



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Escuela Politécnica Superior de Linares

Trabajo Fin de Grado

**DISEÑO, FABRICACIÓN Y
CARACTERIZACIÓN DE UNA
TURBINA FRANCIS PARA USO
DOCENTE**

Alumno: Javier de la Torre Bayo

Tutor: Mario Miró Barnés

Depto.: Ingeniería mecánica y minera

Junio, 2021

ÍNDICE

1.	RESUMEN	1
2.	INTRODUCCIÓN	2
2.1.	MÁQUINAS DE FLUIDO	2
2.1.1.	Clasificación de las máquinas de fluido	2
2.2.	TURBOMÁQUINAS	3
2.2.1.	Clasificación de las turbomáquinas hidráulicas	3
2.2.2.	Aplicaciones de las turbomáquinas hidráulicas	6
2.3.	TURBINAS HIDRÁULICAS	8
2.3.1.	Turbinas de acción	8
2.3.2.	Turbinas de reacción	9
2.4.	TURBINA FRANCIS	10
2.4.1.	Descripción y ventajas	10
2.4.2.	Clasificación de las turbinas Francis	12
2.4.3.	Elementos principales de una turbina Francis	15
3.	OBJETIVOS	17
4.	MATERIALES Y MÉTODOS	18
4.1.	MAQUINAS EMPLEADAS	18
4.1.1.	Centro de mecanizado CNC Lagun 650	18
4.1.2.	Máquina de corte por agua TCI-cutting BP-C 1515	20
4.1.3.	Otras máquinas de taller	21
4.2.	VELOCIDADES DE MECANIZADO	22
5.	DISEÑO, FABRICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LA TURBINA FRANCIS.	26
5.1.	DISEÑO	26
5.1.1.	Cálculos previos	28
5.1.2.	Diseño CAD	37
5.2.	FABRICACIÓN	42
5.2.1.	Introducción	42
5.2.2.	Rodete	44
5.2.3.	Carcasa	47
5.2.4.	Polea de freno.	51
5.2.5.	Álabe distribuidor	56
5.2.6.	Elementos del distribuidor	59
5.3.	CARACTERIZACIÓN	62
5.3.1.	Resultados de la caracterización	64

6.	CONCLUSIONES	85
6.1.	MEJORAS PROPUESTAS.....	86
7.	BIBLIOGRAFÍA.....	87
8.	ANEXOS	88

SÍMBOLOS

α	Ángulo formado por velocidad absoluta y tangencial
β	Ángulo formado por velocidad relativa y tangencial
η_h	Rendimiento hidráulico
Ω	Velocidad angular
Ω_s	Velocidad específica
Ψ	Factor experimental dependiente de β_2
Θ	Ángulo en el radio de la cámara espiral logarítmica.
b	Altura del álabe
D	Diámetro
e_z	Coeficiente de ajuste
g	Aceleración de la gravedad
H_n	Altura neta
$H_{t\infty}$	Altura teórica de Euler
H_t	Altura teórica
Q	Caudal
r	Radio
s	Espesor del álabe
S	Momento estático de la línea media del álabe
t	Paso del fluido a través de los álabes
U	Velocidad tangencial
V, c	Velocidad absoluta
V_m	Velocidad meridiana
V_u	Componente tangencial de la velocidad absoluta
W	Velocidad relativa
W_u	Componente tangencial de la velocidad relativa

Y	Energía intercambiada de un fluido
z	Número de álabes

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Bombas de desplazamiento positivo. a) B de paletas deslizantes; b) B de émbolos axiales; c) B de tubo flexible; d) B de engranajes exteriores; e) B de engranaje y tornillo.....	2
Figura 2. Paso del fluido a través de los álabes del rodete.	4
Figura 3. Coordenadas de la partícula en el rodete de una turbomáquina hidráulica.	4
Figura 4. Tipos de rodete de una turbomáquina hidráulica. a) Radial. b) Axial. c) Cónica. d) Diagonal.....	5
Figura 5. Representación meridional del rodete: a) Radial. b) Axial. c) Diagonal.	6
Figura 6. Aplicación de las turbinas hidráulicas según la carga y la velocidad específica.	7
Figura 7. Clasificación de los distintos tipos de turbinas hidráulicas.	8
Figura 8. Esquema de las turbinas hidráulicas de acción (a) y de reacción (b).....	8
Figura 9. Sección transversal de una turbina Pelton.....	9
Figura 10. Sección transversal de una instalación de turbina Kaplan.	9
Figura 11. Gama de aplicación de la turbina Francis. Las zonas superior izquierda e inferior derecha son exclusivas de las turbinas Pelton y Kaplan respectivamente.	10
Figura 12. Corte en perspectiva de una turbina Francis junto con los elementos que la componen.	11
Figura 13. Instalación de tipo cerrado.....	12
Figura 14. Instalación abierta de una turbina Francis con eje horizontal.	13
Figura 15. Turbina Francis de dos flujos con tubo de aspiración doble.	13
Figura 16. Tamaño del rodete para una misma potencia con distinto salto. Baja presión (H = 56.5 m) y alta presión (H = 455 m)	14
Figura 17. Diferentes secciones de una cámara espiral.	15
Figura 18. Distribuidor Fink de una turbina de reacción. a) Cerrado. b) Abierto.....	15
Figura 19. Diferentes perfiles hidráulicos del rodete de una turbina Francis.....	16
Figura 20. Tubo de aspiración de una turbina Francis. a) Sin tubo de aspiración. b) Tubo de aspiración cilíndrico. c) Tubo de aspiración troncocónico.	16
Figura 21. Centro de mecanizado CNC ubicado en EPS de Linares.....	18
Figura 22. Máquina de corte por agua ubicada en EPS de Jaén	20
Figura 23. Sierra de cinta Optimum S275G ubicada en la EPS de Linares.	21
Figura 24. Torno ubicado en la EPS de Linares.....	21
Figura 25. Triángulos de velocidad a la entrada.....	29
Figura 26. Triángulos de velocidad a la salida.	30
Figura 27. Trazado del álabe por puntos.....	31
Figura 28. Rodete fabricado con el diseño del álabe calculado.	32
Figura 29. Álabes del distribuidor para la posición de apertura y cierre.	33
Figura 30. Diseño del alabe fabricado.	33
Figura 31. Cámara espiral logarítmica de una bomba radial.	34
Figura 32. Cámara espiral para un valor de I predeterminado.	35
Figura 33. Diseño de la espiral por puntos según los datos de la tabla 13.	36
Figura 34. Cámara espiral fabricada según el diseño calculado.....	36
Figura 35. Trazado del álabe mediante el método por puntos.....	37
Figura 36. Patrón circular para 14 álabes.....	37
Figura 37. Perfil del álabe directriz.....	38
Figura 38. Diseño del álabe directriz.	39
Figura 39. Frontal de la carcasa.....	39
Figura 40. Trasera de la carcasa.	40

Figura 41. Diseño de la cámara espiral.	40
Figura 42. Sistema del distribuidor.	41
Figura 43. Sistema de distribución acoplado a la carcasa.	41
Figura 44. Ensamblaje final de la turbina.	42
Figura 45. Pieza de partida para la fabricación del rodete.	45
Figura 46. Proceso de contorno en varias pasadas.	45
Figura 47. Proceso de agujereado para eje principal.	46
Figura 48. Proceso de mecanizado de álabes.	46
Figura 49. Rodete fabricado.	47
Figura 50. Proceso de contorneado de la carcasa.	48
Figura 51. Mecanizado lateral de entrada a la cámara espiral.	48
Figura 52. Mecanizado lateral de la entrada a la cámara espiral.	49
Figura 53. . Simulación del mecanizado de la junta tórica.	49
Figura 54. Mecanizado de la junta tórica y taladros pasantes.	50
Figura 55. Proceso de mecanizado de la cámara espiral.	50
Figura 56. Mecanizado de la cámara espiral en CNC.	51
Figura 57. Finalización del proceso de mecanizado de la carcasa.	51
Figura 58. Cilindro de aluminio de partida.	52
Figura 59. Corte por sierra del material necesario.	52
Figura 60. Corte por sierra del material necesario.	53
Figura 61. Eliminación de material hasta obtener el diámetro adecuado.	53
Figura 62. Eliminación de material hasta obtener el diámetro adecuado.	54
Figura 63. Pieza para introducir en CNC. Los poros que se aprecian son defectos encontrados en el material disponible.	54
Figura 64. Simulación del mecanizado de la parte lateral.	55
Figura 65. Mecanizado en CNC de la parte lateral.	55
Figura 66. Polea de freno obtenida tras finalizar los procesos de fabricación.	56
Figura 67. Taladrado de álabe para unión con su respectivo eje.	57
Figura 68. Proceso de contorneado del álabe en varias pasadas.	57
Figura 69. Álabe obtenido tras el proceso de fabricación.	58
Figura 70. Álabe obtenido tras el proceso de fabricación.	59
Figura 71. Interfaz gráfica de la máquina de corte por agua.	60
Figura 72. Anillo metálico del distribuidor cortado mediante chorro por agua.	60
Figura 73. Piezas del distribuidor obtenidas mediante corte por agua.	61
Figura 74. Montaje final de la turbina Francis.	62
Figura 75. Esquema de la instalación del banco de ensayos.	63
Figura 76. Banco de ensayos con la turbina Francis en funcionamiento.	63
Figura 77. 100% apertura del distribuidor.	64
Figura 78. 50% de apertura del distribuidor.	70
Figura 79. 25% de apertura del distribuidor.	76

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características del centro de mecanizado CNC.	19
Tabla 2. Características del centro de mecanizado CNC.	19
Tabla 3. Características de varios modelos de máquinas de corte por agua.	20
Tabla 4. Condiciones de mecanizado para aluminio.	22
Tabla 5. Condiciones de mecanizado para plásticos.	22
Tabla 6. Condiciones de mecanizado para aceros.	23
Tabla 7. Condiciones de mecanizado para bronce.	23
Tabla 8. Condiciones de mecanizado para taladrados.	24
Tabla 9. Condiciones de mecanizado para roscas.	25
Tabla 10. Datos de la caracterización.	26
Tabla 11. Resultados de la caracterización.	27
Tabla 12. Trazado del alabe por puntos.	31
Tabla 13. Puntos de la espiral logarítmica.	35
Tabla 14. Tiempos de mecanizado.	43
Tabla 15. Tareas de fabricación.	44
Tabla 16. Datos para una apertura del distribuidor del 100% y Q1.	65
Tabla 17. Resultados para una apertura de 100% y Q1.	65
Tabla 18. Datos para una apertura de 100% y Q2.	66
Tabla 19. Resultados para una apertura del distribuidor del 100% y Q2.	66
Tabla 20. Datos para una apertura del distribuidor del 100% y Q3.	67
Tabla 21. Resultados para una apertura del distribuidor del 100% y Q3.	67
Tabla 22. Datos para una apertura del distribuidor del 50% y Q1.	71
Tabla 23. Resultados para una apertura de 50% y Q1.	71
Tabla 24. Datos para una apertura del distribuidor del 50% y Q2.	72
Tabla 25. Resultados para una apertura del distribuidor del 50% y Q2.	72
Tabla 26. Datos para una apertura del distribuidor del 50% y Q3.	73
Tabla 27. Resultados para una apertura del distribuidor del 50% y Q3.	73
Tabla 28. Datos para una apertura del distribuidor del 25 y Q1.	77
Tabla 29. Resultados para una apertura del distribuidor del 25 y Q1.	78
Tabla 30. Datos para una apertura del distribuidor del 25% y Q2.	79
Tabla 31. Resultados para una apertura del distribuidor del 25% y Q2.	80
Tabla 32. Datos para una apertura del distribuidor del 25% y Q3.	81
Tabla 33. Resultados para una apertura del distribuidor del 25% y Q3.	82

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Curva de rendimiento.....	27
Gráfico 2. Par-Velocidad 100% apertura.....	67
Gráfico 3. Rendimiento-velocidad 100% apertura.....	68
Gráfico 4. Potencia hidráulica-velocidad 100% apertura.....	68
Gráfico 5. Potencia útil-velocidad 100% apertura	69
Gráfico 6. Caudal-velocidad 100% apertura.....	69
Gráfico 7. Par mecánico-velocidad 50% apertura.....	74
Gráfico 8. Rendimiento-velocidad 50% apertura.....	74
Gráfico 9. Potencia hidráulica-velocidad 50% apertura.....	75
Gráfico 10. Potencia útil-velocidad 50% apertura.	75
Gráfico 11. Caudal-velocidad 50% apertura.....	76
Gráfico 12. Par mecánico-velocidad 25% apertura.....	82
Gráfico 13. Rendimiento-velocidad 25% apertura.....	83
Gráfico 14. Potencia hidráulica-velocidad 25% apertura.....	83
Gráfico 15. Potencia útil-velocidad 25% apertura.	84
Gráfico 16. Caudal-velocidad 25% apertura.....	84

1. RESUMEN

Este trabajo de fin de grado trata sobre la realización de una turbina Francis, se analiza el diseño, fabricación y posteriormente la caracterización de dicha turbina para uso docente. Se aplican los conocimientos obtenidos en diversas áreas de ingeniería mecánica como mecánica de fluidos y turbomáquinas hidráulicas, diseño industrial e ingeniería de fabricación.

Inicialmente se han obtenido datos en laboratorio de una turbina Francis, se han estudiado dichos datos para obtener el rendimiento máximo y poder optimizar el diseño de la turbina, así como justificar las dimensiones de las piezas en base a los cálculos empleados. El diseño de la turbina se ha realizado utilizando el software Autodesk Inventor 2019.

Posteriormente se procede a la fabricación, analizando los métodos más adecuados para las diversas piezas que conforman el conjunto de la turbina, así como el material más óptimo y económico para cumplir su función. Para la fabricación de los componentes de la turbina se ha hecho uso de diversos softwares de CAD-CAM, tales como:

- Autodesk Inventor
- Autodesk Fusion 360
- Winunisoft
- Fagor 8055 (incorporado en el centro de mecanizado CNC del taller mecánico de la EPS de Linares)
- Lantek, versión 2019-2020, para el diseño y mecanizado de piezas para corte por agua
- HMI Smart Touch V6 de TCI Cutting, incluido en la máquina de corte por agua

Finalmente se ha ensayado la turbina con el fin de caracterizarla y obtener su óptimo rendimiento. A la misma vez se comparan los datos con los de partida y se comentan las diferencias encontradas.

2. INTRODUCCIÓN

2.1. MÁQUINAS DE FLUIDO

Son máquinas en las que el fluido se encarga de absorber o ceder la energía a la máquina. Dependiendo del tipo de máquina podemos encontrar bombas en las que la máquina cede energía mecánica al fluido o turbinas en las que la máquina absorbe energía procedente del fluido.

2.1.1. Clasificación de las máquinas de fluido

Se pueden adoptar tres criterios para clasificar las máquinas de fluidos, según el funcionamiento de la máquina, la compresibilidad del fluido y el sentido de la transmisión de energía.

Según el funcionamiento de la máquina se puede diferenciar en máquinas de desplazamiento positivo y turbomáquinas. Dentro de este grupo se incluyen las máquinas de émbolo como bombas, compresores, motores de gas, cilindros hidráulicos, etc...El funcionamiento de este tipo de máquinas es debido a la variación de presión y de volumen del fluido mediante un émbolo que se desplaza.

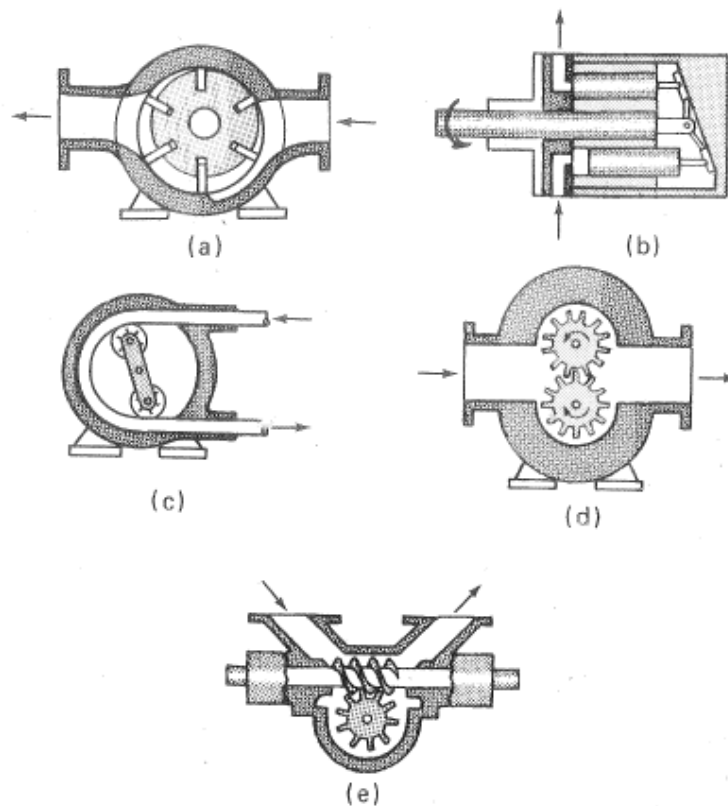


Figura 1. Bombas de desplazamiento positivo. a) B de paletas deslizantes; b) B de émbolos axiales; c) B de tubo flexible; d) B de engranajes exteriores; e) B de engranaje y tornillo.

2.2. TURBOMÁQUINAS

Una turbomáquina es aquella en la que el intercambio de energía se debe a la variación del momento cinético del fluido al pasar por un elemento móvil llamado rotor. A diferencia de las máquinas de desplazamiento positivo, el fluido se suministra de forma continua. Su funcionamiento se basa en la ecuación de Euler.

$$Y = u_1 v_{1u} - u_2 v_{2u}; \left(\frac{J}{kg} \right)$$

Las turbomáquinas se pueden clasificar en turbomáquinas térmicas y turbomáquinas hidráulicas dependiendo de la compresibilidad del fluido empleado.

Si el fluido sufre una variación en la densidad considerable, se trata de una turbomáquina térmica. En las turbomáquinas hidráulicas la variación en la densidad es inapreciable por lo que se considera como una constante. Centrándonos en las turbomáquinas hidráulicas, se pueden diferenciar turbinas hidráulicas, bombas y ventiladores.

2.2.1. Clasificación de las turbomáquinas hidráulicas

Las turbomáquinas hidráulicas se pueden clasificar dependiendo del sentido de la transmisión de la energía y la dirección del fluido a través del rotor. Dependiendo del sentido de la energía podemos clasificar en turbomáquinas motoras y generadoras. En las turbomáquinas motoras el fluido disminuye su energía al cederla al rotor y en las generadoras, es el rodete el encargado de administrar energía al fluido.

Según la dirección del fluido en el rotor, se analiza el comportamiento de éste a través del rodete. Se considera que el fluido está en reposo, entrando en el conducto en el punto 1 y saliendo por el punto 2, la trayectoria que recorre el fluido sería la línea 1-2, como se puede observar en la figura 2. Suponiendo que el rodete se mueve con velocidad u , el movimiento del fluido con relación al conducto es el mismo, por lo que la trayectoria 1-2 representará la trayectoria relativa de la partícula de fluido. Si el movimiento absoluto de la partícula se considera en relación a unos ejes fijos, la trayectoria absoluta será la 1-2'. Si denominamos c a la velocidad absoluta y w a la relativa, se puede obtener el triángulo de velocidades, siendo el vector velocidad absoluta:

$$\vec{c} = \vec{w} + \vec{u}$$

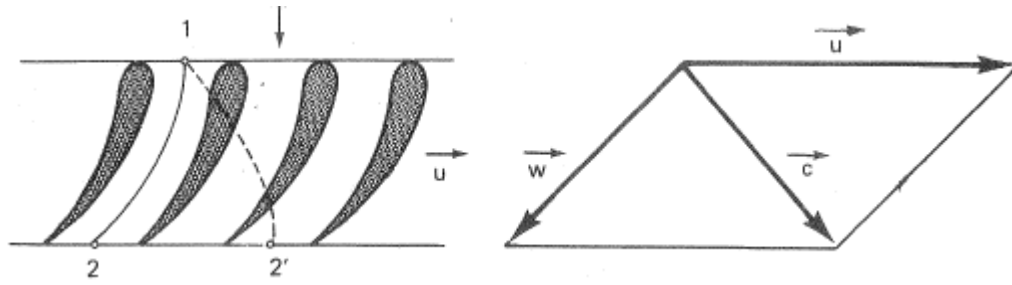


Figura 2. Paso del fluido a través de los álabes del rodete.

El movimiento del rodete es de rotación por lo que la velocidad del álabe será función de las revoluciones a las que gire el rotor. Ya que el diseño del rodete no siempre es plano, se pueden analizar las velocidades escogiendo un sistema de coordenadas cilíndricas, dependientes del radio y el eje de la turbomáquina.

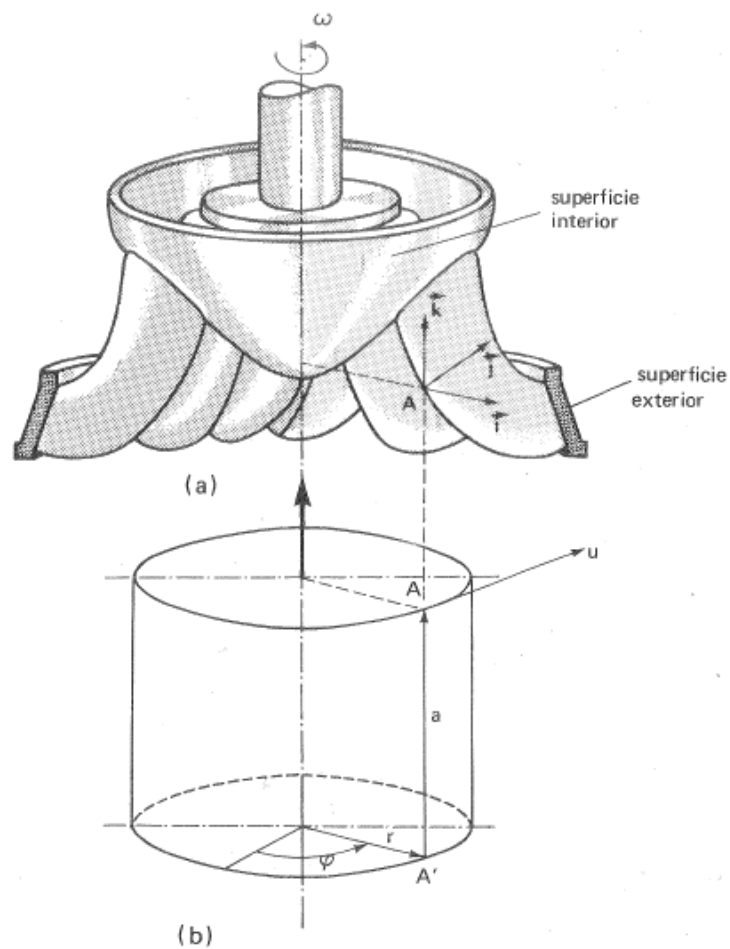


Figura 3. Coordenadas de la partícula en el rodete de una turbomáquina hidráulica.

Como se puede observar en la figura 3, la partícula de fluido constará de tres componentes según los ejes. Para la velocidad absoluta será:

$$\vec{c} = c_r \vec{i} + c_u \vec{j} + c_a \vec{k}$$

de igual forma para la velocidad relativa:

$$\vec{w} = w_r \vec{i} + w_u \vec{j} + w_a \vec{k}$$

el vector velocidad tangencial $\vec{u}$ sólo tendrá componente $\vec{j}$.

Según hemos visto, la clasificación de las turbomáquinas hidráulicas se basa en el movimiento de la partícula de fluido. Pueden ser de tipo radial, axial o diagonal.

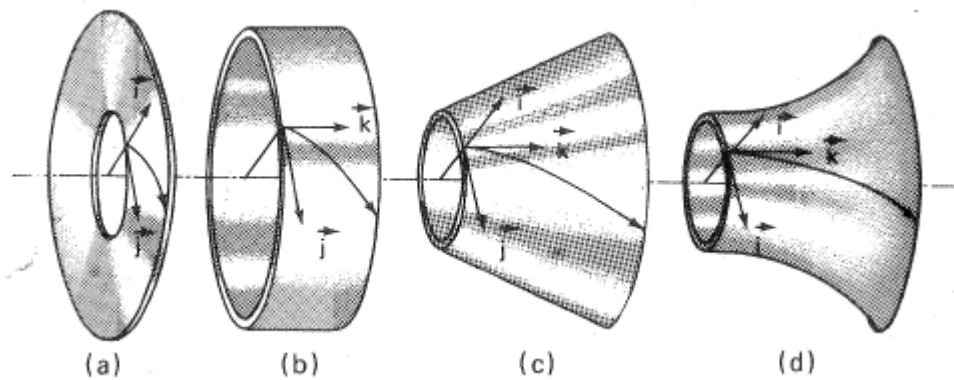


Figura 4. Tipos de rodete de una turbomáquina hidráulica. a) Radial. b) Axial. c) Cónica. d) Diagonal

En las turbomáquinas radiales la partícula recorre una trayectoria situada en un plano transversal al eje de la turbomáquina. Por lo tanto, la componente axial de las velocidades absoluta y relativa será nula. La componente meridional coincide con la componente radial.

$$\begin{aligned}\vec{c} &= c_r \vec{i} + c_u \vec{j} \\ \vec{w} &= w_r \vec{i} + w_u \vec{j} \\ c_a &= w_a = 0 \\ c_r &= c_m\end{aligned}$$

En las turbomáquinas axiales la partícula describe una trayectoria definida por un cilindro concéntrico al eje. La componente radial será nula tanto para la velocidad absoluta como para la relativa. Por lo tanto, la componente meridional será la misma que la axial.

$$\vec{c} = c_u \vec{j} + c_a \vec{k}$$

$$\vec{w} = w_u \vec{j} + w_a \vec{k}$$

$$c_r = w_r = 0$$

$$c_a = c_m$$

En las turbomáquinas diagonales la partícula recorre el rodete a través de una superficie cónica o de revolución no desarrollable.

$$\vec{c} = c_r \vec{i} + c_u \vec{j} + c_a \vec{k}$$

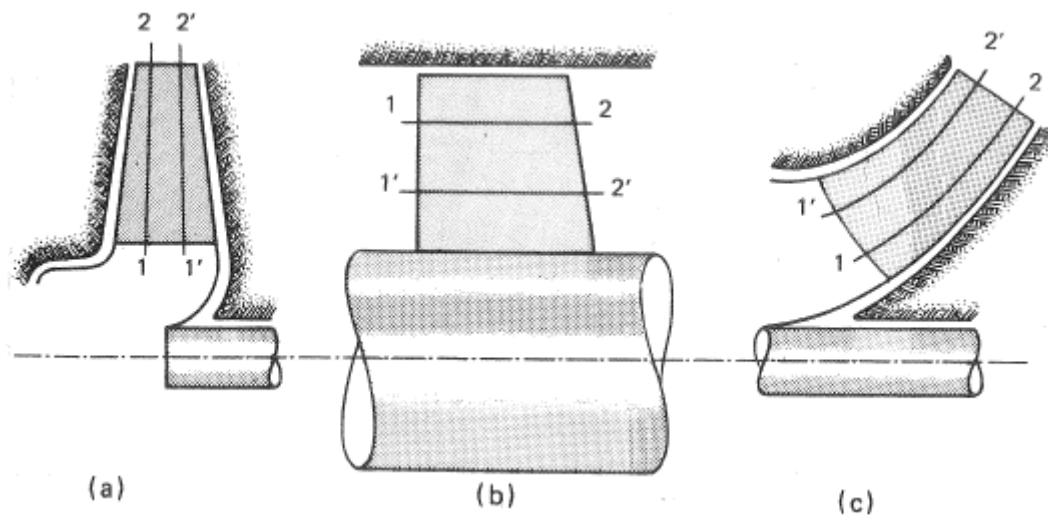


Figura 5. Representación meridional del rodete: a) Radial. b) Axial. c) Diagonal.

2.2.2. Aplicaciones de las turbomáquinas hidráulicas

2.2.2.1. Bombas hidráulicas

Las bombas hidráulicas son uno de los tipos de máquinas más utilizadas, como consecuencia, existe una gran cantidad de fabricantes de bombas a nivel mundial. El fluido más utilizado en las bombas es el agua, aunque se puede encontrar bombas que utilizan barros, líquidos corrosivos, plomo fundido, etc... Se emplean materiales muy diversos en su fabricación dependiendo de su función. Dentro del uso de las bombas podemos encontrar bombas para riego, suministro de agua sanitaria, centrales de bombeo de oleoductos, bombas de alimentación para calderas, etc... Se puede distinguir dos diferentes tipos de bombas, bombas de desplazamiento positivo y bombas rotodinámicas,

dentro de las cuáles se pueden clasificar en diferentes grupos, como las radiales, axiales y diagonales mencionadas anteriormente.

2.2.2.2. Turbinas hidráulicas

Las turbinas hidráulicas se utilizan para generar energía a partir de los saltos de agua. El uso de turbinas hidráulicas conlleva una serie de ventajas sobre la generación de otro tipo de energía ya que son una fuente de energía renovable, no generan emisiones, no necesitan combustible para su funcionamiento, alto rendimiento, posibilidad de fabricación en modelos de grandes dimensiones, etc... A pesar de que su uso lleva prolongándose por más de un siglo, se siguen investigando entre los grandes fabricantes de turbinas. Los tipos de turbinas se pueden clasificar dependiendo del salto y caudal de agua que se requiera: turbina Pelton, turbina Francis y turbina Kaplan.

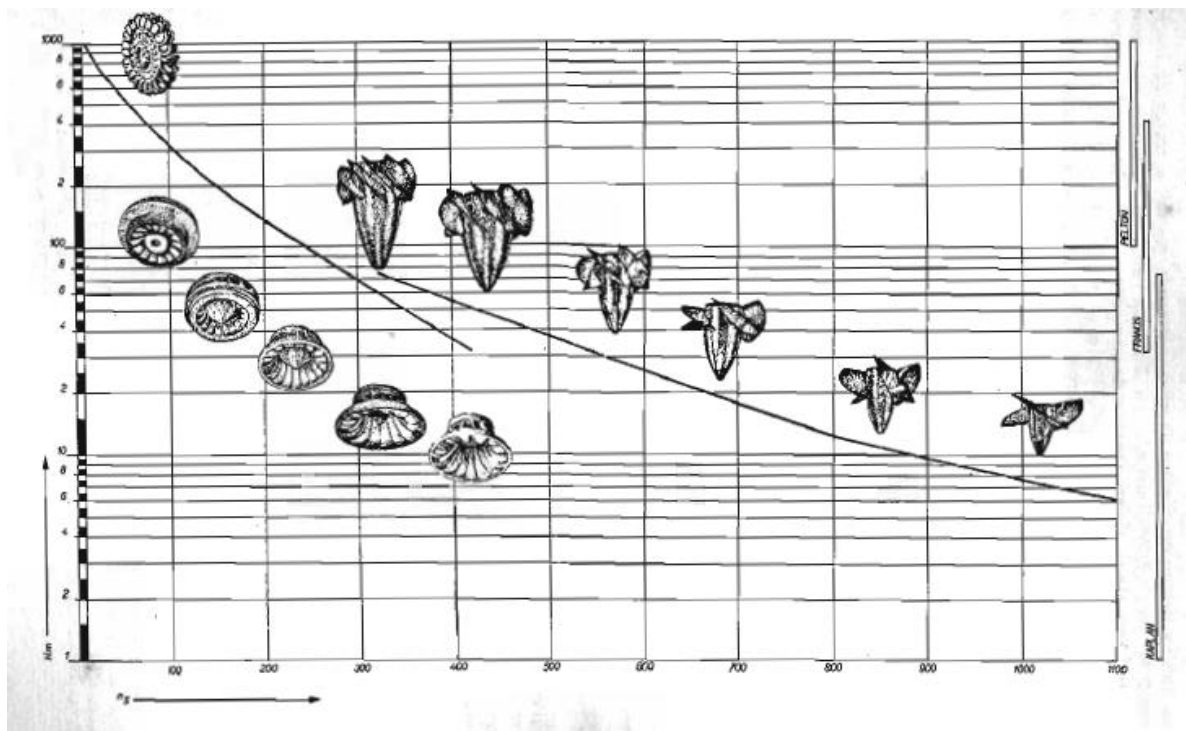


Figura 6. Aplicación de las turbinas hidráulicas según la carga y la velocidad específica.

2.3. TURBINAS HIDRÁULICAS

Las turbinas hidráulicas se pueden clasificar en dos grupos: turbinas de acción y turbinas de reacción. Esta clasificación atiende al grado de reacción de la turbina, si es igual a 0, la turbina es de acción. Si el grado de reacción es distinto de 0, se dice que la turbina es de reacción. En las turbinas de acción el rodete se encuentra a presión atmosférica, mientras que, en las turbinas de reacción, el rodete se encuentra a una presión inferior a la atmosférica.

Clases	Reaction			Impulse		
Systems	Axial (propeller)		Francis (axial-radial)	Pelton	Inclined jet	Double jet
	Kaplan (adjustable blades)	Fixed blades				
Limits of applic- ability	$H = 2-70 \text{ m}$ $D_1 = 1.0-10.0 \text{ m}$ N up to 250,000 kw	$H = 2-70 \text{ m}$ $D_1 = 0.35-9.0 \text{ m}$ N up to 150,000 kw	$H = 30-450$ (large sizes) $H = 2-200$ (small sizes) $D_1 = 0.35-7.5 \text{ m}$ N up to 500,000 kw	$H = 300-1700$ (large sizes) $H = 40-250 \text{ m}$ (small sizes) $D_1 = 0.36-5.2 \text{ m}$ N up to 110,000 kw	$H = 30-400 \text{ m}$ $N = 10-4000 \text{ kw}$	$H = 10-60 \text{ m}$ $N = 10-150 \text{ kw}$

Figura 7. Clasificación de los distintos tipos de turbinas hidráulicas.

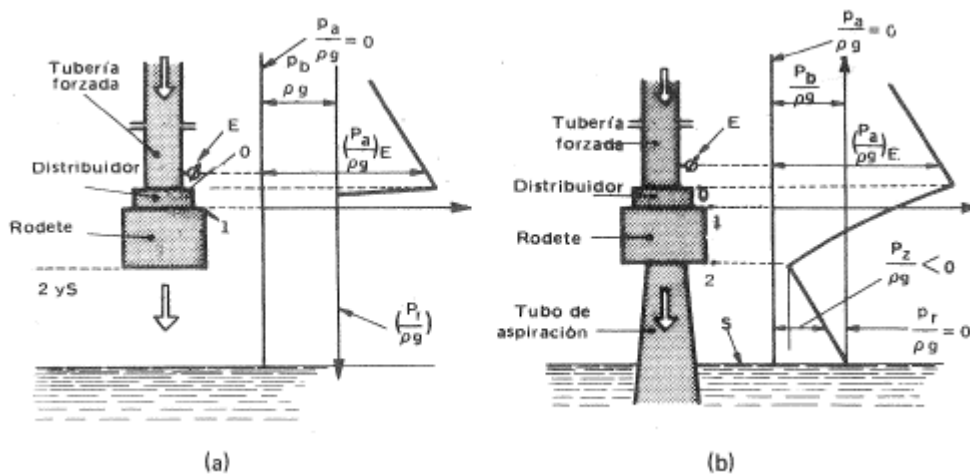


Figura 8. Esquema de las turbinas hidráulicas de acción (a) y de reacción (b)

2.3.1. Turbinas de acción

Las únicas turbinas de acción que se construyen son las de turbinas Pelton. En este tipo de turbinas se inyecta el fluido mediante una válvula de aguja, que transforma la energía de presión en energía cinética. Este cambio de energía se produce al incidir el

chorro en los álabes o cucharas del rodete. El rodete se encuentra en el interior de una cubierta con el fin de evitar salpicaduras. Finalmente, el agua sale a presión atmosférica al nivel inferior.

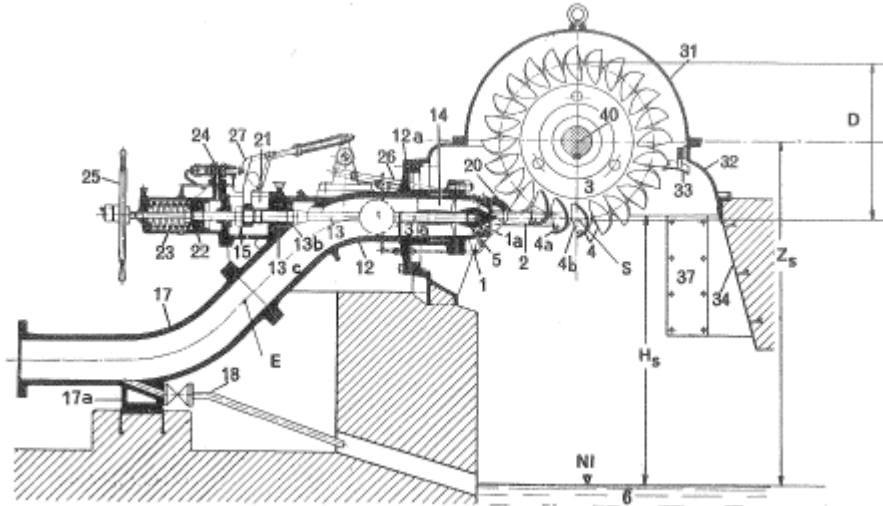


Figura 9. Sección transversal de una turbina Pelton.

2.3.2. Turbinas de reacción

En las turbinas de reacción se encuentran las turbinas Francis y Kaplan. Este tipo de turbinas conducen el fluido mediante la cámara espiral y el distribuidor, que se encarga de distribuir el agua a la entrada del rodete. El rodete de las turbinas de reacción trabaja a una presión superior a la atmosférica, transformando parte de la energía de presión en energía cinética mediante los álabes del rodete. Finalmente, el fluido sale del rodete a una presión inferior a la atmosférica por lo que se instala un tubo de aspiración para permitir el aumento de presión del fluido hasta la presión atmosférica, a la cual sale el agua al nivel inferior.

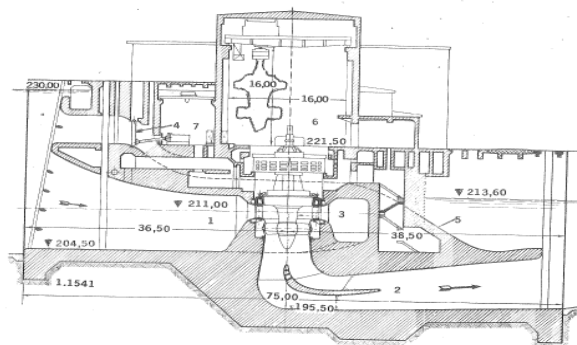


Figura 10. Sección transversal de una instalación de turbina Kaplan.

2.4. TURBINA FRANCIS

Se trata del tipo de turbina objetivo de este TFG, y tal como ya se ha dicho, son turbomáquinas hidráulicas de reacción. Este tipo de turbinas se encuentra dentro de la gama de turbinas semiaxiales o diagonales. Son el tipo de turbina más empleado ya que abarca grandes diferencias de saltos hidráulicos, caudales y potencias. El gráfico de la figura 11 representa que es la turbina hidráulica más adaptada para cada rango de aplicación altura-caudal.

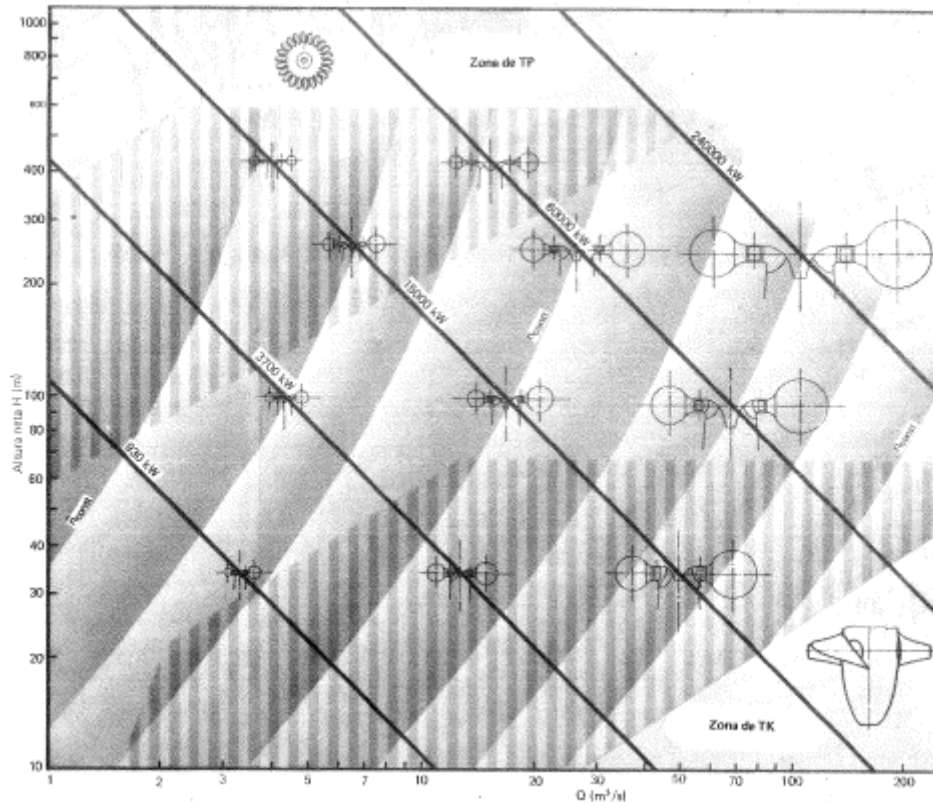


Figura 11. Gama de aplicación de la turbina Francis. Las zonas superior izquierda e inferior derecha son exclusivas de las turbinas Pelton y Kaplan respectivamente.

2.4.1. Descripción y ventajas

El elemento más importante de una turbina Francis es el rodete, se trata de hacer llegar el fluido hacia éste en condiciones óptimas y de máximo rendimiento. El resto de componentes se construyen en torno al rodete. En la figura 12 se puede observar los principales elementos que componen una turbina Francis.

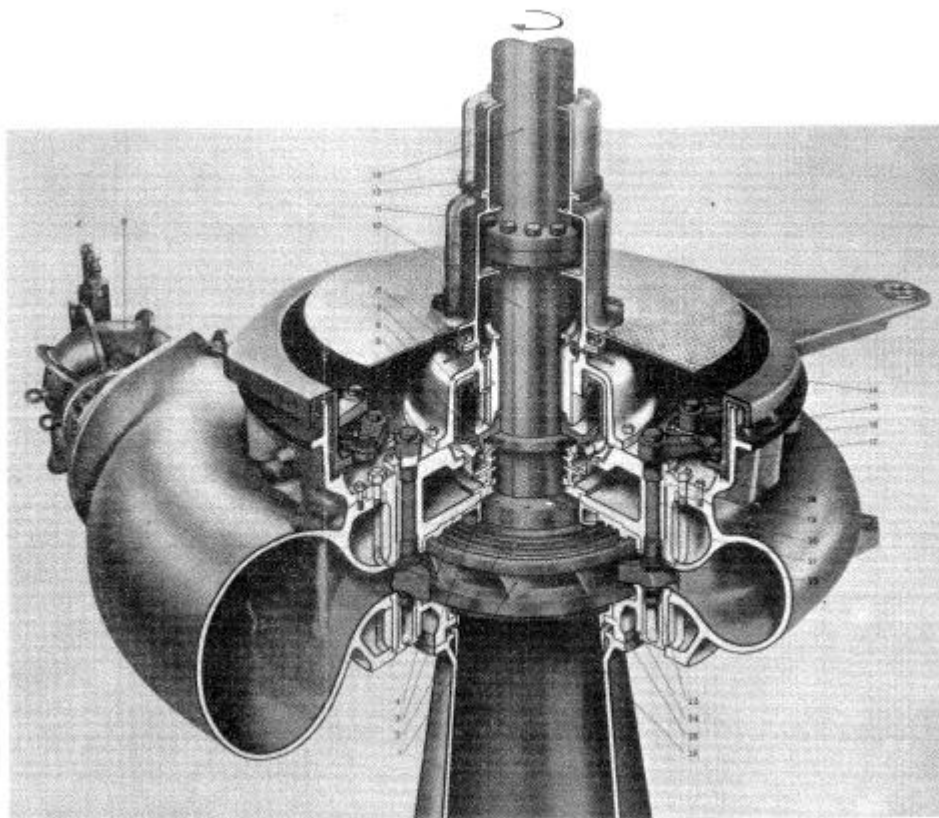


Figura 12. Corte en perspectiva de una turbina Francis junto con los elementos que la componen.

Ocupan un lugar importante en el uso de las turbinas debido a que presentan una serie de ventajas como la circulación centrípeta del fluido a través del rodete, permitiendo la cesión de la energía a la vez que conducen el fluido hacia una salida central, por lo que facilita el diseño del tubo de aspiración.

El espacio sin álabes que se encuentra entre el rodete y el distribuidor permite una entrada adecuada del fluido hacia el rodete, aún en condiciones diferentes a las de diseño. La partícula fluida intercambia energía de presión en energía cinética por la convergencia del fluido en dicho espacio sin necesidad de ser guiada.

El distribuidor se encarga de guiar el fluido para evitar pérdidas en la entrada, ya que permite reducir la sección para caudales inferiores al de diseño, a la vez que varía el ángulo de entrada al rodete.

2.4.2. Clasificación de las turbinas Francis

2.4.2.1. Clasificación según el tipo de instalación

La instalación puede ser de tipo cerrado o abierto. En las instalaciones de tipo cerrado el fluido es conducido por una tubería forzada hasta la turbina, entrando a la cámara espiral, donde pasa al distribuidor de álabes giratorios que lo conducen hacia el rodete, finalmente el fluido se dirige hacia la salida a través del tubo de aspiración.

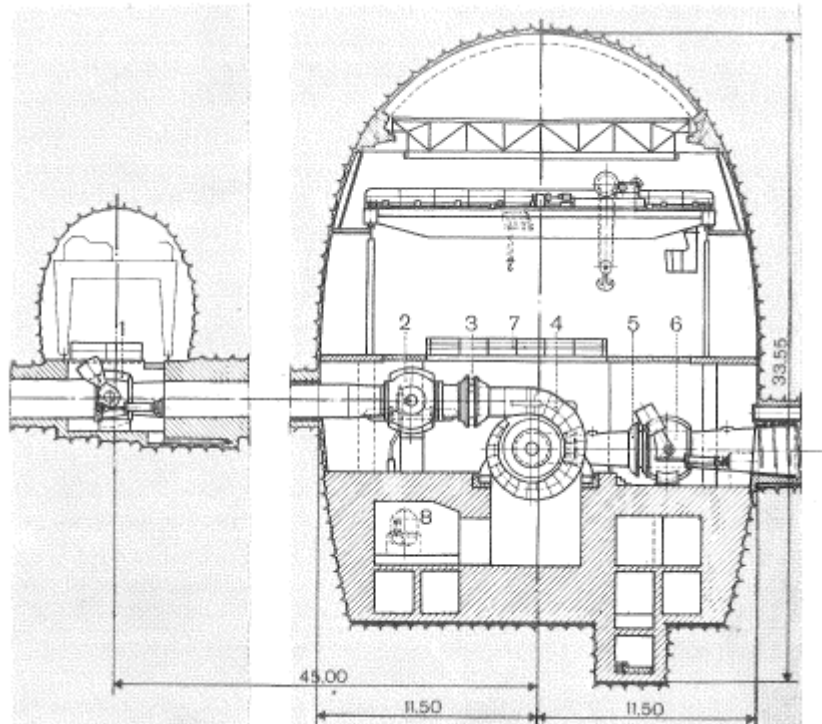


Figura 13. Instalación de tipo cerrado.

En las instalaciones de tipo abierto la turbina puede instalarse de manera que el eje sea vertical u horizontal. La cámara puede ser abierta o techada. Para saltos pequeños se pueden utilizar cámaras de tipo abierto, a mayor salto se construirá la cámara techada, se produce entonces una cámara de presión que se alimenta por un conducto forzado.

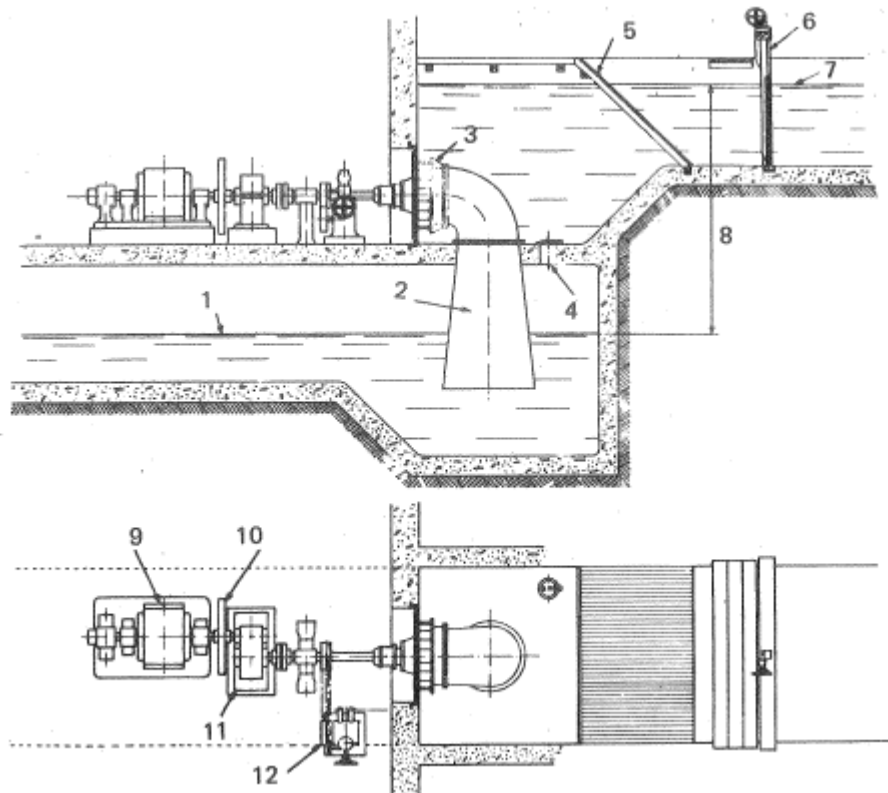


Figura 14. Instalación abierta de una turbina Francis con eje horizontal.

2.4.2.2. Clasificación según el número de flujo

Dentro de este rango podemos encontrar turbinas Francis de un solo flujo o turbinas gemelas de dos flujos. La turbina Francis de un solo flujo es la más común y es la que se ha venido estudiando. La turbina Francis de dos flujos se caracterizan por la utilización de un rodete de doble admisión y por lo tanto absorben un caudal doble. Tienen un valor de admisión $\sqrt{2}$ veces mayor que la turbina Francis de un solo flujo.

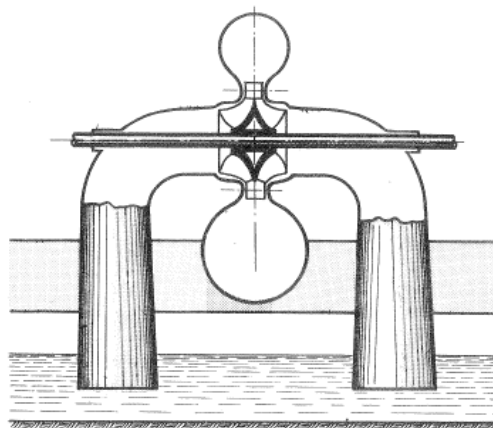


Figura 15. Turbina Francis de dos flujos con tubo de aspiración doble.

2.4.2.3. Clasificación según la disposición del eje

Las turbinas Francis se pueden instalar de forma que su eje se encuentre horizontalmente o verticalmente. Las turbinas de eje vertical permiten instalarse en un espacio más reducido, a la misma vez evitan el peligro de la cavitación ya que permite su instalación a una cota inferior con respecto al nivel de agua de salida. En las turbinas de eje vertical la cámara espiral puede instalarse de manera que quede más ajustada, evitando las vibraciones. Las turbinas de eje horizontal tienen la ventaja de que son más accesibles al rodete, aunque en general las turbinas Francis no requieren de grandes revisiones.

2.4.2.4. Clasificación según la altura del salto

Se puede diferenciar entre turbinas de alta presión y de baja presión, generalmente se establece la línea divisoria para un salto de 80 m.

Para igualdad de potencias, se deberá disminuir el caudal al aumentar la altura y también aumentará el número de revoluciones, con lo cual la turbina Francis requiere menor tamaño. En la figura 16 se puede apreciar la diferencia de tamaño para una misma potencia con distintos saltos de altura.

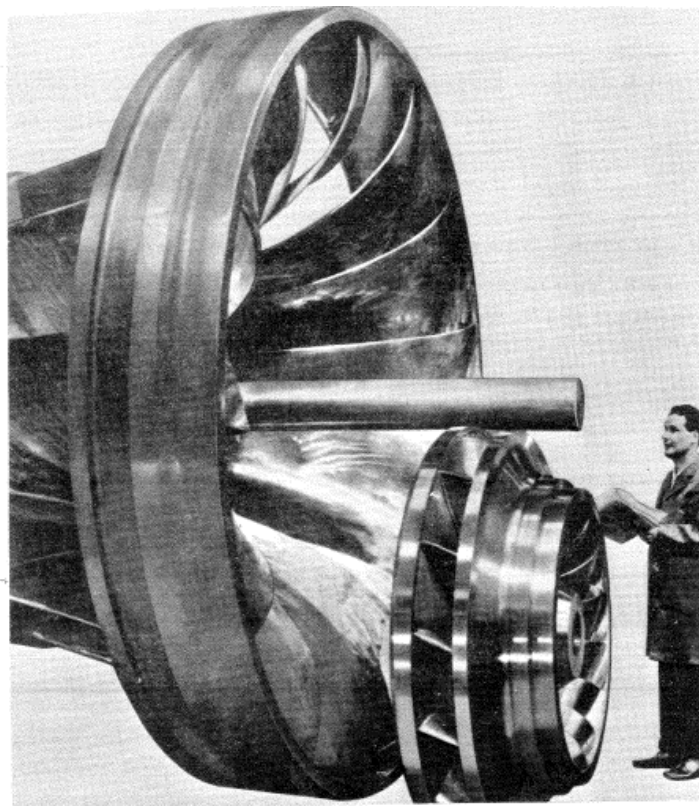


Figura 16. Tamaño del rodete para una misma potencia con distinto salto. Baja presión ($H = 56.5$ m) y alta presión ($H = 455$ m)

2.4.3. Elementos principales de una turbina Francis

Los órganos principales que componen una turbina Francis son la cámara espiral, distribuidor, rodete y tubo de aspiración.

La cámara espiral es un canal por el cuál circula el fluido de forma óptima, pueden ser abiertas, cerradas o con forma espiral. Dentro de las cámaras con forma espiral podemos encontrar diferentes secciones geométricas como las mostradas en la figura 17.

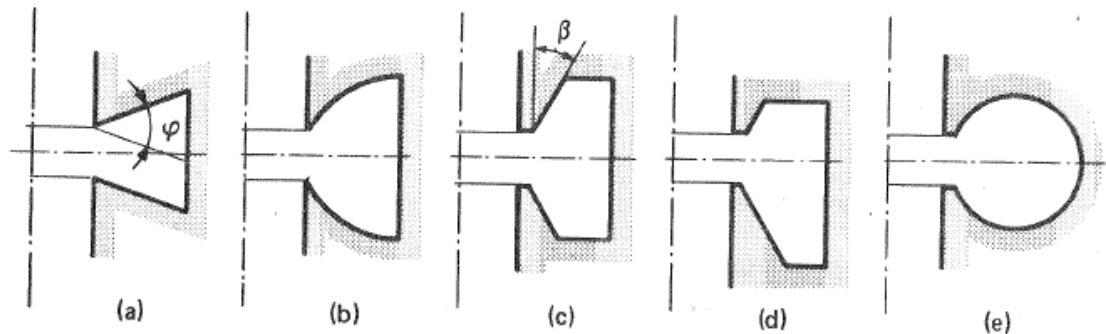


Figura 17. Diferentes secciones de una cámara espiral.

El siguiente elemento con el que se encuentra el fluido es el distribuidor, generalmente se utiliza el distribuidor Fink, tanto para turbinas Francis como Kaplan. Su función es regular el caudal para que la turbina opere en condiciones óptimas aún fuera de su caudal de diseño. Para ello el distribuidor dispone de unos álabes rotatorios que pueden estar instalados de forma cilíndrica, axial o cónica. El número de álabes del distribuidor y el perfil del álabe se ha de determinar de manera que reduzca las pérdidas a la entrada del rodete.

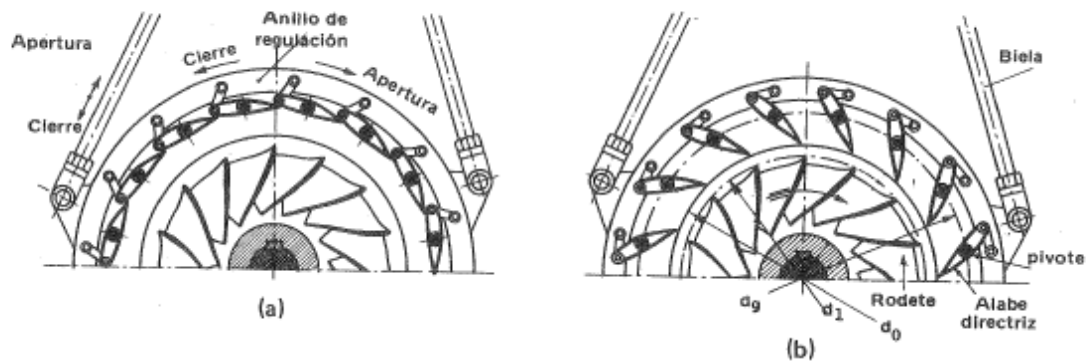


Figura 18. Distribuidor Fink de una turbina de reacción. a) Cerrado. b) Abierto.

El rodete es el principal elemento de una turbina ya que es donde se produce el cambio de energía de presión a energía mecánica. En el capítulo 5 se explicará el proceso seguido para el diseño del rodete de este TFG. Los rodetes de las turbinas Francis son generalmente semiaxiales o diagonales, pero también se puede encontrar rodetes puramente radiales. Se pueden clasificar en rodetes lentos o rápidos, dependiendo de la geometría del rodete, la cual afecta a su velocidad específica.

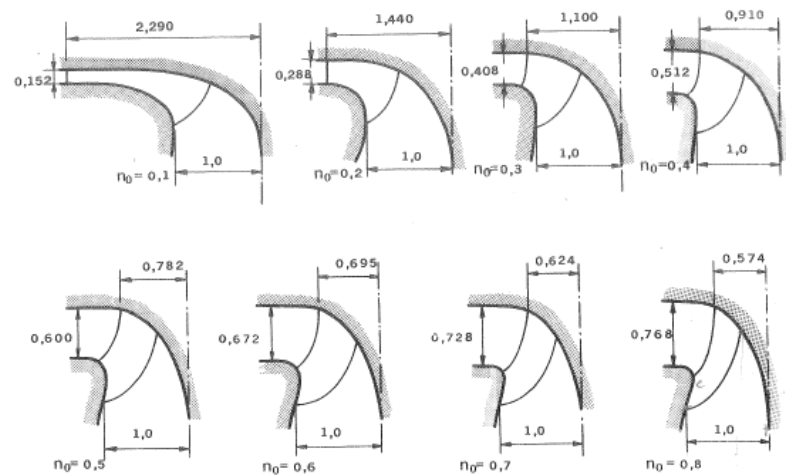


Figura 19. Diferentes perfiles hidráulicos del rodete de una turbina Francis.

El elemento que permite la salida del fluido es el tubo de aspiración, su función es conducir el agua tras ceder su energía en el rodete, aumentar la energía estática produciendo una succión a la salida del rodete y aumentar la energía dinámica, para ello el tubo debe tener una forma troncocónica aumentando la sección de paso con una función similar al de un difusor.

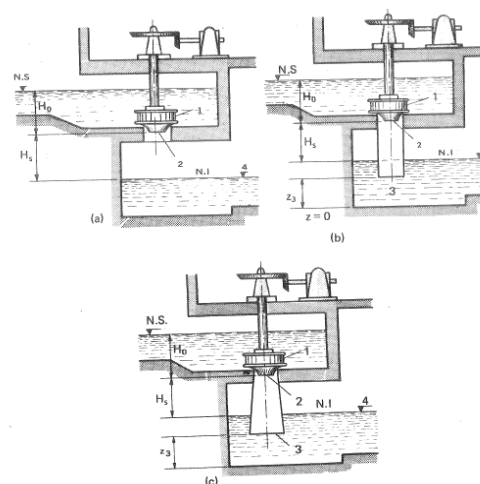


Figura 20. Tubo de aspiración de una turbina Francis. a) Sin tubo de aspiración. b) Tubo de aspiración cilíndrico. c) Tubo de aspiración troncocónico.

3. OBJETIVOS

Los objetivos principales del presente trabajo de fin de grado son los siguientes:

- Realizar un prototipo de turbina Francis a partir de los datos de caracterización de otra turbina Francis experimental.
- Aplicar el conocimiento adquirido en mecánica de fluidos y turbomáquinas para realizar los cálculos teóricos necesarios de ángulos de entrada y salida, velocidades, geometrías, etc...
- Diseñar la turbina Francis según los cálculos teóricos poniendo en práctica a su vez el conocimiento adquirido en diseño industrial.
- Realizar la fabricación de la turbina a partir de los planos de diseño, aplicar los conocimientos adquiridos en ingeniería de fabricación con el fin de evitar defectos tanto en las máquinas y herramientas utilizadas como en el prototipo diseñado.
- Someter a pruebas la turbina fabricada para determinar posibles fugas y defectos.
- Realizar ensayos y obtener las curvas características, comparándolas con los datos de caracterización de la turbina de partida.
- Disponer la turbina en laboratorio para la realización de prácticas por parte del alumnado.

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. MAQUINAS EMPLEADAS

4.1.1. Centro de mecanizado CNC Lagun 650



Figura 21. Centro de mecanizado CNC ubicado en EPS de Linares.

Características principales del Centro de Mecanizado (CNC) utilizado para ejecutar la mayor parte de las operaciones de mecanizado de las piezas integrantes de la turbina. Información obtenida de los manuales del fabricante (Lagun):

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

MESA	
Superficie de trabajo	800 x 460 mm
Ranuras en "T"	5 x 18 mm x 80 mm
Peso máximo sobre la mesa	400 kg
Altura de la mesa al suelo	915 mm
CURSOS	
Curso longitudinal X	650 mm
Curso transversal Y	510 mm
Curso vertical Z	610 mm
CABEZAL	
Gama de velocidades	8000 rpm
Cono del eje principal	MAS 403 BT 40
Tipo brante mandrino	MAS 403 P40T-I
Distancia mín./máx. del eje a la mesa	100 + 710 mm
Distancia del centro del eje a la superficie de la guía	550 mm
TRANSMISIÓN DE EJES	
Husillos a bolas	Ø 32 x 12 mm
Transmisión	Directa
Lubricación	Aceite
GUÍA LINEAL X	
Número de guías lineales	2
Número de patines	4
Distancia entre guías	320 mm
Lubricación	Aceite
GUÍA LINEAL Y	
Número de guías lineales	2
Número de patines	4
Distancia entre guías	685 mm
Lubricación	Aceite
GUÍA LINEAL Z	
Número de guías lineales	2
Número de patines	4
Distancia entre guías	295 mm
Lubricación	Aceite
AVANCES RÁPIDOS	
Longitudinal	36000 mm/min
Transversal	36000 mm/min
Vertical	36000 mm/min

Tabla 1. Características del centro de mecanizado CNC.

ALMACÉN DE HERRAMIENTAS	
Nº de herramientas	16 hts.
Sistema de selección	NO Random / Bidirectional
Tiempo cambio de herramienta	6 s
Tiempo cambio de herramienta viruta a viruta	13 s
Diámetro máximo con herramientas contiguas	Ø 100 mm
Diámetro máximo con herramientas alternas	Ø 130 mm
Longitud máxima de herramienta	250 mm
Peso máximo de la herramienta	8 kg
Peso total de las herramientas	87 kg
MOTORES	
Potencia del eje principal S1 / S6	7,5 / 9 kW
Potencia servomotores X, Y, Z (Fagor/Heidenhain/Fanuc)	3,6 / 2,6 / 1,2-1,8 kW
Bomba refrigeración	0,75 kW
Bomba limpieza carenado	0,75 kW
Motor almacén de herramientas (No random)	0,07 kW
Bomba de engrase centralizado	0,15 kW
PRECISIÓN	
Posicionamiento	± 0,005/300 mm
Repetibilidad	± 0,003 mm
GENERAL	
Superficie en planta (ancho x fondo)	2200 x 2370 mm
Altura máxima	2660 mm
Peso neto	3700 kg
Presión de aire requerida	6 + 7 bar
Capacidad máxima depósito taladrina	210 l
Potencia total instalada (FAGOR/HEIDENHAIN/FANUC)	23/20/21 kW

Tabla 2. Características del centro de mecanizado CNC.

4.1.2. Máquina de corte por agua TCI-cutting BP-C 1515



Figura 22. Máquina de corte por agua ubicada en EPS de Jaén

A continuación, se muestran algunas de las características para varios modelos de máquinas de corte por agua. En los anexos se incluyen las especificaciones técnicas de dichas máquinas.

DATOS TÉCNICOS	MODELOS	
Característica	BP-C 1515	BP-C 4020
Grosor máximo de pieza	200 mm	200 mm
Carga máxima permitida de piezas	790 kg/m ²	790 kg/m ²
Número de cabezales de corte	1 a 2	1 a 2
Velocidad de posicionamiento max simultáneo	85 m/min	85 m/min
Velocidad de corte máxima	20 m/min	20 m/min
Tolerancia de máquina según VDI/DGQ 3441	± 0.05 mm/m	± 0.05 mm/m
Precisión de repetición	± 0.025 mm	± 0.025 mm
Dimensiones	1500x1500x200mm	4000x2000x200 mm

Tabla 3. Características de varios modelos de máquinas de corte por agua.

4.1.3. Otras máquinas de taller

En el proceso de fabricación se han empleado otras máquinas como la sierra de cinta, taladro por engranaje, torno y esmeriladora. En los anexos se incluyen las características de dichas máquinas.



Figura 23. Sierra de cinta Optimum S275G ubicada en la EPS de Linares.



Figura 24. Torno ubicado en la EPS de Linares.

4.2. VELOCIDADES DE MECANIZADO

Tablas orientativas que se han utilizado para seleccionar los parámetros de mecanizado en las máquinas:

avance por	HERRAMIENTA ACERO RÁPIDO				HERRAMIENTA METAL DURO				
diente	ALUMINIO				DESBASTE ALUMINIO				TALADRO
fz=	Vc (m/min)= 85				Vc (m/min)= 230				60
0,1	F (mm/min)= fz * n°dientes * S				F (mm/min)= fz * n°dientes * S				
D (mm)	S	4	3	2	S	4	3	2	
80	338	135	101	68	915	366	275	183	239
40	676	271	203	135	1.830	732	549	366	477
32	846	338	254	169	2.288	915	686	458	597
20	1.353	541	406	271	3.661	1.464	1.098	732	955
18	1.503	601	451	301	4.067	1.627	1.220	813	1.061
16	1.691	676	507	338	4.576	1.830	1.373	915	1.194
12	2.255	902	676	451	6.101	2.440	1.830	1.220	1.592
10	2.706	1.082	812	541	7.321	2.928	2.196	1.464	1.910
8	3.382	1.353	1.015	676	9.151	3.661	2.745	1.830	2.387
10	2.706	1.082	812	541	7.321	2.928	2.196	1.464	1.910
6	4.509	1.804	1.353	902	12.202	4.881	3.661	2.440	3.183
14	1.933	773	580	387	5.229	2.092	1.569	1.046	1.364

Tabla 4. Condiciones de mecanizado para aluminio.

avance por	HERRAMIENTA ACERO RÁPIDO				HERRAMIENTA METAL DURO				
diente	PLÁSTICOS				DESBASTE PLÁSTICOS				TALADRO
fz=	Vc (m/min)= 30				Vc (m/min)= 160				26
0,1	F (mm/min)= fz * n°dientes * S				F (mm/min)= fz * n°dientes * S				
D (mm)	S	4	3	2	S	4	3	2	
80	119	48	36	24	637	255	191	127	103
40	239	95	72	48	1.273	509	382	255	207
32	298	119	90	60	1.592	637	477	318	259
20	477	191	143	95	2.546	1.019	764	509	414
18	531	212	159	106	2.829	1.132	849	566	460
16	597	239	179	119	3.183	1.273	955	637	517
12	796	318	239	159	4.244	1.698	1.273	849	690
10	955	382	286	191	5.093	2.037	1.528	1.019	828
8	1.194	477	358	239	6.366	2.546	1.910	1.273	1.035
10	955	382	286	191	5.093	2.037	1.528	1.019	828
6	1.592	637	477	318	8.488	3.395	2.546	1.698	1.379
14	682	273	205	136	3.638	1.455	1.091	728	591

Tabla 5. Condiciones de mecanizado para plásticos.

avance por diente	HERRAMIENTA ACERO RÁPIDO				HERRAMIENTA METAL DURO				
	ACERO			DESBASTE	ACERO			ACABADO	TALADRO
F (mm/min)=	Vc (m/min)= 30				Vc (m/min)= 110				22
0,1	F (mm/min)= fz * n°dientes * S				F (mm/min)= fz * n°dientes * S				
D (mm)	S	4	3	2	S	4	3	2	
80	119	48	36	24	438	175	131	88	88
40	239	95	72	48	875	350	263	175	175
32	298	119	90	60	1.094	438	328	219	219
20	477	191	143	95	1.751	700	525	350	350
18	531	212	159	106	1.945	778	584	389	389
16	597	239	179	119	2.188	875	657	438	438
12	796	318	239	159	2.918	1.167	875	584	584
10	955	382	286	191	3.501	1.401	1.050	700	700
8	1.194	477	358	239	4.377	1.751	1.313	875	875
10	955	382	286	191	3.501	1.401	1.050	700	700
6	1.592	637	477	318	5.836	2.334	1.751	1.167	1.167
14	682	273	205	136	2.501	1.000	750	500	500

Tabla 6. Condiciones de mecanizado para aceros.

avance por diente	HERRAMIENTA ACERO RÁPIDO				HERRAMIENTA METAL DURO				
	BRONCE			DESBASTE	BRONCE			ACABADO	TALADRO
fz=	Vc (m/min)= 40				Vc (m/min)= 140				38
0,1	F (mm/min)= fz * n°dientes * S				F (mm/min)= fz * n°dientes * S				
D (mm)	S	4	3	2	S	4	3	2	
80	159	64	48	32	557	223	167	111	151
40	318	127	95	64	1.114	446	334	223	302
32	398	159	119	80	1.393	557	418	279	378
20	637	255	191	127	2.228	891	668	446	605
18	707	283	212	141	2.476	990	743	495	672
16	796	318	239	159	2.785	1.114	836	557	756
12	1.061	424	318	212	3.714	1.485	1.114	743	1.008
10	1.273	509	382	255	4.456	1.783	1.337	891	1.210
8	1.592	637	477	318	5.570	2.228	1.671	1.114	1.512
10	1.273	509	382	255	4.456	1.783	1.337	891	1.210
6	2.122	849	637	424	7.427	2.971	2.228	1.485	2.016
14	909	364	273	182	3.183	2.546	955	1.273	864

Tabla 7. Condiciones de mecanizado para bronce.

TALADRO	ACEROS	DIÁMETRO (mm)	S	S (6000/d)	Medida nominal y paso normal	Diámetro broca agujero	Medida nominal y paso fino	Diámetro broca agujero
Vc (m/s)=	22	2	3.501	3.000	M3 x 0,5	2,5	M3 x 0,25	2,75
		3	2.334	2.000	M4 x 0,7	3,3	M4 x 0,35	3,65
		4	1.751	1.500	M5 x 0,8	4,2	M5 x 0,50	4,5
		5	1.401	1.200	M6 x 1	5	M6 x 0,50	5,5
		6	1.167	1.000	M8 x 1,25	6,8	M8 x 0,75	7,25
		7	1.000	857	M10 x 1,50	8,5	M10 x 0,75	9,25
		8	875	750	M12 x 1,75	10,2	M12 x 1	11
		9	778	667	M14 x 2	12	M14 x 1	13
		10	700	600	M16 x 2	14	M16 x 1,25	14.75
		11	637	545	M18 x 2,5	15,5	M18 x 1,25	16.75
		12	584	500	M20 x 2,5	17,5	M20 x 1,50	18.50
		13	539	462	M22 x 2,5	19,5	M22 x 1,50	20.50
		14	500	429	M24 x 3	21	M24 x 1,50	22.50
		15	467	400	M27 x 3	24	M27 x 2	25
		16	438	375	M30 x 3,5	26,5	M30 x 2	28
		17	412	353	M30 x 3,5	26,5	M30 x 2	28
		18	389	333				
		19	369	316				
		20	350	300				

Tabla 8. Condiciones de mecanizado para taladrados.

TABLA PARA LA ROSCA WHITWORTH PARA TUBOS, O ROSCA GAS (BSP)			
Medida nominal y paso normal			Diámetro broca agujero ***
Denominación	Hilos *	Diámetro **	
G 1/8	28	9.728	8,8
G 1/4	19	13.157	11,8
G 3/8	19	16.662	15,25
G 1/2	14	20.955	19
G 5/8	14	22.811	21
G 3/4	14	26.441	24,5
G 7/8	14	30.201	28,25
G 1	11	33.249	30,75
G 1.1/8	11	37.897	35,5
G 1.1/4	11	41,91	39,5
G 1.3/8	11	44.323	42
G 1.1/2	11	47.803	45,25
G 1.3/4	11	53.746	51,25
G 2	11	59.614	57
G 2.1/4	11	65,71	63
G 2.1/2	11	75.184	72,5
G 2.3/4	11	81.534	79
G 3	11	87.884	85,5
G 4	11	113,03	110,5
*hilos por pulgada. Una pulgada =25,4 mm			
**equivalencia en milímetros de la medida nominal			
***en milímetros			

Tabla 9. Condiciones de mecanizado para roscas.

5. DISEÑO, FABRICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LA TURBINA FRANCIS.

El procedimiento seguido consta de la fase de diseño, dentro de la cual se calculan los datos necesarios para la realización del modelado de álabes junto con el diseño del rodete, cámara espiral y álabes directrices. Seguidamente se utiliza la herramienta de diseño CAD Autodesk Inventor para realizar el modelado de la turbina. Una vez finalizada la fase de diseño se procede a la fabricación. En esta etapa se utilizan distintas máquinas herramientas pertenecientes todas ellas a la Universidad de Jaén: sierras, taladros, torno, centro de mecanizado, corte por agua, etc. La mayor parte de las piezas que constituyen la turbina han sido mecanizadas en máquinas de control numérico, siendo el software de CAM más empleado, Autodesk Fusion 360, que nos permite simular las operaciones de mecanizado y obtener el código máquina con el que fabricar las piezas en el centro de mecanizado. Además de éste, también se ha hecho uso de otros programas tales como: Lantek, Winunisoft, Fagor 8055, HMI Smart Touch V6 de TCI Cutting. La última fase es la caracterización de la turbina con el fin de obtener datos de trabajo y observar su desempeño.

5.1. DISEÑO

Las turbinas Francis se encuentran dentro del tipo de turbinas semiaxiales, ya que el fluido a su paso puede ser de tipo radial o diagonal. En este caso el tipo de turbina elegido es el de una turbina radial, cuyo diseño se realiza de manera similar al de una bomba radial.

El punto de diseño de la turbina se ha determinado según la caracterización en laboratorio de una turbina Francis experimental, obteniendo los siguientes resultados:

Dato	rpm	F1 (gr)	F2 (gr)	P (bar)	Q (l/min)
1,00	4350,00	0,00	0,00	1,08	56,00
2,00	4140,00	0,00	50,00	1,08	57,00
3,00	4000,00	0,00	75,00	0,98	58,00
4,00	3810,00	0,00	125,00	0,93	60,00
5,00	3600,00	0,00	175,00	0,88	61,00
6,00	3400,00	0,00	200,00	0,88	62,00
7,00	3260,00	0,00	250,00	0,78	64,00
8,00	3000,00	0,00	350,00	0,74	65,00
9,00	2850,00	0,00	375,00	0,74	65,00
10,00	2700,00	0,00	450,00	0,69	67,00
11,00	2520,00	0,00	500,00	0,64	67,00
12,00	2330,00	25,00	525,00	0,64	68,00
13,00	2150,00	25,00	575,00	0,59	68,00
14,00	1960,00	25,00	625,00	0,59	69,00
15,00	1870,00	25,00	650,00	0,59	70,00
16,00	1690,00	25,00	700,00	0,59	70,00
17,00	1600,00	50,00	725,00	0,56	70,00
18,00	1450,00	50,00	775,00	0,54	70,00
19,00	1250,00	75,00	825,00	0,54	70,00
20,00	1000,00	75,00	850,00	0,49	71,00
21,00	630,00	100,00	875,00	0,49	71,00
22,00	0,00	150,00	925,00	0,49	71,00

Tabla 10. Datos de la caracterización.

Γ (Nm)	Q (m ³ /s)	W_T (W)	W_n (W)	η (%)
0,00	0,00	0,00	100,72	0,00
0,01	0,00	6,38	102,51	6,22
0,02	0,00	9,25	94,83	9,75
0,04	0,00	14,68	93,20	15,75
0,05	0,00	19,42	89,76	21,63
0,06	0,00	20,96	91,23	22,97
0,07	0,00	25,12	83,71	30,00
0,10	0,00	32,36	79,71	40,60
0,11	0,00	32,94	79,71	41,32
0,13	0,00	37,45	76,68	48,83
0,15	0,00	38,83	71,20	54,54
0,15	0,00	35,90	72,27	49,68
0,16	0,00	36,44	66,71	54,63
0,18	0,00	36,24	67,69	53,54
0,18	0,00	36,02	68,67	52,45
0,20	0,00	35,16	68,67	51,20
0,20	0,00	33,28	65,81	50,58
0,21	0,00	32,40	62,95	51,47
0,22	0,00	28,89	62,95	45,90
0,23	0,00	23,88	58,04	41,15
0,23	0,00	15,05	58,04	25,92
0,23	0,00	0,00	58,04	0,00

Tabla 11. Resultados de la caracterización.

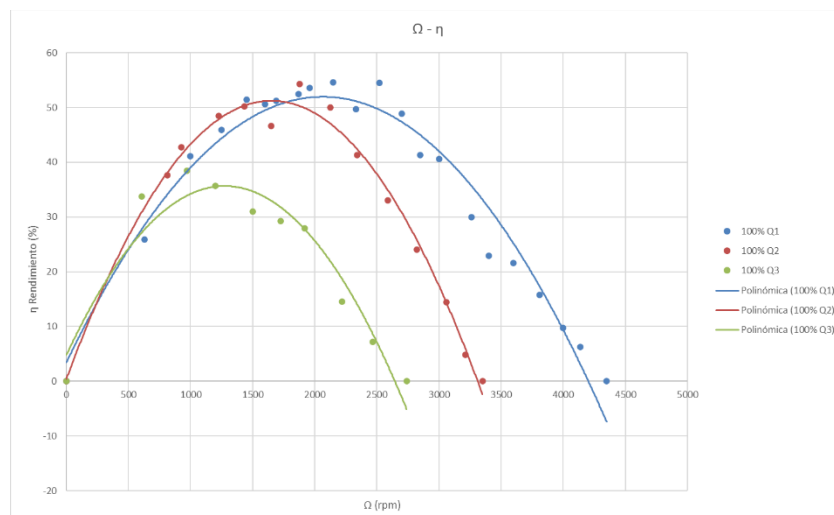


Gráfico 1. Curva de rendimiento.

5.1.1. Cálculos previos

Las condiciones de partida para realizar los cálculos según las condiciones de máximo rendimiento son:

$$Q = 68 \text{ l/min}$$

$$Hn = 6 \text{ m}$$

$$\Omega = 2150 \text{ rpm}$$

$$\Omega_s = \Omega \frac{\sqrt{Q}}{(gHn)^{\frac{3}{4}}} = 2150 \frac{2\pi \sqrt{\frac{68 \cdot 10^{-3}}{60}}}{60 (9.81 \cdot 6)^{\frac{3}{4}}} = 0.357$$

La velocidad específica obtenida confirma que se trata de una turbina Francis ya que entra dentro del rango establecido para este tipo de turbinas.

El cálculo de la velocidad en la entrada y salida del rodete se denotará con el subíndice 1 y 2 respectivamente. Tomando como referencia las dimensiones de la turbina Francis empleada para los datos de partida y un ángulo de entrada β_1 de 46.3° . Se ha utilizado un diámetro a la entrada D_1 de 60 mm, un diámetro a la salida D_2 de 25 mm, la altura del álabe b es constante e igual a 5 mm y espesor constante s de 1 mm.

Para obtener los triángulos de velocidades que determinarán los ángulos de los álaves a la entrada y a la salida de la turbina es necesario conocer las velocidades a través de éstos. La obtención de dichas velocidades se ha calculado empleando las siguientes ecuaciones.

Cálculo de la velocidad tangencial a la entrada y salida del rodete.

$$U = \Omega r$$

$$U_1 = 2150 \text{ rpm} \frac{2\pi}{60} 0.03 \text{ m} = 6.75 \text{ m/s}$$

$$U_2 = 2150 \text{ rpm} \frac{2\pi}{60} 0.0125 \text{ m} = 2.814 \text{ m/s}$$

Cálculo de la velocidad meridional suponiendo que no se produce momento cinético a la salida $V_{u2} = 0$; $\alpha_2 = 90^\circ$

$$V_m = \frac{Q}{\pi D b}$$

$$V_{m1} = \frac{68 \cdot 10^{-3}}{60 \pi 0.06 0.005} = 1.20 \text{ m/s}$$

$$V_{m2} = V_2 = \frac{68 \cdot 10^{-3}}{60 \pi 0.025 0.005} = 2.89 \text{ m/s}$$

$$W_{u1} = \frac{V_{m1}}{\operatorname{tg} \beta_1} = \frac{1.20}{\operatorname{tg} 46.3^\circ} = 1.15 \text{ m/s}$$

Cálculo del ángulo, velocidad absoluta y relativa a la entrada.

$$\alpha_1 = \operatorname{arctg} \left(\frac{V_{m1}}{U_1 - \frac{V_{m1}}{\operatorname{tg} \beta_1}} \right) = \operatorname{arctg} \left(\frac{1.20}{6.75 - \frac{1.20}{\operatorname{tg} 46.3^\circ}} \right) = 12.09^\circ$$

$$V_1 = \frac{V_{m1}}{\operatorname{sen} \alpha_1} = \frac{1.20}{\operatorname{sen} 12.09^\circ} = 5.73 \text{ m/s}$$

$$W_1 = \frac{V_{m1}}{\operatorname{sen} \beta_1} = \frac{1.20}{\operatorname{sen} 46.3^\circ} = 1.66 \text{ m/s}$$

Cálculo del ángulo de salida.

$$\beta_2 = \operatorname{arctg} \frac{V_2}{U_2} = \operatorname{arctg} \frac{2.89}{2.81} = 45.8^\circ$$

Una vez conocidos los ángulos de salida se puede calcular la velocidad relativa a la salida w_2

$$W_2 = \frac{V_2}{\operatorname{sen} \beta_2} = \frac{2.89}{\operatorname{sen} 45.8^\circ} = 4.03 \text{ m/s}$$

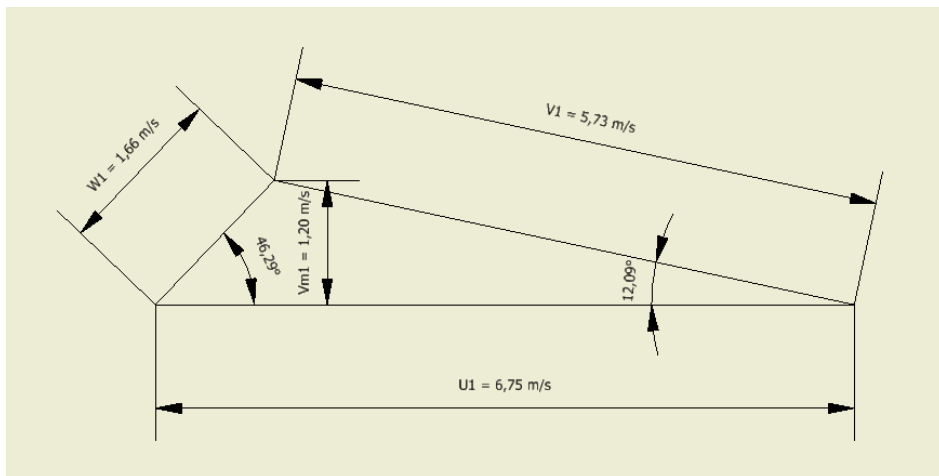


Figura 25. Triángulos de velocidad a la entrada.

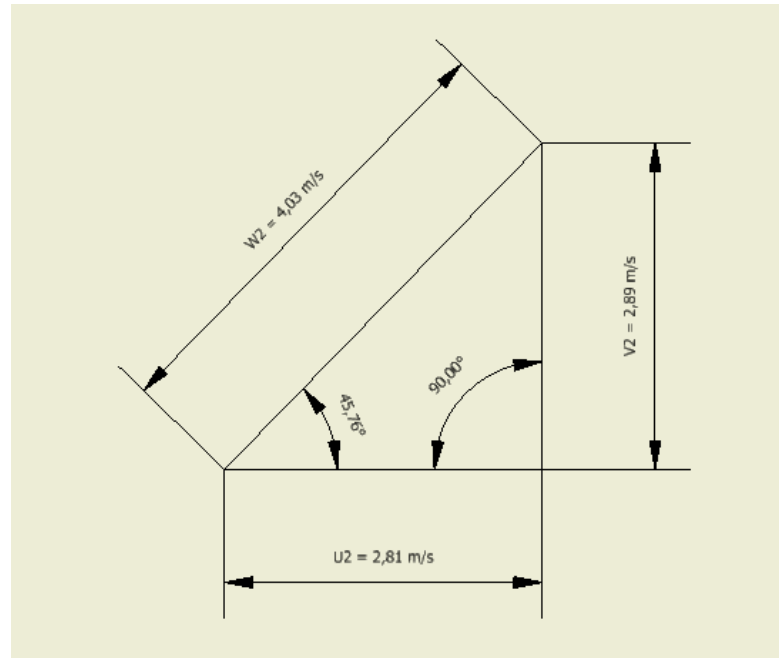


Figura 26. Triángulos de velocidad a la salida.

Según la ecuación de Euler aplicada a turbinas hidráulicas, la altura teórica suministrada para un número infinito de álabes será:

$$Ht_{\infty} = \frac{U_1 V_{u1} - U_2 V_{u2}}{g} = \frac{6.75 \cdot 5.60}{9.81} = 3.85 \text{ m}$$

Aplicando la corrección de Pfleiderer se puede obtener la altura teórica para un número finito de álabes.

Previamente se calcula el número de álabes del rodete, z :

$$z = k \frac{D_1 + D_2}{D_1 - D_2} \operatorname{sen} \frac{\beta_2 + \beta_1}{2} = 8 \frac{0.06 + 0.025}{0.06 - 0.025} \operatorname{sen} \frac{45.7^\circ + 46.3^\circ}{2} = 13.98 \approx 14 \text{ álabes}$$

donde k es un coeficiente cuyo valor oscila entre 3 y 10.

$$\Psi = 0.6(1 + \operatorname{sen} \beta_2) = 0.6(1 + \operatorname{sen} 45.76^\circ) = 1.03$$

$$S = \frac{1}{2}(r_1^2 - r_2^2) = \frac{1}{2}(0.03^2 - 0.0125^2) = 3.72 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$e_z = \frac{1}{1 + \frac{\Psi r_1^2}{zS}} = \frac{1}{1 + \frac{1.03 \cdot 0.03^2}{14 \cdot 3.72 \cdot 10^{-4}}} = 0.85$$

$$Ht = e_z Ht_{\infty} = 0.85 \cdot 3.85 = 3.27 \text{ m}$$

Finalmente se puede obtener el rendimiento hidráulico de la turbina Francis.

$$\eta_h = \frac{Ht}{Ht_{\infty}} = \frac{3.27}{3.85} = 0.85$$

En turbinas radiales la influencia del número finito de álabes es menos significativo que en bombas, ya que esta diferencia encontrada influye en la sección de salida (para bombas). En las turbinas esta sección se encuentra donde los radios son menores y los álabes están más próximos.

5.1.1.1. Rodete

El diseño del rodete determinará la forma con la que el fluido pasa a través de éste, considerando el número de álabes obtenido anteriormente y los respectivos ángulos de entrada y salida, junto con las dimensiones de los diámetros, espesor y altura de los álabes. Se puede trazar la forma del álabe. La realización de la forma del álabe se ha escogido mediante el método de trazado por puntos, seguidamente se expondrán los cálculos utilizados y los valores obtenidos para los distintos puntos calculados.

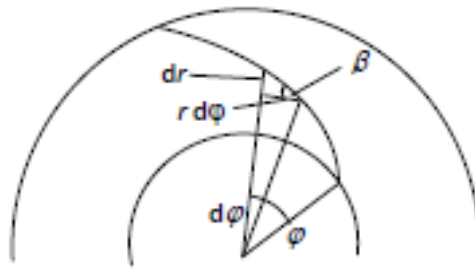


Figura 27. Trazado del álabe por puntos.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	11	12	13
radio (mm)	w (m/s)	cm (m/s)	u (m/s)	s (mm)	t (mm)	b (mm)	β (grados)	sen β	tg β	1/(r tg β)	∫dr/(r tg β)	(180/π) ∫dr/(r tg β)
12,5	6,21	2,89	2,81	1	7,85	5	27,70	0,46	0,53	152,35	0,00	0,00
14,25	5,75	2,53	3,21	1	8,95	5	26,11	0,44	0,49	143,21	0,27	15,32
16	5,30	2,25	3,60	1	10,05	5	25,18	0,43	0,47	132,92	0,53	30,08
17,75	4,84	2,03	4,00	1	11,15	5	24,80	0,42	0,46	121,90	0,76	43,47
19,5	4,39	1,85	4,39	1	12,25	5	24,92	0,42	0,46	110,36	0,96	54,83
21,25	3,94	1,70	4,78	1	13,35	5	25,55	0,43	0,48	98,43	1,11	63,59
23	3,48	1,57	5,18	1	14,45	5	26,78	0,45	0,50	86,15	1,21	69,23
24,75	3,03	1,46	5,57	1	15,55	5	28,79	0,48	0,55	73,54	1,24	71,24
26,5	2,57	1,36	5,97	1	16,65	5	31,95	0,53	0,62	60,51	1,20	69,04
28,25	2,12	1,28	6,36	1	17,75	5	37,07	0,60	0,76	46,85	1,08	61,83
30	1,66	1,20	6,75	1	18,85	5	46,28	0,72	1,05	31,88	0,84	47,97

Tabla 12. Trazado del álabe por puntos.



Figura 28. Rodete fabricado con el diseño del álabe calculado.

5.1.1.2. Álabe directriz

El distribuidor de álabes móviles se encarga de favorecer la entrada al rodete en toda la periferia de este, creando el campo de velocidades más favorable, influyendo en el ángulo de entrada con el fin de evitar pérdidas por choque. También se encarga de regular el caudal a la vez que influye en la potencia suministrada al rodete. Los principales parámetros de la corona directriz son el ancho b_0 , el ángulo de salida de los álabes directrices α_0 , el diámetro pivotante de los álabes d_g y la forma geométrica del perfil del álabe.

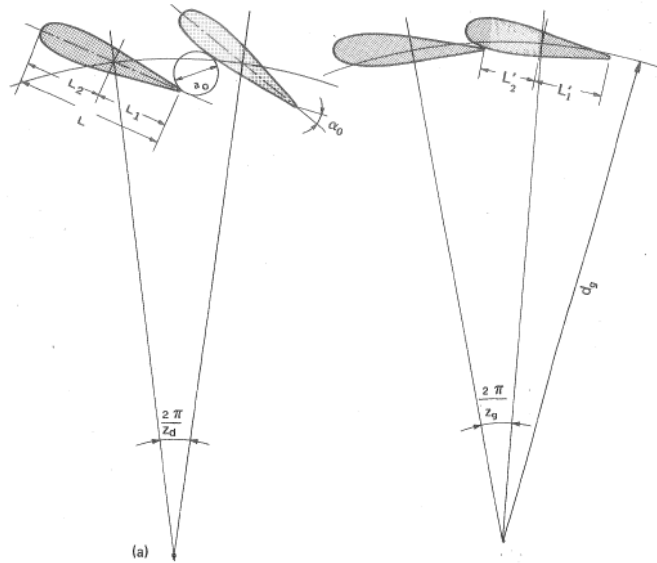


Figura 29. Álabes del distribuidor para la posición de apertura y cierre.

Para la realización del perfil del álabe se ha tomado como referencia los álaves de la turbina Francis ensayada en laboratorio. Con un número de 6 álaves directrices, una longitud de cuerda de 42 mm.



Figura 30. Diseño del alabe fabricado.

5.1.1.3. Cámara espiral

La función de la cámara espiral es transformar la energía de presión que tiene el fluido en energía cinética a la misma vez que conduce el fluido en su paso a través del rodete. En este caso se ha optado por diseñar una cámara espiral logarítmica con una profundidad

de la cámara de 17 mm. El tipo de sección de la cámara espiral es cuadrada y se ha trazado mediante el método de puntos.

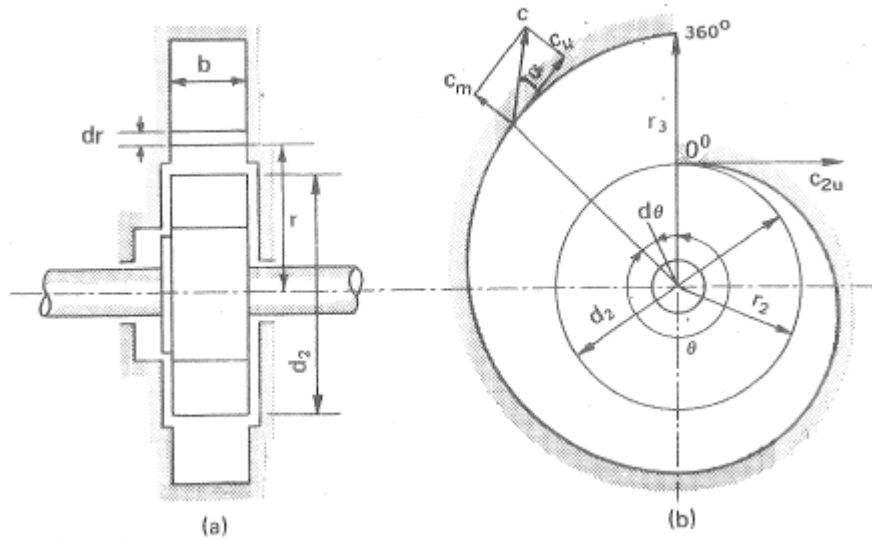


Figura 31. Cámara espiral logarítmica de una bomba radial.

Para realizar el diseño es necesario conocer el radio de partida del inicio de la espiral, la profundidad de la cámara y el ángulo girado del radio del siguiente punto. Según la ecuación

$$r_{\theta} = r_3 e^{\frac{Q}{360 \cdot C \cdot b_3} \theta}$$

$$C = r_1 \cdot c_{u1} = 0.03m \cdot 4.378 \frac{m}{s} = 0.13134 \frac{m^2}{s}$$

donde r_3 es el radio donde se inicia la espiral logarítmica e igual a 50 mm, b_3 es la profundidad de la cámara, θ es el ángulo girado y C es una constante que relaciona el radio con la velocidad acimutal.

La obtención del ángulo girado se ha determinado a partir de la figura 32 b). Entrando con un valor de l igual a 40 mm y un valor de r de 50 mm. El ángulo girado obtenido es de 33°

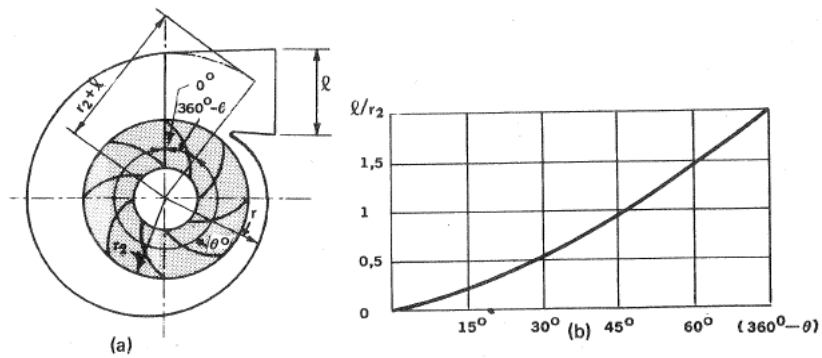


Figura 32. Cámara espiral para un valor de l predeterminado.

Los resultados obtenidos de la ecuación para los puntos que definen la espiral se muestran en la tabla 13.

Puntos	Radio (mm)	Θ (Grados)
0	50	0
1	52,43	33
2	54,98	66
3	57,65	99
4	60,46	132
5	63,39	165
6	66,48	198
7	69,71	231
8	73,1	264
9	76,66	297
10	80,38	330
11	84,29	363

Tabla 13. Puntos de la espiral logarítmica.

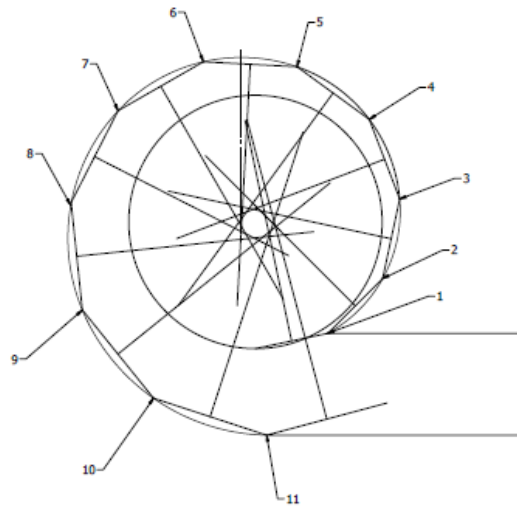


Figura 33. Diseño de la espiral por puntos según los datos de la tabla 13.

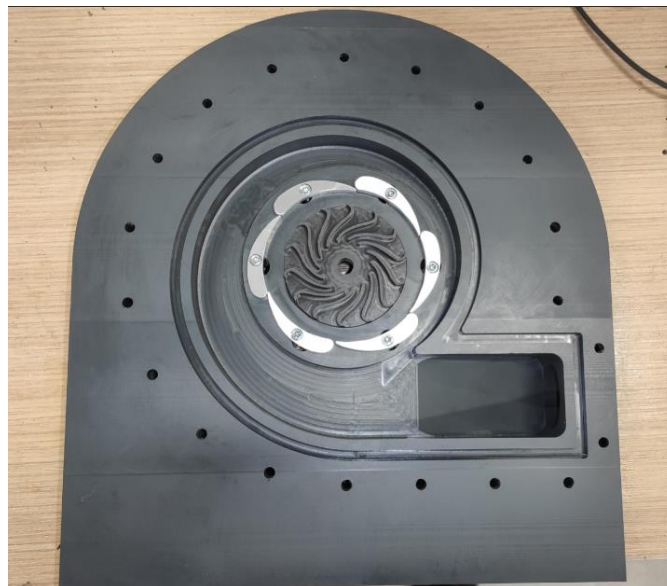


Figura 34. Cámara espiral fabricada según el diseño calculado.

5.1.2. Diseño CAD

Una vez obtenidos los cálculos necesarios para el diseño de la turbina, se ha procedido a realizar el diseño CAD mediante el software Autodesk Inventor 2019. Los planos finales de todas las piezas se incluyen en el anexo de este documento.

5.1.2.1. Rodete

El diseño CAD del rodete se ha realizado utilizando la tabla 12 para el trazado del álabe mediante el método por puntos. Seguidamente se ha realizado un patrón circular para un número de 14 álaves dotando a éstos de un espesor de 1 mm y una altura de 5 mm. A continuación, se muestran algunas imágenes del proceso seguido:

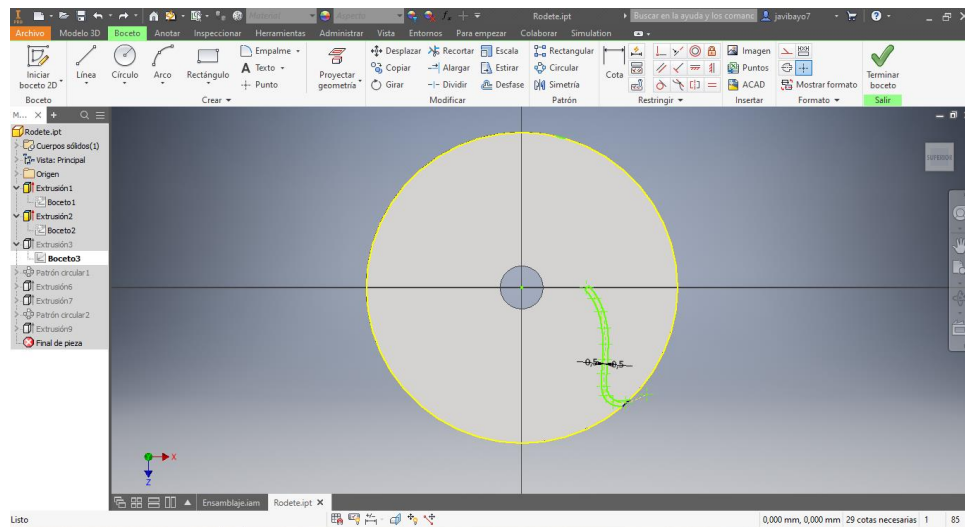


Figura 35. Trazado del álabe mediante el método por puntos.

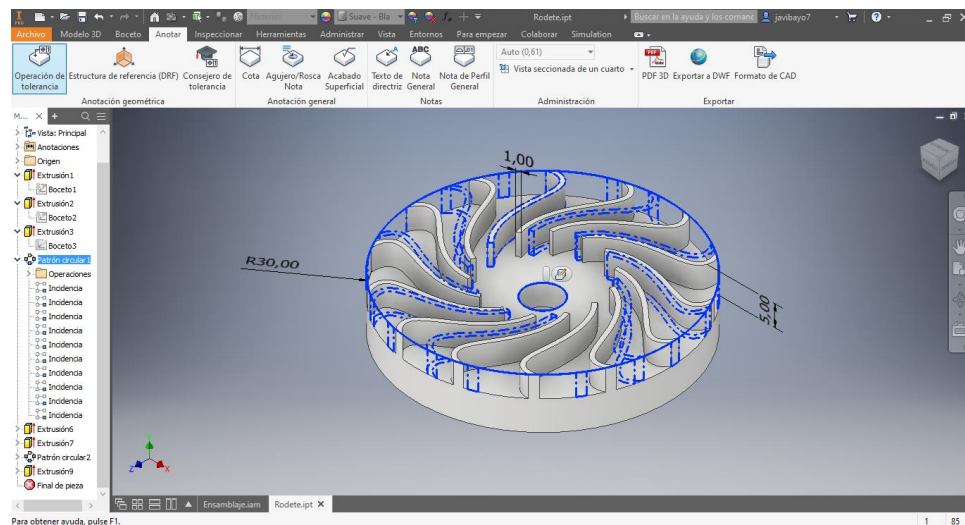


Figura 36. Patrón circular para 14 álaves.

5.1.2.2. Álabes directriz

La geometría del álabe directriz se ha diseñado en función al álabe ensayado en la turbina Francis de laboratorio. Mediante el método de puntos se ha obtenido el perfil del álabe deseado.

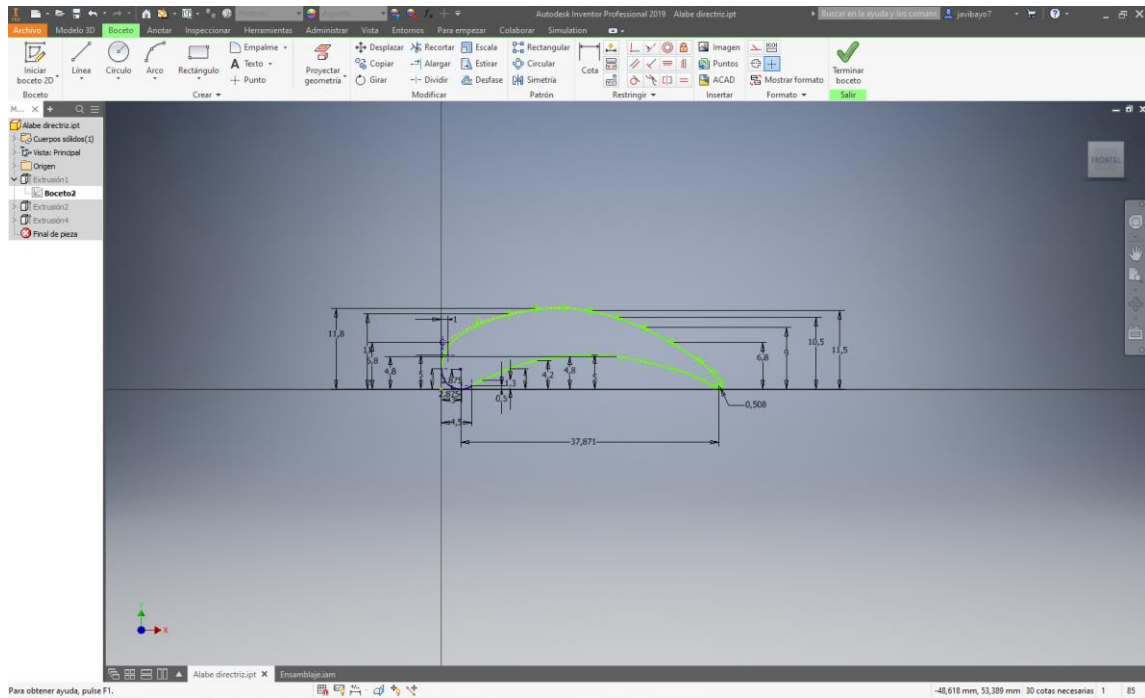


Figura 37. Perfil del álabe directriz.

Tras obtener el contorno del perfil del álabe se ha extruido la sección con una altura de 5 mm y posteriormente se ha generado un agujero para permitir la rotación de apertura y cierre del distribuidor.

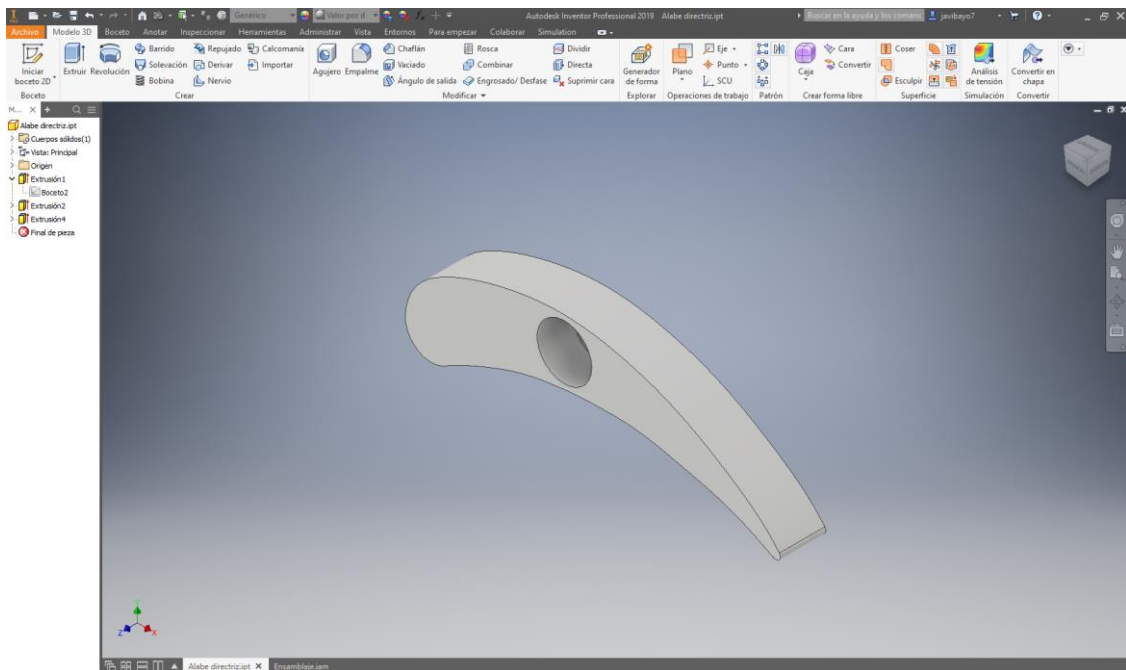


Figura 38. Diseño del álabe directriz.

5.1.2.3. Carcasa

El diseño de la carcasa consta de la mayoría de los procesos de diseño y fabricación de la turbina ya que la mayoría de las piezas van alojadas en ella.

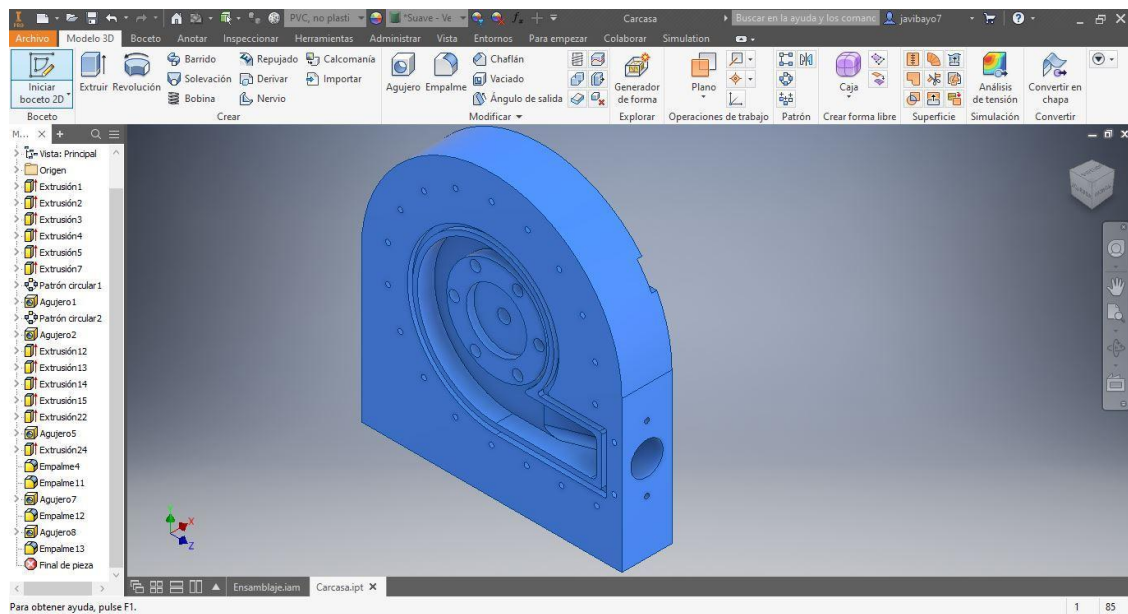


Figura 39. Frontal de la carcasa.

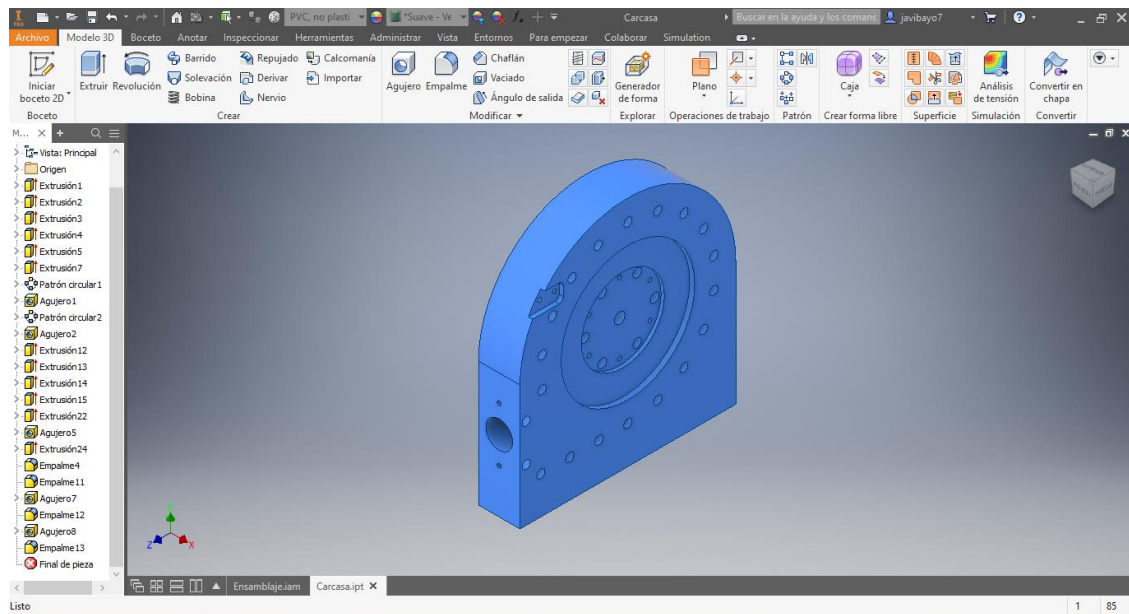


Figura 40. Trasera de la carcasa.

El diseño de la cámara espiral se ha basado en la geometría mostrada en la figura 26. Se ha realizado el trazado de la cámara espiral logarítmica para posteriormente extruir la sección obtenida con una profundidad de 17 mm.

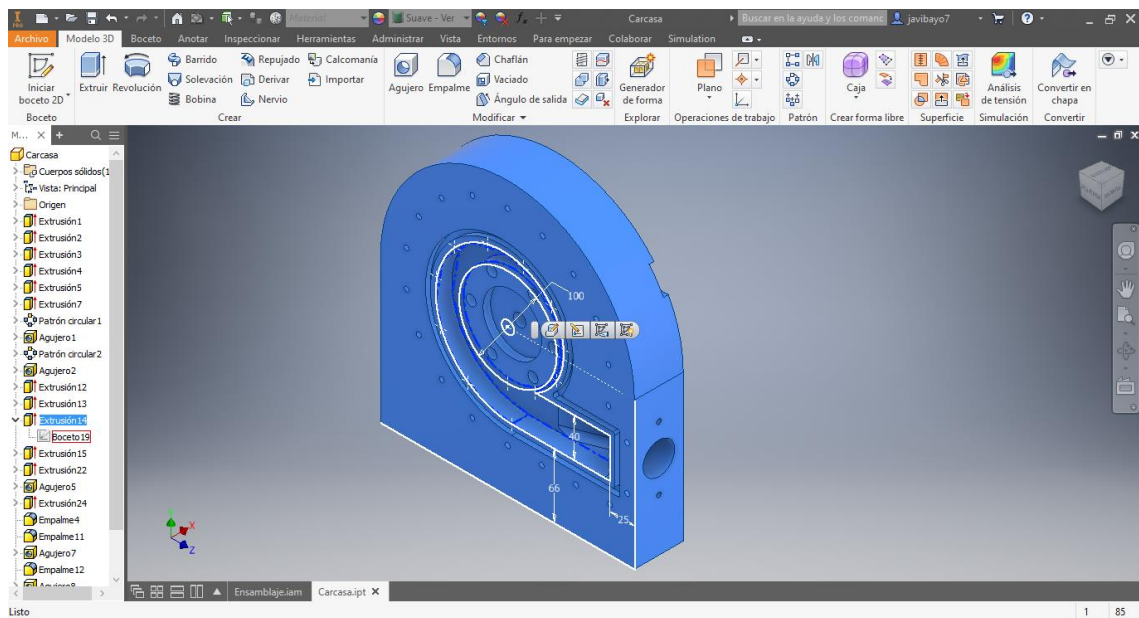


Figura 41. Diseño de la cámara espiral.

5.1.2.4. Distribuidor

El diseño del distribuidor se ha realizado utilizando como referencia la turbina ensayada en laboratorio. Consta de los álabes distribuidores, ejes de los álabes y una serie de placas conectadas a un volante que permite regular la apertura y cierre de los álabes.

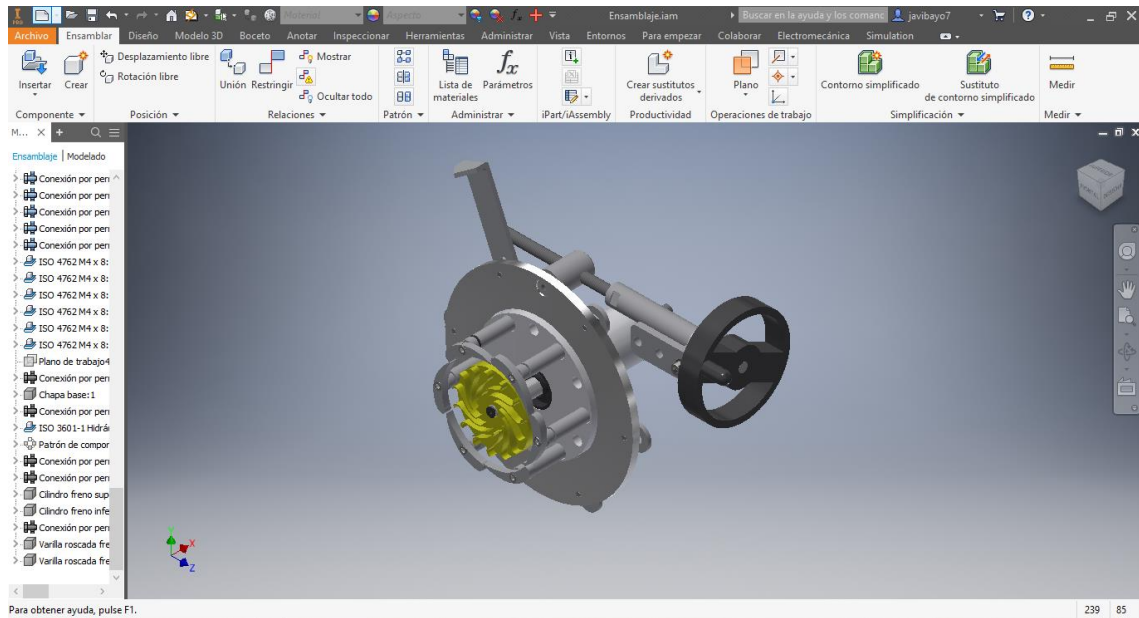


Figura 42. Sistema del distribuidor.

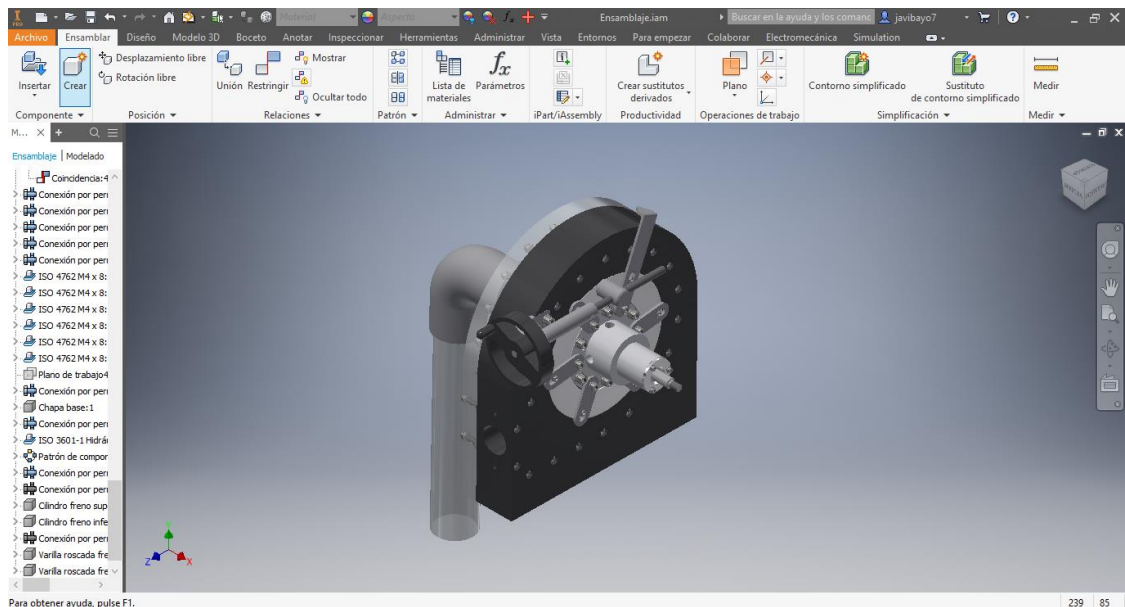


Figura 43. Sistema de distribución acoplado a la carcasa.

5.1.2.5. Ensamblaje final

Finalmente se procede al ensamblaje de todas las piezas creadas, incluido el bastidor donde va acoplada la turbina y el sistema de freno que nos permite determinar la potencia generada en el eje mediante dinamómetros.

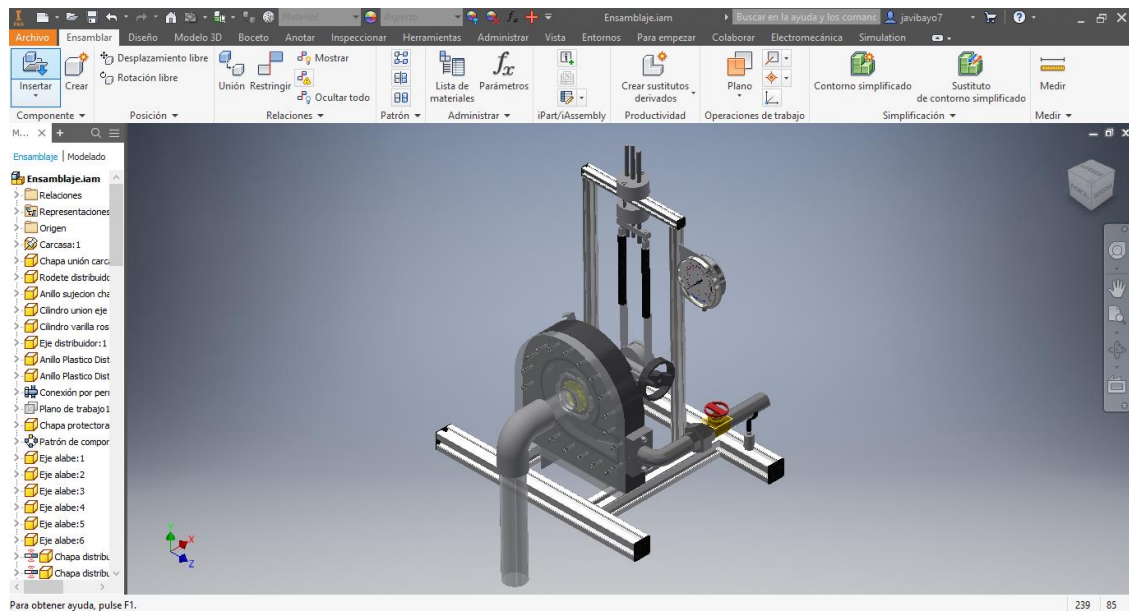


Figura 44. Ensamblaje final de la turbina.

5.2. FABRICACIÓN

En esta fase del proyecto se han utilizado diferentes métodos de fabricación. Se ha empleado corte por agua, mecanizado por control numérico, mecanizado mediante torno, corte por sierra y taladros. Previamente se ha simulado mediante el software Autodesk Fusion 360 algunas de las piezas más complejas de mecanizar con el fin de evitar posibles errores y hacer más eficiente el proceso de fabricación. A continuación, se muestran dichos procesos de fabricación tanto en software como el producto final obtenido.

5.2.1. Introducción

En primer lugar, se ha realizado la fabricación de las piezas que menos tiempo de mecanizado requieren, como las chapas del distribuidor, obtenidas mediante corte por agua.

Seguidamente se ha fabricado el rodete y los álabes directrices. Estas piezas presentan una geometría más compleja y se ha empleado mecanizado por control numérico, a pesar del mecanizado empleado se han producido defectos en las primeras piezas fabricadas,

rompiéndose algunos álabes del rodete debido a velocidades demasiado elevadas de mecanizado.

La pieza que más tiempo de fabricación ha requerido es la carcasa, ya que es el cuerpo principal de la turbina y dónde van alojadas las demás piezas. Durante el transcurso de la fabricación han ido apareciendo defectos que se han ido corrigiendo como el rozamiento encontrado entre carcasa y ejes.

Finalmente se han fabricado las piezas necesarias para medir la potencia generada, como la polea de freno y los acoples de los dinamómetros. A continuación, se muestran los tiempos de mecanizado aproximados y el procedimiento seguido para la fabricación de algunas piezas.

TIEMPOS DE MECANIZADO CNC			
FECHA	MINUTOS	HORAS	MECANIZADO
15/04/2021	120	2:00:00	Mecanizado Álabes directrices
19/04/2021	420	7:00:00	Mecanizado de rodete, plano trasero de carcasa y ejes pasantes
20/04/2021	120	2:00:00	Corte por agua de chapas
21/04/2021	1140	19:00:00	Mecanizado de carcasa (Frontal)
26/04/2021	60	1:00:00	Chapa unión carcasa-distribuidor
26/04/2021	60	1:00:00	Cilindro acople eje distribuidor-carcasa
26/04/2021	60	1:00:00	Cilindro conexión anillo
27/04/2021	90	1:30:00	Eje distribuidor
28/04/2021	30	0:30:00	Anillo plástico distribuidor
04/05/2021	60	1:00:00	Polea
04/05/2021	60	1:00:00	Sujeción codo
04/05/2021	30	0:30:00	Tapa metacrilato, mecanizado junta tórica y alojamiento tubo
05/05/2021	300	5:00:00	Acoplamiento 1-2 polea-eje principal
07/05/2021	270	4:30:00	Soporte dinamómetro (5 piezas), plegado chapa inferior
10/05/2021	240	4:00:00	Volante distribuidor (3 piezas)
10/05/2021	60	1:00:00	Tapa manómetro
11/05/2021	150	2:30:00	Eje álabe distribuidor
13/05/2021	120	2:00:00	Eje principal turbina
14/05/2021	180	3:00:00	Rehacer eje principal, polea, rectificar carcasa pvc
	3570	59,5	
Mano de obra	60	horas	1.190,00 €
TOTAL			1.292,98 €

Tabla 14. Tiempos de mecanizado.

	TAREAS	TERMINADO	PENDIENTE	EN PROCESO	ESTADO
CARCASA	15	15	0	0	
DISTRIBUIDOR	12	12	0	0	
RODETE Y ACOPLAMIENTO	7	7	0	0	
BASTIDOR	14	14	0	0	
TOTAL	48	48	0	0	

CARCASA (Tareas)	ESTADO	OBSERVAC.	UDS.PIEZA	CARACT.	COSTE
Mecanizado para chapa unión carcasa-distribuidor (POSTERIOR)	Terminado				
Mecanizado para anillo sujeción chapas-distribuidor (POSTERIOR)	Terminado				
Mecanizado Acople rodetes-distribuidor y taladros (POSTERIOR)	Terminado				
Mecanizado eje principal (FRONTAL)	Terminado				
Mecanizado eje alabes (FRONTAL)	Terminado				
Mecanizado cilindrico para alabes distribuidor (FRONTAL)	Terminado				
Mecanizado entrada camara espiral y taladros (LATERAL)	Terminado				
Mecanizado camara espiral y unión entrada fluido (FRONTAL)	Terminado				
Mecanizado junta tórica (FRONTAL)	Terminado	comprar cordón tórico			3,74 €
Taladros tornillos pasantes de la carcasa x20 (FRONTAL)	Terminado				
Taladros sujeción a soporte	Terminado				
sujeción codo de entrada	Terminado		1		
Mecanizado tapa frontal en metacrilato	Terminado	Corte por agua	1		
Junta tórica carcasa	Terminado		1		
Tubo de salida	Terminado		1		
			1		
			1		
DISTRIBUIDOR (Tareas)	ESTADO	OBSERVAC.	UDS.PIEZA	CARACT.	COSTE
Anillo sujeción chapas-distribuidor	Terminado	Corte por agua 5 mm espesor	1		
Chapa indicadora	Terminado	Corte por agua 3 mm espesor	1		
Chapa distribuidor	Terminado	Corte por agua 3 mm espesor	5		
Chapa unión carcasa-distribuidor	Terminado	Aluminio en existencia	1		
Chapa protectora rodamiento	Terminado	Corte por agua 3 mm espesor	1		
Cilindro eje distribuidor a carcasa	Terminado	Aluminio en existencia	1		
Cilindro acople anillo-eje distribuidor	Terminado	Aluminio en existencia	1		
Eje de álabe distribuidor	Terminado	Aluminio en existencia	6		1,26 €
Eje distribuidor	Terminado	Aluminio en existencia	1		
Anillos de plástico para eje distribuidor	Terminado	Nylon en existencia	2		
Volante para eje distribuidor	Terminado	Nylon en existencia	1		
Alabes directrices	Terminado	Aluminio en existencia	6		
RODETE Y ACOPLAMIENTO EJE PRINCIPAL (Tareas)	ESTADO	OBSERVAC.	UDS.PIEZA	CARACT.	COSTE
Rodete principal	Terminado	PVC en existencia	1		
Polea	Terminado	Barra alumio en existencia	1		
Eje principal	Terminado	Barra aluminio D20 en existencia	1		
Acoplamiento polea-eje principal	Terminado	Barra PVC en existencia	1		
Rodamiento trasero	Terminado	Almanzora	1		2,00 €
Rodamiento delantero	Terminado	Almanzora	1		2,00 €
Retén estanco y anillos retención	Terminado	Almanzora	1		2,56 €
BASTIDOR (Tareas)	ESTADO	OBSERVAC.	UDS.PIEZA	CARACT.	COSTE
Mecanizado de soporte para dinamómetros (5 piezas)	Terminado	PVC en existencia	1		
Dinamómetros	Terminado		2		66,55 €
Varilla guía para dinamómetros	Terminado	compradas en inoxidable	1		
Cinta freno	Terminado	en existencia	1		
Tubería de entrada (codo, válvula, uniones, tubo, soporte, neumático)	Terminado		1		
Perfil Bosh 300 mm	Terminado		2		
Perfil Bosh pequeño 240 mm	Terminado		1		
Perfil Bosch 500 mm	Terminado		2		
Perfil Bosch pequeño 500 mm	Terminado		2		
Chapa plegada atornillada a bastidor y carcasa por abajo	Terminado		1		
Perfil Bosh 300 mm	Terminado		2		
Manómetro	Terminado		1		24,87 €
Tapa manómetro	Terminado	PVC en existencia	1		
Tapas perfiles Bosch	Terminado		6		

Tabla 15. Tareas de fabricación.

5.2.2. Rodete

Mediante el archivo CAD obtenido en la fase de diseño se procede a la simulación del proceso de fabricación del rodete. Inicialmente se parte de una pieza de PVC cuadrangular con las dimensiones necesarias para la fabricación del rodete.

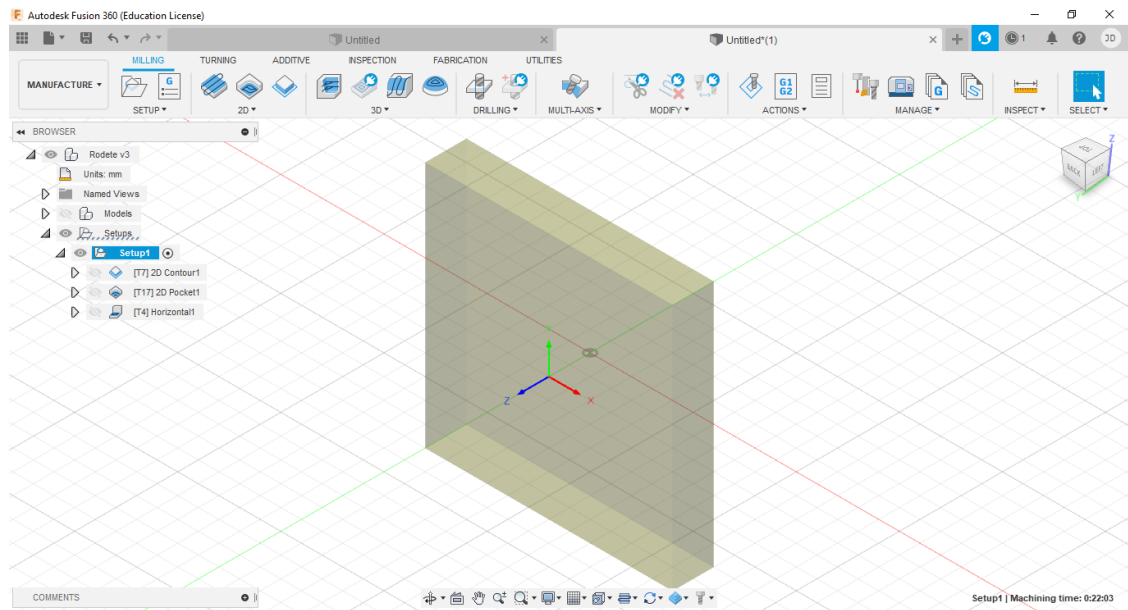


Figura 45. Pieza de partida para la fabricación del rodete.

El proceso siguiente es la realización del contorno de nuestro rodete, mediante una herramienta de metal duro de 10 mm de diámetro y las condiciones para plástico indicadas en la tabla 5.

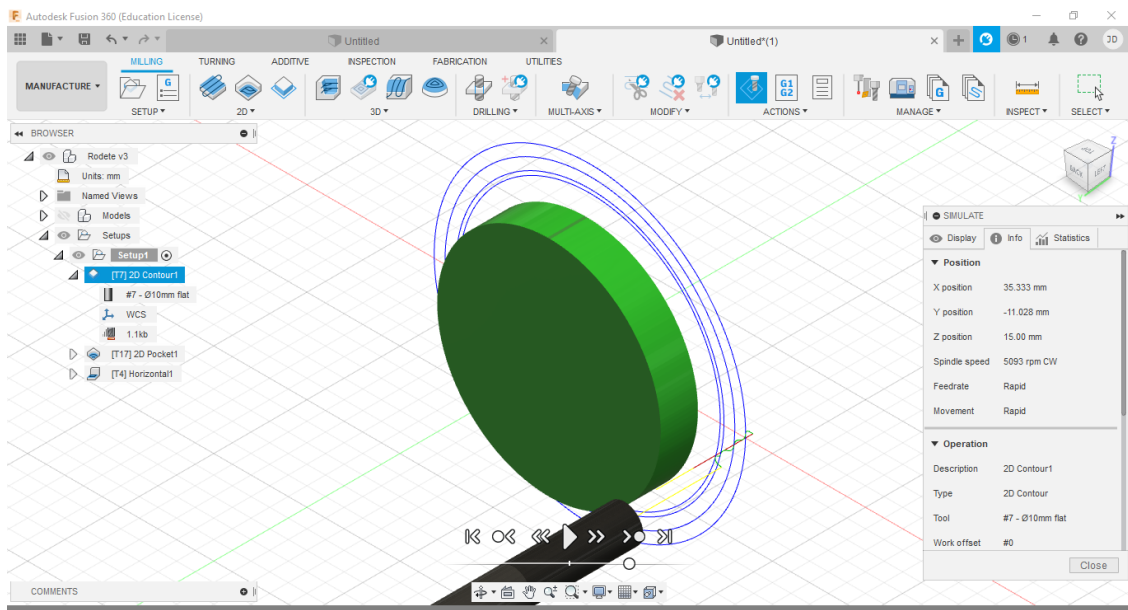


Figura 46. Proceso de contorno en varias pasadas.

El siguiente proceso ha sido el de agujereado para el alojamiento del eje principal de la turbina. Se ha empleado una herramienta de metal duro de diámetro 4 mm y unas condiciones de: S 6000 rpm, F de 2400 mm/min, Vc de 75 m/min y f_z de 0.1 mm.

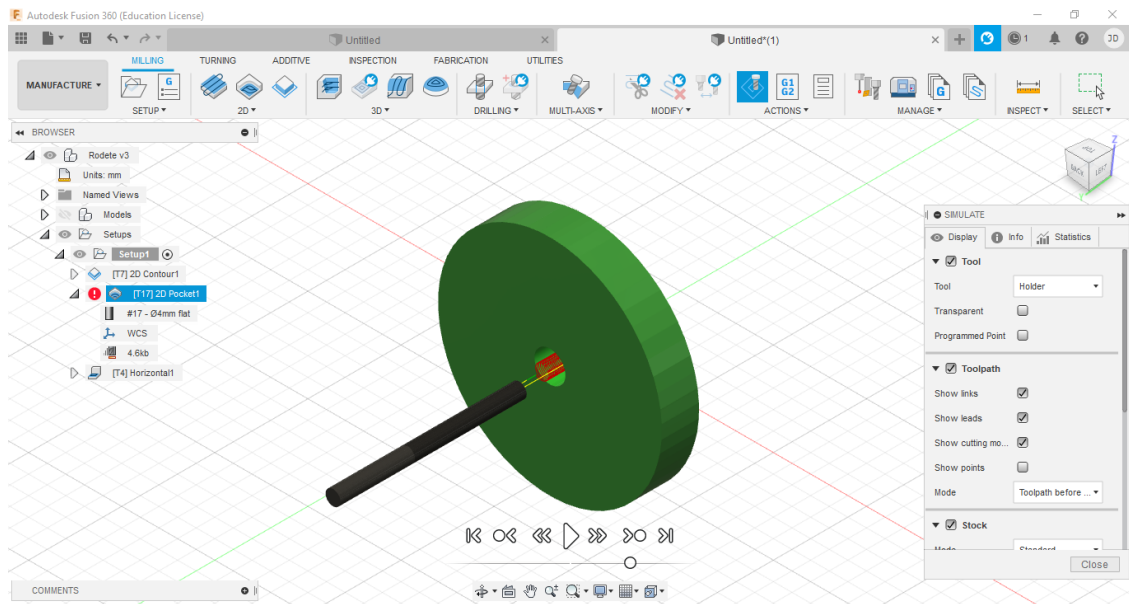


Figura 47. Proceso de agujereado para eje principal.

El proceso final de mecanizado del rodete se ha realizado mediante una herramienta de metal duro de 3 mm de diámetro y las siguientes condiciones: S de 6000 rpm, Vc de 56 m/min, F de 2400 mm/min y f_z de 0.1 mm.

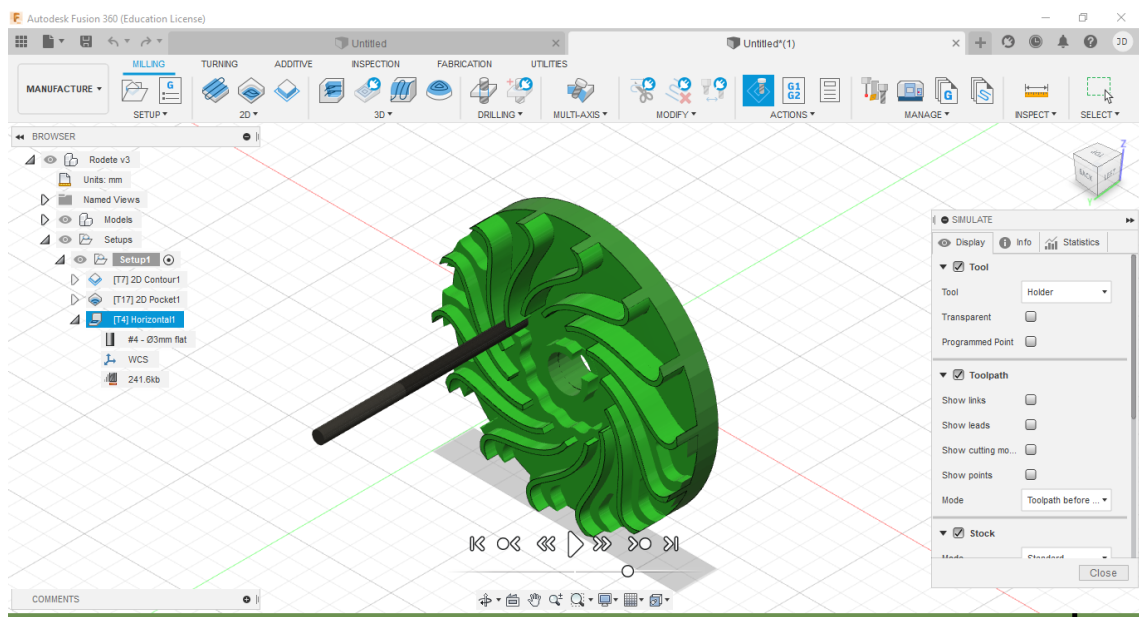


Figura 48. Proceso de mecanizado de álabes.



Figura 49. Rodete fabricado.

5.2.3. Carcasa

La fabricación de la carcasa se ha realizado en PVC mediante control numérico. Debido a la complejidad del mecanizado de las secciones de la carcasa se ha simulado el mecanizado y posteriormente se ha trabajado en la máquina. A partir de una pieza de PVC con las dimensiones necesarias se ha procedido a la realización de las diferentes operaciones de fabricación hasta la obtención del producto deseado.

El primer proceso ha sido realizar el contorno de la carcasa, para ello se ha utilizado una herramienta de metal duro de diámetro 20 mm y las condiciones de la tabla 5 para dicha herramienta.

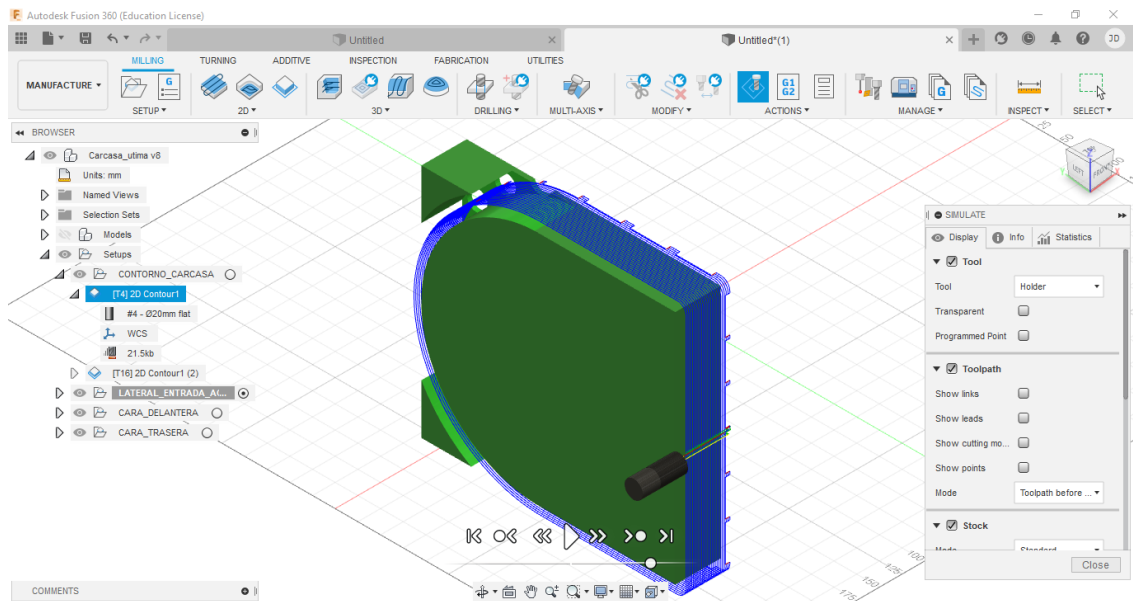


Figura 50. Proceso de contorneado de la carcasa.

El siguiente proceso es el agujereado de la entrada a la cámara espiral, para su realización se ha empleado una herramienta de metal duro de 10 mm de diámetro con las condiciones de la tabla 5. Seguidamente se han realizado dos taladros de métrica 6 para poder unir la tubería de entrada a la carcasa.

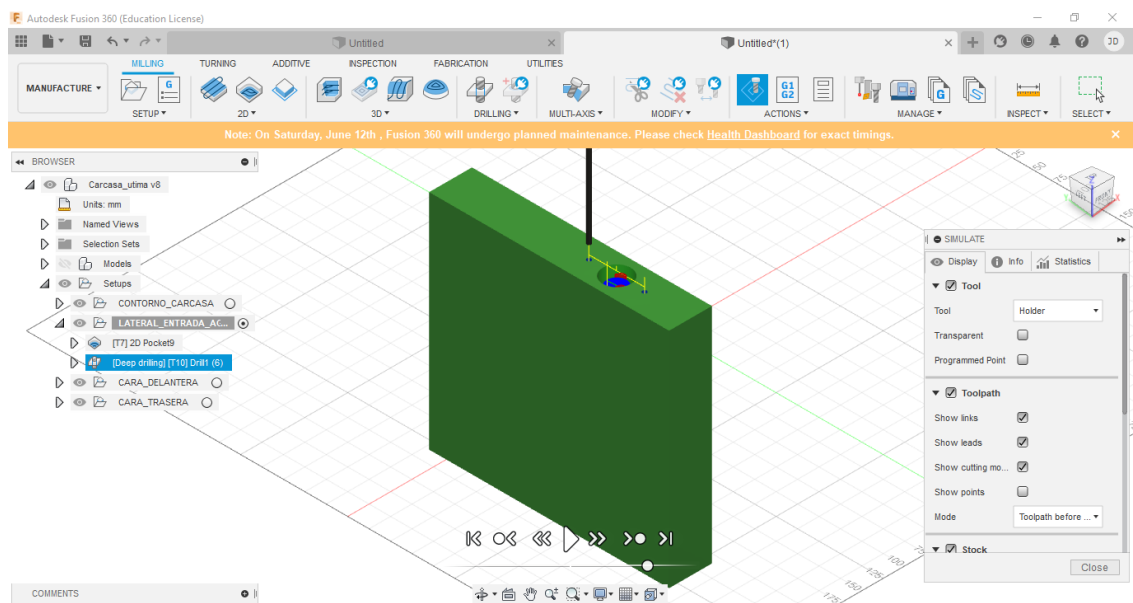


Figura 51. Mecanizado lateral de entrada a la cámara espiral.



Figura 52. Mecanizado lateral de la entrada a la cámara espiral.

A continuación, se ha realizado el mecanizado de la cara frontal de la carcasa, que se divide en el mecanizado de la junta tórica, cámara espiral, alojamiento del rodete, taladrados para los ejes de los álabes y para el eje principal de la turbina. Para la junta tórica se ha empleado una herramienta de metal duro de 3 mm de diámetro y las condiciones descritas anteriormente para dicha herramienta.

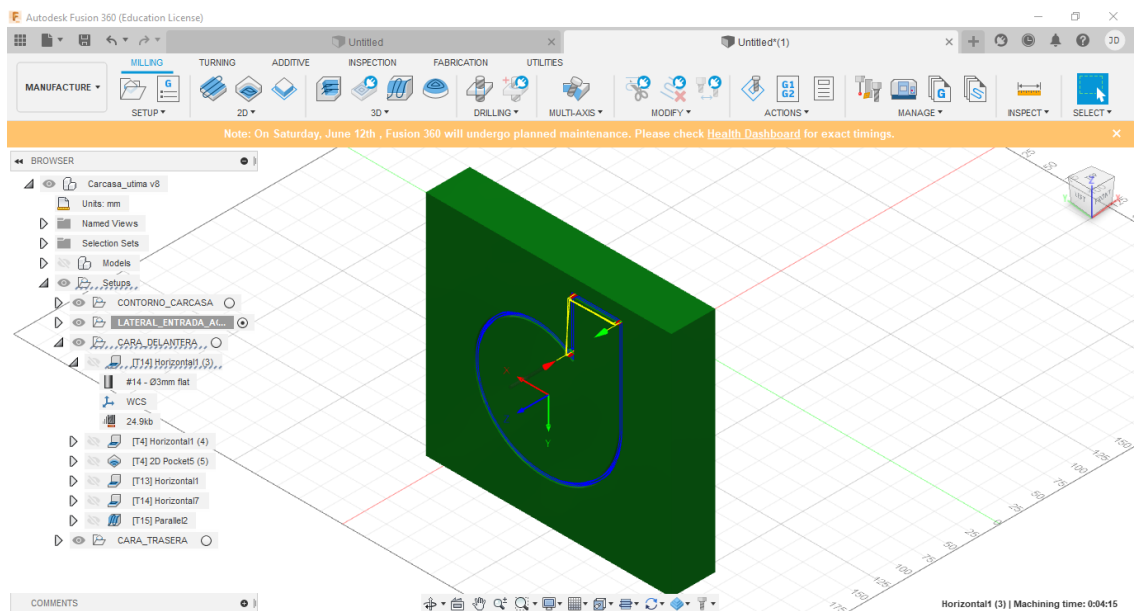


Figura 53 . Simulación del mecanizado de la junta tórica.



Figura 54. Mecanizado de la junta tórica y taladros pasantes.

El siguiente proceso consiste en el mecanizado del alojamiento del rodete y de la cámara espiral. Para ello se ha empleado una herramienta de metal duro de 20 mm de diámetro y otra de 6 mm con las condiciones especificadas en la tabla 5.

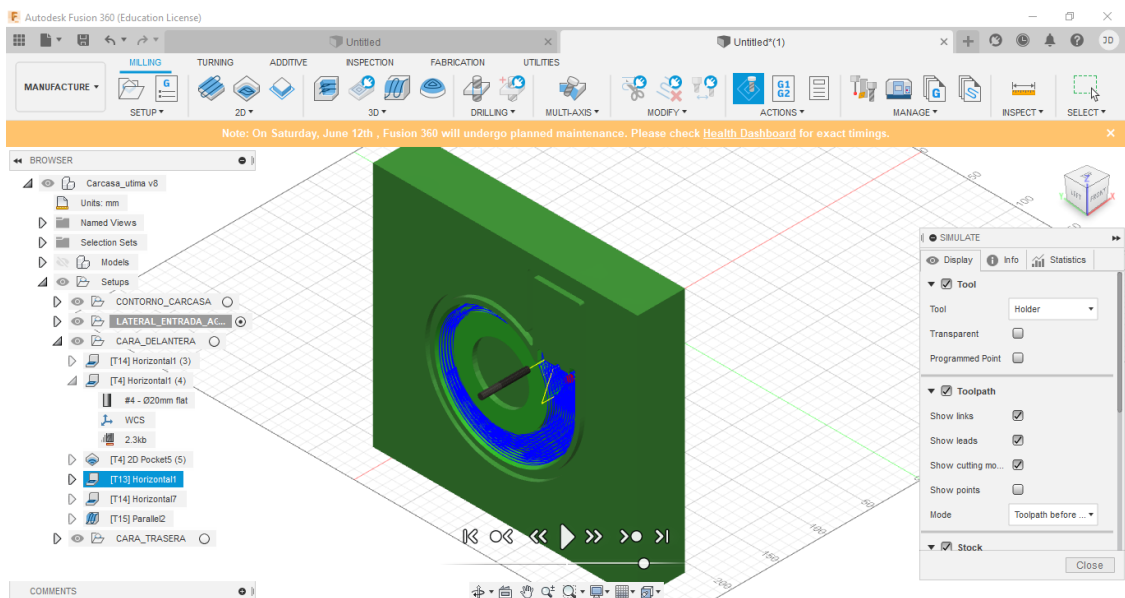


Figura 55. Proceso de mecanizado de la cámara espiral.



Figura 56. Mecanizado de la cámara espiral en CNC.

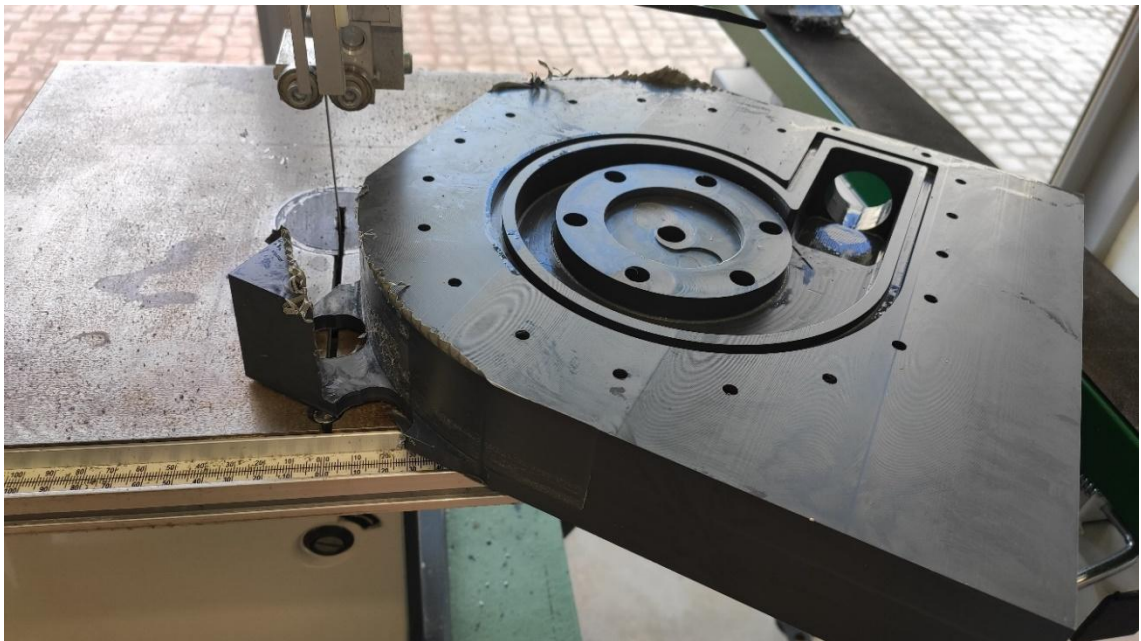


Figura 57. Finalización del proceso de mecanizado de la carcasa.

5.2.4. Polea de freno.

Para el mecanizado de la polea se ha utilizado una pieza cilíndrica de aluminio con las dimensiones adecuadas para la fabricación de la polea. Inicialmente se ha cortado la pieza con la longitud necesaria para la polea, seguidamente se ha introducido la pieza en torno realizando un contorneado, eliminando material hasta obtener el diámetro adecuado. Una

vez acabado este proceso se ha introducido la pieza en la máquina de control numérico para el mecanizado de la parte lateral y del taladro pasante para el eje principal de la turbina. A continuación, se muestran las imágenes con los procesos descritos anteriormente:



Figura 58. Cilindro de aluminio de partida.

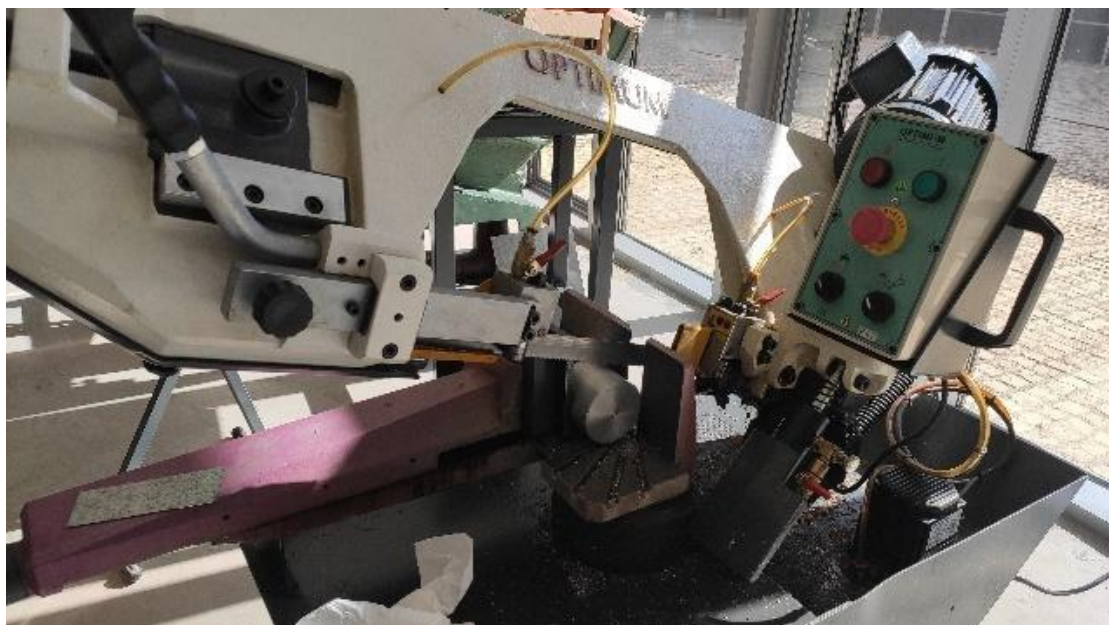


Figura 59. Corte por sierra del material necesario.

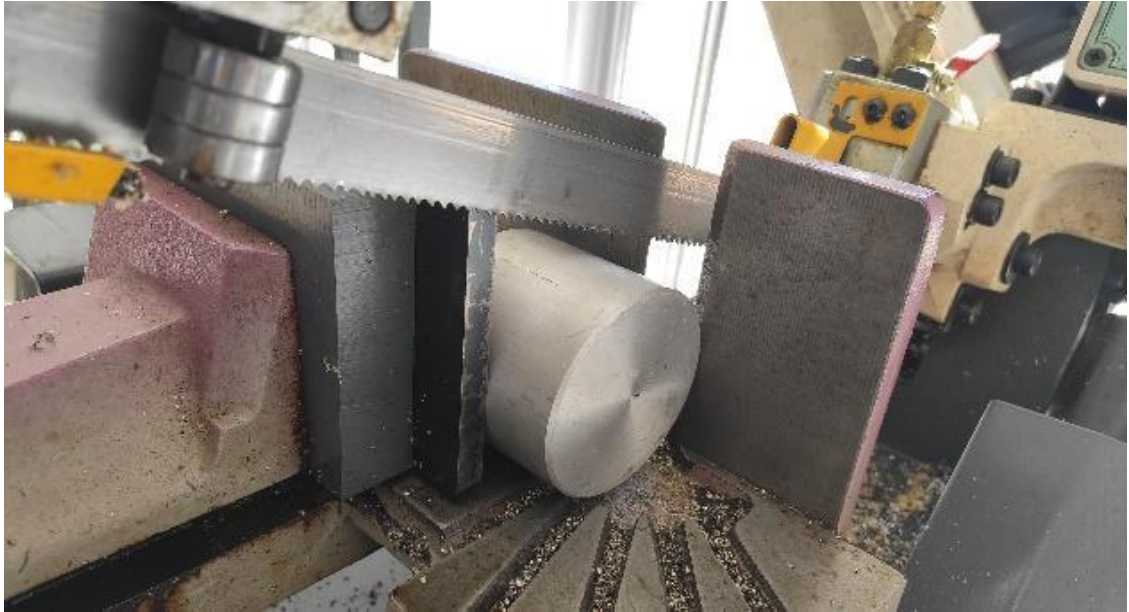


Figura 60. Corte por sierra del material necesario.

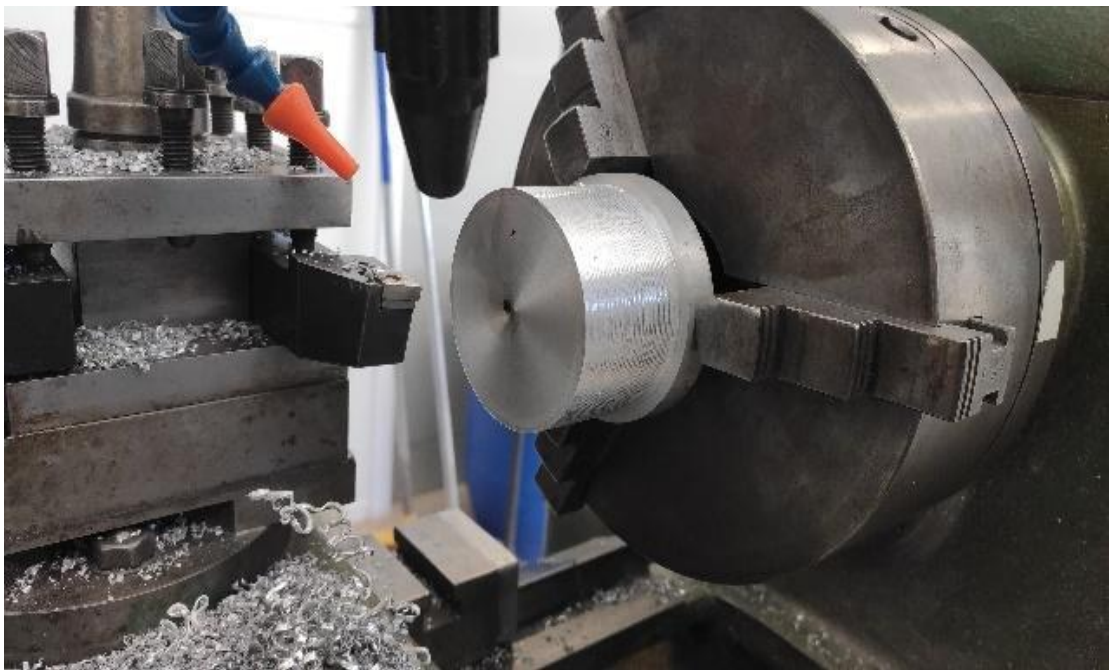


Figura 61. Eliminación de material hasta obtener el diámetro adecuado.



Figura 62. Eliminación de material hasta obtener el diámetro adecuado.



Figura 63. Pieza para introducir en CNC. Los poros que se aprecian son defectos encontrados en el material disponible.

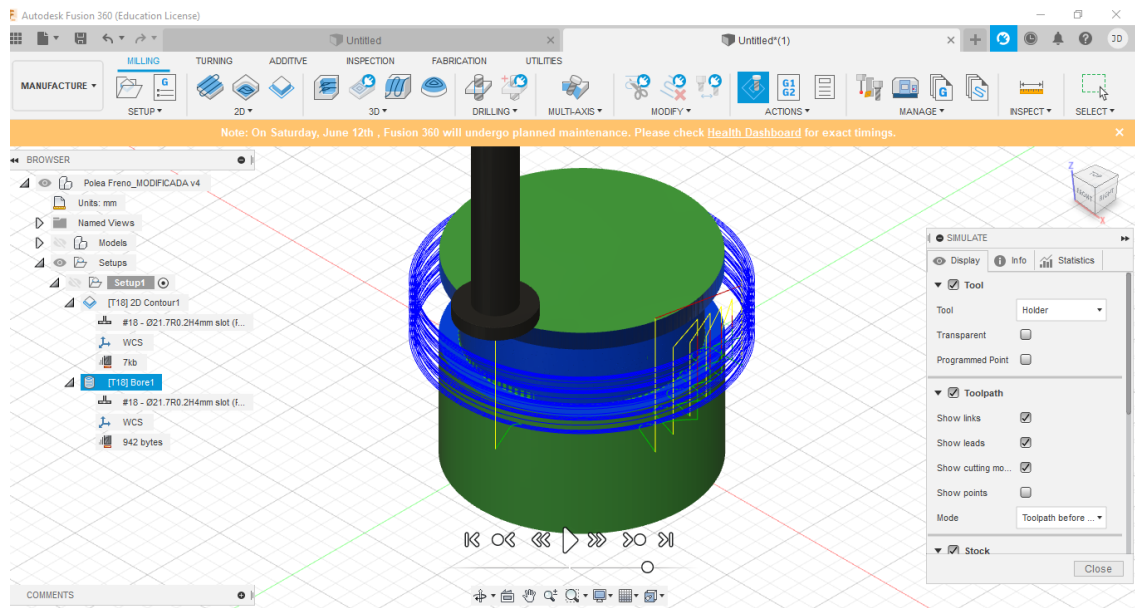


Figura 64. Simulación del mecanizado de la parte lateral.



Figura 65. Mecanizado en CNC de la parte lateral.



Figura 66. Polea de freno obtenida tras finalizar los procesos de fabricación.

5.2.5. Álabe distribuidor

La fabricación del álabe distribuidor se ha realizado en aluminio y el proceso seguido es similar a los descritos anteriormente. Se ha partido del archivo CAD y debido a la geometría del álabe se ha simulado el proceso de fabricación en Fusion 360 para facilitar el mecanizado de la pieza mediante control numérico.

El primer proceso en la fabricación del álabe ha sido la realización de un taladrado de diámetro 4 mm para la unión con el eje. Para ello se ha empleado una herramienta de metal duro de 4 mm de diámetro y las condiciones de la tabla 8.

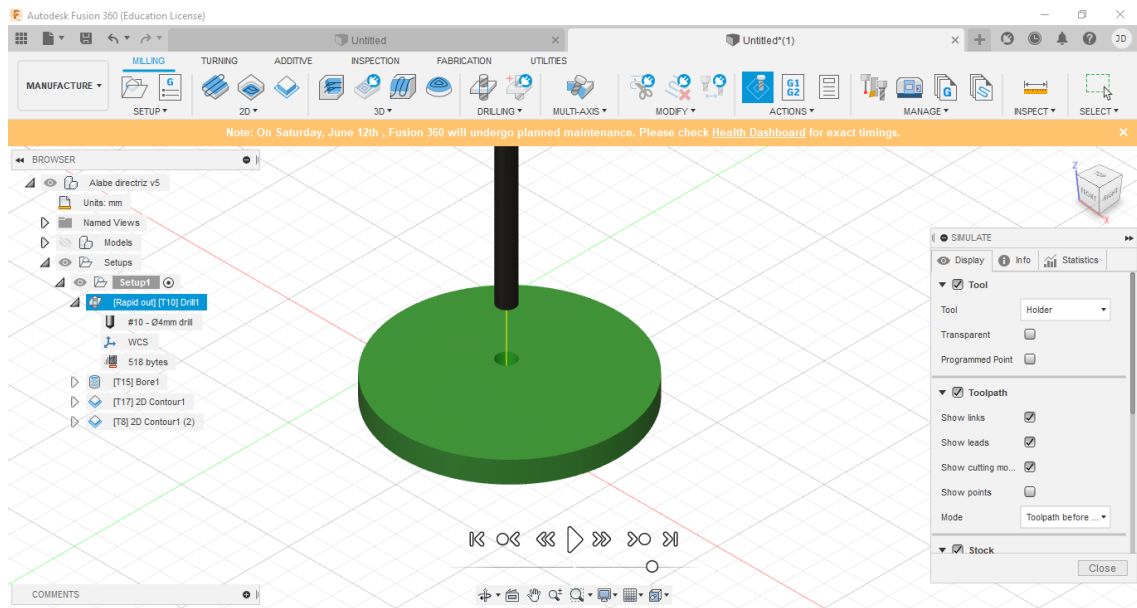


Figura 67. Taladrado de álabe para unión con su respectivo eje.

El siguiente proceso en la fabricación consiste en realizar el contorno del álabe mediante una herramienta de metal duro de 20 mm de diámetro y las condiciones de la tabla 4 para aluminios. Finalmente se ha realizado una operación de acabado para un mejor resultado superficial.

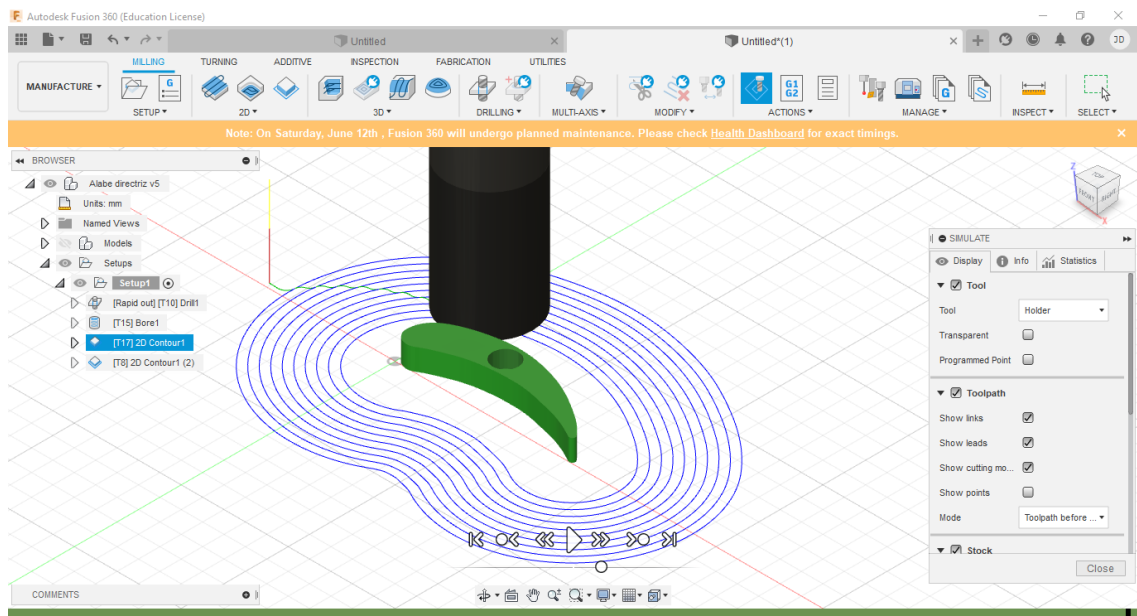


Figura 68. Proceso de contorneado del álabe en varias pasadas.



Figura 69. Álabes obtenidos tras el proceso de fabricación.



Figura 70. Álabes obtenido tras el proceso de fabricación.

5.2.6. Elementos del distribuidor

Para la fabricación de las piezas que permiten la apertura y cierre de los álabes del distribuidor, así como del anillo circular donde van alojadas se ha empleado el proceso de corte por chorro de agua. Para ello es necesario obtener los planos de dichas piezas en formato DXF, ya que la interfaz de la máquina de corte por agua trabaja con este tipo de formato. Una vez introducido el archivo se carga en la interfaz y se preparan las piezas para proceder a su corte.

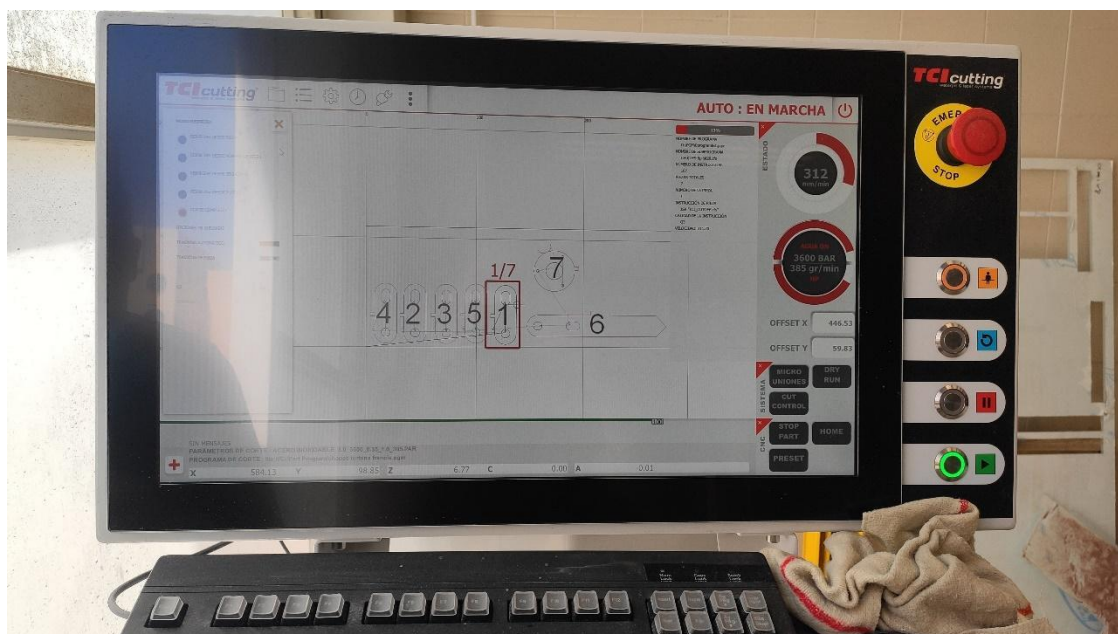


Figura 71. Interfaz gráfica de la máquina de corte por agua.



Figura 72. Anillo metálico del distribuidor cortado mediante chorro por agua.

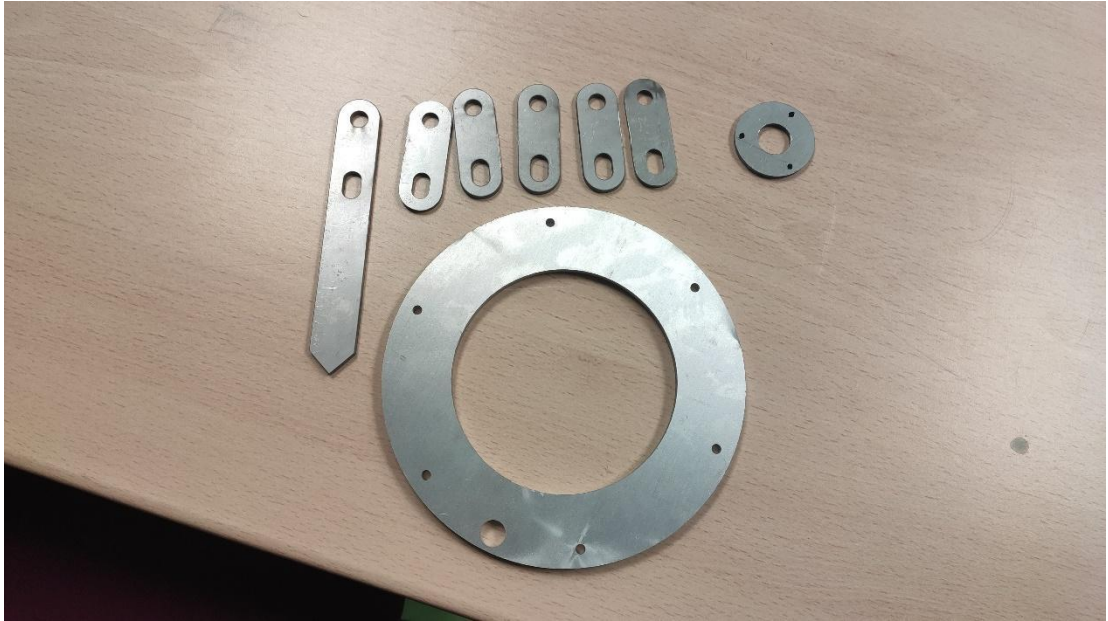


Figura 73. Piezas del distribuidor obtenidas mediante corte por agua.

Una vez fabricadas todas las piezas necesarias para el funcionamiento de la turbina se ha procedido al montaje para poder ensayar la turbina.

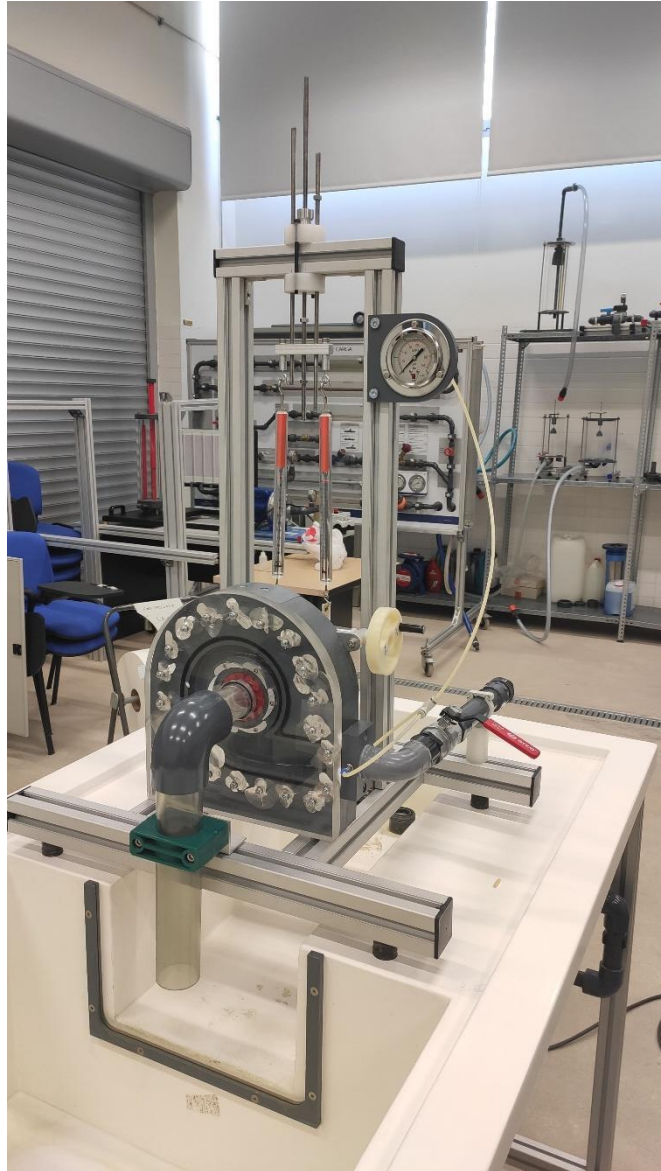


Figura 74. Montaje final de la turbina Francis.

5.3. CARACTERIZACIÓN

La caracterización de la turbina nos permite obtener las curvas de par mecánico, caudal, potencia útil, potencia hidráulica y rendimiento en función de la velocidad de giro. Para ello se configura la turbina para diferentes posiciones de apertura del distribuidor y en cada posición se experimenta con varios caudales.

Para la obtención de dichas curvas se ha de obtener una serie de datos de caudal, velocidad de giro, presión y fuerza de frenado. Un esquema simplificado del banco de ensayos se muestra en la figura 75.

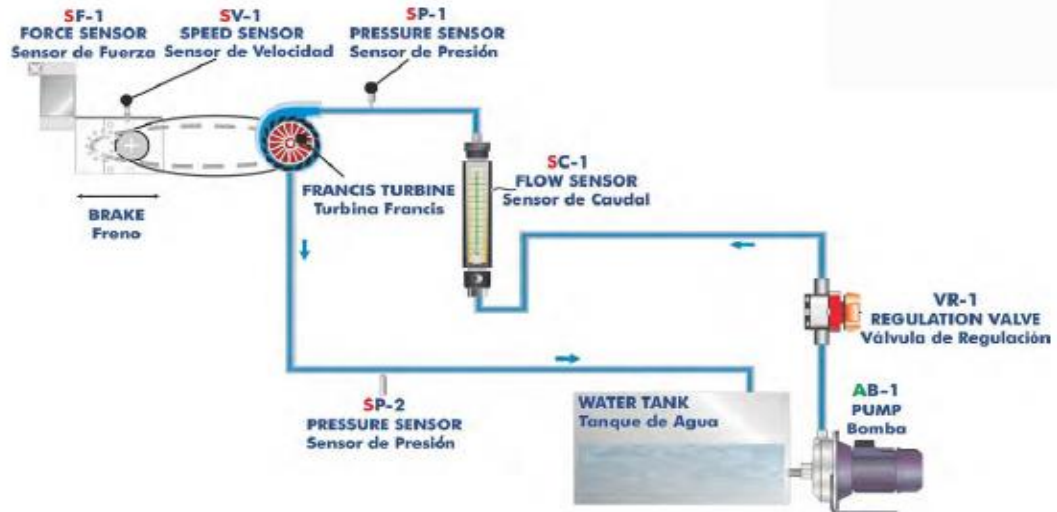


Figura 75. Esquema de la instalación del banco de ensayos.

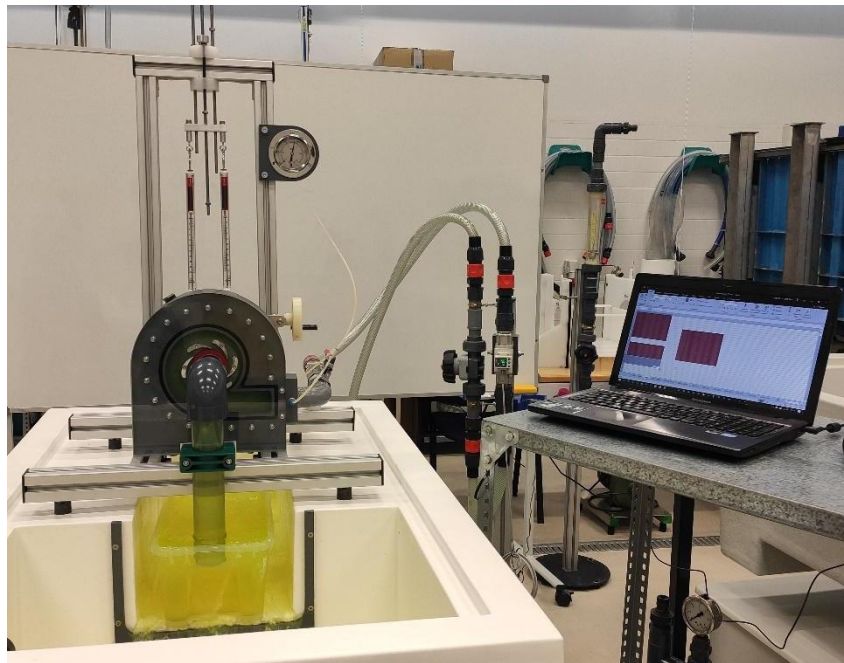


Figura 76. Banco de ensayos con la turbina Francis en funcionamiento.

Una vez obtenidos los datos se emplean las ecuaciones de par mecánico, potencia útil e hidráulica y rendimiento para realizar las curvas características.

$$W_u = \Gamma \Omega$$

$$W_n = \rho g Q H_n$$

$$\eta = \frac{W_u}{W_n} 100$$

5.3.1. Resultados de la caracterización

5.3.1.1. 100% Apertura del distribuidor

Los datos obtenidos para una apertura del distribuidor del 100 % y diferentes caudales se muestran a continuación. Los datos resaltados en amarillo corresponden al valor de máximo rendimiento.



Figura 77. 100% apertura del distribuidor.

Dato	rpm	F1 (N)	F2 (N)	P (bar)	Q (l/min)
1	3586	0	0	0,54	58
2	3480	0,2	0	0,52	58
3	3400	0,4	0	0,48	58
4	3230	0,7	0	0,43	59
5	3125	0,9	0,1	0,42	59
6	2990	1,2	0,1	0,4	60
7	2880	1,4	0,2	0,37	61
8	2690	1,6	0,2	0,32	61
9	2480	2	0,2	0,3	62
10	2300	2,2	0,2	0,27	62
11	2100	2,5	0,3	0,24	63
12	1940	2,7	0,4	0,22	63
13	1830	2,9	0,4	0,2	63
14	1650	3,1	0,4	0,19	64
15	1480	3,3	0,5	0,18	64
16	1340	3,5	0,6	0,16	64
17	1180	3,7	0,7	0,15	64
18	1030	3,9	0,7	0,14	65
19	840	4,1	0,8	0,14	65
20	440	4,3	0,8	0,12	65
21	195	4,4	0,8	0,12	65
22	0	4,3	1,2	0,12	65

Tabla 16. Datos para una apertura del distribuidor del 100% y Q1.

Γ (Nm)	Q(m ³ /s)	W _T (W)	W _n (W)	η (%)
0,00	0,00	0,00	52,20	0,00
0,01	0,00	2,19	50,27	4,35
0,01	0,00	4,27	46,40	9,21
0,02	0,00	7,10	42,28	16,80
0,02	0,00	7,85	41,30	19,02
0,03	0,00	10,33	40,00	25,83
0,04	0,00	10,86	37,62	28,86
0,04	0,00	11,83	32,53	36,37
0,05	0,00	14,02	31,00	45,24
0,06	0,00	14,45	27,90	51,80
0,07	0,00	14,51	25,20	57,60
0,07	0,00	14,02	23,10	60,68
0,08	0,00	14,37	21,00	68,44
0,08	0,00	14,00	20,27	69,06
0,08	0,00	13,02	19,20	67,81
0,09	0,00	12,21	17,07	71,53
0,09	0,00	11,12	16,00	69,51
0,10	0,00	10,35	15,17	68,27
0,10	0,00	8,71	15,17	57,42
0,11	0,00	4,84	13,00	37,22
0,11	0,00	2,21	13,00	16,96
0,09	0,00	0,00	13,00	0,00

Tabla 17. Resultados para una apertura de 100% y Q1

Dato	rpm	F1 (N)	F2 (N)	P (bar)	Q (l/min)
1	3000	0	0	0,37	49
2	2800	0,2	0	0,31	49
3	2700	0,3	0	0,29	50
4	2540	0,5	0	0,26	50
5	2400	0,7	0,1	0,23	51
6	2280	0,9	0,1	0,2	51
7	2120	1,1	0,2	0,18	51
8	2000	1,3	0,2	0,17	52
9	1860	1,4	0,2	0,15	52
10	1670	1,6	0,3	0,13	52
11	1480	1,8	0,3	0,12	53
12	1270	2	0,4	0,1	53
13	1080	2,1	0,4	0,075	53
14	900	2,3	0,4	0,065	53
15	700	2,4	0,4	0,06	54
16	450	2,6	0,4	0,05	54
17	0	2,7	0,6	0,03	54

Tabla 18. Datos para una apertura de 100% y Q2

Γ (Nm)	Q(m ³ /s)	W _T (W)	W _n (W)	η (%)
0,00	0,00	0,00	30,22	0,00
0,01	0,00	1,76	25,32	6,95
0,01	0,00	2,54	24,17	10,53
0,02	0,00	3,99	21,67	18,41
0,02	0,00	4,52	19,55	23,14
0,02	0,00	5,73	17,00	33,71
0,03	0,00	5,99	15,30	39,18
0,03	0,00	6,91	14,73	46,91
0,04	0,00	7,01	13,00	53,94
0,04	0,00	6,82	11,27	60,54
0,05	0,00	6,97	10,60	65,80
0,05	0,00	6,38	8,83	72,27
0,05	0,00	5,77	6,63	87,06
0,06	0,00	5,37	5,74	93,56
0,06	0,00	4,40	5,40	81,45
0,07	0,00	3,11	4,50	69,12
0,06	0,00	0,00	2,70	0,00

Tabla 19. Resultados para una apertura del distribuidor del 100% y Q2.

Dato	rpm	F1 (N)	F2 (N)	P (bar)	Q (l/min)
1	2190	0	0	0,16	41
2	2080	0,1	0	0,15	42
3	1960	0,2	0	0,13	42
4	1760	0,4	0	0,1	42
5	1560	0,6	0	0,075	42
6	1340	0,7	0,1	0,05	42
7	1170	0,9	0,1	0,045	43

Tabla 20. Datos para una apertura del distribuidor del 100% y Q3.

Γ (Nm)	Q (m ³ /s)	W_T (W)	W_n (W)	η (%)
0,00	0,00	0,00	10,93	0,00
0,00	0,00	0,65	10,50	6,22
0,01	0,00	1,23	9,10	13,53
0,01	0,00	2,21	7,00	31,60
0,02	0,00	2,94	5,25	56,01
0,02	0,00	2,53	3,50	72,17
0,02	0,00	2,94	3,23	91,18

Tabla 21. Resultados para una apertura del distribuidor del 100% y Q3.

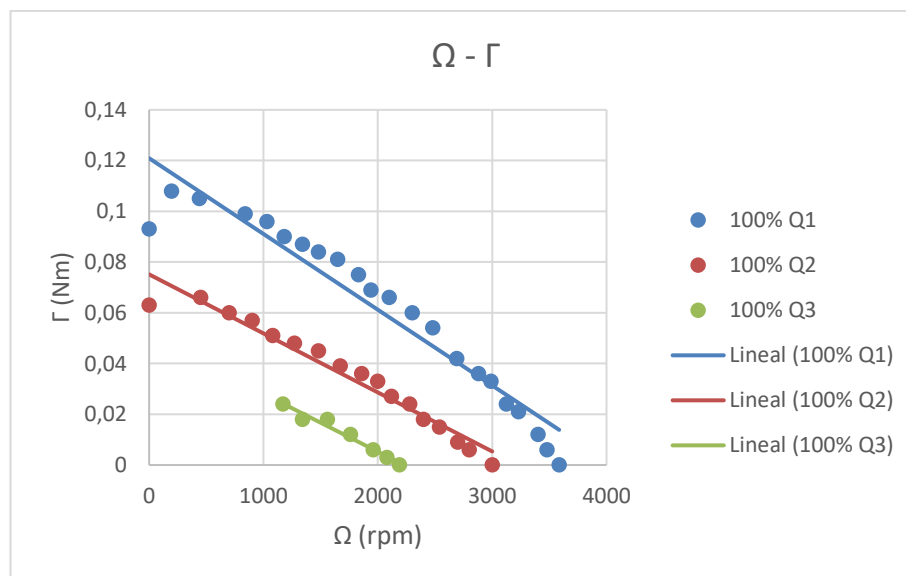


Gráfico 2. Par-Velocidad 100% apertura.

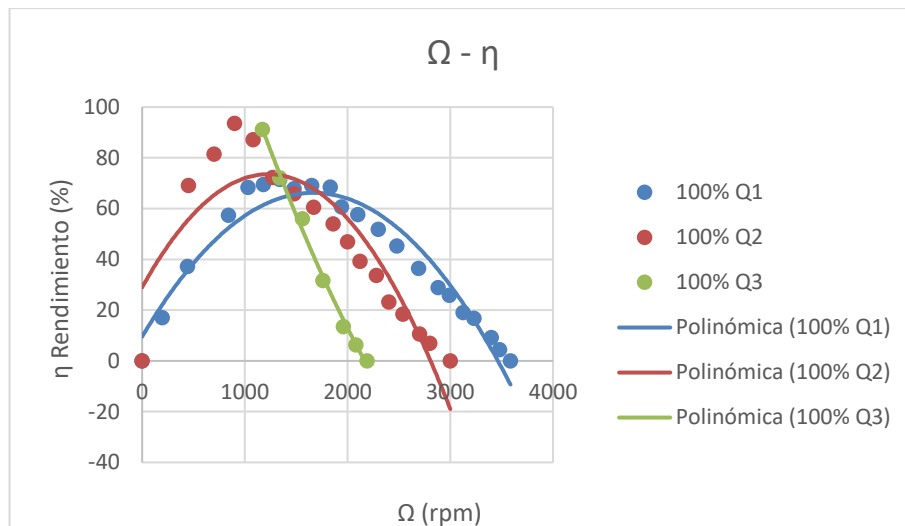


Gráfico 3. Rendimiento-velocidad 100% apertura

Figura 74. Gráfica rendimiento-velocidad

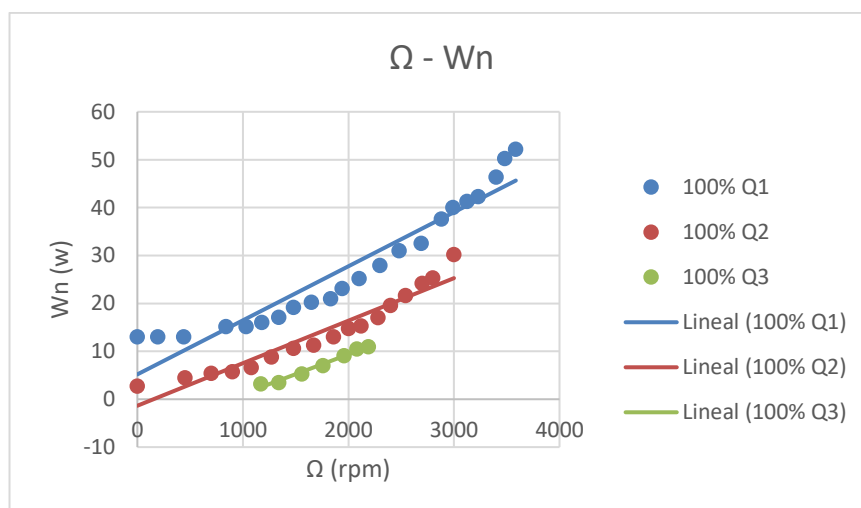


Gráfico 4. Potencia hidráulica-velocidad 100% apertura.

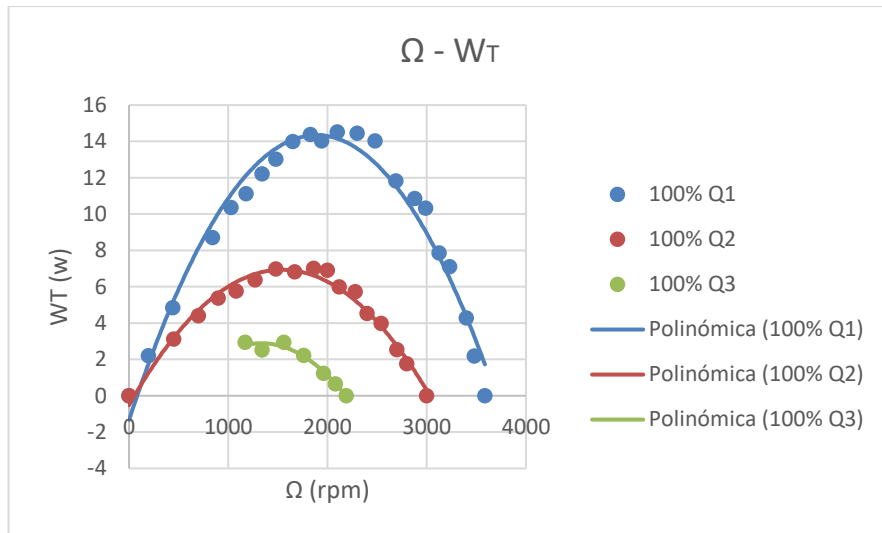


Gráfico 5. Potencia útil-velocidad 100% apertura

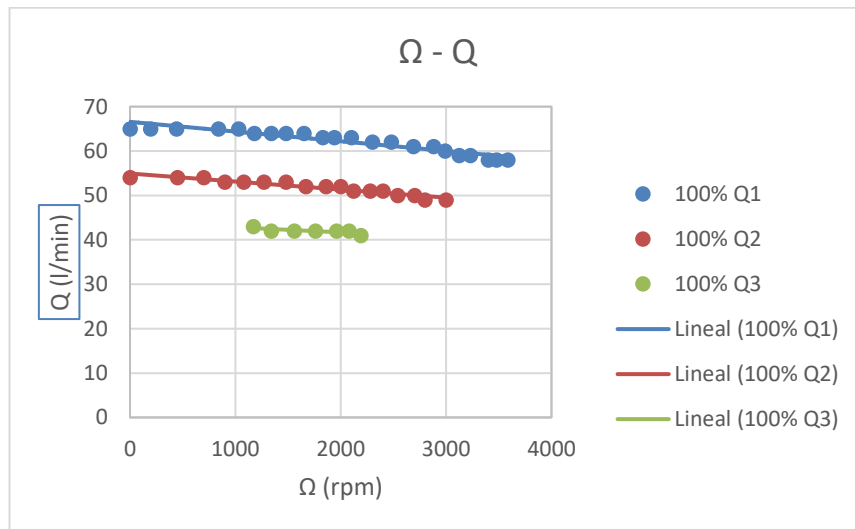


Gráfico 6. Caudal-velocidad 100% apertura

5.3.1.2. 50% Apertura del distribuidor

Los datos obtenidos para una apertura del 50% del distribuidor se muestran a continuación:



Figura 78. 50% de apertura del distribuidor.

Dato	rpm	F1 (N)	F2 (N)	P (bar)	Q (l/min)
1	3970	0	0	0,73	53
2	3820	0,3	0	0,7	53
3	3710	0,5	0	0,65	54
4	3570	0,9	0,1	0,62	55
5	3470	1,1	0,1	0,59	55
6	3330	1,3	0,1	0,56	56
7	3250	1,5	0,1	0,54	57
8	3130	1,7	0,1	0,51	57
9	3020	1,9	0,2	0,49	58
10	2940	2,1	0,2	0,47	58
11	2830	2,3	0,2	0,45	59
12	2700	2,5	0,2	0,43	59
13	2580	2,7	0,2	0,4	60
14	2450	2,9	0,2	0,39	60
15	2320	3,1	0,3	0,37	60
16	2200	3,2	0,3	0,36	61
17	2070	3,4	0,4	0,34	61
18	1920	3,6	0,4	0,32	62
19	1800	3,7	0,4	0,3	62
20	1700	3,9	0,5	0,3	62
21	1630	4	0,6	0,29	62
22	1530	4,2	0,6	0,28	62
23	1420	4,3	0,7	0,27	62
24	1300	4,5	0,8	0,26	63
25	1220	4,6	0,9	0,25	63
26	1030	4,9	0,9	0,23	63
27	750	5,1	0,9	0,22	63
28	510	5,3	0,9	0,2	63
29	170	5,4	0,9	0,2	63
30	0	5,6	1	0,2	64

Tabla 22. Datos para una apertura del distribuidor del 50% y Q1.

Γ (Nm)	Q(m ³ /s)	W _T (W)	W _n (W)	η (%)
0,00	0,00	0,00	64,48	0,00
0,01	0,00	3,60	61,83	5,82
0,02	0,00	5,83	58,50	9,96
0,02	0,00	8,97	56,83	15,79
0,03	0,00	10,90	54,08	20,16
0,04	0,00	12,55	52,27	24,02
0,04	0,00	14,29	51,30	27,86
0,05	0,00	15,73	48,45	32,47
0,05	0,00	16,13	47,37	34,05
0,06	0,00	17,55	45,43	38,63
0,06	0,00	18,67	44,25	42,19
0,07	0,00	19,51	42,28	46,14
0,08	0,00	20,26	40,00	50,66
0,08	0,00	20,78	39,00	53,29
0,08	0,00	20,41	37,00	55,16
0,09	0,00	20,04	36,60	54,76
0,09	0,00	19,51	34,57	56,44
0,10	0,00	19,30	33,07	58,37
0,10	0,00	18,66	31,00	60,20
0,10	0,00	18,16	31,00	58,58
0,10	0,00	17,41	29,97	58,10
0,11	0,00	17,30	28,93	59,81
0,11	0,00	16,06	27,90	57,56
0,11	0,00	15,11	27,30	55,35
0,11	0,00	14,18	26,25	54,02
0,12	0,00	12,94	24,15	53,60
0,13	0,00	9,90	23,10	42,84
0,13	0,00	7,05	21,00	33,57
0,14	0,00	2,40	21,00	11,44
0,14	0,00	0,00	21,33	0,00

Tabla 23. Resultados para una apertura de 50% y Q1.

Dato	rpm	F1 (N)	F2 (N)	P (bar)	Q (l/min)
1	3700	0	0	0,62	49
2	3600	0,1	0	0,59	49
3	3500	0,4	0	0,56	49
4	3400	0,6	0	0,54	50
5	3300	0,7	0,1	0,52	50
6	3200	0,9	0,1	0,49	51
7	3100	1,1	0,1	0,47	51
8	3000	1,3	0,1	0,44	52
9	2900	1,5	0,2	0,42	52
10	2800	1,6	0,2	0,4	52
11	2700	1,7	0,2	0,38	53
12	2600	1,9	0,2	0,37	53
13	2500	2,1	0,2	0,34	53
14	2400	2,2	0,3	0,32	53
15	2280	2,4	0,3	0,31	54
16	2100	2,6	0,4	0,29	54
17	1980	2,7	0,4	0,27	54
18	1820	2,9	0,4	0,26	55
19	1700	3,1	0,5	0,24	55
20	1570	3,2	0,5	0,22	56
21	1430	3,3	0,6	0,21	56
22	1300	3,5	0,6	0,2	56
23	1170	3,6	0,6	0,19	56
24	1050	3,7	0,6	0,18	56
25	850	3,9	0,6	0,17	57
26	640	4	0,6	0,16	57
27	500	4,1	0,6	0,15	57
28	250	4,2	0,6	0,14	57
29	0	4,3	0,7	0,14	57

Tabla 24. Datos para una apertura del distribuidor del 50% y Q2.

Γ (Nm)	Q (m ³ /s)	W _T (W)	W _n (W)	η (%)
0,00	0,00	0,00	50,63	0,00
0,00	0,00	1,13	48,18	2,35
0,01	0,00	4,40	45,73	9,62
0,02	0,00	6,41	45,00	14,24
0,02	0,00	6,22	43,33	14,35
0,02	0,00	8,04	41,65	19,31
0,03	0,00	9,74	39,95	24,38
0,04	0,00	11,31	38,13	29,66
0,04	0,00	11,84	36,40	32,54
0,04	0,00	12,32	34,67	35,52
0,05	0,00	12,72	33,57	37,91
0,05	0,00	13,89	32,68	42,49
0,06	0,00	14,92	30,03	49,69
0,06	0,00	14,33	28,27	50,68
0,06	0,00	15,04	27,90	53,91
0,07	0,00	14,51	26,10	55,61
0,07	0,00	14,31	24,30	58,88
0,08	0,00	14,29	23,83	59,98
0,08	0,00	13,89	22,00	63,12
0,08	0,00	13,32	20,53	64,86
0,08	0,00	12,13	19,60	61,89
0,09	0,00	11,84	18,67	63,45
0,09	0,00	11,03	17,73	62,18
0,09	0,00	10,23	16,80	60,87
0,10	0,00	8,81	16,15	54,56
0,10	0,00	6,84	15,20	44,97
0,11	0,00	5,50	14,25	38,58
0,11	0,00	2,83	13,30	21,26
0,11	0,00	0,00	13,30	0,00

Tabla 25. Resultados para una apertura del distribuidor del 50% y Q2.

Dato	rpm	F1 (N)	F2 (N)	P (bar)	Q (l/min)
1	2900	0	0	0,36	41
2	2780	0,1	0	0,34	42
3	2680	0,3	0	0,31	42
4	2560	0,4	0	0,29	42
5	2370	0,7	0	0,26	43
6	2260	0,8	0,1	0,23	43
7	2130	1	0,1	0,21	43
8	1950	1,2	0,2	0,19	43
9	1850	1,3	0,2	0,18	43
10	1700	1,5	0,2	0,16	44
11	1580	1,6	0,2	0,14	44
12	1400	1,7	0,2	0,13	44
13	1200	1,8	0,2	0,11	44
14	1070	1,9	0,2	0,1	44
15	880	2	0,3	0,075	44
16	710	2,1	0,3	0,06	44
17	480	2,2	0,3	0,05	44
18	0	2,4	0,4	0,05	44

Tabla 26. Datos para una apertura del distribuidor del 50% y Q3.

Γ (Nm)	Q(m ³ /s)	W _T (W)	W _n (W)	η (%)
0,00	0,00	0,00	24,60	0,00
0,00	0,00	0,87	23,80	3,67
0,01	0,00	2,53	21,70	11,64
0,01	0,00	3,22	20,30	15,85
0,02	0,00	5,21	18,63	27,97
0,02	0,00	4,97	16,48	30,15
0,03	0,00	6,02	15,05	40,02
0,03	0,00	6,13	13,62	44,99
0,03	0,00	6,39	12,90	49,56
0,04	0,00	6,94	11,73	59,17
0,04	0,00	6,95	10,27	67,69
0,05	0,00	6,60	9,53	69,20
0,05	0,00	6,03	8,07	74,78
0,05	0,00	5,71	7,33	77,93
0,05	0,00	4,70	5,50	85,45
0,05	0,00	4,01	4,40	91,25
0,06	0,00	2,87	3,67	78,14
0,06	0,00	0,00	3,67	0,00

Tabla 27. Resultados para una apertura del distribuidor del 50% y Q3.

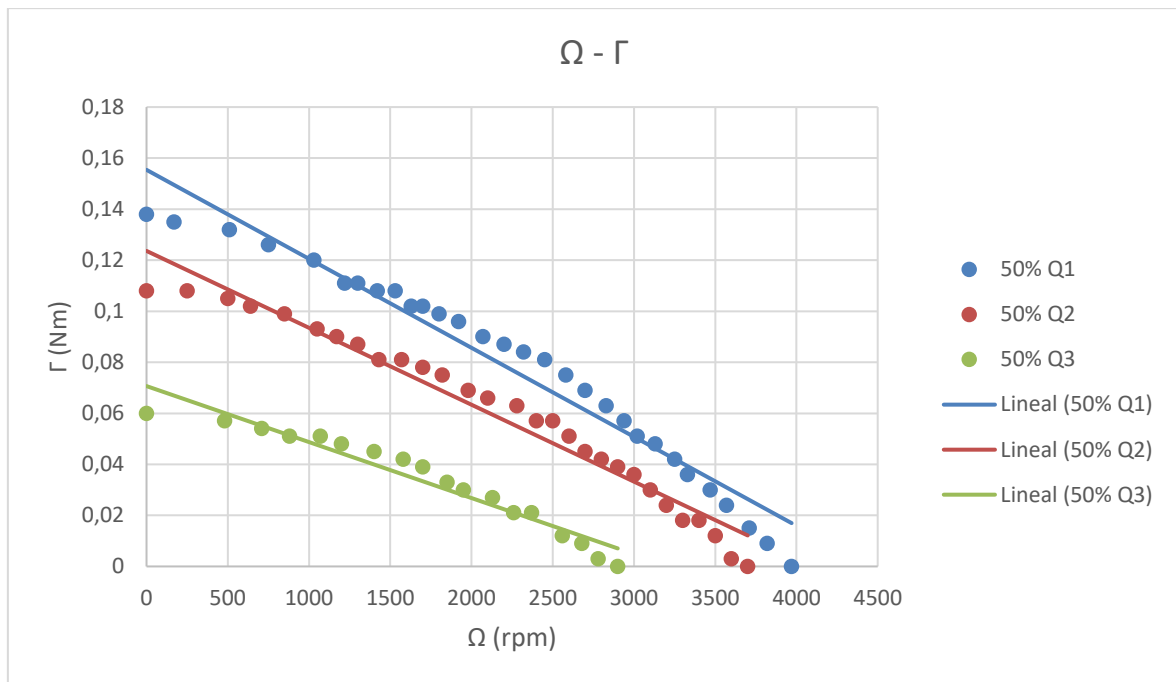


Gráfico 7. Par mecánico-velocidad 50% apertura.

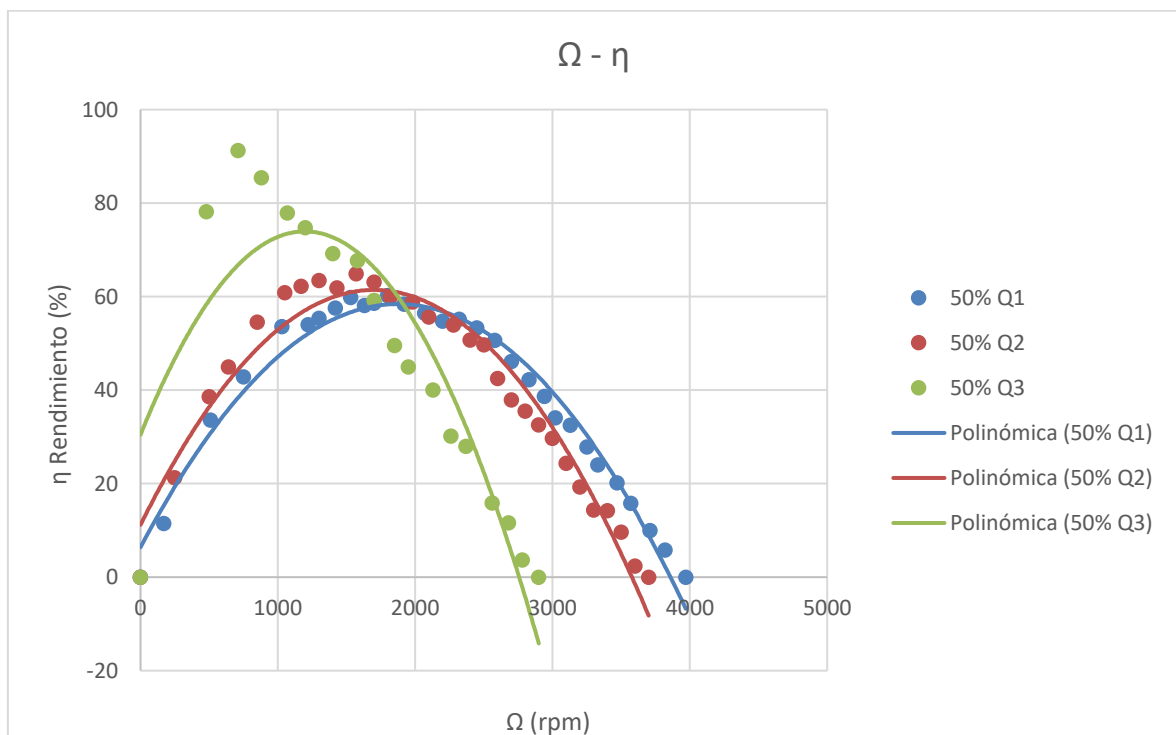


Gráfico 8. Rendimiento-velocidad 50% apertura.

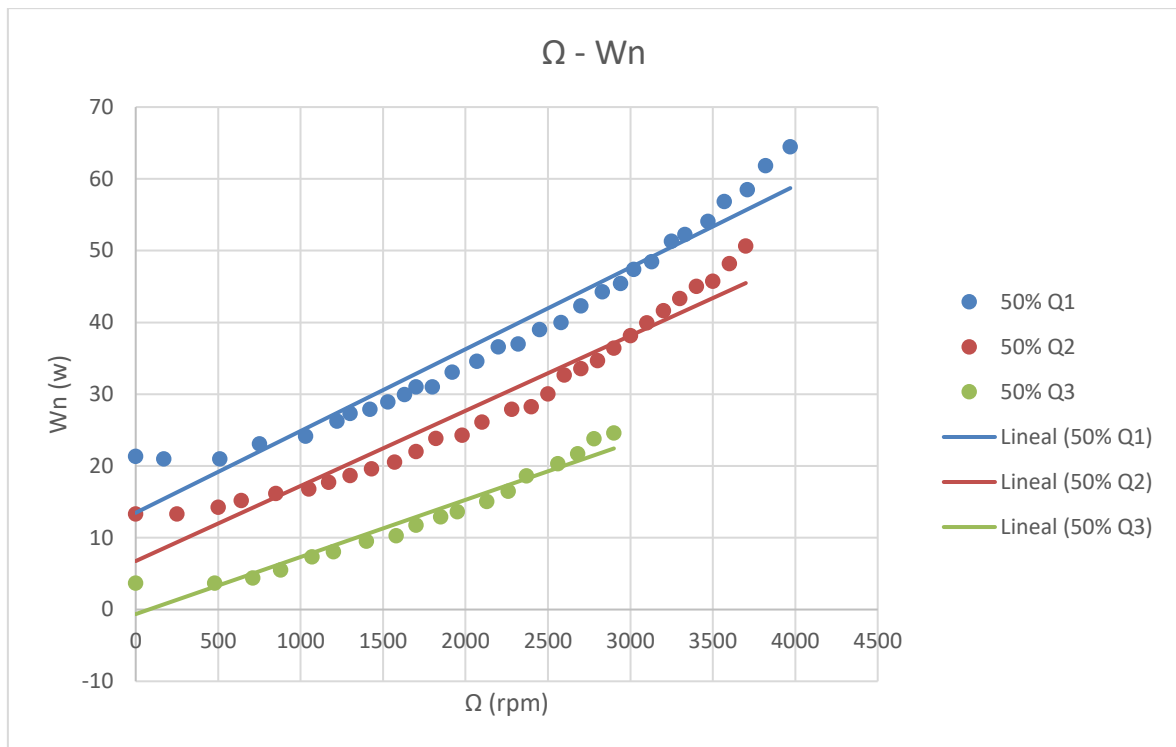


Gráfico 9. Potencia hidráulica-velocidad 50% apertura.

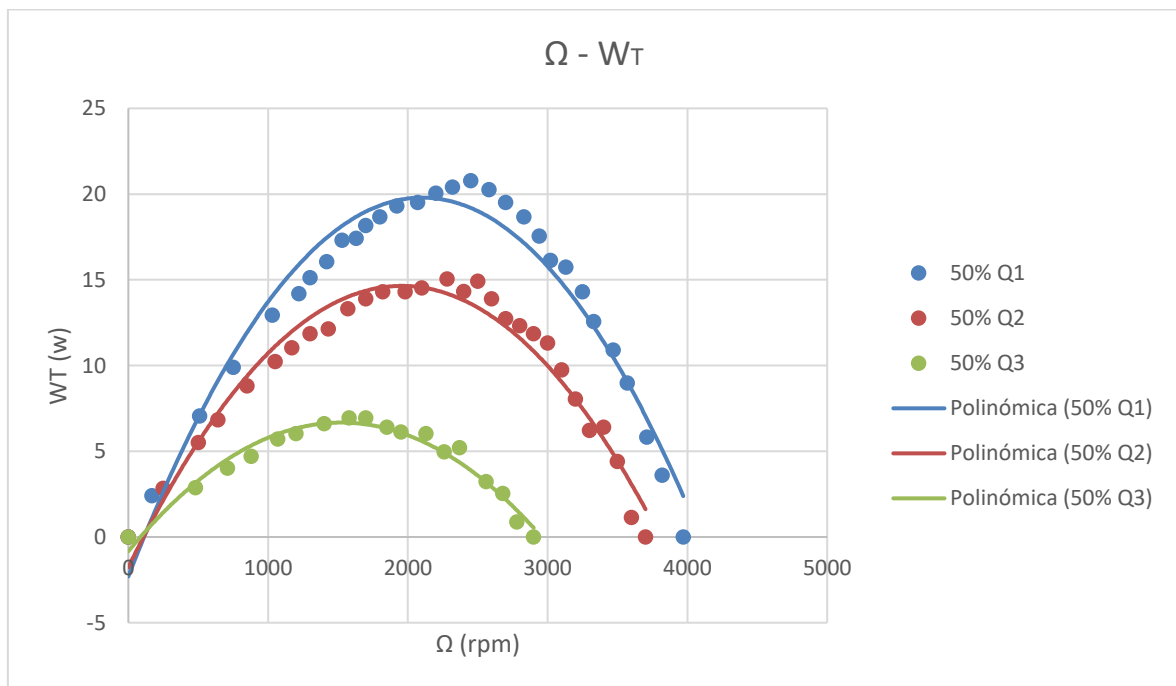


Gráfico 10. Potencia útil-velocidad 50% apertura.

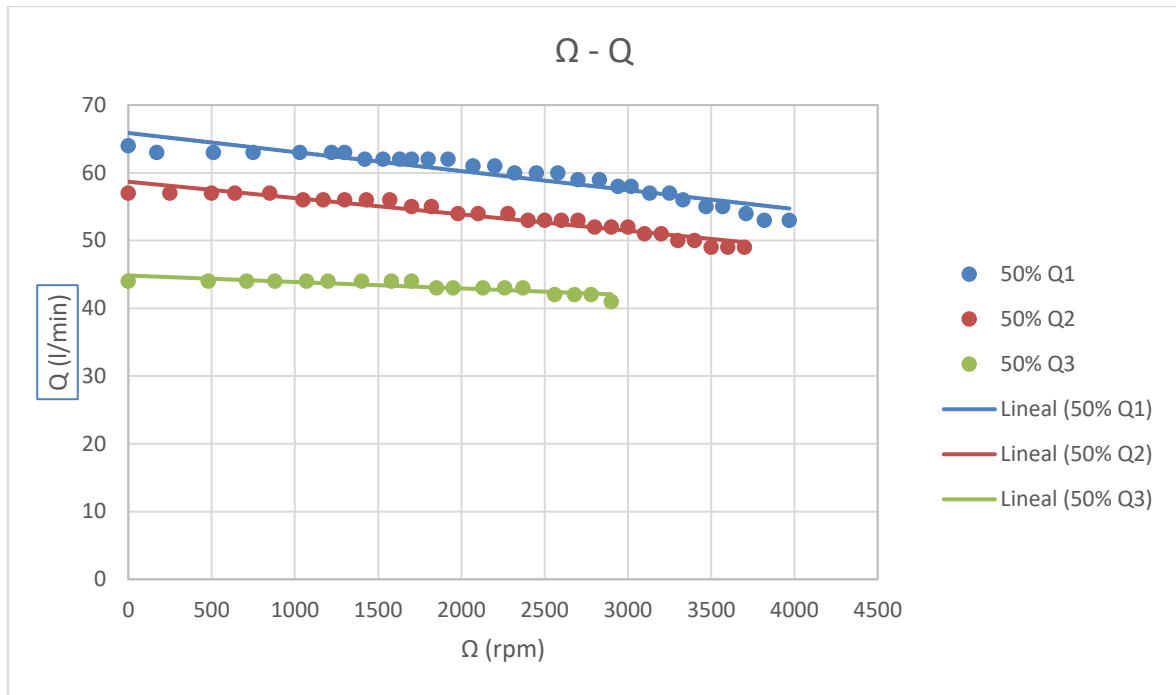


Gráfico 11. Caudal-velocidad 50% apertura.

5.3.1.3. 25% Apertura del distribuidor

Los datos obtenidos para una apertura del distribuidor del 25% se muestran a continuación:



Figura 79. 25% de apertura del distribuidor.

Dato	rpm	F1 (N)	F2 (N)	P (bar)	Q (l/min)
1	4080	0	0	0,88	49
2	3930	0,4	0	0,84	49
3	3860	0,6	0	0,83	50
4	3740	0,9	0	0,8	51
5	3640	1,1	0	0,77	51
6	3540	1,3	0,1	0,74	51
7	3420	1,5	0,1	0,72	52
8	3300	1,8	0,1	0,7	53
9	3190	2	0,2	0,67	53
10	3030	2,3	0,2	0,64	53
11	2900	2,5	0,2	0,62	54
12	2800	2,7	0,2	0,6	55
13	2700	2,9	0,3	0,6	55
14	2600	3	0,3	0,58	55
15	2500	3,1	0,3	0,56	56
16	2400	3,3	0,3	0,54	56
17	2300	3,4	0,4	0,52	56
18	2190	3,6	0,4	0,52	57
19	2100	3,7	0,4	0,51	57
20	2000	3,8	0,4	0,5	57
21	1900	4	0,5	0,49	57
22	1800	4,1	0,5	0,48	58
23	1700	4,2	0,6	0,48	58
24	1600	4,4	0,6	0,46	58
25	1500	4,7	0,7	0,45	59
26	1400	4,8	0,8	0,44	59
27	1300	4,9	0,9	0,44	59
28	1200	5	1	0,42	59
29	1080	5,2	1	0,42	59
30	870	5,4	1	0,4	59
31	680	5,6	1	0,39	59
32	290	5,8	1	0,38	60
33	0	6,1	1	0,38	60

Tabla 28 . Datos para una apertura del distribuidor del 25 y Q1.

Γ (Nm)	Q (m ³ /s)	W_T (W)	W_n (W)	η (%)
0,00	0,00	0,00	71,87	0,00
0,01	0,00	4,94	68,60	7,20
0,02	0,00	7,28	69,17	10,52
0,03	0,00	10,57	68,00	15,55
0,03	0,00	12,58	65,45	19,22
0,04	0,00	13,35	62,90	21,22
0,04	0,00	15,04	62,40	24,11
0,05	0,00	17,62	61,83	28,50
0,05	0,00	18,04	59,18	30,48
0,06	0,00	19,99	56,53	35,36
0,07	0,00	20,95	55,80	37,55
0,08	0,00	21,99	55,00	39,98
0,08	0,00	22,05	55,00	40,10
0,08	0,00	22,05	53,17	41,48
0,08	0,00	21,99	52,27	42,07
0,09	0,00	22,62	50,40	44,88
0,09	0,00	21,68	48,53	44,66
0,10	0,00	22,02	49,40	44,57
0,10	0,00	21,77	48,45	44,94
0,10	0,00	21,36	47,50	44,97
0,11	0,00	20,89	46,55	44,88
0,11	0,00	20,36	46,40	43,87
0,11	0,00	19,23	46,40	41,44
0,11	0,00	19,10	44,47	42,96
0,12	0,00	18,85	44,25	42,60
0,12	0,00	17,59	43,27	40,66
0,12	0,00	16,34	43,27	37,76
0,12	0,00	15,08	41,30	36,51
0,13	0,00	14,25	41,30	34,50
0,13	0,00	12,03	39,33	30,57
0,14	0,00	9,83	38,35	25,62
0,14	0,00	4,37	38,00	11,51
0,15	0,00	0,00	38,00	0,00

Tabla 29. Resultados para una apertura del distribuidor del 25 y Q1.

Dato	rpm	F1 (N)	F2 (N)	P (bar)	Q (l/min)
1	3510	0	0	0,63	42
2	3370	0,3	0	0,6	42
3	3200	0,5	0	0,56	43
4	3100	0,7	0	0,54	43
5	3000	0,8	0	0,52	44
6	2900	1	0	0,5	44
7	2780	1,1	0,1	0,48	44
8	2700	1,3	0,1	0,46	45
9	2600	1,4	0,2	0,44	45
10	2500	1,5	0,2	0,42	45
11	2400	1,7	0,2	0,41	45
12	2300	1,8	0,2	0,4	45
13	2200	1,9	0,2	0,38	46
14	2100	2	0,2	0,37	46
15	1950	2,2	0,3	0,36	46
16	1800	2,3	0,3	0,33	46
17	1700	2,4	0,4	0,32	47
18	1600	2,5	0,4	0,31	47
19	1500	2,6	0,4	0,3	47
20	1400	2,7	0,4	0,29	47
21	1250	2,8	0,4	0,28	47
22	1110	2,9	0,4	0,28	47
23	1000	3	0,4	0,26	47
24	900	3	0,4	0,25	47
25	780	3,1	0,4	0,24	48
26	700	3,2	0,4	0,24	48
27	550	3,2	0,4	0,23	48
28	450	3,3	0,4	0,22	48
29	50	3,4	0,4	0,2	48
30	0	3,5	0,5	0,22	48

Tabla 30. Datos para una apertura del distribuidor del 25% y Q2.

Γ (Nm)	$Q(m^3/s)$	W_T (W)	$W_n(W)$	$\eta(\%)$
0,00	0,00	0,00	44,10	0,00
0,01	0,00	3,18	42,00	7,56
0,02	0,00	5,03	40,13	12,52
0,02	0,00	6,82	38,70	17,62
0,02	0,00	7,54	38,13	19,77
0,03	0,00	9,11	36,67	24,85
0,03	0,00	8,73	35,20	24,81
0,04	0,00	10,18	34,50	29,50
0,04	0,00	9,80	33,00	29,70
0,04	0,00	10,21	31,50	32,41
0,05	0,00	11,31	30,75	36,78
0,05	0,00	11,56	30,00	38,54
0,05	0,00	11,75	29,13	40,33
0,05	0,00	11,88	28,37	41,86
0,06	0,00	11,64	27,60	42,17
0,06	0,00	11,31	25,30	44,70
0,06	0,00	10,68	25,07	42,61
0,06	0,00	10,56	24,28	43,47
0,07	0,00	10,37	23,50	44,12
0,07	0,00	10,12	22,72	44,53
0,07	0,00	9,42	21,93	42,97
0,08	0,00	8,72	21,93	39,75
0,08	0,00	8,17	20,37	40,11
0,08	0,00	7,35	19,58	37,54
0,08	0,00	6,62	19,20	34,46
0,08	0,00	6,16	19,20	32,07
0,08	0,00	4,84	18,40	26,29
0,09	0,00	4,10	17,60	23,29
0,09	0,00	0,47	16,00	2,95
0,09	0,00	0,00	17,60	0,00

Tabla 31. Resultados para una apertura del distribuidor del 25% y Q2.

Dato	rpm	F1 (N)	F2 (N)	P (bar)	Q (l/min)
1	3020	0	0	0,46	38
2	2900	0,1	0	0,44	38
3	2800	0,3	0	0,42	38
4	2700	0,4	0	0,4	38
5	2600	0,5	0	0,38	39
6	2500	0,6	0	0,36	39
7	2400	0,7	0	0,34	39
8	2300	0,8	0	0,32	39
9	2200	0,9	0	0,31	39
10	2100	1	0,1	0,3	39
11	2000	1,2	0,1	0,28	39
12	1900	1,3	0,1	0,27	40
13	1800	1,4	0,1	0,26	40
14	1660	1,4	0,2	0,25	40
15	1460	1,6	0,2	0,22	40
16	1330	1,7	0,2	0,2	40
17	1170	1,8	0,2	0,19	40
18	1000	1,8	0,2	0,18	40
19	925	1,9	0,3	0,18	41
20	670	2,1	0,3	0,16	41
21	480	2,2	0,3	0,15	41
22	0	2,4	0,3	0,14	41

Tabla 32. Datos para una apertura del distribuidor del 25% y Q3.

Γ (Nm)	Q (m ³ /s)	W_T (W)	W_n (W)	η (%)
0,00	0,00	0,00	29,13	0,00
0,00	0,00	0,91	27,87	3,27
0,01	0,00	2,64	26,60	9,92
0,01	0,00	3,39	25,33	13,39
0,02	0,00	4,08	24,70	16,53
0,02	0,00	4,71	23,40	20,14
0,02	0,00	5,28	22,10	23,88
0,02	0,00	5,78	20,80	27,79
0,03	0,00	6,22	20,15	30,87
0,03	0,00	5,94	19,50	30,45
0,03	0,00	6,91	18,20	37,98
0,04	0,00	7,16	18,00	39,79
0,04	0,00	7,35	17,33	42,41
0,04	0,00	6,26	16,67	37,55
0,04	0,00	6,42	14,67	43,78
0,05	0,00	6,27	13,33	47,01
0,05	0,00	5,88	12,67	46,43
0,05	0,00	5,03	12,00	41,89
0,05	0,00	4,65	12,30	37,80
0,05	0,00	3,79	10,93	34,65
0,06	0,00	2,87	10,25	27,95
0,06	0,00	0,00	9,57	0,00

Tabla 33. Resultados para una apertura del distribuidor del 25% y Q3.

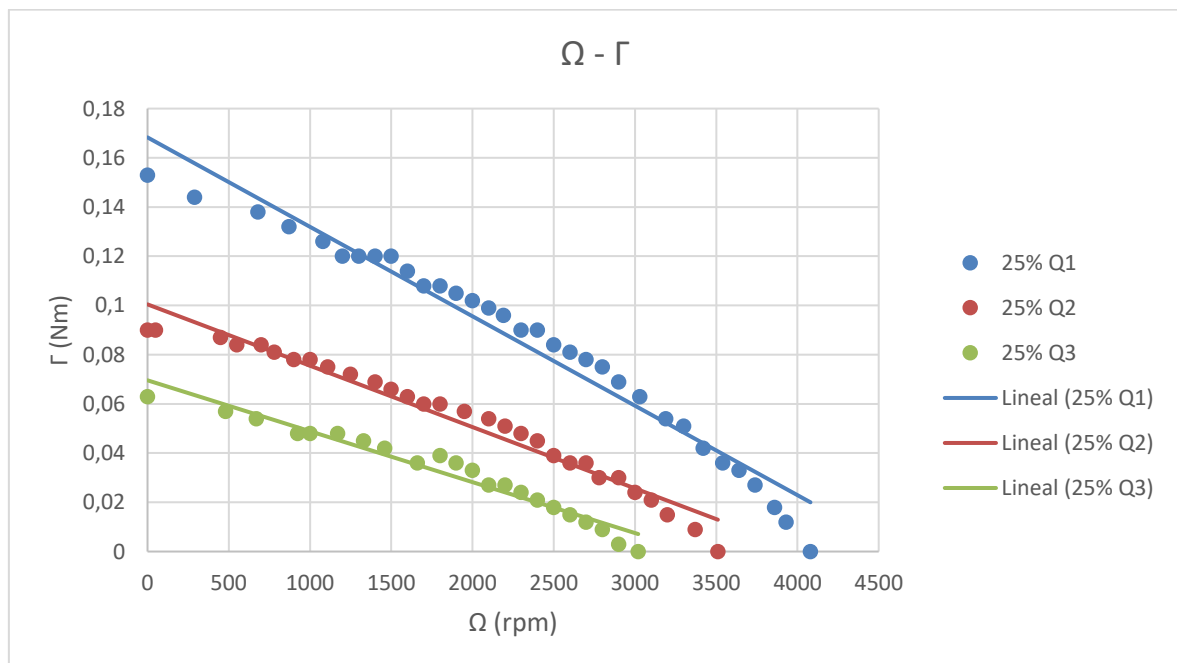


Gráfico 12. Par mecánico-velocidad 25% apertura.

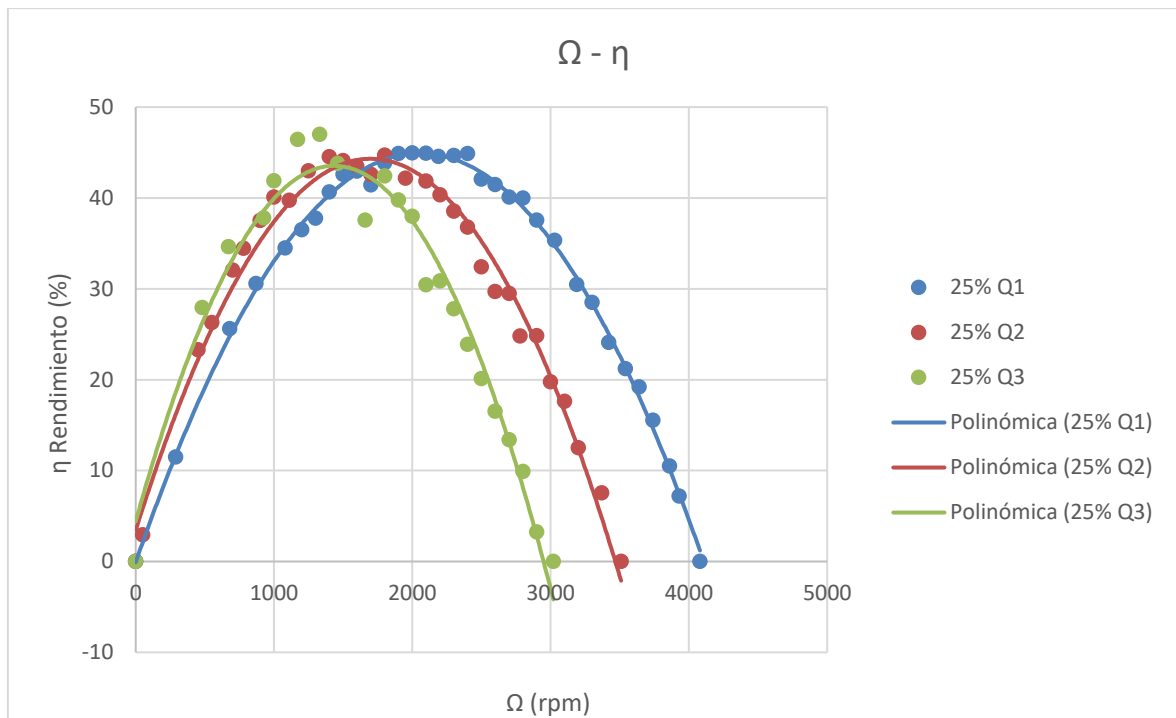


Gráfico 13. Rendimiento-velocidad 25% apertura.

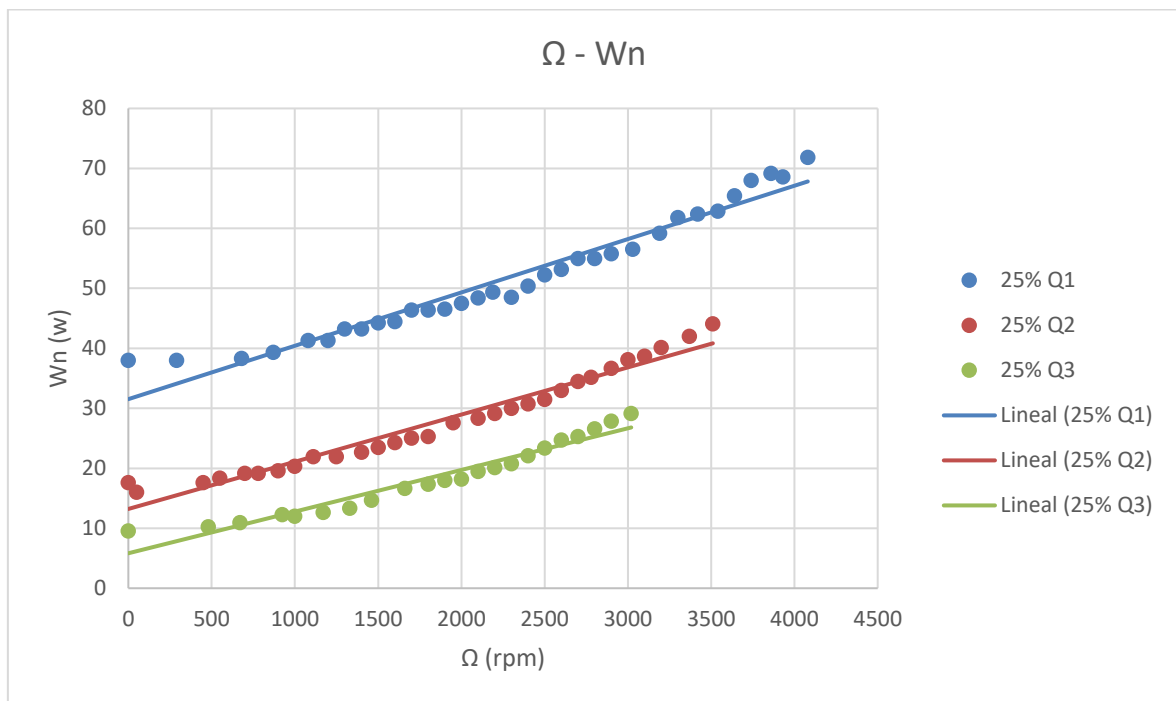


Gráfico 14. Potencia hidráulica-velocidad 25% apertura.

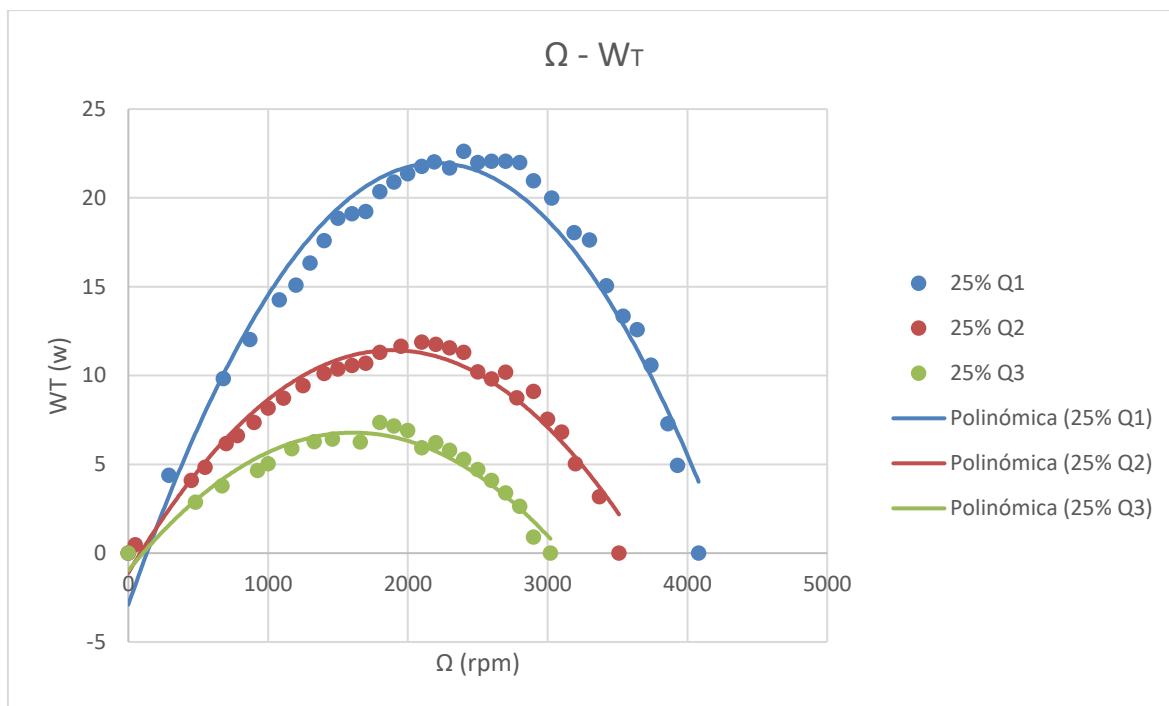


Gráfico 15. Potencia útil-velocidad 25% apertura.

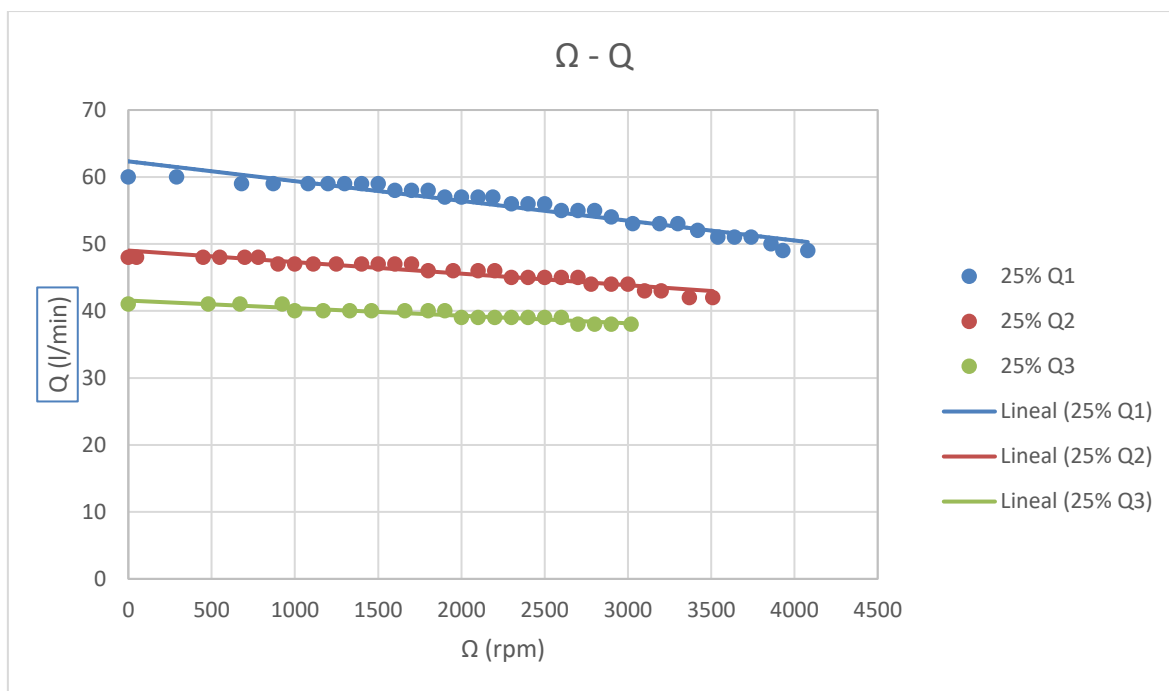


Gráfico 16. Caudal-velocidad 25% apertura.

6. CONCLUSIONES

Tras la realización del diseño, fabricación y caracterización de la turbina Francis se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- El estudio sobre las turbinas Francis ha permitido conocer en profundidad los elementos que componen las turbinas y el procedimiento a seguir para su diseño.
- El rodete y la cámara espiral se han diseñado en función de los cálculos teóricos realizados, resultando en una geometría diferente a la del rodete de la turbina Francis usada como modelo.
- Se han diseñado las piezas conjuntamente al proceso de fabricación, de modo que desde el momento de diseño se ha ido pensando en la dificultad de fabricación de dichas piezas.
- La utilización del software de mecanizado Autodesk Fusión 360 ha sido de gran ayuda gracias a la simulación de los procesos de mecanizado y la posibilidad de obtener el código de control numérico.
- La fabricación ha sido la fase que más tiempo ha demorado, debido a la complejidad de algunas piezas se ha tenido que diseñar nuevas herramientas para el mecanizado, como el diseño de nuevas mordazas para la máquina de control numérico.
- Al realizar el montaje de la turbina se han encontrado problemas de rozamiento entre algunas piezas, por lo que se ha ido modificando la geometría de dichas piezas para evitar defectos.
- Se ha obtenido un rendimiento máximo del 77% según la línea de tendencia para una apertura del 50%. Al comparar con los datos de caracterización de la turbina Francis que se usó como modelo, el incremento del rendimiento es del 20%.
- Al analizar los resultados se puede concluir que las condiciones óptimas de funcionamiento son para velocidades bajas y pequeño salto de agua ya que su rendimiento es máximo en dichas condiciones.
- Cabe destacar el amplio rango de toma de datos para las distintas posiciones del distribuidor, lo que ayuda a la realización de ensayos en laboratorio para uso docente.

6.1. MEJORAS PROPUESTAS

Para finalizar se proponen una serie de mejoras con el fin de facilitar tanto el proceso de montaje como el de fabricación:

- Modificar el diseño de los ejes de los álabes para que permita girar al álabe y el eje no se desplace axialmente.
- Diseñar un anillo que se acople al eje principal e impida que se desplace axialmente.
- Modificar el apoyo del eje principal sobre el rodete para evitar rozamientos con el fondo de la carcasa.
- Diseñar un sistema de seguridad para evitar que la apertura y cierre máximos de los álabes del distribuidor puedan dañar el rodete.

7. BIBLIOGRAFÍA

Kovalev, N. N. (1961). *Hydroturbines desing and constructions* (S. Monson (ed.); First). Israel Program for Scientific Translations Ltd.

Mataix, C. (2009). *Turbomáquinas hidráulicas. Turbinas hidráulicas, bombas y ventiladores* (A. Arenas, E. Arenas, & A. Cantizano (eds.); 2ª Edición). Madrid: Universidad Pontificia de Comillas.

Polo Encinas, M. (1975). *Turbomáquinas hidráulicas* (1ª Edición). Editorial Limusa, S. A.

Zamora Parra, B., & Viedma Robles, A. (2016). *Máquinas Hidráulicas Teoría y Problemas* (U. P. de Cartagena (ed.); Primera). Universidad Politécnica de Cartagena.

8. ANEXOS

 Universidad de Jaén	CONTRATO DE SUMINISTRO E INSTALACIÓN DE INSTRUMENTACIÓN Y EQUIPOS CIENTÍFICOS PARA EL DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA Y MINERA EN EL COMPLEJO DE LABORATORIOS I+D DEL CAMPUS CIENTÍFICO-TECNOLÓGICO DE LINARES. EDIFICIO DE LABORATORIOS ESTE	 PIHA
--	---	---

a.1.2. SIERRA DE CINTA

Se oferta la sierra de cinta S 275 G de Optimun, con las siguientes características:



SIERRAS FIJAS | Arranque de viruta

S 210 G / S 275 G / S 275 G Vario

OPTIMUM
MACHINERY - EQUIPMENT

Sierras de cinta para trabajos con metal, con arco de sierra giratorio para corte en ángulo, sistema de refrigeración de serie y dos velocidades de la cinta. El modelo 275 G Vario incorpora variador de velocidad.

Arco de sierra giratorio para corte en ángulo, 2 velocidades y bajada de corte por pistón hidráulico



Manejevole
S 275 G / S 275 G Vario
- Control manual y remoto de la tensión de la banda de sierra.

Baja de sierra de banda
- Cinta guiada en 5 puntos mediante resorte de tensión para una mayor precisión y durabilidad.
- Cepillo para limpieza de la cinta.

Mecanismo de acción rápida
- Ajuste mediante volante.
- Aperto de la pisa mediante volante manual.



S 275 G Vario



Panel de control
- Pulsador de parada.
- Interruptor para la bomba refrigerante.
- Interruptor de selección de velocidad.
- Modelo Vario con potenciómetro.

- Certificado de conformidad CE del sistema eléctrico.
- Con filtro EMC para cumplir con las normas de protección.



Sistema de refrigeración
Equipo de serie.

Banco
Equipo de serie.



S 210 G

Modelo	S 210 G	S 275 G	S 275 G Vario
Código	3300216	3300275	3300279
Potencia del motor	1 CV / 750 W / 400 V	1,5 CV / 1,1 kW / 400 V	2 CV / 1,5 kW / 230 V
Capacidad de corte a 90°	170 mm	225 mm	225 mm
Capacidad de corte a 45°	210 x 140 mm	245 x 160 mm	265 x 180 mm
Capacidad de corte a 45°	105 mm	140 mm	160 mm
Capacidad de corte a 45°	120 x 180 mm	160 x 140 mm	160 x 140 mm
Capacidad de corte a 45°	—	100 mm	180 mm
Capacidad de corte a 45°	—	100 x 100 mm	180 x 130 mm
Desarrollo de la hoja de sierra	2.080 x 22 x 0,9 mm	2.480 x 27 x 0,9 mm	2.480 x 27 x 0,9 mm
Velocidad de la hoja de sierra	10 / 60 m/min	15 / 90 m/min	20 / 90 m/min
Dimensiones mín. B x A x E	1.380 x 930 x 1.320 mm	1.600 x 930 x 1.360 mm	1.480 x 930 x 1.360 mm
Peso neto	152 kg	165 kg	280 kg

Las máquinas están construidas de acuerdo con las normas CE.



ACCESORIOS INCLUIDOS
Hoja de sierra bimetálica, cilindro de bajada hidráulico, sistema de refrigeración por bomba de taladrina, microinterruptor for para desconexión final automática, banco.

ACCESORIOS OPCIONALES	Código
Hoja de sierra	
- 4-18 22 (S 210 G)	3307514
- 4-18 22 (S 275 G / S 275 G Vario)	3307526
- S-B 22 (S 275 G / S 275 G Vario)	3307511

 UNIVERSIDAD DE JAÉN	CONTRATO DE SUMINISTRO E INSTALACIÓN DE INSTRUMENTACIÓN Y EQUIPOS CIENTÍFICOS PARA EL DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA Y MINERA EN EL COMPLEJO DE LABORATORIOS I+D DEL CAMPUS CIENTÍFICO-TECNOLÓGICO DE LINARES. EDIFICIO DE LABORATORIOS ESTE	
--	--	---

a.1.3. TALADRO DE COLUMNA SERIE INDUSTRIAL

Se oferta el taladro de columna B 40 GSP de Optimun, con las siguientes características:



B 40 GSP SERIE INDUSTRIAL OPTIMUM
MACHINING - GERMANY

Con sistema de refrigeración y expulsor automático de la broca, de diseño robusto y macizo de fundición, con un motor eléctrico de poca rumorosidad y gran potencia.

Sistema de avance mecánico automático.
Bomba de refrigeración de serie.



2 velocidades de avance automáticas de la broca.
Cambio sencillo de herramientas.



Mezcla de taladrado resaca de virutas direccionales, con superficie de alta calidad y ranuras tipo T en cruz y perfil interior con ranuras nervilladas.
Regulador de avance mediante controlador.
Giratorio 360° sobre el eje y respecto a la columna.

Modelo	B 40 GSP
Código	3034403
Potencia del motor	2 CV / 1,5 kW / 400 V
Ø máx. taladro fundición/acero	25 / 35 mm
Tipo con motor	MT 4
Revoluciones del husillo	30 - 1.450 r.p.m.
Dimensiones (L x A x al)	935 x 540 x 2.280 mm
Peso neto	580 kg

Las máquinas están construidas de acuerdo con las normas CE.

B 40 GSM SERIE INDUSTRIAL OPTIMUM
MACHINING - GERMANY

Con sistema de refrigeración y expulsor automático de la broca, de diseño robusto y macizo de fundición, con un motor eléctrico de poca rumorosidad y gran potencia.

Sistema electromagnético de avance automático e inversor de giro para roscar.
Bomba de refrigeración de serie.



Mediante un pulsador situado en la palanca de bajada de la broca, accionamos la inversión de giro del husillo para hacer roscar.
Cambio sencillo de giro en manivela para roscar.



Avance automático de la broca.
Cambio sencillo de herramientas mediante dispositivo de extracción rápida.

Modelo	B 40 GSM
Código	3034400
Potencia del motor	2 CV / 1,5 kW / 400 V
Ø máx. taladro fundición/acero	25 / 35 mm
Tipo con motor	MT 4
Revoluciones del husillo	30 - 1.450 r.p.m.
Dimensiones (L x A x al)	935 x 540 x 2.280 mm
Peso neto	580 kg

Las máquinas están construidas de acuerdo con las normas CE.



CONTRATO DE SUMINISTRO E INSTALACIÓN DE
INSTRUMENTACIÓN Y EQUIPOS CIENTÍFICOS PARA
EL DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA Y
MINERA EN EL COMPLEJO DE LABORATORIOS I+D
DEL CAMPUS CIENTÍFICO-TECNOLÓGICO DE
LINARES. EDIFICIO DE LABORATORIOS ESTE



a.1.4. ESMERILADORA

Se oferta el siguiente material:

- Esmeriladora QSM 200 de Optimum con las siguientes características:



- Banco SM anclado al suelo:



Banco SM

- Banco SM 3107100
Para QSM 150 hasta SM 250, Dimensiones B = an x al; 320 x 270 x 620 mm,

Expediente nº 2014/23



BP-C[®]
Series

WATERJET 
division

TCI *cutting*
waterjet & laser systems



BP-C[®] Series (Compact)

Las máquinas de la serie BP de **TCI Cutting** se caracterizan por una construcción tipo puente, lo que les aporta gran robustez y les permite cortar grandes superficies.

El sistema de motorización Gantry en eje Y, les permite grandes aceleraciones y altas velocidades reduciendo así los tiempos operativos.

Las máquinas de corte BP-C de **TCI Cutting**, ofrecen una instalación funcional, precisa y rentable para todas las aplicaciones estándar.

Máximo rendimiento con una mínima inversión y mantenimiento.

Modelos	Medidas
BP-C 1515	1500x1500x200 mm
BP-C 4020	4000x2000x200 mm



Características	Datos Técnicos
Grosor máximo de pieza	200 mm
Carga máxima permitida de piezas	790 kg/m ²
Número de cabezales de corte	1 a 2
Velocidad de posicionamiento max simultáneo	85 m/min
Velocidad de corte máxima	20 m/min
Tolerancia de máquina según VDI/DGQ 3441	± 0.05 mm/m
Precisión de repetición	± 0.025 mm/m

BP-C[®]
Series

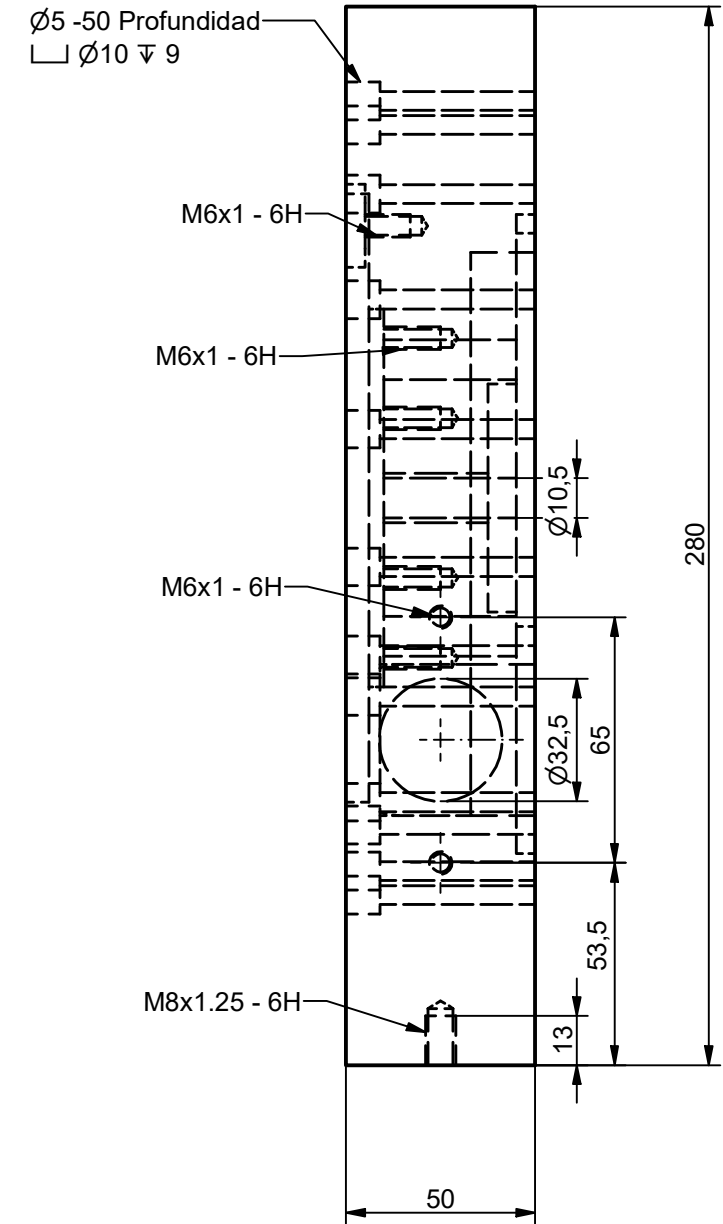
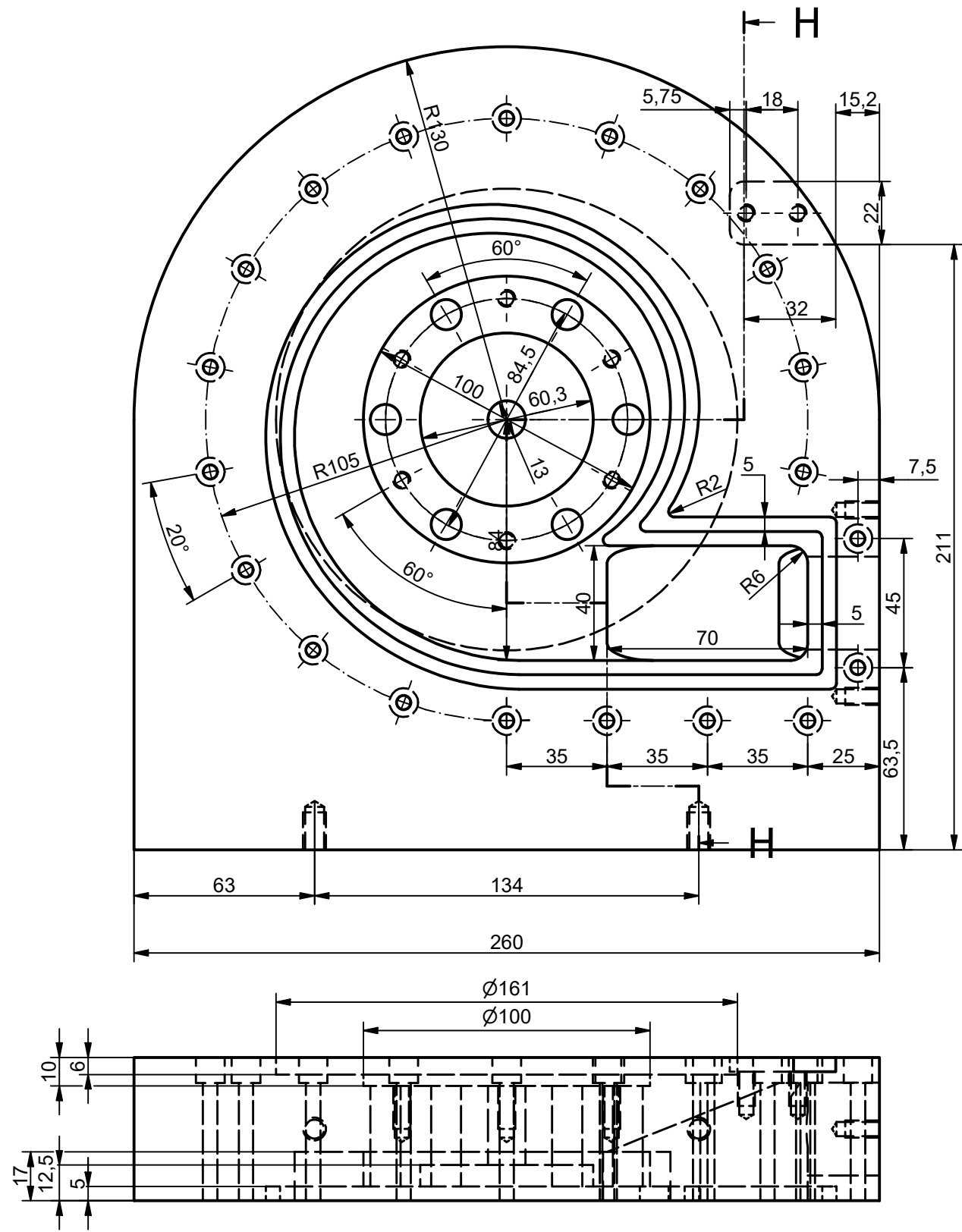
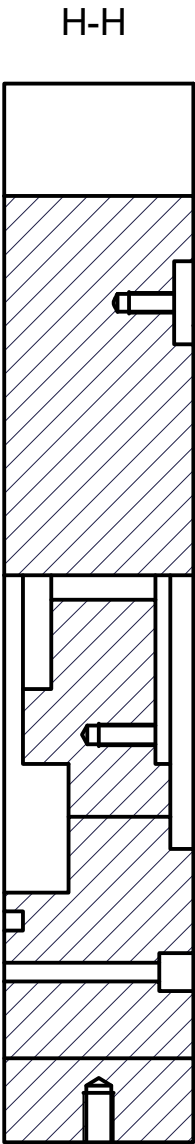
Ventajas y características

- Velocidades desplazamiento simultaneo hasta 85 m/min.
- Sistema de tratamiento inteligente para movimiento de hasta 2 cabezales independientes, lo que permite máximo aprovechamiento de materiales.
- Software de seguimiento de estado de consumibles de máquina en tiempo real, que permite realizar un mantenimiento preventivo y evitar paradas.
- Sistema de limpieza de lodos de máquina totalmente automatizado.
- CNC, Armario de control, intensificador y periféricos, resguardados de la zona de trabajo de la máquina.
- Posibilidad de carga de materiales tanto frontal como por los laterales.
- Sistema autónomo de funcionamiento.
- Sistema anticolidión con regulación de sensibilidad digital.
- Atención técnica ON-LINE por Ingenieros Mecánicos, Ingenieros en Automática, Electrónica Industrial e Ingenieros de Diseño Industrial.
- Instalación y puesta en marcha en 7 días.

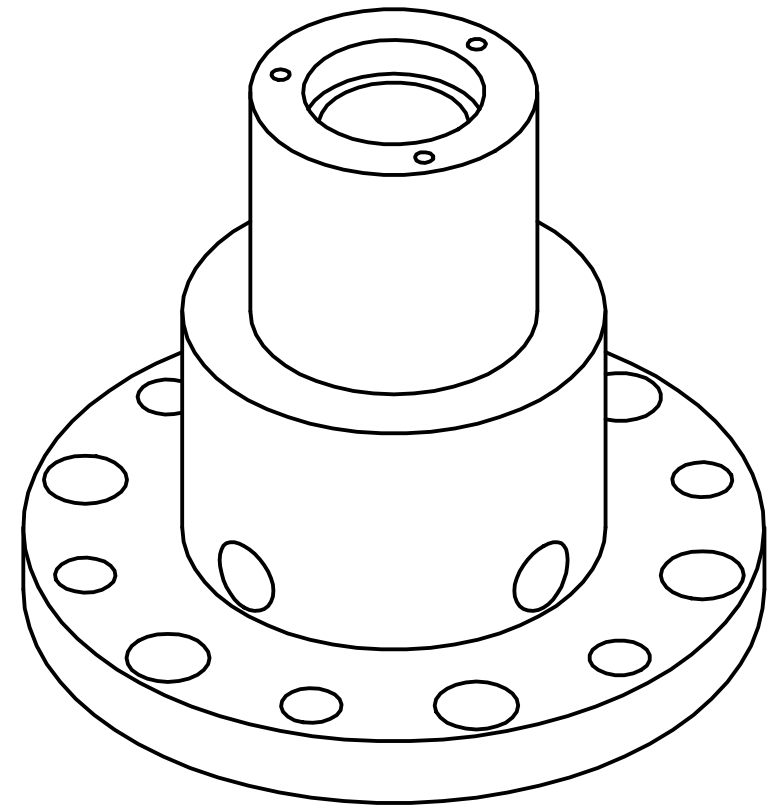


Oficinas centrales: Colón, 113 - 46610 - GUADASSUAR (VALENCIA) ESPAÑA
Tel: +34 962 57 22 90 - Fax: +34 962 570 394 - www.tci-cutting.com

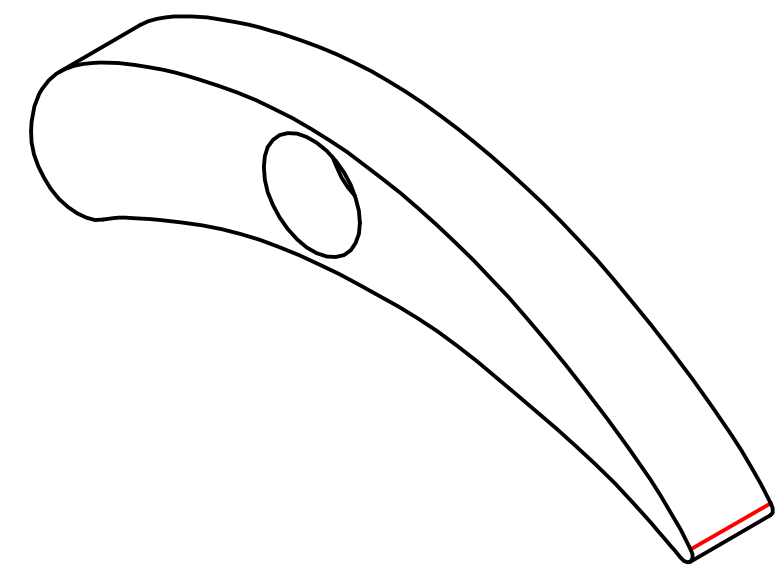
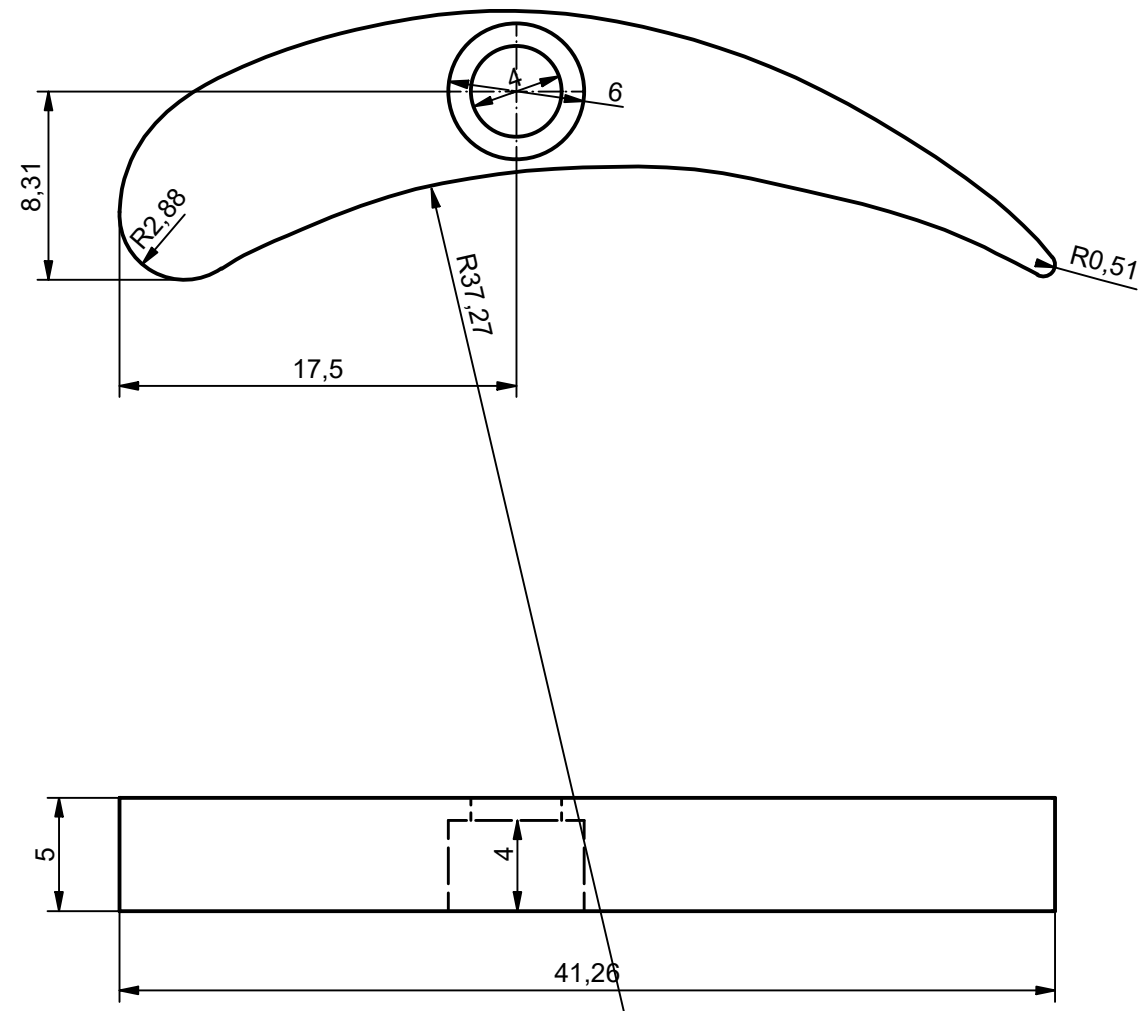
TCIcutting
MANAGE & BUILD YOUR BUSINESS



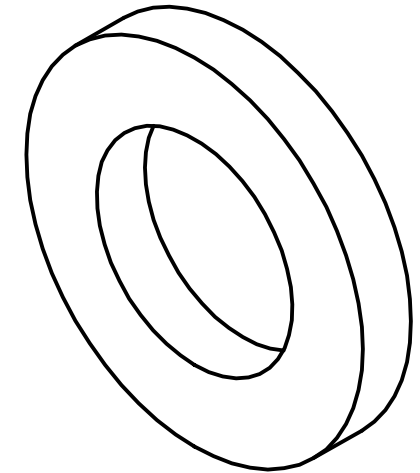
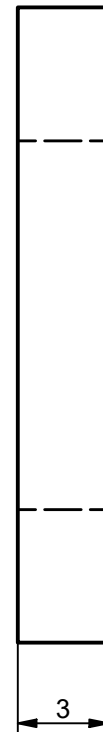
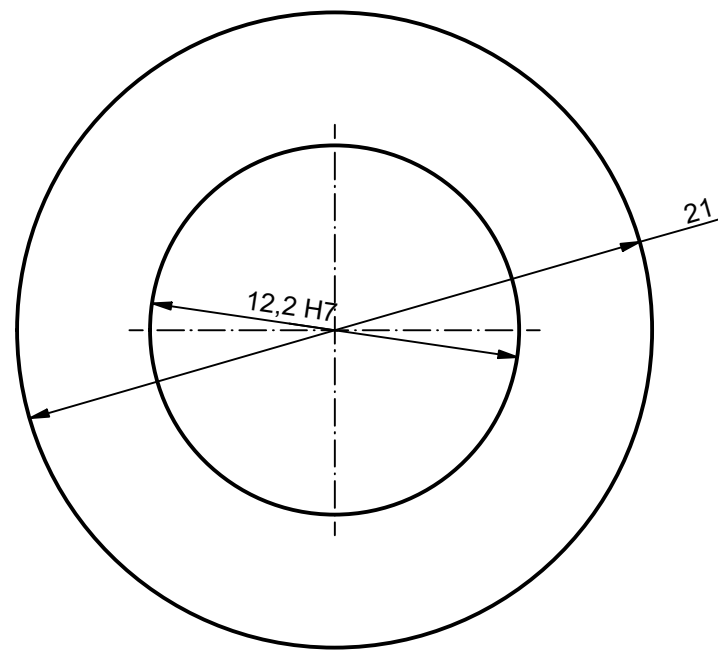
	FECHA	NOMBRE	FIRMA	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR LINARES	
DIBUJADO		JAVIER			
COMPROBADO					
ESCALA:	Diseño, fabricación y caracterización de una turbina Francis para uso docente			Nº PLANO 1/21	FORMATO A3
1 : 2				SUSTITUYE A:	
	Carcasa			SUSTITUIDO POR:	



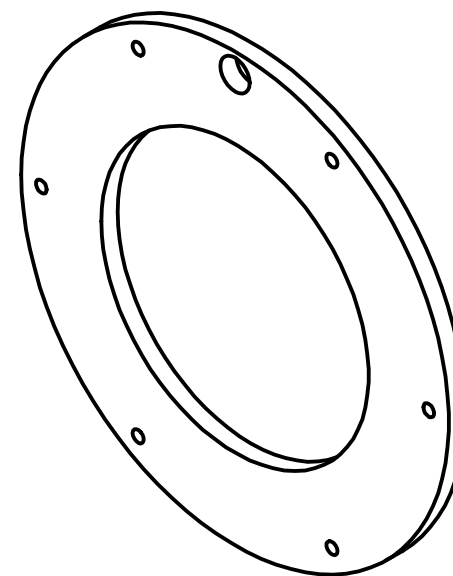
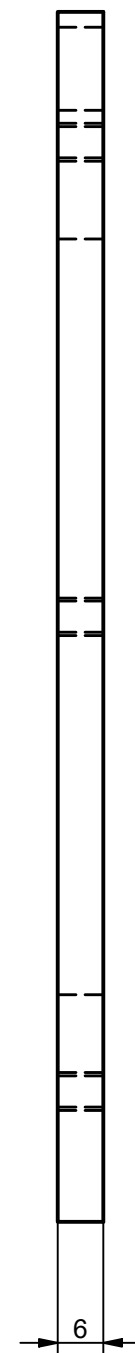
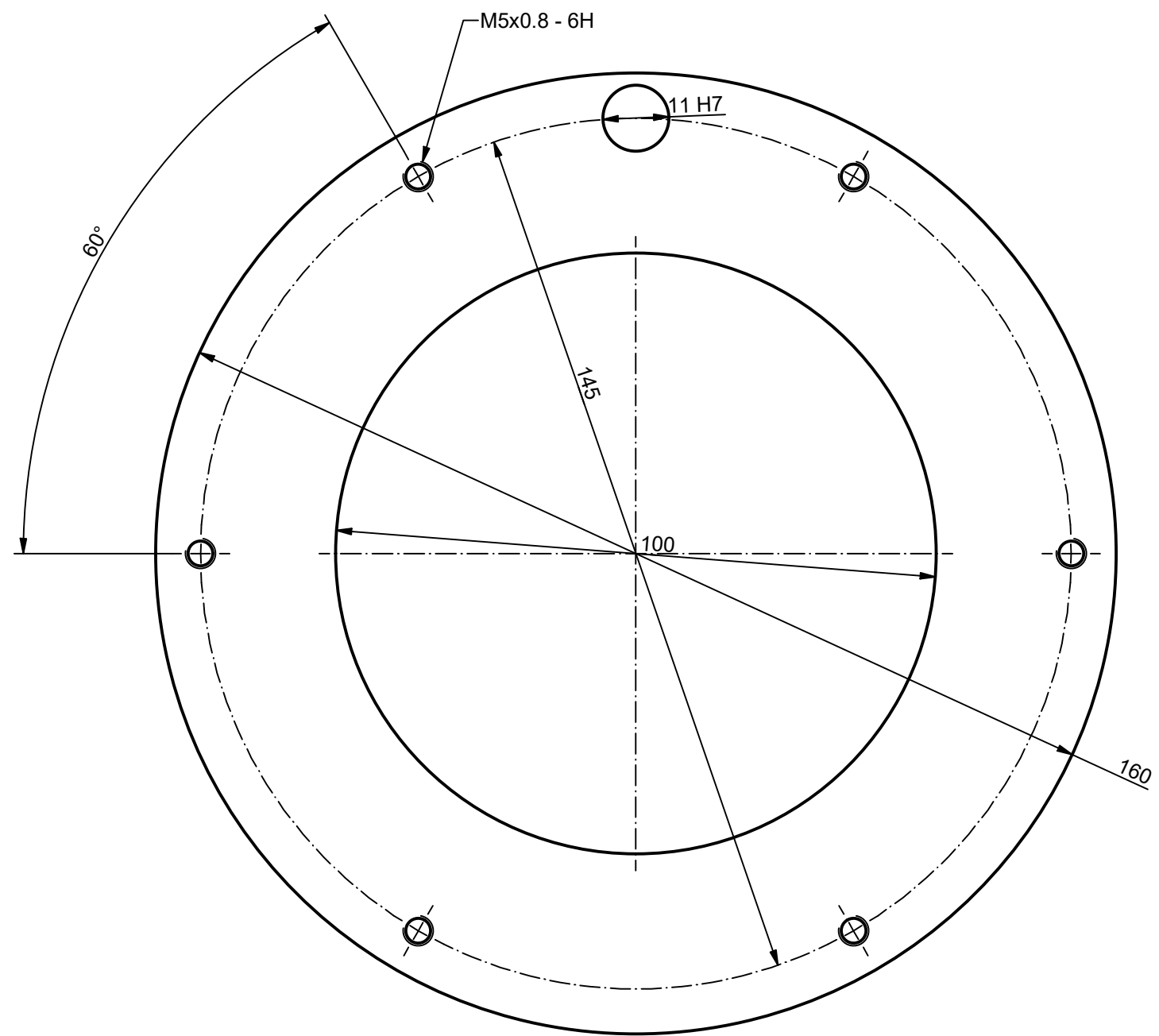
	FECHA	NOMBRE	FIRMA	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR LINARES
DIBUJADO		JAVIER		
COMPROBADO				
ESCALA: 1:1	Diseño, fabricación y caracterización de una turbina Francis para uso docente Unión eje-distribuidor			Nº PLANO 2/21
				FORMATO A3
				SUSTITUYE A:
				SUSTITUIDO POR:



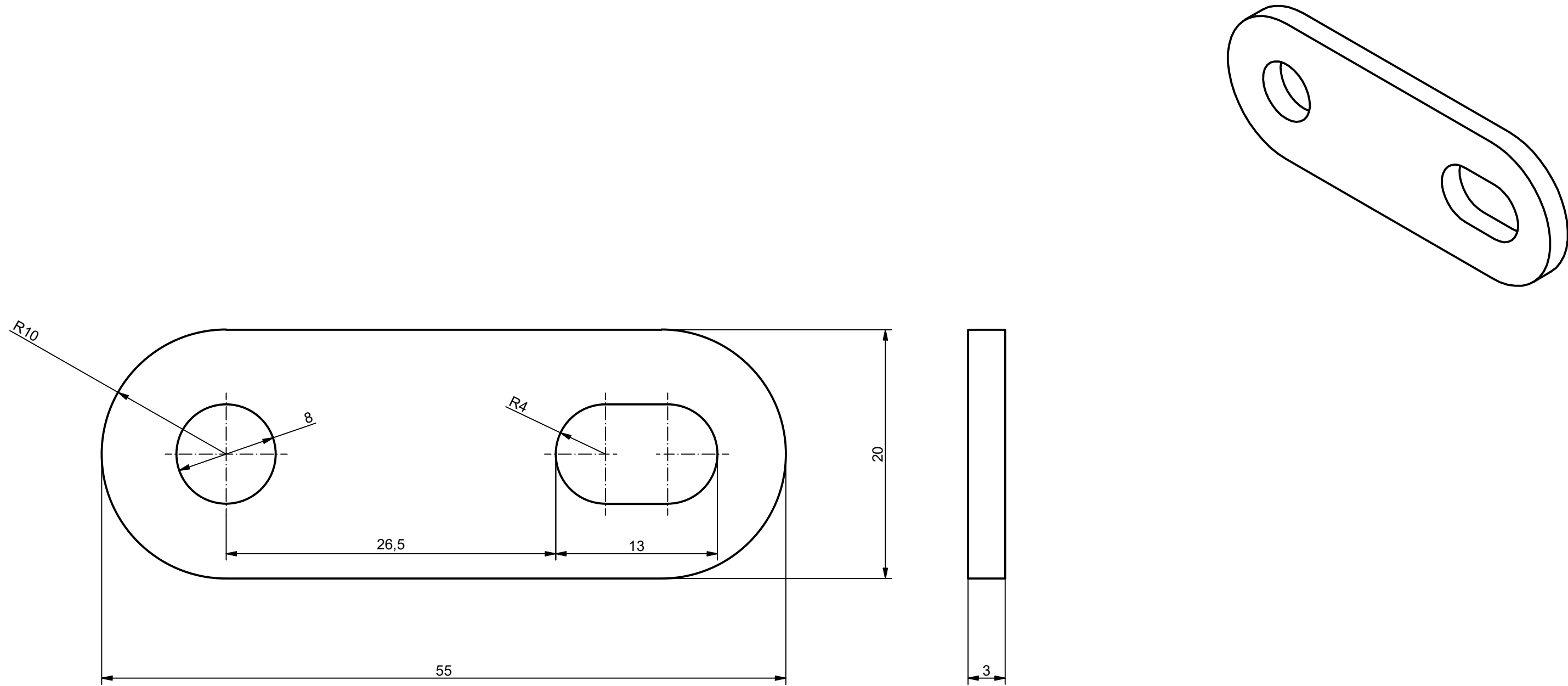
	FECHA	NOMBRE	FIRMA	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR LINARES	
DIBUJADO		JAVIER			
COMPROBADO					
ESCALA:	Diseño, fabricación y caracterización de una turbina Francis para uso docente			Nº PLANO 3/21	FORMATO A3
3:1				SUSTITUYE A:	
	Álabe directriz			SUSTITUIDO POR:	



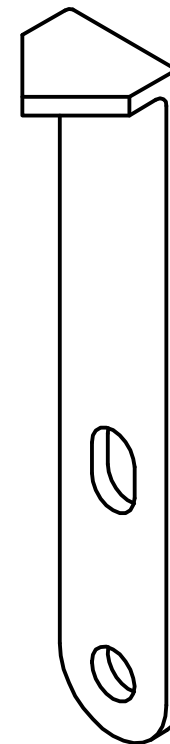
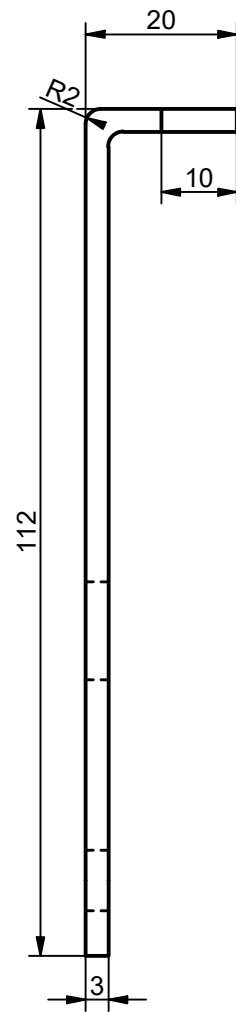
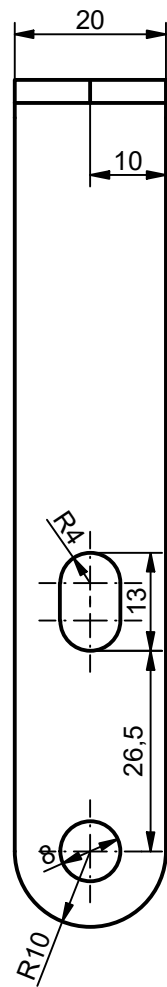
	FECHA	NOMBRE	FIRMA	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR LINARES	
DIBUJADO		JAVIER			
COMPROBADO					
ESCALA: 4:1	Diseño, fabricación y caracterización de una turbina Francis para uso docente			Nº PLANO 4/21	FORMATO A3
	Anillo eje distribuidor			SUSTITUYE A:	
SUSTITUIDO POR:					



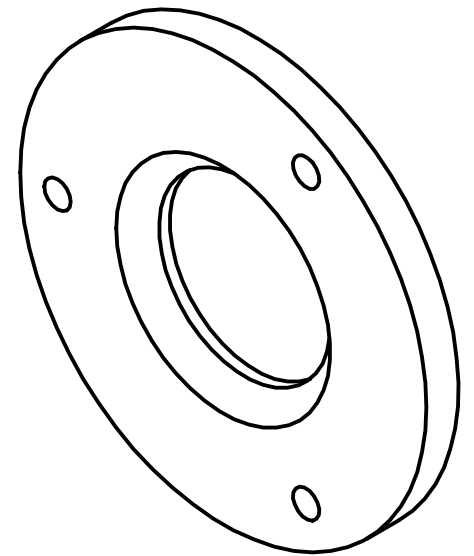
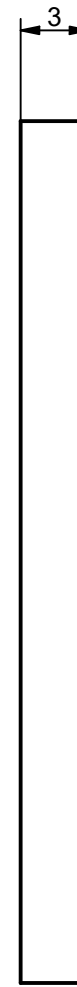
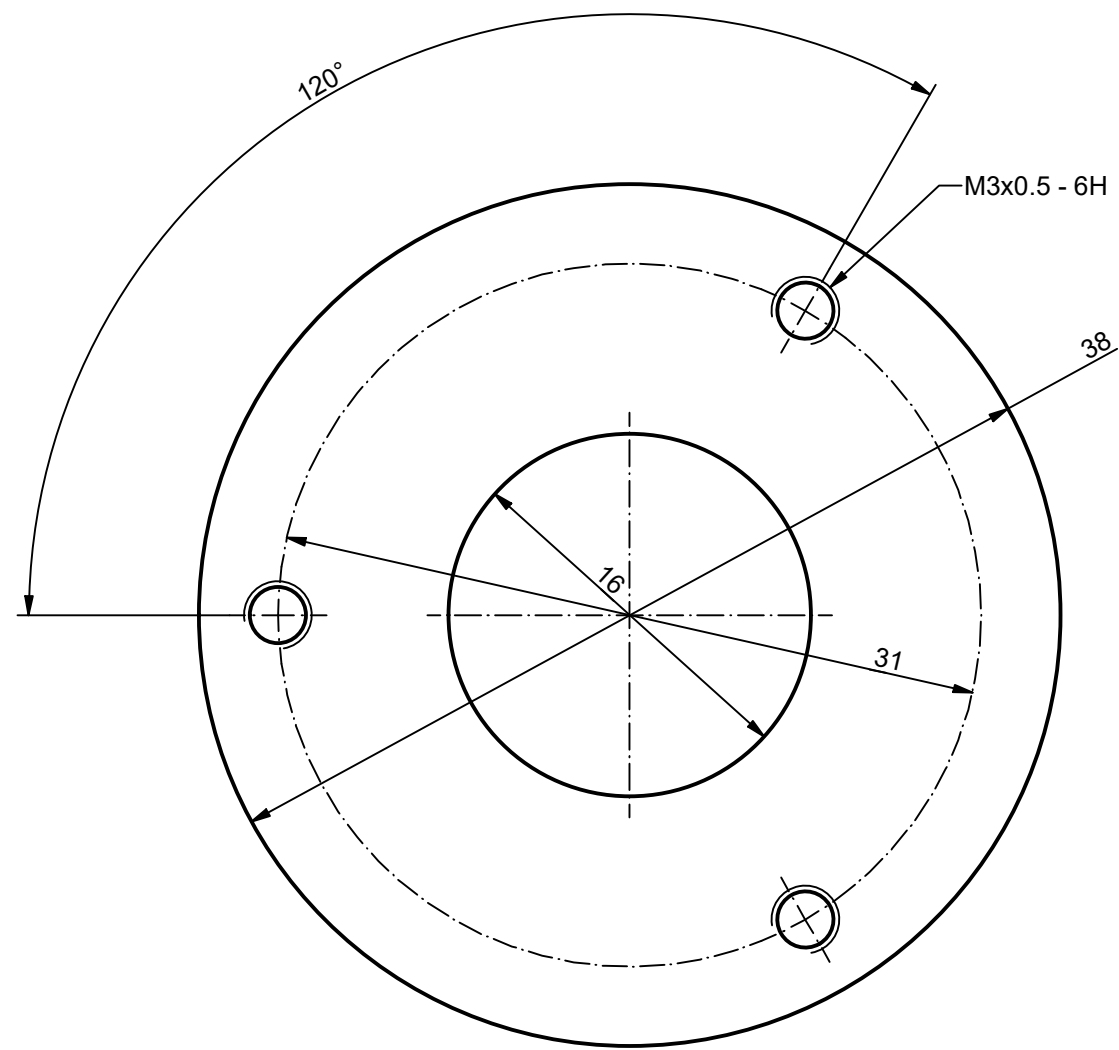
	FECHA	NOMBRE	FIRMA	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR LINARES	
DIBUJADO		JAVIER			
COMPROBADO					
ESCALA:	Diseño, fabricación y caracterización de una turbina Francis para uso docente			Nº PLANO 5/21	FORMATO A3
1 : 1				SUSTITUYE A:	
	Anillo unión de chapas			SUSTITUIDO POR:	



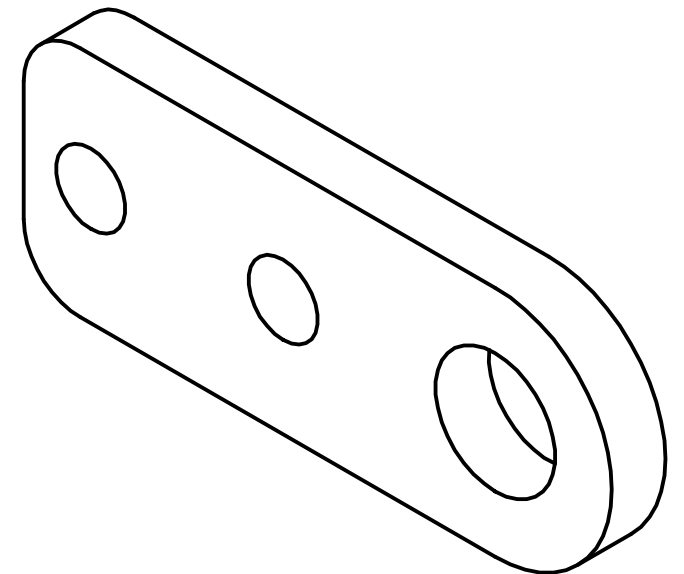
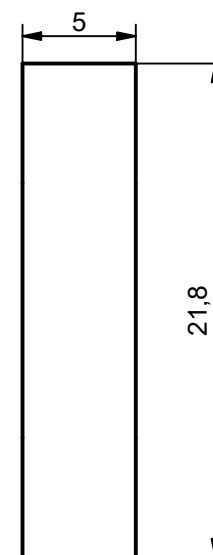
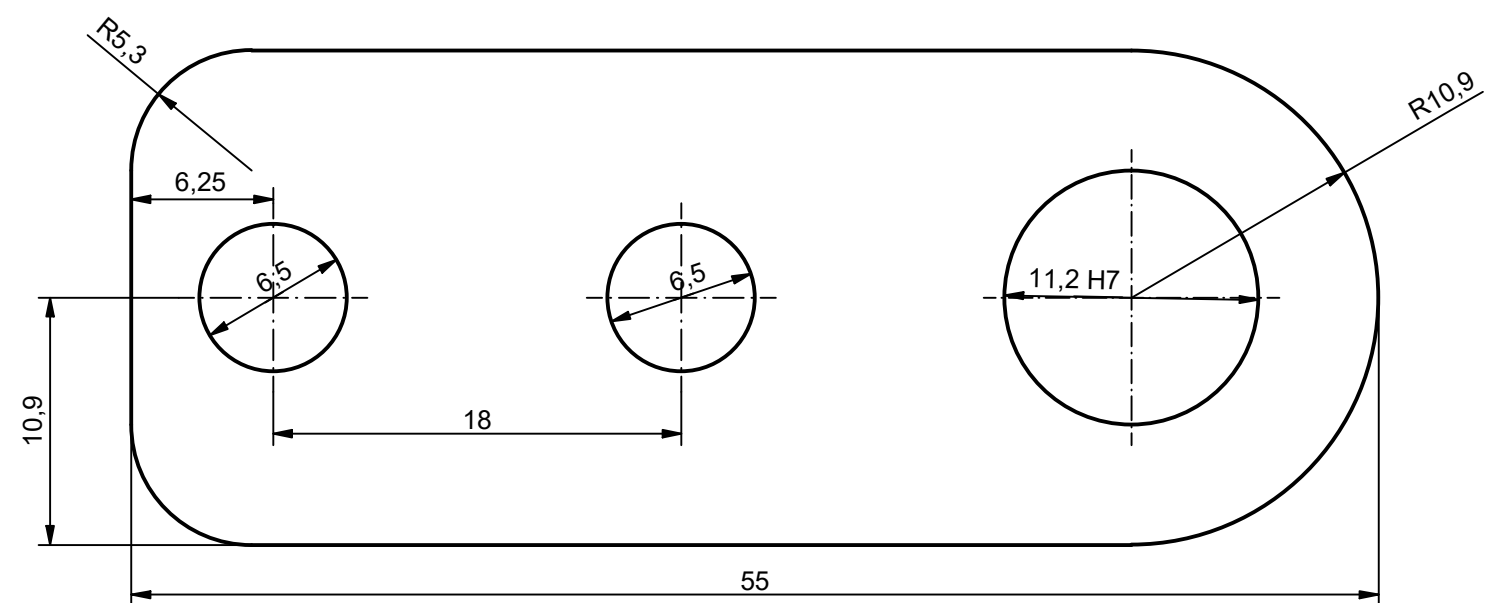
	FECHA	NOMBRE	FIRMA	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR LINARES	
DIBUJADO		JAVIER			
COMPROBADO					
ESCALA:	Diseño, fabricación y caracterización de una turbina Francis para uso docente Chapa distribuidor			Nº PLANO 6/21	FORMATO A3
3 : 1				SUSTITUYE A:	
				SUSTITUIDO POR:	



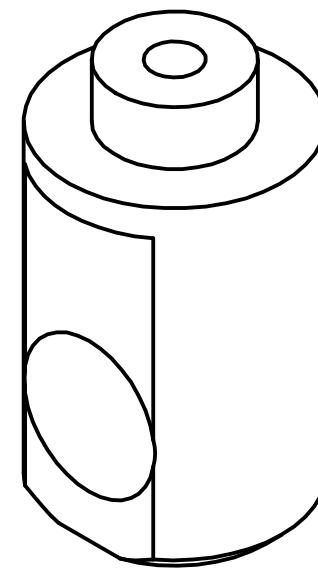
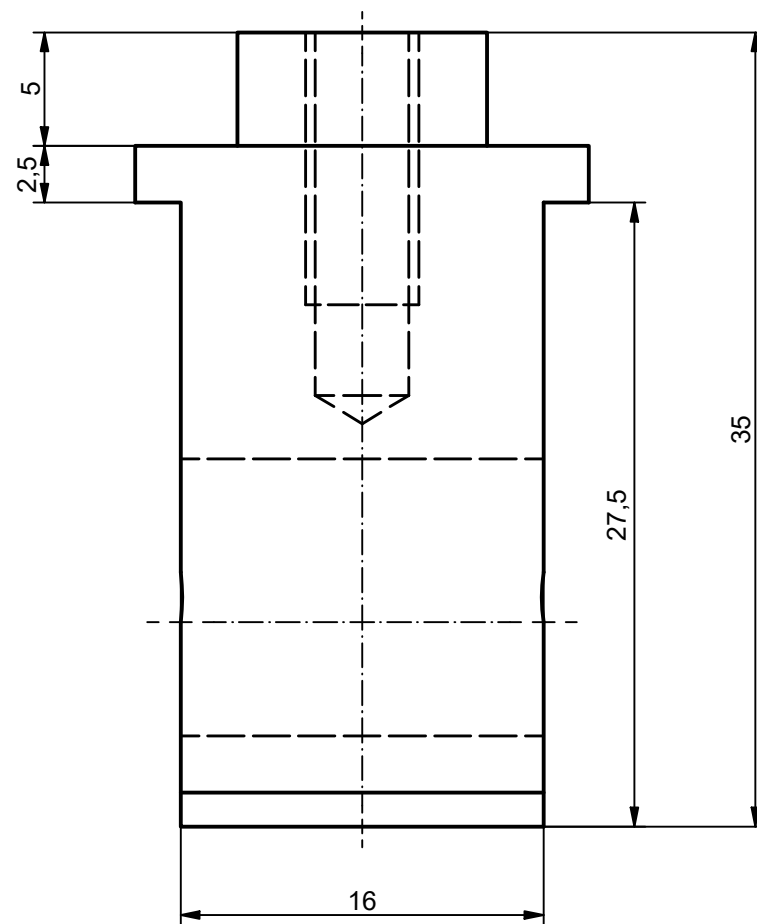
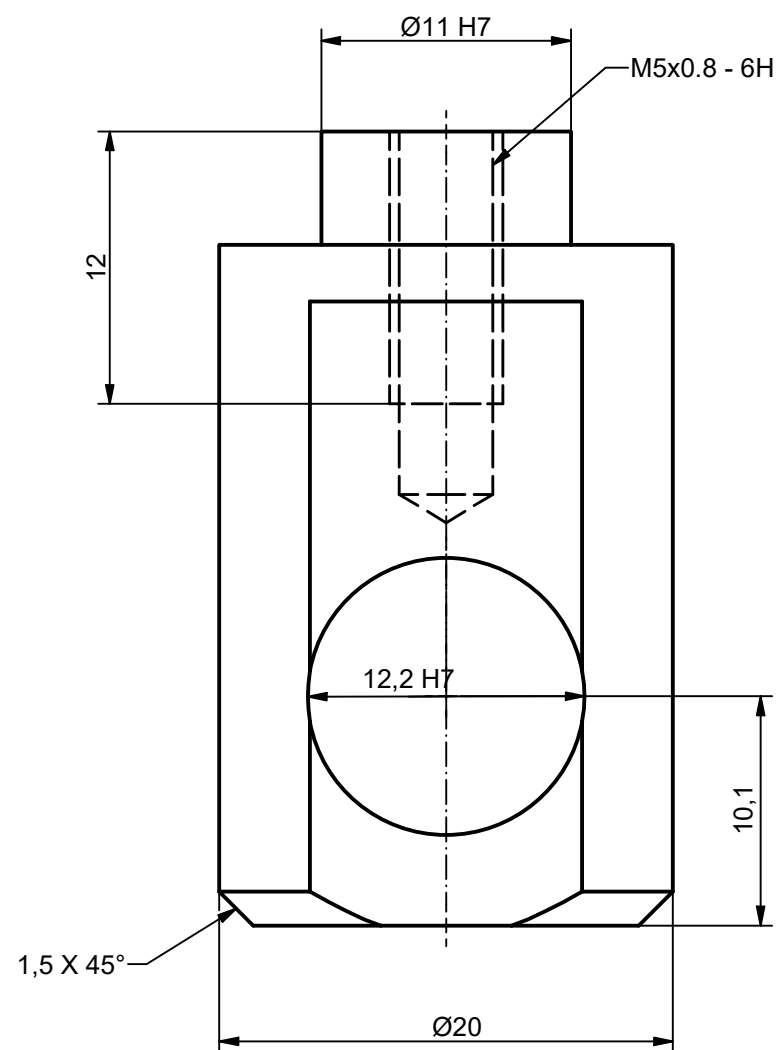
	FECHA	NOMBRE	FIRMA	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR LINARES		
DIBUJADO		JAVIER				
COMPROBADO						
ESCALA:	Diseño, fabricación y caracterización de una turbina Francis para uso docente Chapa indicadora				Nº PLANO 7/21	FORMATO A3
1 : 1					SUSTITUYE A:	
					SUSTITUIDO POR:	



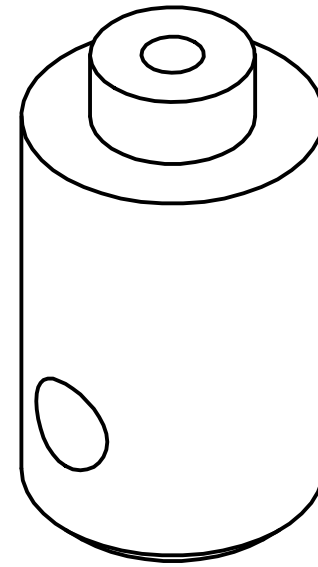
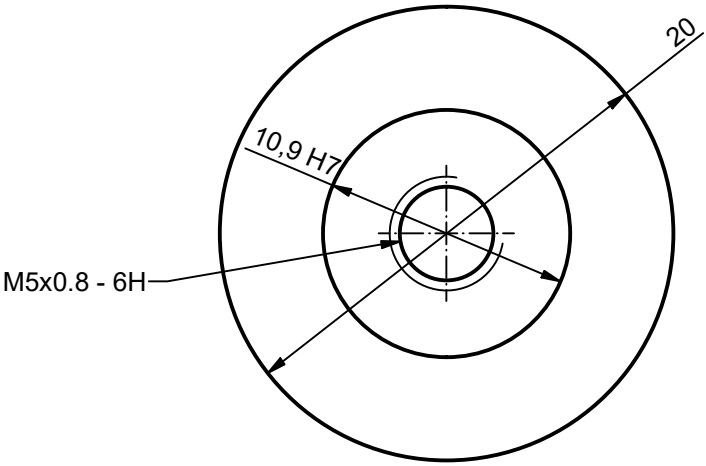
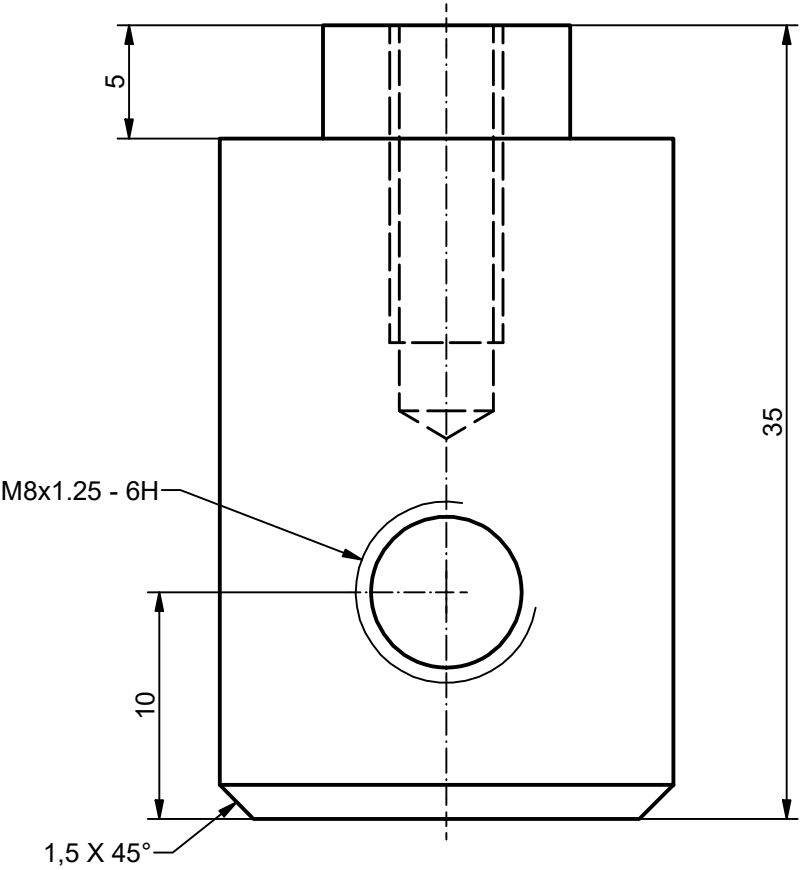
	FECHA	NOMBRE	FIRMA	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR LINARES		
DIBUJADO		JAVIER				
COMPROBADO						
ESCALA:	Diseño, fabricación y caracterización de una turbina Francis para uso docente				Nº PLANO 8/21	FORMATO A3
3: 1					SUSTITUYE A:	
	Chapa rodamiento				SUSTITUIDO POR:	



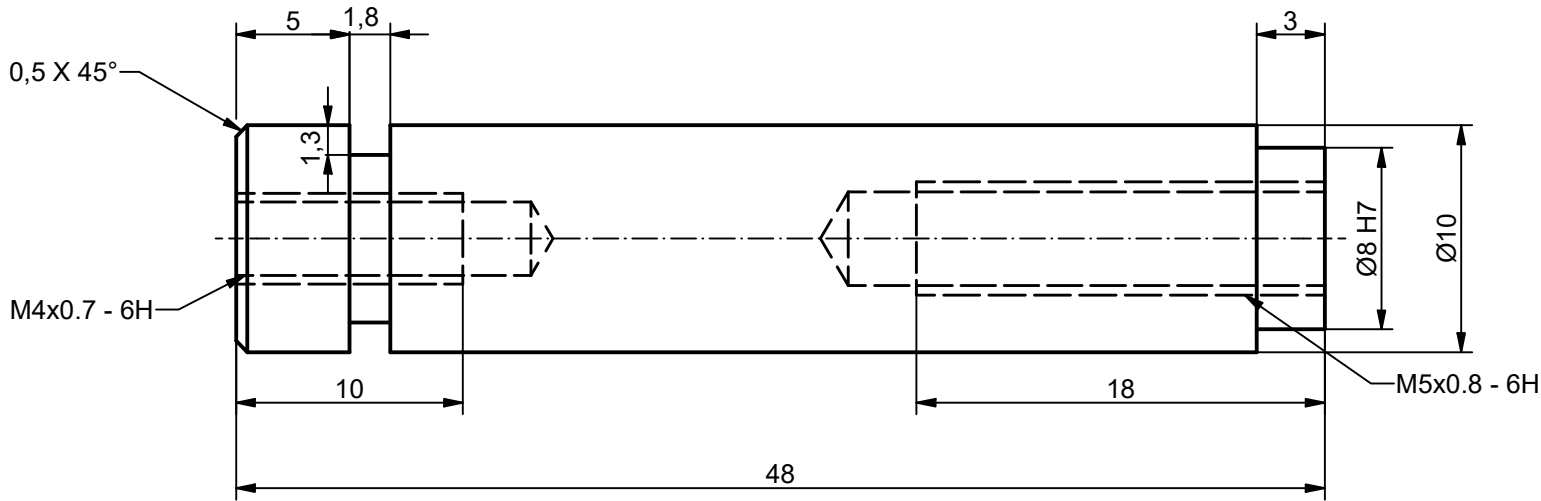
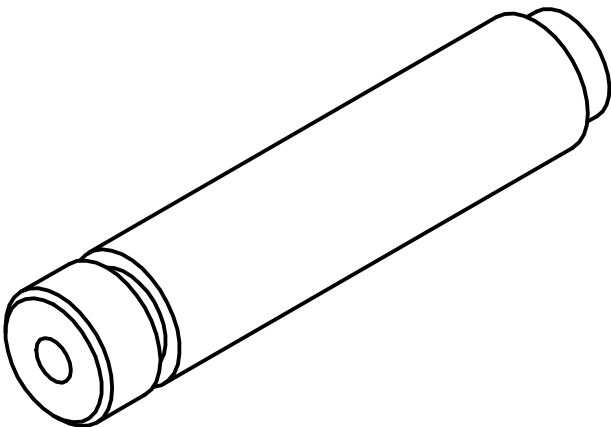
	FECHA	NOMBRE	FIRMA	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR LINARES	
DIBUJADO		JAVIER			
COMPROBADO					
ESCALA:	Diseño, fabricación y caracterización de una turbina Francis para uso docente Chapa carcasa-distribuidor			Nº PLANO 9/21	FORMATO A3
3: 1				SUSTITUYE A:	
				SUSTITUIDO POR:	



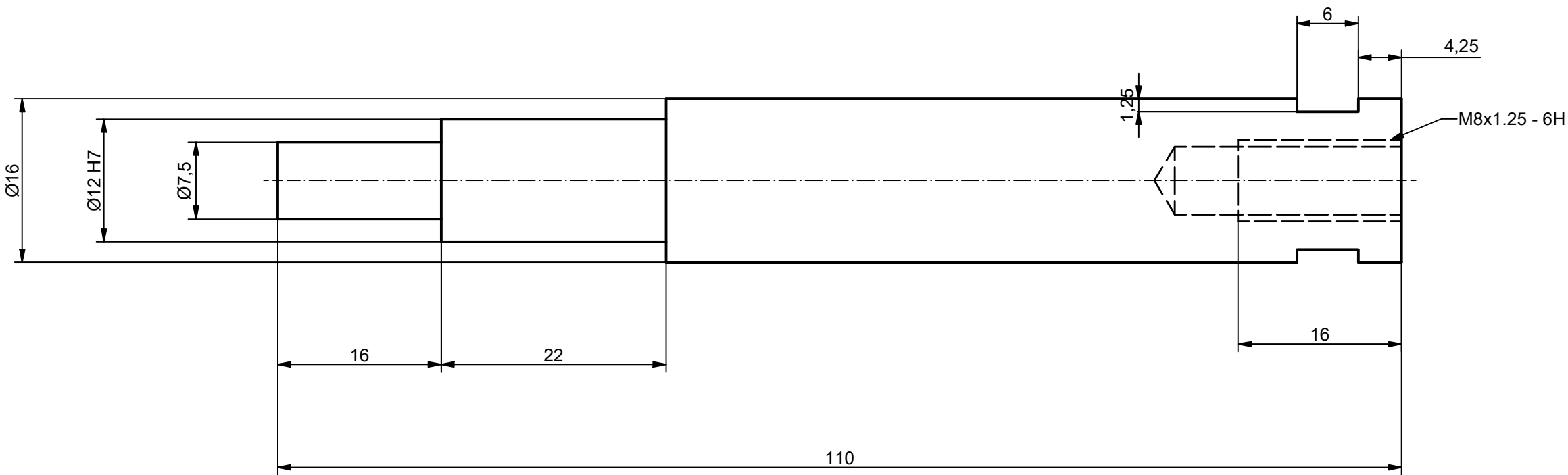
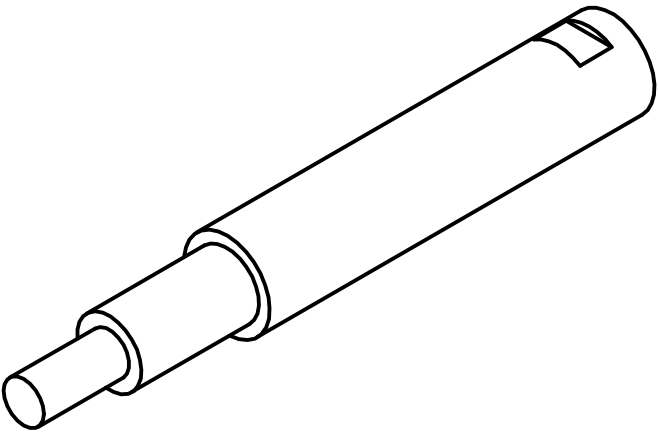
	FECHA	NOMBRE	FIRMA	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR LINARES	
DIBUJADO		JAVIER			
COMPROBADO					
ESCALA:	Diseño, fabricación y caracterización de una turbina Francis para uso docente			Nº PLANO 10/21	FORMATO A3
3 : 1				SUSTITUYE A:	
	Cilindro chapa carcasa			SUSTITUIDO POR:	



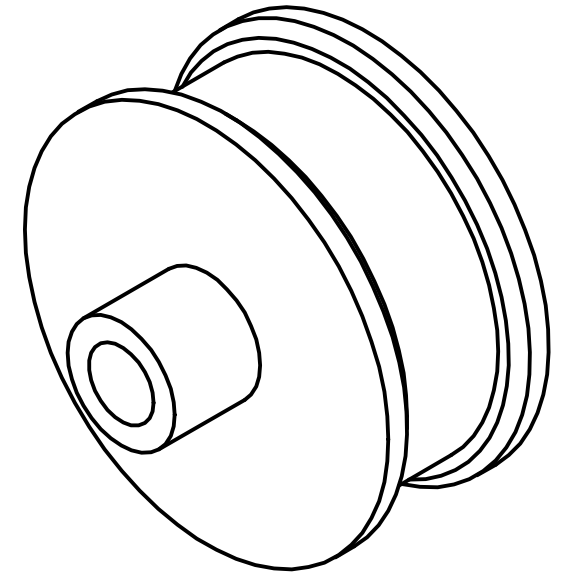
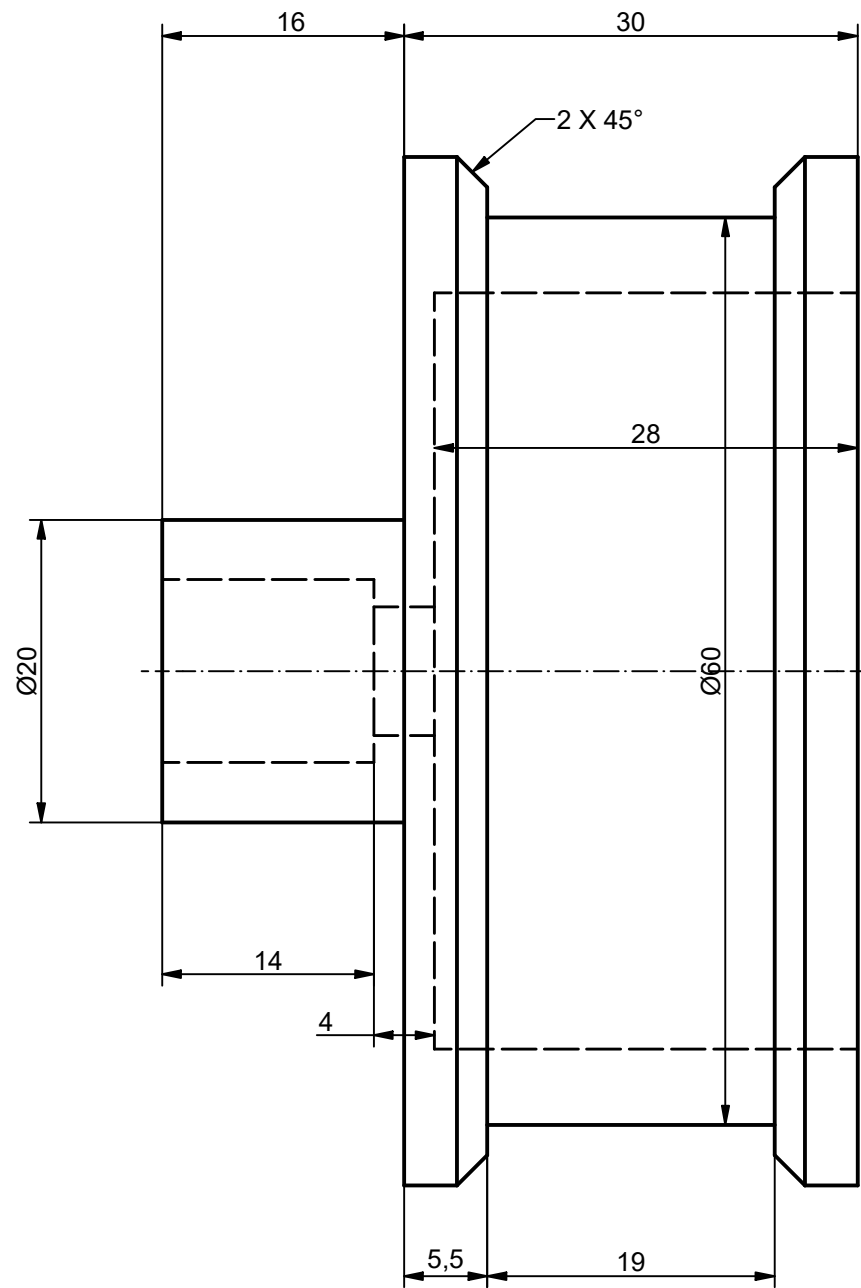
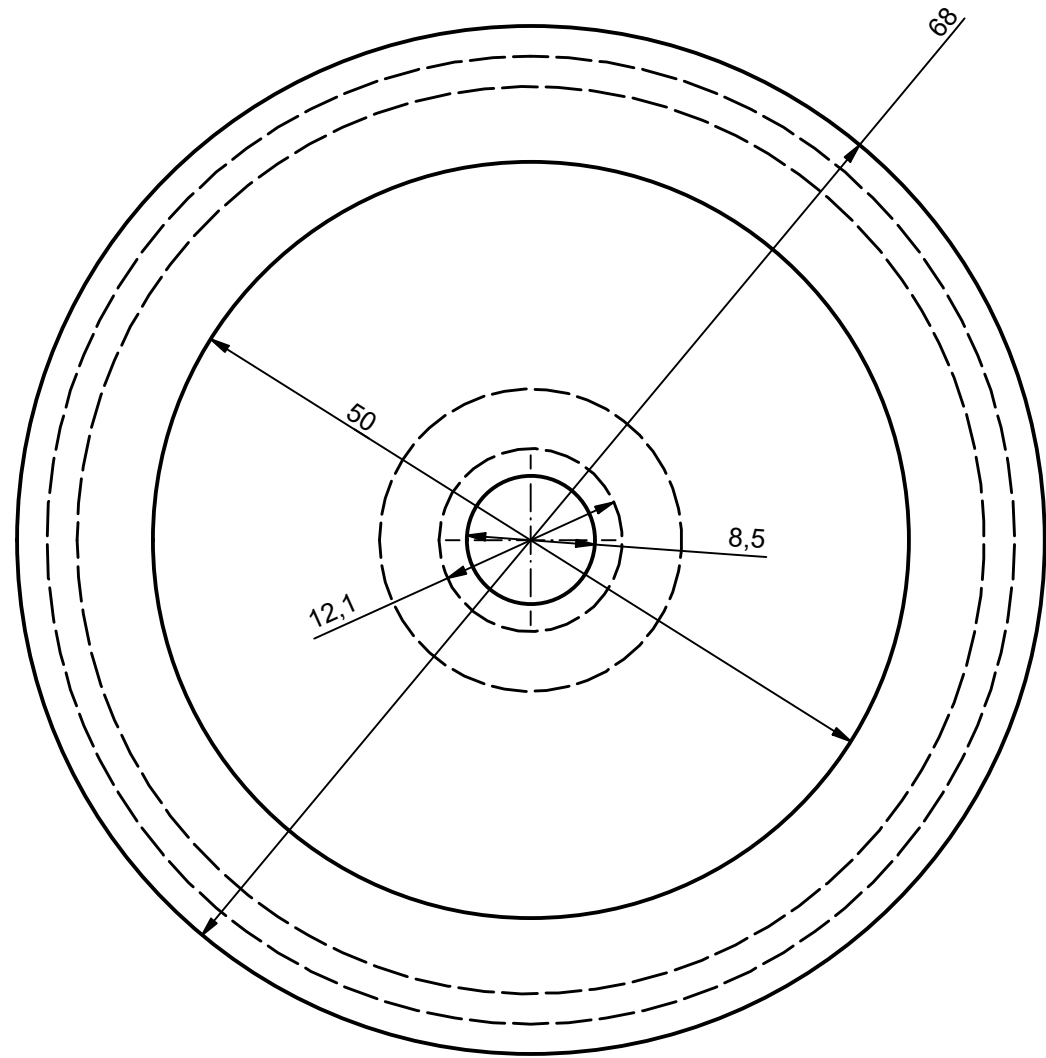
	FECHA	NOMBRE	FIRMA	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR LINARES	
DIBUJADO		JAVIER			
COMPROBADO					
ESCALA:	Diseño, fabricación y caracterización de una turbina Francis para uso docente Cilindro anillo-eje distribuidor			Nº PLANO 11/21	FORMATO A3
3 : 1				SUSTITUYE A:	
				SUSTITUIDO POR:	



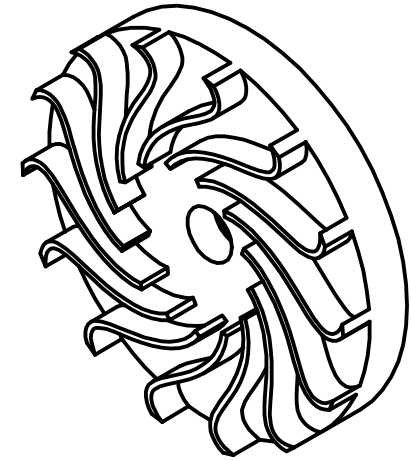
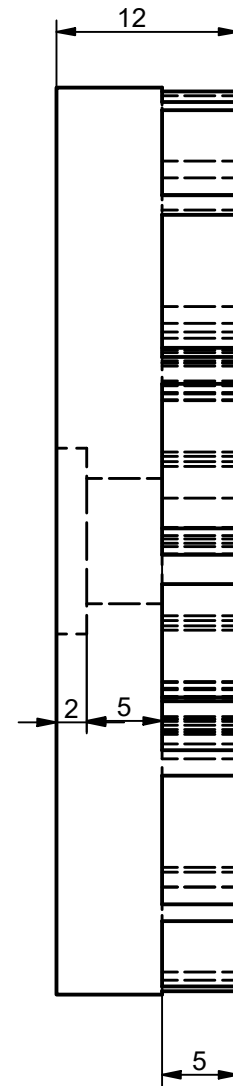
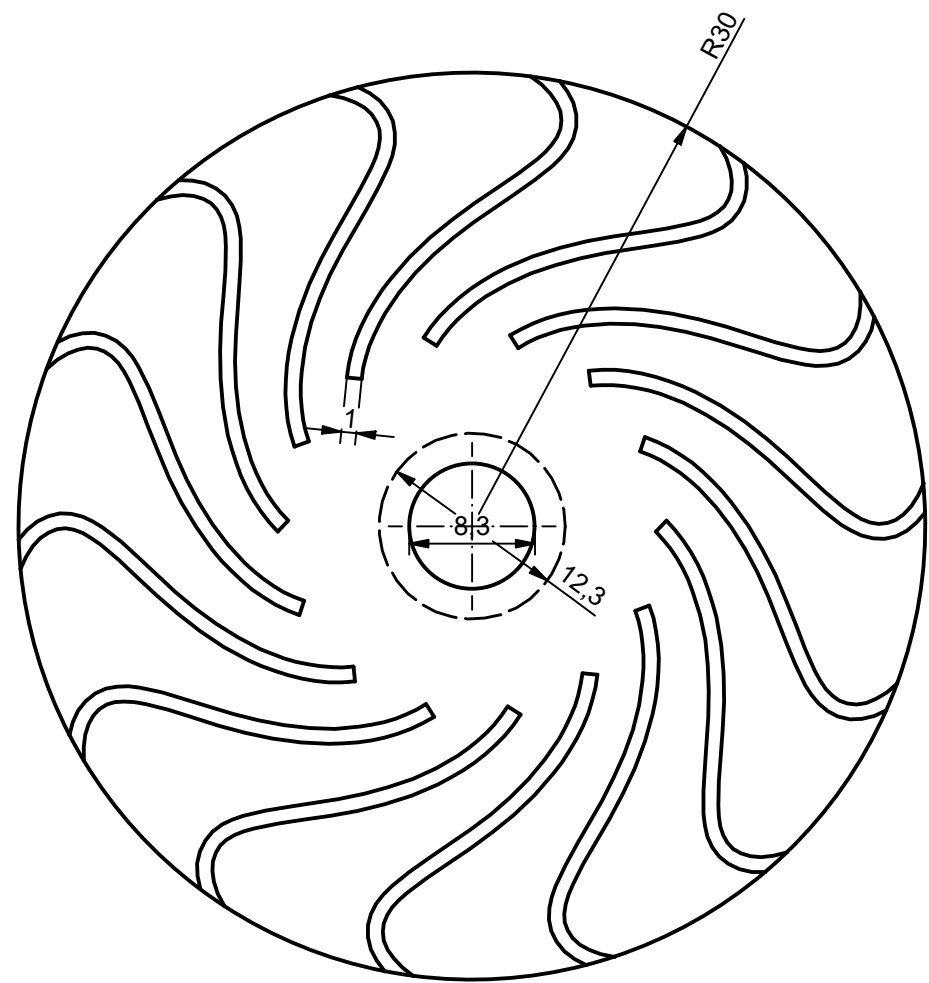
	FECHA	NOMBRE	FIRMA	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR LINARES	
DIBUJADO		JAVIER			
COMPROBADO					
ESCALA:	Diseño, fabricación y caracterización de una turbina Francis para uso docente Eje álabe			Nº PLANO 12/21	FORMATO A3
3 : 1				SUSTITUYE A:	
				SUSTITUIDO POR:	



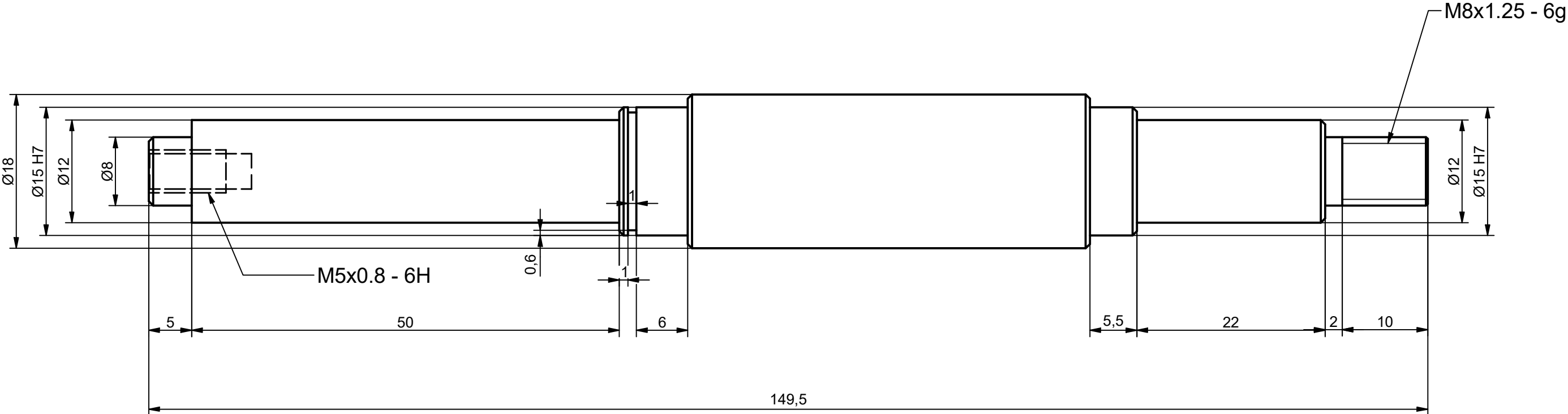
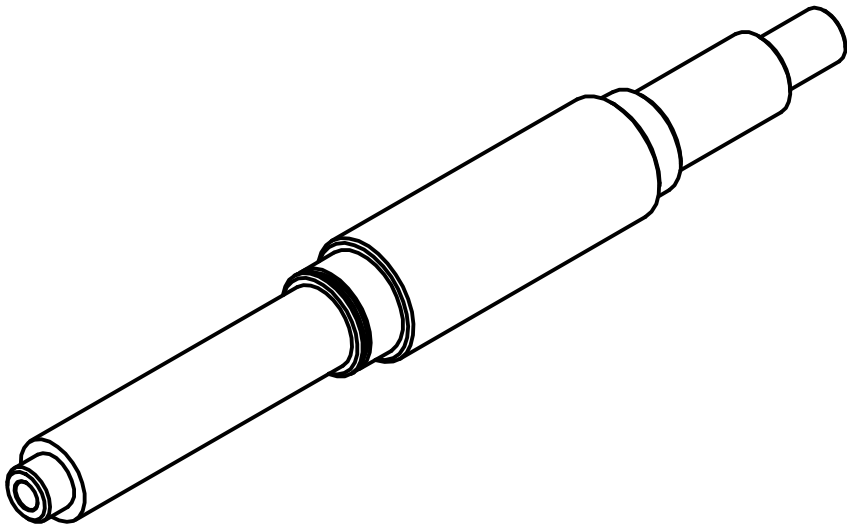
	FECHA	NOMBRE	FIRMA	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR LINARES	
DIBUJADO		JAVIER			
COMPROBADO					
ESCALA:	Diseño, fabricación y caracterización de una turbina Francis para uso docente			Nº PLANO 13/21	FORMATO A3
2 : 1				SUSTITUYE A:	
	Eje distribuidor			SUSTITUIDO POR:	



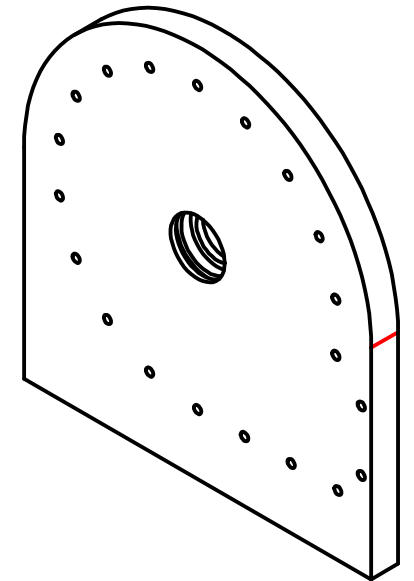
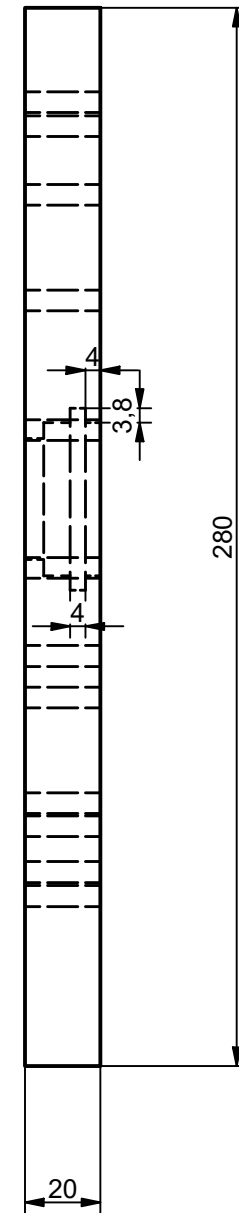
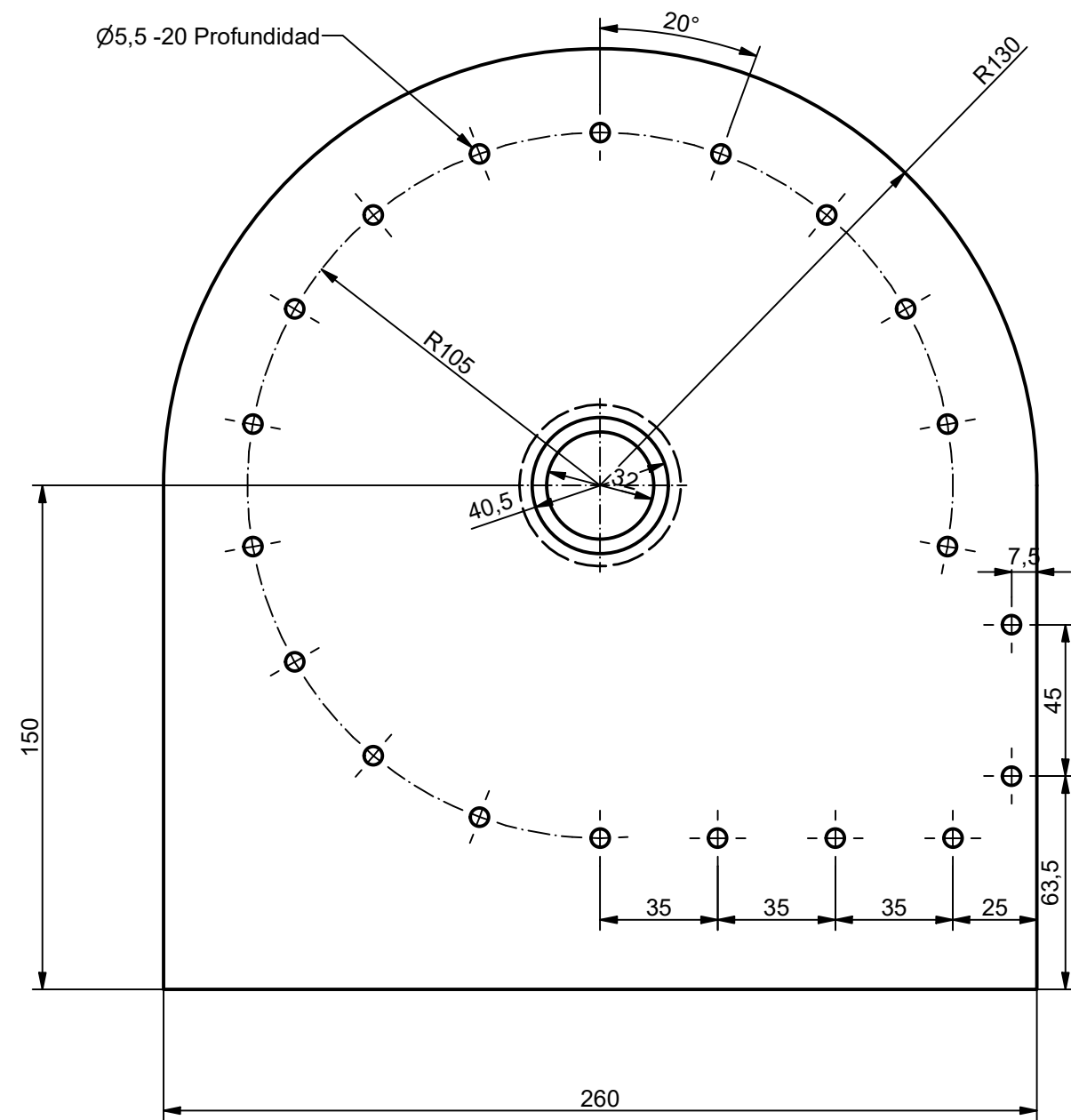
	FECHA	NOMBRE	FIRMA	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR LINARES	
DIBUJADO		JAVIER			
COMPROBADO					
ESCALA:	Diseño, fabricación y caracterización de una turbina Francis para uso docente			Nº PLANO 14/21	FORMATO A3
2 : 1				SUSTITUYE A:	
	Polea freno			SUSTITUIDO POR:	



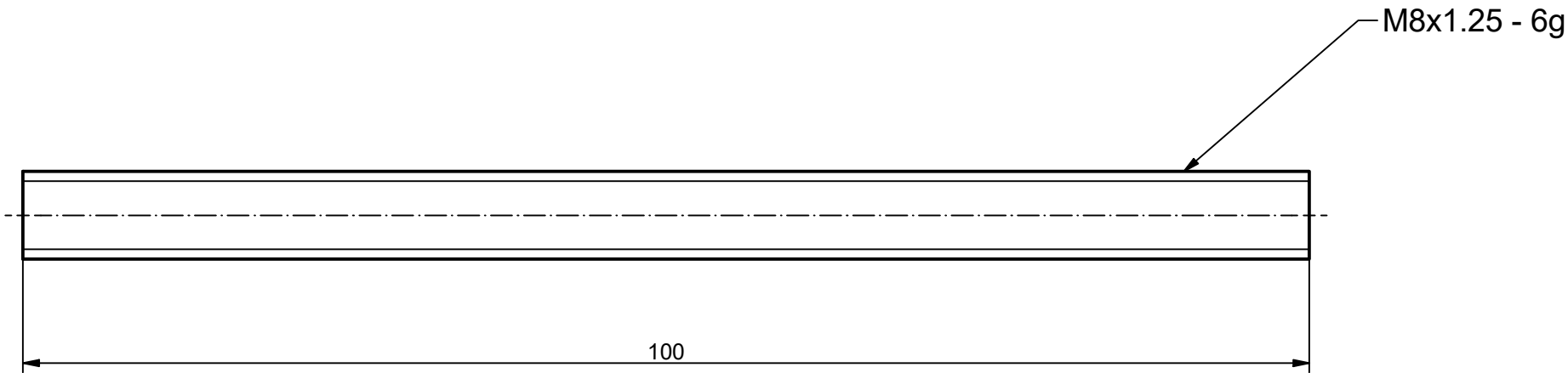
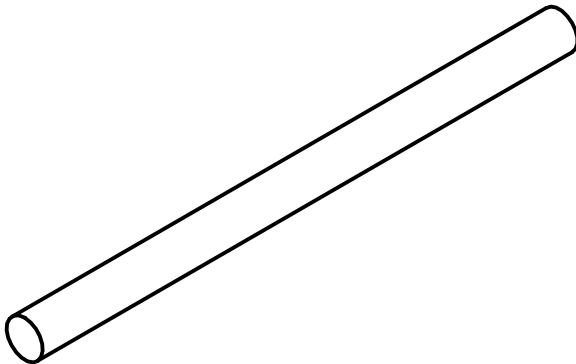
	FECHA	NOMBRE	FIRMA	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR LINARES		
DIBUJADO		JAVIER				
COMPROBADO						
ESCALA:	Diseño, fabricación y caracterización de una turbina Francis para uso docente				Nº PLANO 15/21	FORMATO A3
2 : 1					SUSTITUYE A:	
	Rodete				SUSTITUIDO POR:	



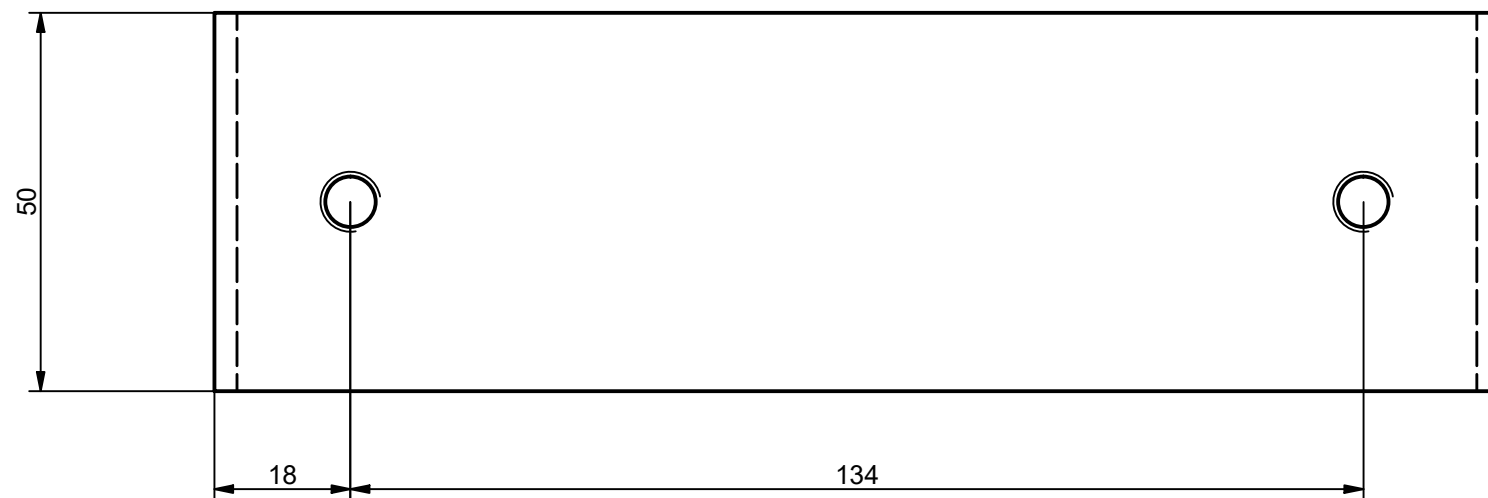
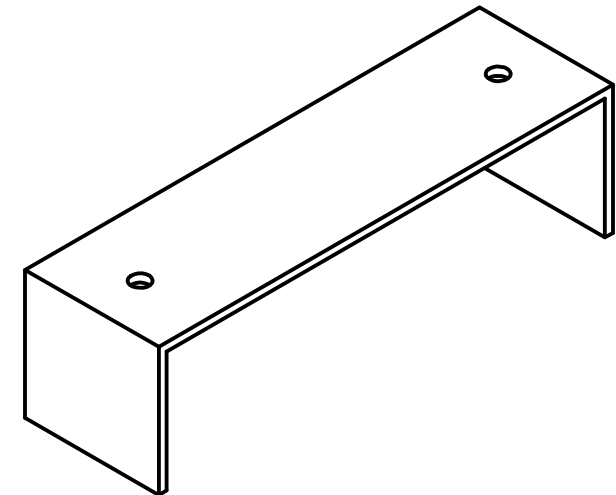
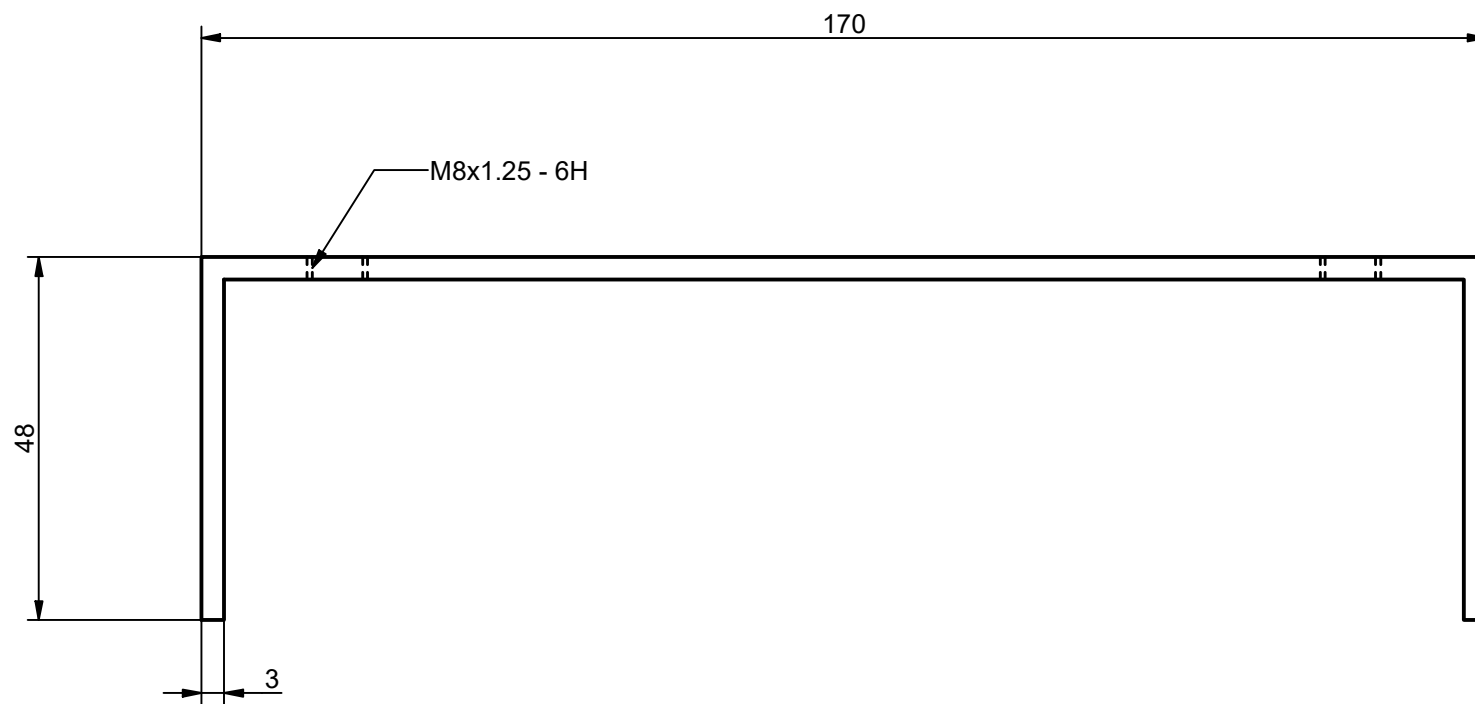
	FECHA	NOMBRE	FIRMA	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR LINARES	
DIBUJADO		JAVIER			
COMPROBADO					
ESCALA:	Diseño, fabricación y caracterización de una turbina Francis para uso docente Eje turbina			Nº PLANO 16/21	FORMATO A3
2 : 1				SUSTITUYE A:	
				SUSTITUIDO POR:	



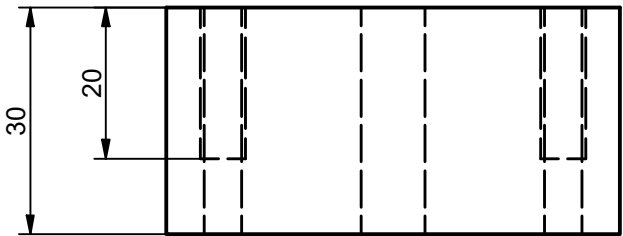
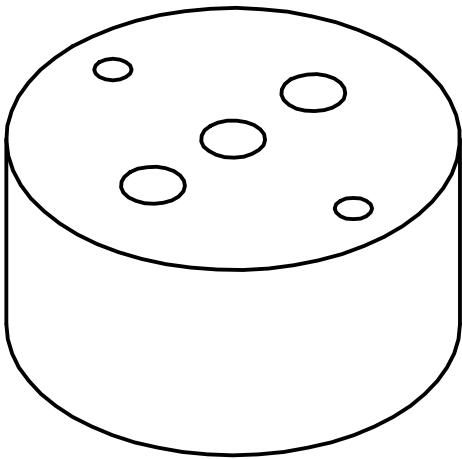
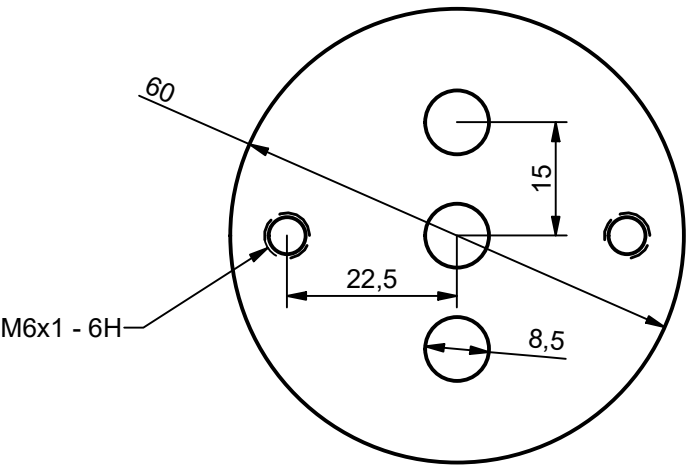
	FECHA	NOMBRE	FIRMA	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR LINARES		
DIBUJADO		JAVIER				
COMPROBADO						
ESCALA:	Diseño, fabricación y caracterización de una turbina Francis para uso docente				Nº PLANO 17/21	FORMATO A3
1 : 2					SUSTITUYE A:	
	Tapa de metacrilato				SUSTITUIDO POR:	



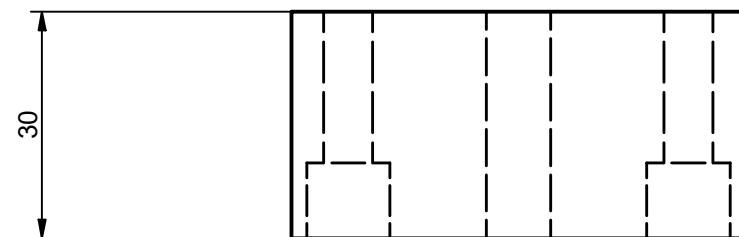
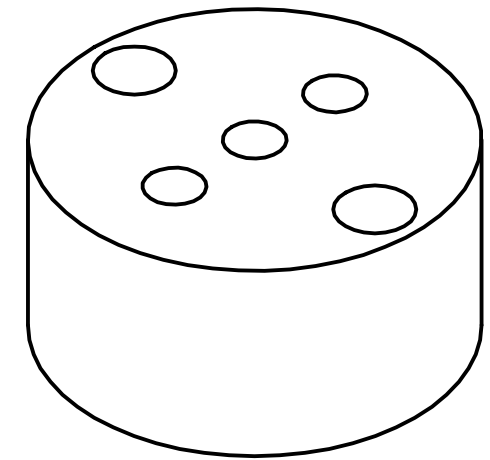
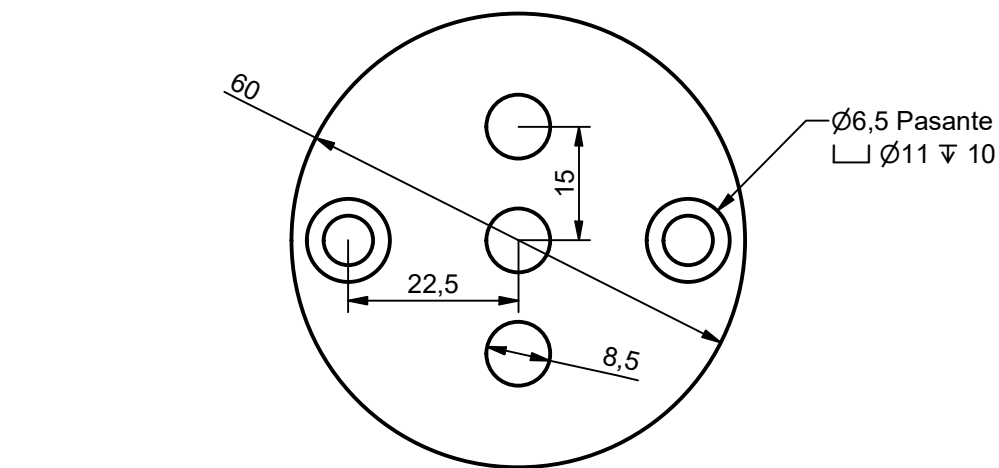
	FECHA	NOMBRE	FIRMA	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR LINARES		
DIBUJADO		JAVIER				
COMPROBADO						
ESCALA:	Diseño, fabricación y caracterización de una turbina Francis para uso docente Varilla roscada				Nº PLANO 18/21	FORMATO A3
2 : 1					SUSTITUYE A:	
					SUSTITUIDO POR:	



	FECHA	NOMBRE	FIRMA	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR LINARES	
DIBUJADO		JAVIER			
COMPROBADO					
ESCALA:	Diseño, fabricación y caracterización de una turbina Francis para uso docente Chapa Base			Nº PLANO 19/21	FORMATO A3
1 : 1				SUSTITUYE A:	
				SUSTITUIDO POR:	



	FECHA	NOMBRE	FIRMA	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR LINARES	
DIBUJADO		JAVIER			
COMPROBADO					
ESCALA:	Diseño, fabricación y caracterización de una turbina Francis para uso docente Cilindro freno inferior			Nº PLANO 20/21	FORMATO A3
1 : 1				SUSTITUYE A:	
				SUSTITUIDO POR:	



	FECHA	NOMBRE	FIRMA	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR LINARES	
DIBUJADO		JAVIER			
COMPROBADO					
ESCALA:	Diseño, fabricación y caracterización de una turbina Francis para uso docente Cilindro freno superior			Nº PLANO 21/21	FORMATO A3
1 : 1				SUSTITUYE A:	
				SUSTITUIDO POR:	