

Treball final de grau

Estudi: Grau en Enginyeria Mecànica

Títol: Disseny i construcció d'un banc de proves de rodets hidràulics

Document: Memòria i Annexes

Alumne: Paula Segorbe Serra

Tutor: Eduard Massaguer i Albert Massaguer

Departament: Mecànica de Fluids

Àrea: Enginyeria Mecànica

Convocatòria (mes/any): Setembre/ 2023

ÍNDEX

1. INTRODUCCIÓ	13
1.1 Antecedents.....	13
1.2 Objecte del projecte.....	14
1.3 Abast	14
1.4 Requeriments del projecte	15
2. METODOLOGIA.....	16
2.1 Situació prèvia.....	16
2.2 Metodologia.....	16
2.3 Procediment	17
3. BANC D'ASSAIG	19
3.1 Estat actual.....	20
3.2 Proposta.....	21
3.2.1 Selecció bomba.....	22
3.2.2 Selecció manòmetre i vacuòmetre.....	23
3.2.3 Cabalímetre.....	24
3.3 Dades elèctriques.....	24
3.3.1 Instal·lació elèctrica	25
4. DISSENY DEL RODET.....	26
4.1 Rodet actual	26
4.1.1 Condicions inicials	26
4.1.2 Comparació paràmetres mesurats amb valors teòrics obtinguts.....	29

4.1.3	Comparació paràmetres calculats i mesurats amb paràmetres definits per les dades proveïdes pel fabricant:	38
4.1.4	Obtenció de la corba característica experimental	41
4.1.5	Relació entre corba teòrica ideal i experimental.....	44
4.1.6	Corba característica de la instal·lació	48
4.2	Modificació del rodet amb paràmetre β_2	50
4.3	Modificació del rodet amb paràmetre D2	54
4.3.1	Mètode 1	54
4.3.2	Mètode 2	56
5.	CONSTRUCCIÓ RODETS	62
5.1	Disseny al SolidWorks	62
5.1.1	Geometria β_2	62
5.1.2	Geometria Diàmetre 2 Mètode 1	69
5.1.3	Geometria Diàmetre 2 Mètode 2.....	73
5.2	Impressió.....	75
5.2.1	Fabricació additiva.....	75
5.2.2	Impressora	76
5.3	Muntatge	79
6.	ASSAIG I RESULTATS	81
6.1	Rodet modificant β_2	83
6.2	Rodet modificant D2	87

6.2.1	Mètode 1	87
6.2.2	Mètode 2	91
6.3	Anàlisi dels resultats	95
7.	CONCLUSIONS	96
8.	RELACIÓ DE DOCUMENTS	98
9.	BIBLIOGRAFIA.....	99
	ANNEXES	102
	ANNEX A: FONAMENTACIÓ TEÒRICA.....	103
A.1	Conceptes bàsics	104
A.1.1	Bombes centrífugues	104
A.2	Desenvolupament teòric	114
A.3	Paràmetres de les bombes centrífugues.....	120
A.3.1	Turbomàquines intercanvi d'energia entre el rodet i el fluid	120
A.3.3	Fonamentació teòrica bombes centrífugues	122
A.1	Teoria de semblança	138
	ANNEX B: FACTORS A TENIR EN COMTE.....	140
B.1	Factors d'impressió i disseny a tenir en compte.....	141
	ANNEX C: PRÀCTICA PELS ALUMNES DE L'ASSIGNATURA	145
C.1	Pràctica: Assaig d'un rodet a PF	146
C.1.1	Objecte	146

C.1.2	Introducció.....	146
C.1.3	Metodologia.....	146
C.1.4	Informe.....	163

TAULA D'IL·LUSTRACIONS

Figura 1. Banc de proves	19
Figura 2. Banc de proves actual	20
Figura 3. Esquema proposta de configuració del banc de proves	21
Figura 4. Situació del manòmetre i vacuòmetre a la bomba monoetapa existent del banc...	23
Figura 5. Cabalímetre actual del banc de proves	24
Figura 6. Quadre de control circuit hidràulic	25
Figura 7. Triangle de velocitats a la sortida del rodet	32
Figura 8. Triangle de velocitats a l'entrada del rodet	33
Figura 9. Angles d'entrada i sortida del rodet real mesurat	35
Figura 10. Detall triangle de velocitats a l'entrada del rodet	36
Figura 11. Detall del triangle a la sortida del rodet	36
Figura 12. Resultat de la determinació dels triangles d'entrada i sortida calculats amb les equacions teòriques.....	37
Figura 13. Procediment pel disseny de l'àlep amb un sol arc de circumferència	37
Figura 14. Comparació entre els angles obtinguts de amb metodologies teòriques i experimentals. Àlep verd (dissenyat teòricament). Àlep negre predeterminat pel rodet inicial mesurat.....	38
Figura 15. Corba característica proveïda pel fabricant.....	39
Figura 16. Taula de característiques de la bomba on s'observa que no concorden els paràmetres de la taula amb la gràfica proveïda pel fabricant	40

Figura 17. Angle que determina la direcció en què surt el fluid del rodet.....	50
Figura 18. Metodologia de disseny de l'àlep amb un sol arc de circumferència	63
Figura 19. Resultat d'aplicar el mètode de disseny dels àleps amb les dades del nou PF ...	64
Figura 20. Disseny i cotes part inferior del rodet	65
Figura 21. Disseny de la forma característica dels àleps	65
Figura 22. Aplicació de la metodologia per dibuixar l'àlep amb un sol arc de circumferència amb els paràmetres característics a l'entrada i a la sortida del rodet	66
Figura 23. Part inferior i àleps del rodet dissenyats.....	67
Figura 24. Disseny final del rodet.....	67
Figura 25. Part inferior del rodet del segon disseny	68
Figura 26. Disseny final del rodet.....	68
Figura 27. Disseny de l'àlep modificant el D2 segons el mètode 1	70
Figura 28. Disseny i cotes part inferior rodet (Mètode 1).....	71
Figura 29. Disseny en secció dels àleps	71
Figura 30. Aplicació de la metodologia per dibuixar l'àlep amb un sol arc de circumferència amb els paràmetres característics a l'entrada i a la sortida del rodet (Mètode 1)	72
Figura 31. Vista isomètrica 3D dels àleps	72
Figura 32. Disseny final rodet D2=61,5 mm	73
Figura 33. Disseny part inferior rodet Diàmetre exterior àleps 43 mm. En aquest últim disseny s'opta per fer el disseny de l'eix amb una forma cònica per afavorir l'entrada del premsaestopes.	73
Figura 34. Disseny en secció dels àleps (Mètode 2)	74

Figura 35. Disseny de l'àlep segons el diàmetre exterior de 43 mm.....	74
Figura 36. Disseny 3D dels àleps.....	75
Figura 37. S'afegeix al disseny uns pilars per suportar els esforços del fluid en conseqüència que els àleps són de petites dimensions en aquest model.....	75
Figura 38. Impressora BCN3D Sigma 19.....	77
Figura 39. Programa per determinar paràmetres d'impressió del rodet.....	78
Figura 40. Procés d'impressió dels àleps del rodet	78
Figura 41. Roscatge de la part interna de l'eix del rodet.....	79
Figura 42. Muntatge del rodet a la BOMBA NOX 20 4M	80
Figura 43. Vista lateral del muntatge del rodet amb el premsaestopes	80
Figura 44. Assajos en el banc de proves	82
Figura 45. Classificació màquines de fluid	104
Figura 46. Bomba Espa NOX 20 4M.....	106
Figura 47. Denominació components bomba. 1. Cos de la bomba. 2. Rodet. 3. Tap del manòmetre. 4. Eix de la bomba. 5. Rodament. 7. Tap de buidat. 8. Peu de recolzament de l'estructura. 9. Suport. 10. Femella de subjecció del rodet.	107
Figura 48. Corona directriu	108
Figura 49. Elements del sistema difusor	109
Figura 50. Comportament de les turbomàquines	110
Figura 51. Components de les turbomàquines.....	110
Figura 52. Disseny del rodet en funció de les rpm	111

Figura 53. Classificació rodet segons velocitat específica.....	112
Figura 54. Espejament Bomba NOX 20 4M.....	113
Figura 55. Conservació de la massa.....	116
Figura 56. Plans representació rodet	120
Figura 57. Disposició velocitats.....	121
Figura 58. Triangles de velocitat a l'entrada i a la sortida del rodet	122
Figura 59. Esquema de pèrdues	125
Figura 60. Corbes característiques de la bomba.....	128
Figura 61. Variació de la pendent de la corba en funció de l'angle β_2	133
Figura 62. Evolució de la corba característica real en funció del cabal	136
Figura 63. Conseqüències de la cavitació.....	137
Figura 64. Desfasament en la impressió del primer disseny	141
Figura 65. Resultat de impressió del segon disseny	142
Figura 66. Impressió dels àleps i la base del rodet	142
Figura 67. Situació del rodet a la bomba, es pot comprovar que l'espessor augmenta al haver unit dos peces que contenen ambdues la base del rodet.....	143
Figura 68. Trencament del premsaestopes. Part de la goma queda enganxada a la part del suport de l'eix del motor.	143
Figura 69. Trencament de la goma del premsaestopes	144
Figura 70. Metodologia de disseny de l'àlep amb un sol arc de circumferència	156
Figura 71. Disseny part inferior rodet Diàmetre exterior àleps 43 mm.....	157

Figura 72. Disseny en secció dels àleps (Mètode 2)	158
Figura 73. Disseny de l'àlep segons el diàmetre exterior de 43 mm.....	158
Figura 74. Disseny 3D dels àleps.....	159
Figura 75. S'afegeix al disseny uns pilars per suportar els esforços del fluid en conseqüència que els àleps són de petites dimensions en aquest model.....	159
Figura 76. Procés d'impressió amb el programa BCN 3D	160
Figura 77. Roscatge de la part interna de l'eix del rodet.....	162
Figura 78. Representació del muntatge del rodet a la bomba	162

ÍNDEX DE TAULES

Taula 1. Dades inicials rodet.....	26
Taula 2. Valors mesurats del rodet inicial.....	30
Taula 3. Dades d'alçada i cabal del Punt de funcionament inicial	30
Taula 4. Valors del punt de referència per trobar rendiment volumètric	47
Taula 5. Dades per dissenyar els nous àleps del rodet.....	53
Taula 6. Dades de partida per a dissenyar el rodet.....	62
Taula 7. Dades de partida per a dissenyar el rodet.....	69
Taula 8. Punts relacionats per obtenir rendiment hidràulic.....	152
Taula 9. Dades de partida pel disseny del rodet	156
Taula 10. Paràmetre de qualitat.....	160
Taula 11. Paràmetres del perímetre.....	161
Taula 12. Paràmetres de l'interior de la impressió.....	161
Taula 13. Paràmetres del suport.....	161

ÍNDEX DE GRÀFICS

Gràfic 1. Corba característica experimental	43
Gràfic 2. Rendiment bomba	44
Gràfic 3. Corbes característiques ideal i experimental	45
Gràfic 4. Comparació entre corba característica real i ideal aplicant factor de rendiment hidràulic	46
Gràfic 5. Comparació entre corba característica real i ideal aplicant factor de rendiment hidràulic i volumètric	48
Gràfic 6. Punt de funcionament inicial de la bomba	49
Gràfic 7. Punt de funcionament determinat	51
Gràfic 8. Corba característica teòrica de la bomba amb PF establert (representat amb blau cel).....	52
Gràfic 9. Corba de semblança PF	55
Gràfic 10. Corba característica ideal pel punt de semblança (Modificant el punt de funcionament inicial de rendiment màxim que era una suposició).....	58
Gràfic 11. Corba teòrica modificant el paràmetre D2 pel segon mètode.....	61
Gràfic 12. Resultats experimentals i teòrics pel mètode variació del paràmetre beta 2 (β_2). 84	
Gràfic 13. Barres d'error pel mètode de variació del paràmetre β_2	85
Gràfic 14. Corba cabal- Potència d'accionament per modificació del paràmetre β_2	86
Gràfic 15. Corba cabal- rendiment per modificació del paràmetre β_2	86
Gràfic 16. Resultats experimentals i teòrics pel mètode variació del paràmetre D2 segons Mètode 1.....	88

Gràfic 17. Barres d'error pel mètode de variació del paràmetre D2 segons Mètode 1	89
Gràfic 18. Corba cabal- Potència d'accionament per modificació del paràmetre D2 segons Mètode 1.....	90
Gràfic 19. Corba cabal- rendiment per modificació del paràmetre D2 segons Mètode 1.	90
Gràfic 20. Resultats experimentals i teòrics pel mètode variació del paràmetre D2 segons Mètode 2.....	92
Gràfic 21. Barres d'error pel mètode de variació del paràmetre D2 segons Mètode 2.....	93
Gràfic 22. Corba cabal- Potència d'accionament per modificació del paràmetre D2 segons Mètode 2.....	94
Gràfic 23. Corba cabal- rendiment per modificació del paràmetre D2 segons Mètode 2.	94
Gràfic 24. Corba característica ideal i real de la BOMBA ESPA NOX 20 4M	147
Gràfic 25. Determinació del nou PF	148
Gràfic 26. Corba de semblança i de la instal·lació de la bomba	148
Gràfic 27. Corba ideal afectada per les pèrdues hidràuliques	151
Gràfic 28. Corba ideal afectada per pèrdues hidràuliques i volumètriques.....	153
Gràfic 29. Corba teòrica del nou rodet	155

1. INTRODUCCIÓ

1.1 Antecedents

La fabricació additiva ha suposat i està suposant un canvi important en la manera de produir certs components per la indústria. Aquest sistema permet dissenyar i construir peces úniques a mida a un preu competitiu, ja que no és necessari recórrer als mètodes de producció convencionals que estan destinats a produir grans volums de peces.

En el camp de la Enginyeria hidràulica, els sistemes de bombeig presenten un gran paper dins la necessitat de generar diferents tipus d'energia, és el cas de les bombes centrífugues. Ens permeten bombejar fluids a grans quantitats de cabal i a una gran velocitat, per aquest motiu s'utilitzen en una ampla varietat d'aplicacions com és l'agricultura en l'abastament d'aigua i sobretot en indústries químiques i del petroli.

Prèviament ja s'han fet molts estudis treballant en la millora de la eficiència de les bombes centrífugues, relacionada amb la implementació de la fabricació additiva per generar diferents components. La millora de rendiment està directament relacionada amb la geometria i disseny del rodet, que s'encarrega en gran part de transformar i cedir energia al fluid. Molts dels assajos d'aquestes bombes es duen a terme en bancs de proves per veure com afecta el disseny del rodet en les Corbes de funcionament. Gràcies a la fabricació additiva es possible dissenyar i imprimir rodets de geometries diferents i assajar-los al banc, comparant els resultats amb la teoria de Disseny de turbomàquines.

Adaptant el banc existent de la Universitat, amb una bomba centrífuga de voluta desmuntable es possible assajar diferents dissenys de rodet i comprovar com afecta al seu rendiment a mesura que es varien diferents dades geomètriques.

1.2 Objecte del projecte

En aquest capítol es definiran els objectius de l'estudi.

- Disseny i construcció del banc de proves de rodets hidràulics que permeti assajar rodets de diferents formes i mides, fabricats mitjançant impressora 3D i obtenir les corbes característiques de la bomba (Cabal-Alçada, Cabal-Potència i Cabal-rendiment).
- Determinar una bomba de voluta desmuntable que sigui compatible amb el banc.
- Estudi del rodet inicial de la bomba i relacionar el seu funcionament amb les dades geomètriques teòriques.
- Calcular quin rodet es pot fabricar variant les dades geomètriques per assolir un nou punt de funcionament determinat utilitzant diferents metodologies.
- Fabricació en 3D del nou rodet per tal de comparar els càlculs teòrics amb els resultats dels assajos experimentals.
- Realitzar diferents proves per crear un rodet prou resistent per suportar els esforços exercits pel fluid.
- Concloure quina metodologia s'aproxima més al Punt de Funcionament escollit, comparant els resultats teòrics amb els experimentals.
- Proporcionar una eina i procediment detallat per assajar els paràmetres d'una bomba que permetrà modificar i assajar tot tipus de rodets que treballin a un cabal i una alçada determinades prèviament.

1.3 Abast

Aquesta eina s'usarà a nivell de recerca però també es podrà usar en docència. Es preveu que aquest equip s'utilitzi en l'assignatura de Sistemes i Màquines Fluidomecàniques (Assignatura de GEM i GETI), per tal que els alumnes puguin dissenyar i construir els seus propis rodets i obtenir-ne les seves corbes característiques i punt de funcionament.

1.4 Requeriments del projecte

El projecte tal i com s'ha anomenat anteriorment constarà del disseny i estudi de rodets els quals seran fabricats amb impressió 3D.

La bomba a assajar permetrà treballar amb cabals màxims de $6,3 \frac{m^3}{h}$ que serà l'admissible per el cabalímetre situat al banc de proves.

Es considera que el rodet només pot estar fabricat amb impressió 3D, es fabricaran a la Universitat de Girona gràcies a les impressores del departament de Mecànica. Els rodets de bombes centrífugues es fabriquen normalment per injecció, en aquest estudi utilitzarem la fabricació 3D que permet que cada grup d'alumnes dissenyi el seu rodet. En el camp de la docència, la fabricació 3D permetrà dissenyar el rodet i assajar-lo, estudiant les possibles modificacions per aconseguir optimitzar-lo per un punt de funcionament.

El punt de funcionament establert del qual partirà tot l'estudi és:

$$PF: Q = 2,5 \left(\frac{m^3}{h} \right) \text{ ó } 0,000694 \left(\frac{m^3}{s} \right) \quad H = 2,091 \text{ m.c.a}$$

On: Q: cabal en (m³/h)

H: alçada en (m.c.a)

S'especificaran posteriorment els paràmetres que consideraran el disseny del rodet d'una manera òptima i que permeti la seva fabricació de la manera més eficient. Es determinarà si el rodet es prou resistent mitjançant proves per arribar a l'òptim i es compararan els resultats de les corbes característiques de les bombes.

El model a tractar és una bomba centrífuga NOX 20 4M proporcionada per l'empresa ESPA.

2. METODOLOGIA

2.1 Situació prèvia

El departament d'Enginyeria Fluidomecànica compta amb un banc de proves on es fan diversos assajos amb bombes centrífugues.

Es vol adaptar aquest banc perquè en un futur els alumnes de l'assignatura de Sistemes i Màquines Fluidomecàniques puguin assajar bombes centrífugues que funcionin amb un rodets creats a la mateixa Universitat i comparin els resultats obtinguts.

2.2 Metodologia

Actualment es presenten moltes limitacions alhora d'assajar rodets de bombes centrífugues, existeixen lleis que simplifiquen el comportament del fluid dins la bomba però aquestes no compleixen amb els resultats experimentals. És per aquest motiu que per estudiar el comportament del fluid dins del rodet es necessita partir de dades teòriques i poder-les relacionar amb les experimentals per assegurar el rendiment òptim.

Per altre banda, també existeixen diferents limitacions tant de fabricació com de temps d'assaig. Les empreses opten sovint per fabricar els rodets amb injecció, en aquest estudi es fabricaran les peces amb impressora 3D a la pròpia universitat que permetrà crear prototips d'una manera ràpida i també abaratir els costos de fabricació. Al ser un estudi que es posarà en pràctica en un futur permetrà que els alumnes entrin en contacte també en el món de la fabricació additiva.

L'estudi farà que els alumnes disposin d'una metodologia que els permetrà assajar rodets fabricats de forma pròpia i obtenir informació valuosa sobre la relació entre les corbes de funcionament experimentals i teòriques d'una bomba. Els permetrà també entendre quins són els paràmetres geomètrics del rodet que permeten que treballi en diferents punts de funcionament, és a dir, que treballi depèn dels paràmetres geomètrics a un nivell de cabal i alçada determinats.

Un cop assajada la bomba s'obtidran les corbes característiques reals que són la representació que mostra la relació entre el cabal i l'alçada que pot assolir donat un règim de gir determinat. Es compararan les corbes característiques obtingudes de manera teòrica amb l'experimental, per determinar una metodologia per assajar rodets que treballin en punts de funcionament variant els seus paràmetres geomètrics. Es pot consultar tota la teoria referent a bombes centrífugues a l'Annex A. Fonamentació teòrica.

2.3 Procediment

L'estudi es durà a terme seguint els següents passos:

En primer lloc, s'estudiarà les limitacions del banc de proves existent al laboratori de Fluidomecànica. S'escollirà una bomba que treballi dins el rang que pot absorbir el banc de treball. S'adaptarà la bomba al banc de proves existent i s'ajustaran els elements de mesura per tal d'obtenir els resultats experimentals.

A continuació, s'estudiaran els paràmetres geomètrics de les bombes i com afecta en els gràfics de funcionament, es graficarà la corba obtinguda de manera experimental, teòrica i es compararan els seus resultats per un punt de funcionament.

Es pretén amb aquest estudi dissenyar rodets semblants al inicial de la bomba que puguin treballar en punts de funcionament determinats. A partir de les equacions teòriques es desenvoluparà el mètode per obtenir els paràmetres geomètrics dels rodets en els nous punts de funcionament i s'escollirà el sistema més adequat per tal de dissenyar-lo de la manera més senzilla possible.

Seguidament es generaran diferents rodets gràcies a la fabricació additiva i a la utilització de la impressora 3D. S'assajarà i es comprovarà la seva resistència amb proves degut al canvi de material i si els resultats experimentals s'ajusten als teòrics.

L'estudi ha de ser adequat per tal de ser utilitzat en un futur pels alumnes de l'assignatura de Sistemes i Màquines Fluidomecàniques, amb la finalitat de que cada alumne parteixi d'un

punt de treball escollit i pugui dissenyar el seu propi rodet i verificar si s'ajusta o no les lleis teòriques amb els assajos experimentals.

3. BANC D'ASSAIG

Actualment tots els fabricants fan assajos del comportament de les bombes en bancs de proves controlats per ordinador, abans d'entregar-les als respectius clients. En el nostre cas les dades seran obtingudes de manera directa experimentalment sense fer ús d'un sistema d'adquisició de dades per ordinador.

Un banc de proves és una plataforma que permet dur a terme comprovacions, proves científiques i estudiar el desenvolupament de nous productes. S'utilitzarà per el càlcul i obtenció de les corbes de funcionament de la bomba i per provar les limitacions del rodet fabricat.



Figura 1. Banc de proves

Com s'observa en la Figura 1, la bomba aspirarà l'aigua del tanc on hi ha diferents vàlvules que permeten el pas del fluid. Es mesurarà la pressió a l'entrada i la sortida de la bomba a més del cabal que passa pel cabalímetre (part superior).

3.1 Estat actual

El banc de proves actual compta amb tres bombes centrífugues multietapa que s'utilitzen per fer les pràctiques de laboratori i diferents assajos de l'assignatura de Sistemes i Màquines Fluidomecàniques, tal i com es veu en la Figura 2. Per exemple connexions sèrie paral·lel i obtenció de les corbes característiques.

La instal·lació compta amb un tanc on es recircularà el fluid, compostat per una sèrie de conductes per conduir l'aigua des de el tanc fins a la part superior de la bomba, a més de les eines necessàries per estudiar el funcionament del rodet.

En l'estudi es substituirà una de les bombes multi-etapa per una bomba de voluta desmuntable que es pugui adaptar correctament al banc, en el *capítol 3.2 Proposta* es procedirà a descriure el procediment per tal d'escollir la bomba.



Figura 2. Banc de proves actual

3.2 Proposta

En aquest capítol s'especificaran totes les dades per determinar quina bomba s'ha escollit que pugui ser compatible amb el banc de proves existent.

Es proposa la compra d'una bomba amb voluta desmuntable que permetrà la substitució del rodet. A més, s'hauran d'instal·lar els elements de mesura com vacuòmetre, manòmetre i cabalímetre. S'ha de tenir en compte que la bomba escollida estigui dins el règim de mesura dels elements que ja disposa el laboratori i que el quadre de control sigui capaç de mesurar quina potència i intensitat disposem (Veure apartat 1.4 Requeriments).

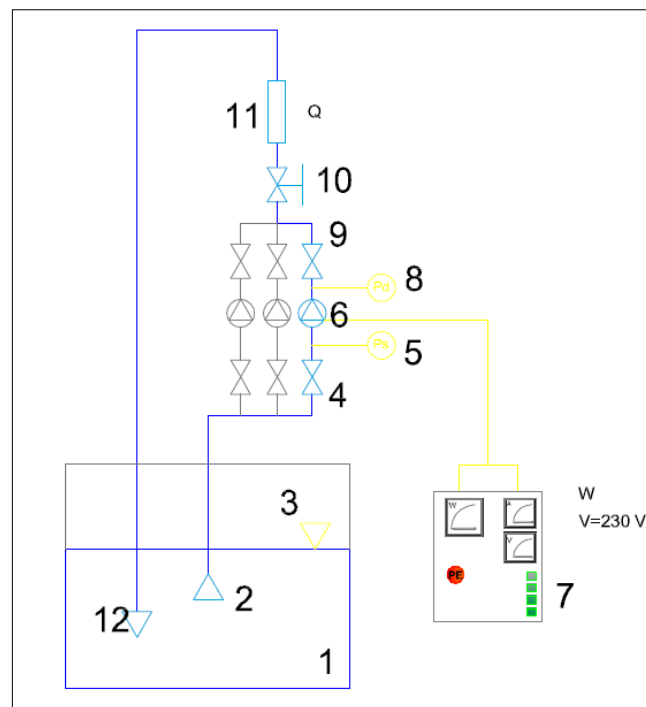


Figura 3. Esquema proposat de configuració del banc de proves

Manòmetre aspiració (5): Mesura la pressió en l'aspiració.

Manòmetre descàrrega (8): Mesura la pressió a la sortida de la bomba, on les pressions són superiors.

Cabàlmetre (11): Realitza les mesures de cabal que passen per la bomba. Per controlar mesures de cabal reduïdes s'utilitzen mesuradors de flotador, que compten amb un flotador dins un tub cònic muntat verticalment que senyalitza la mesura del cabal.

Wattímetre (7): Mesura la potència d'accionament de la bomba.

Vàlvules (4/9/10): Regulen tant la pressió com el cabal de la instal·lació i permeten el pas de més o menys fluid per els conductes.

3.2.1 Selecció bomba

La bomba usada per aquest estudi com s'ha mencionat anteriorment serà de voluta desmuntable. S'obtindrà gràcies a la casa ESPA situada a Banyoles.

Es tractarà d'una bomba centrífuga mono etapa per a recirculació de l'aigua. El fabricant al proporcionar les corbes característiques de la bomba permetrà estudiar com es comportarà el nou rodet dissenyat .

Es determinaran els requisits posteriorment explicats de flux i pressió que requereix la bomba. Es mirarà al catàleg d'un proveïdor proper quines bombes disposen de voluta desmuntable de manera senzilla, per tal de poder fer els estudis dels futurs rodets que dissenyaran l'alumnat de l'assignatura de Sistemes i Màquines Fluidomecàniques.

Els elements del banc, segons el tipus de mesura es poden dividir en tres grups:

- Mesures hidràuliques: (pressió, pressió diferencial).
- Mesures elèctriques (V.I. fase, freqüència).
- Mesures ambientals (temperatures i humitats).

Extret del llibre Bombes centrífugues, Parafino. Autor: E Carnicer Royo i C. Mainar Hasta. Capítol BANCO DE ENSAYO BOMBAS HIDRÁULICAS PÀG 109.)

3.2.2 Selecció manòmetre i vacuòmetre

El manòmetre i vacuòmetre son instruments de mesura de pressió, la major diferència entre els dos és que el manòmetre mesura pressions per sobre l'atmosfèrica al contrari del vacuòmetre que mesura pressions per sota l'atmosfèrica.

El vacuòmetre es situarà a la succió i el manòmetre a descàrrega.

La bomba NOX 20 4M treballa amb pressions entre 0,7 i 0,1 a la sortida(descàrrega). A la descàrrega es situarà el manòmetre que mesura pressions fins a 1,6 bar i a la succió es situarà un vacuòmetre capaç de mesurar lectures fins a -1 bar.

Es treballa amb els instruments que ja disposava el laboratori per mesurar pressions de succió i aspiració de les bombes monoetapa, coneixent que les pressions de la nova bomba no seran superiors.



Figura 4. Situació del manòmetre i vacuòmetre a la bomba monoetapa existent del banc

3.2.3 Cabalímetre

El cabalímetre és un instrument que s'encarrega de mesurar el cabal (volumètric) d'un fluid. Són elements que tal com s'observa en la Figura 5 es solen col·locar en línia amb la canonada que transporta el fluid.

Els límits de mesura del cabalímetre van de 0 a 6,3 (m³/h). S'haurà d'escollir una bomba que el seu règim de treball estigui dins el que mesura el cabalímetre.



Figura 5. Cabalímetre actual del banc de proves

3.3 Dades elèctriques

Dades elèctriques

S'usarà una bomba NOX 20 de model monofàsic que funciona amb una freqüència de 50 Hz de 1~230 V. La potència del motor és de 0.15 KW, la potència absorbida de 0.20 KW i la intensitat màxima de 1 A.

Característiques constructives

Els diàmetres d'aspiració i d'impulsió de la bomba seran de 32-38 mm. S'assegurà la estanqueïtat mitjançant un tancament mecànic d'alúmina-grafit. La connexió entre els conductes tant a l'aspiració com a la impulsió serà mitjançant Racor manguera.

Límits d'utilització

Es limita la utilització amb fluids superiors a 40° C. En l'estudi al treballar amb un fluid a temperatura ambient no suposa inconvenients.

3.3.1 Instal·lació elèctrica

La instal·lació comptarà amb un quadre de control tal i com es mostra a la Figura 6, per tal de controlar la velocitat de rotació del nostre rodet, s'aconsegueix mitjançant la variació del voltatge. Permetrà saber la potència d'accionament de la bomba i la intensitat.



Figura 6. Quadre de control circuit hidràulic

4. DISSENY DEL RODET

En el següent capítol, es dissenyarà un rodet nou a partir del rodet de la bomba prèviament estudiat. Es determinarà de manera experimental la corba real de la bomba amb el rodet inicial, es trobarà a partir de condicions geomètriques mesurades prèviament quina és l'equació característica ideal de la bomba i quins són els respectius rendiments hidràulics i volumètrics.

Seguidament es determinarà quin és el punt de funcionament de la bomba amb el rodet inicial i a partir d'aquest es trobarà un altre punt de funcionament variant únicament condicions geomètriques dels àleps. En el primer estudi, el Punt de Funcionament inicial al no ser conegut es suposarà que és el punt on la bomba té el rendiment màxim.

4.1 Rodet actual

4.1.1 Condicions inicials

Es fixaran unes condicions inicials mesurades del rodet proveït pel fabricant, tal i com s'observa a la Taula 1, per tal de trobar quina és la corba ideal de la bomba.

D1 (m)	0,035
D2 (m)	0,08
b1 (m)	0,006
b2 (m)	0,006
β_2(°)	20
α_1 (°)	90
n (rpm)	2900

Taula 1. Dades inicials rodet

On: D1: Diàmetre d'entrada del fluid

D2: Diàmetre de sortida del fluid

b1: Aresta d'entrada dels àleps

b2: Aresta de sortida dels àleps

β_2 : Angle de sortida del fluid al rodet que relaciona les components velocitat relativa i velocitat perifèrica a l'entrada.

α_1 : Angle d'entrada del fluid al rodet que relaciona les components de velocitat absoluta del fluid amb la component velocitat perifèrica.

n: Número específic de revolucions a la que gira el rodet de la bomba centrífuga.

La corba ideal com s'ha mencionat anteriorment al capítol 2.2.2.1 Turbomàquines intercanvi d'energia entre el rodet i el fluid ve determinada per l'Equació 1.

$$H = A + BQ \quad (\text{Eq 1.})$$

On: H: Alçada d'Euler (m.c.a)

Q: Cabal ideal (m^3/s)

El paràmetre A es calcula tal i com es s'expressa a l'Equació 2 i ens dona informació sobre el punt d'intersecció amb l'origen d'ordenades.

$$A = \frac{u_2^2}{g} \quad (\text{Eq 2.})$$

On: u_2 : Velocitat perifèrica a la sortida del rodet (m/s)

g : Coeficient de gravetat es considera un valor de 9,81 ($\frac{m^2}{s}$)

El paràmetre B es calcula tal i com s'expressa en l'Equació 3.

$$B = -\frac{u_2 \cot \beta_2}{k_2 g \pi D_2 b_2} \quad (\text{Eq 3.})$$

On: u_2 : Velocitat perifèrica a la sortida del rodet (m/s)

$\cot \beta_2$: cotangent de l'angle β_2 (°)

k_2 : Coeficient d'obstrucció que depenen de l'espai ocupat per l'espessor dels àleps a l'àrea d'entrada i sortida del rodet (Jose Agüera Soriano, IV Edición).

JOSE AGÜERA SORIANO. Mecánica de Fluidos incompresibles i turbomàquines hidràulicas. Capitulo XII. Bombas hidràulicas. 4. Curva motriz teorica H-Q. p.524-525

g : Coeficient de gravetat es considera un valor de 9,81 m^2/s

π : Número pi.

D_2 : Diàmetre de sortida (m).

b_2 : Aresta dels àleps de sortida (m).

El càlcul de la velocitat perifèrica es determina segons l'Equació 4:

$$u = \frac{2\pi n}{60} r \quad (\text{Eq 4.})$$

On: π : Número pi.

n: Número específic de revolucions a la que gira el rodet de la bomba centrífuga (rpm).

r: Radi d'entrada o sortida del rodet depenent si es vol trobar la velocitat perifèrica a l'entrada o a la sortida del rodet.

Calculant els següents paràmetres s'obté l'equació característica de la bomba (Equació 5):

$$Heu = 15,0419523 - 2256,111824 Qi \quad (\text{Eq 5.})$$

On: Heu: Alçada teòrica d'Euler (m.c.a)

Qi: Cabal ideal (m^3/s)

4.1.2 Comparació paràmetres mesurats amb valors teòrics obtinguts

Es mesuren els paràmetres geomètrics del rodet, els resultats s'expressen a la Taula 2.

Alpha 1	90°
Alpha 2	4°
Beta 1	17°
Beta 2	20°
D1	0,035 m
D2	0,08 m

b1=b2	0,006 m
--------------	---------

Taula 2. Valors mesurats del rodet inicial

On: Els paràmetres estan definits en el Capítol 4.1.1.

Es calculen els paràmetres geomètrics del rodet de manera teòrica amb les fórmules derivades de les equacions de Bernoulli i Euler que s'exposen en l'*annex A. Fonamentació teòrica* i es mantenen les mesures de D1, D2, b1 i b2 per tal de trobar els angles d'entrada i sortida de manera teòrica.

S'obté el valor de la velocitat perifèrica tal i com s'expressa a l'Equació 6.

$$u_2 = \frac{2\pi n}{60} r = 12,147 \text{ m/s} \quad (\text{Eq 6.})$$

On: π : Número pi.

n: Número específic de revolucions a la que gira el rodet de la bomba centrífuga (rpm).

r: Radi d'entrada o sortida del rodet depenent si es vol trobar la velocitat perifèrica a l'entrada o a la sortida del rodet.

S'agafa com a punt de funcionament inicial de la corba on el rendiment és màxim i s'obté que l'alçada d'Euler i el cabal ideal són els representats a la Taula 3.

Qi=	0,00111111
Heu=	12,5351614

Taula 3. Dades d'alçada i cabal del Punt de funcionament inicial

On: Heu: Alçada teòrica d'Euler (m.c.a)

Qi: Cabal ideal (m^3/s)

Seguidament amb les equacions d'Euler es pot determinar els paràmetres dels angles d'entrada i sortida del fluid.

Tal i com s'expressa en l'Equació 7 podem determinar el paràmetre c_{2u} considerant que α_1 és 90 graus a l'entrada del rodet.

$$Heu = \frac{u_2 c_{2u} - u_1 c_{1u}}{g} \quad (\text{Eq 7.})$$

On: u_2 : Velocitat perifèrica a la sortida del rodet (m/s).

g : Coeficient de gravetat es considera un valor de 9,81 ($\frac{m^2}{s}$).

c_{2u} : Component perifèrica de la velocitat absoluta del fluid a la sortida (m/s).

u_1 : Velocitat perifèrica a l'entrada del rodet (m/s).

c_{1u} : Component perifèrica de la velocitat absoluta del fluid a l'entrada (m/s).

$$c_{2u} = 10,12307209 \text{ m/s}$$

S'obté el valor de c_{2m} amb l'Equació 8.

$$c_{2m} = \left(\frac{qi}{\pi \cdot b \cdot D} \right) = 0,736828 \text{ m/s} \quad (\text{Eq 8.})$$

On: c_{2m} : Component meridional de la velocitat absoluta del fluid a la sortida (m/s).

q_i : Cabal ideal (m^3/s).

π : Número pi.

b : Correspon a l'ample del rodet a la sortida (m).

D : Es el diàmetre a la sortida del rodet (m).

El valor de w s'obté tal i com es pot veure en l'Equació 9. Tenint en compte la relació del triangle de velocitats a la sortida del rodet:

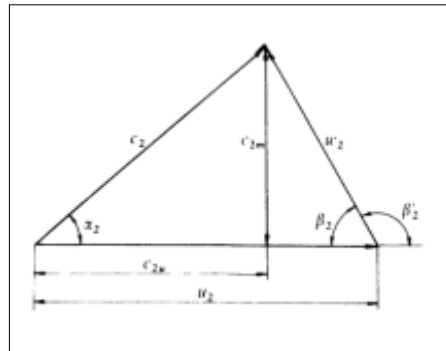


Figura 7. Triangle de velocitats a la sortida del rodet

$$w_2 = u_2 - c_{2u} = 2,02442 \text{ m/s}$$

(Eq 9.)

On: w_2 : Velocitat relativa del fluid respecte l'àlep a la sortida (m/s).

u_2 : Velocitat perifèrica a la sortida del rodet (m/s).

c_{2u} : Component perifèrica de la velocitat absoluta del fluid a la sortida (m/s).

Es procedeix a obtenir el paràmetre d' α_2 amb l'Equació 10:

$$\arctg(\alpha_2) = \frac{c_{2m}}{c_{2u}} = 4,16304^\circ \quad (\text{Eq 10.})$$

On: α_2 : Angle de sortida comprès entre la velocitat absoluta i relativa.

c_{2m} : Component meridional de la velocitat absoluta del fluid a la sortida (m/s).

c_{2u} : Component meridional de la velocitat absoluta del fluid a la sortida (m/s).

Del triangle d'entrada s'obtenen els valors a l'entrada del rodet. En primer lloc s'obté la velocitat perifèrica u_1 :

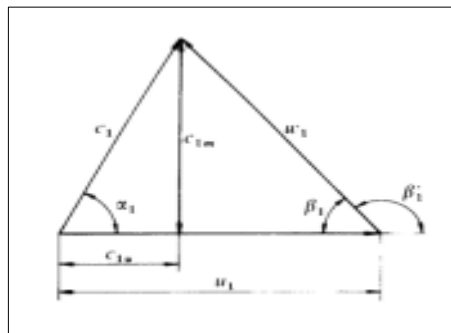


Figura 8. Triangle de velocitats a l'entrada del rodet

Es sap que per una bomba que gira a n (rpm) la velocitat d'arrossegament en un punt que està a r de l'eix de gir serà $\vec{u} = \vec{\omega} \times \vec{r}$ (Apunts de Sistemes i Màquines Fluidomecàniques UdG, 2021). A partir de l'Equació 11 anterior s'obté la velocitat perifèrica a l'entrada del rodet.

$$u_1 = \omega * r_1 = 5,314528 \text{ m/s} \quad (\text{Eq 11.})$$

On: u_1 : Velocitat perifèrica a l'entrada del rodet (m/s).

ω : Velocitat a la que gira el rodet (rad/s).

r_1 : Radi a l'entrada del rodet (m).

Els altres valors de velocitats i beta 1(β_1) a l'entrada els resolen tal i com es veuen en les següents equacions:

$$c_{m1} = \left(\frac{q_i}{\pi \cdot b_1 \cdot D_1} \right) = 1,68417 \text{ m/s} \quad (\text{Eq 12.})$$

On: c_{m1} : Component meridional de la velocitat absoluta del fluid a l'entrada (m/s)

q_i : Cabal ideal (m^3/s).

π : Número pi.

b_1 : Correspon a l'ample del rodet a l'entrada (m).

D_1 : Es el diàmetre a l'entrada del rodet (m).

$$\arctg(\beta_1) = \frac{c_{1m}}{u_1} = 17,5834^\circ \quad (\text{Eq 13.})$$

On: β_1 : Angle comprès entre la velocitat relativa i lineal a l'entrada($^\circ$).

c_{1m} : Component meridional de la velocitat absoluta del fluid a l'entrada del rodet (m/s).

u_1 : Velocitat perifèrica a l'entrada del rodet (m/s).

$$w_1 = \frac{c_{1m}}{\sin(\beta_1)} = 5,5750 \text{ m/s} \quad (\text{Eq 14.})$$

On: **w1**: Velocitat relativa del fluid respecte l'àlep a l'entrada (m/s).

c1m: Component meridional de la velocitat absoluta del fluid a l'entrada del rodet (m/s).

β_1 : Angle comprès entre la velocitat relativa i lineal ($^\circ$).

Es representa en les Figures 9-14 amb el programa de dibuix tècnic Autocad la comparació entre els angles mesurats i obtinguts del procediment teòric amb les corbes unidimensionals de la teoria dels rodets:

- Rodet mesurat:

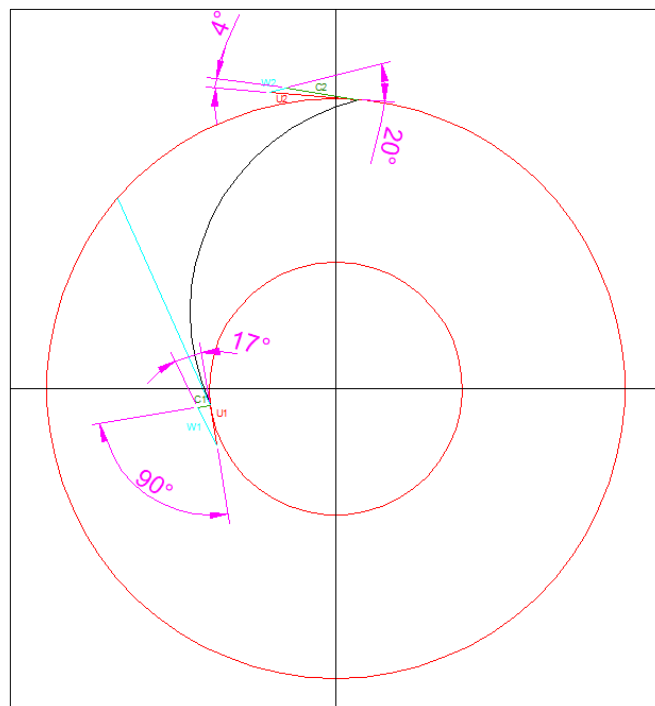


Figura 9. Angles d'entrada i sortida del rodet real mesurat

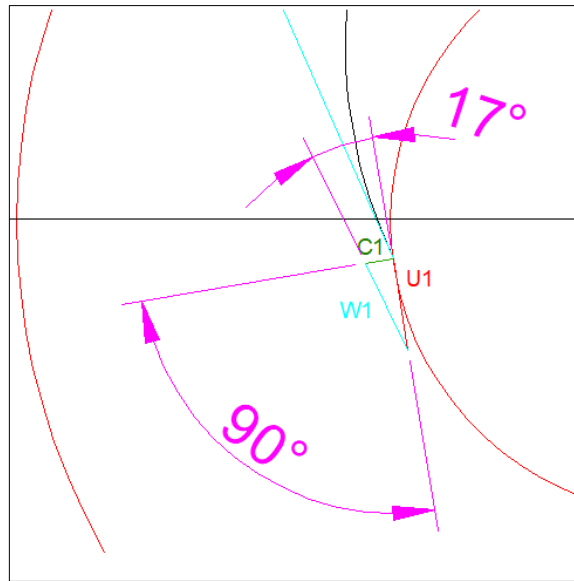


Figura 10. Detall triangle de velocitats a l'entrada del rodet

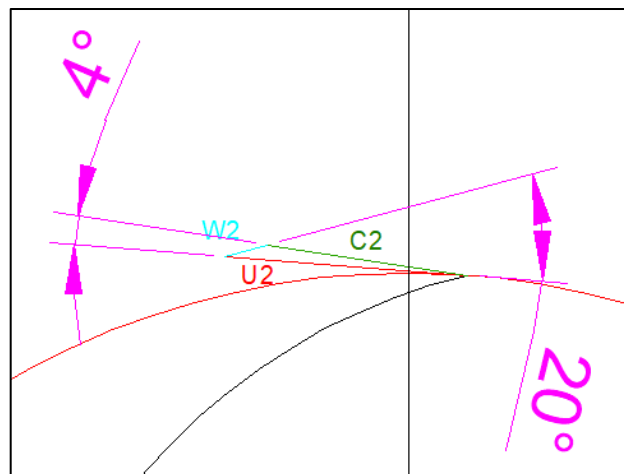


Figura 11. Detall del triangle a la sortida del rodet

- Rodet calculat:

El rodet calculat de manera teòrica necessita d'un procediment per arribar al seu disseny geomètric característic. En aquest capítol es veuran els resultats del procés de disseny però més endavant en el capítol de disseny es veurà quin ha estat el procediment detallat per obtenir l'àlep del rodet.

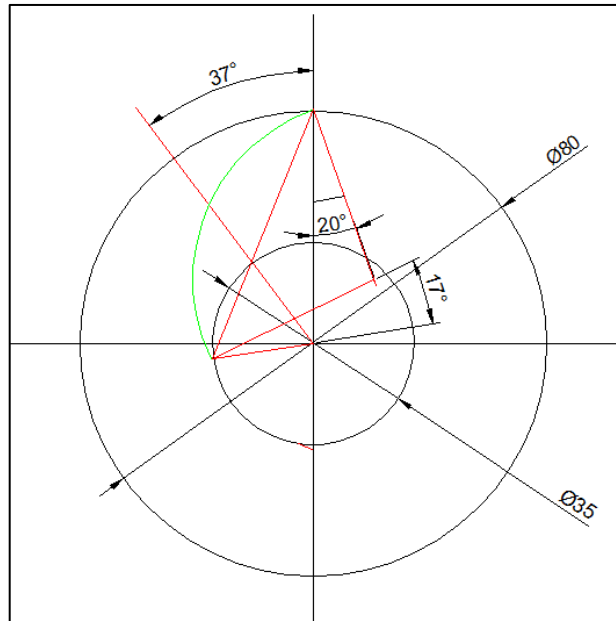


Figura 12. Resultat de la determinació dels triangles d'entrada i sortida calculats amb les equacions teòriques

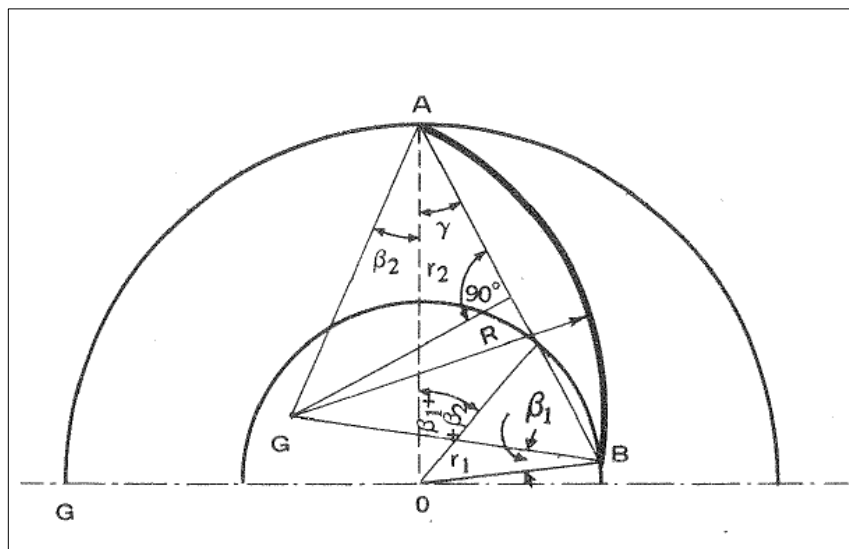


Figura 13. Procediment pel disseny de l'àlep amb un sol arc de circumferència

- Resultat:

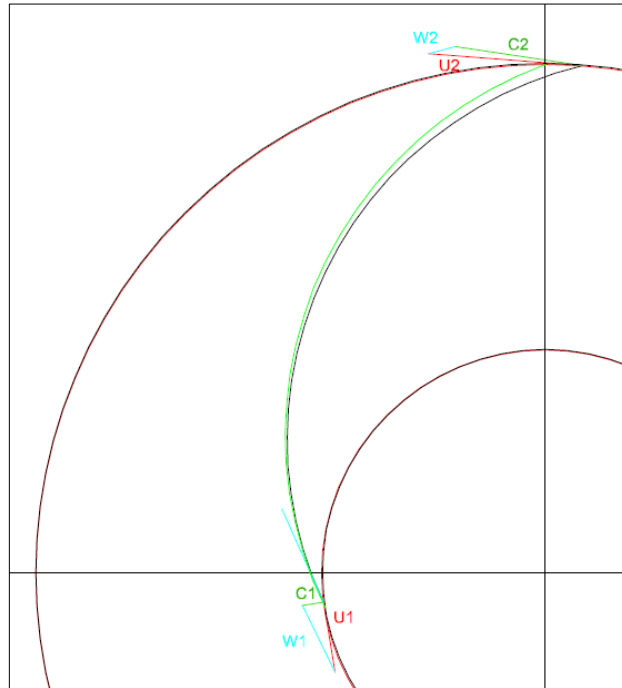


Figura 14. Comparació entre els angles obtinguts de amb metodologies teòriques i experimentals. Àlep verd (dissenyat teòricament). Àlep negre predeterminat pel rodet inicial mesurat.

4.1.3 Comparació paràmetres calculats i mesurats amb paràmetres definits per les dades proveïdes pel fabricant:

S'extreuen les dades geomètriques del rodet a partir de la corba característica proveïda pel fabricant que es pot observar en la Figura 15.

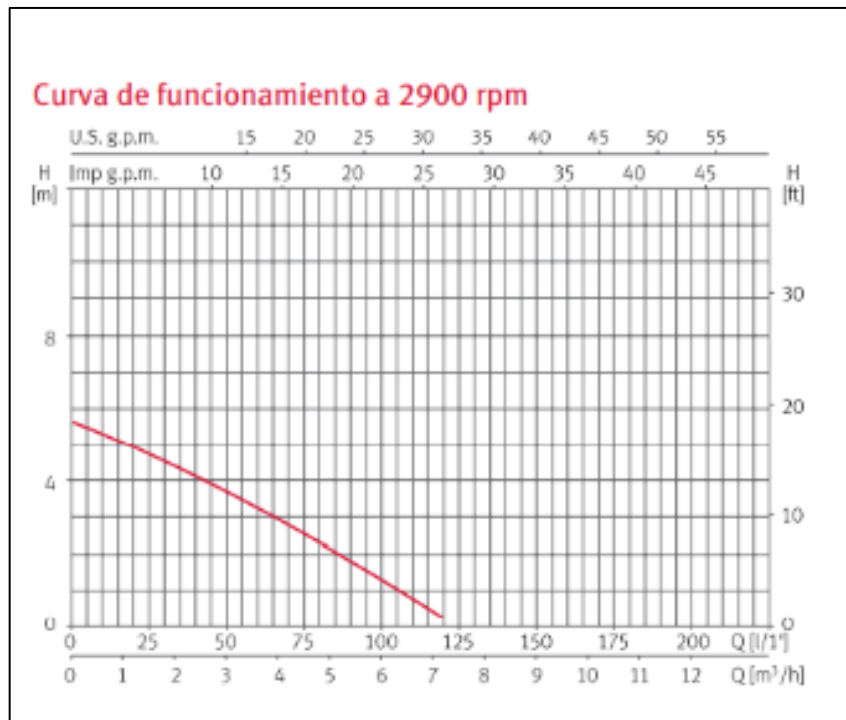


Figura 15. Corba característica proveïda pel fabricant

La corba característica de la bomba tal i com es troba a l'Annex Fonamentació Teòrica ve definida pels paràmetres que s'expressen en l'Equació 15.

$$H_b = A + BQ_r + CQ_r^2 \quad (\text{Eq 15.})$$

On: H_b : Alçada útil que proporciona la bomba (m.c.a).

A, B, C : Paràmetres simplificatius que relacionen la geometria del rodet amb el comportament de la bomba.

Q_r : Cabal real (m^3/s)

S'obté el paràmetre A quan $Q_r = 0$:

$$A = 5,6$$

Com es pot veure aquest paràmetre és l'alçada màxima que pot assolir la bomba, si ens fixem en la taula de característiques de la Figura 16, es pot observar que aquest paràmetre ja no concorda amb el de la bomba que dona una alçada màxima de 7,5 *m. c. a.*

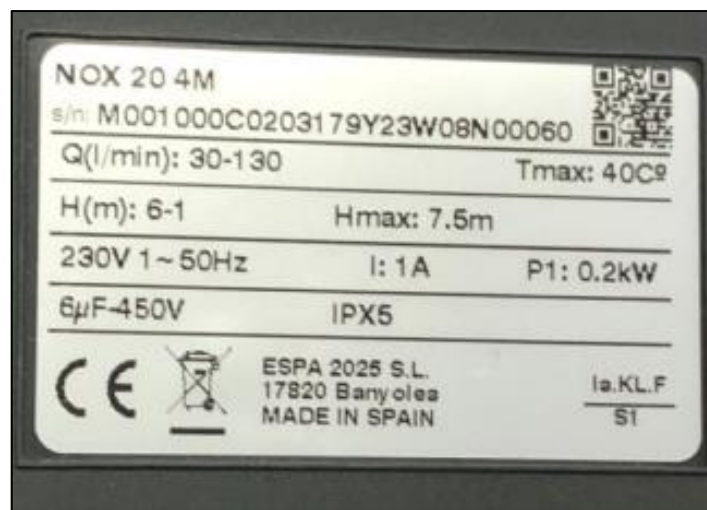


Figura 16. Taula de característiques de la bomba on s'observa que no concorden els paràmetres de la taula amb la gràfica proveïda pel fabricant

Per comprovar si els paràmetres de la gràfica proveïts pel fabricant són incorrectes es procedeix a calcular el diàmetre exterior a partir del coeficient A segons les Equacions 16 i 17.

$$A = \frac{u_2^2}{g} \quad (\text{Eq 16.})$$

On: u_2 : Velocitat perifèrica a la sortida del rodet (m/s).

g : Coeficient de gravetat, es considera un valor de 9,81 (m^2/s)

$$u_2 = \frac{2\pi n}{60} r \quad (\text{Eq 17.})$$

On: u_2 : Velocitat perifèrica a la sortida del rodet (m/s).

π : Número pi.

n : número específic de revolucions a la que gira el rodet de la bomba centrífuga.

r : Radi d'entrada o sortida del rodet depenent si es vol trobar la velocitat perifèrica a l'entrada o a la sortida.

Obtenim el valor del diàmetre exterior que és de 0,0488127 m. Comparant-lo amb el paràmetre obtingut del capítol anterior, es pot observar que no concorden les dades proveïdes pel fabricant amb els valors obtinguts del rodet.

Es procedirà a fer l'assaig del rodet inicial a la bomba per tal d'obtenir la corba característica ja que els paràmetres obtinguts pel fabricant difereixen molt de la realitat.

4.1.4 Obtenció de la corba característica experimental

S'obté de manera experimental al banc de proves l'equació característica de la bomba. El banc anteriorment comptava amb tres bombes que tenien habilitats tres conductes amb capacitat de treballar en sèrie i paral·lel. En aquest estudi es procedirà a substituir una de les bombes anteriors i adaptar-la a la instal·lació vigent.

4.1.4.1 Metodologia

A l'apartat 3.2.1 *Elements de mesura* es pot comprovar com està col·locada la bomba i quin és el seu ambient de treball.

Per tal de poder trobar la corba característica de la bomba es procedirà a:

- Fixar la constant de rotació del rodet triant el voltatge nominal que ve per defecte a la placa de característiques de la bomba. Per tal que la bomba treballi a la velocitat nominal de 2900 rpm.
- Els valors d'alçada i cabal s'obtenen progressivament utilitzant la vàlvula de descàrrega en primer lloc totalment oberta. S'agafen de manera experimental els valors de pressió de succió de la bomba (p_s) a l'entrada i el valor de pressió de descàrrega (p_d) a la sortida de la bomba. També s'obtenen les dades de cabal i consum d'energia absorbida amb el cabalímetre i la caixa de control respectivament.
- Es repeteix el mateix procés tancant gradualment la vàlvula a la descàrrega i agafant valors per cabals més petits.
- Es calcula l'alçada neta de la bomba i el rendiment total utilitzant les Equacions 18 i 19.

$$Hm = \frac{p_D - p_S}{\gamma} \quad (\text{Eq 18.})$$

On: p_D : Pressió a la descàrrega (Pa).

p_S : Pressió a la succió (Pa).

γ : Densitat de l'aigua * Factor de gravetat.

$$\eta = \frac{\gamma H Q}{P_a} \quad (\text{Eq 19.})$$

On: γ : Densitat de l'aigua * Factor de gravetat.

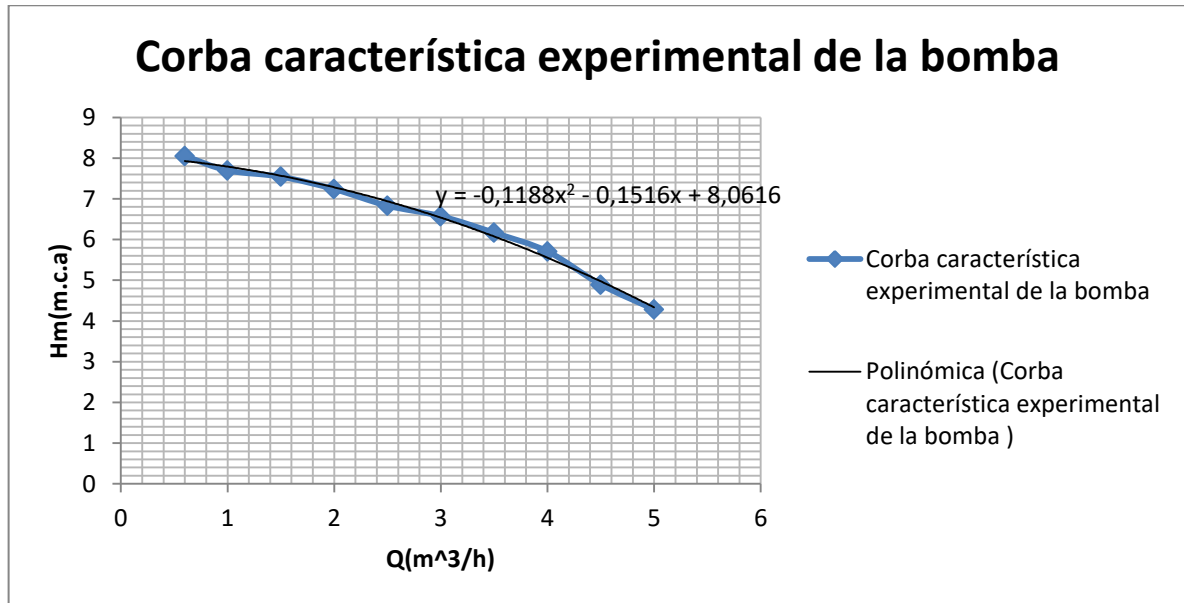
H: Alçada que proporciona la bomba (m.c.a)

Q: Cabal (m^3/s)

P_a : Potència d'accionament (W).

4.1.4.2 Resultats

Els resultats obtinguts s'expressen en el Gràfic 1.



Gràfic 1. Corba característica experimental

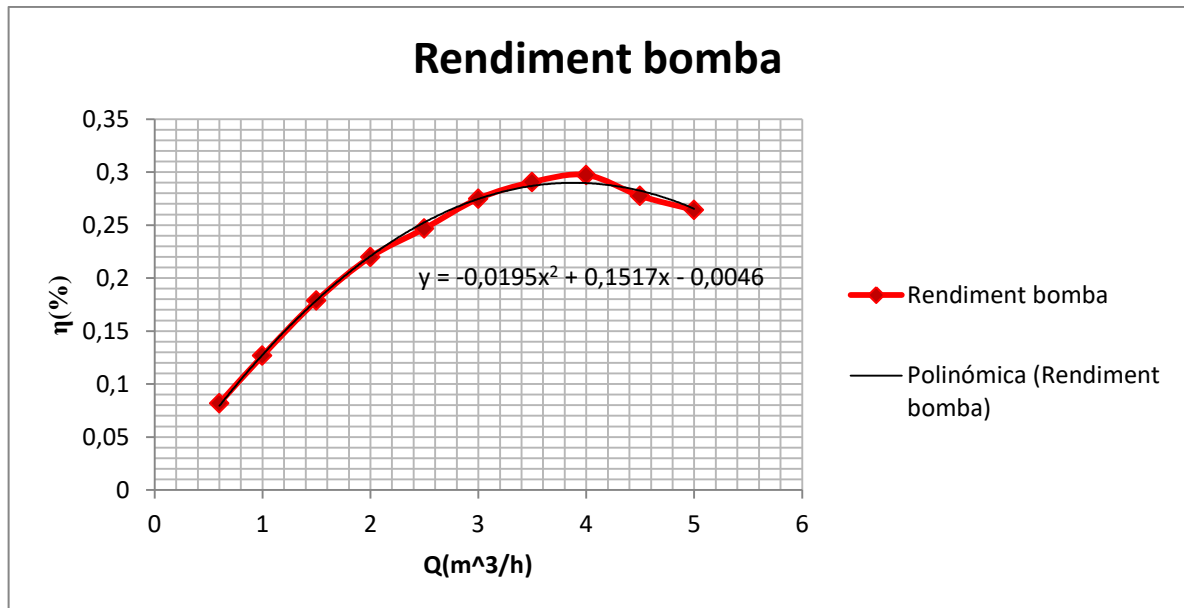
Del Gràfic 1 s'obté l'Equació 20 característica de la bomba real tal i com es pot veure a continuació:

$$H_b = -2 \cdot 10^6 Q_r^2 - 545,73 Q_r + 8,0616 \quad (\text{Eq 20.})$$

On: H_b : Alçada que proporciona la bomba (m.c.a).

Q_r : Cabal real (m³/s).

Els valors de rendiment s'expressen en el Gràfic 2.



Gràfic 2. Rendiment bomba

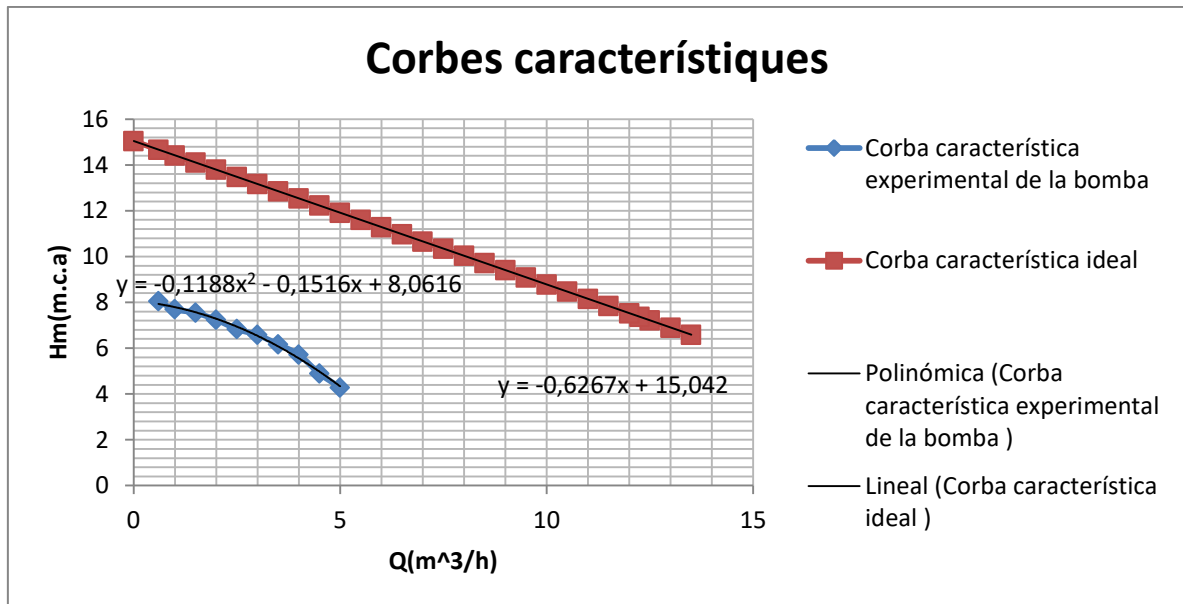
4.1.5 Relació entre corba teòrica ideal i experimental

Les corbes característiques ideal i real estan relacionades entre sí a través dels coeficients de rendiment volumètric i hidràulic, aquests són generats per les pèrdues per fregament, xocs a l'entrada i sortida de la bomba i per recirculació del fluid.

L'objectiu d'aquest capítol és poder passar de la corba ideal al punt de funcionament de la corba real. Això ens permetrà treballar al punt de funcionament determinat només canviant els paràmetres geomètrics dels àleps del rodet. Es treballa amb la corba característica ideal, perquè les fórmules que relacionen la geometria amb l'alçada i cabal estan determinades per la teoria unidimensional del fluid, on només es contempen equacions lineals no polinòmiques.

4.1.5.1 Obtenció rendiment hidràulic i volumètric

La corba característica experimental i ideal extretes de les dimensions del rodet queden representades tal i com s'observa en el Gràfic 3, abans d'aplicar els determinats rendiments a la corba ideal.



Gràfic 3. Corbes característiques ideal i experimental

El rendiment hidràulic és la relació entre l'alçada real i ideal. Es calcula tal i com s'observa a l'Equació 21. En bombes el rendiment hidràulic relaciona, entre l'entrada i la sortida de la bomba quin és el salt d'energia que pateix el fluid.

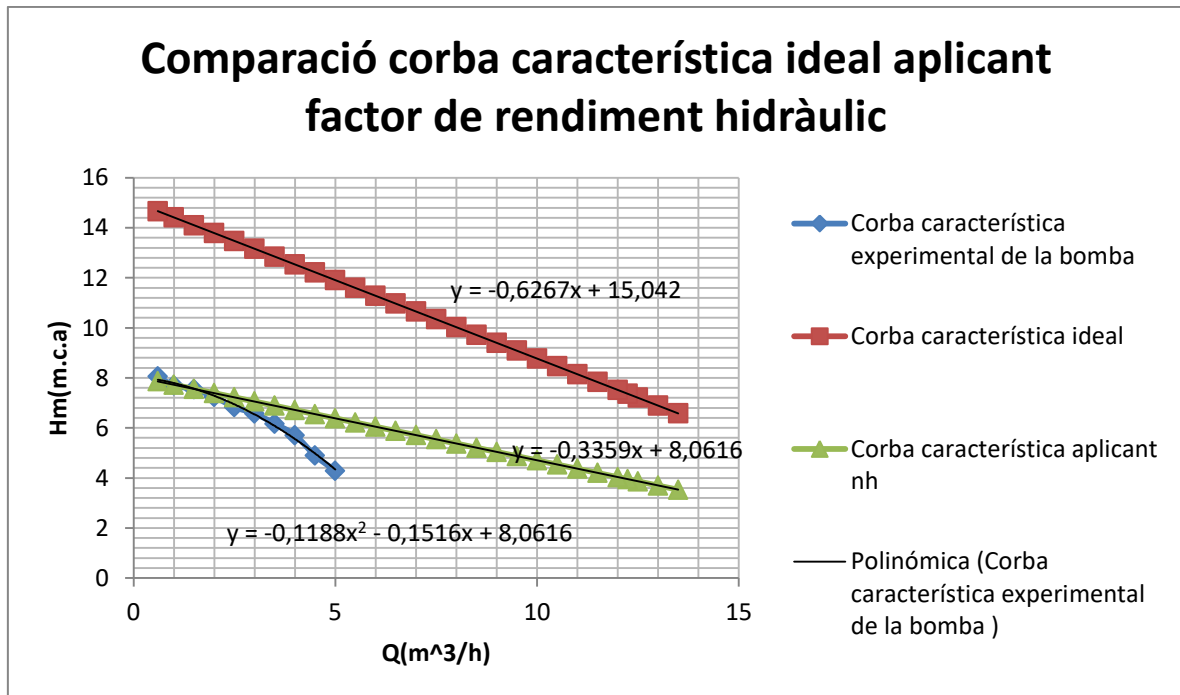
$$\eta_h = \frac{H_{ef}}{H_{eu}} \quad (\text{Eq 21.})$$

On: η_h : rendiment hidràulic (%)

H_{ef} : Alçada real (m.c.a)

H_{eu} : Alçada teòrica d'Euler (m.c.a)

Es calcula el rendiment hidràulic pel primer punt de les dues equacions com si el cabal fos 0. Es troba que el rendiment hidràulic és de 53,59%. S'aplica el coeficient reductor sobre la recta ideal per simular l'aplicació de pèrdues hidràuliques tal i com s'observa en el Gràfic 4.



Gràfic 4. Comparació entre corba característica real i ideal aplicant factor de rendiment hidràulic

La recta doncs queda modificada i adopta la següent equació:

$$H = -1209,1Q + 8,0616 \quad (\text{Eq 22.})$$

El rendiment volumètric relaciona el cabal real amb el cabal ideal tal i com es pot veure a l'Equació 23.

$$\eta_v = \frac{Q_r}{Q_r + q_e + q_i} = \frac{Q_r}{Q_{ideal}} \quad (\text{Eq 23.})$$

On: Q_r : Cabal real (m³/s)

Q_{ideal} : Cabal ideal (m³/s)

η_V : Rendiment volumètric (%)

Es troba quin es el coeficient de rendiment del cabal volumètric pel punt de funcionament determinat.

El punt de funcionament inicial de la corba real s'agafa com al que treballa a un rendiment més elevat tal i com s'expressa en la Taula 4.

Qr (m3/s)=	0,001111111
H (m.c.a)=	5,70846

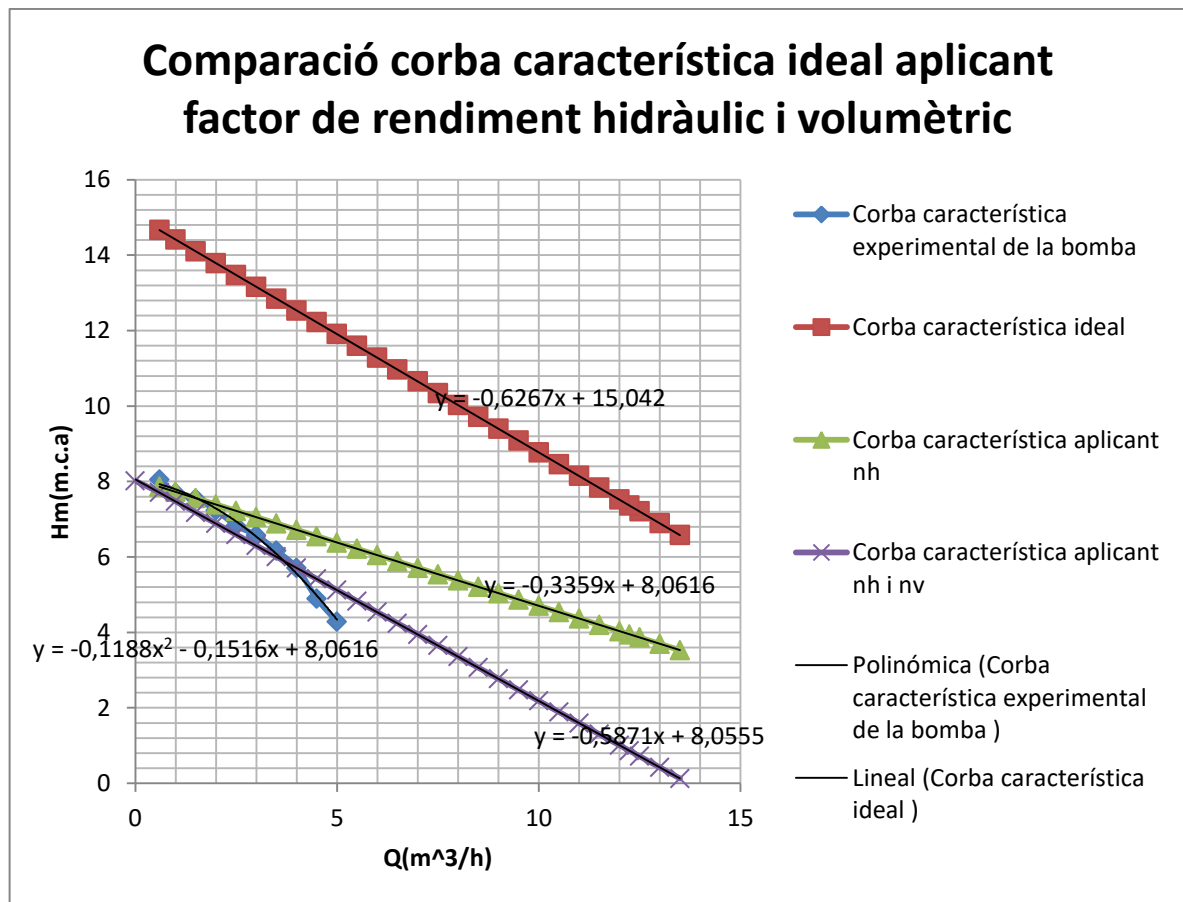
Taula 4. Valors del punt de referència per trobar rendiment volumètric

Quan apliquem el rendiment hidràulic a la corba ideal veiem com aquesta baixa proporcionalment al coeficient. La corba ideal inicialment per un cabal de 0,00111 m³/s (4m³/h) tenia una alçada de 12,53516 mca. En canvi al aplicar el coeficient per un cabal de 0,00111 m³/s (4m³/h) obtenim un valor de 6,18107 mca.

Seguidament per una alçada com és la real del punt de funcionament de 5,70846 mca, es busca quina es la diferència entre els cabals real i ideal després d'haver aplicat el factor corrector del rendiment hidràulic. Per una alçada de 5,70846 mca la corba modificada amb el coeficient de rendiment té un cabal ideal de 0,001944 m³/s (7 m³/h), aplicant l'Equació 23 es troba un valor de rendiment volumètric de 57,14% i l'equació de la recta queda modificada de la següent forma:

$$H = -2116Q + 8,0616 \quad (\text{Eq 24.})$$

Veiem com en termes lineals la corba ja és el màxim semblant a la corba real tal i com es pot veure en el Gràfic 5.



Gràfic 5. Comparació entre corba característica real i ideal aplicant factor de rendiment hidràulic i volumètric

4.1.6 Corba característica de la instal·lació

La corba característica de la instal·lació de la bomba està únicament determinada per les característiques en com es troba la instal·lació. Aquesta corba representa la resistència que imposa la instal·lació a la bomba en funció del cabal. La resistència està afectada per les pèrdues generades per canonades, vàlvules de pas i altres elements del sistema.

La corba ens mostra com varia la carga en funció del cabal i que aquesta augmenta de forma exponencial proporcionalment al cabal.

El punt de funcionament es determina a partir de la intersecció de les dues corbes, la corba característica de la instal·lació ve determinada per l'Equació 25.

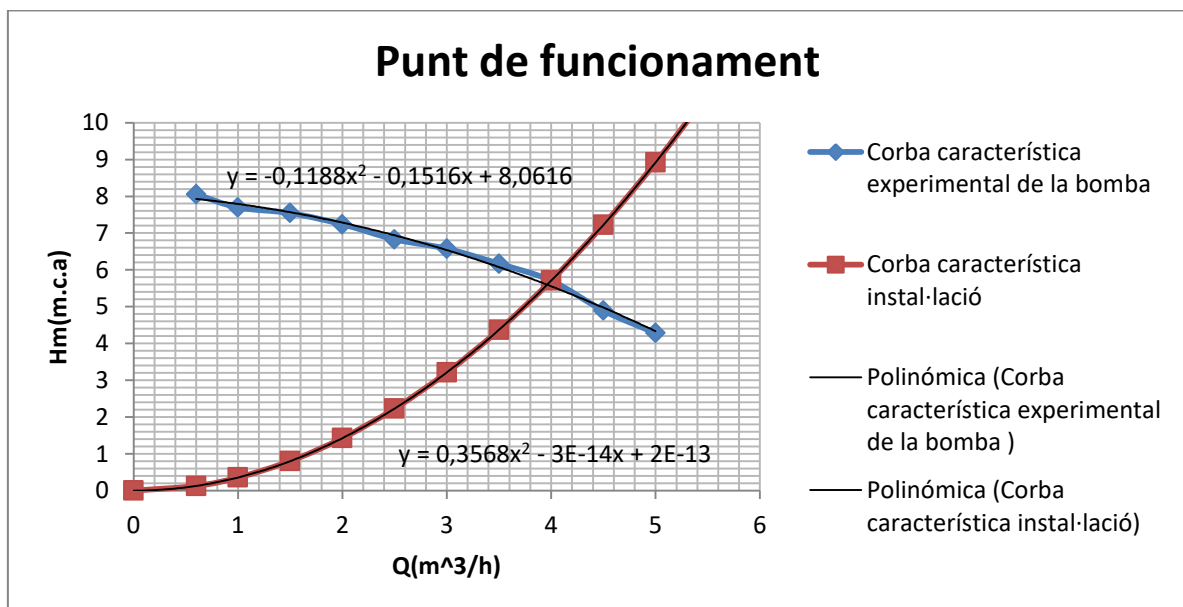
$$H = A + BQ^2 \tag{Eq 25.}$$

Com s'ha anomenat en el capítol anterior un cop fixat el punt de funcionament la corba adapta la següent equació:

$$H = 4623853,211Q^2 \tag{Eq 26.}$$

$$PF: \left(Q = 4000 \frac{l}{h} \right) \quad (H = 5,708460754 \text{ mca})$$

En el Gràfic 6, es pot veure el PF que es troba entre la intersecció de les dues corbes la de la bomba i la de la instal·lació:



Gràfic 6. Punt de funcionament inicial de la bomba

4.2 Modificació del rodet amb paràmetre β_2

Es determina un nou punt de funcionament que es trobi per sota de la corba característica real de la bomba i que creui la corba característica de la instal·lació. En aquest capítol es variarà una de les dades geomètriques del rodet per intentar treballar en aquest punt.

Es procedirà a treballar amb la corba característica ideal modificada anteriorment amb els rendiments hidràulics i volumètrics per tal de poder treballar amb les fórmules que contenen els paràmetres geomètrics del rodet.

El primer assaig es farà modificant el paràmetre beta 2 (β_2) del rodet, que és el que determina la direcció de la velocitat tangencial a la sortida de l'àlep. El podem veure representat a la Figura 17.

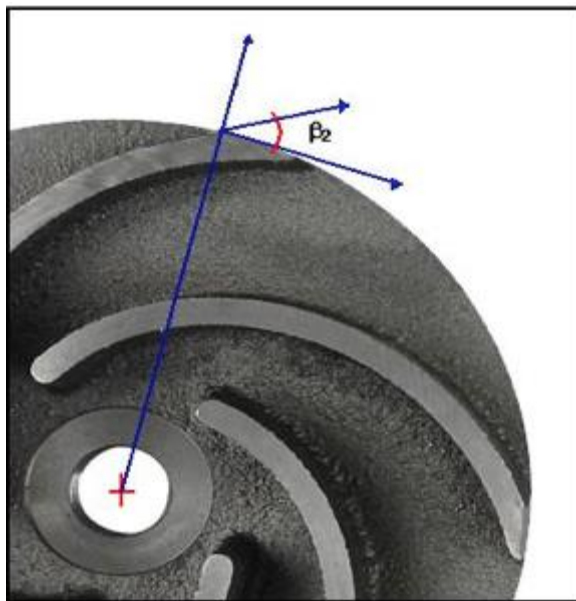


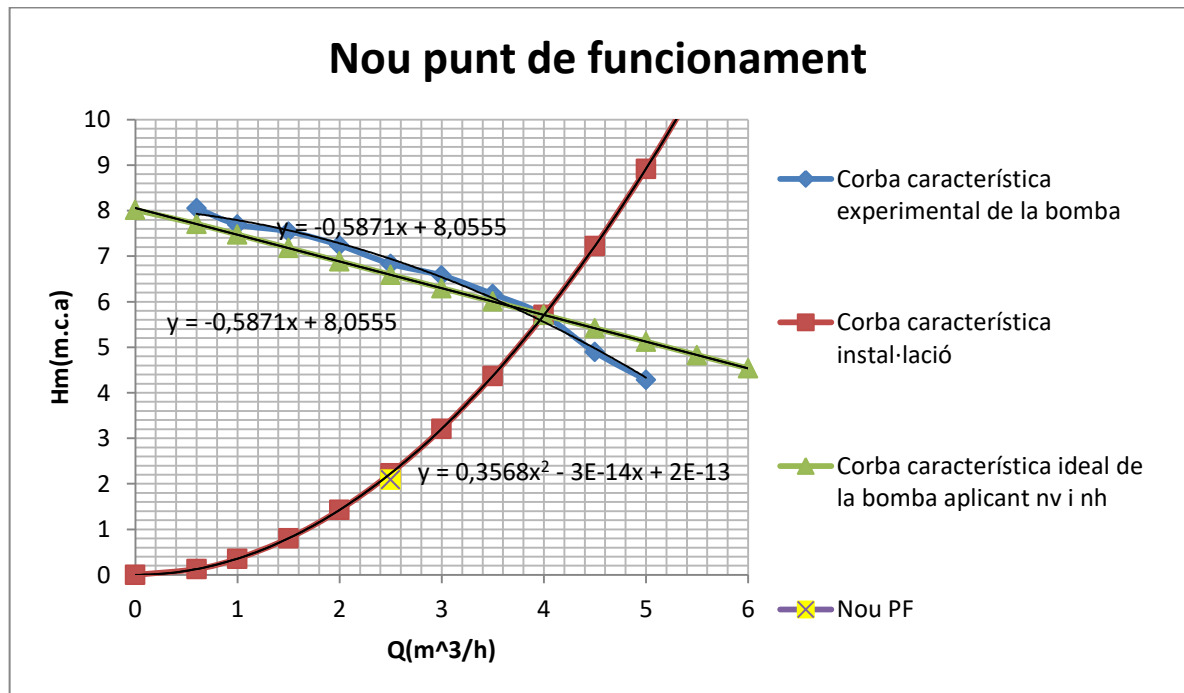
Figura 17. Angle que determina la direcció en què surt el fluid del rodet

Es recorda que el punt de funcionament establert anteriorment és:

$$PF: Q = 2,5 \left(\frac{m^3}{h} \right) \text{ ó } 0,000694 \left(\frac{m^3}{s} \right) \quad H = 2,091 \text{ m.c.a}$$

Es calcula el nou paràmetre beta 2, a partir de l'equació de la corba ideal modificada amb els rendiments hidràulics i volumètrics. S'expressa en la següent equació:

$$H = 8,0616 - 2116Q^2 \text{ m.c.a} \tag{Eq 27.}$$



Gràfic 7. Punt de funcionament determinat

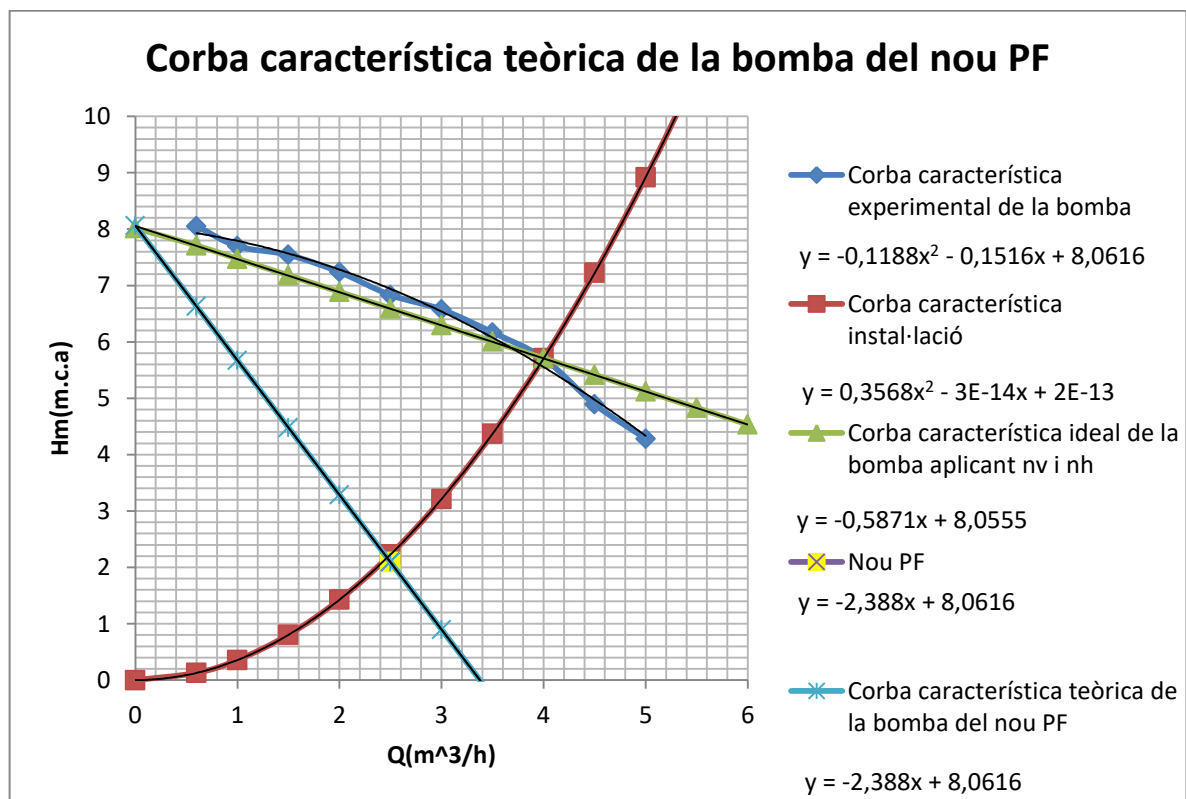
El coeficient de la recta que varia en funció de β_2 , és el paràmetre B que determina el pendent de la recta, tal i com es pot observar en l'Equació 28. Es modificarà el paràmetre fins a aconseguir que la nova recta passi pel punt de funcionament determinat. Recordem l'equació característica d'una bomba en condicions ideals:

$$H = A + BQ \tag{Eq 28.}$$

Com el paràmetre A no depèn de β_2 , aquest mantindrà el seu valor ($A=8,0616 \text{ m.c.a.}$). En canvi el paràmetre B es modificarà fins a obtenir l'alçada i el cabal del punt de funcionament.

De l'equació anterior 28, obtenim quin hauria de ser el valor de B. La nova corba teòrica queda representada tal i com s'observa en el Gràfic 8.

$$B = -8596,888229 \text{ m.c.a.}$$



Gràfic 8. Corba característica teòrica de la bomba amb PF establert (representat amb blau cel)

Tal i com es veu en l'Equació 29 es coneixen totes les dades menys el paràmetre beta 2 (β_2) que es pot aïllar i dona un resultat de:

$$B = \frac{-u_2 \cdot \cot \beta_2}{k_2 \cdot g \cdot \pi \cdot D_2 \cdot b_2} \quad (\text{Eq 29.})$$

$$\beta_2 = 4^\circ$$

Es busquen com s'ha fet en el Capítol 4.1.2 amb el rodet inicial de la bomba segons el punt de funcionament:

u2	8,892935173	m/s
c2u	0,269294496	m/s
c2m	0,454392581	m/s
w2	6,513984396	m/s
u1	5,314527572	m/s
c1	1,038611615	m/s
w1	5,415063933	m/s
beta1	11,05787417	º
beta2	4	º
alpha 1	90	º
alpha 2	59,34701599	º

Taula 5. Dades per dissenyar els nous àleps del rodet

Amb aquestes dades ja es pot procedir al re-disseny del nou rodet i posteriorment assajar-lo al banc de proves per extreure'n els resultats de la corba de la bomba i comparar-los amb els teòrics.

4.3 Modificació del rodet amb paràmetre D2

En aquest capítol s'opta per obtenir el punt de funcionament modificant el paràmetre D2 (Punt on finalitzen els àleps). En l'estudi, es mostren dos mètodes que s'estudiaran per separat i finalment es compararan els resultats experimentals obtinguts.

$$PF: Q = 2,5 \left(\frac{m^3}{h} \right) \text{ ó } 0,000694 \left(\frac{m^3}{s} \right) \quad H = 2,091 \text{ m.c.a}$$

4.3.1 Mètode 1

Per trobar el paràmetre D2 s'utilitzen les lleis de semblança, tota la teoria de les lleis es pot trobar en l'Annex Fonamentació teòrica (A.3.4 Teoria lleis de semblança).

Partim que les lleis de semblança s'utilitzen per predir el comportament d'una bomba geomètricament semblant treballant en les mateixes condicions. (Sistemes i Màquines Fluidomecàniques, 2021).

En el cas d'aquest capítol es coneixen les dades de funcionament de cabal i es pot predir el seu comportament quan varia el diàmetre del rodet.

Es sap que la corba de semblança es representa segons l'Equació 30.

$$H = k * Q^{\frac{2}{3}} \quad (\text{Eq 30.})$$

On: H: alçada de la bomba (m.c.a)

K: Paràmetre adimensional

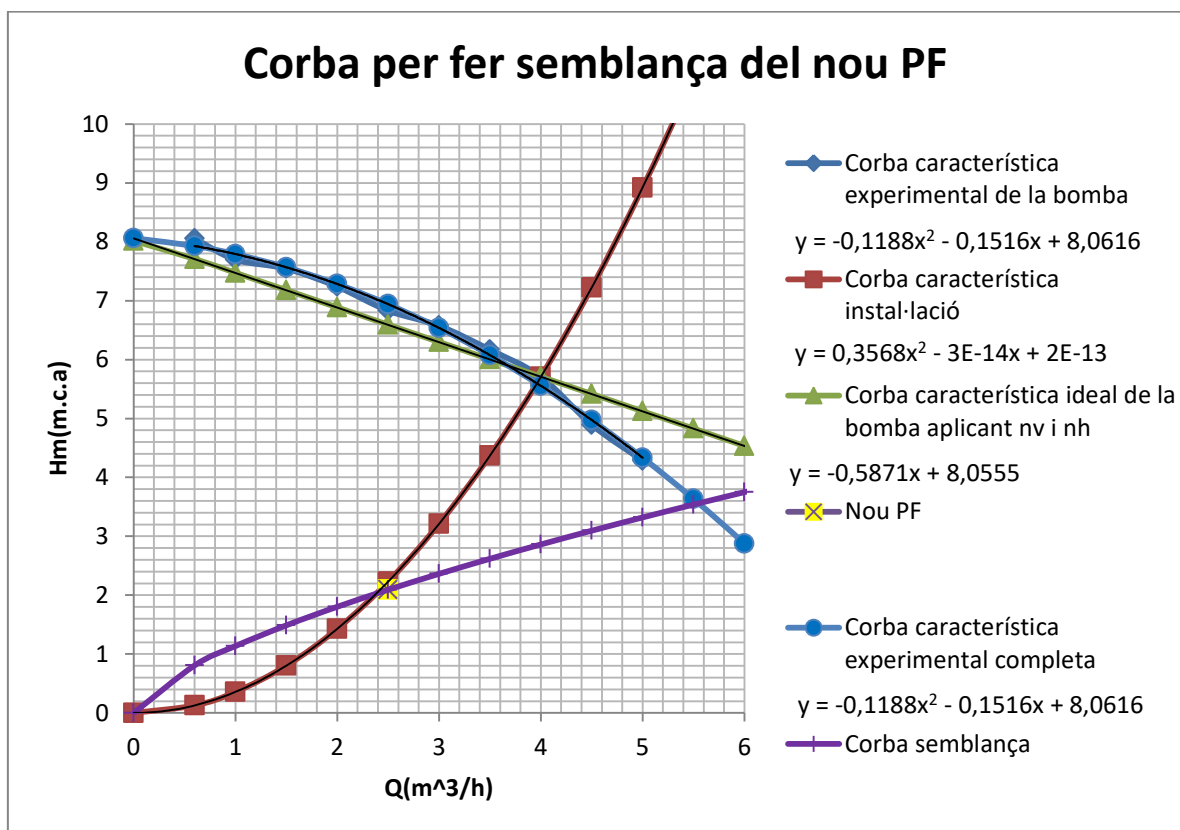
Q: Cabal (m³/s)

La corba de semblança haurà de relacionar el Punt de Funcionament que hem determinat amb un punt de la corba característica experimental de la bomba, assajada amb el rodet inicial.

Es troba el paràmetre k, substituint a l'Equació 30 els valors d'alçada i cabal del Punt de Funcionament 1.

$$k = 266,7111$$

Es grafica la corba semblant i es determina en quin punt talla amb la corba característica de la bomba experimental.



Gràfic 9. Corba de semblança PF

El punt on s'intercepten les dues rectes i on es pot fer semblança és el següent:

$$H = 3,5379 \text{ m. c. a} \quad Q = 0,015278 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \quad Q = 5,4 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

Es fa semblança entre els dos punts i es troba el diàmetre del rodet que donarà l'alçada i cabal requerida pel Punt de funcionament 1. A continuació es pot observar l'equació de semblança 31.

$$\frac{Q'}{Q''} = \left(\frac{D1}{D2}\right)^3 \quad \rightarrow \quad D2 = 61,5 \text{ mm} \quad (\text{Eq 31.})$$

On: Q': Cabal del punt on s'intercepta la corba de semblança amb la corba real experimental (0,015278 m³/s).

Q'': Cabal del PF1 (0,00069444 m³/s)

D1: Diàmetre del rodet inicial de la Bomba (0,08 m).

D2: Diàmetre del PF1

4.3.2 Mètode 2

La metodologia d'obtenció del paràmetre D2 en aquest cas es realitza a través de la corba característica ideal de la bomba. La corba ideal de la bomba s'obté com s'ha determinat anteriorment en el capítol 4.3.1 i capítol 4.1.5, però en aquest cas el rendiment volumètric quedarà modificat ja que es pren com a referència el punt on talla la corba de semblances.

És a dir, es vol corregir la "corba característica ideal aplicant ηh " (corba verda) amb el rendiment volumètric per tal d'aconseguir la "corba ideal aplicant ηh i ηv " (corba rosa). Per aconseguir el valor de rendiment hem de relacionar:

Punt 1: on creua la corba real experimental (corba blava) i la corba de semblança (corba lila).

Punt 2: on mantenint l'alçada del punt 1 creui amb la corba ideal on s'ha aplicat el rendiment hidràulic.

Seguint el procediment anterior obtenim els dos punts per trobar el rendiment volumètric:

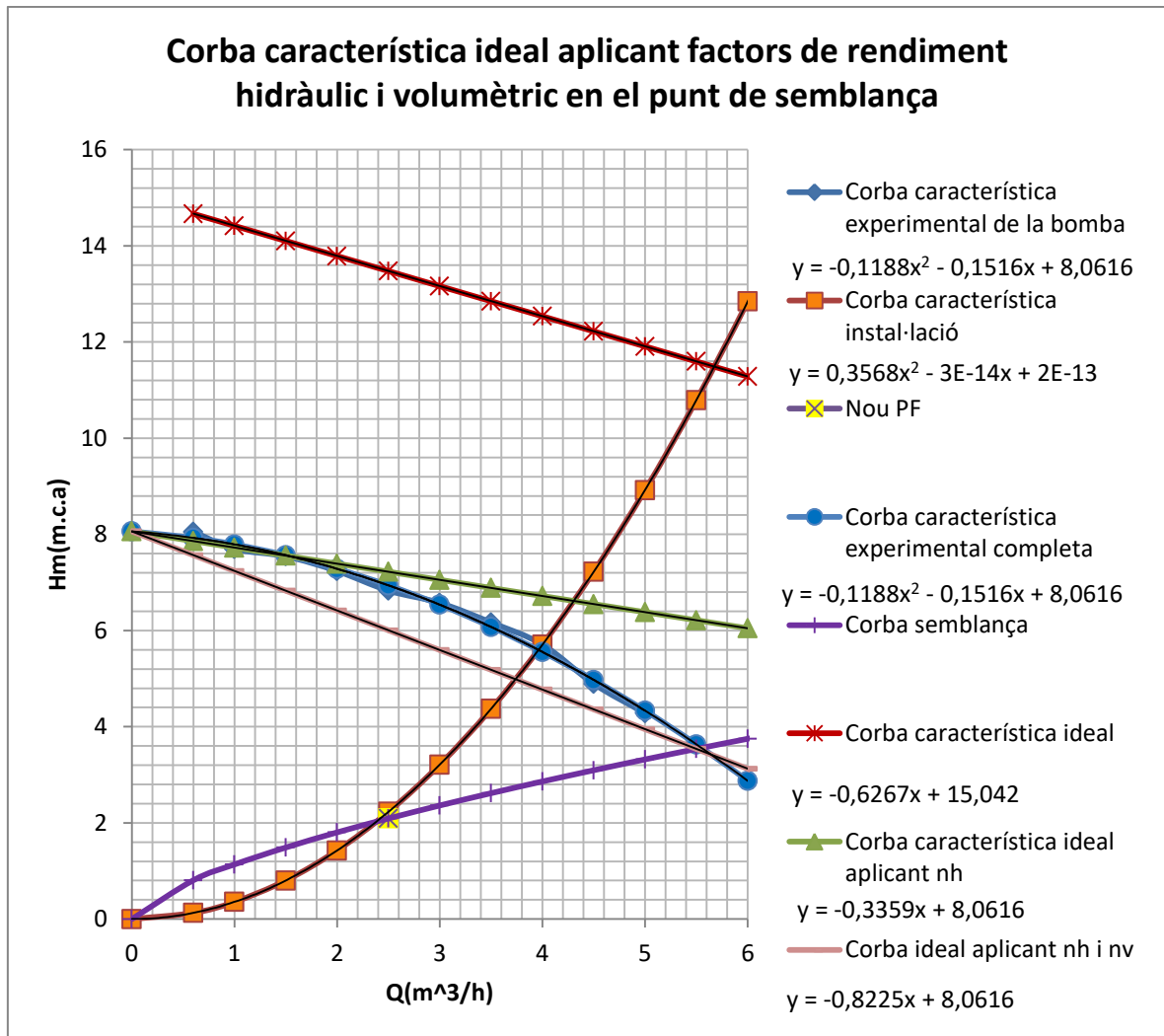
$$\text{Punt 1 per } \eta_v: Q = 5500 \left(\frac{m^3}{h} \right) \text{ ó } 0,0015278 \left(\frac{m^3}{s} \right) \quad H = 3,5376 \text{ m. c. a}$$

$$\text{Punt 2 per } \eta_v: Q = 13.469,16 \left(\frac{m^3}{h} \right) \text{ ó } 0,00374 \left(\frac{m^3}{s} \right) \quad H = 3,5376 \text{ m. c. a}$$

Dividint els dos cabals s'obté el coeficient de rendiment volumètric:

$$\eta_v = \frac{0,0015278}{0,00374} = 0,40834$$

S'aplica el factor de rendiment volumètric i hidràulic a la corba ideal i obtenim la corba considerant les pèrdues (corba lila) per tal que s'aproximi al màxim a la corba real tal i com s'observa en el Gràfic 10.



Gràfic 10. Corba característica ideal pel punt de semblança (Modificant el punt de funcionament inicial de rendiment màxim que era una suposició).

Seguidament es procedeix a modificar els paràmetres A i B que determinen la corba per tal de que creui el punt de funcionament determinat. El procés es pot observar a continuació:

La corba ideal està definida segons l'equació següent:

$$H = A + B Q \quad \rightarrow \quad H = 8,0616 - 2961,1 Q \quad (\text{Eq 32.})$$

On els paràmetres A i B com hem vist anteriorment venen definits pels factors que es poden observar en les Equacions 33 i 34.

$$B = \frac{-u_2 \cdot \cot \beta_2}{k_2 \cdot g \cdot \pi \cdot D_2 \cdot b_2} \quad (\text{Eq 33.})$$

On: u_2 : Velocitat perifèrica a la sortida del rodet (m/s)

$\cot \beta_2$: cotangent de l'angle β_2 (°)

k_2 : Coeficient d'obstrucció que depenen de l'espai ocupat per l'espessor dels àleps a l'àrea d'entrada i sortida del rodet (Jose Agüera Soriano, IV Edición).

JOSE AGÜERA SORIANO. Mecánica de Fluidos incompresibles i turbomàquines hidráulicas. Capitulo XII. Bombas hidráulicas. 4. Curva motriz teorica H-Q. p.524-525

g : Coeficient de gravetat es considera un valor de $9,81 \text{ m}^2/\text{s}$

π : Número pi.

D_2 : Diàmetre de sortida (m).

b_2 : Aresta dels àleps de sortida (m).

$$A = \frac{u_2^2}{g} \quad (\text{Eq 34.})$$

On: u_2 : Velocitat perifèrica a la sortida del rodet (m/s)

g : Coeficient de gravetat es considera un valor de $9,81 \left(\frac{\text{m}^2}{\text{s}}\right)$

$$u_2 = \frac{2\pi n}{60} r \quad (\text{Eq 35.})$$

On: π : Número pi.

n: Número específic de revolucions a la que gira el rodet de la bomba centrífuga (rpm).

r: Radi d'entrada o sortida del rodet depenent si es vol trobar la velocitat perifèrica a l'entrada o a la sortida del rodet.

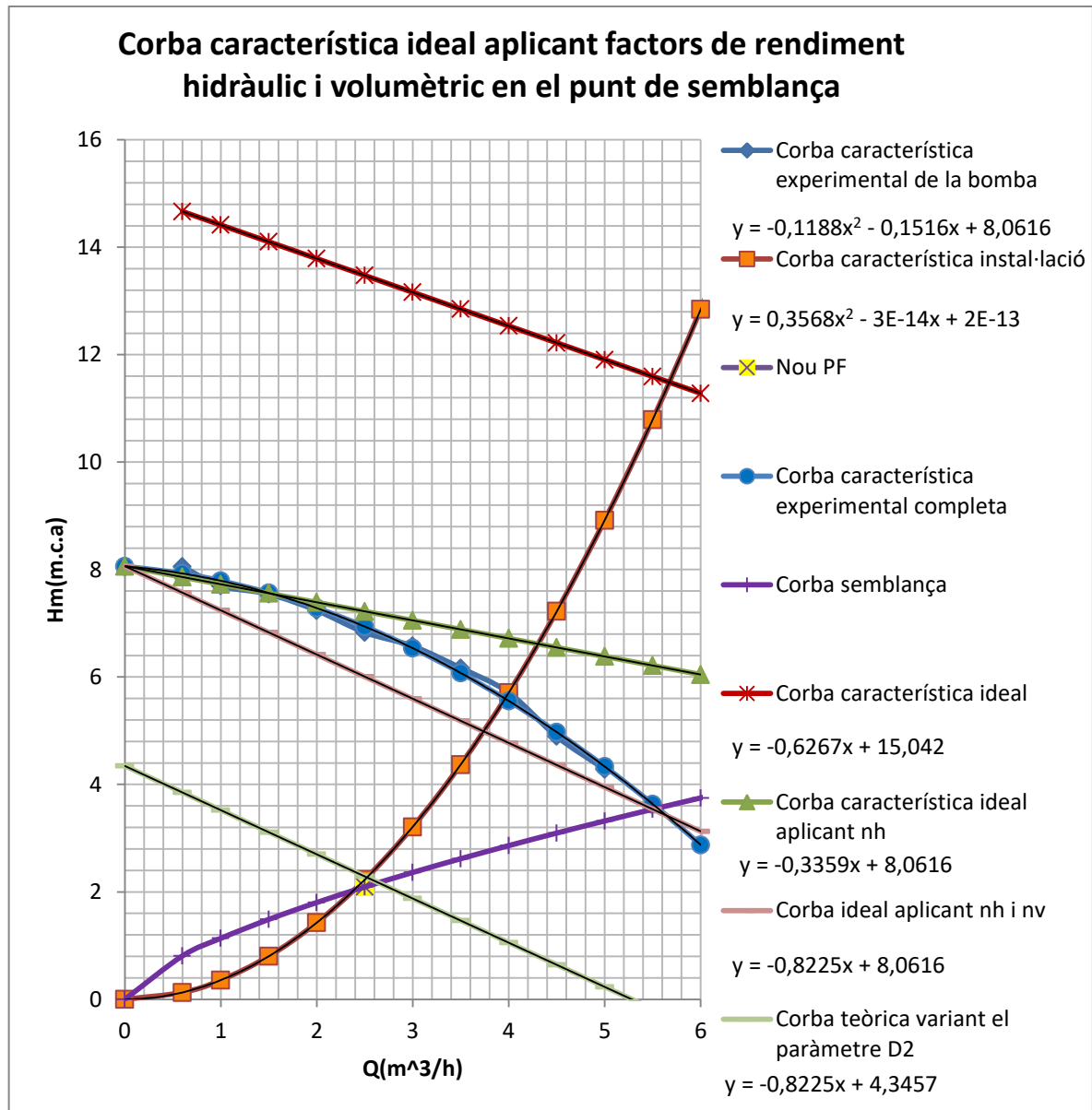
Seguidament es procedeix a modificar el paràmetre D2.

El paràmetre B que determina el pendent de la recta no depèn de D2 ja que s'anul·la amb el coeficient D2 que conté el paràmetre u_2 .

És a dir, es procedeix a modificar el paràmetre D2 només del coeficient A, que es el que farà variar la recta perquè talli el Punt de funcionament. Tal i com es pot veure en el Gràfic 11 al no modificar el paràmetre B el pendent de la recta no varia.

El diàmetre exterior dels àleps que compleix que passi pel punt de funcionament és:

$$D_2 = 0,043 \text{ mm}$$



Gràfic 11. Corba teòrica modificant el paràmetre D2 pel segon mètode

5. CONSTRUCCIÓ RODETS

5.1 Disseny al SolidWorks

5.1.1 Geometria $\beta 2$

5.1.1.1 Dades de partida pel disseny

Per tal de dissenyar el rodet en el nou punt de funcionament partirem de les dades ja trobades en el *Capítol 4.2* que es determinen en la *Taula 6*. Es pot observar que l'únic paràmetre que variarà respecte el rodet inicial serà el coeficient de beta 2 però, aquest segons la teoria hauria de fer variar el funcionament de la bomba.

beta1	11,05787417	º
beta2	4	º
D1	0,035	m
D2	0,08	m

Taula 6. Dades de partida per a dissenyar el rodet

5.1.1.2 Metodologia pel disseny dels àleps

Actualment existeixen diversos mètodes per tal de dissenyar els àleps del rodet d'una bomba centrífuga. Aquest projecte es basa en un disseny complet de l'àlep a partir d'un sol arc de circumferència que relaciona els dos triangles d'entrada i sortida del rodet (Claudio Mataix, 1975).

CLAUDIO MATAIX, TURBOMÀQUINAS HIDRÀULICAS, p. 436-438, 1975.

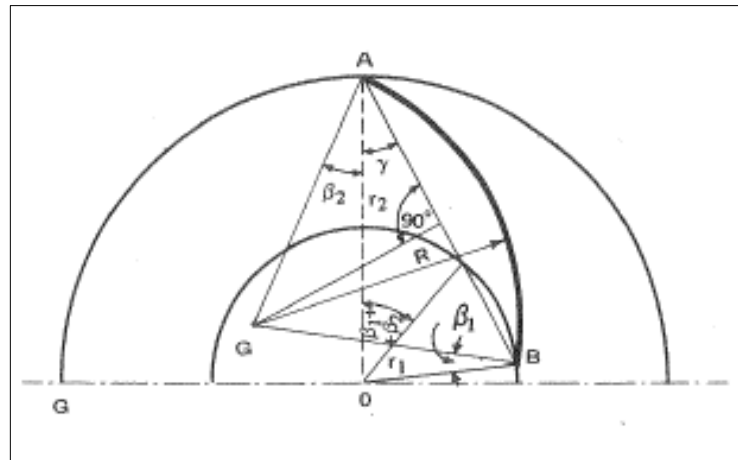


Figura 18. Metodologia de disseny de l'àlep amb un sol arc de circumferència

Coneixent les dades de l'apartat anterior s'inicia el disseny dibuixant les dues circumferències amb valors de diàmetre (D_1 i D_2) concèntriques.

Seguidament s'estableix que el punt superior A serà el final de l'àlep. Per determinar on comença l'arc de l'àlep des de el punt O es dibuixarà una recta que tingui un angle de valor $\beta_1 + \beta_2$ entre ella i la vertical OA (aquesta recta determinarà el radi OC).

Com es pot veure en la Figura 18, el següent pas es traçar una recta AC que ens donarà el punt B en el gràfic, aquest serà el punt inicial de l'arc de l'àlep.

A partir del radi OB es dibuixa un angle β_1 , i a partir del radi OA l'angle β_2 . La intersecció d'aquestes dues rectes serà el centre de la circumferència que determinarà l'àlep (Punt G).

S'ha de comprovar que la circumferència de centre (G), passi pels punts A i B.

Si apliquem el següent mètode amb les nostres dades obtenim el disseny de la Figura 19.

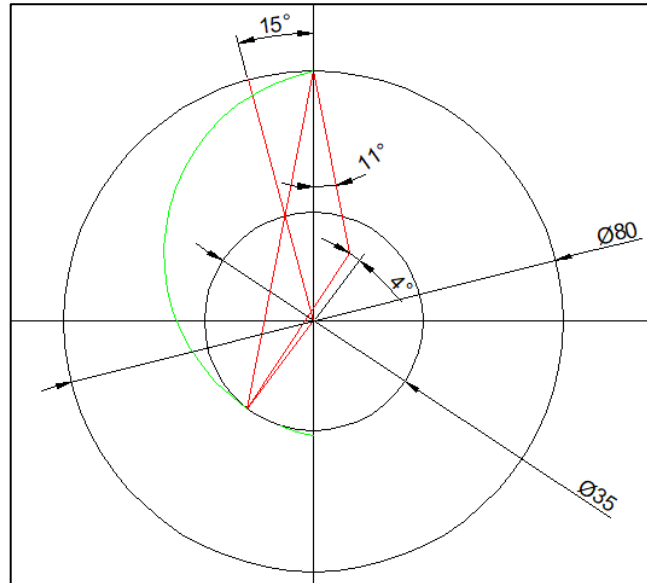


Figura 19. Resultat d'aplicar el mètode de disseny dels àleps amb les dades del nou PF

5.1.1.3 Disseny al programa SolidWorks

Es fa un primer disseny com el que es veu a continuació imprimint tot el conjunt del rodet i un altre disseny imprimint el rodet però sense la part que va roscada a l'eix del motor. El segon disseny es fa així per optar per incorporar una peça metàl·lica, dissenyada al taller, que estigui fixe al rodet i pugui ser roscada amb l'eix del motor de la bomba.

- Disseny inicial conjunt:

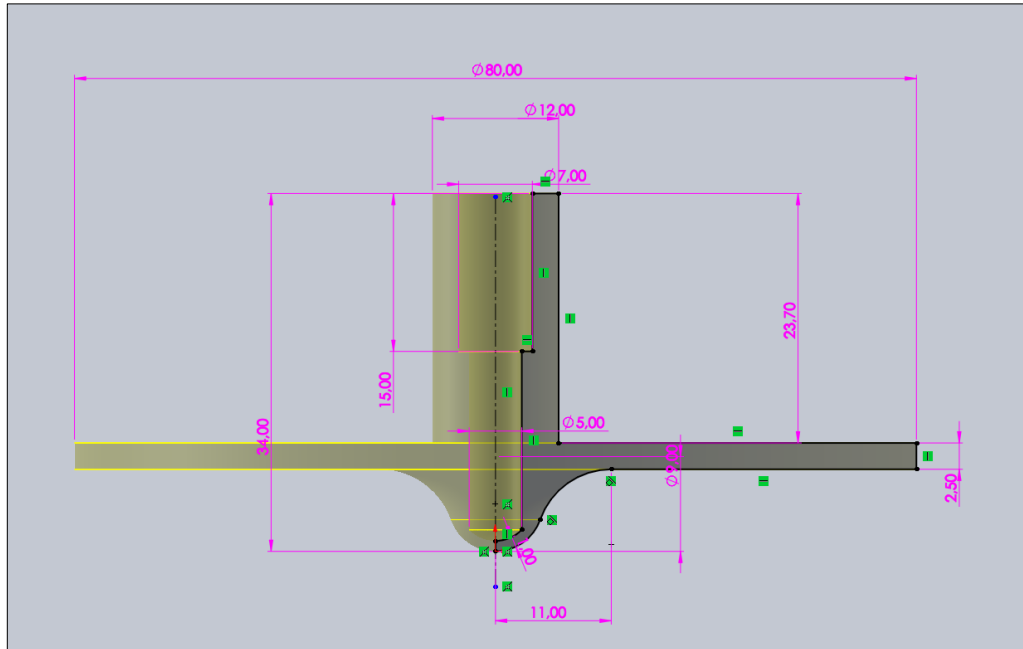


Figura 20. Disseny i cotes part inferior del rodet

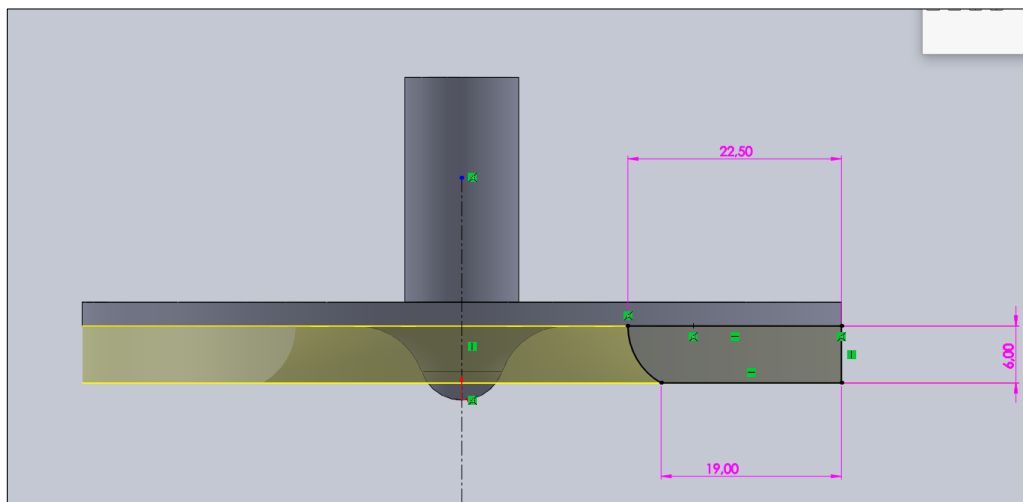


Figura 21. Disseny de la forma característica dels àleps

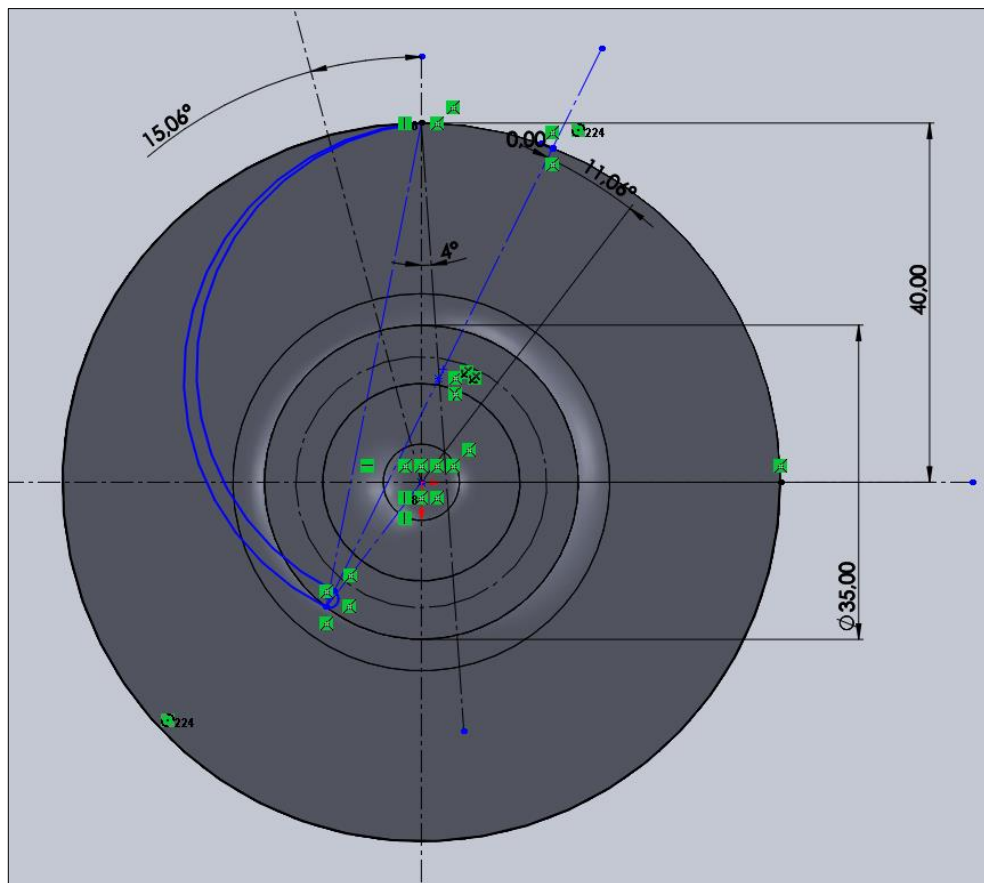


Figura 22. Aplicació de la metodologia per dibuixar l'àlep amb un sol arc de circumferència amb els paràmetres característics a l'entrada i a la sortida del rodet

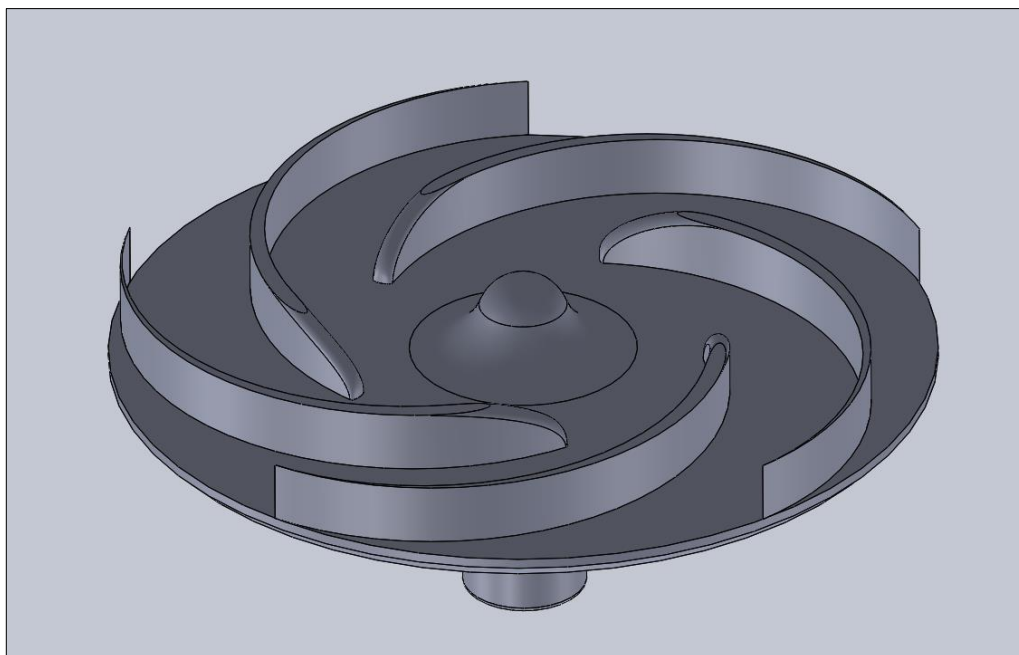


Figura 23. Part inferior i àleps del rodet dissenyats

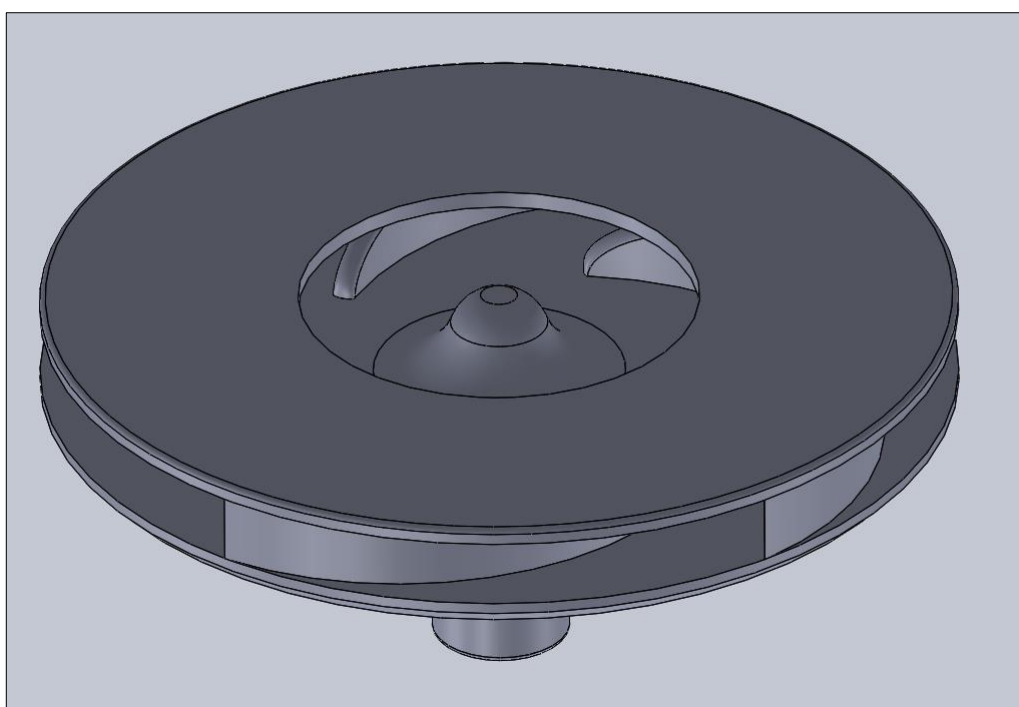


Figura 24. Disseny final del rodet

- Segon disseny:

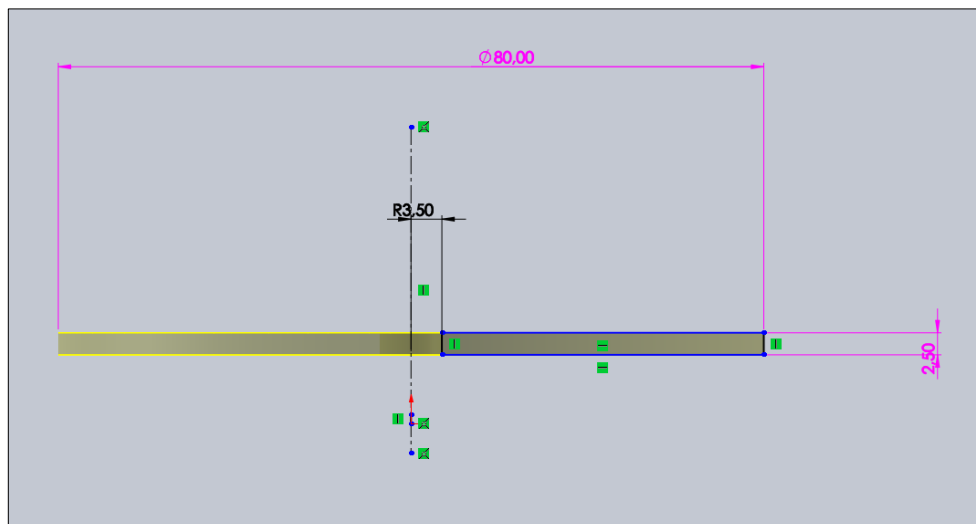


Figura 25. Part inferior del rodet del segon disseny

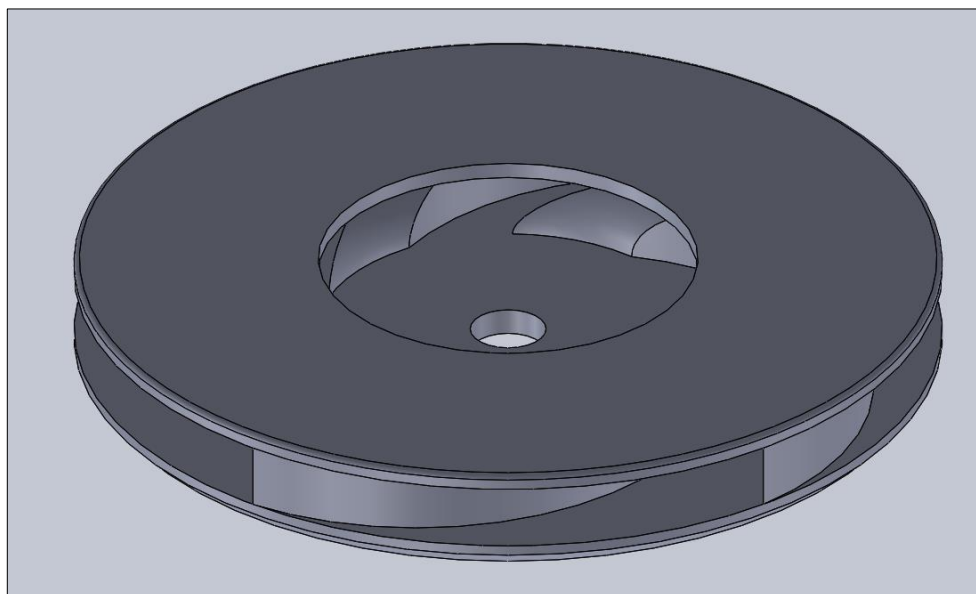


Figura 26. Disseny final del rodet

5.1.2 Geometria Diàmetre 2 Mètode 1

5.1.2.1 Dades de partida pel disseny

Per tal de dissenyar el rodet en el punt de funcionament partirem de les dades ja trobades en el Capítol 4.3.1 i capítol 4.1.2 que es determinen en la Taula 7. Es pot observar que l'únic paràmetre que variarà respecte el rodet inicial serà el coeficient diàmetre exterior dels àleps, les altres dades geomètriques no variaran respecte el rodet inicial.

beta1	17	º
beta2	20	º
D1	0,035	m
D2	0,061	m

Taula 7. Dades de partida per a dissenyar el rodet

5.1.2.2 Metodologia pel disseny dels àleps

Es segueix el mètode descrit en el Capítol 5.1.1.2 amb les dades de la Taula 7 i s'obté el disseny de la Figura 27.

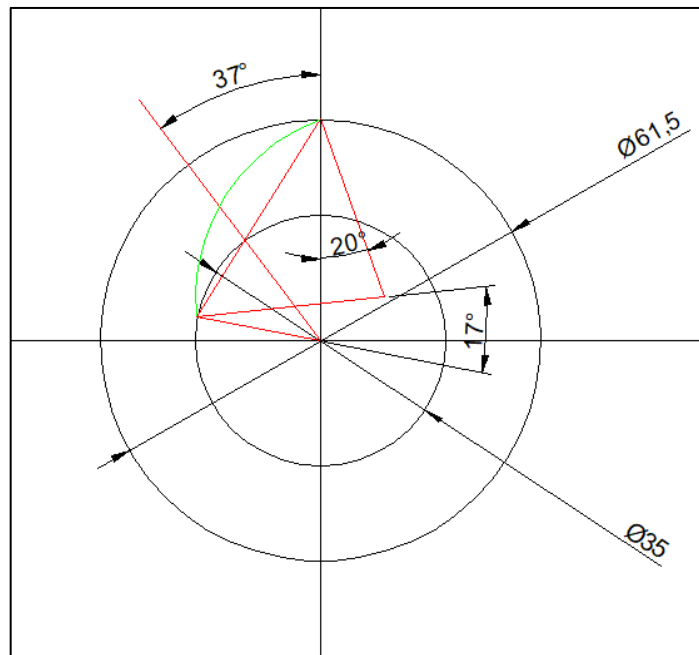


Figura 27. Disseny de l'àlep modificant el D2 segons el mètode 1

5.1.2.3 Disseny al programa SolidWorks

Al fer l'assaig anterior es va determinar que es dissenyaria el rodet amb la part que va roscada a l'eix del motor, al ser el material de la impressora prou resistent per suportar els esforços exercits pel fluid.

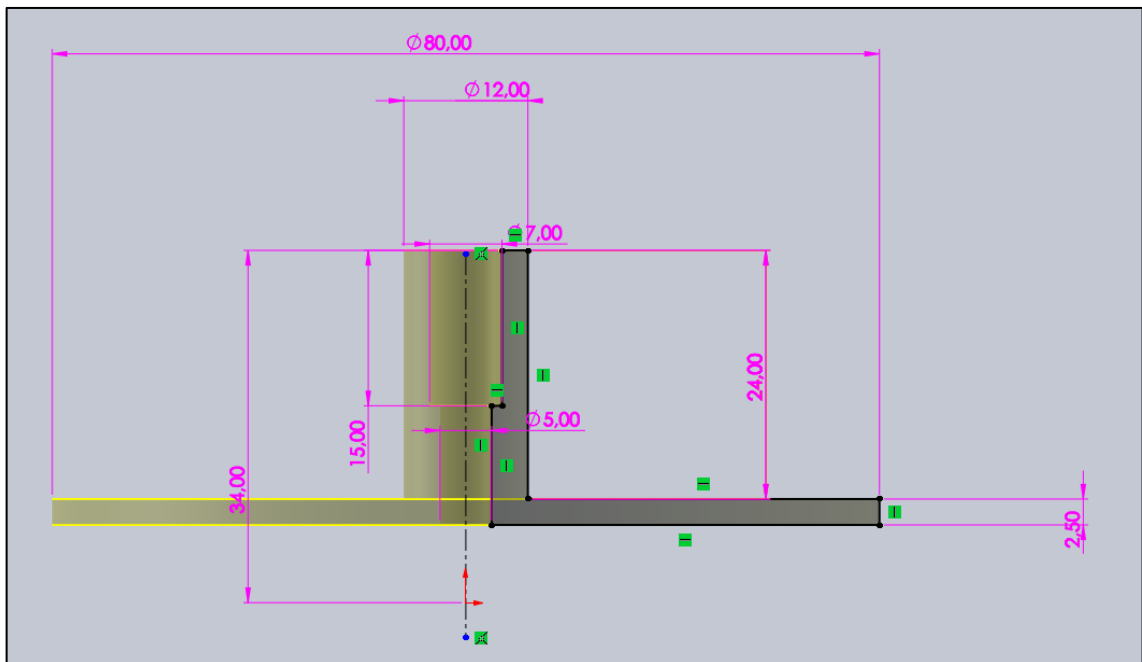


Figura 28. Disseny i cotes part inferior rodet (Mètode 1)

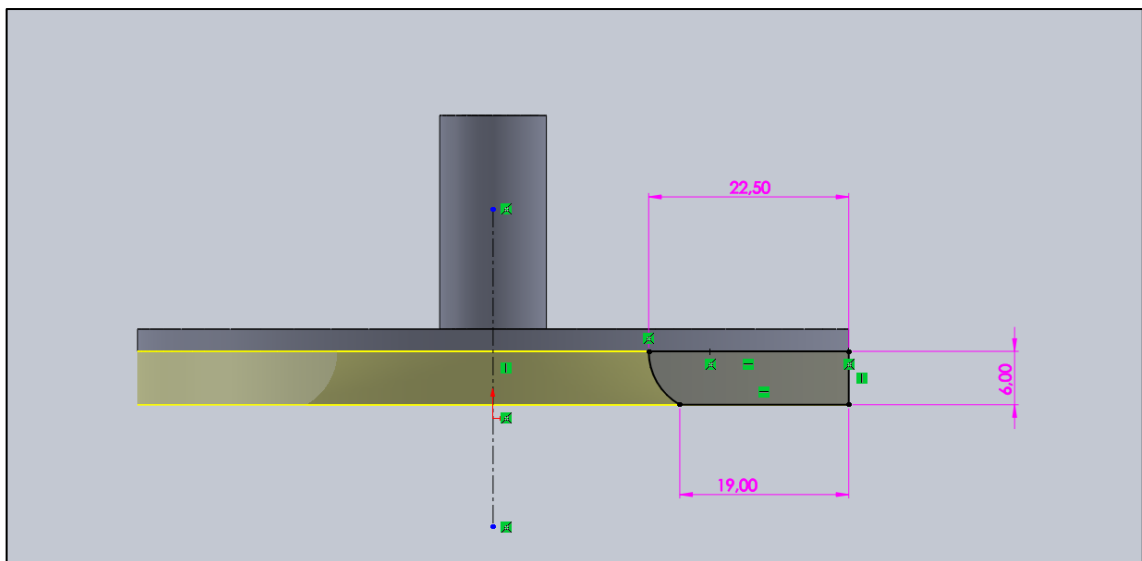


Figura 29. Disseny en secció dels àleps

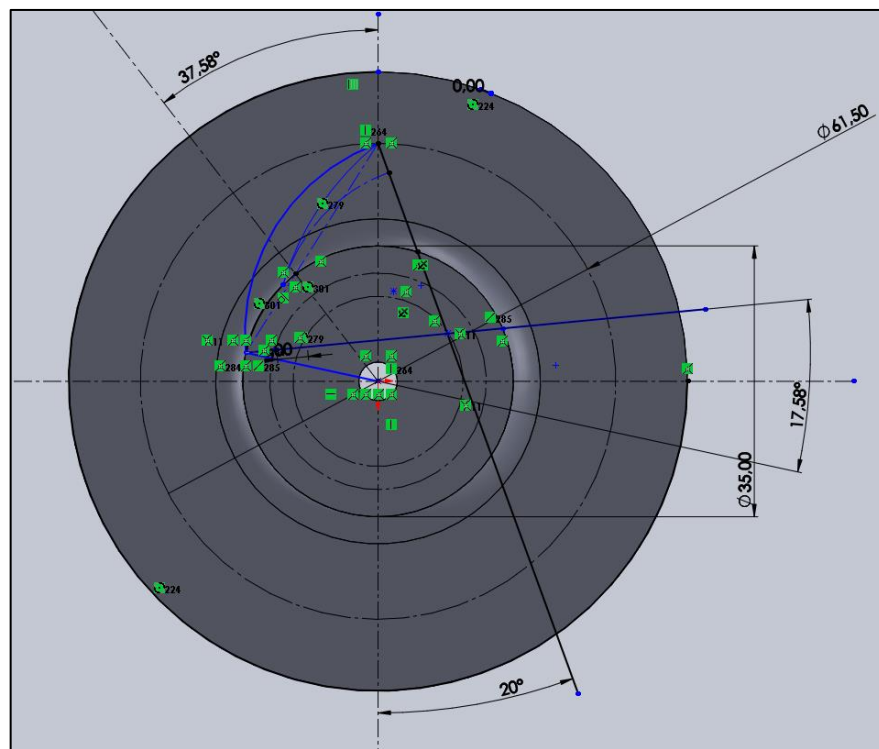


Figura 30. Aplicació de la metodologia per dibuixar l'àlep amb un sol arc de circumferència amb els paràmetres característics a l'entrada i a la sortida del rodet (Mètode 1)

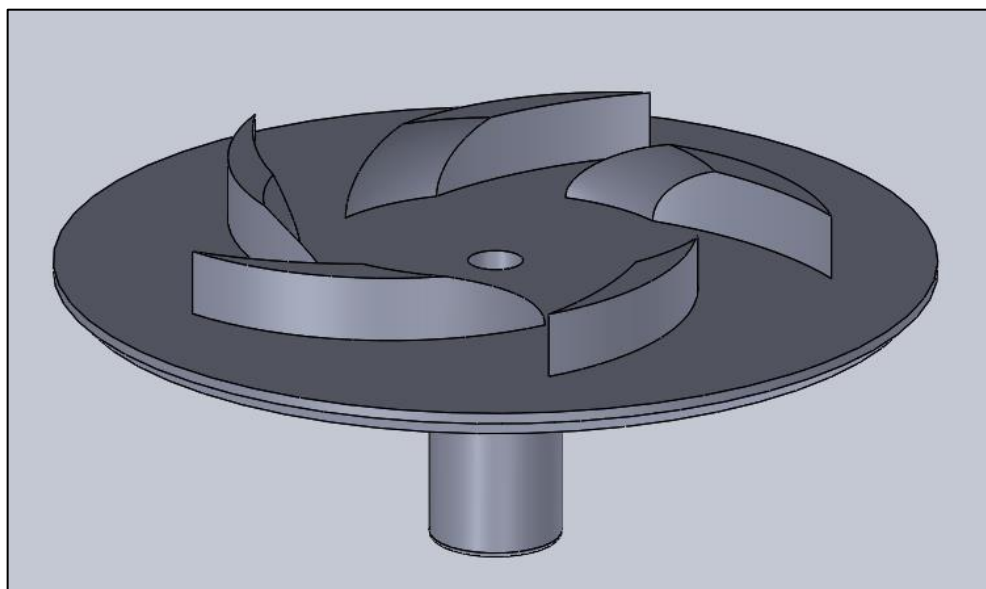


Figura 31. Vista isomètrica 3D dels àleps

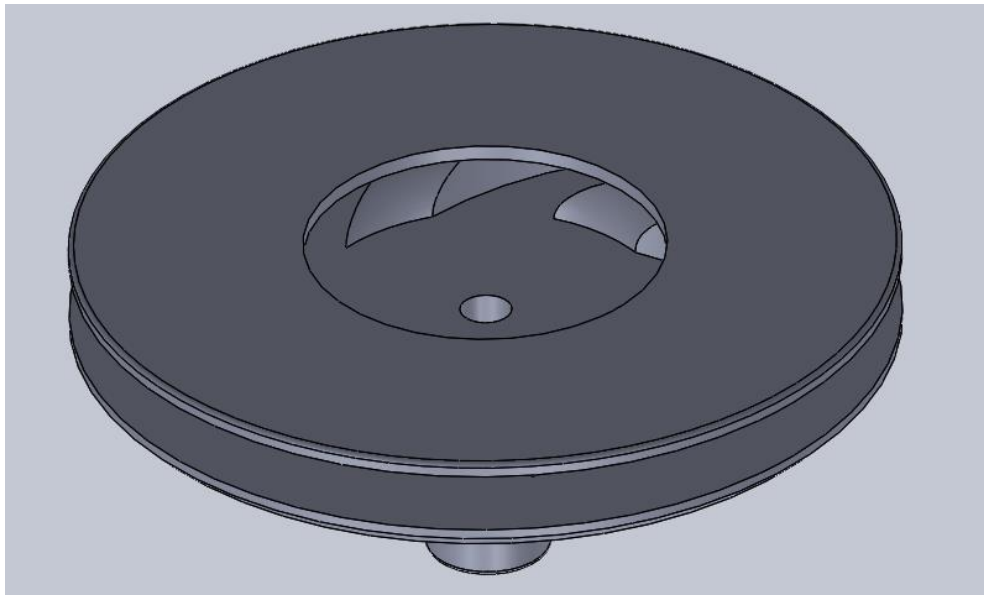


Figura 32. Disseny final rodet D2=61,5 mm

5.1.3 Geometria Diàmetre 2 Mètode 2

En aquest capítol es seguirà el mateix procediment que en el Capítol 5.1.2 però utilitzant el paràmetre D2=43mm. A continuació s'adjunten les fotografies del procés de disseny.

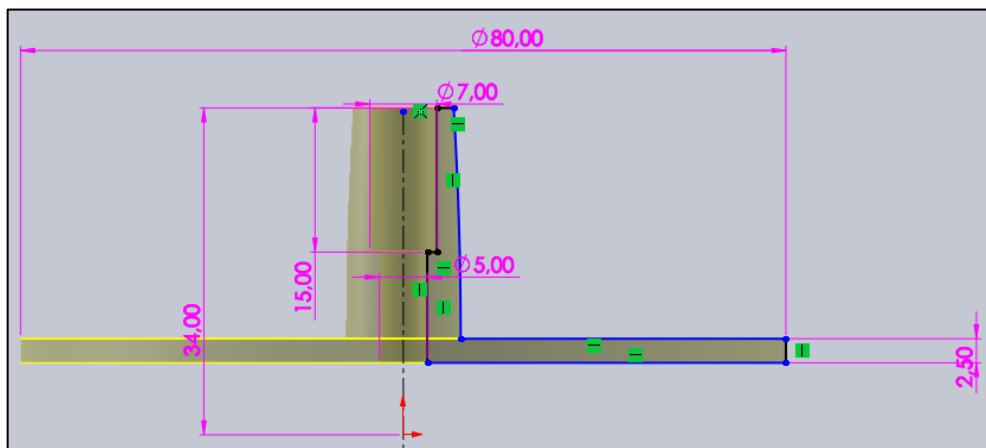


Figura 33. Disseny part inferior rodet Diàmetre exterior àleps 43 mm. En aquest últim disseny s'opta per fer el disseny de l'eix amb una forma cònica per afavorir l'entrada del premsaestopes.

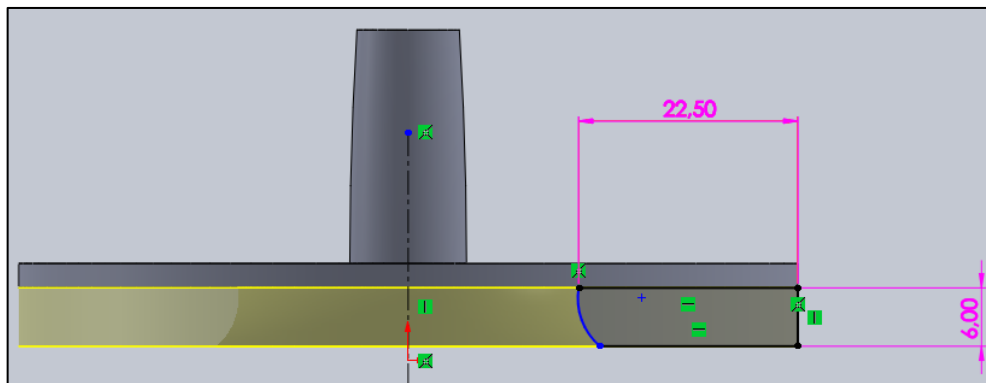


Figura 34. Disseny en secció dels àleps (Mètode 2)

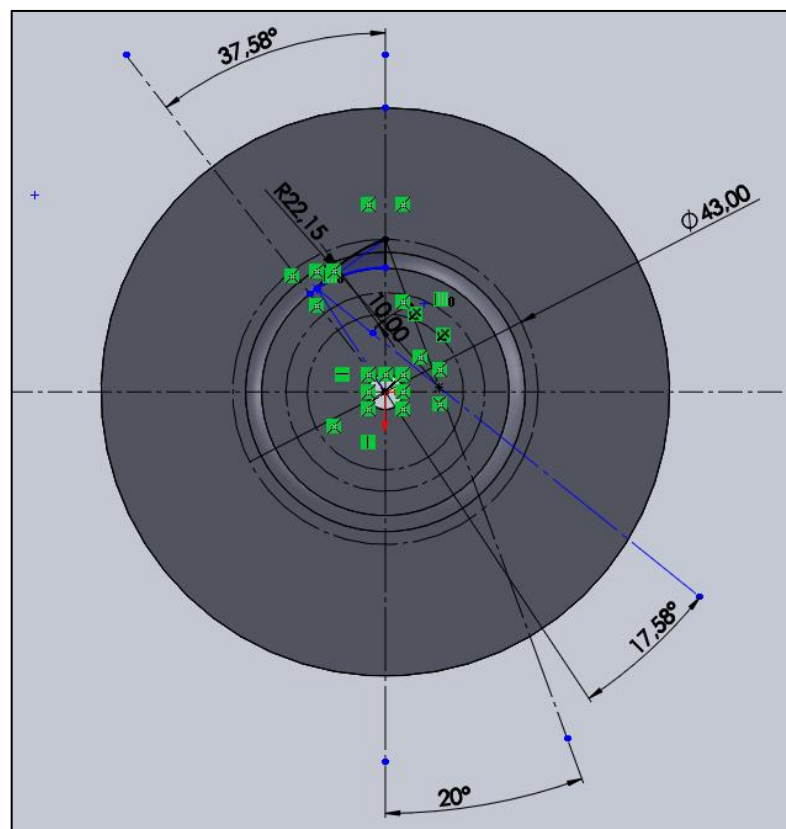


Figura 35. Disseny de l'àlep segons el diàmetre exterior de 43 mm

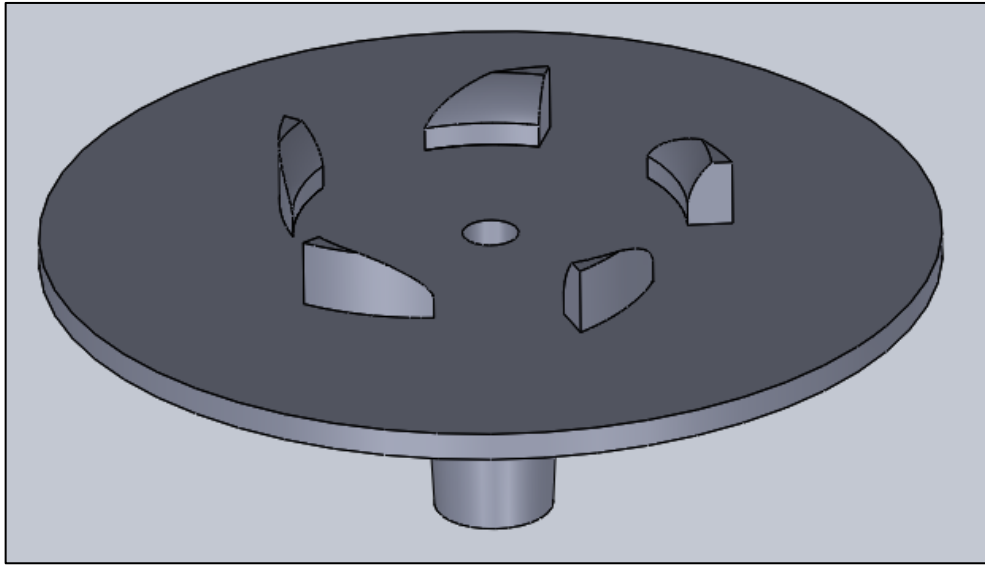


Figura 36. Disseny 3D dels àleps

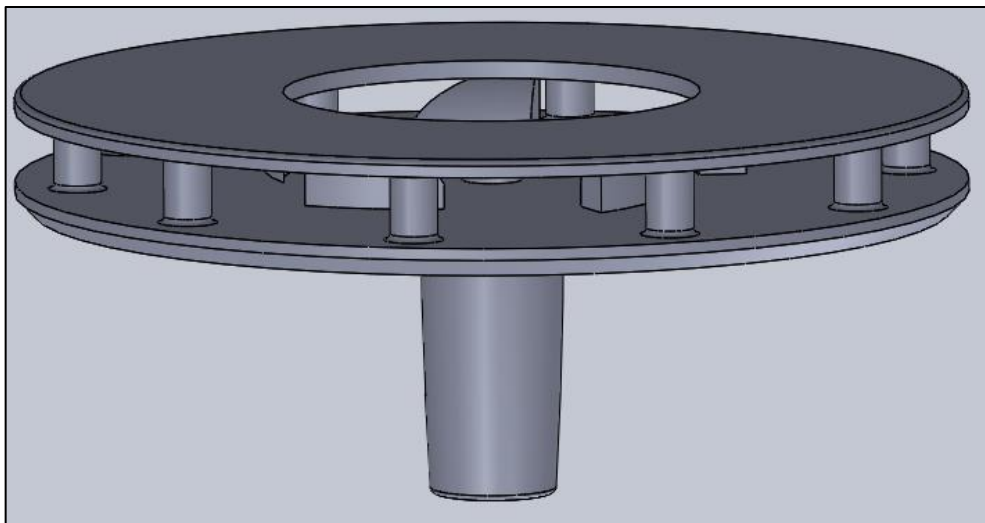


Figura 37. S'afegeix al disseny uns pilars per suportar els esforços del fluid en conseqüència que els àleps són de petites dimensions en aquest model.

5.2 Impressió

5.2.1 Fabricació additiva

La fabricació additiva ha suposat un gran avenç en la producció industrial. Aquesta tecnologia permet transformar models digitals en objectes tridimensionals.

La fabricació 3D en comparació amb la injecció ens permetrà abaratir els costos de fabricació, dissenyar el rodet i assajar-lo estudiant les possibles modificacions per a la seva optimització per un punt de funcionament.

El principi de la fabricació additiva consisteix en la creació d'un model digital que convertit en format STL mitjançant un software CAD. El format STL permet treballar amb la interfície d'impressió 3D i la transmissió de dades del CAD al programa de la impressora.

Avui en dia existeixen moltes tècniques diferents en el rang de la fabricació additiva (SLS, FDM, DLP...) que s'usen depenent de les necessitats o propietats de cada sector o peça.

El rodet d'aquest estudi es crearà a partir de la tecnologia FDM (Fused deposition modeling). Utilitza la metodologia d'extrusió de material a través d'una boquilla que extrudeix filaments de plàstic i crea capes d'aquesta que gràcies a la temperatura de fusió i velocitat en que s'apilen permet la seva unió i la creació de peces en 3D.

Aquesta tècnica s'utilitza en la majoria dels casos per a crear prototips a partir de materials termoplàstics, gràcies a la seva propietat de ser mal·leables i adherir-se a les necessitats de cada peça.

Actualment es fan servir una quantitat molt diversa de materials en la indústria de la fabricació additiva a part dels termoplàstics, també alguns tipus de metalls, materials compòsits o biològics. Existeixen diverses impressores depenent del tipus de material i les qualitats de temperatura i punt de fusió que es necessiti tractar.

5.2.2 Impressora

El departament de Mecànica de la Universitat de Girona ens ha permès fer ús de la seva impressora per tal de crear els nous rodets tal i com s'observa en la Figura 38. Gràcies a això hem pogut crear diferents versions de manera senzilla i en poc temps fer els assajos pertinents per millorar els rodets i veure quins s'aproximen més als resultats reals.

El model d'impressora utilitzada és una Impressora 3D model Sigma R19 BCN 3D. Aquestes impressores permeten a l'usuari imprimir peces de diversos materials i d'alta qualitat de manera senzilla. Els principals polímers amb els que treballa són: PLA, ABS, Nylon, PET-G, PVA, TPU i fibra de carboni (BCN3D, 2018).

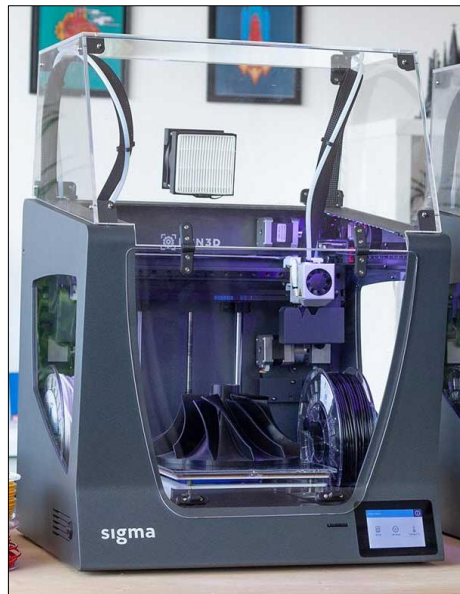


Figura 38. Impressora BCN3D Sigma 19

Interfície gràfica de la pròpia impressora per configurar els paràmetres d'impressió del rodet:

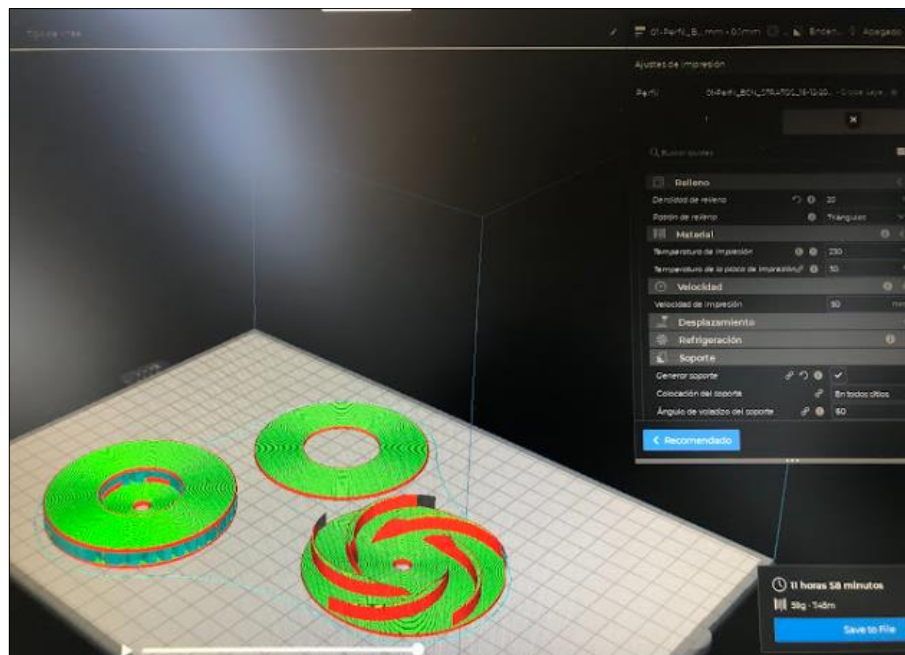


Figura 39. Programa per determinar paràmetres d'impressió del rodet

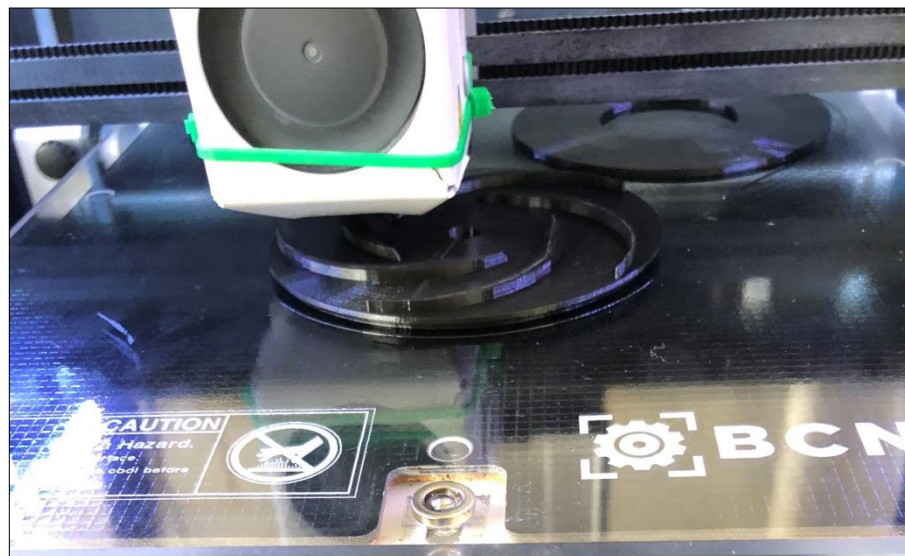


Figura 40. Procés d'impressió dels àleps del rodet

5.3 Muntatge

Per procedir a muntar el rodet a l'eix del motor s'ha de roscar la part interna de l'eix del rodet amb la roscadora del taller. L'eix del motor és de M8 i la longitud de la rosca és de 17 mm.



Figura 41. Roscatge de la part interna de l'eix del rodet

S'ha de tenir en compte que l'eix del rodet ha de mantenir una part passant de diàmetre superior al de la rosca i una part roscada.

Un cop feta la rosca es procedeix a collar el premsaestopes i es cargola el rodet a l'eix del motor.

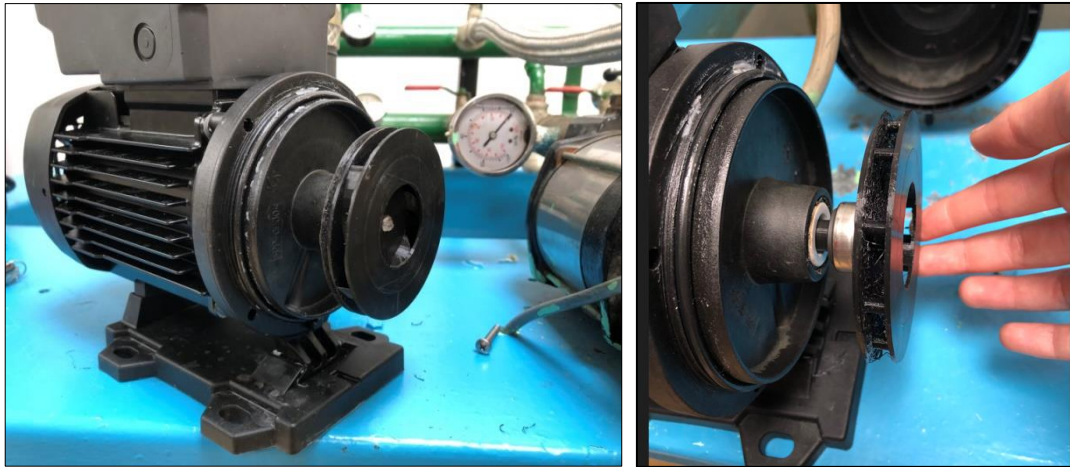


Figura 42. Muntatge del rodet a la BOMBA NOX 20 4M

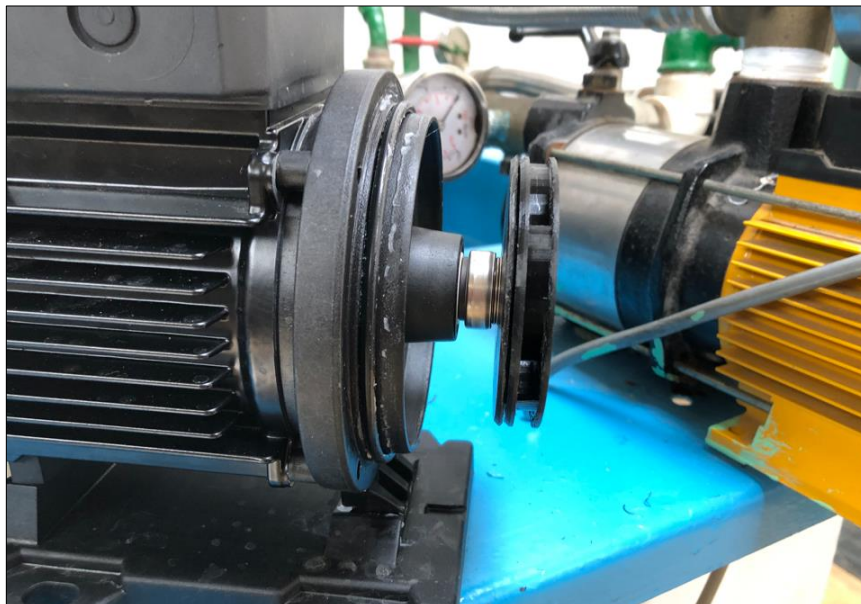


Figura 43. Vista lateral del muntatge del rodet amb el premsaestopes

Es fan les comprovacions pertinents perquè la bomba disposi de l'espai suficient per tancar la voluta i es procedeix a fer els assajos.

6. ASSAIG I RESULTATS

En aquest capítol es documentarà la part dels assajos en el banc de proves, per posteriorment obtenir els resultats experimentals.

Per realitzar un bon assaig es necessita seguir el següent procediment:

- Haver dissenyat el banc segons el requisits de la bomba, en aquest cas adaptar el banc existent que treballava amb bombes similars de potència més elevada.
- Verificar que es compta amb tots els elements de mesura per obtenir els resultats i que tant aquests com la bomba es troben en bon estat i calibrats.
- Instal·lar els sistemes de mesura al nou circuit de la bomba i muntar els sistemes de connexió necessaris.
- Engegar la bomba i realitzar una primera prova i veure que els elements funcionen correctament.
- Realitzar l'encebat de la bomba per tal que generi la pressió necessària per extreure l'aigua i impulsar-la pel circuit fins aconseguir la seva recirculació.
- Fer una primera obtenció de dades i verificar que els resultats són coherents.
- Realitzar una segona prova i obtenir totes les dades de pressió, cabal i mesures de corrent.
- Generar un informe que documenti tots els resultats.

Es seguirà aquest procediment en cada cas d'obtenció de dades per a cada mètode estudiat.



Figura 44. Assajos en el banc de proves

Els resultats obtinguts en el següents capítols contemplaran els següents marges d'error segons els aparells de mesura utilitzats:

- Cabalímetre (4%)
- Manòmetre (2%)
- Vacuòmetre (2%)

Els percentatge d'error que presenten aquests elements seran proveïts segons fabricant.

6.1 Rodet modificant β_2

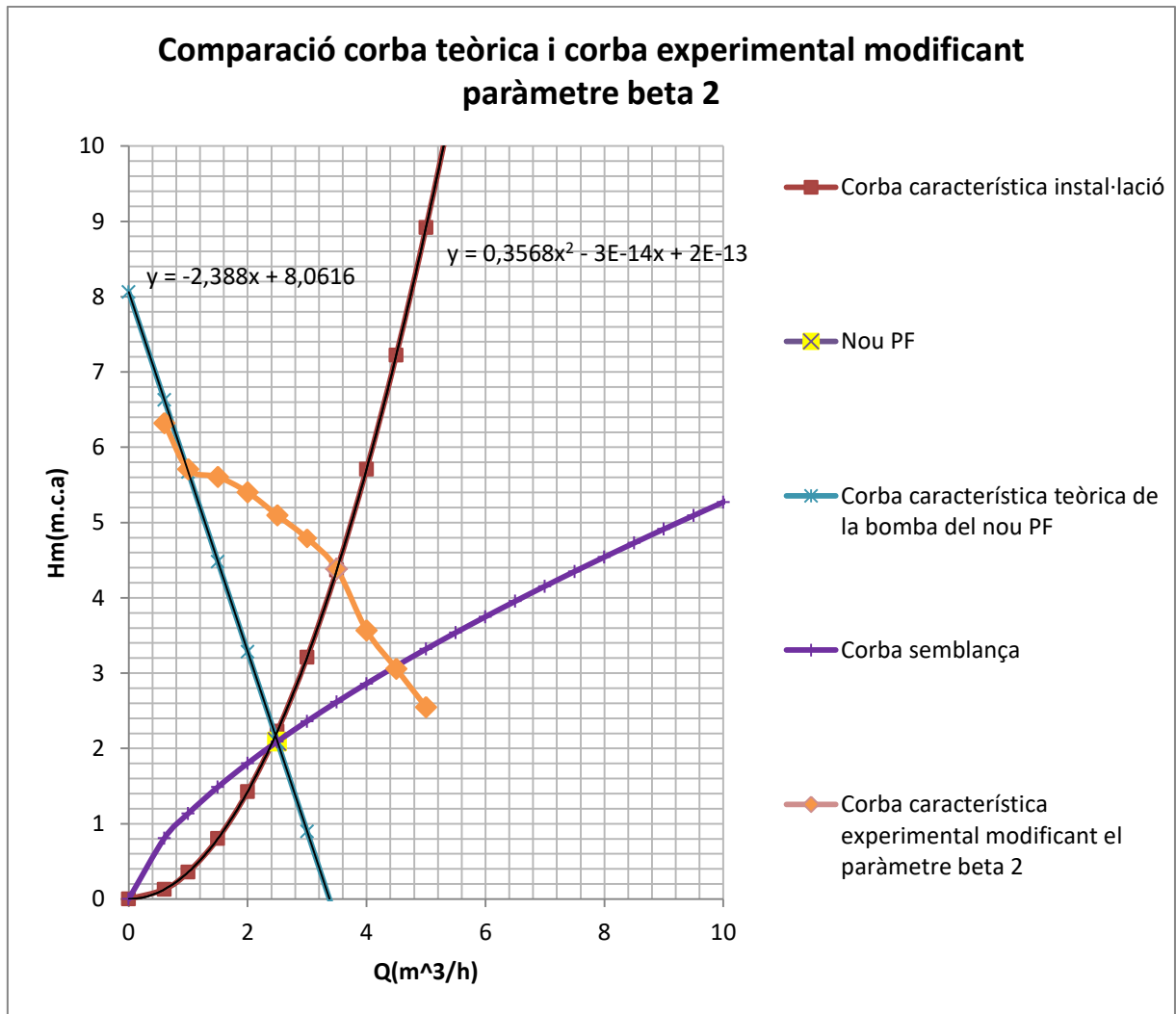
Tal i com es pot observar en el Gràfic 12, presenta totes les dades per tal de comparar els resultats obtinguts de forma experimental amb els previstos teòricament, segons el mètode de modificació del paràmetre β_2 .

Es pot observar que el punt de funcionament que es troba on tallen la *Corba característica de la instal·lació* amb la *Corba característica teòrica modificant beta 2* difereix molt del punt trobat experimentalment de la *Corba característica experimental modificant el paràmetre beta 2* (β_2). Consultar gràfic 12.

$$PF: Q = 2,5 \left(\frac{m^3}{h} \right) \text{ ó } 0,000694 \left(\frac{m^3}{s} \right) \quad H = 2,091 \text{ m. c. a}$$

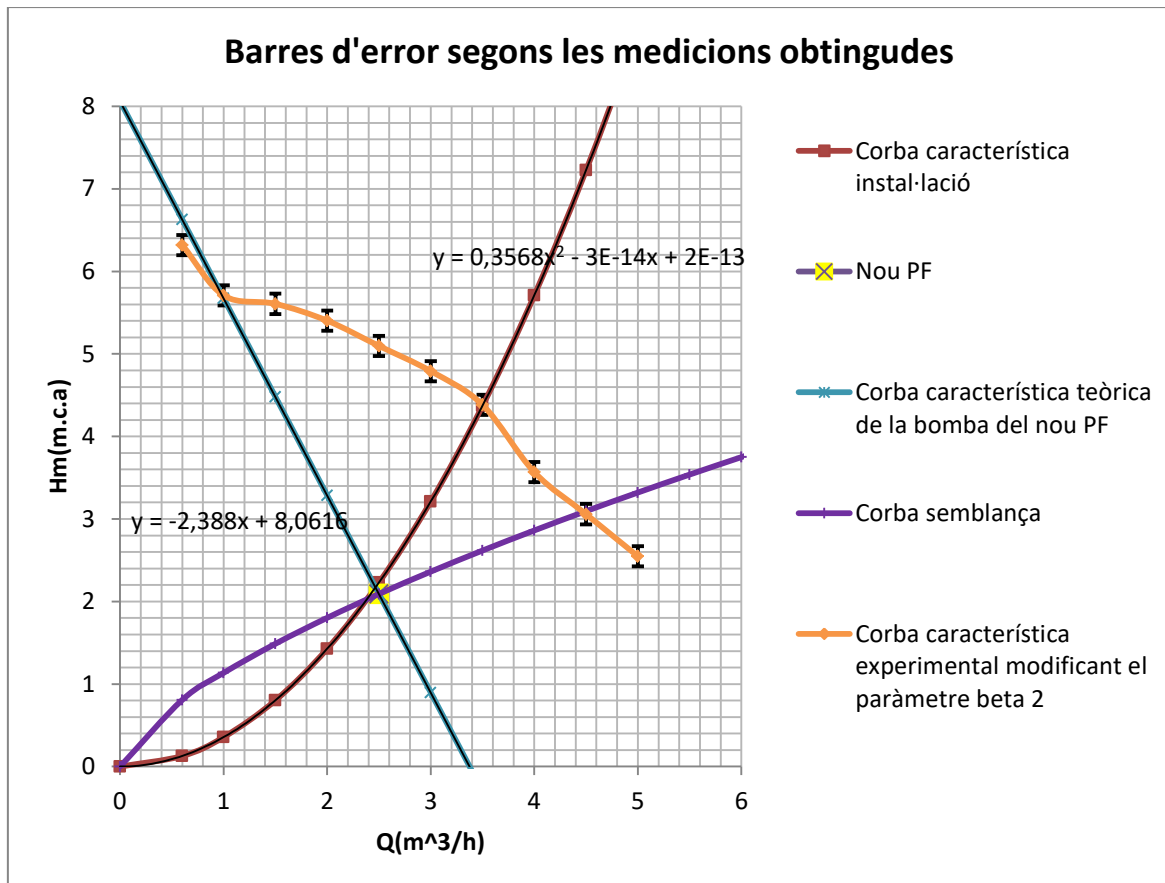
$$Punt trobat experimentalment: Q = 2,5 \left(\frac{m^3}{h} \right) \text{ ó } 0,000694 \left(\frac{m^3}{s} \right) \quad H = 5,097 \text{ m. c. a}$$

Per un mateix cabal modificant el paràmetre beta 2 que varia la inclinació dels àleps no afecta de manera significativa l'alçada que dona la bomba, a diferència del que s'havia previst als càlculs teòrics.



Gràfic 12. Resultats experimentals i teòrics pel mètode variació del paràmetre beta 2 (β_2).

En el Gràfic 13 es mostren les barres d'error, que determinen el marge d'error que es podria haver tingut amb la utilització dels aparells de mesura (cabalímetre, vacuòmetre i manòmetre). Com es pot observar, encara que es contempli el marge d'error, els resultats experimentals no verifiquen els teòrics.

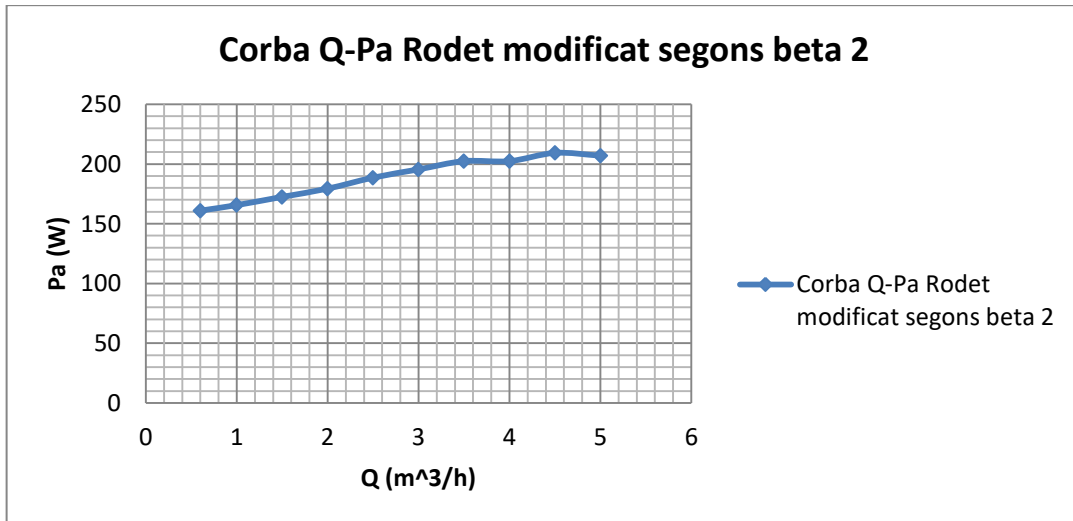


Gràfic 13. Barres d'error pel mètode de variació del paràmetre β_2 .

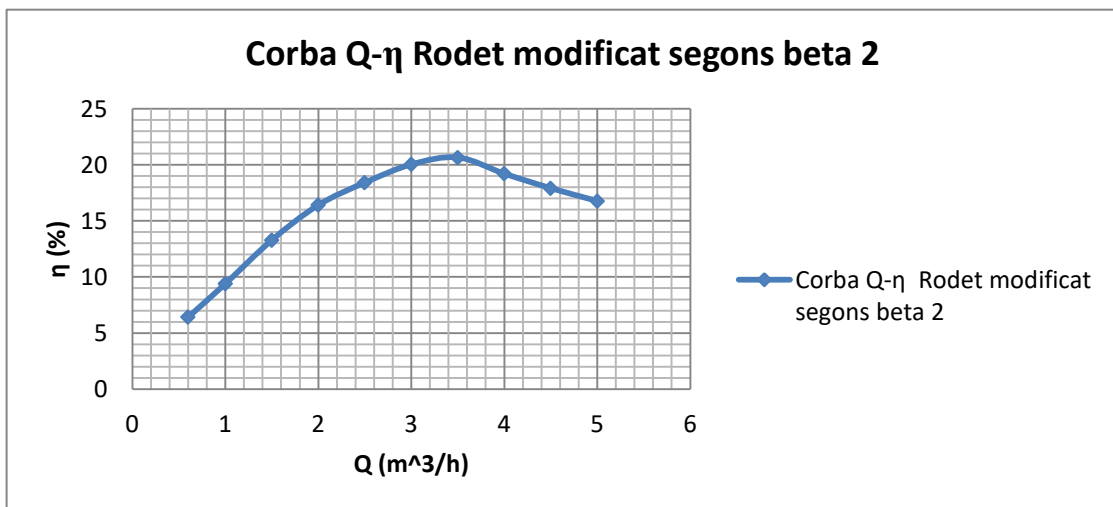
En el següent gràfic es pot observar com varia la Potència d'accionament de la bomba i el seu rendiment en funció del cabal. Aquests gràfics s'utilitzen per determinar l'eficiència de les bombes i per saber quin és el punt òptim on treballa.

Les corbes de rendiment mostren com varia l'alçada de la bomba en funció del cabal. El rendiment acostuma a disminuir quan el cabal es troba en punts màxims i mínims, en canvi el punt òptim es troba en cabals mitjos.

En aquest cas el punt òptim es troba al voltant dels $3,5 \frac{m^3}{h}$ on es necessita una potència d'accionament de 202,4 W.



Gràfic 14. Corba cabal- Potència d'accionament per modificació del paràmetre β_2 .



Gràfic 15. Corba cabal- rendiment per modificació del paràmetre β_2 .

6.2 Rodet modificant D2

En aquest capítol es pot observar com la modificació del paràmetre D2 és la que permet modificar més l'alçada que impulsa la bomba a la sortida en comparació al paràmetre β_2 estudiat en el capítol anterior.

6.2.1 Mètode 1

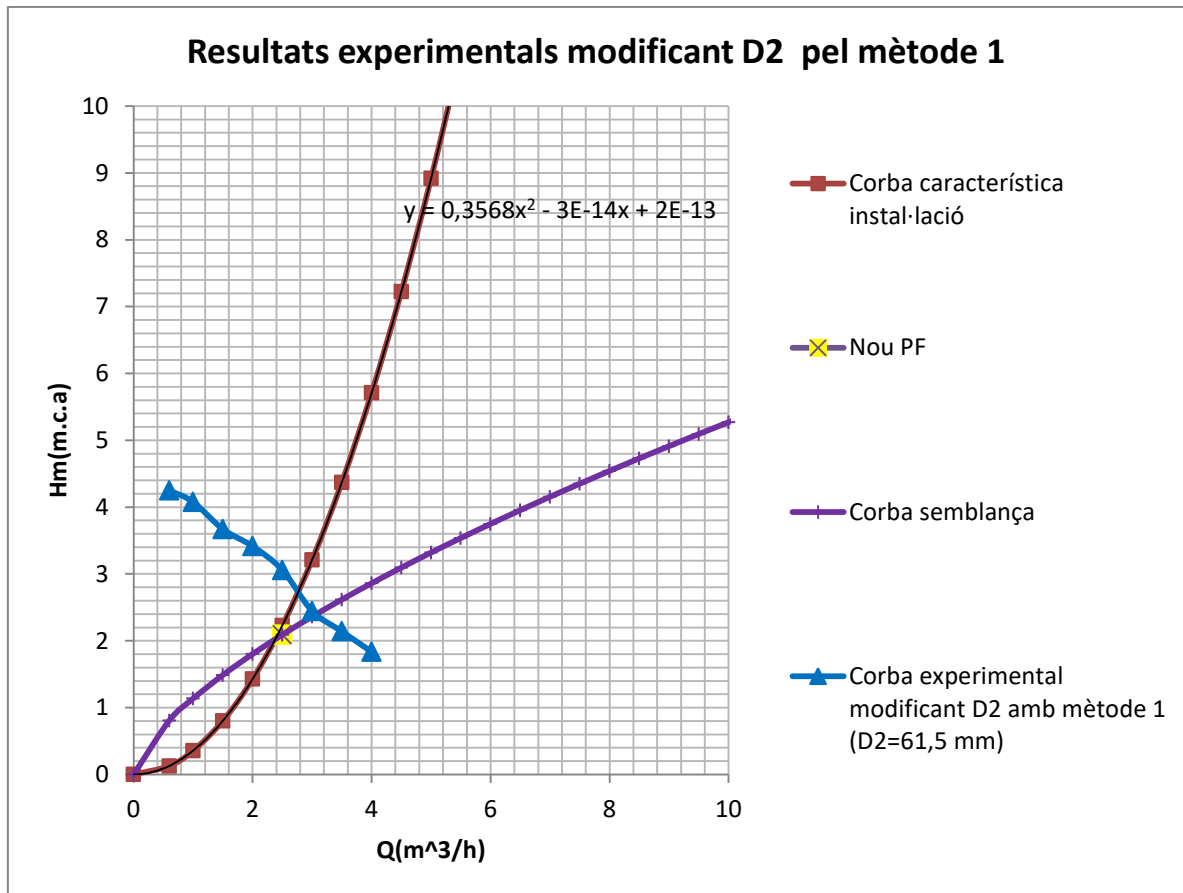
Tal i com es pot observar en el Gràfic 16, presenta totes les dades per tal de comparar els resultats obtinguts de forma experimental amb els previstos teòricament, segons el mètode de modificació del paràmetre D2 pel mètode 1. En aquest mètode es relaciona per semblança la corba característica experimental del rodet inicial amb el punt de funcionament buscat.

Es pot observar que el punt de funcionament que es troba on tallen la *Corba característica de la instal·lació* amb la *Corba de semblança*, difereix molt del punt trobat experimentalment de la *Corba característica experimental modificant el paràmetre D2 pel mètode 1*:

$$PF: Q = 2,5 \left(\frac{m^3}{h} \right) \text{ ó } 0,000694 \left(\frac{m^3}{s} \right) \quad H = 2,091 \text{ m. c. a}$$

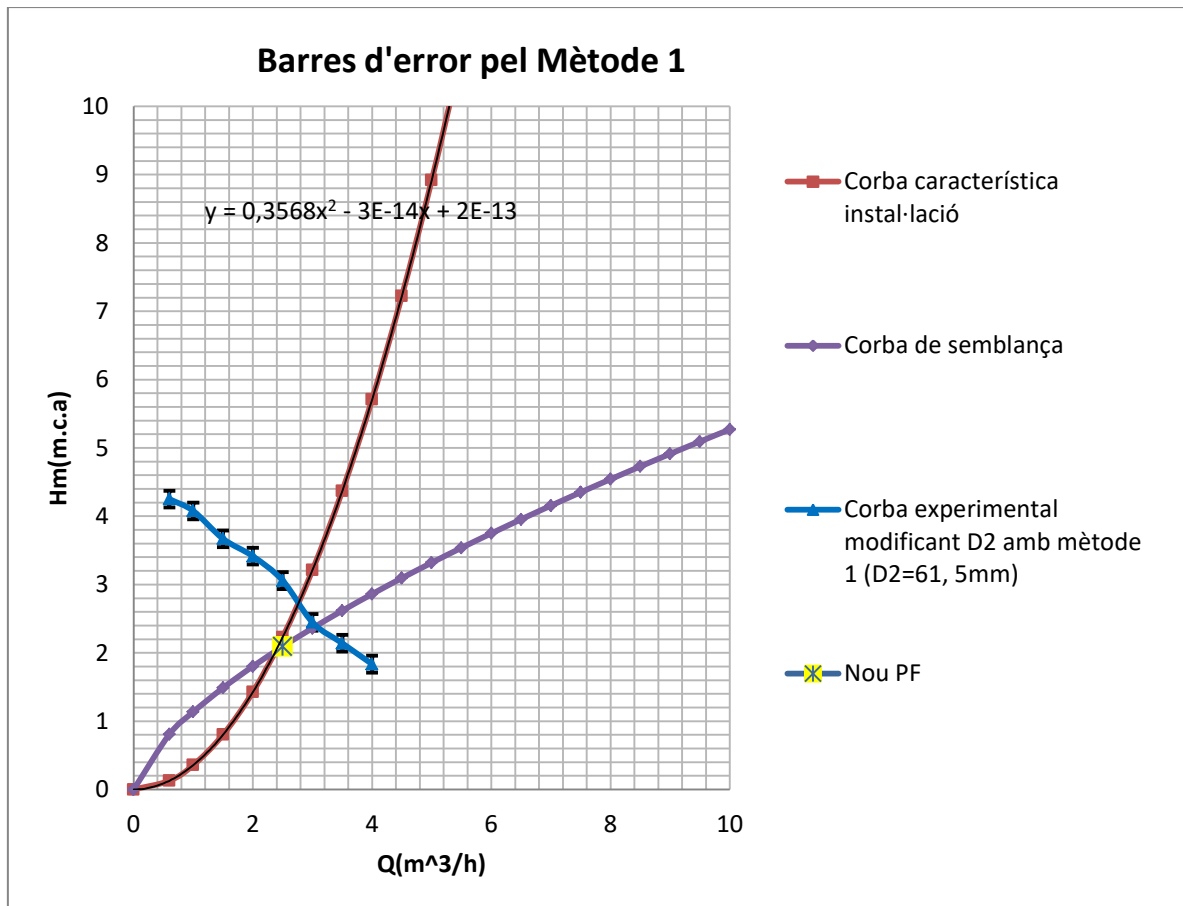
$$Punt trobat experimentalment: Q = 2,5 \left(\frac{m^3}{h} \right) \text{ ó } 0,000694 \left(\frac{m^3}{s} \right) \quad H = 3,058 \text{ m. c. a}$$

Per un mateix cabal modificant el paràmetre D2, que varia el Diàmetre exterior on finalitzen els àleps, varia considerablement l'alçada total que és capaç d'impulsar la bomba en comparació al capítol anterior. Però encara es presenta una diferència important d'1 m.c.a i per tant no es verifiquen per semblança els resultats experimentals amb els teòrics.



Gràfic 16. Resultats experimentals i teòrics pel mètode variació del paràmetre D2 segons Mètode 1.

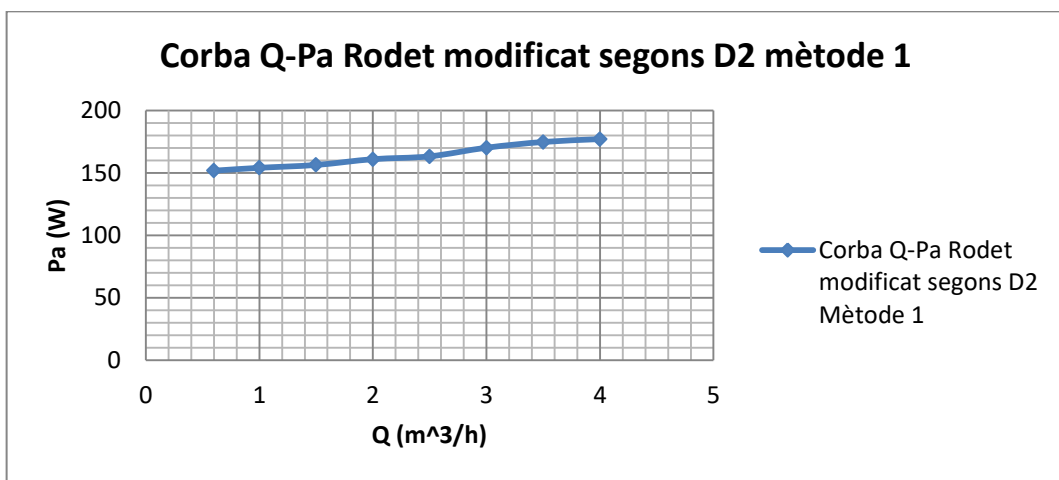
En el Gràfic 17 es mostren les barres d'error, que determinen el marge d'error que es podria haver tingut amb la utilització dels aparells de mesura (cabalímetre, vacuòmetre i manòmetre). Com es pot observar, encara que es contempli el marge d'error, els resultats experimentals no verifiquen els teòrics.



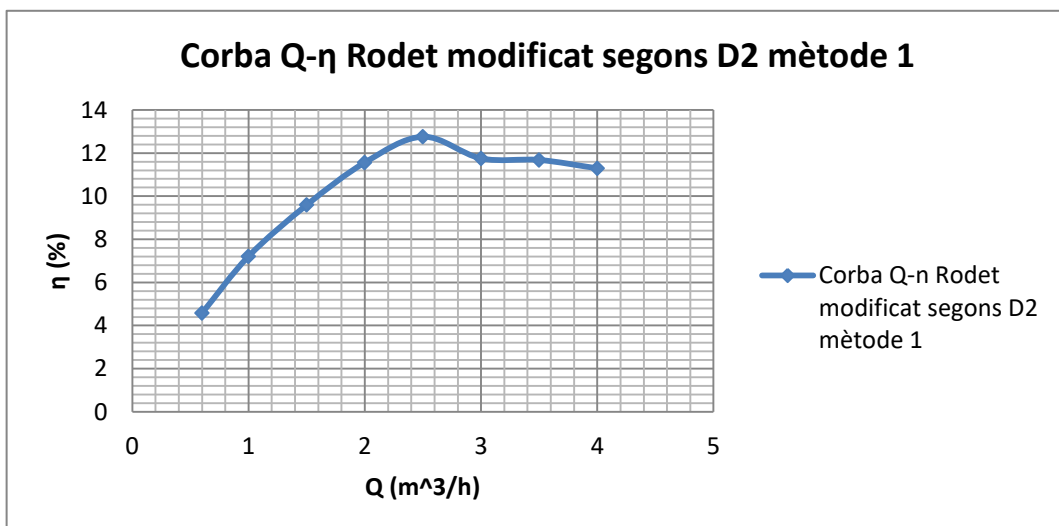
Gràfic 17. Barres d'error pel mètode de variació del paràmetre D2 segons Mètode 1

En el següent gràfic es pot observar com varia la Potència d'accionament de la bomba i el seu rendiment en funció del cabal. En aquest cas el punt òptim es troba al voltant dels 2,5 $\frac{m^3}{h}$ on es necessita una potència d'accionament de 163,3 W.

Com es pot observar la modificació del paràmetre de Diàmetre exterior produeix que el rendiment de la bomba disminueixi en relació al rendiment que teníem amb el rodet inicial que era de un 30%.



Gràfic 18. Corba cabal- Potència d'accionament per modificació del paràmetre D2 segons Mètode 1.



Gràfic 19. Corba cabal- rendiment per modificació del paràmetre D2 segons Mètode 1.

6.2.2 Mètode 2

En el Gràfic 20 es presenten els resultats obtinguts d'haver assajat el rodet per modificació del Diàmetre exterior segons el mètode 2. Aquest mètode relaciona la corba teòrica obtinguda del rodet inicial amb la corba teòrica que passa pel Punt de funcionament buscat.

La corba teòrica s'obté de la modificació del paràmetre A de l'equació que presenten les corbes teòriques de les bombes centrífugues, on aquest paràmetre depèn del diàmetre exterior. Tota la informació del procediment queda documentada en el capítol 4.3.2.

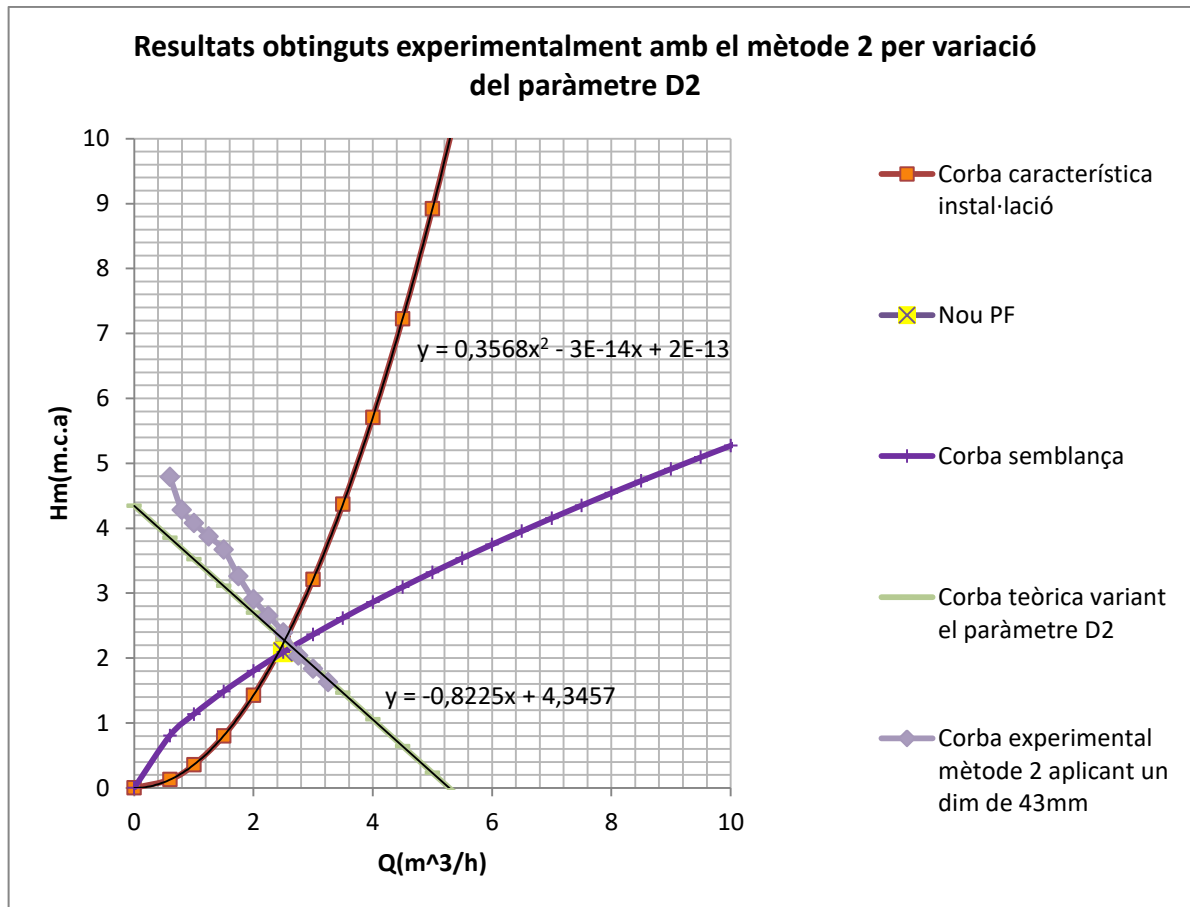
La corba característica experimental utilitzant aquest mètode ens proporciona uns resultats que compleixen amb els suposats teòricament. És a dir, amb aquest mètode som capaços de determinar qualsevol Punt de funcionament que es trobi sobre la corba característica de la instal·lació.

$$PF: Q = 2,5 \left(\frac{m^3}{h} \right) \text{ ó } 0,000694 \left(\frac{m^3}{s} \right) \quad H = 2,091 \text{ m. c. a}$$

$$PF \text{ (segons corba teòrica): } Q = 2,5 \left(\frac{m^3}{h} \right) \text{ ó } 0,000694 \left(\frac{m^3}{s} \right) \quad H = 2,29 \text{ m. c. a}$$

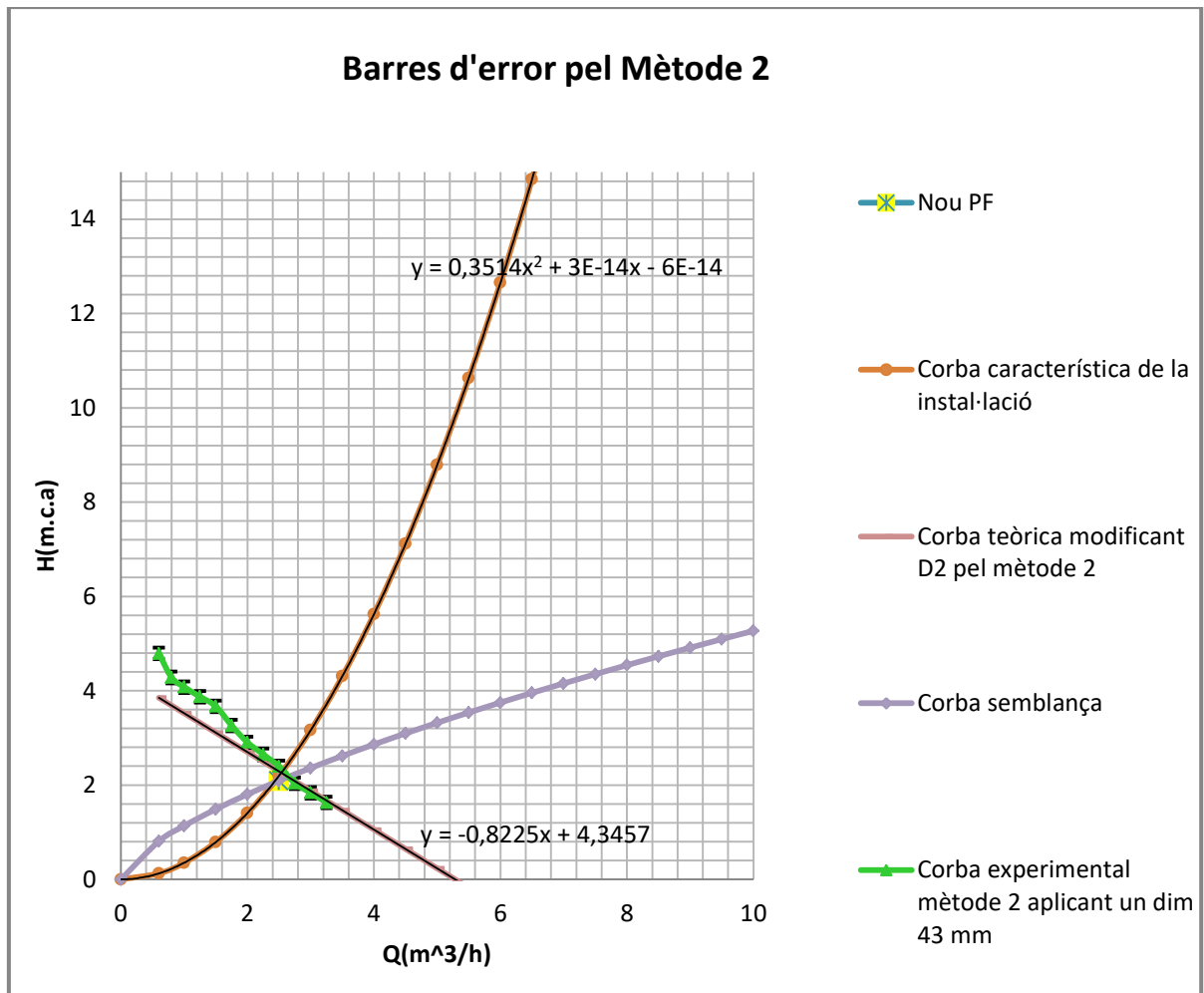
$$Punt trobat experimentalment: Q = 2,5 \left(\frac{m^3}{h} \right) \text{ ó } 0,000694 \left(\frac{m^3}{s} \right) \quad H = 2,34 \text{ m. c. a}$$

Es pot observar com el punt de funcionament segons la corba teòrica varia unes dècimes del punt de funcionament buscat, això és degut a l'arrodoniment del paràmetre del diàmetre exterior de 42,5 mm a 43 mm. Segurament si s'hagués dissenyat segons el paràmetre més exacte de 42,5 mm el punt de funcionament seria encara més precís.



Gràfic 20. Resultats experimentals i teòrics pel mètode variació del paràmetre D2 segons Mètode 2.

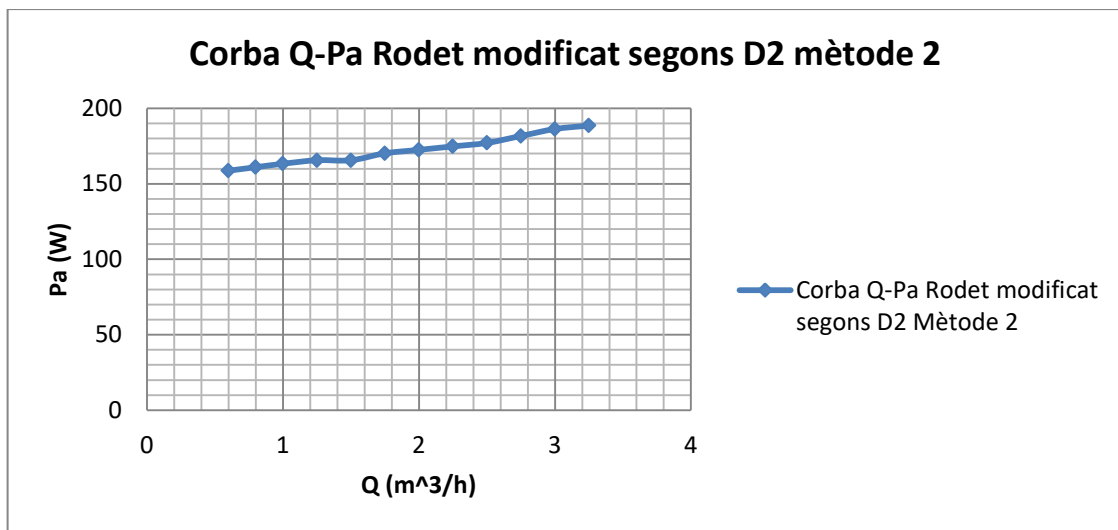
En el Gràfic 21 es mostren les barres d'error, que determinen el marge d'error que es podria haver tingut amb la utilització dels aparells de mesura (cabalímetre, vacuòmetre i manòmetre). Els marges d'error comparats amb els mètodes anteriors verifiquen les equacions basades en la Teoria.



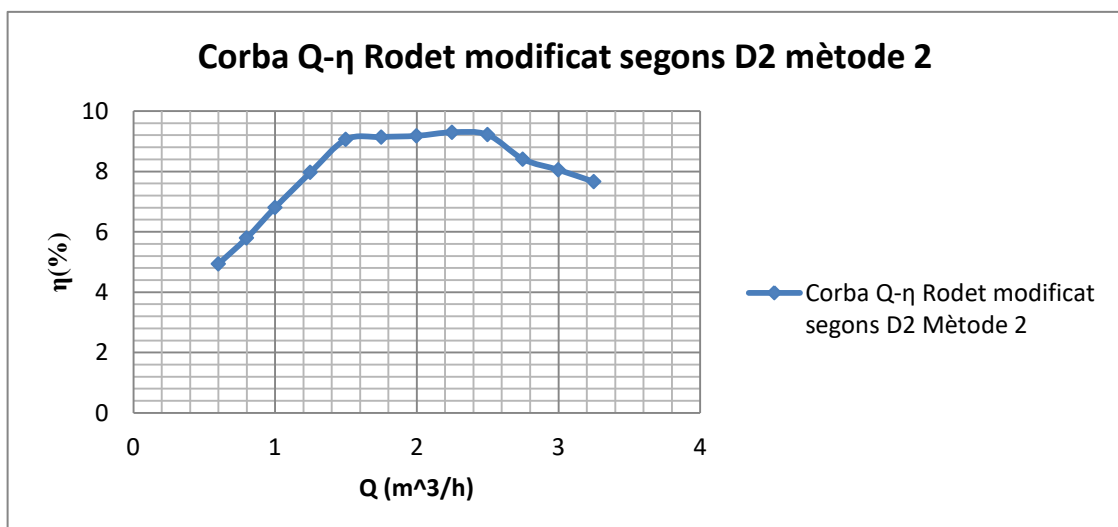
Gràfic 21. Barres d'error pel mètode de variació del paràmetre D2 segons Mètode 2.

En el següent gràfic es pot observar com varia la Potència d'accionament de la bomba i el seu rendiment en funció del cabal.

En aquest cas el punt òptim es troba al voltant dels $2,25 \frac{m^3}{h}$ on es necessita una potència d'accionament de 174,8 W.



Gràfic 22. Corba cabal- Potència d'accionament per modificació del paràmetre D2 segons Mètode 2.



Gràfic 23. Corba cabal- rendiment per modificació del paràmetre D2 segons Mètode 2.

6.3 Anàlisi dels resultats

Es fan assajos dels tres rodets i s'extreuen les corbes característiques experimentals per tal de comparar els resultats amb els teòrics. Es pot concloure que la metodologia que ens permet dissenyar i fabricar rodets que treballin a Punts de funcionament determinats és El Mètode 2 per modificació del Diàmetre 2.

En el primer assaig *Rodet modificant β_2* veiem que obtenim uns resultats que s'allunyen molt dels esperats teòricament. S'obté per un mateix cabal, una diferència entre resultats teòrics i experimentals de 4 (m.c.a), aquest cas permet concloure que gairebé no afecta la variació del paràmetre β_2 en l'alçada que pot impulsar la bomba.

En conseqüència es determina una nova metodologia per tal d'aconseguir uns millors resultats, es decideix modificar el paràmetre D2 (Diàmetre exterior dels àleps) per semblança i es comprova que la modificació d'aquest paràmetre té uns resultats més adequats però encara no es poden verificar els teòrics. La diferència entre el Punt de funcionament determinat i el que s'obté experimentalment és de 1 m.c.a.

Finalment la metodologia que ens permet relacionar la formulació teòrica amb les dades experimentals es basa en variar el paràmetre D2 de la corba característica ideal que es té inicialment. Els resultats obtinguts verifiquen els teòrics. També es pot observar que el rendiment queda afectat de manera negativa, en propers estudis es podria millorar l'eficiència del rodet millorant el disseny i comprovant com afecta la variació del material d'impressió.

7. CONCLUSIONS

Amb aquest estudi s'han assolit els objectius determinats a l'inici.

- S'ha seguit un procés per tal de dissenyar, construir i adaptar el banc de proves existent de la Universitat per assajar nous rodets i extreure'n les corbes característiques de la bomba.
- Aquest procés inclou determinar la bomba de voluta desmuntable de bombes ESPA que sigui compatible amb el banc existent, on es comprova que les dades proporcionades pel fabricant són errònies i s'extreuen experimentalment assajant bomba. A més es comprova que els elements de mesura són compatibles amb la bomba escollida.
- Es compleix la relació entre l'estudi del rodet inicial de la bomba amb les equacions teòriques que es basen en la geometria dels àleps, aplicant els factors de rendiment volumètric i hidràulic degut a les pèrdues.
- Observant els resultats obtinguts es comprova que el rodet fabricat amb impressió 3D, és capaç de suportar els esforços exercits pel fluid, després de fer diferents proves i determinar quin és el millor disseny pel rodet. Els únics inconvenients que s'han trobat són que la part interior per on circula el fluid, al construir-se un suport fa que no quedi del tot llisa la cara i podria provocar petites turbulències, podria ser una millora per a treballs futurs. També que el procés per retirar el suport és delicat i es podria millorar si el suport fos creat amb un material que es pogués dissoldre amb aigua.
- A més, s'estudien tres metodologies diferents relacionant els resultats experimentals amb els suposats teòricament i es pot concloure que el rodet obtingut a partir de la variació d'un paràmetre de la formulació teòrica ens dona resultats més precisos que seguint el mètode de semblances.
- També es pot concloure que la variació de dades geomètriques, com són el diàmetre exterior, afecta molt més a l'alçada que pot proporcionar la bomba, si es compara amb els angles d'entrada i sortida dels àleps del rodet que casi no fan variar els resultats.
- Finalment es pot arribar al punt de funcionament (alçada i cabal determinats prèviament) seguint el mètode 2 i per tant modificant paràmetres geomètrics del rodet segons les equacions teòriques som capaços de preveure en quin punt treballarà la bomba.

A part dels objectius definits a l'inici del treball:

- S'ha estudiat el rendiment dels nous rodets però no s'ha provat de millorar, el fet de canviar la geometria ha causat que el rendiment disminueixi. Per a propers estudis es podria mirar de trobar un mètode per tal de mantenir el rendiment del rodet inicial i que no disminueixi en excés.
- S'ha redactat una pràctica on es detalla el procediment per obtenir nous rodets segons el mètode més precís pels futurs alumnes de l'assignatura de Sistemes i Màquines Fluidomecàniques.

8. RELACIÓ DE DOCUMENTS

DOCUMENT 1: MEMÒRIA

ANNEXES

ANNEX A: FONAMENTACIÓ TEÒRICA

ANNEX B: FACTORS A TENIR EN COMPTE

ANNEX C: PRÀCTICA PELS ALUMNES DE L'ASSIGNATURA

DOCUMENT 2: PLÀNOLS

DOCUMENT 3: PRESSUPOST

ANNEX DEL PRESSUPOST

9. BIBLIOGRAFIA

- Eduard i Albert Massaguer. Apunts Turbomachines I. Euler. Sistemes i Màquines Fluïdomecàniques. Universitat de Girona.
- Eduard i Albert Massaguer. Apunts Turbomachines II. Centrifugal pumps. Sistemes i Màquines Fluïdomecàniques. Universitat de Girona.
- Eduard i Albert Massaguer. Lab Session 2. Sistemes i Màquines Fluïdomecàniques. Universitat de Girona.
- Cesar Huete, Daniel Martínez Ruiz, Mario Sánchez Sanz. Apuntes Máquinas Hidráulicas. Departamento de Ingeniería tèrmica i de fluidos. Escuela Superior Universidad Carlos III de Madrid.
- Mataix, Claudio. Turbomáquinas hidráulicas : turbinas hidráulicas, bombas, ventiladores. Madrid: ICAI, 1975.
- Egusquiza, Eduard. Comportament dinàmic de màquines hidràuliques. Barcelona: Edicions UPC, 2003.
- Agüera Soriano, José. Mecánica de fluidos incompresibles y turbomáquinas hidráulicas. 4a ed. rev. Madrid: Ciencia 3, 1996.
- Carnicer Royo, Enrique, and Concepción Mainar Hasta. Bombas centrífugas. 2a ed. Madrid: Editorial Paraninfo, 2001.
- Echeverría, José Antonio. Validación de un modelo numérico del comportamiento hidráulico de una bomba centrífuga. Trabajo Teórico Experimental. Ingeniería Energética. Centro de Investigación y Pruebas Electroenergéticas. Universidad Tecnológica de La Habana. Junio 2019.

- ZAMORA PARRA, BLAS. VIEDMA ROBLES, ANTONIO. Máquinas Hidráulicas. Teoría y problemas. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial. Universidad Politécnica Cartagena. 2016.
- Aiguapres. Cebado de una bomba de agua paso a paso. (<https://www.aiguapres.es/cebado-de-una-bomba-de-agua-paso-a-paso/>, 30 de Juny de 2023).
- ENCICLOPÈDIA CATALANA. Màquina hidràulica. (<https://www.enciclopedia.cat/gran-enciclopedia-catalana/maquina-hidraulica> 18 de Febrer de 2023).
- José Luis R. Cómo funciona una bomba centrífuga. (<https://como-funciona.co/una-bomba-centrifuga/>, 30 de Març de 2023).
- SEGUAS. Bombas centrífugas y su uso en instalaciones hidráulicas. (<https://www.seguas.com/bombas-centrifugas-instalaciones-hidraulicas/>, 30 de Març de 2023).
- Vaquero Gomez. Aplicacion de bombas rotodinamicas. (https://www.academia.edu/37893258/Aplicacion_de_bombas_rotodinamicas, 10 d'Abril de 2023).
- Tema 6: BOMBAS CENTRÍFUGAS. (<https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/5091/fichero/6+-+BOMBAS+CENTR%C3%8DFUGAS.pdf>, 12 d'Abril de 2023).
- Bombascentrifugas.net. Las Bombas Centrifugas , Funcionamiento características y aplicaciones. (<https://www.bombascentrifugas.net/las-bombas-centrifugas/>, 12 d'abril de 2023).
- Salvador de las Heras. Fluidos, bombas e instalaciones hidráulicas. Universitat politècnica de Catalunya.

(<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.3/36653/9788476538937.pdf?sequence=1&isAllowed=y>, 25 d'Abril de 2023).

- Javier Fraile. Simulación y diseño de un rodete de una bomba centrífuga con análisis de elementos finitos. Proyecto Fin de Máster. Ingeniería Técnica Industrial. Escuela Politécnica Superior. Universidad de Cantabria. Julio 2021.
- CARLOS J RENEDO. BLOQUE 1: Máquinas de Fluidos Incompresibles. Departamento Ingeniería Eléctrica y Energética. Universidad de Cantabria.
- BCN 3D. BCN3D presenta la Sigma y Sigmax R19: La nueva generación de impresoras 3D. (<https://www.bcn3d.com/es/bcn3d-presenta-la-sigma-y-sigmax-r19-la-nueva-generacion-de-impresoras-3d/>, 7 de Juny de 2023).
- Wikipedia. Definició cabalímetre. (<https://ca.wikipedia.org/wiki/Cabal%C3%ADmetre>, 14 de Juny, 2023).
- Cloudtec. Vacuómetro y Manovacúmetro. (<https://cloudtec.pe/blog/automatizacion-industrial/sensores/sensor-de-presion/vacuometro-manovacuumetro/>, 14 de Juny de 2023).
- Ivette Amores-Silva. Design, Implementation and Control for a Test Bank with Centrifugal Pumps in Serial and Parallel Connection. Proyecto Final de Carrera. Ingeniería Industrial. Instituto Politécnico Nacional. Universidad de Ecuador.

ANNEXES

ANNEX A: FONAMENTACIÓ TEÒRICA

A.1 Conceptes bàsics

A.1.1 Bombes centrífugues

Les bombes dins les màquines hidràuliques es defineixen com a turbomàquines, màquines que contenen una peça rotativa anomenada rodet que fa variar l'energia cinètica del fluid per convertir-la en pressió. La forma dels àleps del rodet està dissenyada de manera que cada dos àleps formen un conducte que obliga al flux a variar la quantitat de moviment. Segons l'equació de la quantitat de moviment això genera una força sobre aquests àleps.

El seu principi es basa en la conservació del moment cinètic, per tenir una sortida continua i cabals grans.

Tal i com es pot observar en la Figura 45 dins de turbomàquines es classifiquen en màquines generadores que es caracteritzen per comunicar energia mecànica al fluid. Són màquines que absorbeixen la energia de l'eix del motor i la cedeixen al fluid.

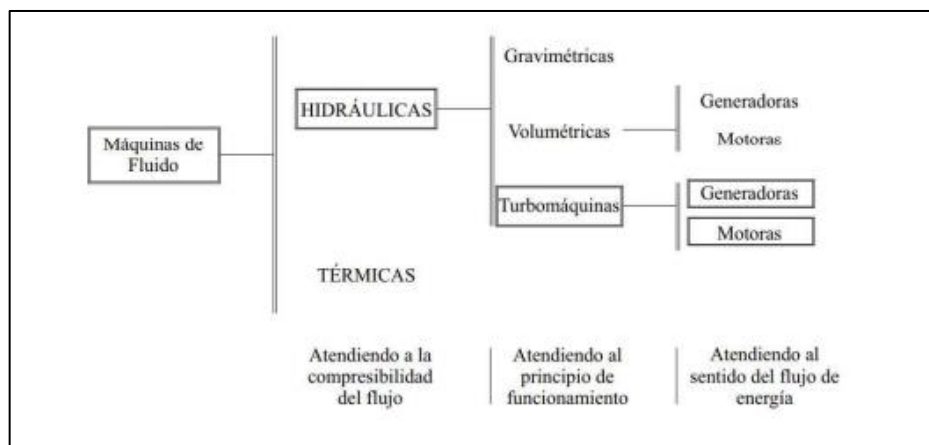


Figura 45. Classificació màquines de fluid

El principi de funcionament es caracteritza per el transport de un punt a un altre d'un líquid mitjançant una màquina anomenada bomba. Generalment aquest líquid es mou de cotes més baixes a més elevades i s'utilitzen per vèncer pressions i desnivells al llarg del circuit.

Totes les bombes centrífugues es basen en el principi de Bernoulli de conservació de l'energia i l'Equació d'Euler per a les turbomàquines. L'intercanvi d'energia es calcula al rodet i són capaces d'impulsar tota mena de líquids.

La transferència d'energia es pot dividir en dues parts. En primer lloc, a causa del moviment rotacional dels àleps es genera un creixement d'energia cinètica del líquid. Seguidament passa a ser recollit per la voluta, que transforma l'energia cinètica generada en energia de pressió gràcies al seu disseny característic. Finalment el mateix cos s'encarrega de dirigir el fluid al con de descàrrega.

El treball es centra en les bombes centrífugues bàsicament de funcionament radial. Capaces de treballar a grans velocitats per un cabal i una pressió determinades (en comparació a altres tipus de bombes). A més de conservar un disseny més lleuger i relativament menys voluminos.

A.1.1.1 Aplicacions

Totes les bombes centrífugues s'encarreguen de transformar un treball mecànic en hidràulic movent un fluid entre dos nivells.

Existeixen doncs, molts sectors industrials que utilitzen les bombes centrífugues en sistemes mecànics, sobretot com s'ha anomenat anteriorment perquè aquestes son capaces de moure grans masses d'aigua a velocitats elevades. També s'utilitzen pel subministre d'aigua a les poblacions, sistemes de regadiu i drenatge, etc.

Els sectors que treballen més amb bombes centrífugues són la indústria química, sector de l'automoció i la indústria alimentaria.

Existeixen diversos avantatges que ofereix una bomba centrífuga alhora d'impulsar fluids. La seva adaptació a diferents sistemes i mecanismes d'acoplació és senzilla a més, compta amb unes dimensions i un pes reduït que fa que el seu cost també hagi disminuït

considerablement amb els anys. Alhora també compten amb una eficiència elevada gràcies a la incorporació de variadors de velocitat.

En concret la bomba NOX 20 que serà la utilitzada en el projecte, s'aplica sobretot en recirculació i filtració d'aigua per a petites piscines (Figura 46).



Figura 46. Bomba Espa NOX 20 4M

A.1.1.2 Composició

Per entendre la composició de la bomba es necessita determinar els termes d'alçada geomètrica i alçada d'aspiració.

Alçada geomètrica: Alçada vertical entre el nivell del líquid que es necessita elevar fins al punt més alt del sistema.

Alçada d'aspiració: Alçada vertical entre el nivell del líquid i l'entrada del fluid a la bomba.

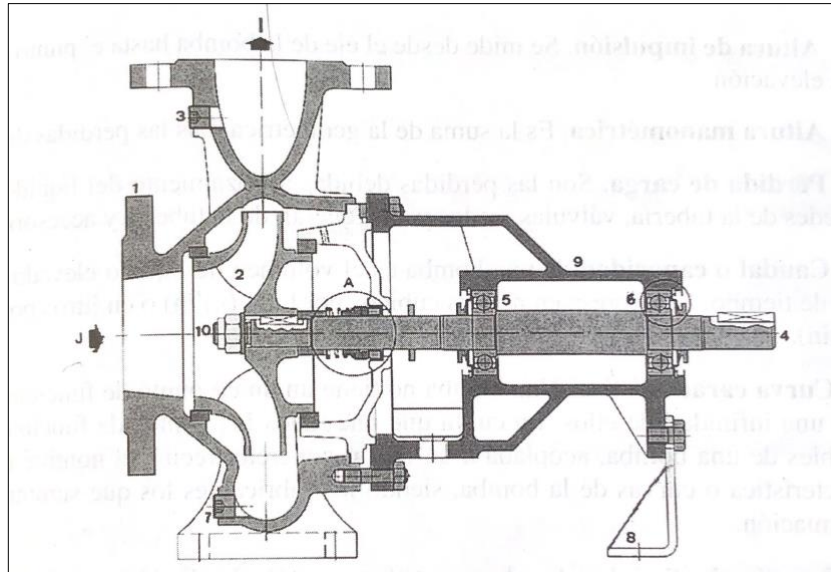


Figura 47. Denominació components bomba. 1. Cos de la bomba. 2. Rodet. 3. Tap del manòmetre. 4. Eix de la bomba. 5. Rodament. 7. Tap de buidat. 8. Peu de recolzament de l'estructura. 9. Suport. 10. Femella de subjecció del rodet.

Components principals bomba:

COMPONENTS ESTATOR:

Distribuïdor: Element que condueix el fluid fins a l'entrada del rodet en les condicions corresponents de direcció. Pot estar compostat per àleps no rotatius i regulables o en altres casos per un simple conducte a l'aspiració.

El distribuïdor haurà de reduir la pre-rotació del fluid, és en els àleps rotatius on els es minimitza al màxim aquest fenomen.

SISTEMA DIFUSOR:

El paper dels tres elements és el mateix transformar l'energia dinàmica que transmet el rodet en energia de pressió amb un rendiment màxim, consegüentment amb un mínim de pèrdues durant el procés.

Corona directriu:

Encarregada de recollir el líquid del rodet, transforma l'energia cinètica en energia de pressió.

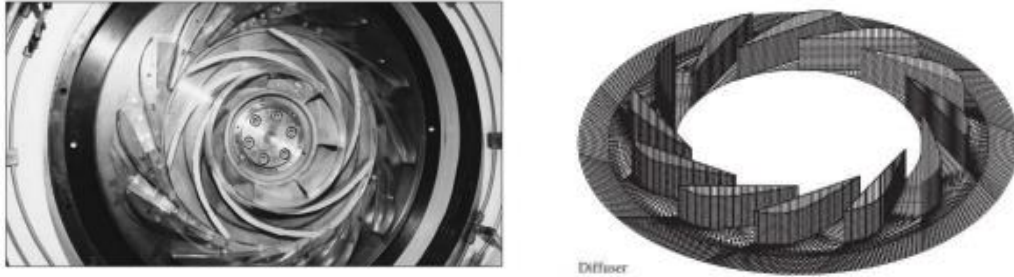


Figura 48. Corona directriu

Caixa espiral:

Transforma l'energia cinètica en energia de pressió a més de recollir i reconduir el fluid cap a la sortida de la bomba.

La caixa espiral està formada per un disseny característic, es tracta d'una caixa formada per dos plans paral·lels i tancada per una superfície cilíndrica que segueix una espiral logarítmica.

La separació entre aquesta i el rodet és mínima al principi i augmenta fins a la sortida del tub difusor. Degut a aquest augment de distància, disminueix de velocitat el fluid i acaba transformant l'energia cinètica en energia de pressió.

Tub difusor:

Etapa final on s'acaba de transformar tota l'energia dinàmica en energia de pressió mitjançant la desacceleració del fluid.

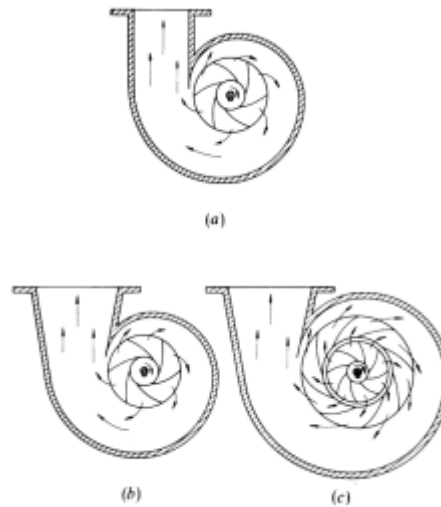


Figura 49. Elements del sistema difusor

No sempre apareixen els tres elements necessàriament en totes les bombes centrífugues, existeixen bombes amb només caixa espiral (Fig. a), caixa espiral i difusor (Fig. b) o finalment amb les tres components (Fig c).

Elements mòbils:

Rodet: Element constituït per una sèrie d'àleps mòbils. Entre ells es formen canals per on passa contínuament el fluid. El rodet a causa de el seu muntatge axial i la capacitat de moviment rotatori, permet que la bomba sigui capaç de transformar el parell aplicat sobre l'eix en energia cinètica al fluid.

El procés de transmissió d'energia es du a terme quan el rodet gira a grans velocitats i transmet el moviment a les partícules de fluid, gràcies a la força centrífuga aquestes són impulsades cap al sistema difusor i van augmentant la seva pressió degut a la velocitat.

Es poden distingir entre tres tipus de rodets: tancats, oberts i semioberts.

Els rodets tancats seran els que estudiarem en aquest document. Es caracteritzen per tenir les dues cares cobertes, amb els àleps a l'interior. Aquests rodets s'utilitzen per disminuir les pèrdues per fugues de fluid entre la zona de descàrrega, on hi ha una pressió superior i la zona d'aspiració on la pressió és menor.

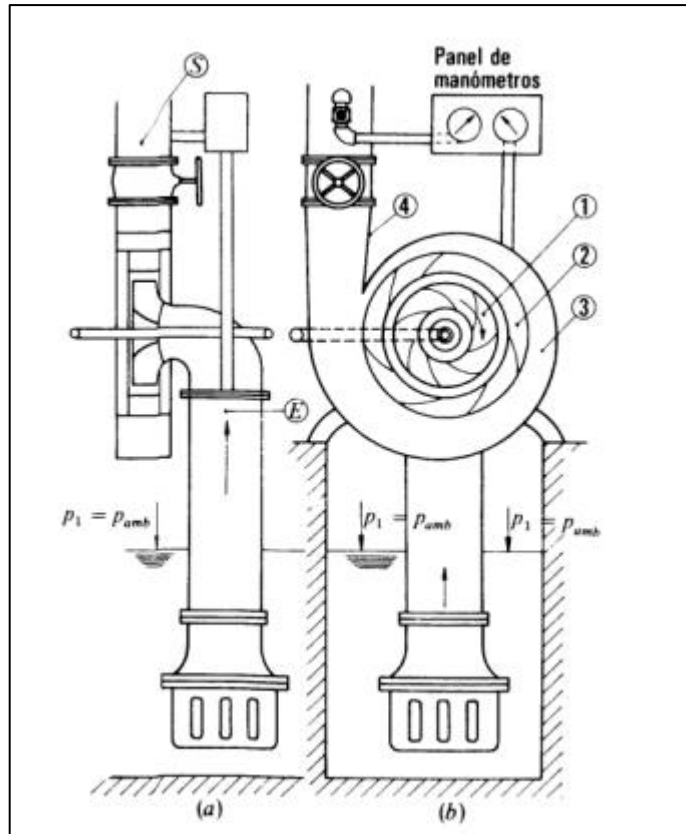


Figura 50. Comportament de les turbomàquines

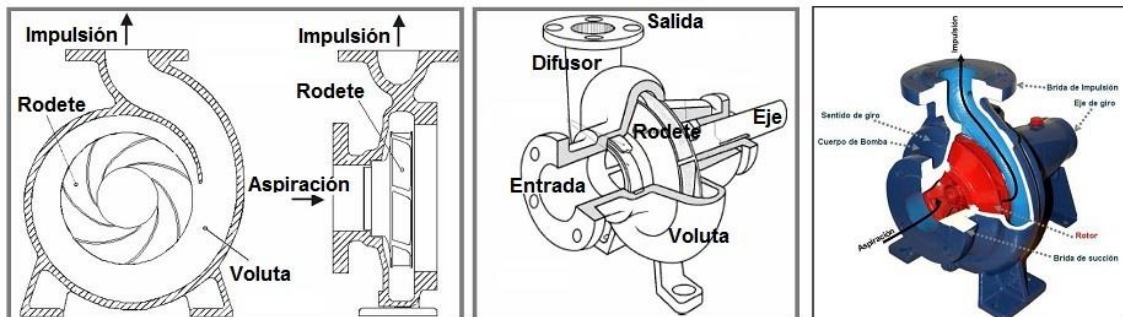


Figura 51. Components de les turbomàquines

A.1.1.3 Classificació rodets o impulsor:

Els rodets tancats s'utilitzen per impulsar líquids a diferència dels oberts o semioberts que també es poden utilitzar per impulsar sòlids.

- Rodet tancat simple aspiració
- Rodet tancat doble aspiració
- Rodet obert doble aspiració
- Rodet obert simple aspiració

En aquest projecte s'estudiarà un rodets de simple aspiració tancat.

Es dissenyarà per tal que el cabal i alçada requerida per la bomba es pugui aconseguir el major rendiment. S'estudiarà quina és la millor forma del rodets:

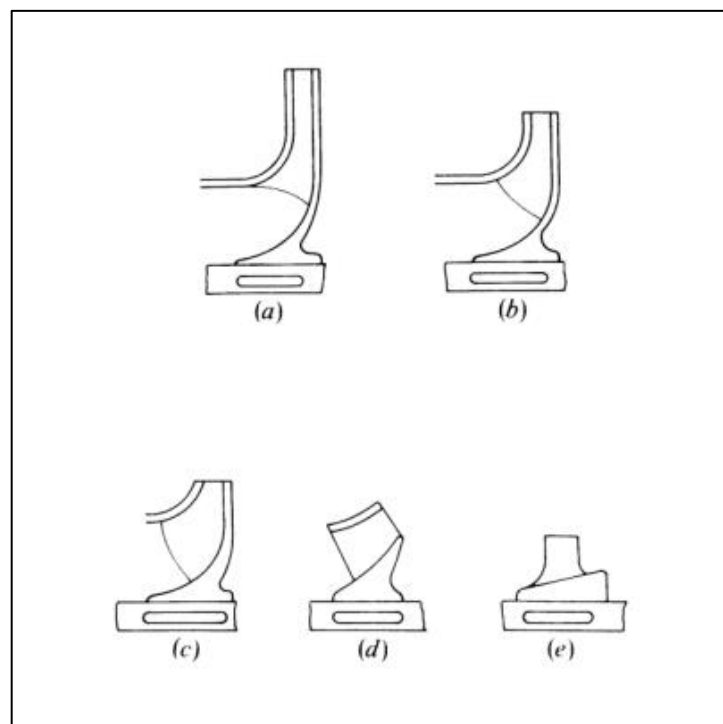


Figura 52. Disseny del rodets en funció de les rpm

Es tractarà d'un rodet com el que es pot veure en la imatge superior (rodet (a)), on el flux és totalment radial.

Es poden classificar també segons el número de revolucions:

- En bombes els valors oscil·len entre 35 i 3000 rpm.

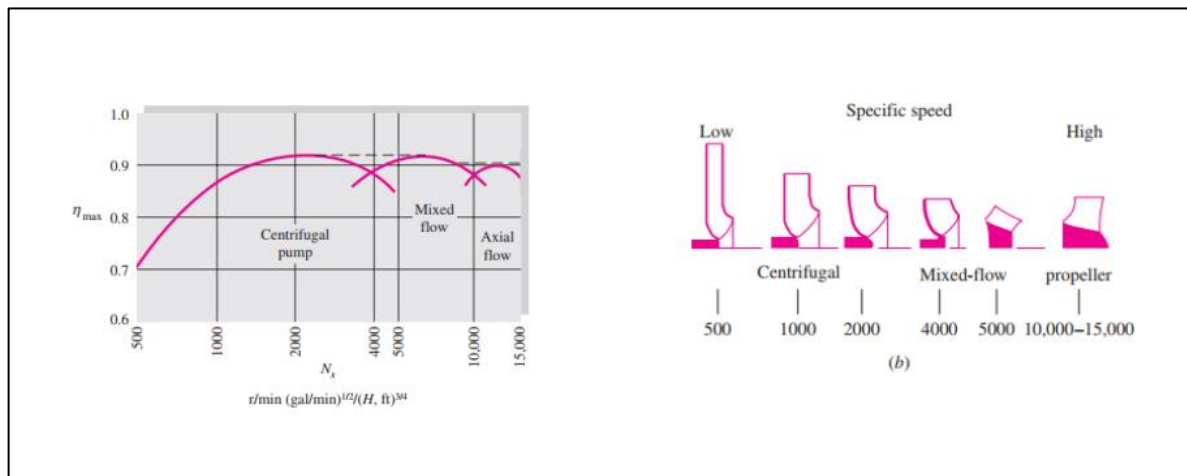


Figura 53. Classificació rodet segons velocitat específica

La bomba NOX 20 que s'utilitza en el projecte treballa a una velocitat de ns 500 segons el catàleg del fabricant, com es pot veure a la Fig 53. Classificació rodet segons velocitat específica, ens centrarem en el rang de 500 a 3000 rpm que és on treballen les bombes centrífugues. S'estudiarà el punt de funcionament segons la Corba Característica a 2900 rpm i a un rendiment òptim, per poder comparar-la amb els resultats experimentals del rodet propi fabricat.

Es veuran com evolucionen les diferents corbes característiques si canviem la velocitat de relació del rodet.

El rodet propi basarà el seu disseny per tal que el cabal i l'alçada requerides per la instal·lació treballin al màxim rendiment. El rodet tal tindrà una forma tal i com s'observa a la

Fig. 52. Disseny del rodet en funció de les rpm, on la diferència de diàmetre d'entrada i sortida és màxima permetent que el flux es desplaci perpendicularment a l'eix del rodet a la sortida.

A.1.1.4 Elements constitutius de la BOMBA NOX 20

Aquest es el model de bomba utilitzat ens basarem en les següents imatges per descriure els elements constitutius de la bomba centrífuga:

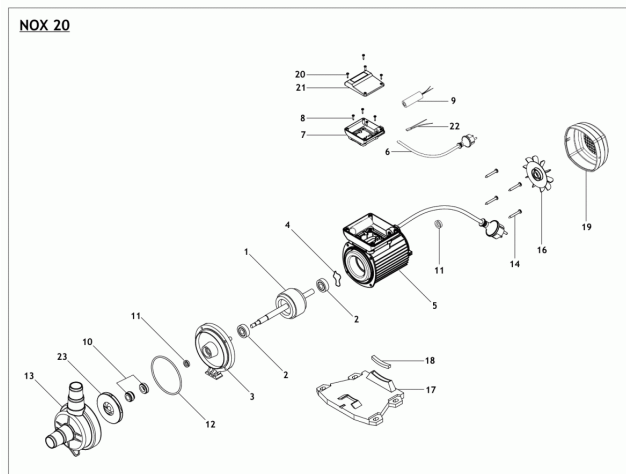


Figura 54. Especejament Bomba NOX 20 4M

ESPA NOX 20 4 M

Segons la classificació de bombes centrífugues podem determinar que la bomba escollida serà una bomba radial, és a dir, la direcció del flux seguirà un moviment perpendicular a l'eix de rotació. Es tracta d'una bomba que genera unes pressions i cabals mitjos que ens permetrà treballar en el punt de funcionament òptim per el sistema del laboratori.

L'eix estarà situat de manera horitzontal i comptarà amb un únic rodet de simple aspiració.

El material de fabricació de la bomba és el tecnopolímer, tant el cos de la bomba com el difusor i l'impulsor són fets d'aquest material. L'eix de la bomba en AISI 431 o la carcassa del motor està fabricada d'alumini.

La bomba comptarà amb uns tancaments mecànics per evitar pèrdues i juntes tipus NBR/EPDM.

El motor que utilitza per transmetre el moviment al rodet es asíncron de 2 pols i amb aïllament classe F, compta amb una protecció IPX5, és a dir que està protegit contra l'aigua en raigs a pressió, a més compta amb una protecció tèrmica que permetrà la protecció del motor i aparells elèctrics, detecta quan la bomba no mantingui el bon funcionament i evita el seu deteriorament.

A.2 Desenvolupament teòric

El comportament de les màquines hidràuliques es basa en l'equació d'Euler que es presentarà en aquest capítol.

Per estudiar la relació entre el fluid i els elements mecànics es necessita saber com varien les propietats de pressió, velocitat, temperatura del propi fluid.

El flux del fluid pot ser laminar on les partícules segueixen direccions laminars i es pot determinar solucions analítiques per resoldre el seu comportament o pot ser turbulent on no existeix una solució analítica concreta al seguir les partícules del fluid direccions desordenades. El número de Reynolds és el paràmetre que defineix en quin règim ens trobem.

Alhora d'aplicar les equacions es realitzen diferents simplificacions per poder aplicar Euler i arribar a una solució analítica. En realitat el fluid que travessa les màquines hidràuliques normalment és turbulent, no estacionari i tridimensional no complint amb la teoria de conservació de moviment i continuïtat. És per això que es consideren simplificacions de

forma analítica alhora de dissenyar el rodet i estudiar el comportament de la màquina, l'inconvenient principal és que es requereix de proves experimentals per poder arribar al punt òptim de funcionament.

SIMPLIFICACIONS:

Per una partícula de fluid que es defineix com la massa elemental de fluid, es defineixen les següents propietats quan es troba en un instant determinat a l'espai:

- Equació de continuïtat (conservació de la massa).
- Equació de l'energia (conservació de l'energia).
- Equació de la quantitat de moviment (conservació de la quantitat de moviment).

Aquestes hipòtesis es basen en interpretar que el rodet té un nombre infinit d'àleps i aquests tenen un espessor infinitesimal, d'aquesta manera es dedueix que el fluid es impulsat per l'àlep que té en contacte i segueix la trajectòria sense turbulències.

A continuació es presenta de manera resumida quin és el principi de cada hipòtesi:

Equació de la continuïtat:

Quan parlem de flux estacionari, ens referim a una quantitat de massa dins d'un determinat volum que no varia en funció del temps. Com a conseqüència, la massa que entra dins el volum per unitat de temps, ha de coincidir sempre amb la massa que surt.

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m} \quad (\text{Eq 36})$$

On: \dot{m} : Cabal màssic (kg).

Sabem que $\dot{m} = \rho \cdot Q$. Per tant l'equació anterior queda de la següent forma:

$$\rho_1 \cdot Q_1 = \rho_2 \cdot Q_2 = \rho \cdot Q \quad (\text{Eq 37})$$

On: ρ : densitat (kg/m³)

Q: Cabal volumètric (m³)

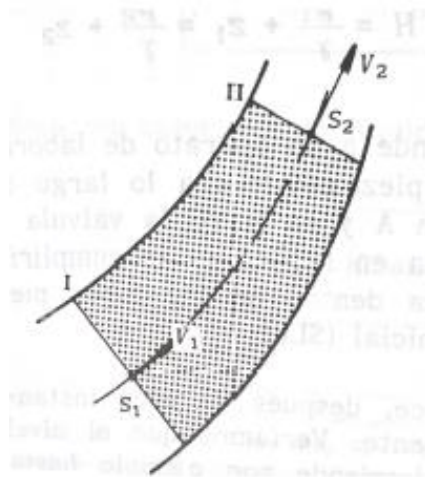


Figura 55. Conservació de la massa

Tenint en compte que el cabal es defineix de la següent forma en líquids (ja que la densitat es manté constant):

$$Q = V_1 \cdot S_1 = V_2 \cdot S_2 \quad (\text{Eq 38})$$

On: V: velocitat (m/s)

S1: Àrea (m²).

Sabem que les velocitats mitjanes d'un flux líquid són inversament proporcionals a les respectives seccions.

Equació de l'energia:

Es suposa que el fluid es caloríficament perfecte, és a dir, el calor específic no varia en el procés. Defineix que un líquid en repòs conté la mateixa energia en qualsevol punt per unitat de massa.

$$H = \frac{p_1}{\rho g} + z_1 = \frac{p_2}{\rho g} + z_2 \quad (\text{Eq 39})$$

On: H: Alçada útil de la bomba (m.c.a).

p : Pressió (Pa)

ρ : Densitat (kg/m³)

g : Coeficient de gravetat, es considera 9,81 (m²/s)

z_1 : Alçada de la cota d'aigua (m).

El principi de conservació de l'energia exigeix que la energia disminuïda en termes de pressió per exemple ha d'estar transformada en energia cinètica i la que es perd és degut a termes de fricció. L'energia no es perd, es transforma.

Per tant l'energia que posseeix un fluid incompressible en una determinada secció transversal es pot definir com:

$$H = \frac{v^2}{2g} + \frac{p}{\rho g} + z \text{ (mca)} \quad (\text{Eq 40.})$$

On: H: Alçada útil de la bomba (m.c.a).

v : velocitat (m/s)

ρ : Densitat (kg/m³)

g : Coeficient de gravetat, es considera 9,81 (m²/s)

z_1 : Alçada de la cota d'aigua (m).

Equació de quantitat de moviment:

Quan en un volum de control la velocitat del flux varia, tant pot ser en direcció com en valor, s'origina sobre la pròpia massa un desequilibri de forces degut a l'acceleració provocada:

$$\sum \vec{F} = m \cdot \vec{a} \quad (\text{Eq 41.})$$

On: F: Força (N).

m : massa (kg).

a : acceleració (m/s²)

L'impuls creat per les forces en un durant un temps infinitesimal provocarà una variació en la quantitat de moviment.

$$\sum \vec{F} * dt = d(m * \vec{v}) = \overline{dp} \quad (\text{Eq 42.})$$

En resum la variació de la quantitat de moviment en un instant determinat serà la que tenia a l'instant (dt+t) restant-li la que tenia a l'instant t.

Resolen l'equació anterior obtenim que en règim permanent el sumatori de forces és igual:

$$\sum \vec{F} * dt = d(m * \vec{v}) = \overline{dp} \quad (\text{Eq 43.})$$

Per líquids es compleix que: $\sum \vec{F} = \dot{m} * (\vec{v}_2 - \vec{v}_1)$ $\dot{m} = \rho * Q$ $\rho_1 = \rho_2$ $Q_1 = Q_2$

Segons aquestes hipòtesis es treballa amb les equacions de conservació de la massa i del moment lineal i angular de l'energia que serviran per determinar les característiques del fluid quan interaccioni amb els elements mecànics de la màquina.

A la realitat com s'ha detallat anteriorment, es creen petites turbulències (corrents internes), provocant que no tota la massa de fluid travessi el rodet uniformement per això alhora de calcular l'altura útil es considera el nombre d'àleps i un factor de disminució del treball.

L'anàlisi del rodet es durà a terme a partir de teories unidimensionals i bidimensionals. La teoria unidimensional prediu que el fluid està perfectament guiat pels àleps del rodet, una ampliació d'aquesta teoria és la bidimensional que suposa que un flux en superfícies bidimensionals de revolució perpendiculars a l'eix en cas de les bombes centrífugues radials.

S'intentarà predir el comportament mitjançant tècniques de semblança i conservació de l'energia com treballarà la màquina.

A.3 Paràmetres de les bombes centrífugues

A.3.1 Turbomàquines intercanvi d'energia entre el rodet i el fluid

Plans de representació del rodet

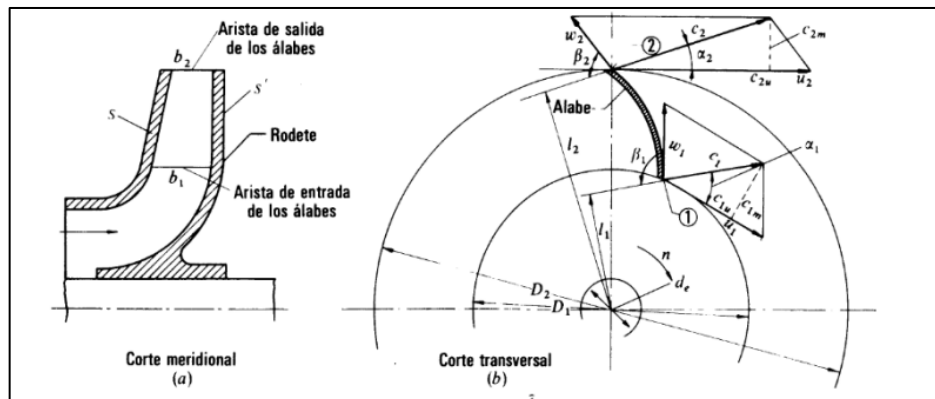


Figura 56. Plans representació rodet

D1: Diàmetre d'entrada

D2: Diàmetre de sortida

b1: Aresta de sortida dels àleps

b2: Aresta d'entrada dels àleps

Equació fonamental de les turbomàquines

Es dedueix l'equació d'Euler és vàlida per a totes les turbomàquines a partir de les següents suposicions de fluid ideal:

- El fluid que travessa els àleps del rodet està en règim estacionari
- El rodet de radi infinit i en repòs

- Disposició del rodet en cascada d'àleps.

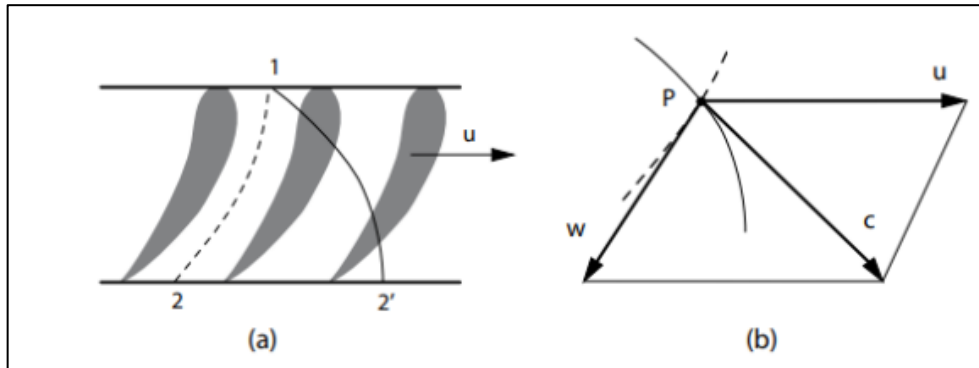


Figura 57. Disposició velocitats

- La trajectòria 1-2 representa la que seguiria una partícula amb velocitat \vec{w} quan entra dins del rodet.
- Es suposa que el rodet es mou lateralment a una velocitat \vec{u} .
- La velocitat mitja que tindrà la partícula serà \vec{c} i la seva trajectòria 1-2'.

Determinem la suma vectorial d'aquestes velocitats triangle de velocitats de la turbomàquina (que es compleix tant a l'entrada com a la sortida del rodet):

$$\vec{c} = \vec{u} + \vec{w} \quad (\text{Eq 44.})$$

- Velocitat absoluta (\vec{c}): Velocitat de la partícula fluida respecte un observador fix a terra. Tangent a la trajectòria relativa.
- Velocitat relativa (\vec{w}): Velocitat relativa de la partícula respecte un observador solidari al conducte. Tangent a la trajectòria relativa.
- Velocitat d'arrossegament (\vec{u}): Velocitat que tenen els àleps.
- Es pot determinar la velocitat d'arrossegament en un punt r com a $\vec{u} = \vec{w} \times \vec{r}$ quan la turbomàquina gira a $n[\text{rpm}]$ o a $w [\text{rad/s}]$.

- El valor absolut es coneix com a velocitat tangencial:

$$u = \frac{2\pi n}{60} r \tag{Eq 45.}$$

On: π : Número pi.

n: Número específic de revolucions a la que gira el rodet de la bomba centrífuga (rpm).

r: Radi d'entrada o sortida del rodet depenent si es vol trobar la velocitat perifèrica a l'entrada o a la sortida del rodet.

Triangles d'entrada i sortida

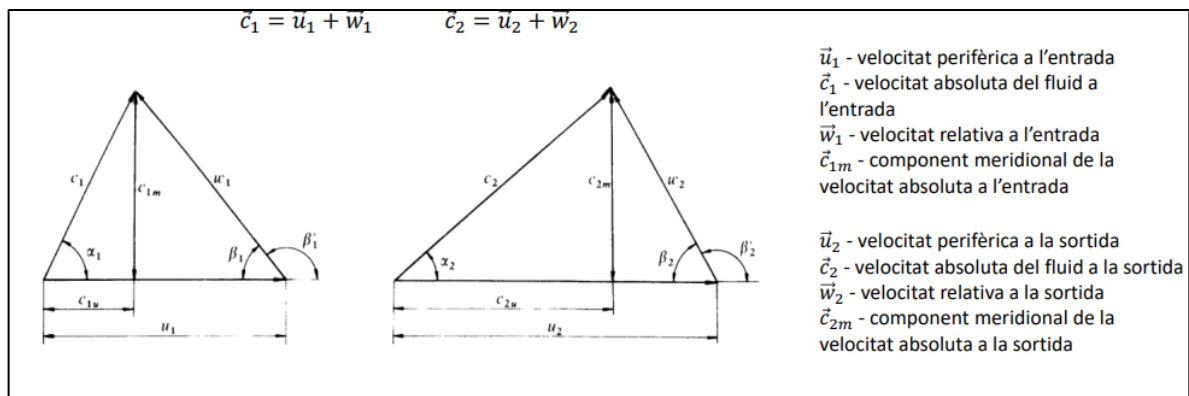


Figura 58. Triangles de velocitat a l'entrada i a la sortida del rodet

A.3.3 Fonamentació teòrica bombes centrífugues

Alçada teòrica o d'Euler entre l'entrada i sortida d'una bomba:

$$Heu = \frac{u_2 c_{2u} - u_1 c_{1u}}{g} \tag{Eq 46.}$$

On: u_2 : Velocitat perifèrica a la sortida del rodet (m/s).

g : Coeficient de gravetat es considera un valor de 9,81 ($\frac{m^2}{s}$).

c_{2u} : Component perifèrica de la velocitat absoluta del fluid a la sortida (m/s).

u_1 : Velocitat perifèrica a l'entrada del rodet (m/s).

c_{1u} : Component perifèrica de la velocitat absoluta del fluid a l'entrada (m/s).

A partir de l'equació de Bernoulli aquesta seria l'alçada teòrica però s'ha de tenir en compte les pèrdues que hi hauria a l'interior de la bomba:

$$H_{ef}[m] = H_{eu} - H_{r,int} = \frac{p_S - p_E}{\rho g} + z_S - z_E + \frac{v_S^2 - v_E^2}{2g} \quad (\text{Eq 47.})$$

On: H_{ef} : Alçada útil (m.c.a).

H_{eu} : Alçada d'euler (m.c.a).

$H_{r,int}$: Pèrdues a l'interior de la bomba (m.c.a)

v : velocitat (m/s).

ρ : Densitat (kg/m³).

g : Coeficient de gravetat, es considera 9,81 (m²/s)

z_1 : Alçada de la cota d'aigua (m).

p : Pressió (Pa).

El que incrementa la bomba d'alçada total del fluid s'igualava a l'alçada útil.

Aquestes equacions permeten conèixer a partir del cabal quina és l'alçada útil, seguidament l'alçada permetrà escollir una bomba adequada que treballi al màxim rendiment.

Les equacions tant poden ser expressades en termes d'alçada útil o energia útil, en aquest treball es treballarà només en termes d'alçada útil.

Pèrdues, potències i rendiments:

Les pèrdues en una bomba anomenades anteriorment es poden classificar en tres grups:

- Pèrdues mecàniques
 - Degudes a fregaments del premsaestopes amb l'eix.
 - Fregament de l'eix amb coixinets.
 - Accionaments addicionals: bombes de lubricació, compta-revolucions, refrigeració.
 - Fregament del rodet amb el fluid en la cara exterior del rodet

- Pèrdues hidràuliques: disminueixen l'alçada útil de la bomba
 - Pèrdues de superfície a causa del fregament de les parets de la bomba.
 - Pèrdues de forma a causa del despreniment de la capa límit degut als canvis de direcció.

- Pèrdues volumètriques: pèrdues de cabal degudes a la recirculació del fluid
 - Pèrdues exteriors: utilització de premsaestopes complexos.
 - Pèrdues interiors: utilització de tancaments laberíntics.

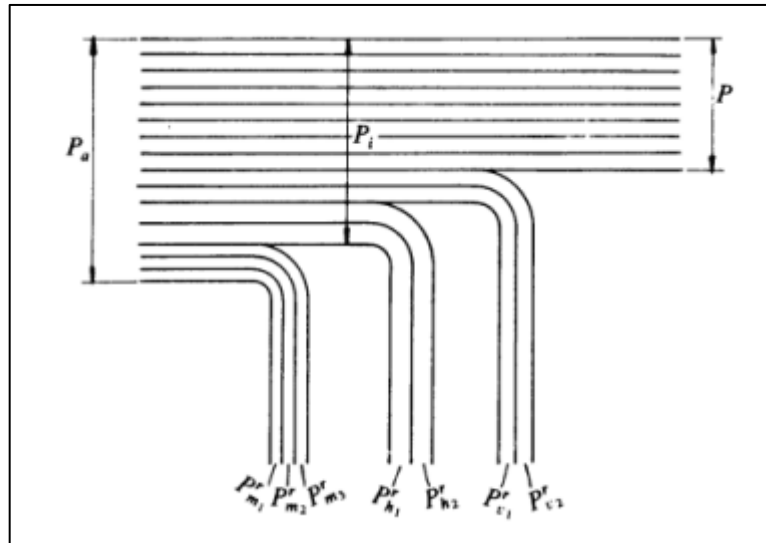


Figura 59. Esquema de pèrdues

En aquest estudi només s'utilitzaran les següents equacions:

Potència d'accionament: Potència absorbida de la xarxa per la bomba.

$$N_a = V \cdot I \cdot \cos \varphi = M \cdot \omega$$

(Eq 48.)

On: N_a : Potència d'accionament (W).

I : Intensitat (A).

φ : Factor de potència ($^\circ$).

Rendiment hidràulic:

$$\eta_H = \frac{H_{ef}}{H_{eu}} \quad (\text{Eq 49.})$$

On: η_H : Rendiment hidràulic

H_{ef} : Alçada útil (m.c.a)

H_{eu} : Alçada d'euler (m.c.a).

Rendiment volumètric:

$$\eta_V = \frac{Q_r}{Q_r + q_e + q_i} = \frac{Q_r}{Q_{ideal}} \quad (\text{Eq 50.})$$

On: Q_r : Cabal real (m³/s)

Q_{ideal} : Cabal ideal (m³/s)

η_V : Rendiment volumètric

Corbes característiques de la bomba

Equació característica de la bomba:

$$H_b = \frac{u_2^2}{g} - \frac{u_2 \cot \beta_2}{k_2 g \pi D_2 b_2} Q_r - \frac{H_p}{Q_r^2} Q_r^2 \quad (\text{Eq 51.})$$

On: H_b : Alçada que proporciona la bomba (m.c.a)

u_2 : Velocitat perifèrica a la sortida del rodet (m/s)

g : Coeficient de gravetat es considera un valor de 9,81 ($\frac{m^2}{s}$)

$\cot\beta_2$: cotangent de l'angle β_2 (°)

k_2 : Coeficient d'obstrucció que depenen de l'espai ocupat per l'espessor dels àleps a l'àrea d'entrada i sortida del rodet (Jose Agüera Soriano, IV Edición).

JOSE AGÜERA SORIANO. Mecánica de Fluidos incompresibles i turbomàquines hidráulicas. Capitulo XII. Bombas hidráulicas. 4. Curva motriz teorica H-Q. p.524-525

g : Coeficient de gravetat es considera un valor de 9,81 m^2/s

π : Número pi.

D_2 : Diàmetre de sortida (m).

b_2 : Aresta dels àleps de sortida (m).

Q_r : Cabal real (m³/s).

H_p : Pèrdues internes (m.c.a)

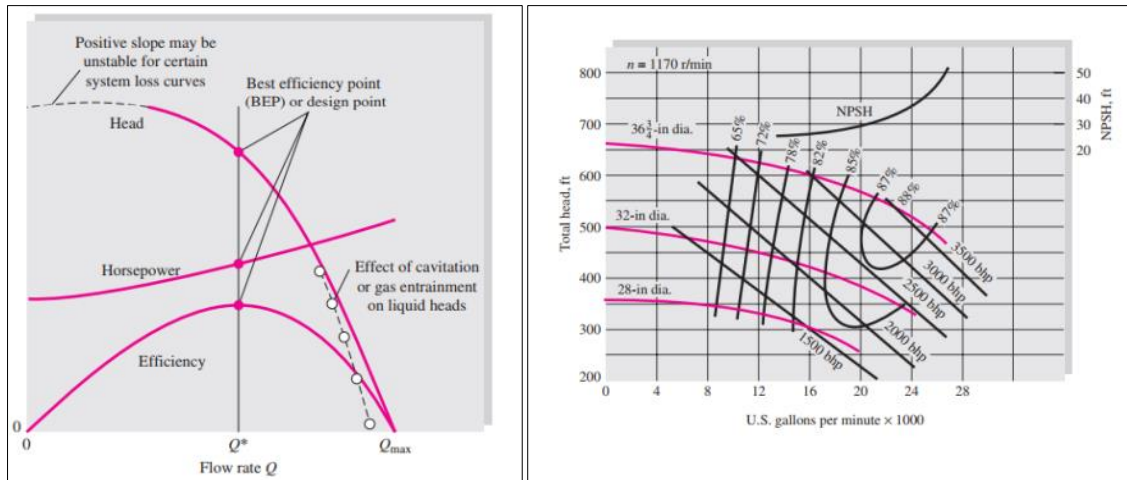


Figura 60. Corbes característiques de la bomba

Una bomba no té un únic punt de funcionament, la corba que uneix tots aquests punts es defineix com a corba característica de la bomba i està proporcionada pel fabricant.

Les corbes característiques de la bomba ens serveixen per estudiar el seu funcionament en funció del cabal, a una determinada velocitat de rotació del rodet.

Els paràmetres que caracteritzen les corbes són: La càrrega total de la bomba (H), la Potència absorbida (P) i el rendiment (η). Per a una velocitat de gir característica es poden determinar magnituds d'alçada, cabal, rendiment i potència absorbida.

La corba característica H-Q relaciona la càrrega de la bomba amb el cabal.

Segons la geometria del rodet obtindrem una corba característica ideal que ens mostrarà l'alçada teòrica en funció del cabal. Determinant les pèrdues internes de la bomba podrem obtenir la corba característica real.

Corba ideal

La corba ideal és la que prescindeix de les pèrdues internes de la bomba, on el rendiment hidràulic i volumètric són igual a u.

Desenvolupant la primera equació d'Euler obtenim l'alçada teòrica de la bomba descrita anteriorment :

$$H_{eu} = \frac{u_2 c_{2u} - u_1 c_{1u}}{g} \quad (\text{Eq 52.})$$

On: u_2 : Velocitat perifèrica a la sortida del rodet (m/s).

g : Coeficient de gravetat es considera un valor de 9,81 ($\frac{m^2}{s}$).

c_{2u} : Component perifèrica de la velocitat absoluta del fluid a la sortida (m/s).

u_1 : Velocitat perifèrica a l'entrada del rodet (m/s).

c_{1u} : Component perifèrica de la velocitat absoluta del fluid a l'entrada (m/s).

Es considera que $\alpha_1 = 90^\circ$ a l'entrada del rodet per tal que el fluid entre sense rotació. És el cas més usual tant en bombes com en turbines.

Quan $\alpha_1 = 90^\circ \rightarrow c_{1u} = 0 \rightarrow$ Per tant l'alçada teòrica serà la màxima sense considerar les pèrdues.

Per tant quedaria l'equació d'aquesta forma:

$$Heu = \frac{u_2 c_{2u}}{g} \quad (\text{Eq 53.})$$

On: Heu : Alçada d'Euler (m.c.a)

u_2 : Velocitat perifèrica a la sortida del rodet (m/s).

c_{2u} : Component perifèrica de la velocitat absoluta del fluid a la sortida (m/s).

g : Coeficient de gravetat es considera un valor de 9,81 ($\frac{m^2}{s}$).

$$c_{2u} = u_2 - w_{2u} \quad (\text{Eq 54.})$$

On: w_{2u} : Velocitat relativa a la sortida en component horitzontal (m/s).

$$w_{2u} = w_{2m} * \cotg \beta_2 \quad (\text{Eq 55.})$$

On: w_{2m} : Velocitat relativa a la sortida en component vertical (m/s).

$\cotg \beta_2$: Cotangent de l'angle β_2 (°)

$$w_{2m} = c_{2m} \quad (\text{Eq 56.})$$

On: c_{2m} : Component meridional de a velocitat absoluta a la sortida (m/s).

$$c_{2u} = u_2 - c_{2m} \cot g \beta_2 \quad (\text{Eq 57.})$$

$$H_{total\ max} = \frac{u_2}{g} (u_2 - c_{2m} \cot g \beta_2) = \frac{u_2^2}{g} - \left(\frac{u_2}{g} c_{2m} \cot g \beta_2 \right) \quad (\text{Eq 58.})$$

On: Els coeficients estan explicats a la pàgina anterior.

Cabal:

Segons la conservació de la continuïtat, es sap que el cabal que entra al rodet serà el mateix que sortirà. En qualsevol dels dos casos es troba multiplicant l'àrea de la corona per la velocitat meridional c_m :

$$Q_r = S_1 * c_{1m} = S_2 * c_{2m} \quad (\text{Eq 59.})$$

On: Q_r : Cabal real (m³/s).

S_1 : Superfície a l'entrada (m²).

c_{1m} : Component meridional de a velocitat absoluta a l'entrada (m/s).

S_2 : Superfície a la sortida (m²).

c_{2m} : Component meridional de a velocitat absoluta a la sortida (m/s).

$$Qr = k_1 * c_{1m} * A_1 = k_2 * c_{2m} * A_2 \quad (\text{Eq 60.})$$

On: k_1, k_2 : Factors de correcció es consideren 1 en l'estudi.

$$A_1 = 2\pi * r_1 * b_1 \quad (\text{Eq 61.})$$

$$A_2 = 2\pi * r_2 * b_2 \quad (\text{Eq 62.})$$

On: π : Número pi.

r: Radi del rodet (m).

b: amplada del rodet (m).

Coneixent que k_2 i k_1 anomenades anteriorment depenen de l'espessor dels àleps en l'àrea del rodet.

$$H_{total\ max} = \frac{u_2^2}{g} - \frac{Q}{k_2 * A_2} * \left(\frac{u_2}{g} \cot g \beta_2 \right) \quad (\text{Eq 63.})$$

On: Paràmetres definits en les pàgines 131-132.

Per un règim de gir concret en la corba ideal s'obté l'equació d'una recta, on l'equació anterior queda de la següent forma:

$$H = A + BQ \quad (\text{Eq 64.})$$

On: H: Alçada d'Euler (m.c.a)

Q: Cabal ideal (m^3/s)

Coefficient β_2 :

Si $\beta_2 < 90^\circ$ els àleps són corbats endarrera $\rightarrow \cotg \beta_2 < 0$ per tant la pendent de la recta de la corba serà negativa .

Si $\beta_2 = 90^\circ$ els àleps són radials $\rightarrow \cotg \beta_2 = 0$ per tant la pendent de la recta de la corba serà nul·la.

Si $\beta_2 > 90^\circ$ els àleps són corbats endavant $\rightarrow \cotg \beta_2 > 0$ per tant la pendent de la recta de la corba serà positiva.

En el nostre cas ens trobem que els àleps són corbats endarrere i per tant la pendent de la corba serà negativa.

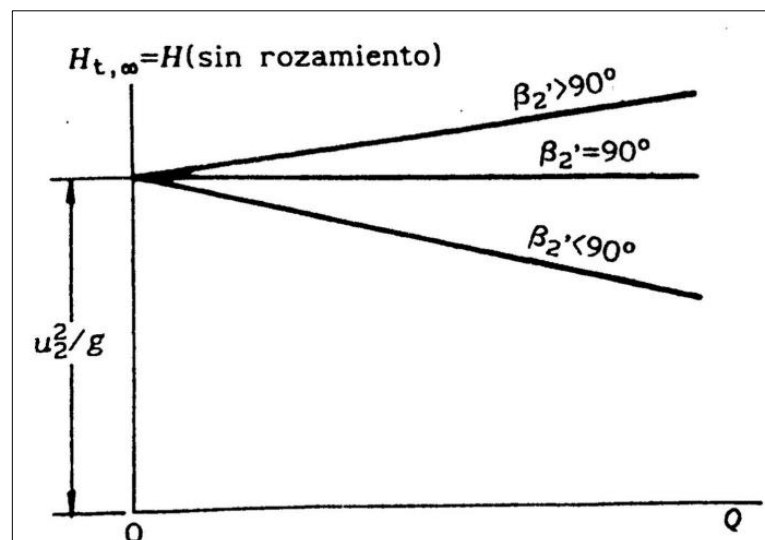


Figura 61. Variació de la pendent de la corba en funció de l'angle β_2

En general l'angle β_2 es troba comprès entre valors de 15° a 35° i els valors més habituals són d'entre 20° a 25° .

Corba característica real:

En primer lloc es suposa que es vol obtenir l'alçada (H_0) que dona la bomba suposant un nombre infinit d'àleps a una velocitat de gir determinada, quan la vàlvula està tancada. Com s'ha anomenant anteriorment la fórmula quedaria de la següent forma:

$$H_0 = \frac{u_2^2}{g} \quad (\text{Eq 65.})$$

On: H_0 : Alçada suposant nombre infinit d'àleps (m.c.a).

u_2 : Velocitat perifèrica a la sortida del rodet (m/s)

g : Coeficient de gravetat es considera un valor de $9,81 \left(\frac{m^2}{s}\right)$

Si es considera un cert nombre d'àleps la fórmula anterior seria modificada per un factor de correcció.

$$H_0 = \mu \frac{u_2^2}{g} \quad (\text{Eq 66.})$$

On: μ : Factor de correcció per un cert nombre d'àleps.

S'ha de tenir en compte que quan es vol analitzar la corba característica real, encara que es mantingui a vàlvula tancada, circularan pèrdues de càrrega volumètriques (q) dins l'impulsor.

El cabal real total serà la suma del cabal ideal més les pèrdues de càrrega anteriors: $Q_r = Q + q$ que al haver-hi un augment de la pressió a la sortida del rodet, les pèrdues augmenten considerablement degut a que H_0 es la màxima alçada que dona la bomba i perquè a la sortida del rodet està casi tota en forma de pressió, ja que el cabal Q_r és considerablement petit i la velocitat en conseqüència també. (Mataix, Claudio, Turbomàquines hidràuliques, 1975).

Mataix, Claudio. Turbomàquines hidràuliques: turbinas hidràulicas, bombas, ventiladores. Madrid: ICAI, 1975.

També es contempla un reflux tant a la zona d'aspiració com a la zona de l'impulsor ($Q_r > q$). Tenen lloc també unes pèrdues per fregament i per xocs que donen lloc a les següents fórmules:

$$H_r = K_r * Q^2 \quad (\text{Eq 67.})$$

On: K_r : constant de fregament.

H_r : Pèrdues (m.c.a).

Q : Cabal (m³/s)

$$H_c = K_c(Q - Q^*)^2 \quad (\text{Eq 68.})$$

On: K_c : constant de xocs.

H_c : Pèrdues (m.c.a).

Q : Cabal (m³/s)

En condicions de disseny es determina que $Q=Q^*$ i per tant no existeixen pèrdues per xocs, només augmenten quan ens allunyem del cabal de disseny, tant si es disminueix com si augmenta de valor. En canvi, les pèrdues per fricció són proporcionals a l'augment de cabal.

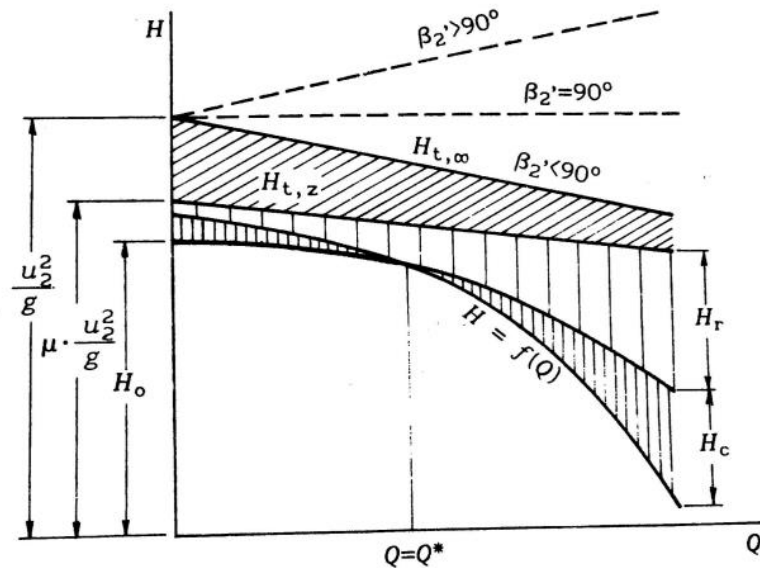


Figura 62. Evolució de la corba característica real en funció del cabal

En aquest gràfic es pot veure com varia la corba característica en funció de les pèrdues i de si es considera si és un rodet d'aleps finit o infinit.

Finalment l'equació de la bomba queda determinada de la següent forma:

$$H = A + BQ + CQ^2 \quad (\text{Eq 69.})$$

On: H: Alçada proporcionada per la bomba (m.c.a).

Q: Cabal (m³/s)

La corba característica de la bomba no és lineal com s'havia determinat anteriorment, sinó que és una funció parabòlica. En general, l'equació característica ve determinada per la corba que et proporciona el fabricant assajant la bomba en un banc de proves.

Fenòmens dins la bomba

Cavitació

És la formació i seguidament col·lapse de les cavitats de vapor dins d'un líquid. Aquest fenomen es produeix quan la pressió en algun punt per on flueix el fluid està per sota la pressió de saturació de vapor, i fa que aquestes bombolles plenes de vapor explotin i facin malbé les parets de la bomba.

El més habitual és que aquest fenomen de depressió es produeixi a l'entrada de la bomba, però també pot aparèixer fins a l'interior del rodet on el fluid comença a rebre energia i per tant seria l'últim punt on podria ocórrer.

L'últim punt de depressió es troba just a l'entrada del rodet a la part còncava dels àleps.



Figura 63. Conseqüències de la cavitació

Aquest fenomen és menys comú en bombes radials

Per tal d'evitar la cavitació es contempla el terme NPSH (Altura de succió positiva neta), es una mesura de pressió que s'experimenta per un fluid a la part on succiona la bomba centrífuga. Aquest paràmetre es fa servir per evitar el funcionament de la bomba en condicions que puguin afavorir la cavitació. En aquest projecte no es tractarà aquest terme però sí que caldria tractar-ho per exemple en projectes futurs quan els alumnes realitzin la pràctica.

A.1 Teoria de semblança

Les lleis de semblança s'utilitzen per saber com es comportarà una màquina que treballa en les mateixes condicions però té una geometria diferent.

Es pot predir el comportament quan varia el regim de gir (n) o el diàmetre del rodet (D) si es saben les dades de cabal (Q), alçada (H) i potència (P).

Les 6 lleis de semblança es poden observar en les següents equacions:

- Cabal

$$\frac{Q'}{Q''} = \frac{n'}{n''} \quad \frac{Q'}{Q''} = \left(\frac{D'}{D''}\right)^3 \quad (\text{Eq 70.})$$

- Alçada útil

$$\frac{H'}{H''} = \left(\frac{n'}{n''}\right)^2 \quad \frac{H'}{H''} = \left(\frac{D'}{D''}\right)^2 \quad (\text{Eq 71.})$$

- Potència útil

$$\frac{P'}{P''} = \left(\frac{n'}{n''}\right)^3$$

$$\frac{P'}{P''} = \left(\frac{D'}{D''}\right)^5$$

(Eq 72.)

ANNEX B: FACTORS A TENIR EN COMTE

B.1 Factors d'impressió i disseny a tenir en compte

Al primer assaig es van imprimir dos dissenys diferents, el primer disseny no es va imprimir correctament i va quedar desfasada la cara superior de la inferior tal com es pot observar en la Figura 64.



Figura 64. Desfasament en la impressió del primer disseny

Es va optar per fer l'assaig unint la part inferior del primer disseny amb el rodet imprès del segon disseny. D'aquesta manera es comptaria amb la geometria adequada dels àleps i amb l'eix del rodet.



Figura 65. Resultat de impressió del segon disseny



Figura 66. Impressió dels àleps i la base del rodet

El principal inconvenient d'aquest muntatge és que s'ha variat l'espessor de la base del rodet al haver unit les dues peces. Al tenir un espessor superior dins la voluta, el premsaestopes va fer massa pressió contra el suport de l'eix del motor i això va produir que la goma s'enganchés i es trenqués tal i com s'observa a les Figures 67 i 68.

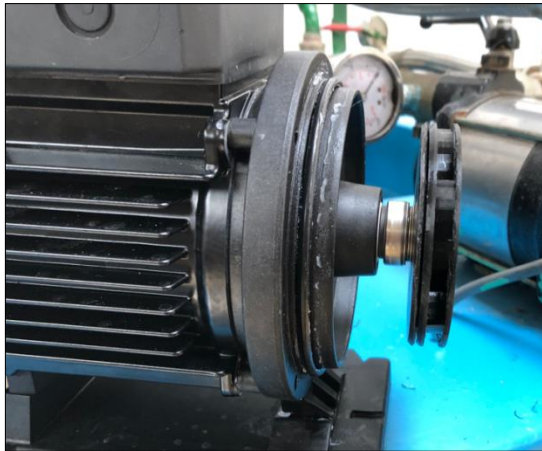


Figura 67. Situació del rodet a la bomba, es pot comprovar que l'espessor augmenta al haver unit dos peces que contenen ambdues la base del rodet.

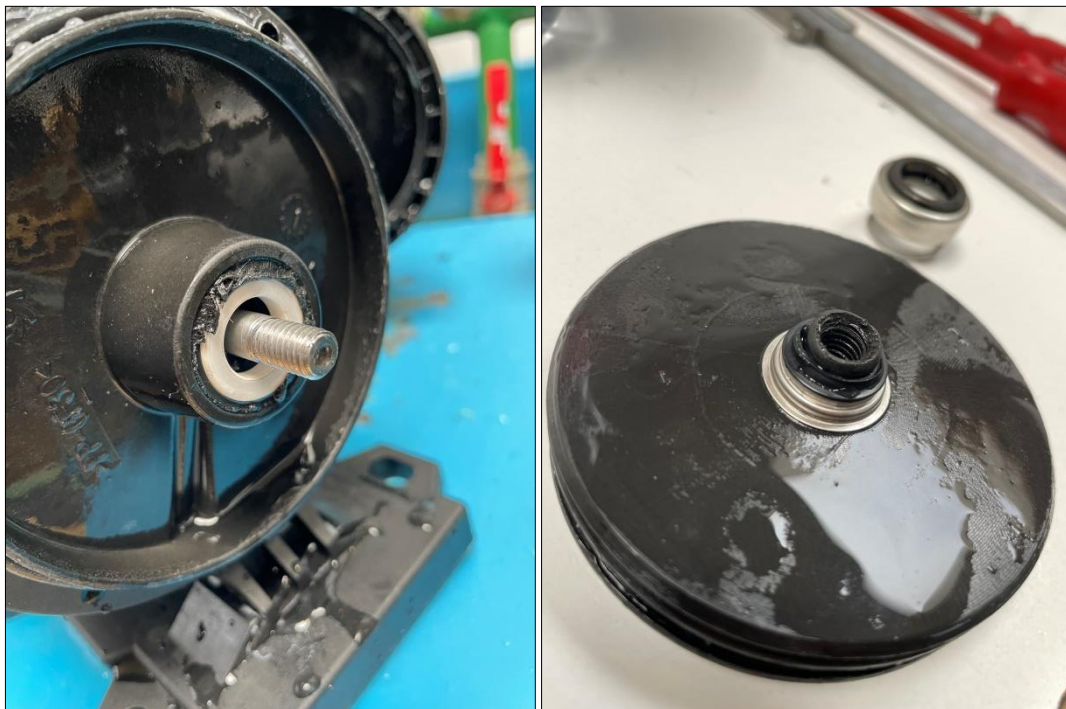


Figura 68. Trencament del premsaestopes. Part de la goma queda enganxada a la part del suport de l'eix del motor.



Figura 69. Trencament de la goma del premsaestopes

Es va comprar un altre premsaestopes per realitzar els següents assajos. Es opta per dissenyar el següent rodet respectant sobretot l'espessor de la base i les dimensions que havia de tenir dins la voluta perquè no tornés a succeir.

Al veure que el rosca de la peça de plàstic aguantava de manera significativa els esforços, es fabriquen els següents dissenys de rodet amb l'eix incorporat.

ANNEX C: PRÀCTICA PELS ALUMNES DE L'ASSIGNATURA

C.1 Pràctica: Assaig d'un rodet a PF

C.1.1 Objecte

L'objectiu d'aquesta pràctica és determinar un punt de funcionament i dissenyar un rodet que treballi en aquest punt. Seguidament seguir el procediment de construcció i muntatge per assajar-lo i obtenir les corbes característiques de la bomba.

C.1.2 Introducció

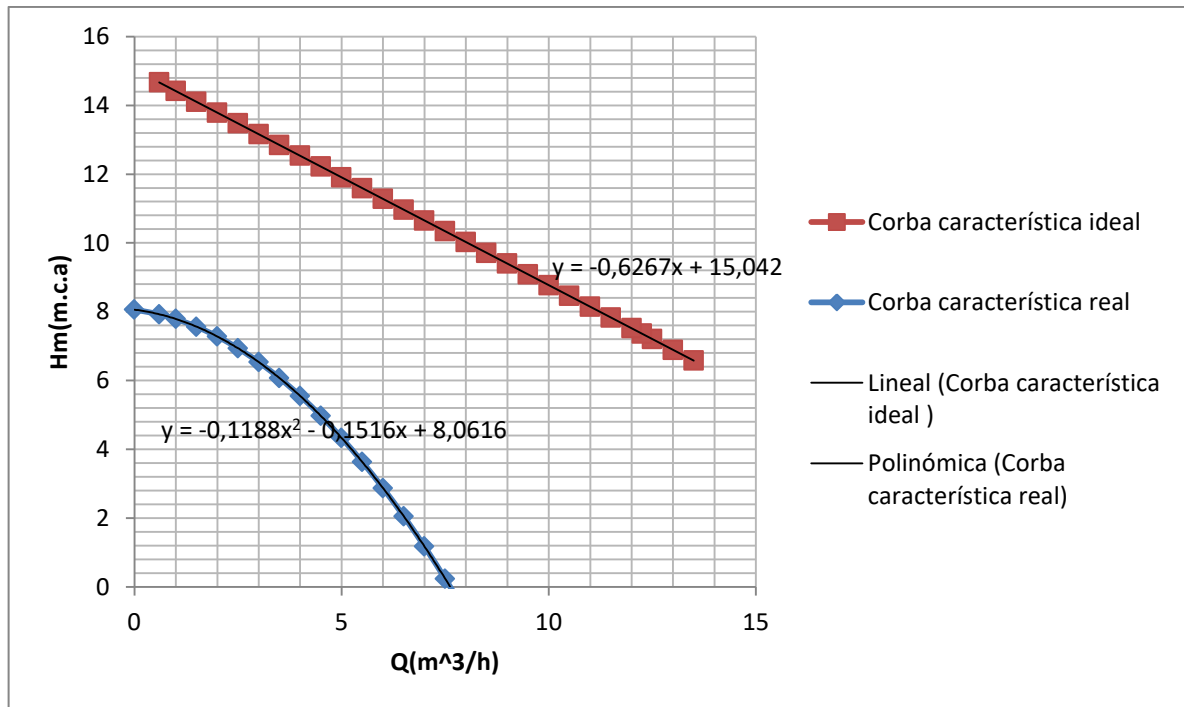
La corba de rendiment elemental d'una bomba mostra la càrrega neta H_m donada per la bomba en funció del cabal volumètric Q . A més, també inclou el potència absorbida P_a així com l'eficiència neta en funció del cabal volumètric velocitat Q . Les corbes anteriors s'obtenen a una velocitat de gir de l'impulsor constant n .

A classes de teoria s'ha vist la relació que hi ha entre les corbes característiques reals i ideals. En aquesta pràctica es presentarà la corba real i experimental d'un rodet prèviament estudiat i s'haurà de seguir una metodologia per dissenyar un nou rodet de manera teòrica i estudiar-lo.

C.1.3 Metodologia

C.1.3.1 Determinar punt de funcionament i característiques del nou rodet

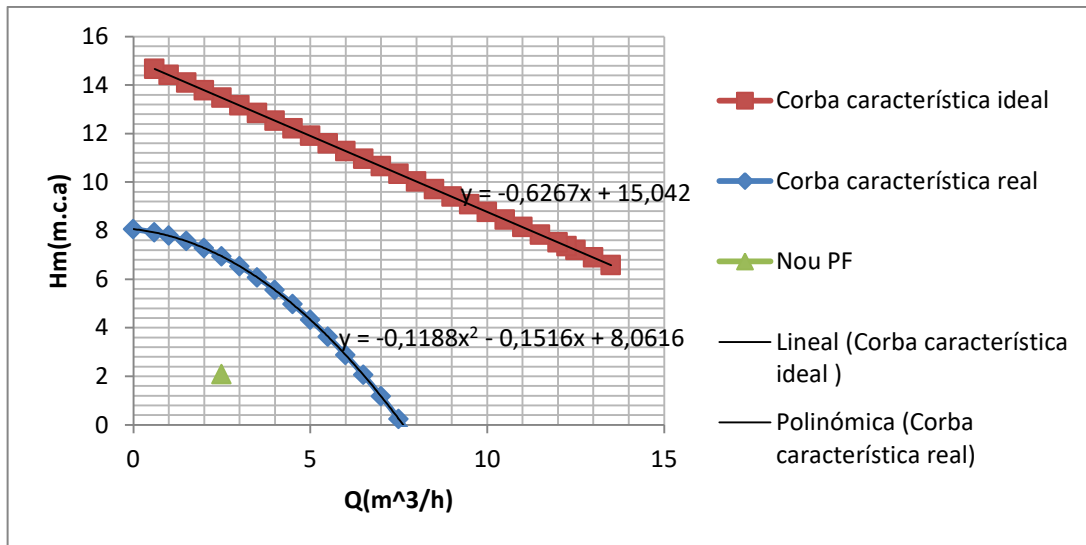
Es proporciona la corba característica teòrica i experimental de la bomba amb el rodet inicial:



Gràfic 24. Corba característica ideal i real de la BOMBA ESPA NOX 20 4M

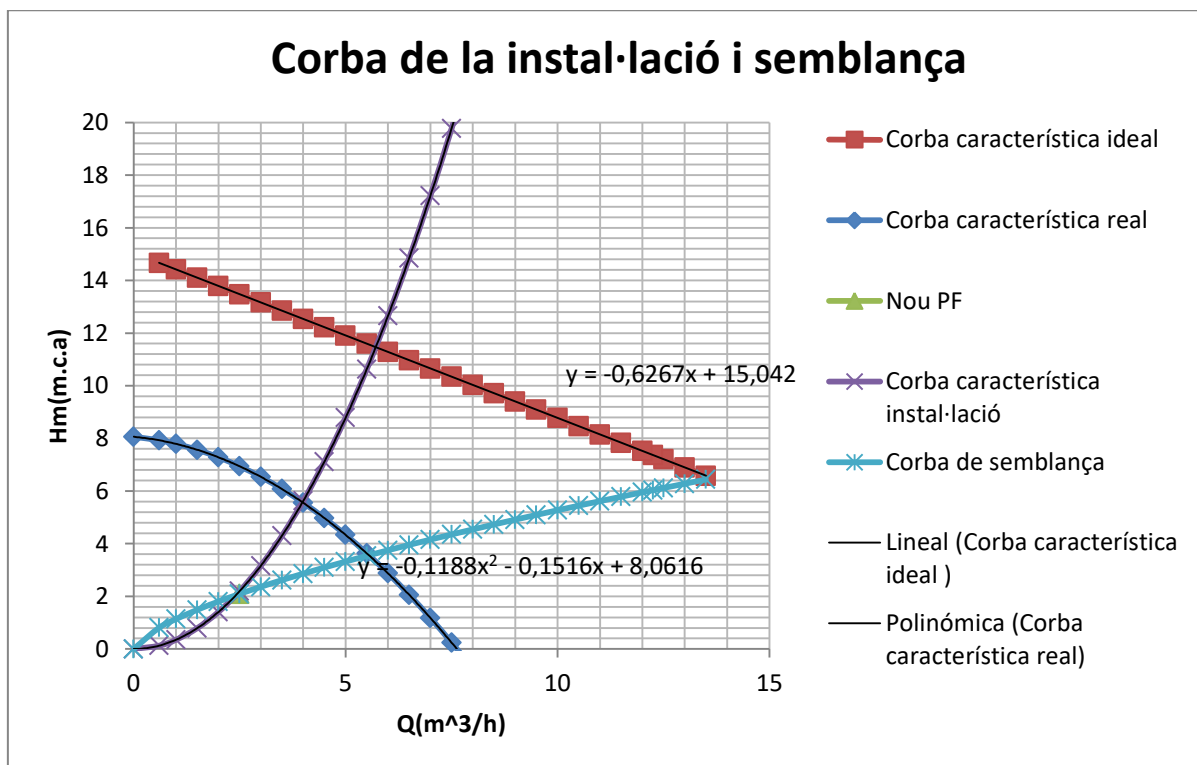
Es determina un nou Punt de Funcionament que estigui per sota de la corba característica real, per exemple:

$$PF: Q = 2,5 \left(\frac{m^3}{h} \right) \text{ ó } 0,000694 \left(\frac{m^3}{s} \right) \quad H = 2,091 \text{ m.c.a}$$



Gràfic 25. Determinació del nou PF

Es grafiquen la corba característica de la instal·lació i la corba de semblança que passen per aquest punt:



Gràfic 26. Corba de semblança i de la instal·lació de la bomba

Recordem les equacions:

Equació de semblança

$$H = k * Q^{\frac{2}{3}} \quad (\text{Eq 73.})$$

On: k: Factor constant

Q: cabal real (m³/s)

Equació de la instal·lació (La corba passa pel punt 0,0)

$$H = A + BQ^2 \quad (\text{Eq 74.})$$

On: A i B: Factors constants

Q: cabal real (m³/s)

Coneixent que la diferència entre la corba real i ideal són les pèrdues que experimenta el bomba (volumètriques i hidràuliques), s'han d'aplicar a la corba ideal. Al treballar amb equacions que només s'apliquen per corbes lineals no es pot treballar directament amb la corba experimental polinòmica.

- El rendiment hidràulic és la relació entre l'alçada real i ideal. Es calcula tal i com s'observa a l'equació 75. En bombes el rendiment hidràulic relaciona entre l'entrada i la sortida de la bomba quin és el salt d'energia que pateix el fluid.

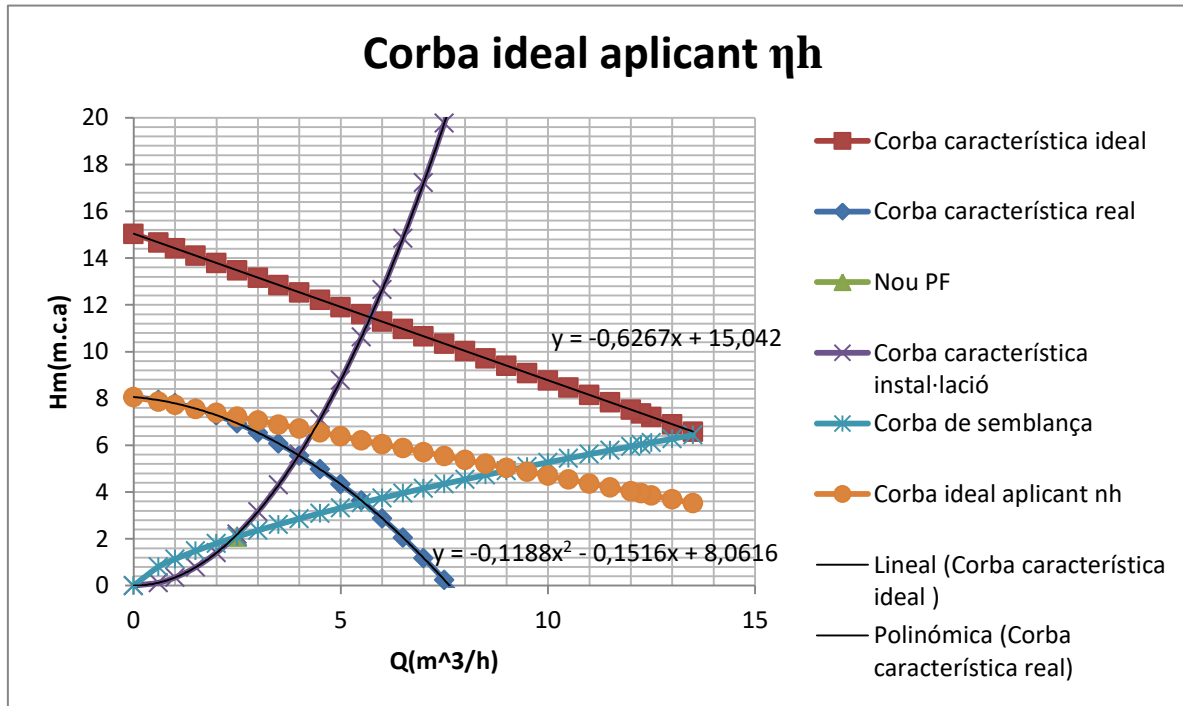
$$\eta_h = \frac{H_{ef}}{H_{eu}} \quad (\text{Eq 75.})$$

On: η_h : rendiment hidràulic

H_{ef} : Alçada real

H_{eu} : Alçada teòrica d'Euler

Es calcula el rendiment hidràulic pel primer punt de les dues equacions com si el cabal fos 0.



Gràfic 27. Corba ideal afectada per les pèrdues hidràuliques

- El rendiment volumètric relaciona el cabal real amb el cabal ideal tal i com es pot veure a l'equació 76.

$$\eta_v = \frac{Q_r}{Q_r + q_e + q_i} = \frac{Q_r}{Q_{ideal}} \quad (\text{Eq 76.})$$

On: Q_r : Cabal real

Q_{ideal} : Cabal ideal

η_v : Rendiment volumètric

El rendiment volumètric es troba per l'alçada que determina la corba de semblança, on talla amb la corba real experimental. I es relaciona amb el punt de la corba ideal afectada pel rendiment hidràulic.

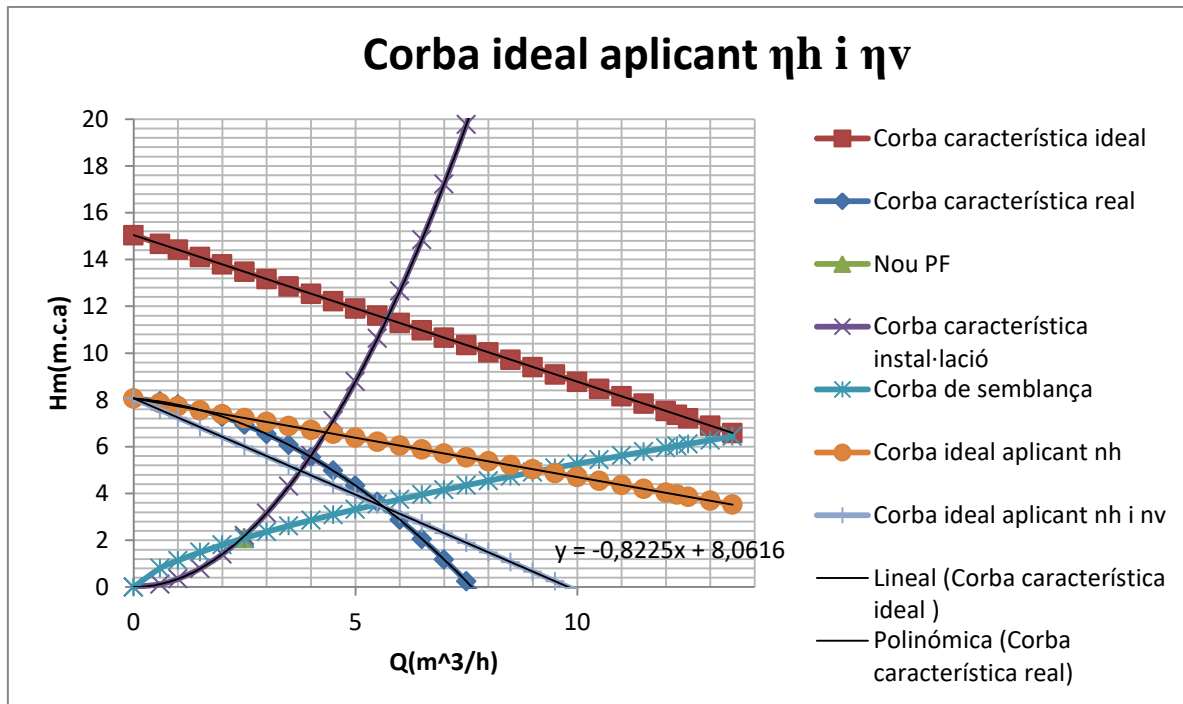
$Q \left(\frac{m^3}{h} \right)$	$H \text{ (m. c. a)}$
5,5	3,5379
13,4673	3,5379

Taula 8. Punts relacionats per obtenir rendiment hidràulic

$$\eta_v = \frac{Q_r}{Q_r + q_e + q_i} = \frac{Q_r}{Q_{ideal}} = \frac{5,5}{13,4673} = 0,408\% \quad (\text{Eq 77.})$$

S'aplica el rendiment volumètric a la recta afectada pel rendiment hidràulic segons l'equació 78:

$$H = \left(A + B * \left(\frac{Q_r}{\eta_v} \right) \right) * \eta_h \quad (\text{Eq 78.})$$



Gràfic 28. Corba ideal afectada per pèrdues hidràuliques i volumètriques

La corba característica tal i com es veu en el Gràfic 28 queda modificada segons:

$$H = A + B * Qr \rightarrow H = 8,0616 - 0,8225 Qr \quad (\text{Eq 79.})$$

Paràmetres geomètrics nou rodet

Per dissenyar el nou rodet es procedirà a modificar el paràmetre geomètric D2 per tal que treballi en el punt de funcionament escollit, recordem que els paràmetres A i B de la corba lineal d'una bomba venen definits pels paràmetres geomètrics dels àleps del rodet:

$$A = \frac{u_2^2}{g} \quad (\text{Eq 80.})$$

On: u_2 : Velocitat perifèrica a la sortida del rodet (m/s)

g : Coeficient de gravetat es considera un valor de 9,81 ($\frac{m^2}{s}$)

$$B = \frac{-u_2 \cdot \cot \beta_2}{k_2 \cdot g \cdot \pi \cdot D_2 \cdot b_2} \quad (\text{Eq 81.})$$

On: u_2 : Velocitat perifèrica a la sortida del rodet (m/s)

$\cot \beta_2$: cotangent de l'angle β_2 ($^\circ$)

k_2 : Coeficient d'obstrucció que depenen de l'espai ocupat per l'espessor dels àleps a l'àrea d'entrada i sortida del rodet (Jose Agüera Soriano, IV Edición).

JOSE AGÜERA SORIANO. Mecánica de Fluidos incompresibles i turbomàquines hidráulicas. Capitulo XII. Bombas hidráulicas. 4. Curva motriz teorica H-Q. p.524-525

g : Coeficient de gravetat es considera un valor de 9,81 m^2/s

π : Número pi.

D_2 : Diàmetre de sortida (m).

b_2 : Aresta dels àleps de sortida (m).

$$u_2 = \frac{2\pi n}{60} r \quad (\text{Eq 82.})$$

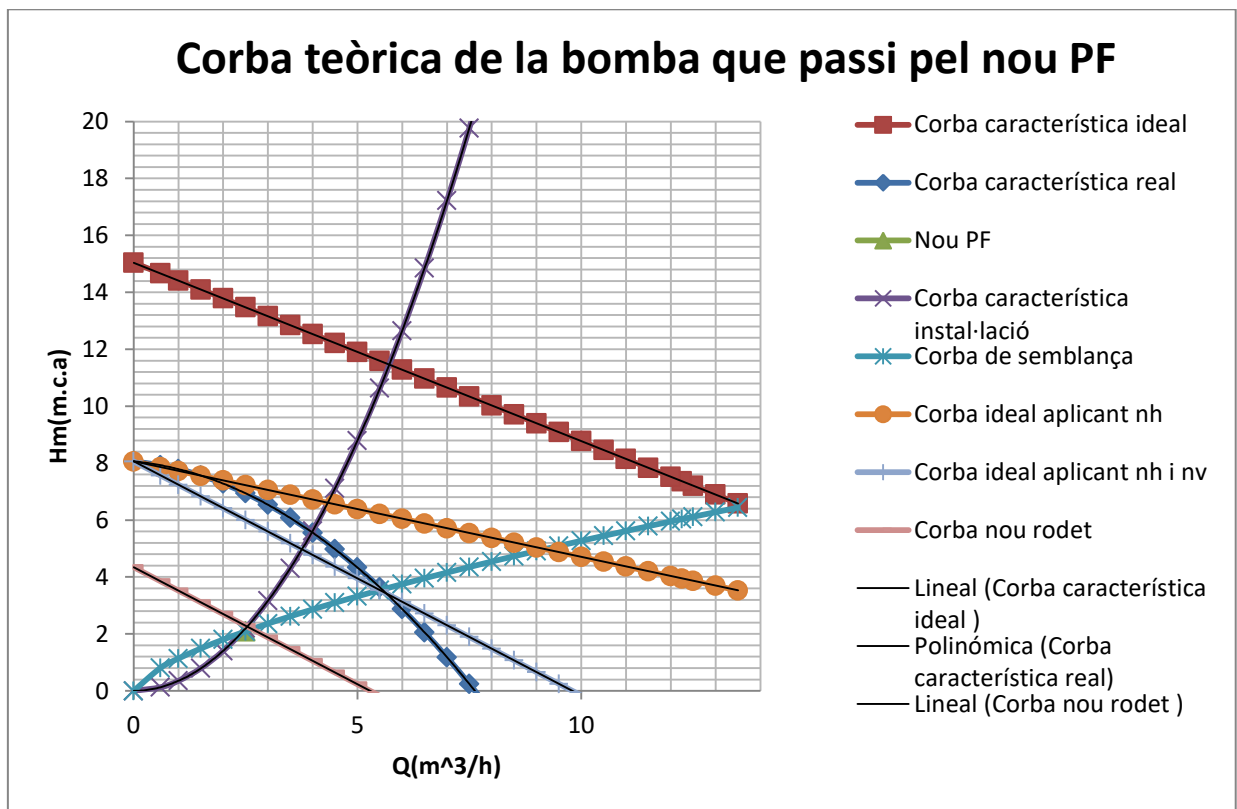
On: π : Número pi.

n : Número específic de revolucions a la que gira el rodet de la bomba centrífuga (rpm).

r: Radi d'entrada o sortida del rodet depenent si es vol trobar la velocitat perifèrica a l'entrada o a la sortida del rodet.

Substituint el paràmetre u_2 a les equacions 80 i 81, comprovem que només el paràmetre A depèn de D2.

El següent pas es muntar l'equació i descobrir quin paràmetre D2 fa que la corba passi pel punt de funcionament escollit, ha de quedar la recta representada tal i com s'observa en el Gràfic 29.



Gràfic 29. Corba teòrica del nou rodet

$$\text{Corba del nou rodet: } H = 4,3457 - 0,8225Qr$$

$$D2 \text{ (Diàmetre exterior àleps): } 0,043 \text{ m}$$

C.1.3.2 Disseny del nou rodet

- Dades de partida:

beta1	17	º
beta2	20	º
D1	0,035	m
D2	0,043	m

Taula 9. Dades de partida pel disseny del rodet

- Metodologia per dibuixar els àleps:

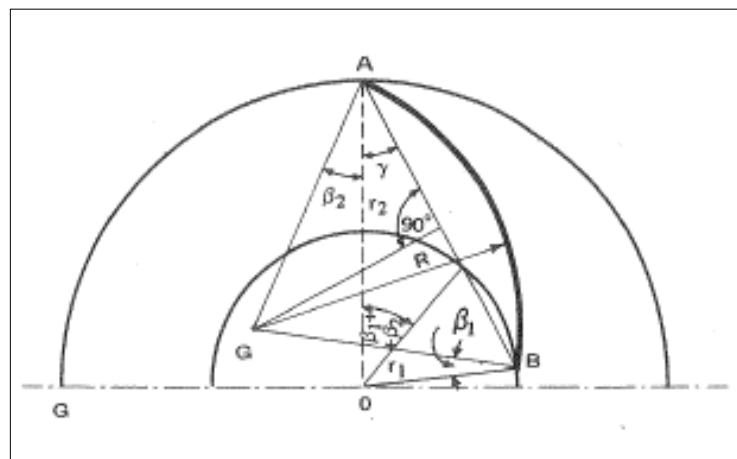


Figura 70. Metodologia de disseny de l'àlep amb un sol arc de circumferència

Coneixent les dades de l'apartat anterior s'inicia el disseny dibuixant les dues circumferències amb valors de diàmetre (D1 i D2) concèntriques.

Seguidament s'estableix que el punt superior A serà el final de l'àlep. Per determinar on comença l'arc de l'àlep des de el punt O es dibuixarà una recta que tingui un angle de valor $\beta_1 + \beta_2$ entre ella i la vertical OA (aquesta recta determinarà el radi OC).

Com es pot veure en la Figura 70, el següent pas es traçar una recta AC que ens donarà el punt B en el gràfic, aquest serà el punt inicial de l'arc de l'àlep.

A partir del radi OB es dibuixa un angle β_1 , i a partir del radi OA l'angle β_2 . La intersecció d'aquestes dues rectes serà el centre de la circumferència que determinarà l'àlep (Punt G).

S'ha de comprovar que la circumferència de centre (G), passi pels punts A i B.

- Disseny programari CAD:

Es farà el disseny al SolidWorks del nou rodet mantenint tots els paràmetres del Rodet inicial excepte el diàmetre exterior dels àleps.

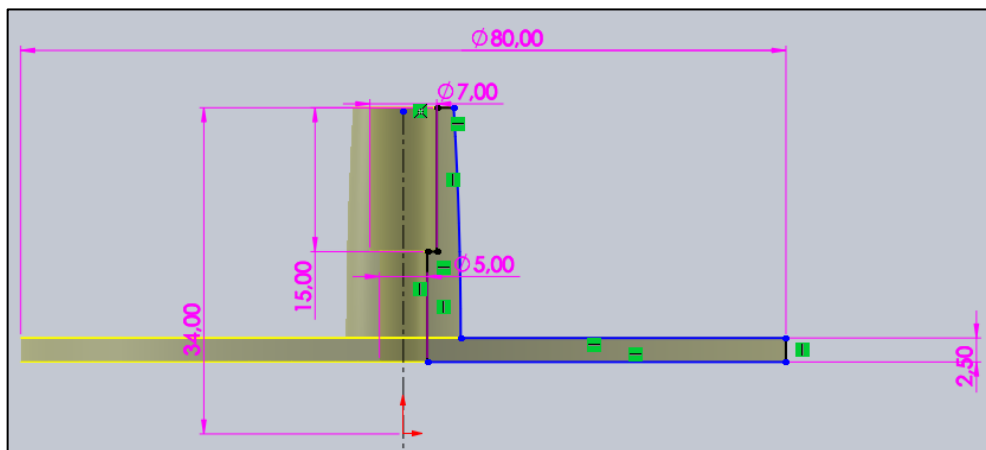


Figura 71. Disseny part inferior rodet Diàmetre exterior àleps 43 mm.

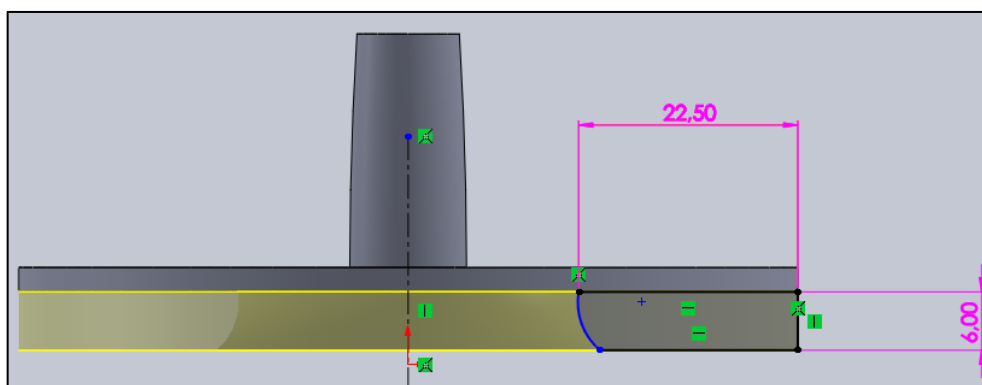


Figura 72. Disseny en secció dels àleps (Mètode 2)

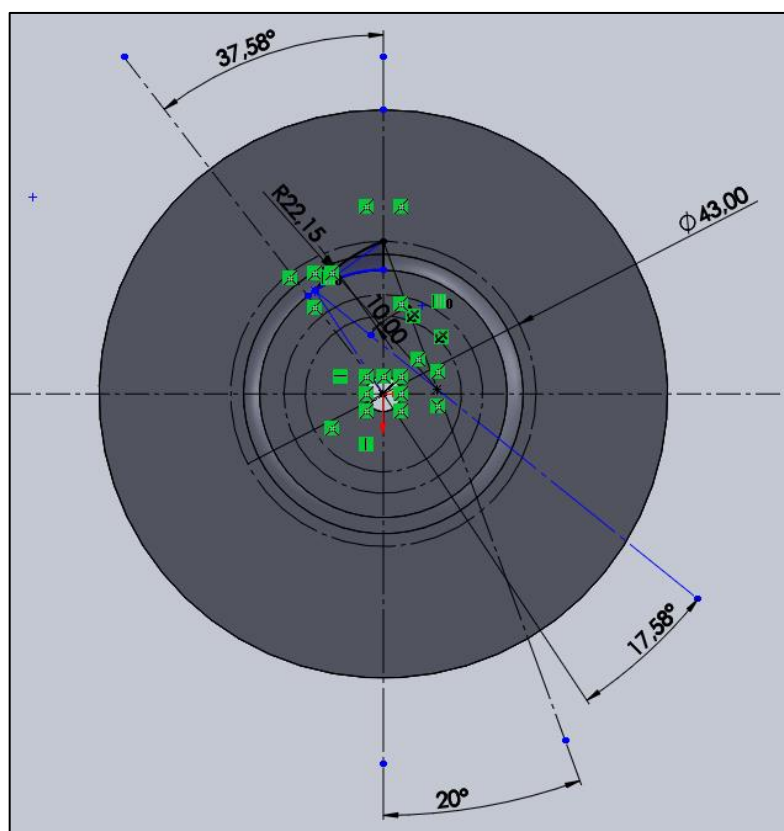


Figura 73. Disseny de l'àlep segons el diàmetre exterior de 43 mm

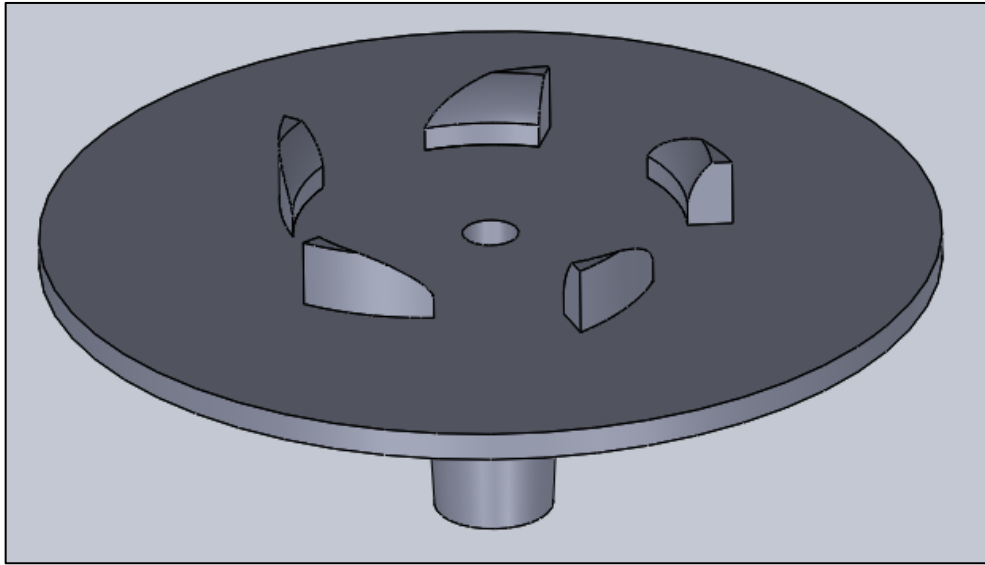


Figura 74. Disseny 3D dels àleps

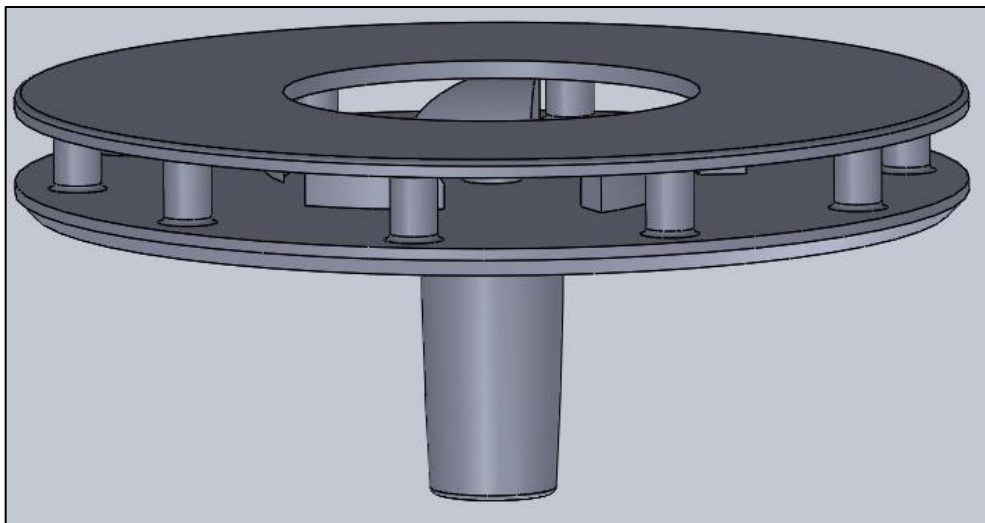


Figura 75. S'afegeix al disseny uns pilars per suportar els esforços del fluid en conseqüència que els àleps són de petites dimensions en aquest model.

C.1.3.3 Impressió

El procés d'impressió es durà a terme a les Impressores 3D que proporciona la pròpia Universitat, el procediment és el següent:

- Guardar l'arxiu SolidWorks a STL.

- Obrir el programari de la impressora BCN 3D.
- Obrir l'arxiu STL dins el programari.
- Col·locar el rodet de forma que la part superior quedi paral·lela a la superfície d'impressió amb les eines de la part esquerra.

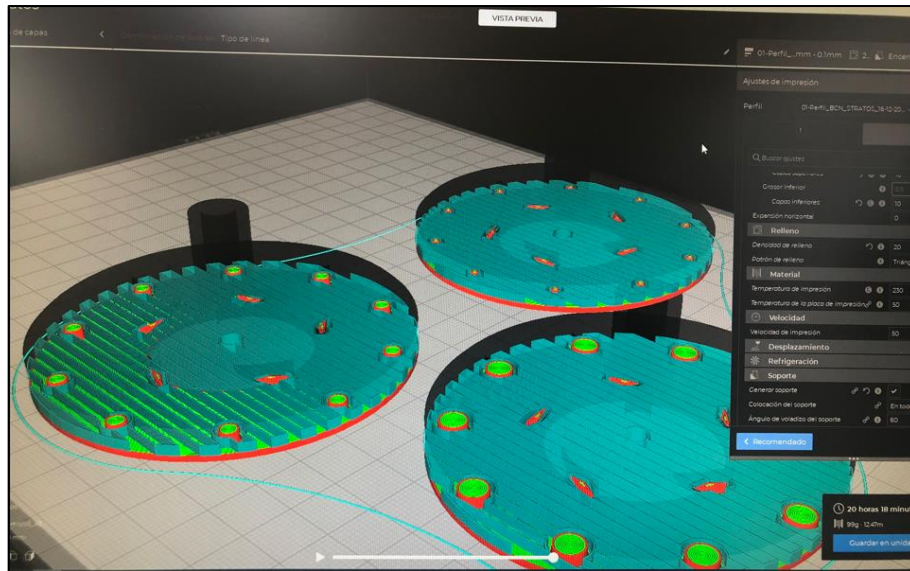


Figura 76. Procés d'impressió amb el programa BCN 3D

- En els paràmetres de la dreta (Ajustes de impressió) que es poden veure en la Figura 76 s'ha de posar:

Calidad:

Altura de capa	0,1 mm
----------------	--------

Taula 10. Paràmetre de qualitat

Perímetro:

Grosor de la pared	1,6 mm
Recuento de líneas de pared	110
Grosor superior/inferior	0,5 mm

Grosor superior	0,5 mm
Capas superiores	10
Grosor inferior	0,5
Capas inferiores	10
Expansión horizontal	0

Taula 11. Paràmetres del perímetre

Relleno

Densidad de relleno	20
Patrón de relleno	Triángulos

Taula 12. Paràmetres de l'interior de la impressió

Soporte

Colocación del soporte	En todos sitios
Ángulo de voladizo del soporte	60

Taula 13. Paràmetres del suport

- Clicar el botó Segmentación
- Guardar el projecte en la targeta SD clicant al botó (Guardar en unidad extraíble).
- Posar la targeta SD a la impressora.
- Clicar el botó imprimir de la impressora en la pantalla tàctil.
- Seleccionar el projecte.
- Confirmar la impressió.

C.1.3.4 Construcció i muntatge

Un cop imprès el rodets es procedirà a mecanitzar la part que va roscada a l'eix.

Per procedir a muntar el rodets a l'eix del motor s'ha de roscar la part interna de l'eix del rodets amb la roscadora del taller. L'eix del motor és de M8 i la longitud de la rosca és de 17 mm. El procediment és el següent:

- Amb la roscadora fer un el roscat de M8 passant.
- Seguidament per fer la part que no té rosca utilitzar una broca de 8,5 mm i col·locar-la al trepant.
- Col·locar el rodet com es veu en la Figura 77 i baixar la broca fins a 17 mm .



Figura 77. Roscatge de la part interna de l'eix del rodet

Muntar el premsaestopes al rodet i rosca-lo a l'eix del motor de la bomba tal i com s'observa en la Figura 78.

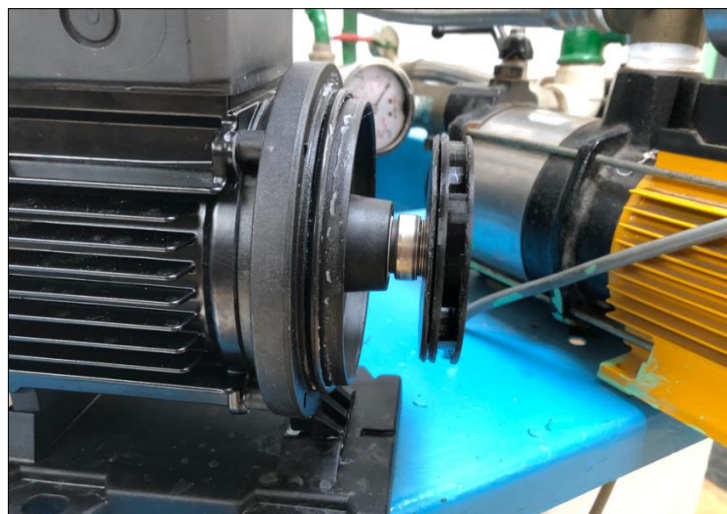


Figura 78. Representació del muntatge del rodet a la bomba

C.1.3.5 Assaig

- Fixar la velocitat de gir del rodet constant escollint el paràmetre de voltatge nominal de 230 V.
- Començar a prendre dades amb la vàlvula de descàrrega totalment oberta. Obtenir valors de pressió a la bomba d'aspiració p_S , pressió a la descàrrega de la bomba p_D , cabal Q i consum d'energia (o absorbida) P_a . Tancar gradualment la descàrrega vàlvula i repetir el mateix procediment vuit vegades.
- A partir de les dades anteriors, calculeu l'alçada neta H_m i l'eficiència neta η mitjançant l'ús de:

$$H_m = \frac{p_D - p_S}{\gamma} \quad (\text{Eq 83.})$$

On: H_m : Alçada que proporciona la bomba (m.c.a).

p_D : Pressió de descàrrega (Pa).

p_S : Pressió de succió (Pa).

γ : Densitat multiplicat pel factor de gravetat (Pa).

$$\eta = \frac{\gamma H Q}{P_a} \quad (\text{Eq 84.})$$

On: H : Alçada que proporciona la bomba (m.c.a).

γ : Densitat multiplicat pel factor de gravetat (Pa).

Q : Cabal (m^3/s).

P_a : Potència d'accionament (W).

C.1.4 Informe

Graficar les corbes característiques experimentals de la bomba amb les dades anteriors (Q - H , Q - P_a , Q - η).

Comparar els gràfics obtinguts experimentalment amb resultats teòrics i argumenta si es compleix la fonamentació teòrica.

