa utilitzat té certes limitacions a l'hora de definir la rotació de la turbina. Per aquesta raó el resultat de les línies de flux no pot ser vist d'una forma precisa. Això és deu al fet que a mesura que l'aigua entra a la zona de rotació de fluid, SimScale, en ves de fer moure les pales de la turbina, fa moure el fluid que les envolta. Per aquesta raó, com més precisa sigui aquesta zona, millor resultat hi haurà.

Un cop just el flux surt de la zona de les pales, aquest hauria de sortir amb una lleugera rotació que es pot definir amb velocitat tangencial. Això indica que la turbina no ha extret la màxima energia possible de l'aigua en moviment, ja que aquesta està relacionada amb la velocitat tangencial.

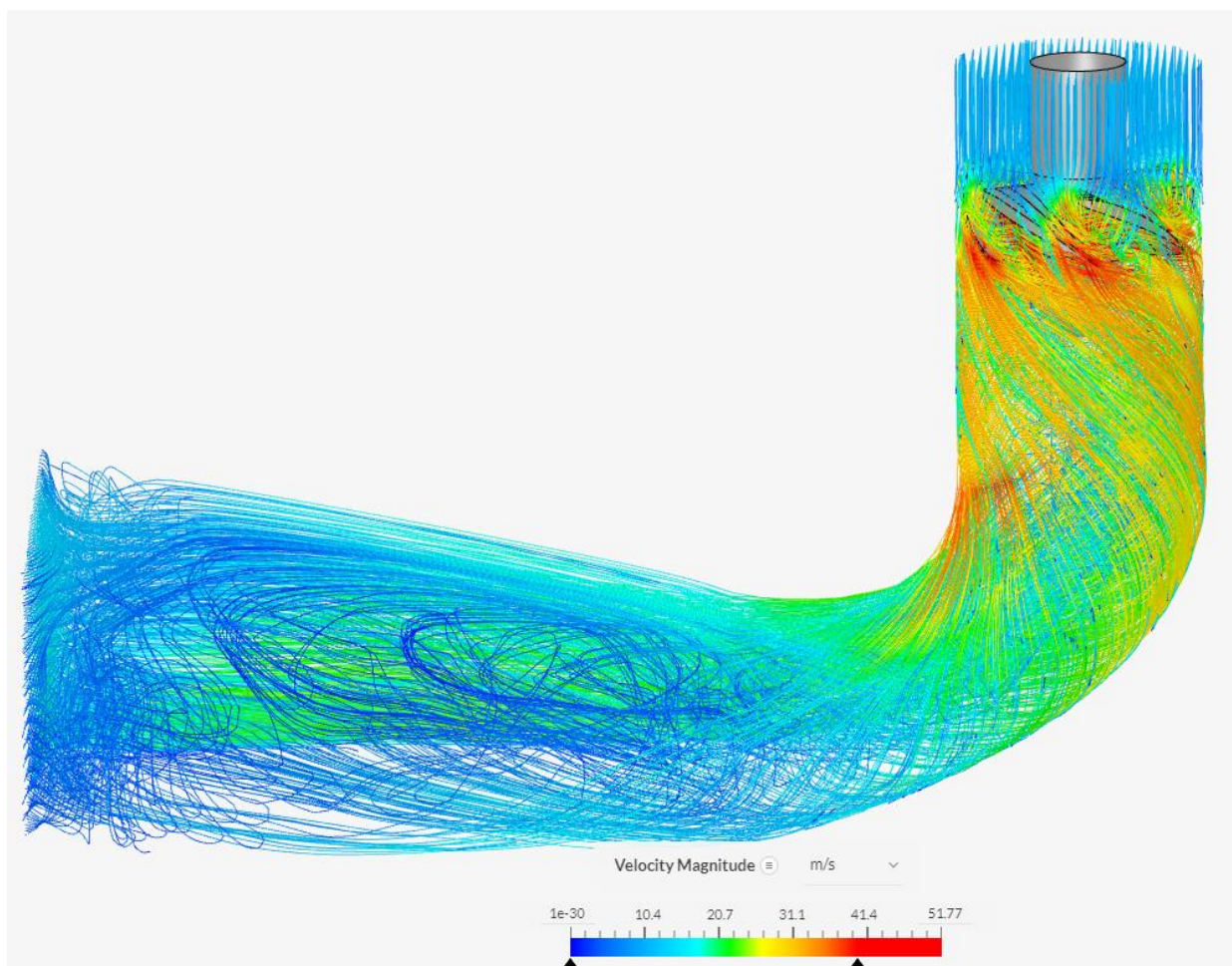


Fig. 6.12 Línies de velocitat del flux (m/s) a través del disseny teòric [font pròpia]

6.2.2. Velocitat tangencial

La velocitat tangencial descriu la velocitat de l'aigua que es mou en la direcció de la rotació dels àleps del rodet.

La velocitat del flux a l'entrada del rodet és c_{u_1} , i la velocitat de sortida és c_{u_2} . Per poder mesurar aquesta velocitat en els resultats de la simulació s'ha fet tres talls plans. Un és a l'entrada de l'aigua a la zona de les pales, un altre a la zona de la sortida del fluid dels àleps i una en els entremitjos de la zona que delimiten aquests dos comentats inicialment. Amb l'eina d'anàlisi ParaView, aquests plans de mesura tenen forma circular a causa de la forma de la canonada i es posen el més a prop possible de les cantonades de les pales i al punt mitjà.

Per tal de calcular la velocitat tangencial es crea una línia de mesura sobre el pla mantenint una equidistància entre dues pales. Tal com es mostra a la *Fig. 6.13*.

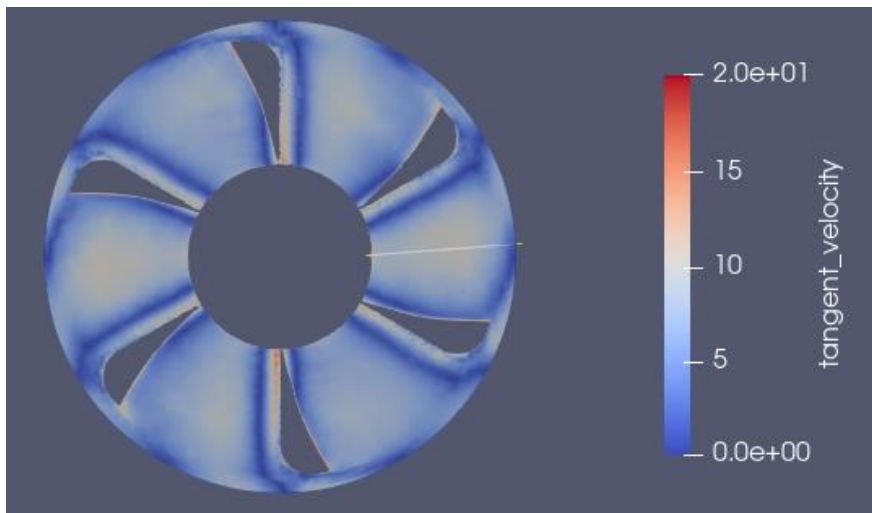


Fig. 6.13 Pla de l'entrada per mesurar la velocitat tangencial (m/s) [font pròpia]

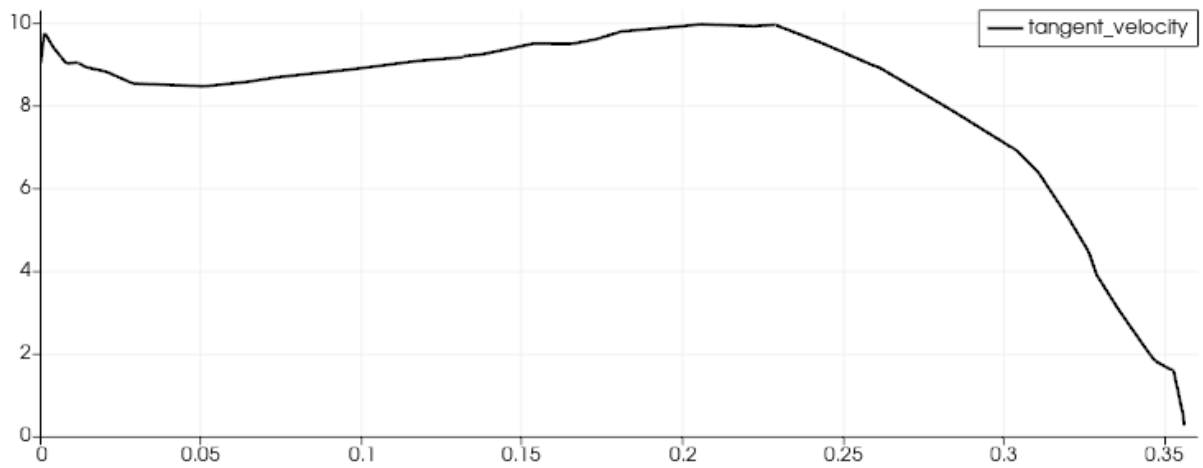


Fig. 6.14 Velocitat tangencial a l'entrada(x:distancia/y:velocitat) [font pròpia]

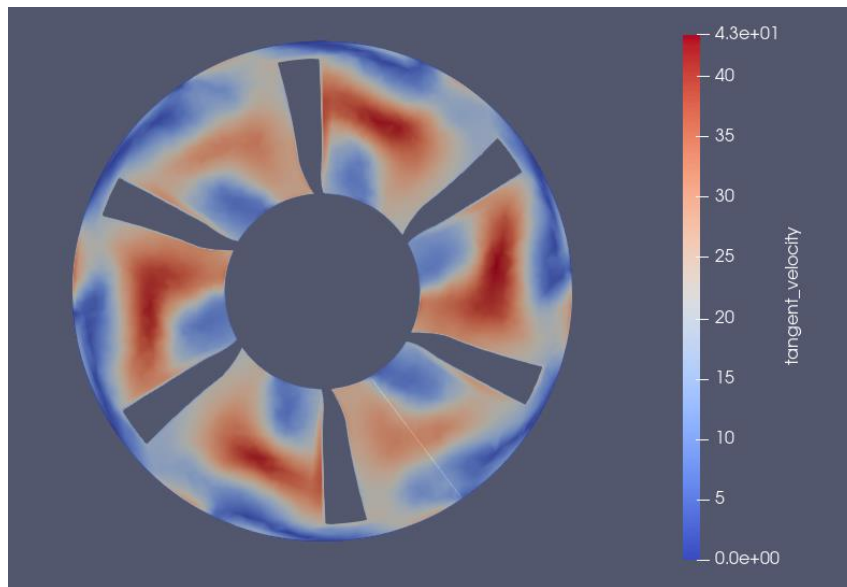


Fig. 6.15 Pla del mitj per mesurar la velocitat tangencial (m/s) [font pròpia]

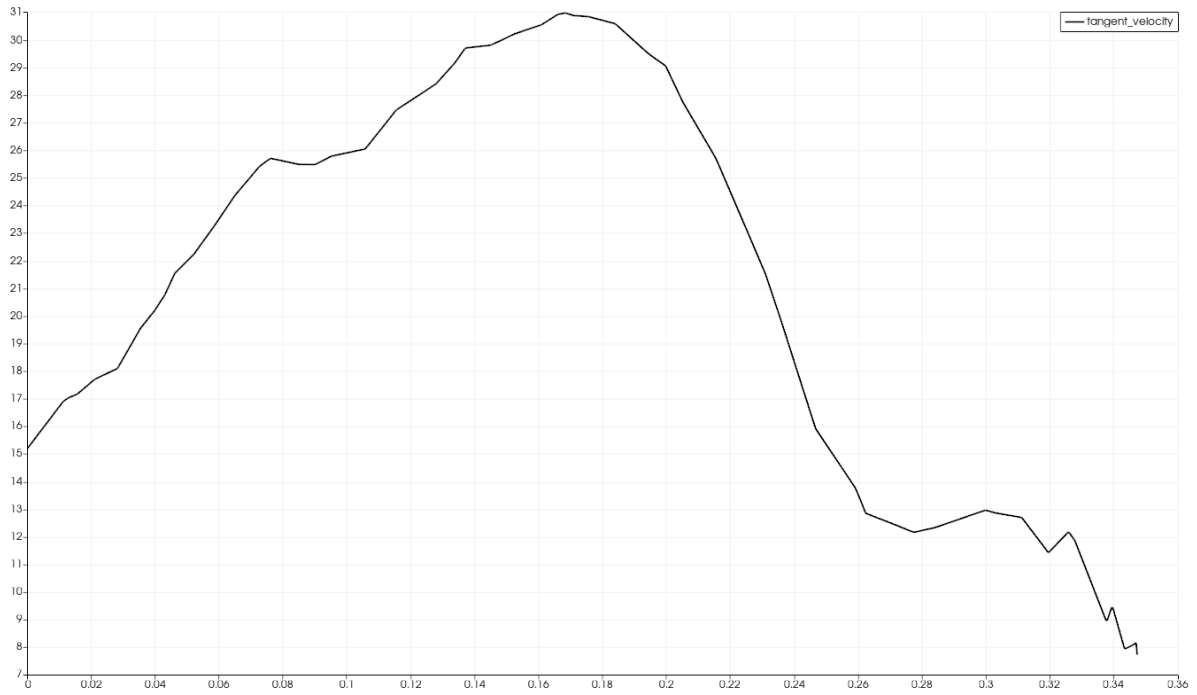


Fig. 6.16 Velocitat tangencial al mitj (x:distancia/y:velocitat) [font pròpia]

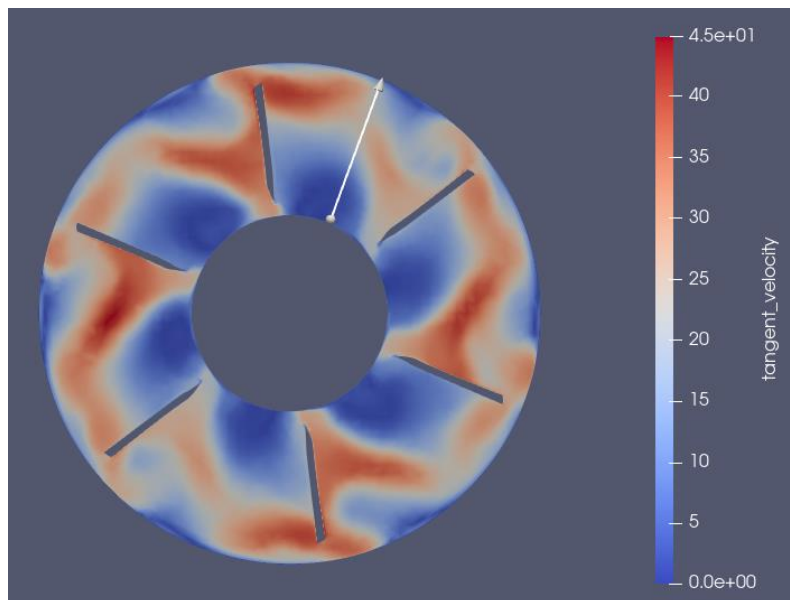


Fig. 6.17 Pla de la sortida per mesurar la velocitat tangencial (m/s) [font pròpia]

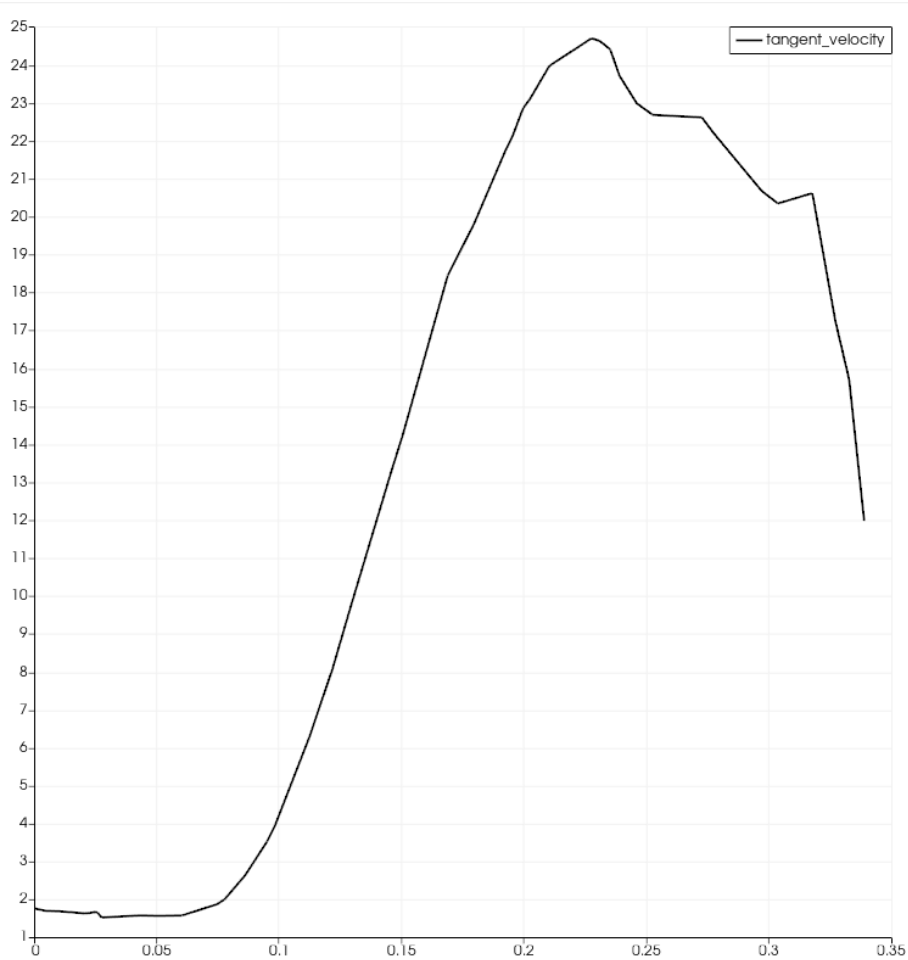


Fig. 6.18 Velocitat tangencial a la sortida (x:distància/y:velocitat) [font pròpia]

Els valors trobats es poden veure a la següent taula:

	D _i	D ₁	D ₂	D ₃	D _e	UNITATS
cu1	9,500	8,500	9,000	8,000	4,200	m/s
cu12	15,000	24,000	30,000	20,000	13,000	m/s
cu2	2,000	3,000	19,000	22,000	18,000	m/s
ΔW _u	7,500	5,500	10,000	14,000	13,800	m/s

Taula 6.1 Taula de resultats de les mesures de la velocitat [font pròpia]

La diferència entre les velocitats tangencials d'entrada i de sortida es poden obtenir amb la següent equació:

$$\Delta w_u = \Delta c_u = c_{u1} - c_{u2} \tag{6.4}$$

La potència que genera la turbina depèn de la diferència de velocitat tangencial, en un futur apartat del treball es faran els càlculs per trobar aquesta.

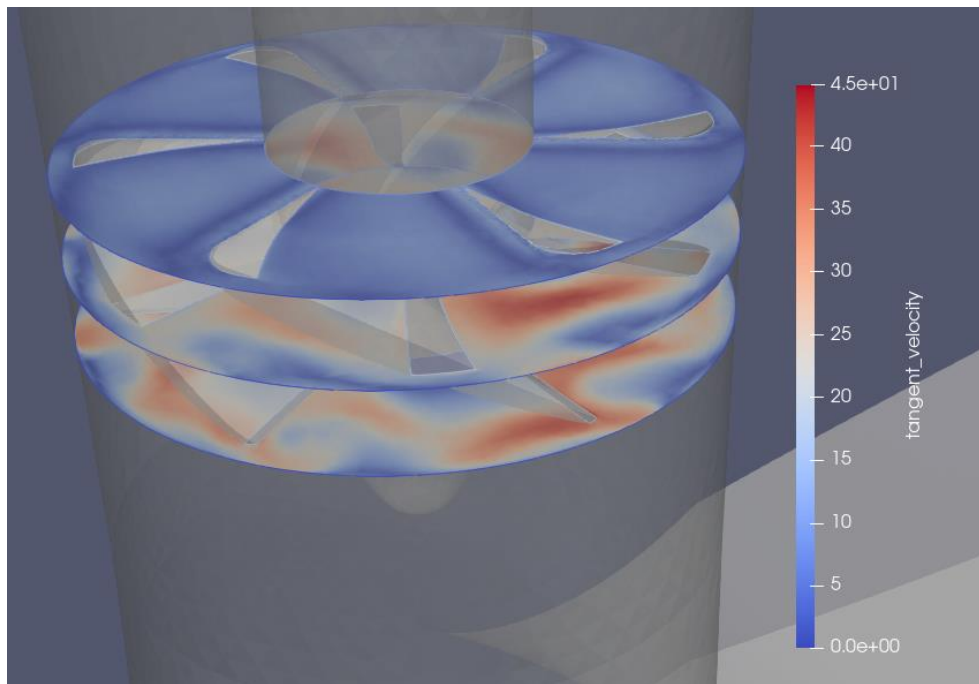


Fig. 6.19 Vista general de les tes capes respecte hèlix [font pròpia]

6.2.3. Pressió en la turbina

Ja que l'aigua travessa la turbina, la pressió s'ha de veure variada entre les dues superfícies (la superior i la inferior). En la Fig. 6.20 es pot apreciar la distribució de pressió de les pales de la turbina.

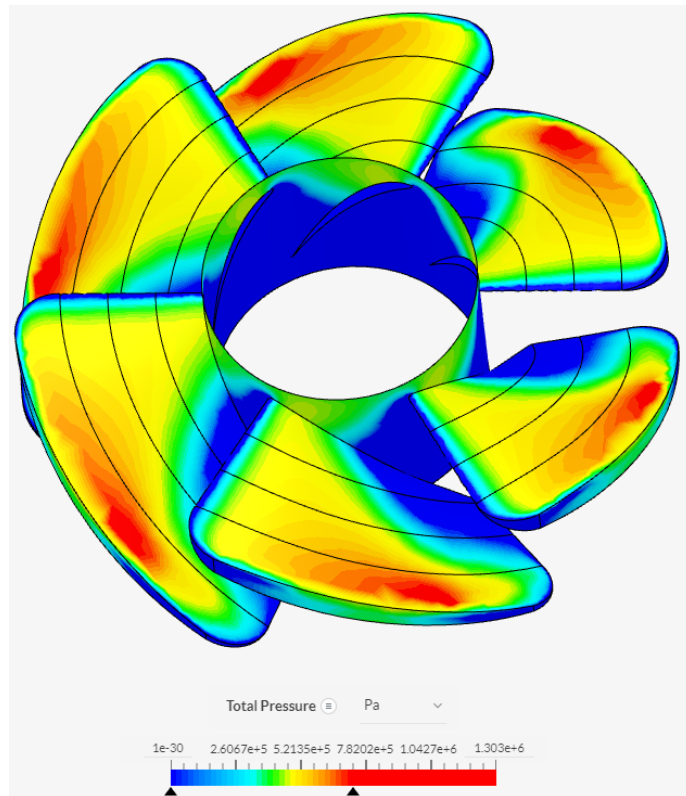


Fig. 6.20 Pressió total a la part superior de la turbina (Pa) [font pròpia]

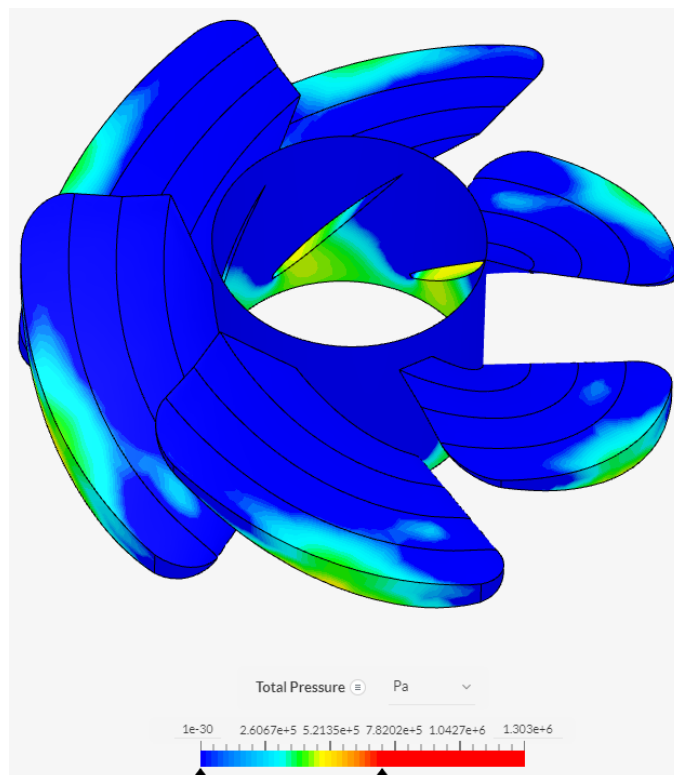


Fig. 6.21 Pressió a la part inferior de la turbina (Pa) [font pròpia]

Es pot veure clarament que la pressió en la cara superior és molt major que la que hi ha en la cara inferior de les pales. La pressió més alta (es veu representada de color vermell) es troba en els extrems de les superfícies exteriors dels àleps. La pressió més baixa (es veu representada de color blau fosc) es troba a l'exterior de la part inferior de la turbina. El perill de cavitació apareix en la cara superior, en la zona de la sortida del fluid, aquesta dada coincideix amb els càlculs teòrics de la Fig. 2.19. A part, també apareix en tots els vèrtex ja que en el model 3D totes les arestes són perfectes i donen lloc a aquests resultats en la simulació.

Per poder veure de forma clara la caiguda de pressió de l'aigua en travessar la turbina es creen dos plans de mesura, un a l'entrada de les pales i un altre a la sortida, tal com es pot veure en la Fig. 6.22.

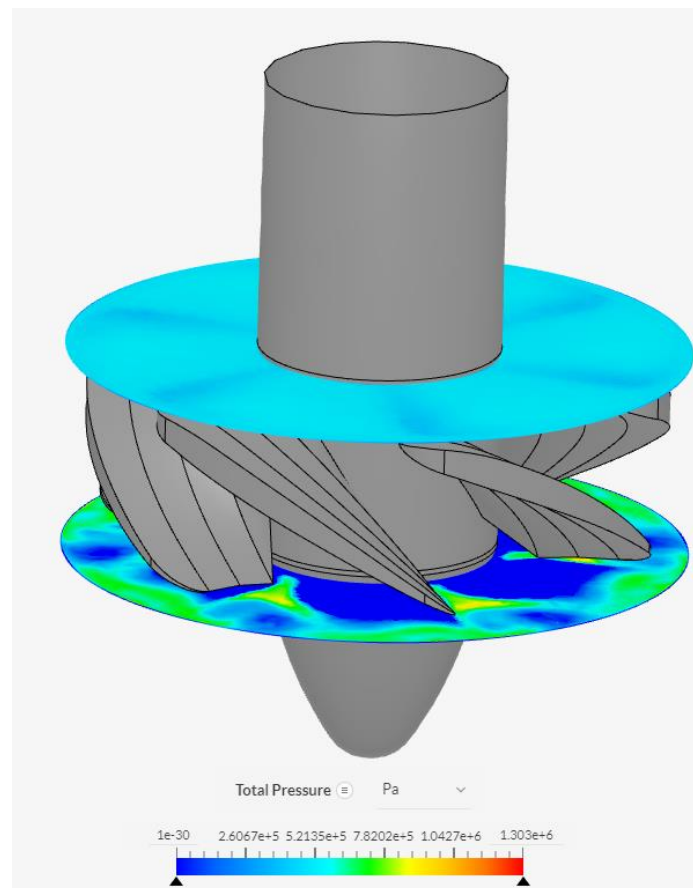


Fig. 6.22 Plans per la mesura de la caiguda de pressió a través de la turbina [font pròpia]

Fixant-se en els colors diferents dels dos plans es pot analitzar com hi ha una caiguda de pressió. Per tenir una resposta més precisa es fa ús d'una eina del programa que permet calcular la

integral de la superfície del pla de la pressió total que hi ha a cada pla, així doncs, d'aquesta manera comparar-ho de forma analítica a la Taula 6.2.

	Pla 1	Pla 2	Diferència	UNITTAS
Pressió	369.396,582	143.096,293	226.300,289	Pa

Taula 6.2 Caiguda de pressió a la turbina [font pròpia]

6.2.4. Capacitat de generació de potència

En aquest apartat es calcula la capacitat de generar energia de la turbina, basant-se en la gràfica del moment extreta de la simulació. Es fa servir l'Equació 6.5 per trobar la solució.

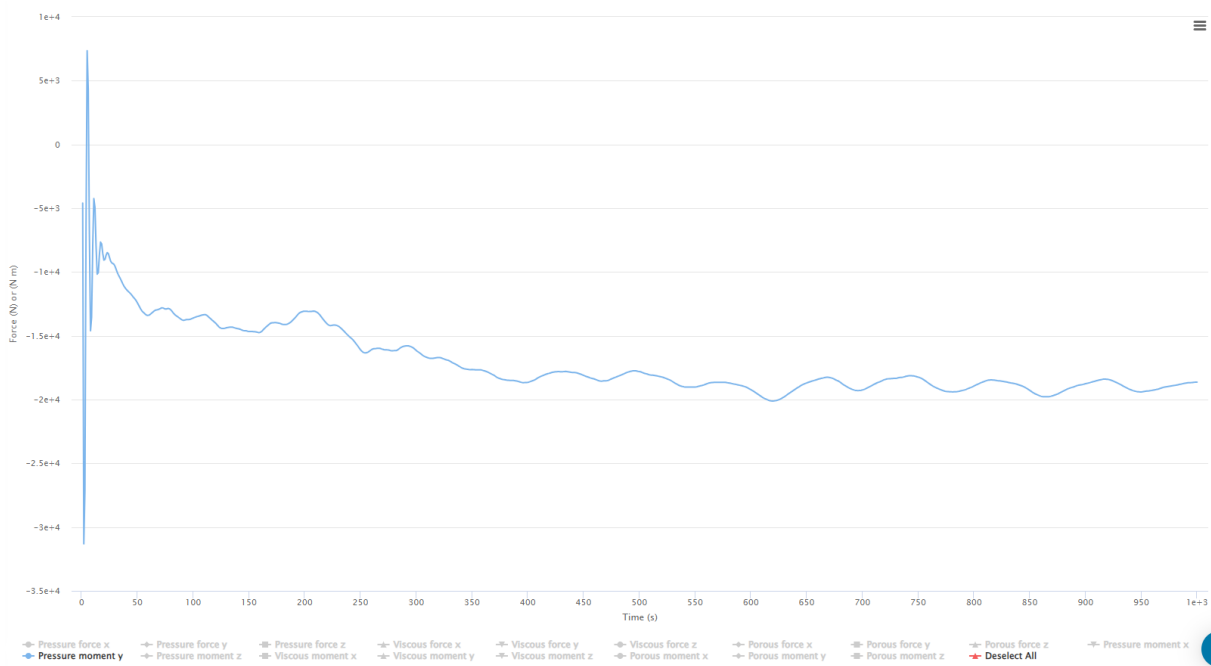


Fig. 6.23 Moment axial sobre l'hèlix (x:temps/y:moment) [font pròpia]

$$P_{turbina} = Moment * \omega \tag{6.5}$$

$$P_{turbina} = 18.000 \text{ Nm} * 37,86 \frac{\text{rad}}{\text{s}} = 681.480 \text{ W} \quad (6.6)$$

En aquest apartat es calcula la capacitat de generar energia de la turbina, basant-se en l'energia extreta de l'aigua. Es fa servir l'Equació 5.75 per trobar la solució.

$$P_{turbina} = \rho \frac{1}{4} \pi (D_e^2 - D_i^2) c_0 u \Delta w_u \quad (6.7)$$

$$\begin{aligned} P_{turbina} &= 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \frac{1}{4} \pi (1,087 \text{ m}^2 - 0,457 \text{ m}^2) * 10,84 \frac{\text{m}}{\text{s}} * 14,62 \frac{\text{m}}{\text{s}} * 4,96 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (6.8) \\ &= 630.274,832 \text{ W} \end{aligned}$$

Amb les dues potències extrems a partir de la simulació es fa una mitjana per trobar un valor més encertat. Tenint en compte que la potència hidràulica teòrica era de 781,66 kW. L'eficiència de la turbina analitzada amb SimScale i ParaView amb les cotes iguals als càlculs teòrics és de:

$$\eta = \frac{P_{turbina}}{P_{hidraulica}} 100 = \frac{630,27 \text{ kW} + 681,48 \text{ kW}}{2} \frac{1}{781,66 \text{ kW}} * 100 = 83,86 \% \quad (6.9)$$

La model simulat indica una eficiència d'extracció d'energia del 83,86%, mentre que el model teòric assenyala una eficiència del 74,1%. Per tant, el model simulat dona un rendiment un 9,76% més elevat que el model teòric. Els resultats del CFD haurien de ser més realistes, ja que els càlculs teòrics estan sotmesos a una sèrie de suposicions que simplifiquen molt les operacions.

Tenint en compte que més endavant aquesta potència es vol portar a un generador per transformar-la en energia elèctrica. S'ha d'assumir un 4% de pèrdues elèctriques en aquesta transformació i un 6 % de pèrdues mecàniques. Tenint en compte això, el rendiment final seria:

$$\eta = \frac{P_{turbina} * 0,96 * 0,94}{P_{hidraulica}} * 100 = 75,67 \% \quad (6.10)$$

6.2.5. Rendiment de la turbina a diferents cabals

En aquest apartat es simula la turbina en dues noves condicions de cabal diferent, d'aquesta manera es pot determinar quin serà el seu rendiment fora del seu cabal nominal.

En el segon punt dels annexos es mostren gràfics i taules on es pot veure la velocitat tangencial de l'aigua amb els diferents cabals, sempre simulat sobre la turbina dissenyada amb el cabal nominal.

Amb un cabal un 24% superior (10,3 m³/s), les potències hidràulica i generada augmentarien, però el rendiment es veu reduït. En les següents equacions es mostra:

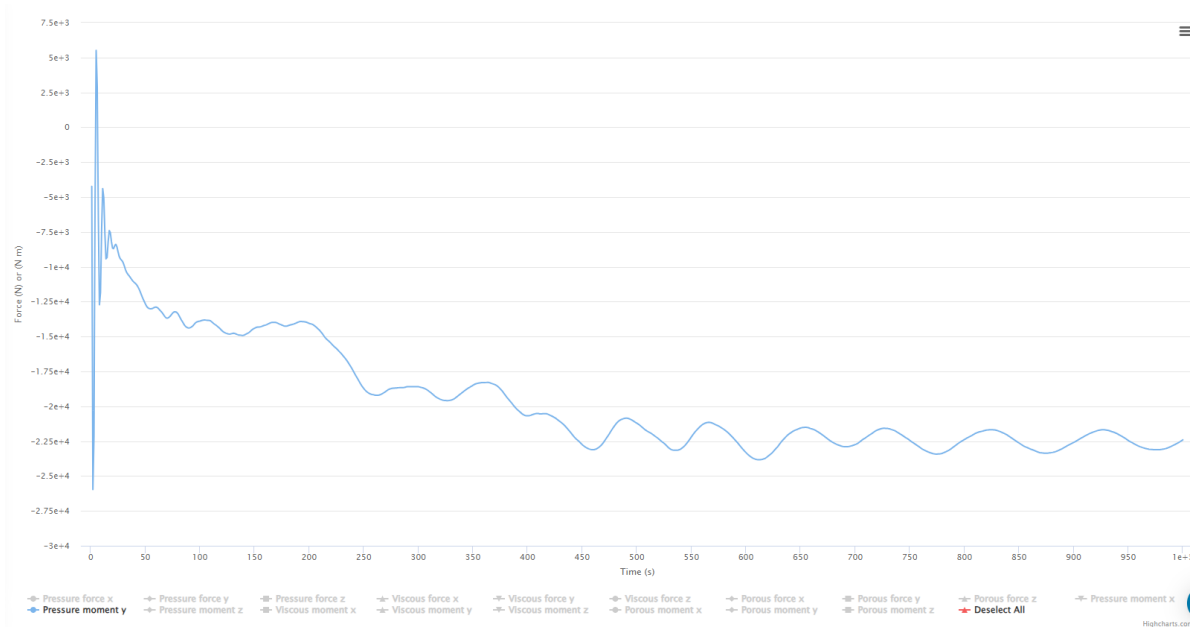


Fig. 6.24 Moment axial sobre l'hèlix amb Q=10,3m³/s (x:temps/y:moment) [font pròpia]

$$P_{turbina} = Moment * \omega = P_{turbina} = 22.500 Nm * 34 \frac{rad}{s} \tag{6.11}$$

$$= 765.000 W$$

$$P_{hidraulica} = QgH_n\rho = 970.000 W \tag{6.12}$$

$$\eta = \frac{P_{turbina}}{P_{hidraulica}} * 100 = \frac{765.000 W}{970.000 W} * 100 = 78,87 \% \tag{6.13}$$

En el cas nominal, amb aquest mateix mètode de mesura es té un rendiment del 87,18 %. Per tant, amb aquest augment de cabal el rendiment es redueix un 8,31 %.

Amb un cabal un 12% superior (9,3 m³/s), les potències hidràulica i generada augmentarien, però el rendiment es veu reduït. En les següents equacions es mostra:

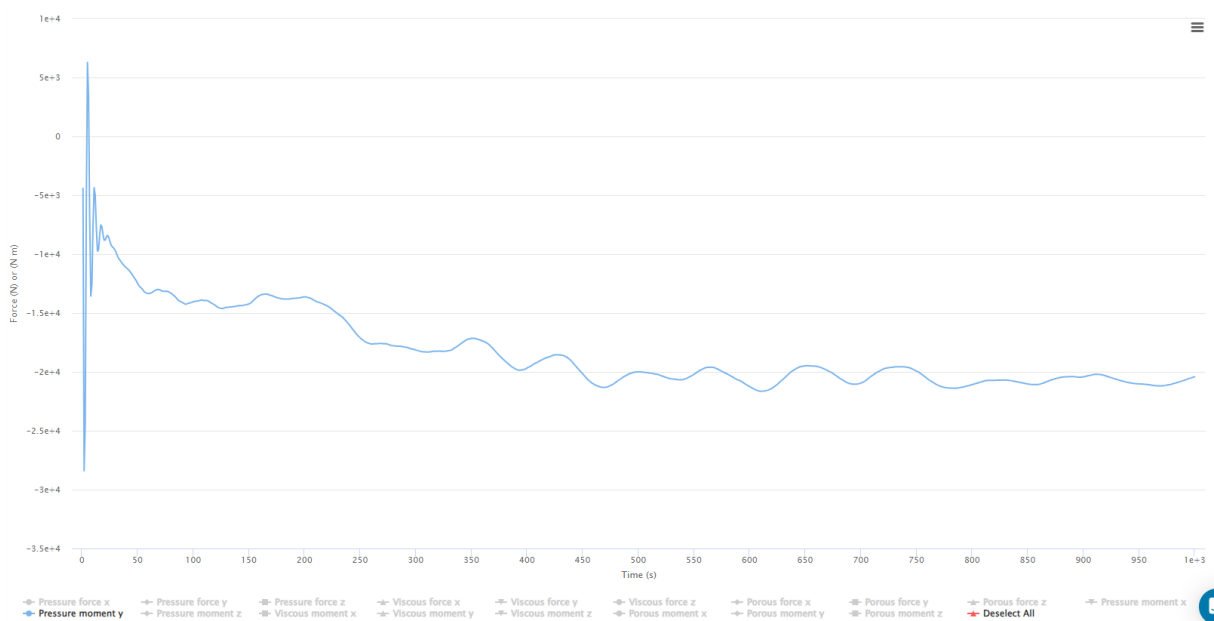


Fig. 6.25 Moment axial sobre l'hèlix amb $Q=9,3\text{m}^3/\text{s}$ (x:temps/y:moment) [font pròpia]

$$P_{turbina} = \text{Moment} * \omega = P_{turbina} = 20.500 \text{ Nm} * 35,8 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad (6.11)$$

$$= 733.900 \text{ W}$$

$$P_{hidraulica} = QgH_n\rho = 875.836 \text{ W} \quad (6.12)$$

$$\eta = \frac{P_{turbina}}{P_{hidraulica}} 100 = \frac{733.900 \text{ W}}{875.836 \text{ W}} 100 = 83,79 \% \quad (6.13)$$

Per tat, amb aquest augment de cabal el rendiment es redueix un 3,39 %.

Amb un cabal un 24% inferior (6,3 m³/s), les potències hidràulica i generada es redueixen i el rendiment es veu reduït. En les següents equacions es mostra:

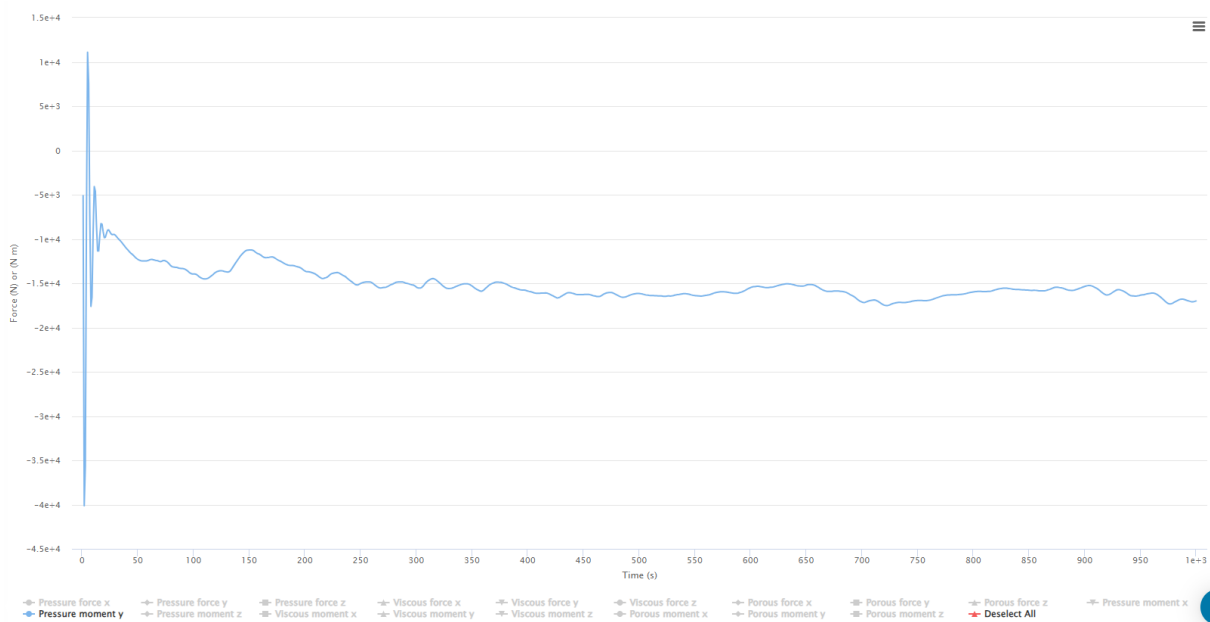


Fig. 6.26 Moment axial sobre l'hèlix amb Q=6,3m³/s (x:temps/y:moment) [font pròpia]

$$P_{turbina} = Moment * \omega = 11.000 Nm * 43,5 \frac{kg}{m^3} = 478.500 W \quad (6.14)$$

$$P_{hidraulica} = QgH_n\rho = 593.308 W \quad (6.15)$$

$$\eta = \frac{P_{turbina}}{P_{hidraulica}} 100 = \frac{478.500 W}{593.308 W} 100 = 80,65 \% \quad (6.16)$$

Per tat, amb aquest augment de cabal el rendiment es redueix un 6,53 %.

Amb un cabal un 70% inferior (2,5 m³/s), les potències hidràulica i generada es redueixen i el rendiment es veu reduït. En les següents equacions es mostra:

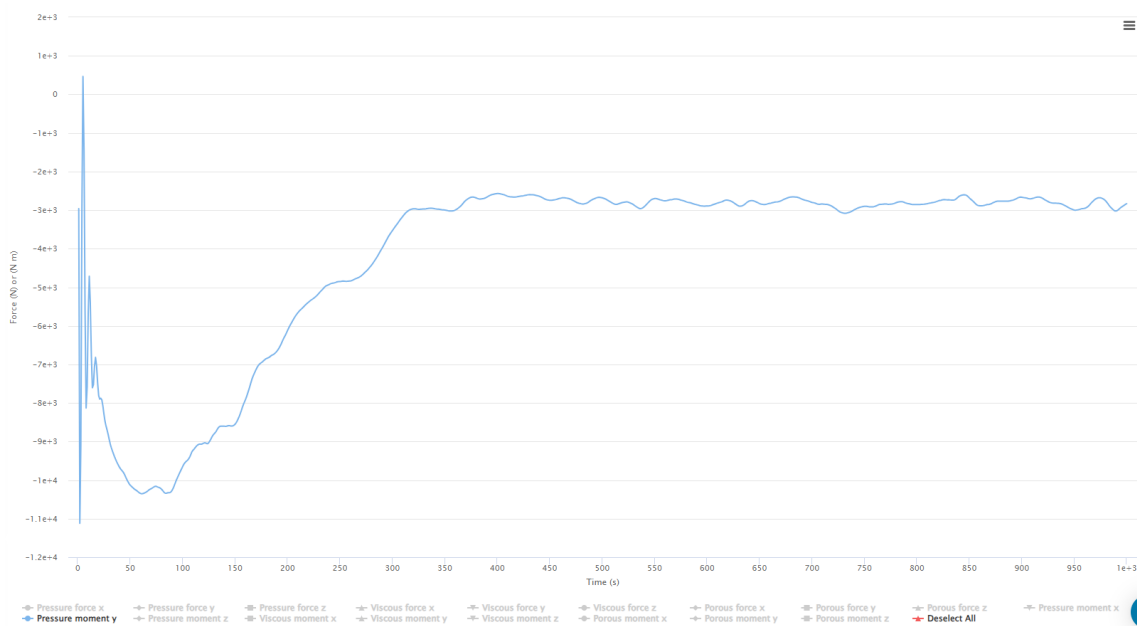


Fig. 6.27 Moment axial sobre l'hèlix amb Q=2,5m³/s (x:temps/y:moment) [font pròpia]

$$P_{turbina} = Moment * \omega = 2.500 Nm * 70 \frac{kg}{m^3} = 175.000 W \quad (6.14)$$

$$P_{hidraulica} = QgH_n\rho = 235.440 W \quad (6.15)$$

$$\eta = \frac{P_{turbina}}{P_{hidraulica}} 100 = \frac{175.000 W}{235.440 W} 100 = 74,33 \% \quad (6.16)$$

Per tat, amb aquest augment de cabal el rendiment es redueix un 12,85 %.

A continuació es mostra una taula on s'ha apuntat els rendiments per a cada cabal simulat:

Cabal[m3/s]	Rendiment[%]	Q/Qn
10,3	78,87	1,24
9,3	83,79	1,12
8,3	87,18	1,00
6,3	80,65	0,76
2,5	74,33	0,30

Taula 6.3 Taula de rendiments per cabals [font pròpia]

A partir d'aquesta taula es fa una gràfica per veure millor les dades:

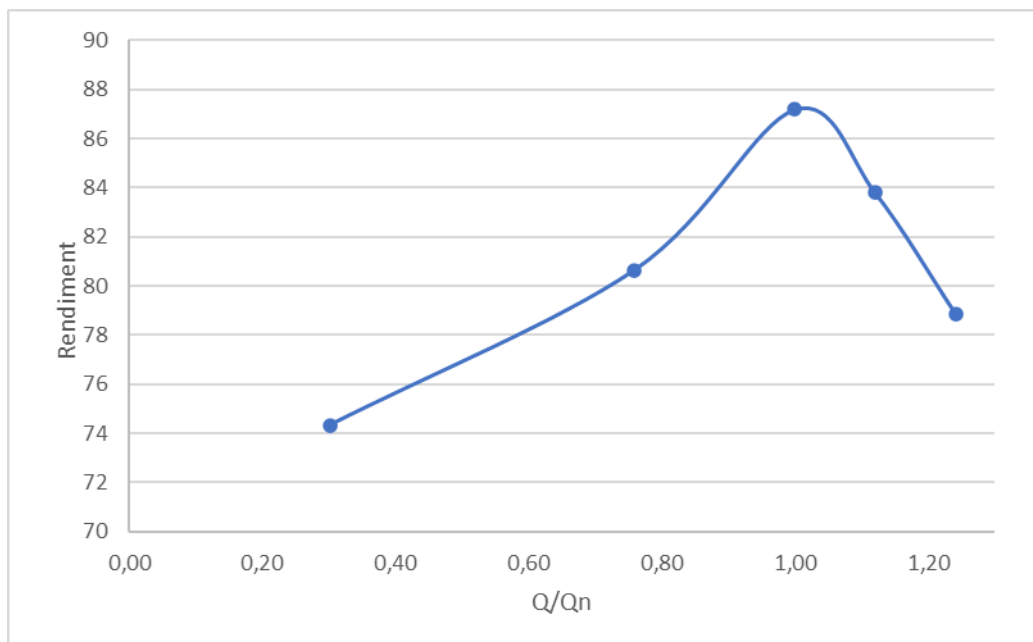


Fig. 6.28 Taula del rendiment en funció de la relació del cabal amb el nominal [font pròpia]

7. Perspectiva de gènere

En aquest projecte no s'ha de fer un estudi sobre la perspectiva de gènere, ja que no es pot aplicar en cap part d'aquest.

8. Impacte mediambiental

Són múltiples els impactes generats per la construcció i generació d'energia hidroelèctrica. Aquestes instal·lacions es fan en llocs on flueix una bona quantitat d'aigua, per tant, són zones de gran biodiversitat i fragilitat ambiental. A continuació es fa una petita llista d'exemples d'impactes mediambientals que succeeixen quan es fa l'instal·lació d'una turbina:

- A causa de tornar a activar la central hi haurà canvis en els ecosistemes aquàtics i terrestres i la seva diversitat. Per aquesta raó hi haurà una influència notòria en la pesca. Per intentar contrarestar aquest succés es poden generar badies artificials.
- Hi haurà alteracions en els cicles naturals de l'aigua, crescudes i disminucions del riu. Això provoca l'absència o disminució d'espècies migratòries de peixos o invertebrats. Es pot solucionar fent variacions per activa o per passiva dels cabals.
- No hi haurà una alteració del paisatge a causa del fet que el lloc que s'utilitza per fer la instal·lació de la turbina nova és una antiga instal·lació amb una estructura ja construïda però inactiva.
- Hi haurà una dessecació dels marges i disminució del cabal del riu. Això provoca una variació en la distribució de les espècies animals i vegetals (per exemple, beneficiarà a les espècies que toleren aquest canvi). Per tal de mitigar aquest impacte es poden introduir millores en el hàbitat de la llera del riu.
- En ser una zona de fressa de salmons s'ha de poder permetre a aquests pujar a través del mur de contenció. Per tal de permetre-ho es generen un tipus d'escales per al que els salmons puguin anar pujant a poc a poc. Per tant, s'ha de destinar una part del cabal del riu per a fer-ho.

Quan una turbina hidràulica arriba al final de la seva vida útil, entre 20 i 25 anys amb el degut manteniment, algunes opcions comunes per al tractament adequat d'aquesta a Espanya poden incloure: [33]

- **Reciclatge:** Els components metàl·lics de la turbina, com l'acer i el coure, es poden separar i reciclar en instal·lacions de reciclatge especialitzades. Hi ha empreses i centres

de reciclatge que poden rebre i processar aquests materials de manera segura i responsable.

- **Reutilització:** Si la turbina hidràulica encara té potencial de funcionament, es podria reutilitzar en altres projectes hidroelèctrics al país. Això implica realitzar reparacions o modificacions necessàries per adaptar-la a les noves condicions d'ús.
- **Eliminació adequada:** En cas que no sigui possible reciclar o reutilitzar la turbina hidràulica, cal procedir a la seva eliminació adequada. Hi ha regulacions i normatives ambientals que regeixen la disposició d'equips i residus, i és important seguir aquests procediments per garantir la protecció del medi ambient.

Per acabar l'anàlisi de l'impacte mediambiental s'ha fet una aproximació de la reducció de les emissions de gasos contaminants per la producció elèctrica de la instal·lació durant un any instal·lada, afegint-hi també el nombre d'arbres plantats o el nombre de kilòmetres en cotxe a què equival aquestes emissions.

TABLA MEDIOAMBIENTAL				
Reducció de emissions de gasos contaminants per la producció elèctrica de la instal·lació	Producció elèctrica anual(kWh)	kg CO2	kg NOx	kg SO2
Factor de conversió per kWh	1	0,34	0,0006	0,0009
Primer any	3.751.920,00	1.275.652,80	2.251,15	3.376,73

Taula 8.1 Reducció emissions [font pròpia]

Nº d'arbres	2 por tonelada de CO2	2.551,31
km de cotxe	98g CO2 por km	13.016.865,31

Taula 8.2 Taula d'equivalències [font pròpia]

9. Planificació del projecte

S'ha distribuït d'activitats per aconseguir una planificació competitiva. Amb la finalitat d'aprofundir en la planificació de les diferents activitats que componen el projecte, es defineixen amb detall les diferents tasques així com la seva duració, s'ha fet ús del programari MS Project.

La planificació del projecte es divideix en les diferents activitats que apareixen en la taula on s'indica les respectives durades a cada tasca, la planificació està prevista en jornades de 2 hores sense contemplar hores extres, des del 5 d'octubre fins al 31 de maig.

El diagrama de Gantt ens mostra de manera visual les durades de cada activitat, les relacions temporals entre elles i la durada total del projecte. Ja que només hi ha un recurs durant tot el projecte, el camí crític passa per totes les tasques.

Nombre de tarea	Duración	Comienzo	Fin	Predece
1 Projecte	410 horas	mié 05/10/22	mié 31/05/23	
1.1 Avantprojecte	232 horas	mié 05/10/22	jue 16/02/23	
1.1.1 Recopilació d'informació i el seu estudi	40 horas	mié 05/10/22	jue 27/10/22	
1.1.2 Crear objectius i definir abast del treball	10 horas	vie 28/10/22	mié 02/11/22	3
1.1.3 Fer planificació	15 horas	jue 03/11/22	vie 11/11/22	4
1.1.4 Aplicar estil TFG al word	18 horas	vie 11/11/22	mar 22/11/22	5
1.1.5 Fer index de la memoria	8 horas	mar 22/11/22	sáb 26/11/22	6
1.1.6 Redactar informació	60 horas	sáb 26/11/22	sáb 31/12/22	7
1.1.7 Cercar i redactar normativa del projecte	15 horas	sáb 31/12/22	lun 09/01/23	8
1.1.8 Càlculs a ma de la turbina	50 horas	mar 10/01/23	mar 07/02/23	9
1.1.9 Redacció de la bibliografia	16 horas	mié 08/02/23	jue 16/02/23	10
1.2 Memoria intermedia	100 horas	vie 17/02/23	sáb 15/04/23	2
1.2.1 Elecció de la ubicació de la turbina Kaplan	20 horas	vie 17/02/23	mar 28/02/23	
1.2.2 Explicació del disseny de la turbina	10 horas	mié 01/03/23	lun 06/03/23	13
1.2.3 Disseny 3D de l'helix de la turbina	30 horas	mar 07/03/23	jue 23/03/23	14
1.2.4 Simulació de la turbina amb CFD i Solidwor	40 horas	vie 24/03/23	sáb 15/04/23	15
1.3 Memoria final	78 horas	lun 17/04/23	mié 31/05/23	12
1.3.1 Estudi imacte mediambiental	10 horas	lun 17/04/23	vie 21/04/23	
1.3.2 Estudi economic	20 horas	sáb 22/04/23	mié 03/05/23	18
1.3.3 Redacció de la perspectiva de gènere	8 horas	jue 04/05/23	lun 08/05/23	19
1.3.4 Conclusions	8 horas	mar 09/05/23	vie 12/05/23	20
1.3.5 Redacció de la bibliografia	6 horas	sáb 13/05/23	mar 16/05/23	21
1.3.6 Redacció anexos	26 horas	mié 17/05/23	mié 31/05/23	22

Taula 9.1 Activitats i duració [font pròpia]

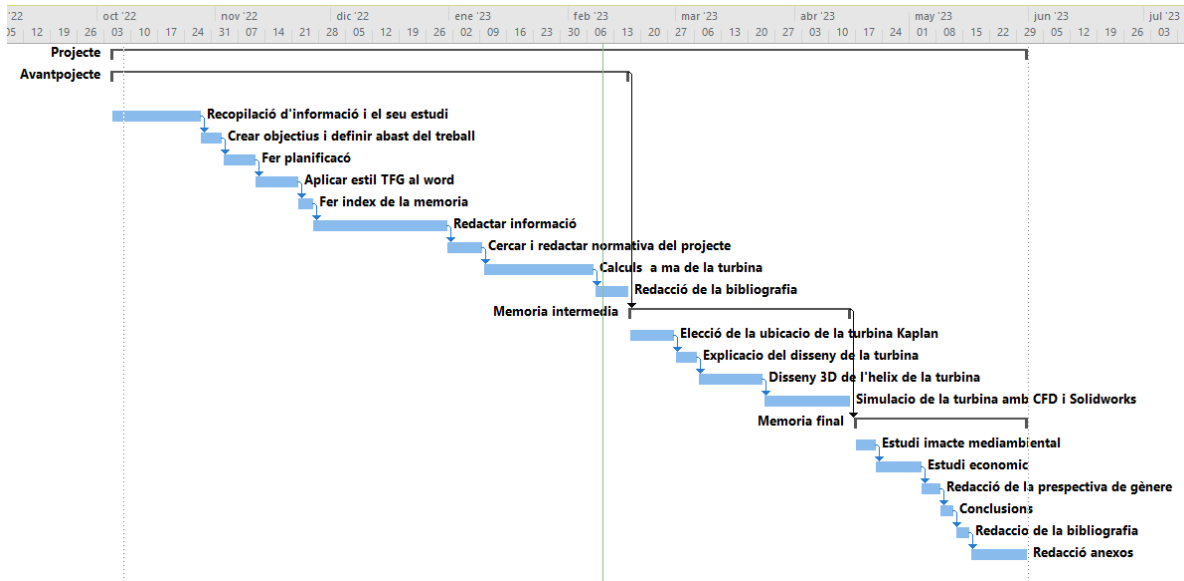


Fig. 9.1 Diagrama de Gantt [font pròpia]

9.1. Justificació dels punts de control

El nostre projecte té una durada de 8 mesos i, segons la taula que tenim a sota, la freqüència de punts de control ha de ser mensual.

Duración del proyecto	Frecuencia mínima de información al cliente	Frecuencia máxima de información al cliente
1 mes	Cada 3 días	Diario
1 año	Mensual	2 veces al mes
5 año	Cada 6 meses	Cada 2 meses

Taula 9.2 Freqüència de punts de control [font pròpia]

Aquests són els dies de punts de control proposats:

05/11/2022	05/12/2022	05/01/2023	05/02/2023	05/03/2023	05/04/2023	05/05/2023	05/06/2023
------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------

Taula 9.3 Punts de control escollits [font pròpia]

9.2. Punts de control

Taula de les observacions fetes en els diferents punts de control:

PUNT DE CONTROL	DATA	OBSERVACIONS
1	05/11/2022	No hi ha ninguna variació respecte la planificació original.
2	05/12/2022	No hi ha ninguna variació respecte la planificació original.
3	05/01/2023	No hi ha ninguna variació respecte la planificació original.
4	05/02/2023	No hi ha ninguna variació respecte la planificació original.
5	05/03/2023	S'esperava que la Redacció de la bibliografia dures 16 h però finalment ha durat 1 h. Per tant s'ha acabat el Avantprojecte abans de l'esperat, concretament 15 h.
6	05/04/2023	S'esperava que el Disseny 3D de l'helix de la turbina dures 30 h però finalment ha durat 50 h. Per tant s'ha acabat 20 h mes tard de l'esperat.
7	05/05/2023	S'esperava que la Simulació de la turbina amb CFD i Solidworks dures 40 h però finalment ha durat 55 h. Per tant s'ha acabat 15 h mes tard de l'esperat, fent que la suma de temps invertit a la Memoria intermitja sigui de 35 h en total.
8	05/06/2023	S'esperava que l' Estudi economic dures 20 h però finalment ha durat 30 h. Per tant s'ha acabat 10 h més tard de l'esperat, fent que la suma de temps invertit a la Memoria intermitja sigui de 35 h en total. Per altre banda la Redacció de la perspectiva de genere ha pasat de 8 h a 1 h(7 h menys), Redacció de la bibliografia ha pasat de 6 h a 1 h(5 h menys) i la Redacció d'anexos ha pasat de 26 h a 5 h(21 h menys).

Taula 9.4 Observacions punts de control [font pròpia]

Amb aquestes variacions en els temps de les activitats la planificació real del projecte queda de la següent forma:

Nombre de tarea	Duración	Comienzo	Fin	Predecesoras
1 Projecte	407 horas	mié 05/10/22	mar 30/05/23	
1.1 Avantprojecte	217 horas	mié 05/10/22	mié 08/02/23	
1.1.1 Recopilació d'informació i el seu estudi	40 horas	mié 05/10/22	jue 27/10/22	
1.1.2 Crear objectius i definir abast del treball	10 horas	vie 28/10/22	mié 02/11/22	3
1.1.3 Fer planificació	15 horas	jue 03/11/22	vie 11/11/22	4
1.1.4 Aplicar estil TFG al word	18 horas	vie 11/11/22	mar 22/11/22	5
1.1.5 Fer index de la memoria	8 horas	mar 22/11/22	sáb 26/11/22	6
1.1.6 Redactar informació	60 horas	sáb 26/11/22	sáb 31/12/22	7
1.1.7 Cercar i redactar normativa del projecte	15 horas	sáb 31/12/22	lun 09/01/23	8
1.1.8 Cálculs a ma de la turbina	50 horas	mar 10/01/23	mar 07/02/23	9
1.1.9 Redacció de la bibliografia	1 hora	mié 08/02/23	mié 08/02/23	10
1.2 Memoria intermedia	135 horas	mié 08/02/23	jue 27/04/23	2
1.2.1 Elecció de la ubicació de la turbina Kaplan	20 horas	mié 08/02/23	lun 20/02/23	
1.2.2 Explicació del disseny de la turbina	10 horas	lun 20/02/23	sáb 25/02/23	13
1.2.3 Disseny 3D de l'helix de la turbina	50 horas	sáb 25/02/23	lun 27/03/23	14
1.2.4 Simulació de la turbina amb CFD i Solidworks	55 horas	lun 27/03/23	jue 27/04/23	15
1.3 Memoria final	55 horas	vie 28/04/23	mar 30/05/23	12
1.3.1 Estudi imacte mediambiental	10 horas	vie 28/04/23	mié 03/05/23	
1.3.2 Estudi economic	30 horas	jue 04/05/23	sáb 20/05/23	18
1.3.3 Redacció de la perspectiva de gènere	1 hora	lun 22/05/23	lun 22/05/23	19
1.3.4 Conclusions	8 horas	lun 22/05/23	vie 26/05/23	20
1.3.5 Redacció de la bibliografia	1 hora	vie 26/05/23	vie 26/05/23	21
1.3.6 Redacció anexos	5 horas	sáb 27/05/23	mar 30/05/23	22

Taula 9.5 Activitats i duració actualitzada [font pròpia]

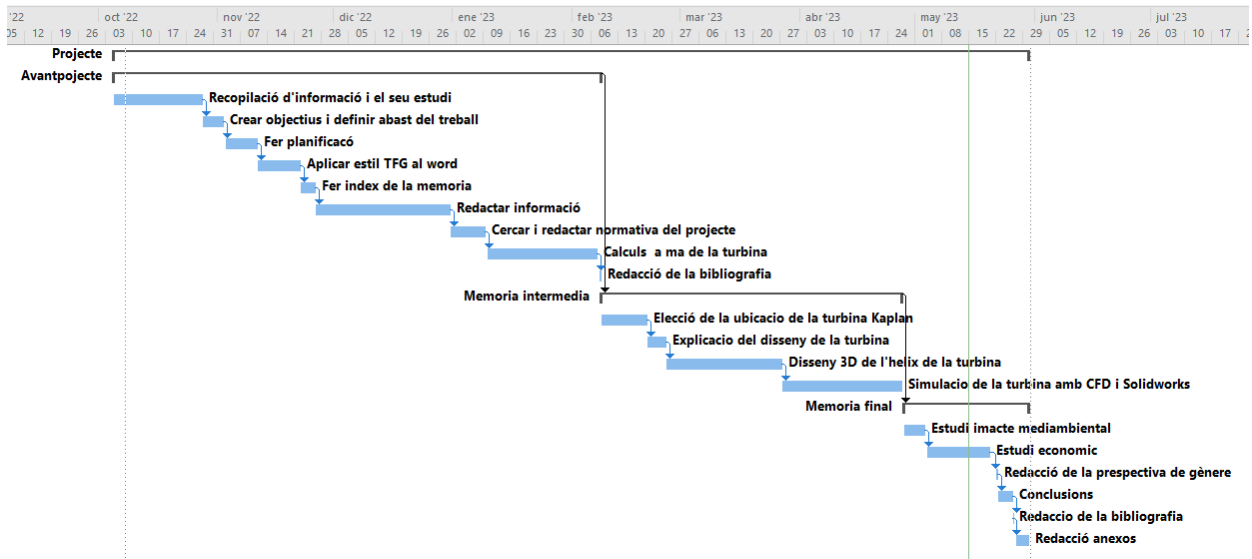


Fig. 9.2 Diagrama de Gantt actualitzat [font pròpia]

10. Conclusions

En aquest projecte s'ha comprovat la gran utilitat que suposa l'ús de software de dinàmica de fluids computacional a l'hora de realitzar simulacions de casos reals. Gràcies a aquests tipus de software, en aquest cas Simscale, s'ha pogut estudiar el comportament d'una turbina de Kaplan sense la necessitat de realitzar un prototip que requeriria de molt mes temps, esforços i diners.

Per tal de poder fer la simulació s'ha hagut de fer un disseny 3D del model calculat teòricament, això es possible gràcies al software de modelatge SolidWorks, que ha sigut de gran utilitat durant el projecte, ja que ha permès fer el model de la turbina amb gran precisió, per tal de poder fer el seu mallat i simular mes endavant aquest.

Gràcies a l'ús de Simscale, el projecte realitzat no ha necessitat de turbines reals per tal de fer assaigs. Això mostra la vital importància que te avui en dia aquests tipus de software per analitzar el comportament de les turbomàquines.

En aquest projecte es presenta un estudi sobre el disseny d'una turbina Kaplan. Inicialment, l'hèlix es va dissenyar teòricament basant-se en càlculs teòrics del cas particular del "Salto del Caño" seleccionat prèviament i donava una eficiència de generació d'energia del 74,1 %.

Després, la turbina dissenyada teòricament es va implementar en un programa 3D per tal de fer simulacions en una plataforma CFD amb exactament les mateixes dimensions. Tanmateix, el mateix disseny teòric implementat amb CFD (amb exactament les mateixes dimensions) només va donar una eficiència al voltant del 83,86 %.

Veient aquesta diferencia de resultats, és clar que els càlculs teòrics tenen menys precisió, cosa que hauria de ser degut a les hipòtesis simplificadores inicials en les que es basen les formules teòriques. No obstant això, els càlculs teòrics sempre són imprescindibles com a pas en el disseny.

Finalment, en l'estudi s'ha estudiat el comportament de la central amb diferents condicions, en concret diferents cabals. D'aquesta manera s'ha vist que tot amb totes les condicions constants, si el cabal definit és diferent del nominal calculat per la turbina, aquesta veurà el seu rendiment reduït a mesura que més s'allunya d'aquest. Una manera de contrarestar aquesta pèrdua de rendiment és recalculant la inclinació que haurien de tenir els àleps amb aquest nou cabal i

seguidament rotar els àleps de la turbina. D'aquesta manera sempre es tindria el màxim rendiment per el cabal que entra, aquest és el punt fort de les turbines que segueixen el model Kaplan.

11. Bibliografía

- [1] Roberto Córdova, Breve Historia de las Turbinas Hidráulicas, El Salvador, 1999.
- [2] Jorge Pertierra Brasa, Proyecto constructivo del aprovechamiento hidroeléctrico del salto de Caño, Asturias, 2019
<https://www.chcantabrico.es/documents/20143/129686/Documento+1+MEMORIA+%28F%29.pdf/6aa8139d-86f5-796d-85dd-9ee32df90ef3>
- [3] Central Hidroeléctrica, 2016
<https://www.enelgreenpower.com/es/learning-hub/energias-renovables/energia-hidroelectrica/central-hidroelectrica>.
- [4] Tipos de centrales, 2012
http://agrega.juntadeandalucia.es/repositorio/24092012/8c/es-an_2012092413_9141050/ODE-bbd3fe0f-8c9e-3609-bb73-f2a6faf94b77/11_tipos_de_centrales.html
- [5] Manuel Combarro Marina, Diseño de una turbina Kaplan y posterior simulación mediante el uso de la dinámica de fluidos computacional, 2022
- [6] Canal de YouTube de la Universidad Politécnica de Valencia
<https://www.youtube.com/@UPV>
- [7] Diego Vicente, Diseño de una turbina Kaplan, 2010
- [8] Hector Garcia, Selección y dimensionamiento de Turbina, 2013
https://www.ingenieria.unam.mx/deptohidraulica/publicaciones/pdf_publicaciones/SELECCION_Y_DIMENSIONAMIENTO_DE_TURBINAS.pdf
- [9] Klara Vekony, Ingeniería de fluidos
- [10] Klara Vekony, Ingeniería de fluidos

- [11] La Red Natura 2000 en España
https://www.miteco.gob.es/es/biodiversidad/temas/espacios-protegidos/red-natura-2000/rn_espana.aspx
- [12] Normativa mediambiental
<https://acortar.link/U4N1EX>
- [13] Sol·licitud de delimitació del domini públic hidràulic
https://www.chcantabrico.es/documents/20143/576835/20200519_solicitud_deslinde.pdf/adf8fb5c-d487-33cf-01ed-ef19e1946278?t=1589873472817
- [14] Comunitat hidrogràfica del Cantàbric
https://www.chcantabrico.es/documents/20143/786695/20210615_ambito_y_rios_ppal.es.png/a4dce06d-29e1-4838-e1e3-66dcba70dd49
- [15] Viktor Kaplan, Wikipedia, 2023
https://es.wikipedia.org/wiki/Viktor_Kaplan
- [16] Pedro Fernandez, Turbinas hidraulicas
http://www.ing.una.py/pdf_material_apoyo/turbinas-hidraulicas.pdf
- [17] Felipe Martin, Triangle de velocitat i equació d'Euler, 2014
<https://ingelibreblog.wordpress.com/2014/09/08/teoria-elemental-de-las-turbomaquinas-triangulo-de-velocidades-y-ecuacion-de-euler/>
- [18] Gifex
<https://www.gifex.com>
- [19] Climate Data,
<https://en.climate-data.org/>

- [20] Cangas de Onís, Wikipedia, 2023
<https://es.wikipedia.org>
- [21] Información socio-economica, SADEI, 2022
<https://www.cangasdeonis.es/informacion-socio-economica>
- [22] Arriondas es el hospital con menos cames por habitante de Asturias, T.Baterra, 2013
<https://www.elcomercio.es>
- [23] Perspectiva actual del gasto energético hospitalario, ETKHO, 2021
<https://www.etkho.com/perspectiva-actual-del-gasto-energetico-hospitalario/>
- [24] Centros de enseñanza, Ayuntamiento de Cangas de Onís
<https://www.cangasdeonis.es/educacion>
- [25] Censo de Población y Viviendas, Instituta Nacional de Estadística
<https://www.ine.es>
- [26] Consumo medio de la luz en España, Selectra
<https://tarifasgasluz.com/faq/cuanto-cuesta-luz-mes>
- [27] Consumos energéticos en edificios escolares, María Guillermina, 2018
<https://www.scielo.cl/pdf/hs/v8n2/0719-0700-hs-8-02-104.pdf>
- [28] Sede Catastro
<https://www1.sedecatastro.gob.es>
- [29] ¿Sabes cuánto se gasta de luz y gas en un restaurante?, B2B News, 2021
<https://www.totalenergies.es/es/pymes/blog/gasto-medio-luz-gas-restaurante>

- [30] Procedimiento para la puesta en servicio de nuevos módulos de generación de electricidad,e-distribución
https://www.edistribucion.com/es/red-electrica/Codigos_de_red/Codigosderedpeninsular.html
- [31] Real Decreto 647/2020, BOE, 8 de julio de 2020
<https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2020-7439>
- [32] Oficina Española de Patentes y Marcas, Gobierno de España
<http://www.oepm.es/cs/OEPMSite/contenidos/Folletos/06-cuestiones-basicas-patentes-modelos.html>
- [33] Turbinas de generacion de enegia hidràulica, Fhsolar&ledIberica
<https://fhsolarled.com/turbinas-de-generacion-de-energia-hidraulica-mini-turbinas/>