

Universidad de La Laguna

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA

Sección de Náutica, Máquinas y Radioelectrónica Naval

**Trabajo de Fin de Grado  
de Tecnologías Marinas**

**Elaboración de un modelo 3D de una turbina de  
vapor**

Presentado por

**Fco Javier Espinilla Peña**

Santa Cruz de Tenerife, 6 de septiembre de 2018



# Autorización

Pedro Rivero Rodríguez, Profesor Titular de Universidad perteneciente al área de conocimiento de Construcciones Navales del Departamento de *Ingeniería Agraria, Náutica, Civil y Marítima* de la Universidad de La Laguna hace constar que:

Fco Javier Espinilla Peña, ha realizado bajo mi dirección el trabajo de fin de grado titulado: Elaboración de un modelo 3D de una turbina de vapor .

Revisado dicho trabajo, estimo que reúne los requisitos para ser juzgado por el tribunal que le sea designado.

Para que conste a los efectos oportunos, firmo el presente documento en Santa Cruz de Tenerife, a 6 de septiembre de 2018.

Fdo.: Pedro Rivero Rodríguez  
-Tutor del trabajo-



# Resumen

Este trabajo de fin de grado consiste en la realización de un modelo en 3D de una turbina de vapor, de la que no se posee ningún tipo de plano o esquema y a partir de la medición, con herramientas básicas, podríamos replicar ciertas piezas, a través de impresión 3D, con la finalidad de sustituirlas en caso de avería. Para todo esto, he elegido una turbina de vapor museística que se encuentra en una central térmica de Tenerife, es una turbina de vapor fabricada por la compañía Brown Boveri en 1919. Para ello se parte de las medidas tomadas manualmente sobre la turbina, representándolas con las distintas herramientas del programa de software libre FreeCAD. Una vez elaborado el modelo, a modo de demostración se realizará una impresión 3D en PLA (a falta de acceso a impresora 3D de metal) de un álabe del rotor a partir de la representación gráfica realizada.



# Abstract

This final-degree project consists of the realization of a 3D model of a steam turbine, which does not have any type of plane or scheme and from the measurement, with basic tools, we could replicate certain parts, through 3D printing, in order to replace them in case of failure. Therefore, I have chosen a museum steam turbine that is located in a thermal power plant in Tenerife, it is a steam turbine manufactured by the Brown Boveri company in 1919. For this purpose, we start with the measurements taken manually on the turbine, representing them with the different tools of the free software program Freecad. When the model has been prepared, a 3D print will be made in PLA (in the absence of access to a 3D metal printer) of a rotor blade based on the graphic representation made.



# Índice general

|   |             |
|---|-------------|
| <b>Lista de figuras</b>   | <b>XIII</b> |
| <b>1. Introducción</b>  | <b>1</b>    |
| 1.1. Impresión 3D . . . . .                                     | 1           |
| 1.2. Turbinas de vapor . . . . .                                | 2           |
| <b>2. Objetivos</b>   | <b>5</b>    |
| <b>3. Metodología</b>   | <b>7</b>    |
| 3.1. Trabajo de campo . . . . .                                 | 7           |
| 3.2. Freecad . . . . .  | 7           |
| 3.3. Diseño en Freecad . . . . .                                | 8           |
| 3.3.1. Primeros pasos en el uso del Freecad . . . . .           | 8           |
| 3.3.2. Proceso detallado de creación del rotor . . . . .        | 8           |
| 3.3.3. Proceso detallado de la creación de la carcasa . . . . . | 11          |
| <b>4. Resultados</b>  | <b>35</b>   |
| 4.1. Elaboración del diseño 3D de la turbina . . . . .          | 35          |
| 4.1.1. Rotor . . . . .  | 35          |
| 4.1.2. Estator . . . . .  | 36          |
| 4.1.3. Carcasa . . . . .  | 36          |
| 4.1.4. Álabes . . . . .   | 40          |
| 4.1.5. Válvula de regulación: . . . . .                         | 40          |
| 4.1.6. Cojinetes . . . . .                                      | 43          |
| 4.1.7. Problemas con Freecad . . . . .                          | 43          |
| 4.1.8. Alcance del diseño . . . . .                             | 47          |
| 4.1.9. Acotaciones de elementos . . . . .                       | 47          |
| 4.1.10. Horas de trabajo . . . . .                              | 47          |
| 4.2. Impresión 3D de un elemento de la turbina . . . . .        | 48          |
| <b>5. Conclusiones</b>  | <b>51</b>   |
| <b>Anexos</b>   | <b>55</b>   |

|                                       |           |
|---------------------------------------|-----------|
| <b>A. Medidas de elementos</b>        | <b>55</b> |
| <b>B. Fotografías complementarias</b> | <b>61</b> |
| <b>Bibliografía</b>                   | <b>73</b> |

# Índice de figuras

|   |    |
|---|----|
| 3.1. Menú página de descarga Freecad . . . . .                                  | 8  |
| 3.2. Pantalla de inicio Freecad . . . . .                                       | 9  |
| 3.3. Banco de trabajo Part Design . . . . .                                     | 9  |
| 3.4. Crear nuevo proyecto . . . . .   | 9  |
| 3.5. Crear Sketch . . . . .   | 11 |
| 3.6. Orientación Plano . . . . .  | 11 |
| 3.7. Pantalla Sketch . . . . .  | 12 |
| 3.8. Herramienta Circunferencia . . . . .                                       | 12 |
| 3.9. Restricción de diámetro . . . . .  | 12 |
| 3.10. Muestra de restricción . . . . .  | 12 |
| 3.11. Icono extrusión . . . . .   | 12 |
| 3.12. Rotor . . . . .   | 13 |
| 3.13. Sketch de la geometría de un álabe . . . . .                              | 13 |
| 3.14. Extrusión de un álabe . . . . .   | 13 |
| 3.15. Banco de trabajo Draft . . . . .  | 14 |
| 3.16. Icono de matriz (Array) . . . . .   | 14 |
| 3.17. Datos de nuestra matriz (Array) . . . . .                                 | 14 |
| 3.18. Escalón de álabes del rotor. . . . .                                      | 15 |
| 3.19. Vista de la ventana de desplazamiento . . . . .                           | 15 |
| 3.20. Resultado de realización de los álabes . . . . .                          | 16 |
| 3.21. Sketch de la geometría de una paleta . . . . .                            | 16 |
| 3.22. Disco y remaches de la corona . . . . .                                   | 17 |
| 3.23. Icono de fusión . . . . .   | 17 |
| 3.24. Rotor como único elemento . . . . .                                       | 17 |
| 3.25. Crear pieza en el banco de trabajo Part . . . . .                         | 17 |
| 3.26. Medidas interiores de cilindro de resta de zona de alta presión . . . . . | 17 |
| 3.27. Ejemplo de corte de dos formas . . . . .                                  | 18 |
| 3.28. Icono de corte . . . . .  | 18 |
| 3.29. Muestra en vista combinada de un corte entre dos formas . . . . .         | 18 |
| 3.30. Aligeramiento en la zona de baja . . . . .                                | 19 |
| 3.31. Aligeramiento entre los escalones de álabes del rotor . . . . .           | 19 |

|  |    |
|--|----|
| 3.32. Icono de creación primitiva de geometrías paramétricas . . . . .                 | 19 |
| 3.33. Ventana tarea de la vista combinada . . . . .                                    | 20 |
| 3.34. Ubicación 3D del objeto . . . . .  | 20 |
| 3.35. Crear una forma . . . . .  | 21 |
| 3.36. Resultado del rotor . . . . .  | 21 |
| 3.37. Ventana Apariencia . . . . .   | 21 |
| 3.38. Propiedades de visualización . . . . .   | 22 |
| 3.39. Ventana de documento . . . . .   | 22 |
| 3.40. Elección de materiales de la pieza . . . . .                                     | 23 |
| 3.41. Skecth con medidas de la brida de la carcasa . . . . .                           | 25 |
| 3.42. Icono Giro de forma seleccionada . . . . .                                       | 25 |
| 3.43. Vista de la ventana de la herramienta Giro . . . . .                             | 25 |
| 3.44. Carcasa maciza obtenida de la brida . . . . .                                    | 26 |
| 3.45. Sketch con medidas de la zona de alta . . . . .                                  | 26 |
| 3.46. Sketch con medidas de la zona de alta . . . . .                                  | 26 |
| 3.47. Posición de los dos Sketch . . . . .   | 27 |
| 3.48. Icono interpolación por trayectoria . . . . .                                    | 27 |
| 3.49. Vista combinada de interpolación por trayectoria . . . . .                       | 28 |
| 3.50. Resultado de la interpolacion . . . . .  | 29 |
| 3.51. Resultado de la carcasa de la zona de alta . . . . .                             | 29 |
| 3.52. Página de descarga Inkscape . . . . .  | 30 |
| 3.53. Crear texto . . . . .  | 30 |
| 3.54. Conversion de texto a trayectos . . . . .  | 30 |
| 3.55. Importar archivo en SVG . . . . .  | 31 |
| 3.56. Extrusión de croquis del banco de trabajo Part . . . . .                         | 31 |
| 3.57. Extrusión de texto . . . . .   | 31 |
| 3.58. Icono de desplazamiento y giro de un objeto del banco de trabajo Draft . . . . . | 31 |
| 3.59. Posición de la placa de Brown Boveri . . . . .                                   | 32 |
| 3.60. Icono Generar Engranaje . . . . .  | 32 |
| 3.61. Perno maestro . . . . .  | 32 |
| 3.62. Iconos de Copiar y Pegar . . . . .   | 33 |
| 3.63. Iconos de Repetición Lineal . . . . .  | 33 |
| 3.64. Resultado de la colocación de los pernos . . . . .                               | 33 |
| 4.1. Foto rotor de la turbina . . . . .  | 35 |
| 4.2. Diseño rotor de la turbina . . . . .  | 36 |
| 4.3. Foto de rotor y toberas de la turbina . . . . .                                   | 36 |
| 4.4. Diseño de las toberas de la turbina . . . . .                                     | 37 |
| 4.5. Toberas de reacción de la turbina . . . . .                                       | 37 |
| 4.6. Diseño de las toberas de reacción de la turbina . . . . .                         | 37 |

|   |    |
|---|----|
| 4.7. Carcasa de la turbina; parte inferior . . . . .                      | 38 |
| 4.8. Carcasa de la turbina; parte superior . . . . .                      | 38 |
| 4.9. Diseño de la carcasa de la turbina; vista longitudinal . . . . .     | 38 |
| 4.10. Carcasa de la turbina . . . . .                                     | 39 |
| 4.11. Carcasa de la turbina . . . . .                                     | 39 |
| 4.12. Diseño de la carcasa de la turbina . . . . .                        | 39 |
| 4.13. Álabes de la turbina . . . . .                                      | 40 |
| 4.14. Foto de los álabes de la turbina . . . . .                          | 41 |
| 4.15. Diseño de los álabes de la turbina . . . . .                        | 41 |
| 4.16. Detalle del zunchado de los álabes de la turbina . . . . .          | 41 |
| 4.17. Foto de las paletas de la corona de acción de la turbina . . . . .  | 42 |
| 4.18. Diseño de las paletas de la corona de la turbina . . . . .          | 42 |
| 4.19. Válvula de regulación de la turbina . . . . .                       | 43 |
| 4.20. Válvula de regulación de la turbina . . . . .                       | 44 |
| 4.21. Referencia para la elaboración del interior de la válvula . . . . . | 44 |
| 4.22. Diseño de la válvula de regulación de la turbina . . . . .          | 45 |
| 4.23. Diseño de la válvula de regulación de la turbina . . . . .          | 45 |
| 4.24. Cojinete de la turbina . . . . .                                    | 46 |
| 4.25. Cojinete de la turbina . . . . .                                    | 46 |
| 4.26. Ventana programa de impresora 3D . . . . .                          | 49 |
| 4.27. Proceso de fabricación de la pieza . . . . .                        | 49 |
| 4.28. Resultado de la impresión . . . . .                                 | 50 |
|   |    |
| A.1. Sección paleta de la corona . . . . .                                | 56 |
| A.2. Carcasa inferior completa . . . . .                                  | 56 |
| A.3. Carcasa superior . . . . .   | 57 |
| A.4. Sección Álabe . . . . .  | 57 |
| A.5. Carcasa inferior . . . . .   | 58 |
| A.6. Válvula de regulación . . . . .                                      | 58 |
| A.7. Sección brida . . . . .  | 59 |
| A.8. Rotor . . . . .  | 59 |
| A.9. Alzado del rotor . . . . .   | 60 |



# Acrónimos

**ABB** - Asea Brown Boveri

**CAD** - Computer Aided Design

**SVG** - Scalable Vector Graphics

**RAM** - Random Access Memory

**STL** - Standard Triangle Language

**PLA** - Poly Lactic Acid



# 1 Introducción

Con las nuevas tecnologías de digitalización y de impresión 3D, nuestra profesión va a dar el paso en el mundo de datos y en el de lo físico. Esta tecnología tiene el potencial de transformar los procesos de medición de rendimientos, fabricación, puede reconfigurar las cadenas de suministro a nivel global y que la fabricación de determinadas piezas se realice incluso a bordo del propio barco en navegación. Es por lo que va a ser cada día más importante en nuestra formación conocer y manejar este tipo de herramientas.

La digitalización de determinadas máquinas puede facilitar la medición de sus parámetros o características de algunas de sus partes. Hoy en día, existen scanners que facilitan enormemente esta tarea, pero con una buena medición manual, también se puede realizar modelos lo suficientemente detallados como para calcular alguno de sus parámetros de funcionamiento y realizar piezas de sustitución mediante la impresión 3D.

Una turbina de vapor histórica (Brown Boveri 1919) como la que, a modo de muestra se haya desmontada, en una central eléctrica de Tenerife, brinda la oportunidad de colaborar en su recuperación ya que no consta que existan planos ni otros datos técnicos, aparte de los que se encuentran impresos en la placa de esta. Puestos en contacto con la empresa fabricante (actualmente ABB) y con personal de la central eléctrica, no han podido facilitar datos, referencias, procedencia y/o servicio prestado.

## 1.1 Impresión 3D

La impresión 3D lleva ya algún tiempo empleándose en la industria, particularmente en el sector naval. Entre las ventajas que proporciona este novedoso sistema de fabricación está la reducción de costes, pues no se desperdicia material, utiliza menos maquinaria y personal, generando una disminución del gasto de combustible, siendo por lo tanto una técnica más ecológica. Por otra parte, se simplifican los procesos de producción, ya que no utiliza molde y una sola impresora puede servir para la fabricación de distintas piezas, que además pueden tener un alto grado de personalización.

Esta técnica además, permite que los stocks de pieza sean virtuales y en red, es decir, que al estar digitalizados simplemente hay que usar un archivo y cargarlo en la impresora. Otra gran ventaja es la mejora en la calidad de los productos con la posibilidad de realizar diseños más complejos y con mejores controles de calidad (ref. [5] MARC SACHON (2016), *Revista Antiguos alumnos IESE, Impresión 3D: la digitalización de la fabricación.* ).

Hoy en día, grandes navieras y las armadas de algunos países están dotando con impresoras 3D sus navíos, para así poder producir a bordo las piezas que precisan con un importante ahorro y evitando desplazamientos a bases para su reparación.

Frente a estas ventajas, la fabricación por impresión 3D, aún tiene algunos inconvenientes, como la limitación del volumen de las piezas, el coste de las impresoras y los materiales que utilizan.

Por último, este sistema engloba la utilización de distintos materiales y de diversas tecnologías, compartiendo además entre ellas un rasgo común, la pieza que obtenemos es el resultado final del depósito de distintas capas de material bien sean plásticos, metales u otros.

## 1.2 Turbinas de vapor

### Turbinas de Vapor

Una Turbina de vapor, es un motor rotativo que gracias a la energía que produce una corriente de vapor de agua, genera energía mecánica. Entre los distintos componentes que la forman, el fundamental es el rotor, este está formado por un eje central alrededor del cual se encuentran los álabes, produciendo una fuerza tangencial que permite que el vapor impulse el rotor y lo haga girar. La energía resultante se transmite a través de un eje hacia una máquina, un generador o una hélice.

### Antecedentes históricos de las turbinas de vapor

La construcción de la turbina de vapor y su posterior desarrollo se remontan a finales del siglo pasado. Concretamente en 1883, Gustaf Laval y Charles Parsons de forma independiente, idearon y perfeccionaron esta máquina. A Laval, le debemos las turbinas de acción con un solo escalonamiento y a Parsons las de reacción de varios escalonamientos y el sistema de marcha atrás. (ref. [10] SCHEGLIAIEV.A.V. (1978). *Turbinas de vapor: la teoría del proceso térmico y las construcciones de turbinas. Mir Moscú.*)

El éxito que consiguieron ambos, alcanzó un gran nivel, permitiendo que la turbina de vapor se convirtiera en el principal tipo de motor para accionar barcos de gran tonelaje y generadores de corriente eléctrica.

### Funcionamiento de las turbinas de vapor

La turbina de vapor se encuentra dentro de un ciclo termodinámico de potencia denominado ciclo Rankine (debido a su desarrollador) y que consiste en el calentamiento y evaporación a alta presión en una caldera de agua, el vapor producido atraviesa la turbina en la cual se expende y genera trabajo mecánico. Posteriormente el vapor ya a baja presión se condensa se enfría y se vuelve a introducir en la caldera mediante una bomba para cerrar el ciclo.

El principio de funcionamiento es el siguiente: Al desviar un álabe móvil un chorro de vapor a alta velocidad y modificar su dirección, se producen fuerzas que generan trabajo mediante el desplazamiento del álabe y por consiguiente imprimiendo movimiento giratorio al rotor. Las turbinas están compuestas por dos partes fundamentales (ref. [6] M. LUCINI (1972). *Turbomáquinas de vapor y de gas, su cálculo y su construcción.*):

**Estator:** está formado por álabes unidos a la carcasa de la turbina. Como su nombre indica, representa la parte fija de la turbina. Se encarga de aumentar la energía cinética del vapor para que pueda producir trabajo mecánico en el rotor.

**Rotor:** lo componen una o varias ruedas de alabes unidas a un eje y son la parte móvil de la turbina. Reciben la energía procedente del vapor y la transforman en energía mecánica en forma de movimiento giratorio del eje de la turbina.

Cada pareja formada por una corona estator y otra corona rotor se conoce con el nombre de etapa o escalonamiento. Cada turbina tiene por lo general más de un escalonamiento, el número de ellos dependerá de la potencia de la turbina. Además, las turbinas requieren algunos otros componentes para funcionar, como: cojinetes de apoyo, cojinetes de empuje, un sistema de lubricación de los cojinetes, un sistema de estanqueidad, sistemas de equilibrado, etc.

La clasificación de las turbinas de vapor puede hacerse: Según la forma de aprovechamiento de la energía contenida en el flujo de vapor (Reacción o Acción). El grado de reacción es una medida del reparto de salto de entalpías entre estator y rotor.  $R = \text{Salto de entalpía en rotor} / \text{Salto de entalpía en escalonamiento}$ .

Para un escalonamiento de Acción ( $-0,1 < R < 0,2$ ), los álabes del rotor deben estar colocados de tal forma que el área de entrada y de salida del vapor a su paso por el rotor no cambie, y por tanto

tampoco la velocidad relativa ni la presión. La sección de paso del rotor ha de ser constante. Para un escalonamiento de Reacción ( $0,4 < R < 0,6$ ), los álabes del rotor están colocados siendo el área de salida inferior al área de entrada, es decir un conducto convergente, acelerando el fluido, aumentando su velocidad relativa y disminuyendo su presión. La sección de paso en el rotor es decreciente. Según el número de etapas (multietapa o monoetapa) Según la dirección del flujo de vapor (axiales o radiales) Según si existe o no extracción de vapor antes de llegar al escape Según la presión de salida del vapor pueden ser Contrapresión (el vapor a la salida de la turbina se encuentra a una presión superior a la atmosférica) o Condensación (la presión del vapor a la salida de la turbina es muy inferior a la presión atmosférica).



## 2 Objetivos

Este trabajo surge del reto de intentar realizar una pequeña demostración de lo dicho anteriormente. Por supuesto con las limitaciones de medios económicos a las que estamos sometidos, pero eso sí con la ilusión y el empeño necesarios para desarrollar esta simple demostración.

El profesor me propuso la realización de un modelo 3D de una turbina de vapor situada en una central eléctrica de Tenerife y se ha intentado realizar un diseño a mayor escala para sacar más provecho al programa en vez de centrarse en una única pieza o elemento.

Los objetivos generales del trabajo son:

- Ampliar conocimientos sobre el uso de programas de diseño 3D, es este caso del Freecad.
- Ampliar conocimientos sobre los elementos que forman una turbina.

Los objetivos específicos de este trabajo son:

- Localizar información sobre el origen de la turbina.
- Tomar medidas de manera adecuada de los elementos de la turbina de vapor.
- Realizar un modelo 3D de la turbina.
- Ampliar conocimientos sobre la impresión 3D
- Impresión 3D de un elemento del modelo, a modo de demostración de carácter didáctico.



# 3 Metodología

## 3.1 Trabajo de campo

Al ser la central térmica una empresa privada y de importancia estratégica, ya que proporciona electricidad a parte de la isla de Tenerife, ésta posee un dispositivo de seguridad a la entrada de las instalaciones que complica el acceso a la hora de observar y realizar las mediciones necesarias en la turbina. La primera vez que me presenté allí tuve que exponer al personal de Seguridad y al jefe de mantenimiento de la central mi deseo de realizar mi trabajo de fin de curso sobre la turbina que tienen expuesta en el exterior. Tras la conversación y sus correspondientes consultas, se acordó que podría visitar la turbina llamando previamente cada vez que quisiera ir a las instalaciones y presentándome al personal de seguridad de guardia en ese momento. Esto fue uno de los inconvenientes a la hora de realizar el trabajo ya que debido a la rotación de su personal de seguridad cada día había una persona diferente al teléfono a la cual había que explicar el por qué de mi llamada, además de que en ocasiones, me pasaba la llamada nuevamente para hablar con el jefe de mantenimiento al que podría resultar molesto. Se ha tenido que asistir a la misma unas 5 veces para completar las mediciones.

Se midieron 'in situ' cada elemento del rotor de la turbina. Fue una tarea complicada ya que la estructura y formas de la pieza son complejas y la medición se realizó con elementos simples y básicos como cinta métrica, reglas, calibrador y niveles. Lo primero que se midió fue el diámetro del eje y su largo. Con esta medida como referencia fue más fácil medir el resto de elementos como los dos discos de toberas, los escalones de álabes, los sellos de entrada y salida y resto de componentes.

## 3.2 Freecad

FreeCAD es una aplicación libre de diseño asistido por computador. Su funcionamiento se basa en un modelador 3D paramétrico que permite modificar fácilmente el diseño regresando dentro del historial del modelo y cambiando sus parámetros. Este software está basado en Open Cascade y programado en C++ y Python. Sigue una filosofía basada en el desarrollo de la comunidad, es por esto que es multiplataforma (Windows, Mac y Linux), altamente personalizable, programable mediante scripts y soporta extensiones. Este software está dirigido a un amplio abanico de usuarios:

- Aquellos que no tienen ninguna experiencia previa en CAD, ya que debido a la amplia comunidad que posee, hay gran cantidad de tutoriales.
- Usuarios CAD avanzados, pues este software posee diferentes bancos de trabajo que son muy semejantes a las alternativas comerciales más populares.

Los programadores encontrarán en este software una opción con la que se sentirán muy cómodos ya que casi la totalidad de funciones de FreeCAD son accesibles a través de Python. Aparte de eso, encuentra en la educación un gran interés debido a que permite enseñar a los estudiantes un programa CAD sin tener que preocuparse por la compra de licencias. Para terminar, cabe remarcar que este software es plenamente capaz de competir con las alternativas comerciales más importantes. Para demostrar esto, podemos ver algunos ejemplos que se han diseñado con este programa.

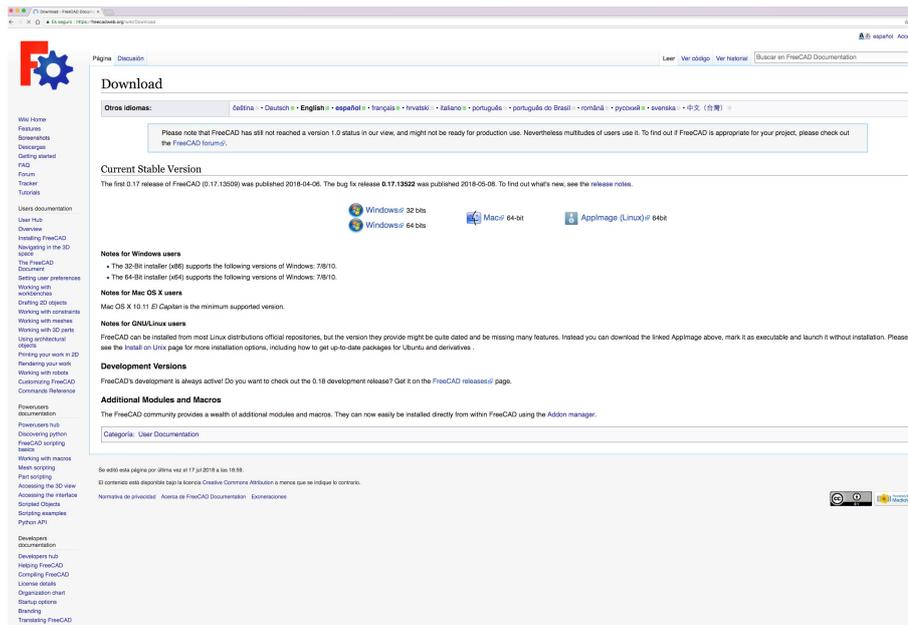


Figura 3.1: Menú página de descarga Freecad

Fuente: elaboración propia

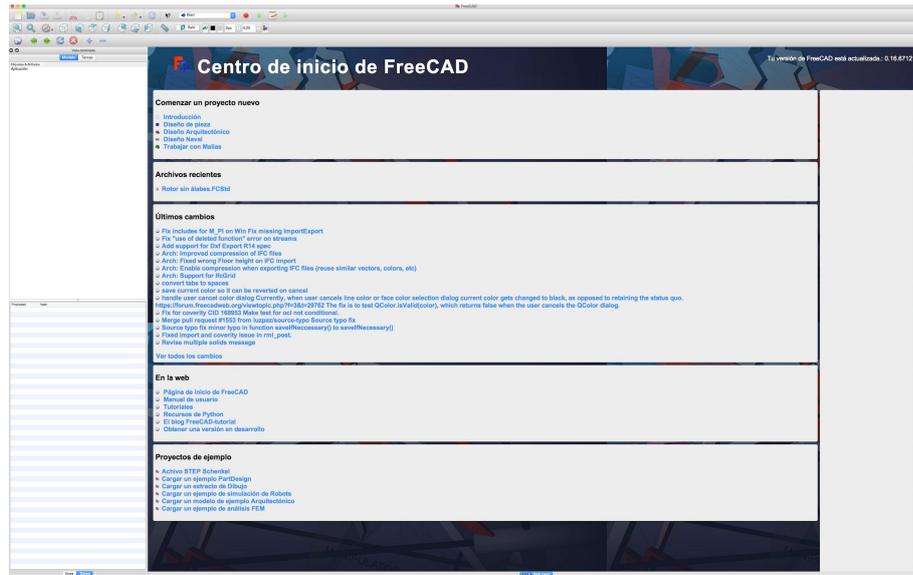
## 3.3 Diseño en Freecad

### 3.3.1 Primeros pasos en el uso del Freecad

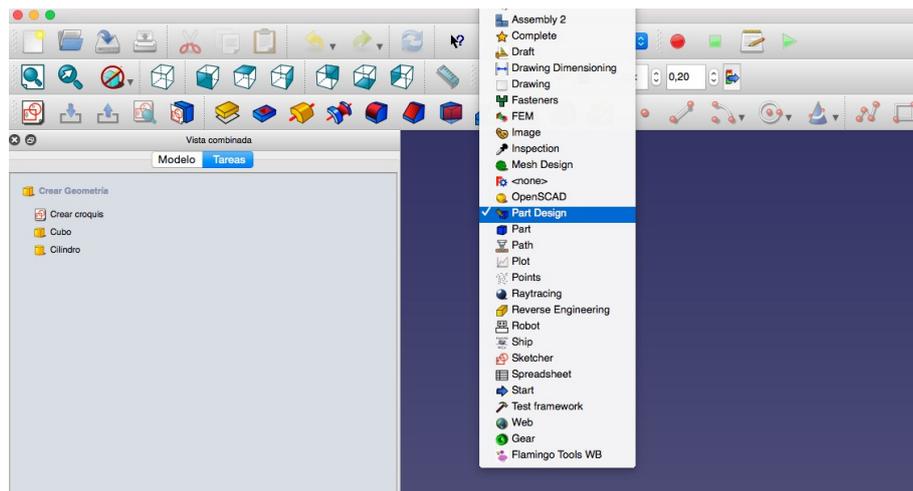
1. El primer paso fue acceder a la página oficial de Freecad (fig. 3.1) y descargar el programa en su versión más actual (0.17). Destacar que el programa está todavía en fase de desarrollo y no tiene una versión definitiva.
2. Aparecerá la siguiente página principal (fig.3.2).
3. Para crear el diseño de una pieza o cualquier elemento desde cero se va a utilizar el banco de trabajo Part Design (fig.3.3). Seguidamente se crea un nuevo documento con el nombre de el proyecto, en este caso “Turbina” (fig. 3.4).

### 3.3.2 Proceso detallado de creación del rotor

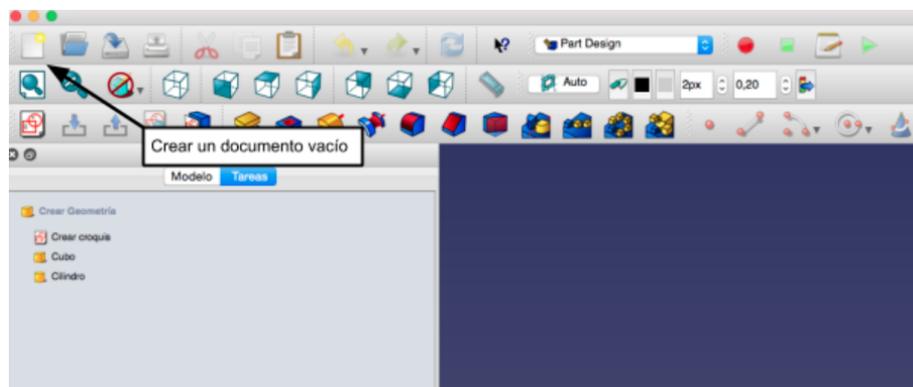
1. Para comenzar con el diseño del rotor, se va al banco de trabajo Part Design y creamos un Sketch. Se pincha en el icono del Sketch (fig. 3.5) y aparecerá una ventana donde se selecciona el plano en el que se quiere colocar el boceto.(fig. 3.6).
2. Se sitúa en el suelo, en el plano YZ, seguidamente se pincha en “Aceptar” y se verá un fondo cuadrículado con eje de coordenadas cartesianas (fig. 3.7).
3. Con esto ya se puede empezar a dibujar sobre el Sketch el eje del rotor, para el cual se dibujará una circunferencia que se encuentra en la pestaña superior y se pincha en el de circunferencia (fig. 3.8).
4. Una vez se tiene el boceto hecho se puede darle restricciones en cuanto a diámetro y distancia a los ejes (fig. 3.9).
5. Con estas restricciones se cierra el boceto y seguidamente se extrusiona con la herramienta Pad (fig.3.11) . Y se le da la altura de extrusión que se desee en cada momento.



**Figura 3.2:** Pantalla de inicio Freecad  
Fuente: elaboración propia

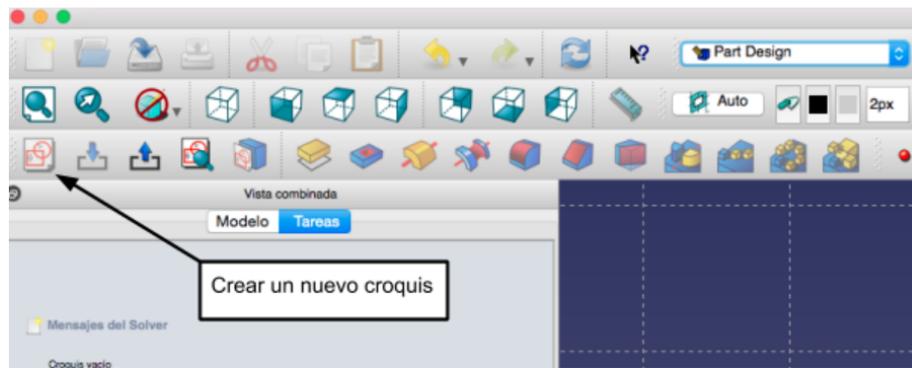


**Figura 3.3:** Banco de trabajo Part Design  
Fuente: elaboración propia



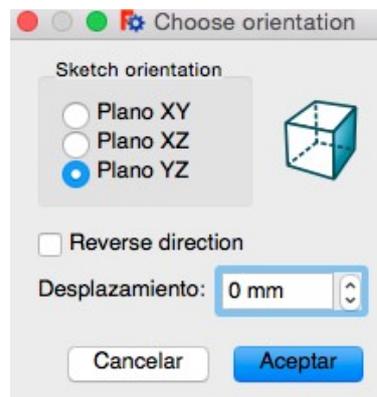
**Figura 3.4:** Crear nuevo proyecto  
Fuente: elaboración propia

6. Este fue el método para la realización del rotor y las partes que lo componen (fig.3.12). Teniendo por consiguiente el rotor como un elemento sólido. El siguiente paso sería dibujar los álabes móviles del rotor con sus refuerzos y las coronas de paletas con sus remaches.
7. Para dibujar los álabes y paletas se parte del mismo banco de trabajo Part Design, (fig.3.3) y se usa otra vez el Sketch para dibujar la geometría de los álabes y paletas (fig.3.13). El siguiente paso es extrusionar la geometría del álabe con el tamaño real del mismo. (fig.3.14).
8. Cada escalón tiene 142 álabes; para hacer todos los álabes y que además giren en torno al rotor se utiliza la herramienta “Array” (Matriz) en la cual se pueden crear matrices de elementos. Para hacer una matriz polar, es decir, una matriz en torno a un eje, se pincha en el icono de matriz (fig.3.16) situado en la pestaña de arriba del banco de trabajo Draft (fig.3.15).
9. Primero se escoge el elemento del que se quiera hacer una matriz pinchando en el mismo y en las opciones de la vista combinada (fig.3.17) aparece primero el ángulo de giro de la matriz que se elegirá que gire en torno a todo el eje ( $360^\circ$ ), después se tiene la opción del tipo de Array que se quiera el cual es de tipo polar. Luego se tiene la opción de Ejes (Axis) donde aparecen los tres ejes y se debe elegir en torno a cuál se quiere que gire, también se tiene la opción de elegir la distancia respecto del centro (Center) del eje se quieren los álabes y por último seleccionar el número de álabes que se desea. El resultado que se obtiene sería el de la fig.3.18.
10. Ahora se tiene una matriz de álabes que se debe situar en el rotor moviéndola en las tres direcciones del espacio con la herramienta de desplazamiento de la vista combinada (fig.3.19).
11. Para el rotor se debe repetir esta operación 30 veces, ya que es el número de escalones de álabes que tiene el rotor de la turbina. Cambiando parámetros de la extrusión, del Array y de la posición se tiene resultado fig.3.20.
12. Para el caso de la corona de paletas se sigue el mismo proceso, pero se cambia la geometría de la paleta en el Sketch (fig.3.21), además de añadir también los remaches de cada paleta (fig.3.22).
13. Como último paso se tendría la realización de los aligeramientos del rotor en la zona de alta presión, en el rotor entre la zona de álabes de reacción y los álabes de la zona de alta presión y en la zona del sello de baja presión. Para realizar los aligeramientos se utiliza la operación booleana de diferencia, la cual nos permite hacer taladros, vaciados, etc. Se empieza yendo al banco de trabajo Part. Primero se debe unir todos los elementos del eje en uno solo, para ello se pincha en cada elemento del rotor y en la pestaña superior se selecciona el icono de Fusión (fig.3.23). Y se consigue que todo el rotor forme una única pieza (fig.3.24).
14. Cuando ya se tiene el rotor en una única pieza llega el momento de hacer el vaciado, para ello se crea una pieza (fig.3.25) con las medidas interiores del vaciado para tener el aligeramiento que se quiera (fig.3.26).
15. Una vez esté la pieza situada en la zona donde se quiera el vaciado (fig.3.27), se pincha primero sobre la pieza a la que se quiera hacer la resta y después la que se quiere que reste, posteriormente se pincha en el icono de corte (fig.3.28). Y quedaría el corte como se muestra en la (fig.3.29), siguiendo con el mismo procedimiento para el resto de aligeramientos como la zona de baja presión (fig.3.30) y entre los escalonamientos del rotor (fig.3.31).
16. Otro método para situar los elementos que se desea restar es utilizar la herramienta de creación de primitivas geométricas paramétricas (fig.3.32) del banco de trabajo Part. En la cual se puede situar la base del elemento que se quiere crear (cubo, cono, esfera, cilindro, toro, etc) en cualquier punto del espacio pinchando sobre esa zona.
17. Una vez se pincha en el icono en la vista combinada aparece la ventana de la fig.3.33, en la que existe una pestaña en la cual se puede seleccionar qué elemento se desea crear.
18. Para situar el elemento se pincha en “Vista 3D” (fig.3.34) y seguidamente se vuelve a pinchar en que zona o sobre qué pieza se quiere situar la base de nuestro elemento. Y por último se pincha a “Crear” (fig.3.35) para que aparezca el rotor terminado (fig.3.36).



**Figura 3.5:** Crear Sketch

Fuente: elaboración propia



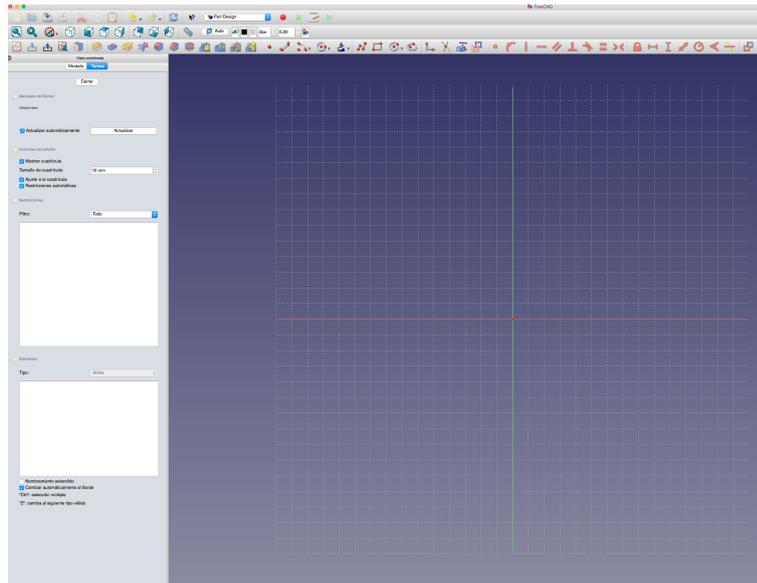
**Figura 3.6:** Orientación Plano

Fuente: elaboración propia

19. Para dar color a cada pieza y diferenciarlas es tan sencillo como ir a la vista combinada y seleccionar el elemento al que se quiera darle cualquier color con el botón derecho del ratón y aparecerá la siguiente ventana dónde se debe pinchar en donde pone “Apariencia”(fig.3.37).
20. Se pincha en “Apariencia” y se abrirá una ventana con varias opciones en las que se podrá cambiar la forma en la que se quiere que se vea nuestra pieza(fig.3.38), como por ejemplo con puntos (Points), como un elemento sombreado (Shaded), como una estructura de mallas( Wireframe) o como se tiene por defecto con sombreado y líneas (Flat Lines)(fig.3.39) También se puede elegir el color de las líneas y el color del cuerpo de la pieza. Esta ventana tiene la opción además de elegir si la pieza se quiere que sea de un material en concreto como por ejemplo Aluminio, Cobre, Plástico o Rubí (fig.3.40). Aparte de todo esto también tiene una opción en la que se puede dar una determinada transparencia a la pieza lo cual es muy útil si se quiere que se vean elementos interiores.

### 3.3.3 Proceso detallado de la creación de la carcasa

1. Para comenzar con la realización de la carcasa lo que nos va a ayudar a conseguir la forma de la estructura va a ser la brida de unión de la turbina. Para ello se hicieron mediciones de la misma, midiendo cada parte lo más preciso posible sobre un boceto hecho en papel. Una vez se tiene las medidas se crea un Sketch con el nombre de “Brida” (fig.3.41) y se dibuja la forma con las herramientas del Part Design (líneas, circunferencias, arcos y sus restricciones).
2. Una vez se tiene el Sketch con la forma de la brida, se va al banco de trabajo Part y primero se pincha en el Sketch y después se le da al icono de Girar una forma seleccionada (fig.3.42).
3. En la vista combinada aparecen las siguientes opciones de la herramienta (fig.3.43). Para crear la carcasa debemos seleccionar el eje en torno al que se quiere que gire, en este caso el eje Y,



**Figura 3.7:** Pantalla Sketch

Fuente: elaboración propia



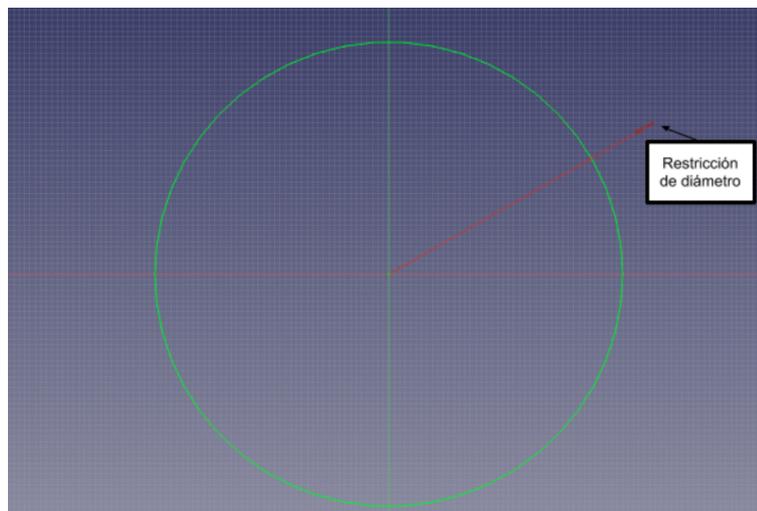
**Figura 3.8:** Herramienta Circunferencia

Fuente: elaboración propia



**Figura 3.9:** Restricción de diámetro

Fuente: elaboración propia



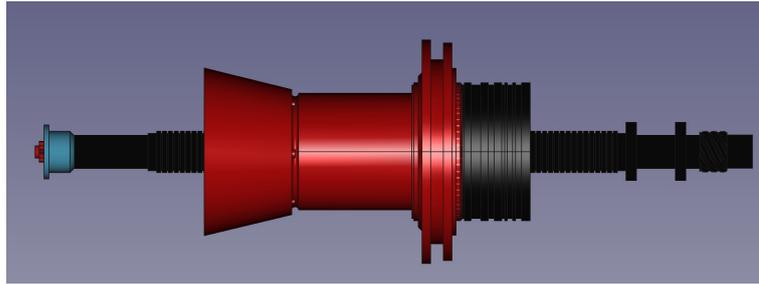
**Figura 3.10:** Muestra de restricción

Fuente: elaboración propia

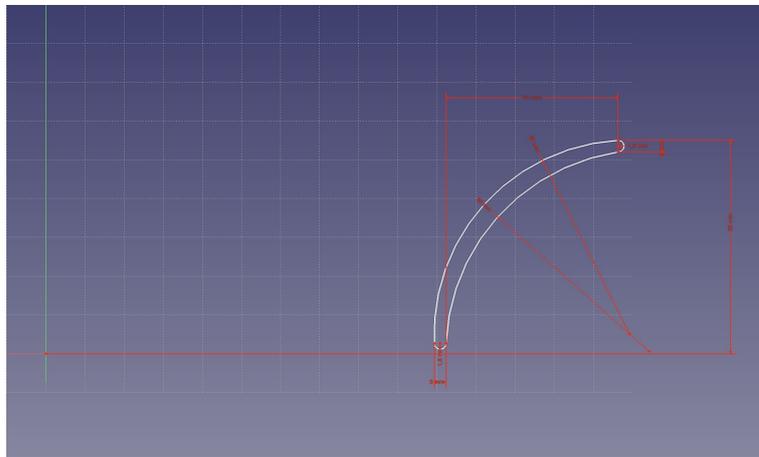


**Figura 3.11:** Icono extrusión

Fuente: elaboración propia



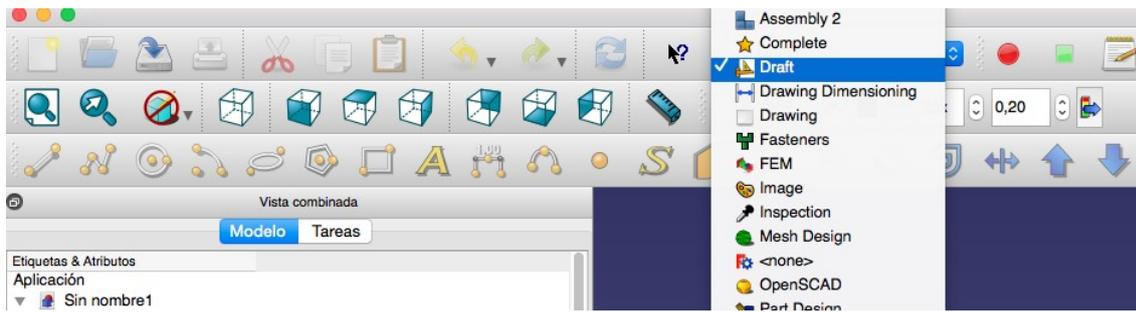
**Figura 3.12:** Rotor  
Fuente: elaboración propia



**Figura 3.13:** Sketch de la geometría de un álabe  
Fuente: elaboración propia



**Figura 3.14:** Extrusión de un álabe  
Fuente: elaboración propia



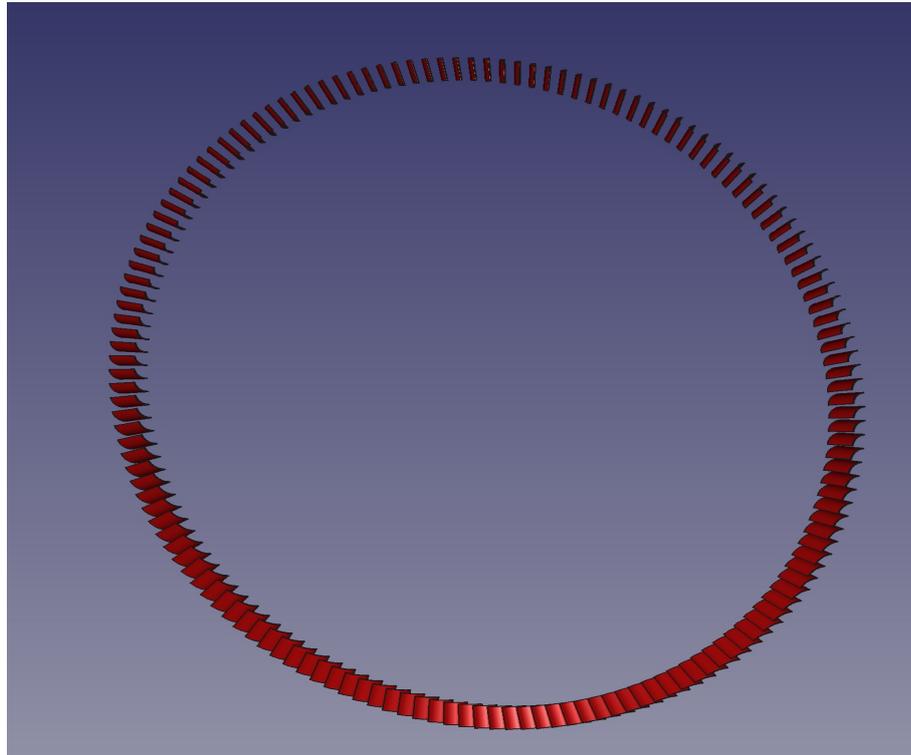
**Figura 3.15:** Banco de trabajo Draft  
Fuente: elaboración propia



**Figura 3.16:** Icono de matriz (Array)  
Fuente: elaboración propia

|                 |  |
|-----------------|--|
| Base            |  |
| ► Placement     | [(0,00 0,00 1,00); 0 °; (0 mm 523 mm -2.645 mm)] |
| Label           | Alabes215  |
| Draft           |  |
| Angle           | 360,00 °   |
| Array Type      | polar  |
| ▼ Axis          | [0,00 1,00 0,00]                                 |
| x               | 0,00   |
| y               | 1,00   |
| z               | 0,00   |
| Base            | Pad036   |
| ▼ Center        | [0 mm 0 mm 2.645 mm]                             |
| x               | 0 mm   |
| y               | 0 mm   |
| z               | 2.645 mm   |
| Fuse            | false  |
| ► Interval Axis | [0 mm 0 mm 0 mm]                                 |
| ► Interval X    | [1 mm 0 mm 0 mm]                                 |
| ► Interval Y    | [0 mm 1 mm 0 mm]                                 |
| ► Interval Z    | [0 mm 0 mm 0 mm]                                 |
| Number ...      | 142  |
| Number X        | 2  |
| Number Y        | 2  |
| Number Z        | 1  |

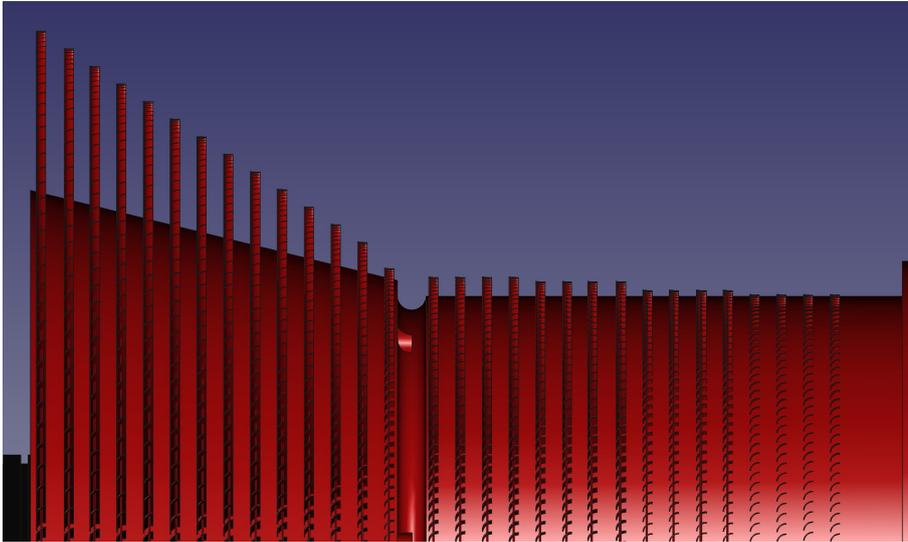
**Figura 3.17:** Datos de nuestra matriz (Array)  
Fuente: elaboración propia



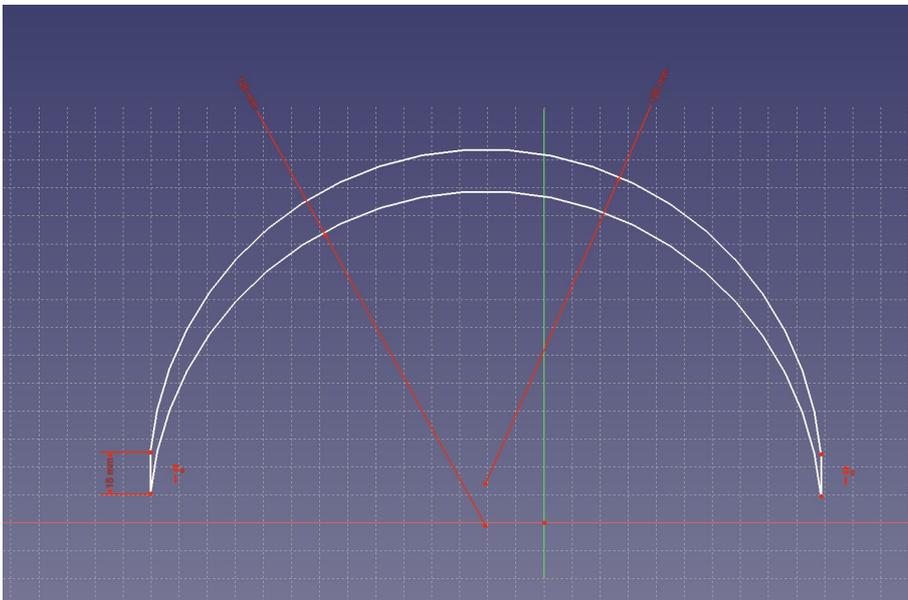
**Figura 3.18:** Escalón de álabes del rotor.  
Fuente: elaboración propia

| Base        |  |
|-------------|--|
| ▼ Placement | [(0,00 0,00 1,00); 0 °; (0 mm 523 mm -2.645 mm)] |
| Angle       | 0 °  |
| ▼ Axis      | [0,00 0,00 1,00]                                 |
| x           | 0,00   |
| y           | 0,00   |
| z           | 1,00   |
| ▼ Position  | [0 mm 523 mm -2.645 mm]                          |
| x           | 0 mm   |
| y           | 523 mm   |
| z           | -2.645 mm  |
| Label       | Alabes215  |

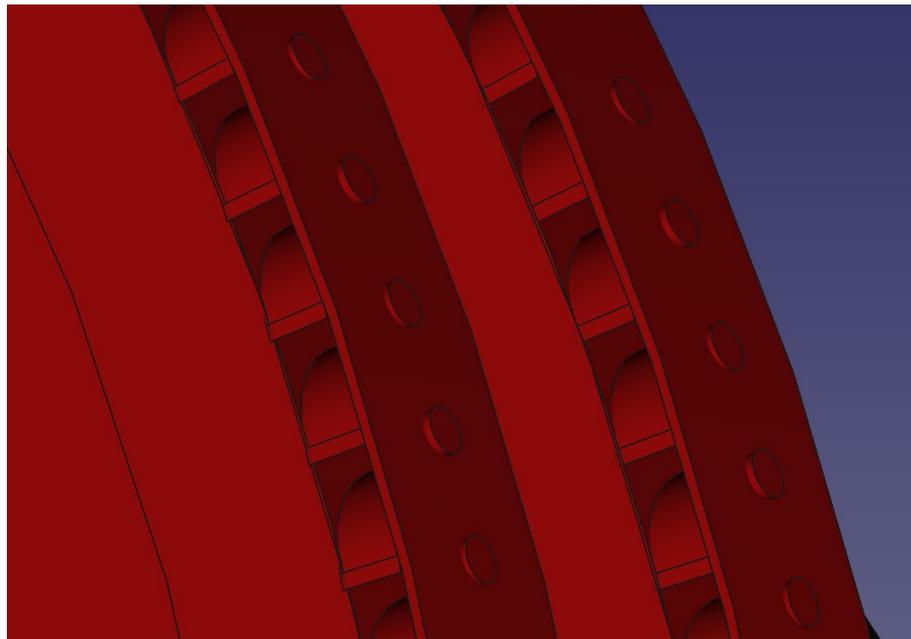
**Figura 3.19:** Vista de la ventana de desplazamiento  
Fuente: elaboración propia



**Figura 3.20:** Resultado de realización de los álabes  
Fuente: elaboración propia



**Figura 3.21:** Sketch de la geometría de una paleta  
Fuente: elaboración propia



**Figura 3.22:** Disco y remaches de la corona  
Fuente: elaboración propia



**Figura 3.23:** Icono de fusión  
Fuente: elaboración propia



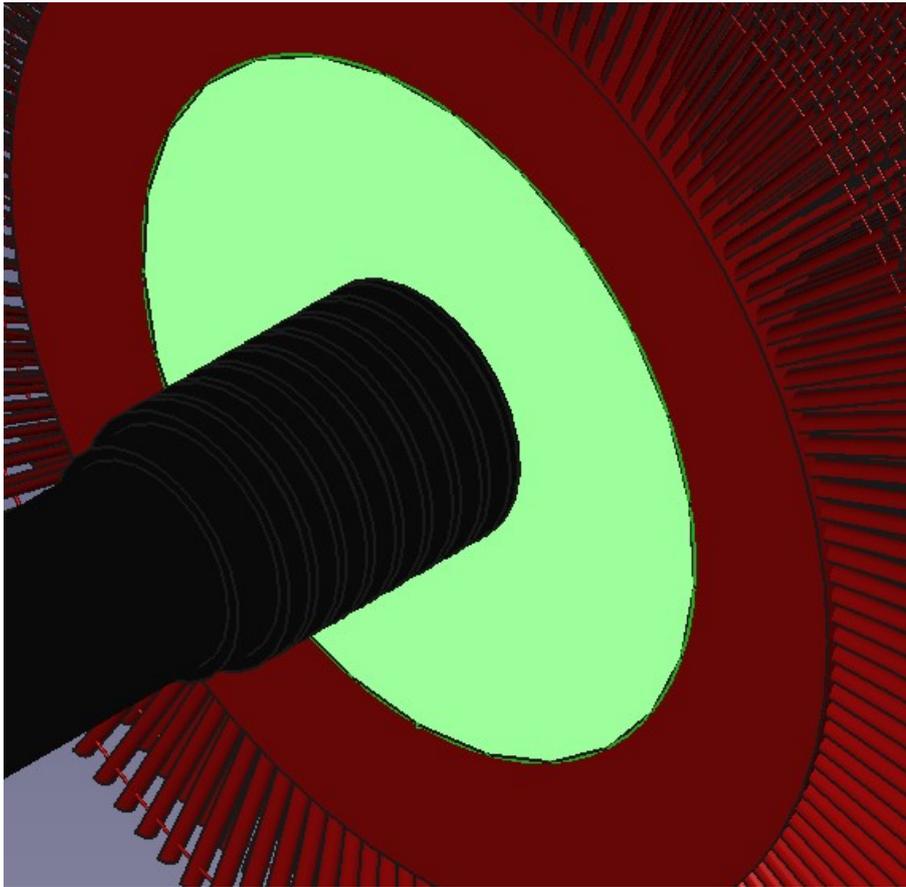
**Figura 3.24:** Rotor como único elemento  
Fuente: elaboración propia



**Figura 3.25:** Crear pieza en el banco de trabajo Part  
Fuente: elaboración propia

|             |   |
|-------------|---|
| Base        |   |
| ► Placement | [(0,58 0,58 -0,58); 120 °; (0 mm -3.817 mm 0 mm)] |
| Label       | Cilindro001                                       |
| Cylinder    |   |
| Radius      | 1.350 mm  |
| Height      | 1.350 mm  |
| Angle       | 360,00 °  |

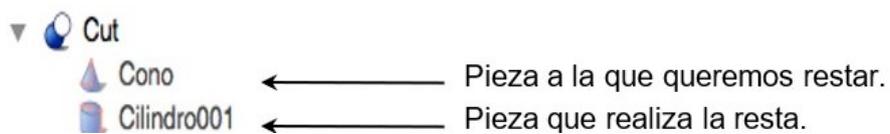
**Figura 3.26:** Medidas interiores de cilindro de resta de zona de alta presión  
Fuente: elaboración propia



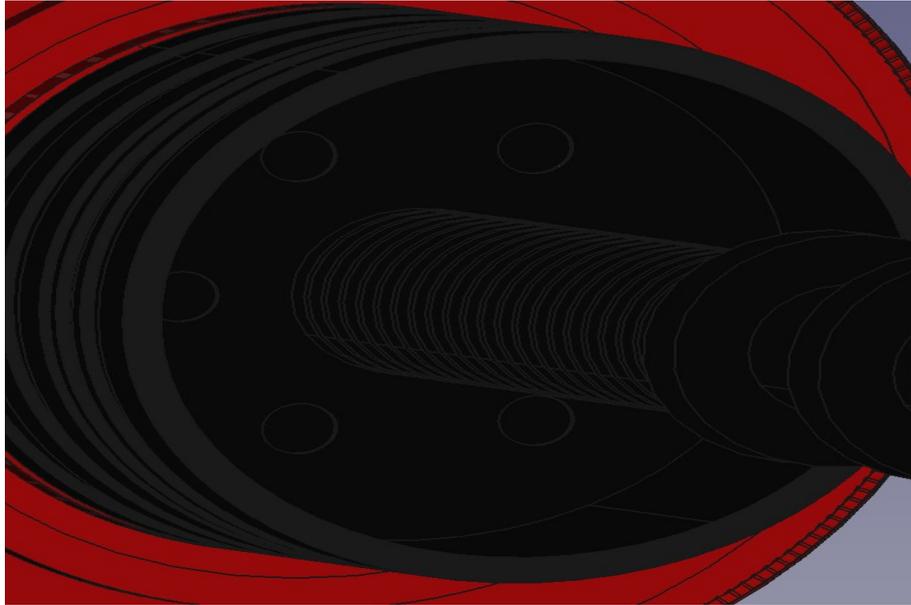
**Figura 3.27:** Ejemplo de corte de dos formas  
Fuente: elaboración propia



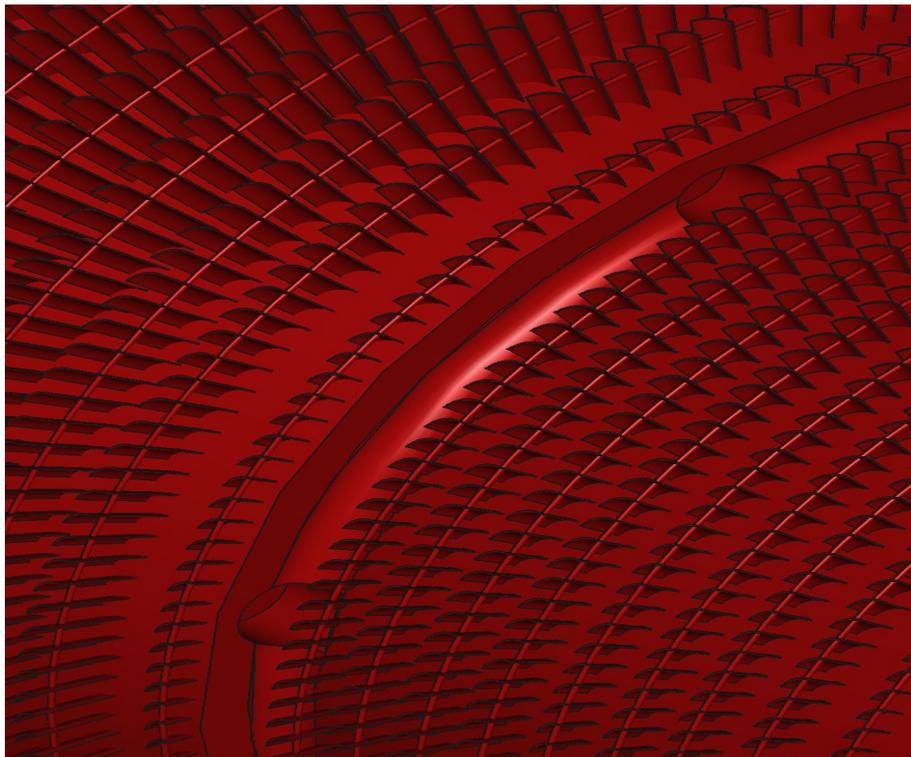
**Figura 3.28:** Icono de corte  
Fuente: elaboración propia



**Figura 3.29:** Muestra en vista combinada de un corte entre dos formas  
Fuente: elaboración propia



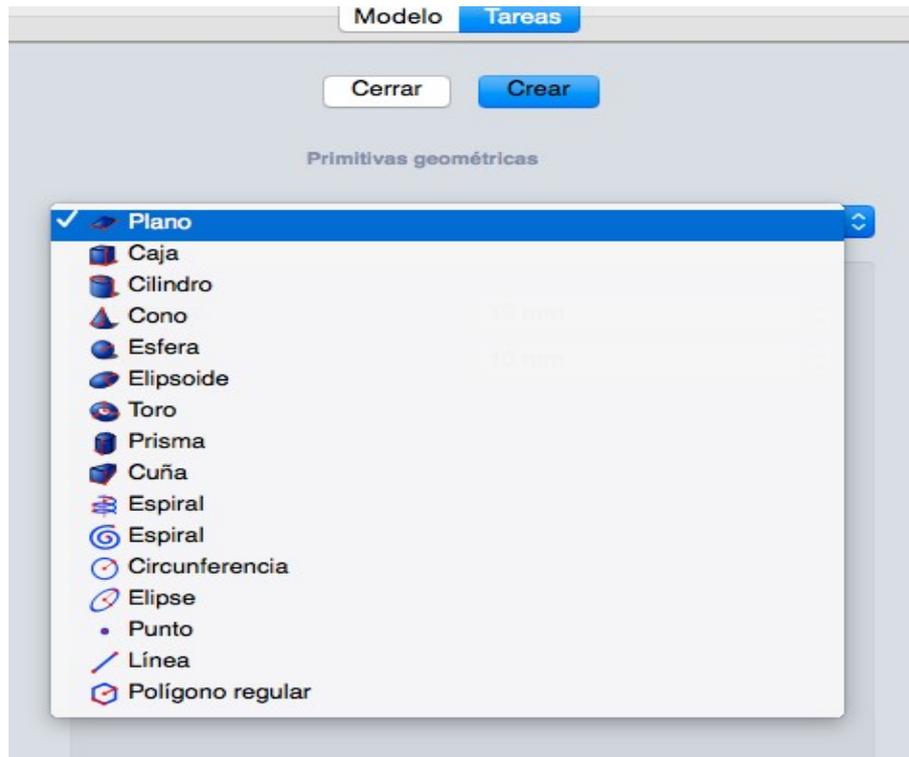
**Figura 3.30:** Aligeramiento en la zona de baja  
Fuente: elaboración propia



**Figura 3.31:** Aligeramiento entre los escalones de álabes del rotor  
Fuente: elaboración propia



**Figura 3.32:** Icono de creación primitiva de geometrías paramétricas  
Fuente: elaboración propia



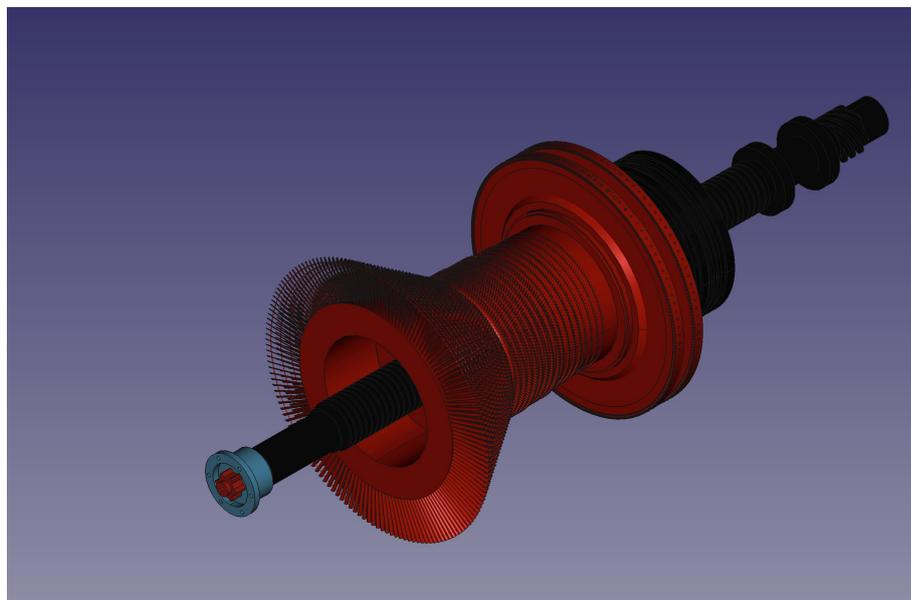
**Figura 3.33:** Ventana tarea de la vista combinada  
Fuente: elaboración propia



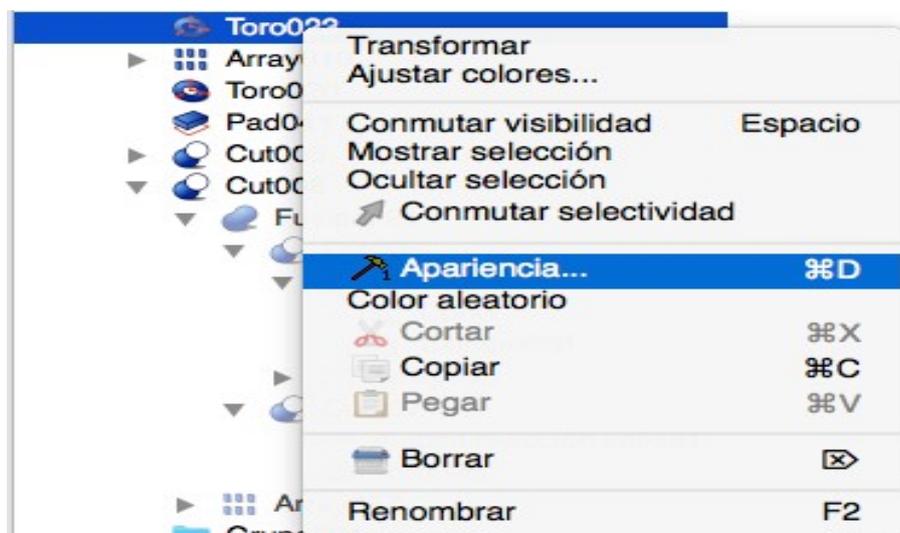
**Figura 3.34:** Ubicación 3D del objeto  
Fuente: elaboración propia



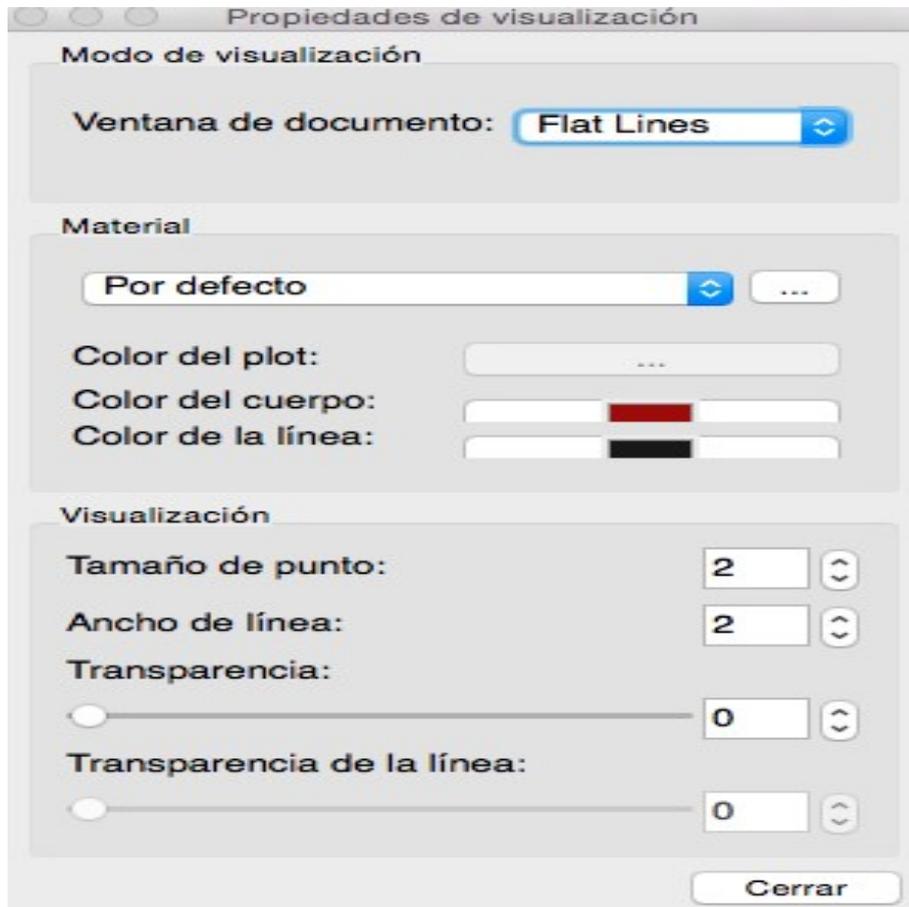
**Figura 3.35:** Crear una forma  
Fuente: elaboración propia



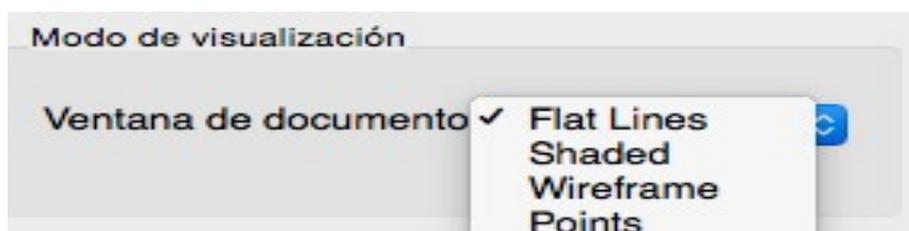
**Figura 3.36:** Resultado del rotor  
Fuente: elaboración propia



**Figura 3.37:** Ventana Apariencia  
Fuente: elaboración propia



**Figura 3.38:** Propiedades de visualización  
Fuente: elaboración propia



**Figura 3.39:** Ventana de documento  
Fuente: elaboración propia



**Figura 3.40:** Elección de materiales de la pieza

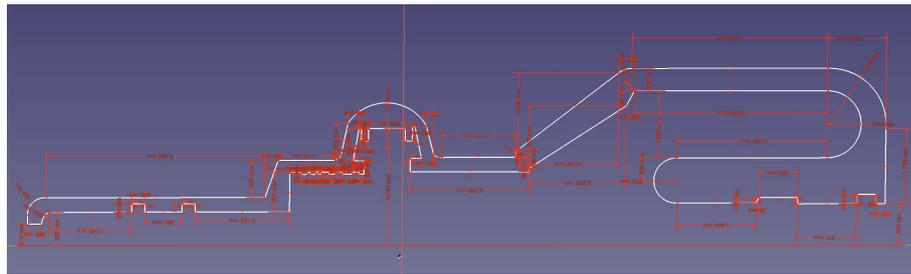
Fuente: elaboración propia

después definir el ángulo de giro en el cual se ha elegido el de  $180^{\circ}$  para que se muestre la parte inferior de la carcasa y la misma geometría para la parte superior con un giro de  $90^{\circ}$  que represente un corte en la carcasa y se aprecie el interior de la misma. Por último se marca el cuadro de “Crear Sólido” para que se cree una pieza maciza. Se obtiene el siguiente resultado de la (fig.3.44).

4. Cuando ya se tiene la carcasa de la turbina el siguiente paso es realizar los demás componentes que la forman, como; las válvula de admisión, el canal de entrada de vapor a las válvulas, los conductos de trasiego del vapor, la disposición de los agujeros en la brida para unir las dos partes de la carcasa mediante pernos, la salida de vapor hacia el condensador, la bancada y otros componentes.  
Como ya se ha visto existen varios métodos para representar estos elementos en Freecad como la herramienta de Sketch, la creación de piezas en el banco Part y la fusión y resta de estos, se puede decir que estos son los tres pilares básicos con los que se trabaja para la creación de estos componentes. Pero existen además otras herramientas adicionales que complementarán este proceso, ya que algunos elementos no se puede realizar con esas herramientas citadas anteriormente.
5. Para la realización del contorno de la carcasa de la zona de alta presión se utilizó la herramienta Loft (Interpolación por trayectoria).
6. Se parte de un boceto creado con el Sketch (fig.3.45) y se duplica con diferentes parámetros (fig.3.46) y se desplaza hacia donde se quiera que se forme la trayectoria de la pieza (fig.3.50).
7. Seguidamente se selecciona el Sketch del que se quiere hacer la interpolación por trayectoria y se pincha sobre el icono de Loft (fig.3.48).
8. En la vista combinada aparecerá una ventana (fig.3.49) en la que aparecen dos columnas: una con un listado de Sketches y la otra va a ser a la que se añaden los Sketch que se desea interpolar por trayectoria. Primero se selecciona nuestro Sketch de origen y se pincha sobre

la flecha azul hacia la derecha (Añadir) y después se selecciona el Sketch de llegada y ya se tendría ambos Sketches en la columna de la derecha. Después se debe pinchar sobre “Crear sólido” y seguidamente dar a “Aceptar” y se obtiene nuestra pieza (fig.3.50). Se obtiene como resultado final de la zona de alta de la carcasa de la turbina (fig.3.51).

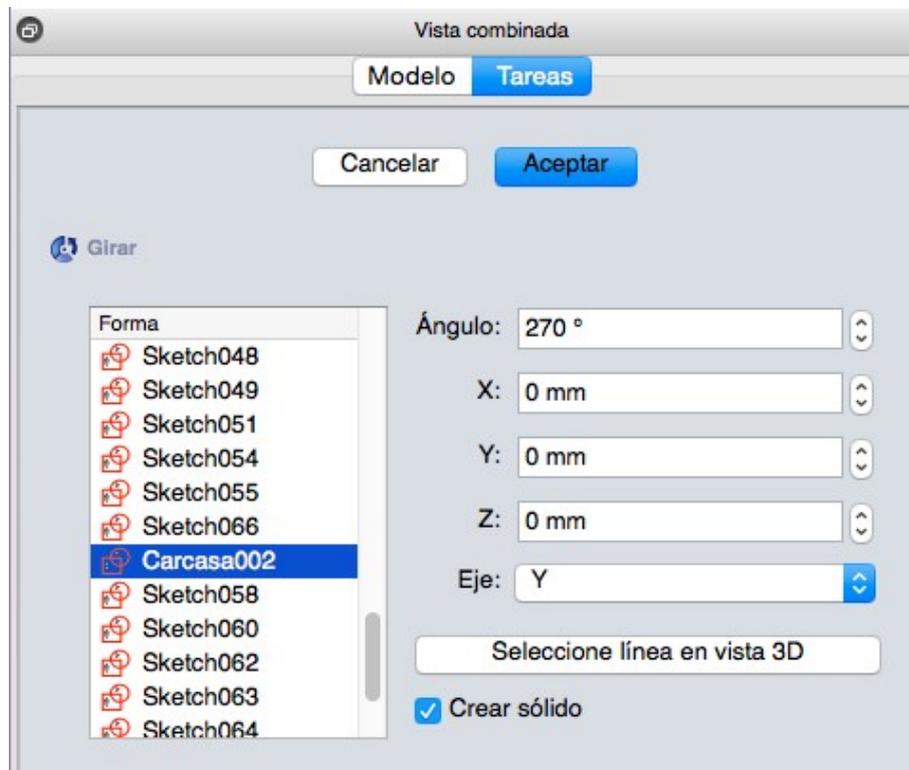
9. Para la creación del cartel de Brown Boveri se va a utilizar el programa Inkscape el cual es un editor de código libre y multiplataforma donde se puede crear y editar textos y dibujos en 2D. De esta forma se puede incorporar a cualquier diseños dibujos que serían difíciles de hacer con Freecad. Primero se ir a la página oficial (fig.3.52) y descargar el programa según el sistema operativo.
10. Una vez descargado, se instala y se ejecuta. Para escribir se debe pinchar en el icono para “Crear y editar objetos de texto” (fig.3.53). Se lleva el puntero a la zona donde se quiera poner el texto y se clicca con el botón izquierdo y se escribe el texto: ”BROWN BOVERI”.
11. Para escalar el texto para que se ajuste el tamaño a el diseño se va a la parte superior del menú y se cambia las unidades de píxeles (px) a milímetros (mm). En las cajas superiores se encuentran con una que ponen W (width) es la anchura total del texto y H (height) es la altura. Para el diseño se ha elegido un tamaño de 1000 mm. El siguiente paso es convertir el texto a trazos o trayectos. Se marca la opción del menú trayecto y dentro de trayecto se selecciona la opción Objeto a Trayecto. Ahora al editar el texto funciona como puntos independientes (fig.3.54). Después se exporta a SVG plano y se importa en Freecad (fig.3.55).
12. Se selecciona todas las letras, que se han creado en forma de objeto (Path). Luego se le da a el icono de extruir en el banco de trabajo Part (fig.3.56) y en la ventana de la vista combinada se selecciona la opción de Crear un Sólido y se marcan los parámetro de extrusión, en este caso se le ha dado una extrusión de 150 mm. Obteniendo como resultado (fig.3.57).
13. Una vez se tiene ya extrusionado el texto se mueve a donde se desee. Dado que con la herramienta de desplazamiento de la propia pieza en la vista combinada en ocasiones es demasiado complicado y más lento mover un objeto se puede utilizar la herramienta de Mover (Traslación) y Girar (Rotación) (fig.3.58) de la pestaña superior del banco de trabajo Draft. Permiten seleccionar puntos claves de una pieza y situarlos en otros puntos del espacio, desplazando la pieza.
14. Se pincha sobre el icono de Traslación y se selecciona uno de los extremos (vértice o arista) inferiores del texto para situarlo sobre la base ya que se unen los puntos, de lo contrario si se selecciona uno superior quedaría por debajo de la base Sólo hace que los puntos seleccionados coincidan, pero manteniendo la misma orientación inicial de la pieza.  
En cuanto a la rotación se hace paralela al plano en el que se quiere situarlo. Se pincha sobre el icono y se tiene que seleccionar el punto que se usará como centro de rotación. Igual que con la herramienta de traslación se pincha en uno de sus extremos de la cara inferior y se rota la pieza según el punto de referencia que se ha escogido (fig.3.59).
15. Como última pieza realizada en la turbina se tienen los pernos de unión de la carcasa situados en la brida.  
Para ello se debe descargar el banco de trabajo Gear de la plataforma GitHub que se utiliza principalmente para la creación de código fuente de programas como Freecad. (<https://github.com/looooo/FCGear>). Primero se debe descargar el banco de trabajo que viene en el formato de compresión ZIP y siguiendo los diferentes pasos para cada sistema operativo que contiene la propia página de Freecad. (<https://www.freecadweb.org/wiki/Installingmoreworkbenches>) Una vez instalado, se selecciona el banco de trabajo Gear (fig.3.60) y se pincha sobre el icono de “Generar Engranaje” y en la ventana que aparece en la vista combinada, se determinan los parámetros del perno como el ángulo de la rosca, la altura del perno, el número de filetes, la holgura, etc.
16. Una vez se tiene hecho el perno maestro (fig.3.61) se copia y pega cuantas veces se quiera (fig.3.62) y se desplazan con la herramienta de “Traslación” del banco de trabajo Draft.
17. Otro método más sencillo es la Creación de un patrón de repetición lineal (fig.3.63), que permite repetir un objeto sobre un plano el número de veces que se quiera, como son los pernos sobre la brida de unión de la carcasa (fig.3.64).



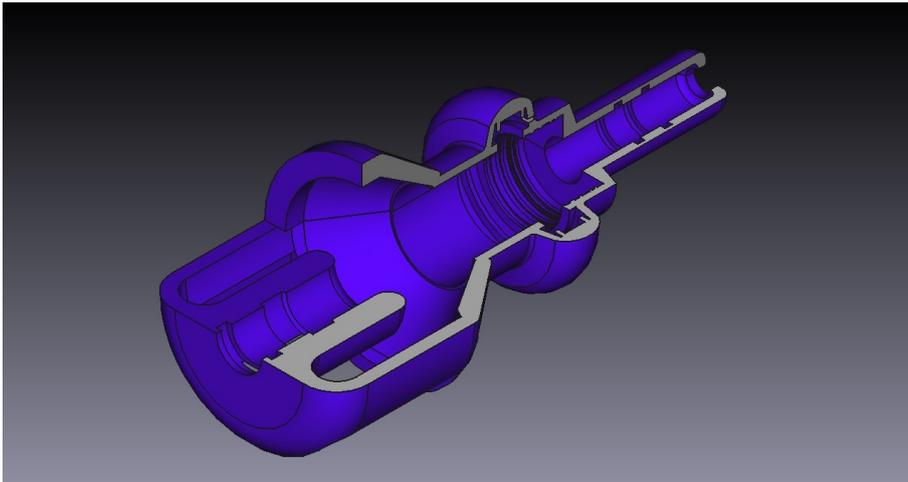
**Figura 3.41:** Sketch con medidas de la brida de la carcasa  
Fuente: elaboración propia



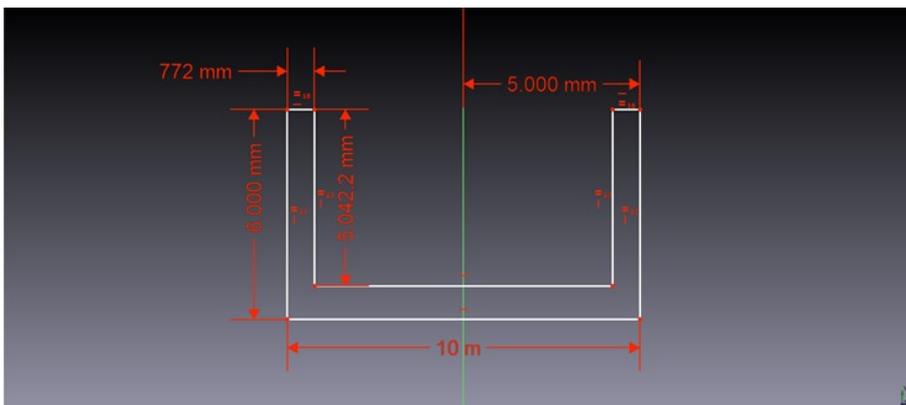
**Figura 3.42:** Icono Giro de forma seleccionada  
Fuente: elaboración propia



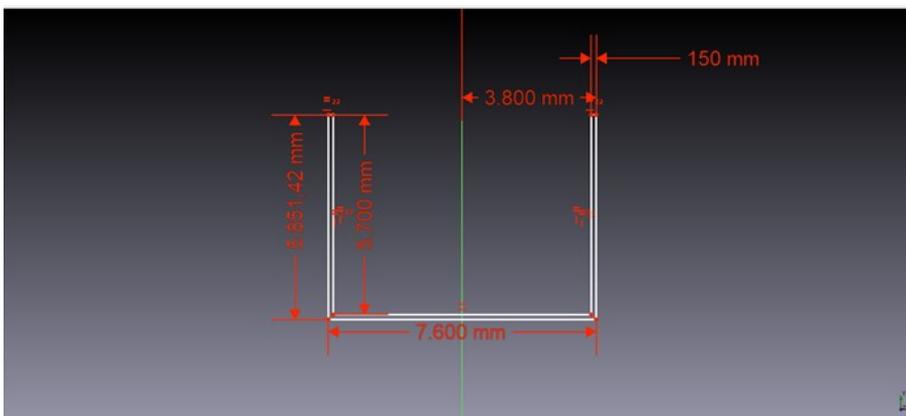
**Figura 3.43:** Vista de la ventana de la herramienta Giro  
Fuente: elaboración propia



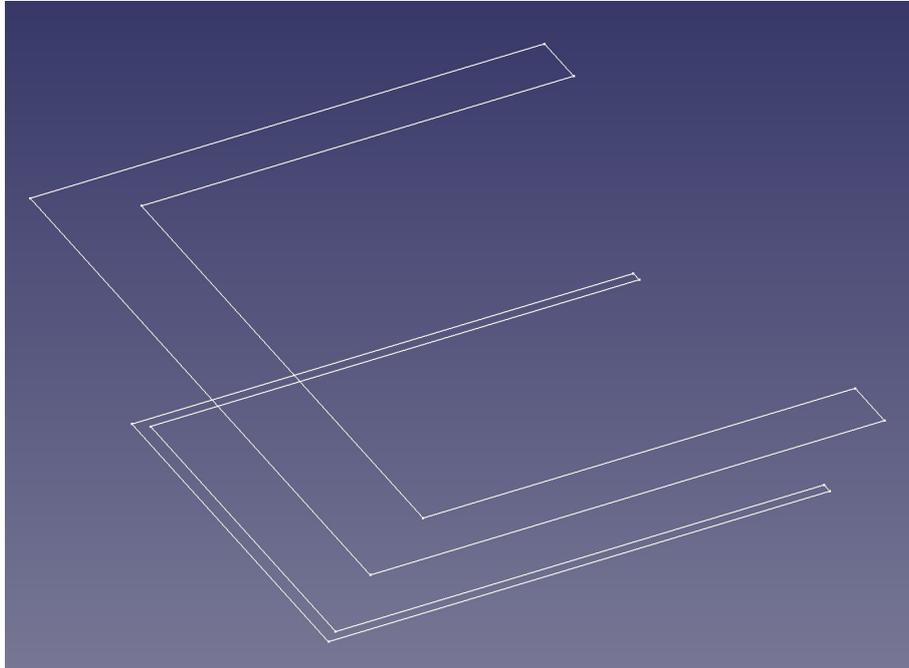
**Figura 3.44:** Carcasa maciza obtenida de la brida  
Fuente: elaboración propia



**Figura 3.45:** Sketch con medidas de la zona de alta  
Fuente: elaboración propia



**Figura 3.46:** Sketch con medidas de la zona de alta  
Fuente: elaboración propia



**Figura 3.47:** Posición de los dos Sketch  
Fuente: elaboración propia



**Figura 3.48:** Icono interpolación por trayectoria  
Fuente: elaboración propia

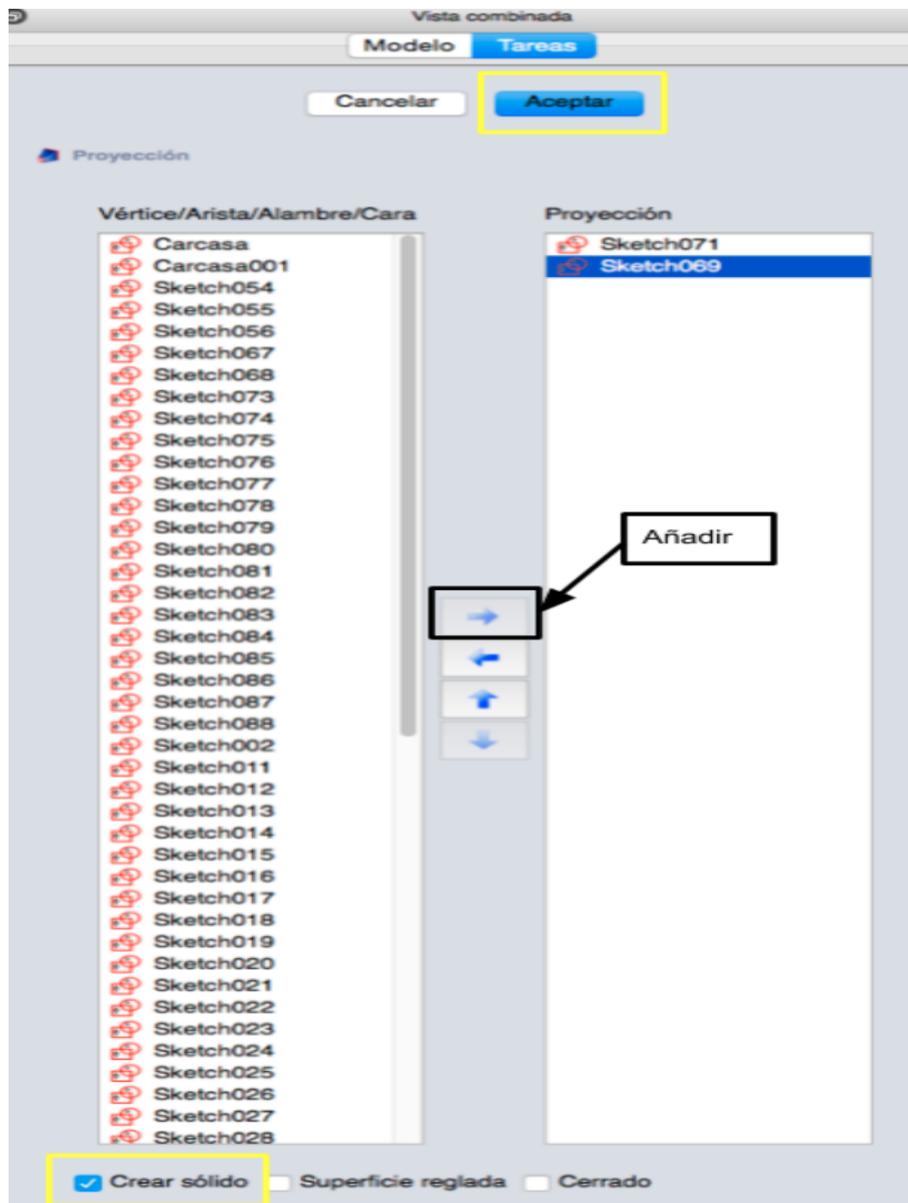
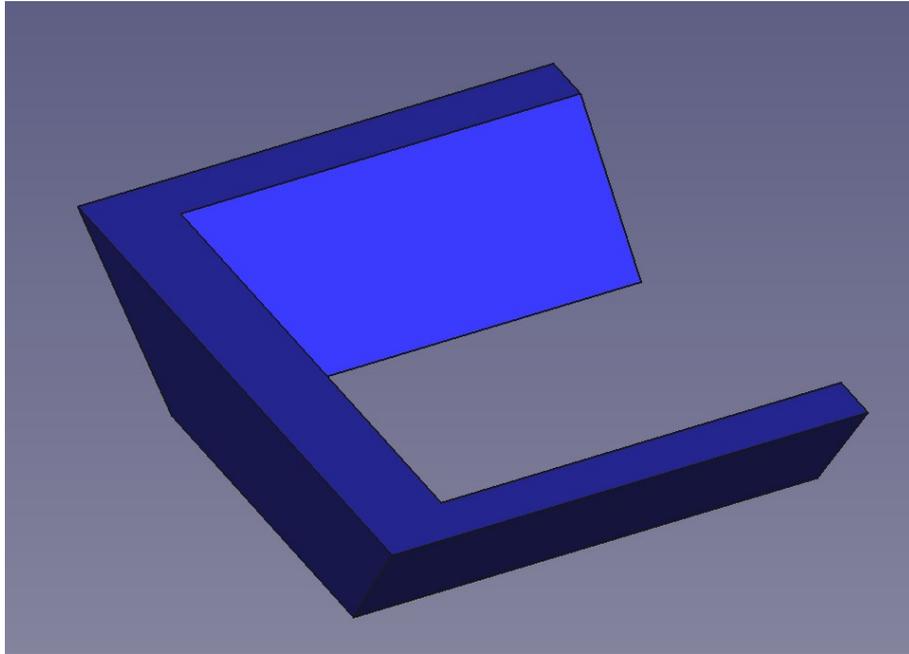
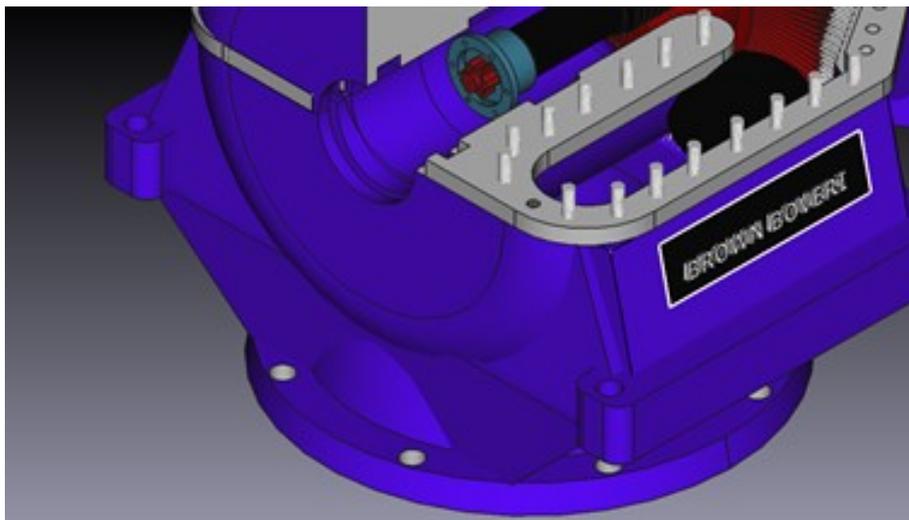


Figura 3.49: Vista combinada de interpolación por trayectoria

Fuente: elaboración propia



**Figura 3.50:** Resultado de la interpolación  
Fuente: elaboración propia



**Figura 3.51:** Resultado de la carcasa de la zona de alta  
Fuente: elaboración propia

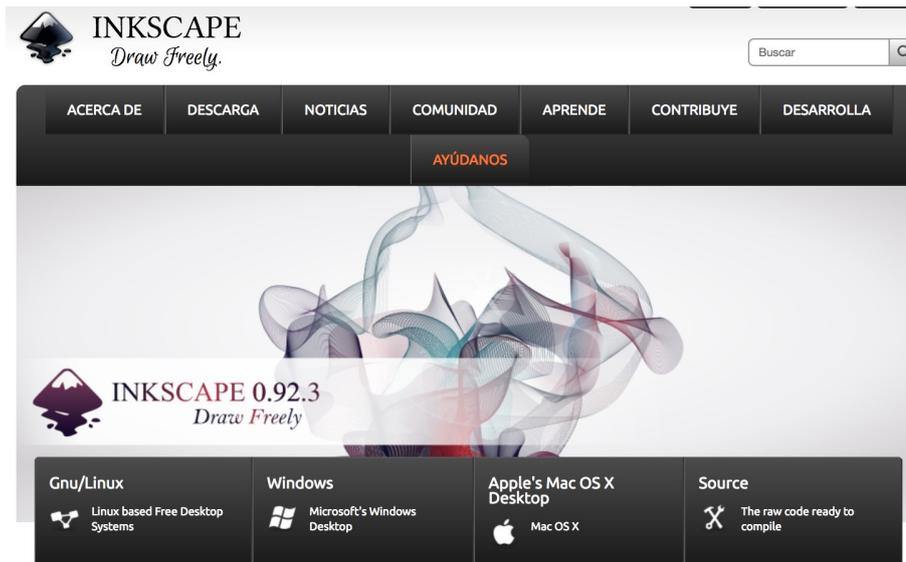


Figura 3.52: Página de descarga Inkscape  
Fuente: elaboración propia

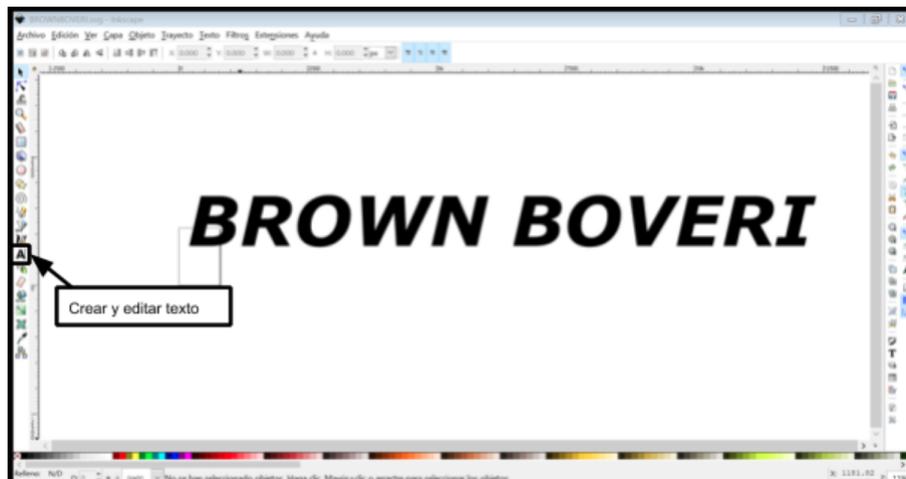


Figura 3.53: Crear texto  
Fuente: elaboración propia

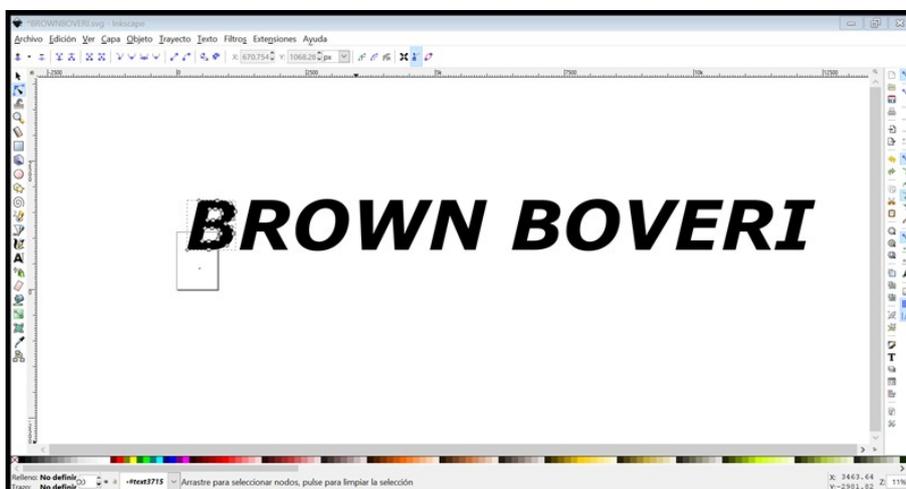
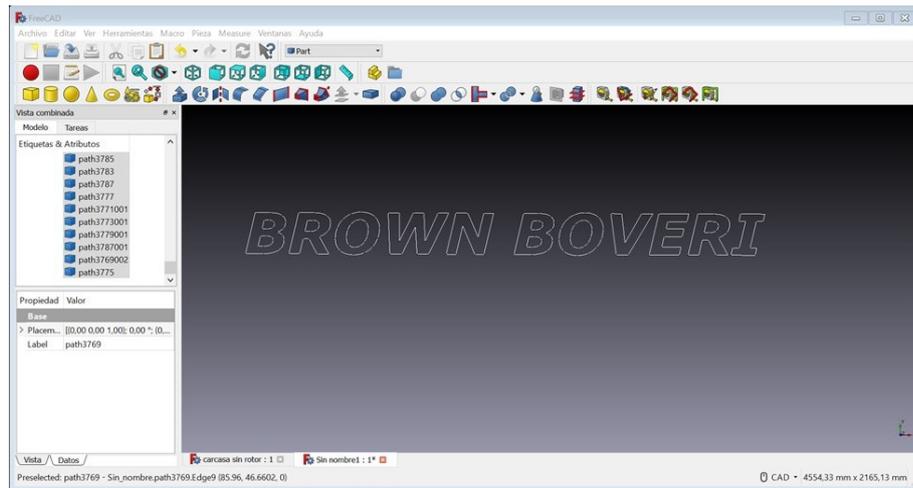


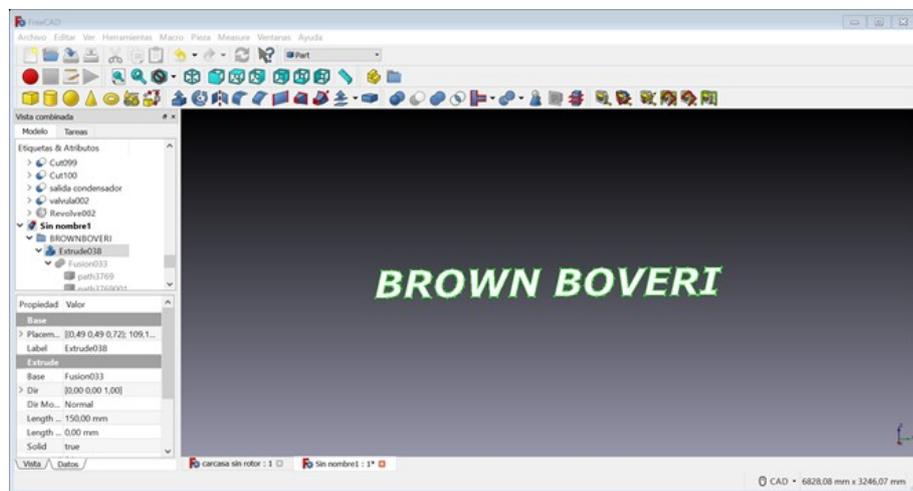
Figura 3.54: Conversión de texto a trayectos  
Fuente: elaboración propia



**Figura 3.55:** Importar archivo en SVG  
Fuente: elaboración propia



**Figura 3.56:** Extrusión de croquis del banco de trabajo Part  
Fuente: elaboración propia

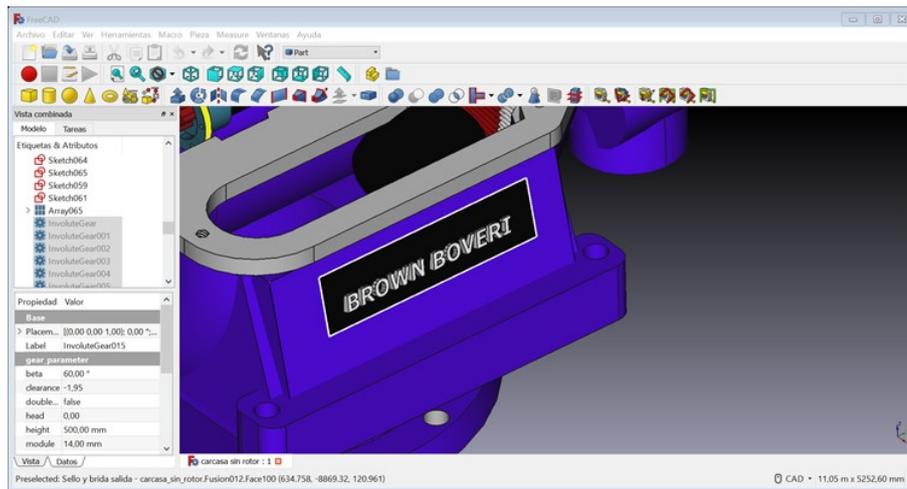


**Figura 3.57:** Extrusión de texto  
Fuente: elaboración propia



**Figura 3.58:** Icono de desplazamiento y giro de un objeto del banco de trabajo Draft

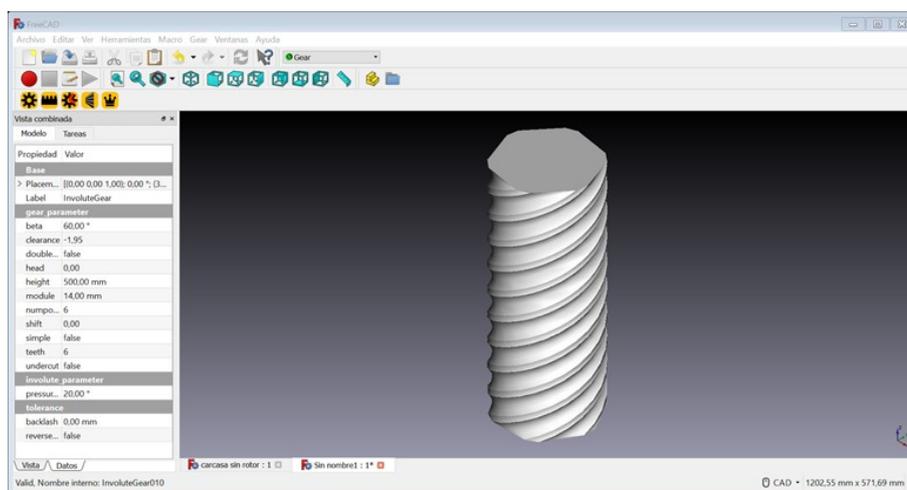
Fuente: elaboración propia



**Figura 3.59:** Posición de la placa de Brown Boveri  
Fuente: elaboración propia



**Figura 3.60:** Icono Generar Engranaje  
Fuente: elaboración propia



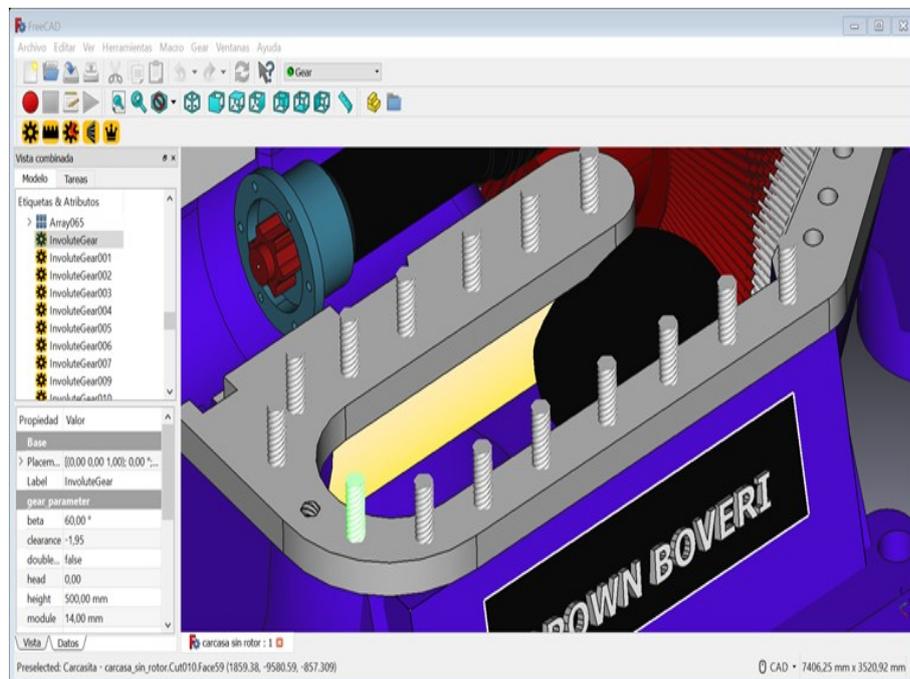
**Figura 3.61:** Perno maestro  
Fuente: elaboración propia



**Figura 3.62:** Iconos de Copiar y Pegar  
Fuente: elaboración propia



**Figura 3.63:** Iconos de Repetición Lineal  
Fuente: elaboración propia



**Figura 3.64:** Resultado de la colocación de los pernos  
Fuente: elaboración propia



# 4 Resultados

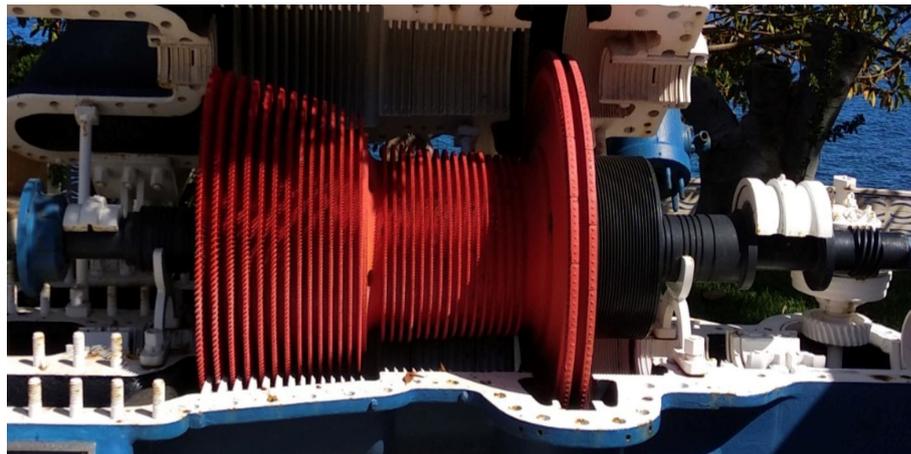
## 4.1 Elaboración del diseño 3D de la turbina

En el siguiente apartado se van a mostrar los resultados a través de fotografías comparativas de la realización de los distintos elementos de la turbina. Acompañan de breves comentarios en los que se expondrán las dificultades que ha tenido cada elemento además de una pequeña explicación de su función. También incluye dificultades con el propio programa FreeCAD y el alcance del diseño del modelo 3D, acotaciones de elementos y un apartado con el número de horas que ha conllevado la realización del diseño.

En este caso se tiene una turbina Brown Boveri de 1919. Es una turbina de condensación con un rotor que genera una potencia de 750 kW, se movía a unas 3000 rpm. Con una presión de vapor de  $12 \text{ kg/cm}^2$ . El principio de funcionamiento es muy básico: cuando un álabe móvil deflecta un chorro de fluido a alta velocidad cambiando su dirección, se ejercen fuerzas entre el álabe y el flujo, de tal forma que se genera trabajo mediante el desplazamiento del álabe.

### 4.1.1 Rotor

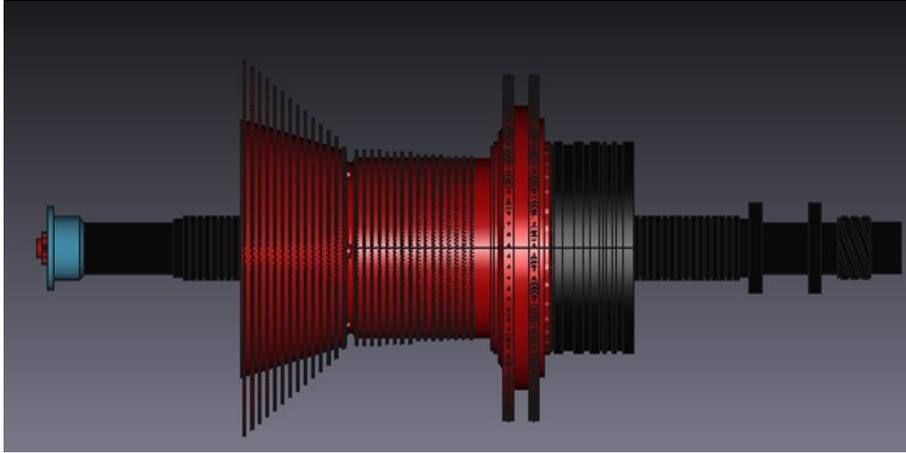
Está compuesto por coronas de paletas y ruedas de álaves móviles unidas a un eje y constituyen la parte móvil de la turbina. Transforman la energía térmica del vapor en energía mecánica en forma de movimiento giratorio del eje de la turbina.



**Figura 4.1:** Foto rotor de la turbina

Fuente: colección propia

**Dificultades:** Para la elaboración del rotor sólo se tuvo el inconveniente del gran tamaño de este ya que se necesitan dos personas para medir el largo y el diámetro de las coronas, eje y sello. La representación en FreeCAD no fue complicada ya que con la herramienta de extrusión de Sketches es bastante fácil de hacer. Con esto se consiguió una fidedigna representación del rotor.



**Figura 4.2:** Diseño rotor de la turbina  
Fuente: elaboración propia



**Figura 4.3:** Foto de rotor y toberas de la turbina  
Fuente: colección propia

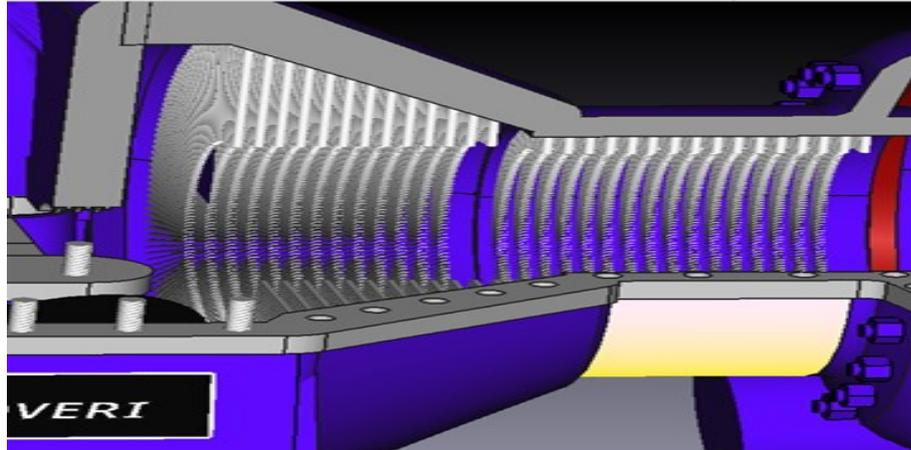
#### 4.1.2 Estator

Está formado por álabes unidos a la carcasa de la turbina. Como su nombre indica, representa la parte fija de la turbina. Se encarga de preparar el flujo (aumentar su energía cinética) para que pueda dar trabajo mecánico en el rotor.

**Dificultades:** Respecto a la ejecución del estator el único problema fue la medición de la sección de los álabes y su altura ya que en la zona de alta presión resultaba incómodo la medición de la misma. En cuanto a su realización en FreeCAD el exclusivo inconveniente fue conseguir el ángulo que formaban los álabes ya que se encontraban en el sentido contrario al del Sketch. Podemos decir que se consiguió una representación bastante precisa del estator.

#### 4.1.3 Carcasa

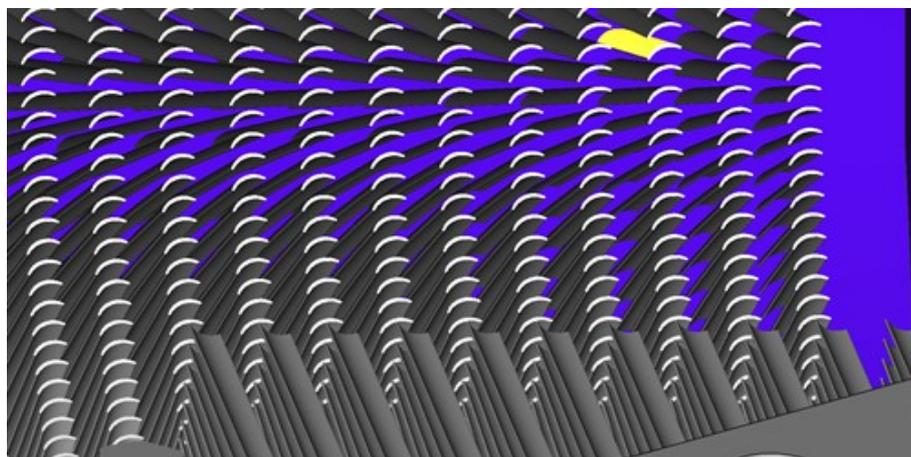
En la construcción de la carcasa hay que tener en cuenta la accesibilidad a las partes interiores que permita una visualización del rotor de manera fácil. Es por ello que se suelen fabricar en dos mitades: la superior que es la que se puede desmontar retirando los pernos que las unen y la inferior que es la que se une a la bancada. La carcasa disminuye las pérdidas de calor por radiación hacia el exterior y evita que disminuya el rendimiento de la turbina.



**Figura 4.4:** Diseño de las toberas de la turbina  
Fuente: elaboración propia



**Figura 4.5:** Toberas de reacción de la turbina  
Fuente: colección propia



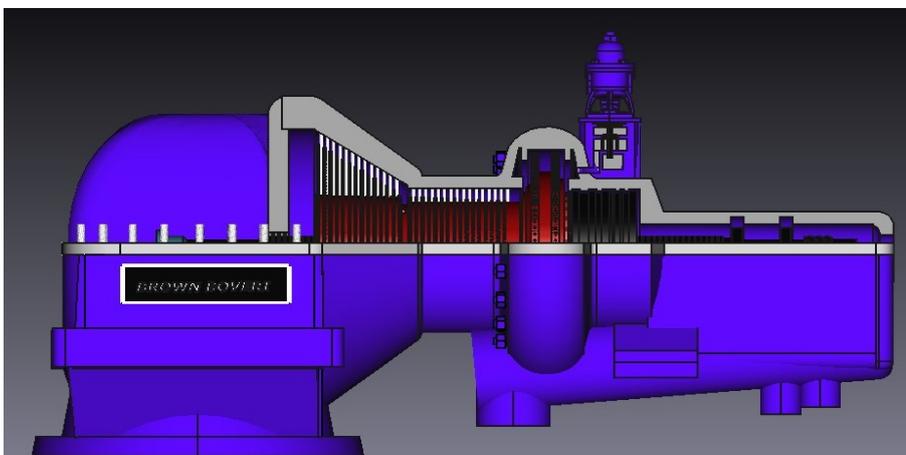
**Figura 4.6:** Diseño de las toberas de reacción de la turbina  
Fuente: elaboración propia



**Figura 4.7:** Carcasa de la turbina; parte inferior  
Fuente: colección propia



**Figura 4.8:** Carcasa de la turbina; parte superior  
Fuente: colección propia



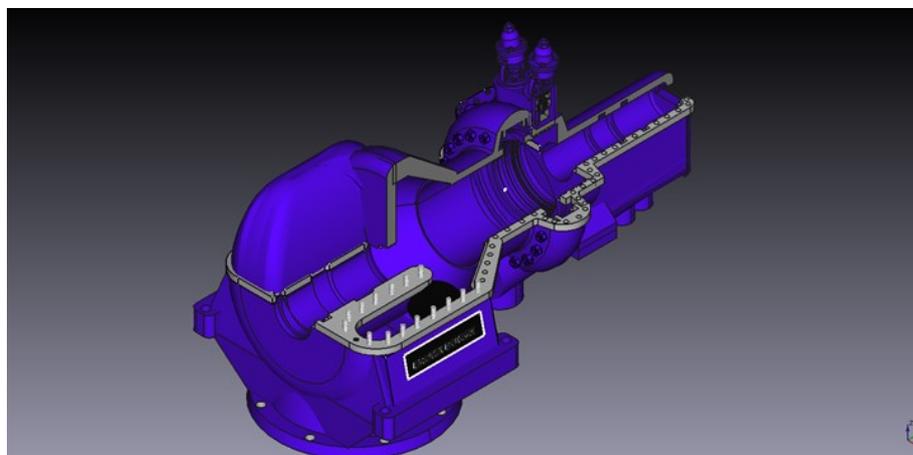
**Figura 4.9:** Diseño de la carcasa de la turbina; vista longitudinal  
Fuente: elaboración propia



**Figura 4.10:** Carcasa de la turbina  
Fuente: colección propia



**Figura 4.11:** Carcasa de la turbina  
Fuente: colección propia



**Figura 4.12:** Diseño de la carcasa de la turbina  
Fuente: elaboración propia



**Figura 4.13:** Álabes de la turbina

Fuente: colección propia

**Dificultades:** Sin duda la carcasa fue el elemento más laborioso y complejo de hacer. En primer lugar la complicación para tomar medidas fue una tarea que tomó 3 horas haciendo mediciones sobre cada perfil diferente que tiene la carcasa, desde la zona de entrada de vapor hasta la salida hacia el condensador. El gran tamaño de la turbina siempre fue una dificultad a la hora de tomar medidas exactas, además del añadido de las abundantes piezas adicionales que tenía como bridas de unión, los propios agujeros para los pernos de la brida de unión de las dos partes de la carcasa, extracciones de vapor, la forma de la carcasa en la salida hacia el condensador, la brida del condensador, etc. Además, fue difícil la interpretación de algunos elementos como la zona de alta presión que ya al estar la carcasa abierta y sujeta por un soporte no permitía diferenciar bien estos elementos. Para la elaboración de la carcasa lo primero que se hizo fue hacer un croquis de la brida y girar el Sketch, con esto se consiguió una forma base de la carcasa que ayudaría a añadir el resto de elementos a esta. En cuanto a herramientas utilizadas, muchas no producían el resultado esperado, por lo que hubo que recurrir a diseñar las piezas en varias partes. Por tanto el resultado del diseño 3D de la carcasa presenta algunas irregularidades en cuanto a medidas y formas por las cuestiones citadas anteriormente, obteniendo un resultado sin el detalle deseado.

#### 4.1.4 Álabes

El álabe de una turbina, es una estructura en forma de pala con la capacidad de desviar de forma eficiente y calculada, el flujo de corriente de vapor proporcionando un momento de fuerza en el rotor. Los álabes del estator (fijos) son los responsables de guiar y dar velocidad al flujo de vapor, los del rotor (móviles), generan el trabajo. La densidad del vapor disminuye y se expande mientras está atravesando la turbina, de ahí la necesidad de que los álabes deban ir aumentando su altura conforme la presión baja. Como consecuencia de que los álabes giren a elevadas revoluciones, es imprescindible la colocación de un alambre antivibraciones.

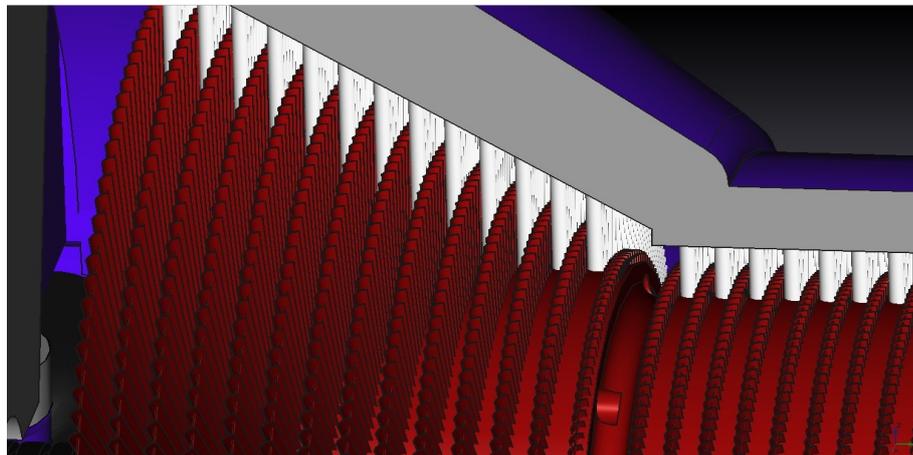
**Dificultades:** Para la realización de la corona de paletas y álabes móviles del rotor el único inconveniente fue la medición de la sección de los álabes ya que eran de una sección muy pequeña y de la corona de paletas también la medición de la sección ya que no era de cómodo acceso. En cuanto a su realización en FreeCAD se ha conseguido una buena representación tanto de los álabes como de la corona de paletas y otros elementos como la llanta y remaches.

#### 4.1.5 Válvula de regulación:

Regula el caudal de vapor que entra en la turbina, ajustando por tanto la potencia de la máquina. Por tanto, es uno de los elementos más importantes de la turbina de vapor. Tiene accionamiento



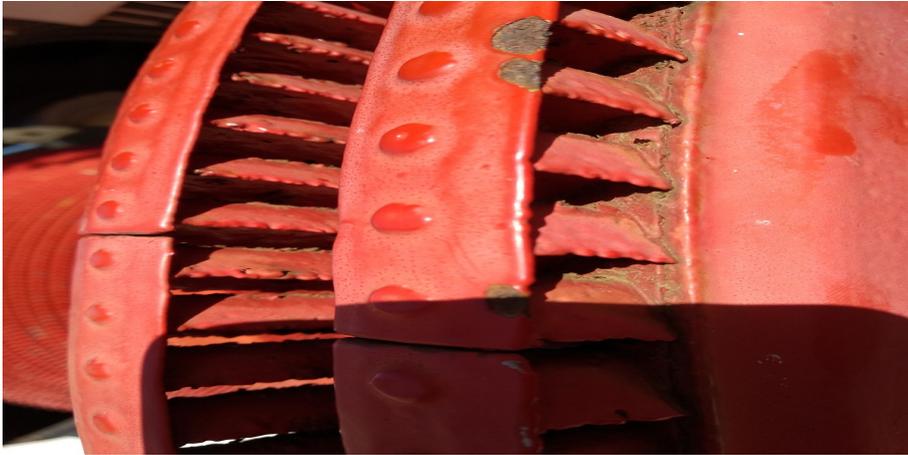
**Figura 4.14:** Foto de los álabes de la turbina  
Fuente: colección propia



**Figura 4.15:** Diseño de los álabes de la turbina  
Fuente: elaboración propia



**Figura 4.16:** Detalle del zunchado de los álabes de la turbina  
Fuente: elaboración propia



**Figura 4.17:** Foto de las paletas de la corona de acción de la turbina  
Fuente: colección propia



**Figura 4.18:** Diseño de las paletas de la corona de la turbina  
Fuente: elaboración propia



**Figura 4.19:** Válvula de regulación de la turbina  
Fuente: colección propia

hidráulico mediante un grupo de presión de aceite de control, o neumático. Forma parte de dos lazos de control: el de la velocidad de la turbina y el de la carga o potencia de la turbina.

**Dificultades:** La realización de la válvula fue de los elementos más difíciles de llevar a cabo. La primera complicación fue tomar medidas reales, ya que en primer lugar no se tenía una vista interior de las válvulas y se tuvo que tomar como referencia un plano de una válvula similar de una turbina del mismo fabricante. Además, el resto de medidas resultaron difíciles de tomar ya que no eran de cómoda accesibilidad y la superficie tenía gran cantidad de perfiles complejos de realizar. Para su representación en FreeCAD se utilizaron la mayoría de procesos descritos en la metodología, los cuales requieren de un avanzado conocimiento de estas herramientas. Es por estas razones que la representación en 3D no es lo más fidedigna.

#### 4.1.6 Cojinetes

Sobre los cojinetes es donde se apoya el rotor de la turbina y suelen ser del tipo de tapillas lisas, con revestimiento antifricción. Los cojinetes evitan también el empuje axial que produce el vapor evitando así daños en la turbina. Han de ir siempre lubricados con un sistema de engrase a presión.

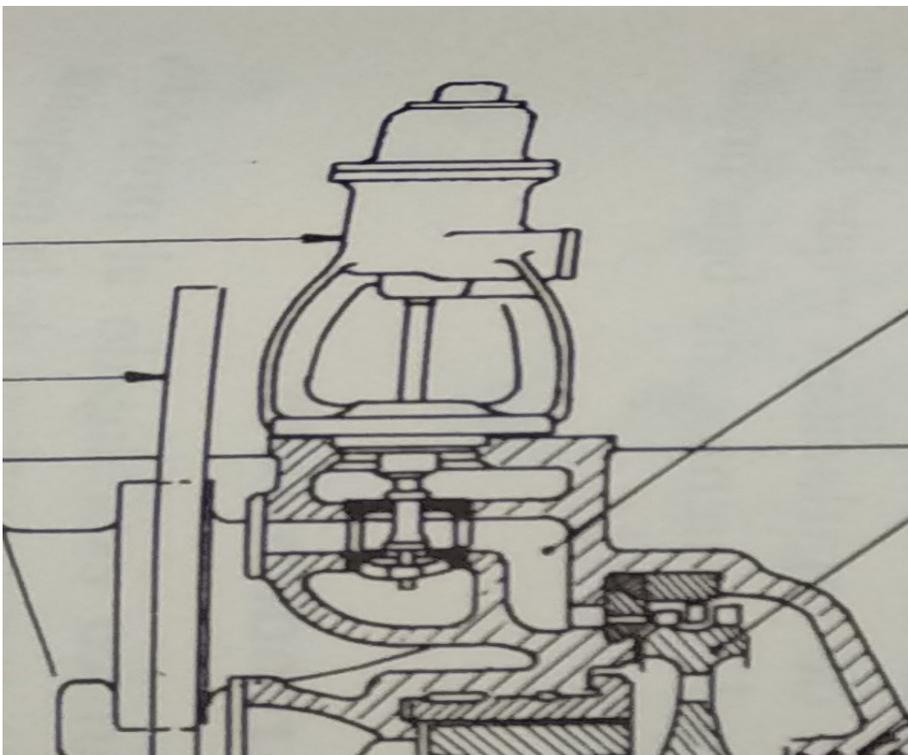
**Dificultades:** Para la realización de los cojinetes no hubo ningún problema tanto a la hora de la medición sobre la turbina, como para su representación. El único inconveniente que se encontró fue que el rotor no estaba apoyado sobre los cojinetes sino elevado por medio de unos soportes y complicó un poco su interpretación, pero no de forma destacable.

#### 4.1.7 Problemas con FreeCAD

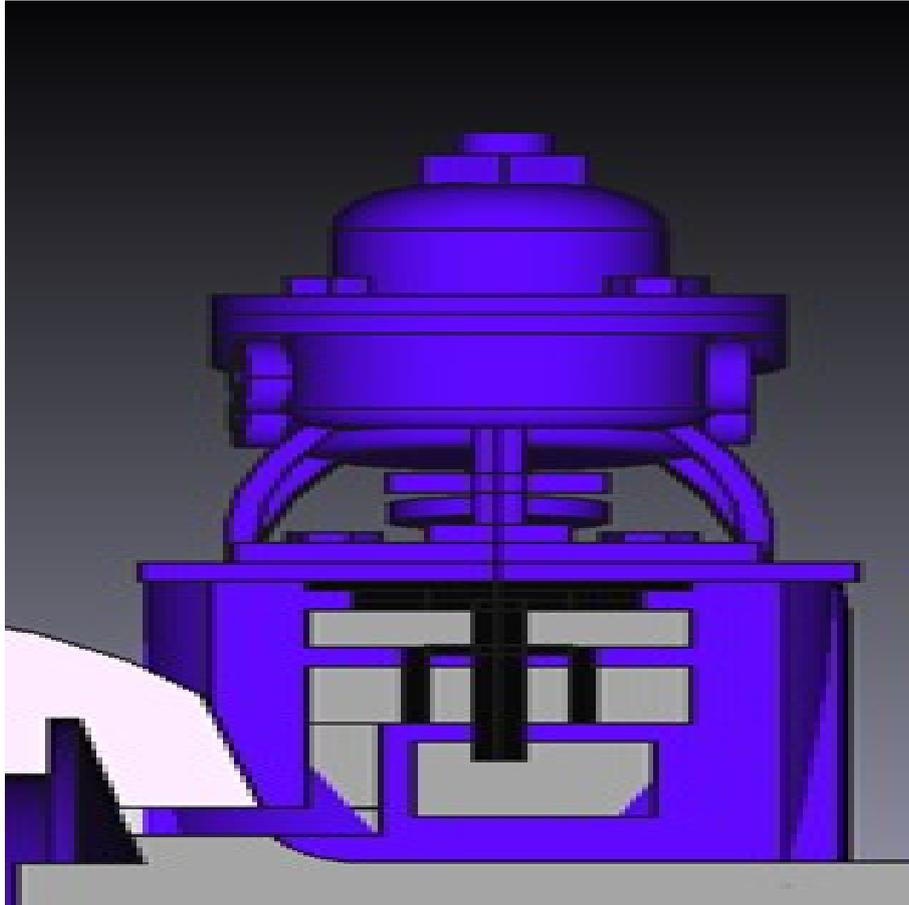
En cuanto al programa FreeCAD en sí, el principal problema fue que la capacidad del ordenador de trabajo no era lo suficientemente potente como para ejecutar de manera adecuada cada proceso del diseño ya que las bajas características de la memoria RAM ralentizaban las operaciones de diseño, en ocasiones por el elevado peso gráfico de las mismas, lo que hacía imposible trabajar de manera adecuada. Por ello se decidió utilizar otro ordenador además de distinto sistema operativo, con el que se obtuvieran mejores resultados.



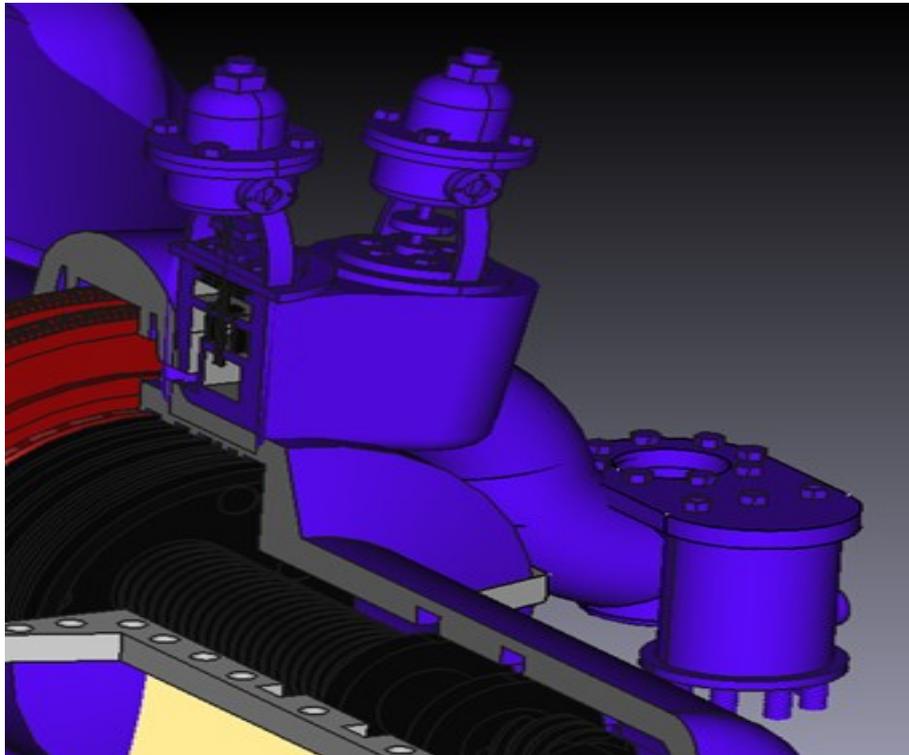
**Figura 4.20:** Válvula de regulación de la turbina  
Fuente: colección propia



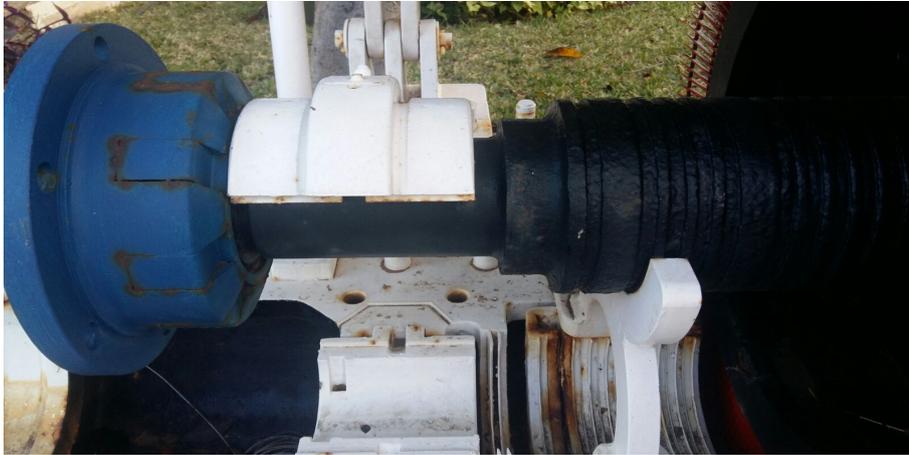
**Figura 4.21:** Referencia para la elaboración del interior de la válvula  
Fuente: colección propia



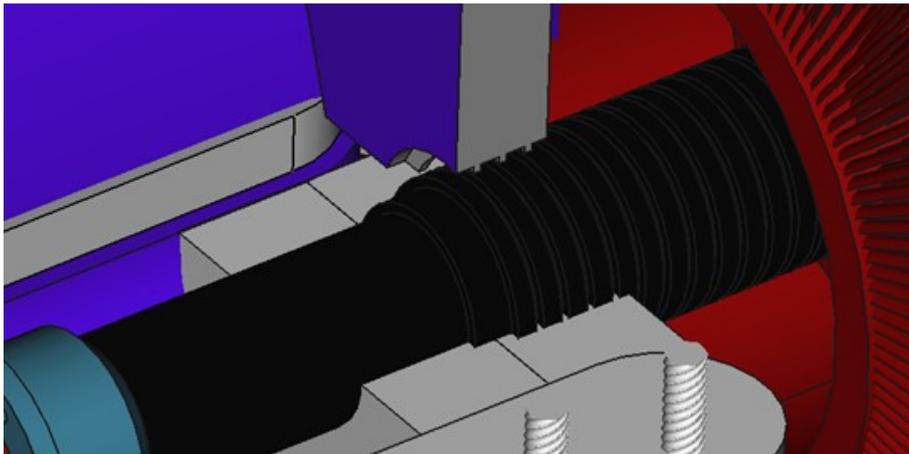
**Figura 4.22:** Diseño de la válvula de regulación de la turbina  
Fuente: elaboración propia



**Figura 4.23:** Diseño de la válvula de regulación de la turbina  
Fuente: elaboración propia



**Figura 4.24:** Cojinete de la turbina  
Fuente: colección propia



**Figura 4.25:** Cojinete de la turbina  
Fuente: elaboración propia

### 4.1.8 Alcance del diseño

Debido a la falta de planos de la turbina, algunas medidas no han sido todo lo preciso que requerían. Se han excluido del diseño algunos elementos de los que era imposible tomar medidas debido al reducido espacio, como por ejemplo, la tobera de entrada de vapor desde la válvula de regulación. Además había partes de la turbina que estaban incompletas como la bomba de aceite de lubricación de la turbina, de la que solo estaba los engranajes que se acoplaban al rotor. Por ello se decidió no incluirla en el diseño.

### 4.1.9 Acotaciones de elementos

Para rematar de manera más completa la parte del diseño se han realizado acotaciones sobre planos generados por el banco de trabajo Drawing de FreeCAD de elementos de la turbina para ilustrar el trabajo de trasfondo de la medición. Se han añadido en el **Anexo A** de la memoria.

### 4.1.10 Horas de trabajo

Para la estimación de las horas de trabajo en la realización del diseño, en primer lugar se debe tener en cuenta que la utilización de programas de diseño como FreeCAD forman apenas parte de la docencia en los cuatro cursos del grado de Tecnologías Marinas. Estos programas están siendo introducidos de manera gradual en asignaturas como Expresión Gráfica de primer curso o en Máquinas e Instalaciones de Vapor de tercer curso.

#### 1. Herramienta de diseño FreeCAD: (20 horas)

- Tutoriales de la plataforma Youtube.
- Lectura de manuales de la página web de FreeCAD.
- Búsqueda de información específica.

#### 2. Estudio de la temática: (10 horas)

- Fundamentos teóricos de las turbinas.
- Recopilación de información.
- Búsqueda de documentos y artículos.

#### 3. Toma de medidas: (8 horas)

- Medición de cada elemento de la turbina.
- Desplazamiento a la central térmica.
- Toma de fotografías añadidas en el **Anexo B**.

#### 4. Desarrollo del diseño: (160 horas)

- Familiarización con cada herramienta del programa.
- Solución de problemas con el equipo de trabajo.
- Realización de modelos sencillos a modo de práctica.
- Diseño y simulación de la turbina.
- Análisis de los resultados.

#### 5. Impresión 3D: (12 horas)

- Diseño y simulación del álabe.
- Preparación de la impresora 3D.
- Proceso de impresión del álabe.

#### 5. Redacción de documentos: (10 horas)

- Comprensión del uso del programa LaTeX.
- Redacción de la memoria del proyecto.

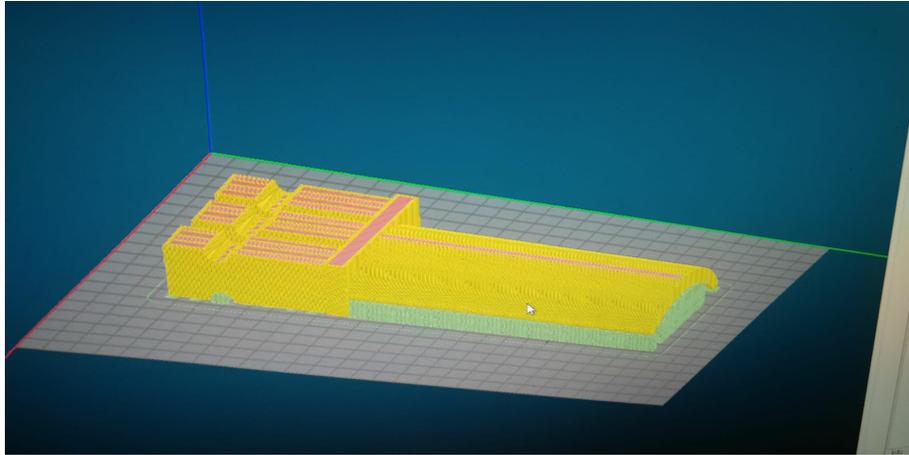
Las actividades que se han desarrollado a lo largo de los meses han sido supervisadas mediante tutorías periódicas con el profesor Pedro Rivero Rodríguez, tutor del proyecto.

## 4.2 Impresión 3D de un elemento de la turbina

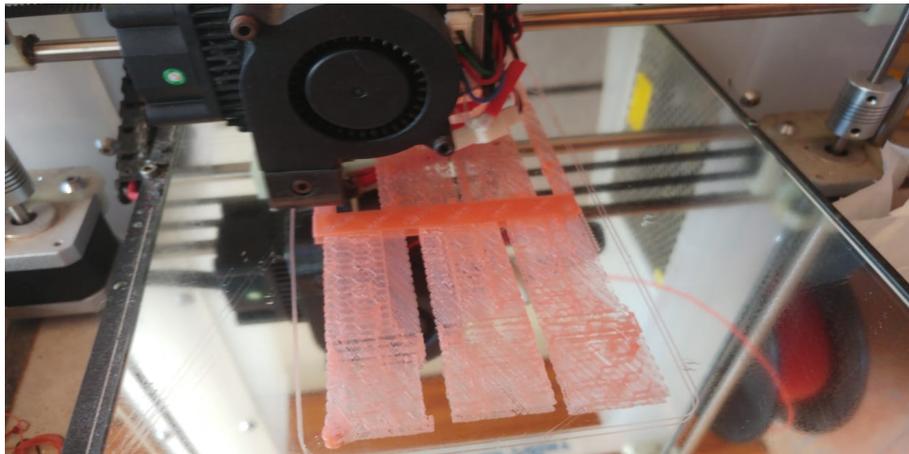
Como ya se ha dicho previamente herramientas como FreeCAD pueden servir para diseñar y luego imprimir piezas en 3D, adecuando su formato de exportación (STL) al de trabajo de una impresora 3D. Así poder imprimir cualquier pieza o elemento necesario de recambio o fabricar en caso de no poseer o no tener acceso a la pieza original y ser sustituido por materiales de características parecidas y/o adecuadas.

Es por ello que para demostrar esta vertiente del uso de FreeCAD se ha decidido realizar la impresión 3D de un álabe móvil del rotor de la turbina. Para ello se parte de la pieza ya realizada en el programa, a la que se le ha añadido una base de acoplamiento al tambor del rotor, y seguidamente se ha exportado a formato STL para trabajar en el programa que usa la impresora 3D (fig.4.26). Seguidamente, dentro del programa se ha elegido la escala de la pieza aumentándola a 3:1 para una mejor visualización de la misma, además de elegir el material de la pieza, en este caso un filamento de PLA el cual es un polímero biodegradable aunque cabe destacar que como ya se ha dicho, hoy en día sería posible mecanizar estas piezas en metal mediante una máquina de control numérico. Luego se ha procedido a la impresión, la cual se ha llevado a cabo en aproximadamente unas 12 horas (fig.4.27). Estos tiempos pueden ser excesivos para una pieza de estas dimensiones, pero podrían reducirse con una impresora de mayor tamaño y de mejor calidad que la usada (Anet A8).

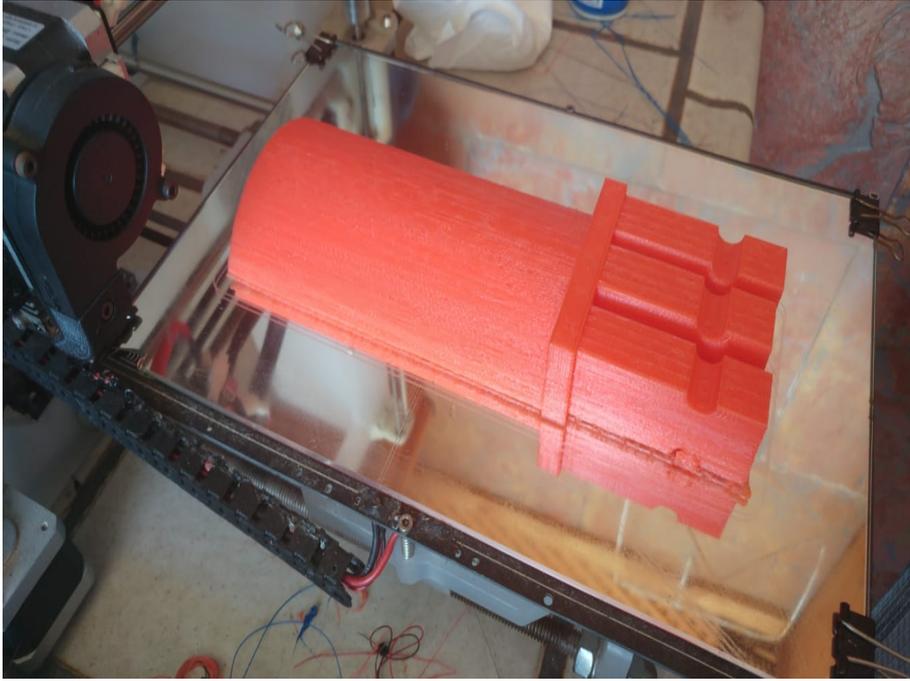
Como resultado la pieza de la fig.4.28 refleja la posibilidad de llevar a cabo impresiones 3D de elementos a bordo de un barco. Además se han añadido al **Anexo B** de la memoria más fotografías del proceso.



**Figura 4.26:** Ventana programa de impresora 3D  
Fuente: colección propia



**Figura 4.27:** Proceso de fabricación de la pieza  
Fuente: colección propia



**Figura 4.28:** Resultado de la impresión  
Fuente: colección propia

# 5 Conclusiones

1. El conocimiento de las herramientas de diseño, modelado y cálculo asistido por ordenador pueden ayudar en la profesión de oficial de máquinas dada la futura fabricación de piezas 'in situ' de piezas.
2. Mediante programas de representación 3D y programas para cálculo numérico estructural se pueden realizar cálculos sobre el funcionamiento, rendimiento, resistencia, potencia de un escalón, transferencia de calor en una turbina.
3. Una buena técnica en la toma de mediciones facilitará el trabajo de recopilación de datos y parámetros de elementos y máquinas con los que se van a trabajar.
4. Se pueden realizar réplicas de piezas mediante representación de modelos 3D de las mismas y su posterior fabricación en una impresora 3D.
5. Es posible diseñar desde cero elementos complejos utilizando software libre, que posteriormente pueden ser fabricados a bordo mediante máquinas de control numérico
6. Una vez obtenido el modelo, este puede emplearse también con carácter didáctico para visualizar los elementos de una turbina de vapor.

## Conclusions

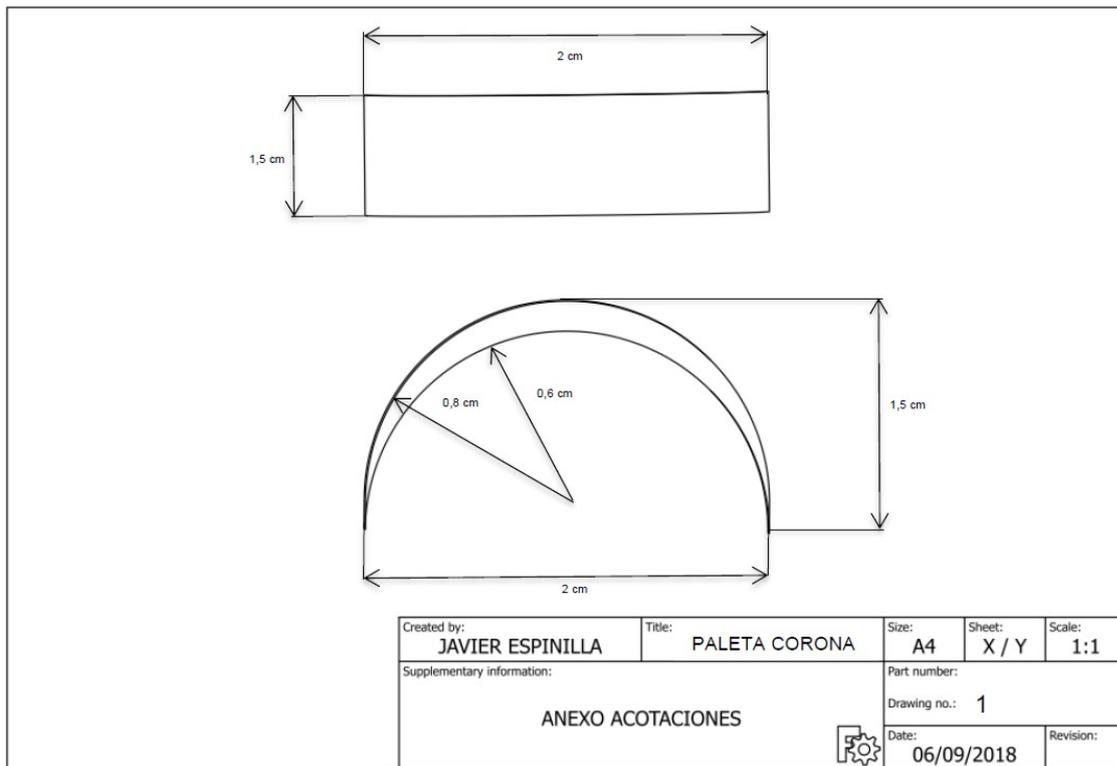
1. Knowledge of computer-aided design, modeling and calculation tools can help the profession of machine officer given the future fabrication of parts in situ.
2. Through 3D rendering programs and programs for structural numerical calculation, calculations can be made on the operation, efficiency, resistance, power of a step, heat transfer in a turbine.
3. A good technique in taking measurements will facilitate the work of data collection and parameters of elements and machines with which they will work.
4. Replicas of pieces can be made by representing 3D models of them and their subsequent manufacture in a 3D printer.
5. It is possible to design complex elements from scratch using free software, which can then be manufactured on board using numerical control machines.
6. Once the model is obtained, it can also be used as a teaching tool to visualize the elements of a steam turbine.



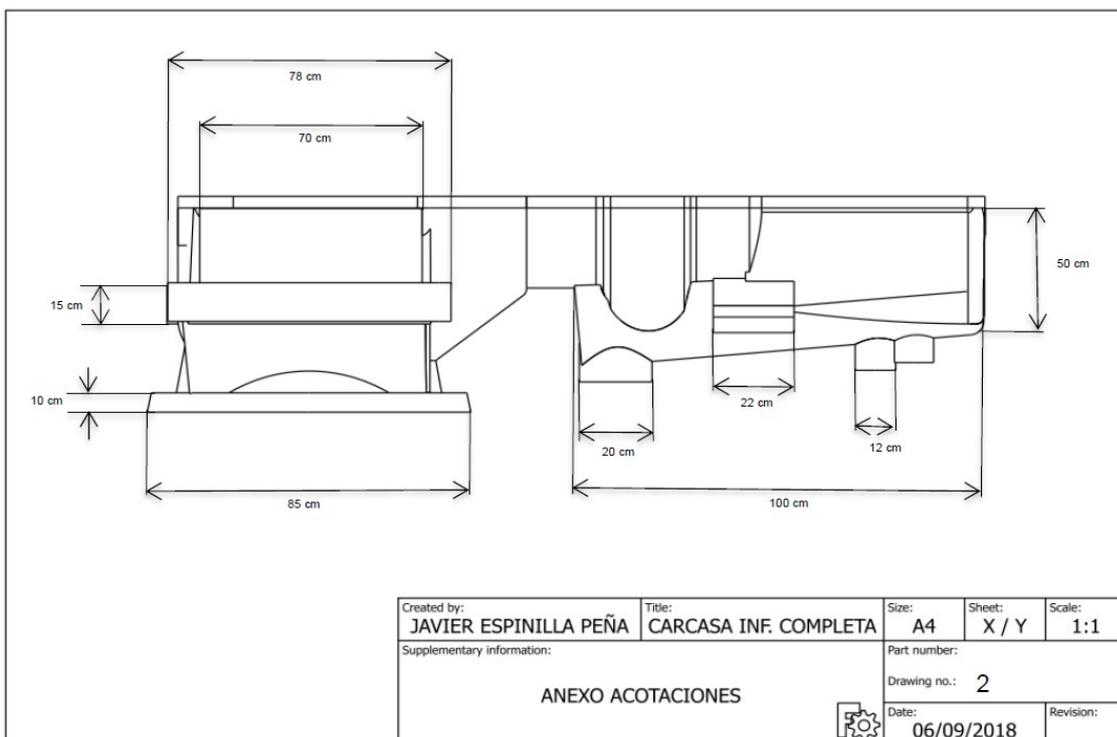
# Anexos



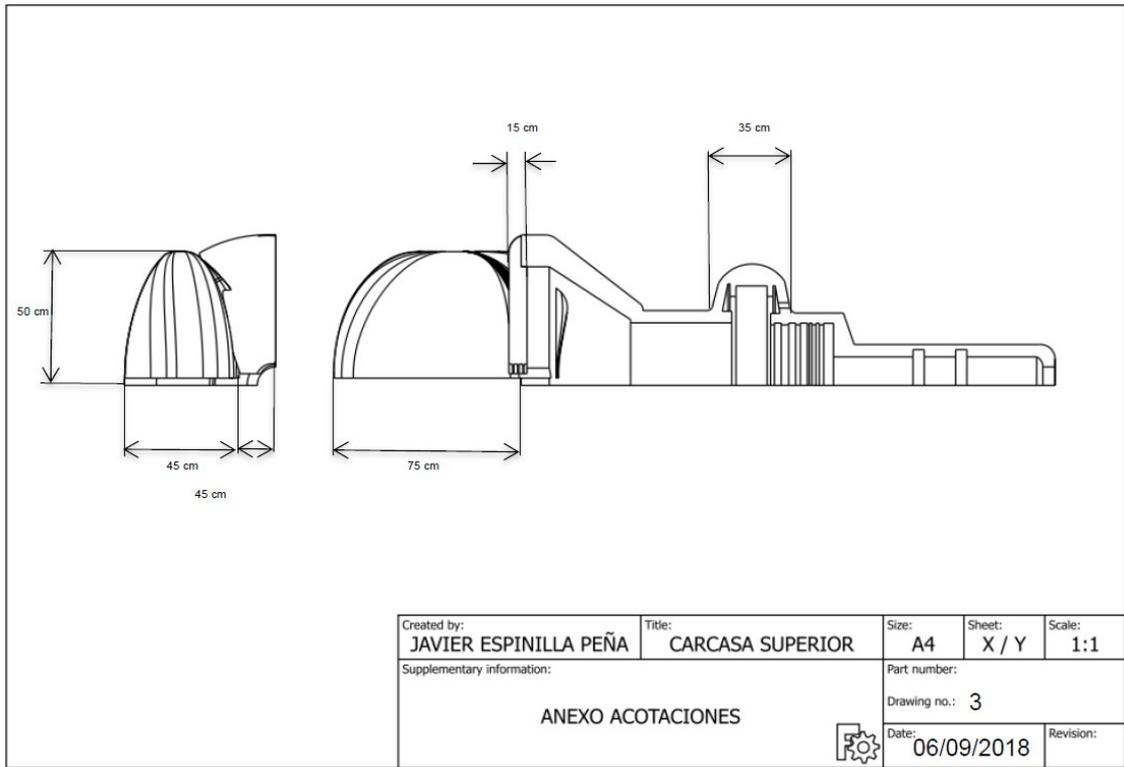
# A Medidas de elementos



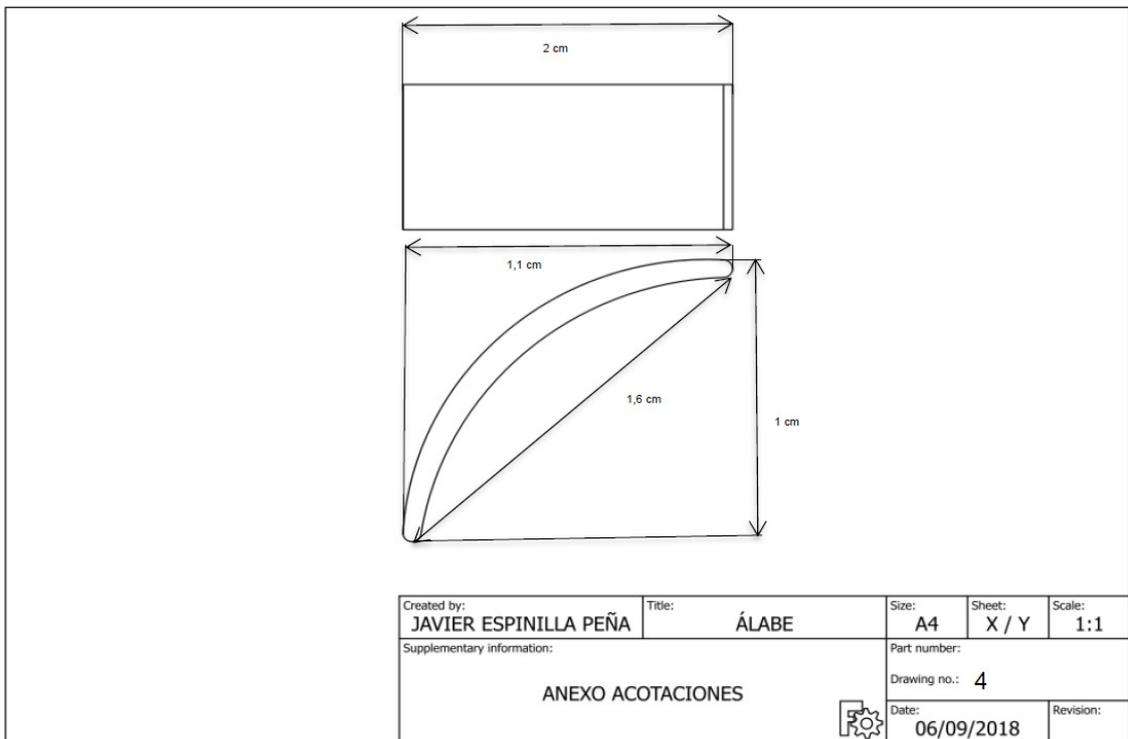
**Figura A.1:** Sección paleta de la corona  
Fuente: elaboración propia



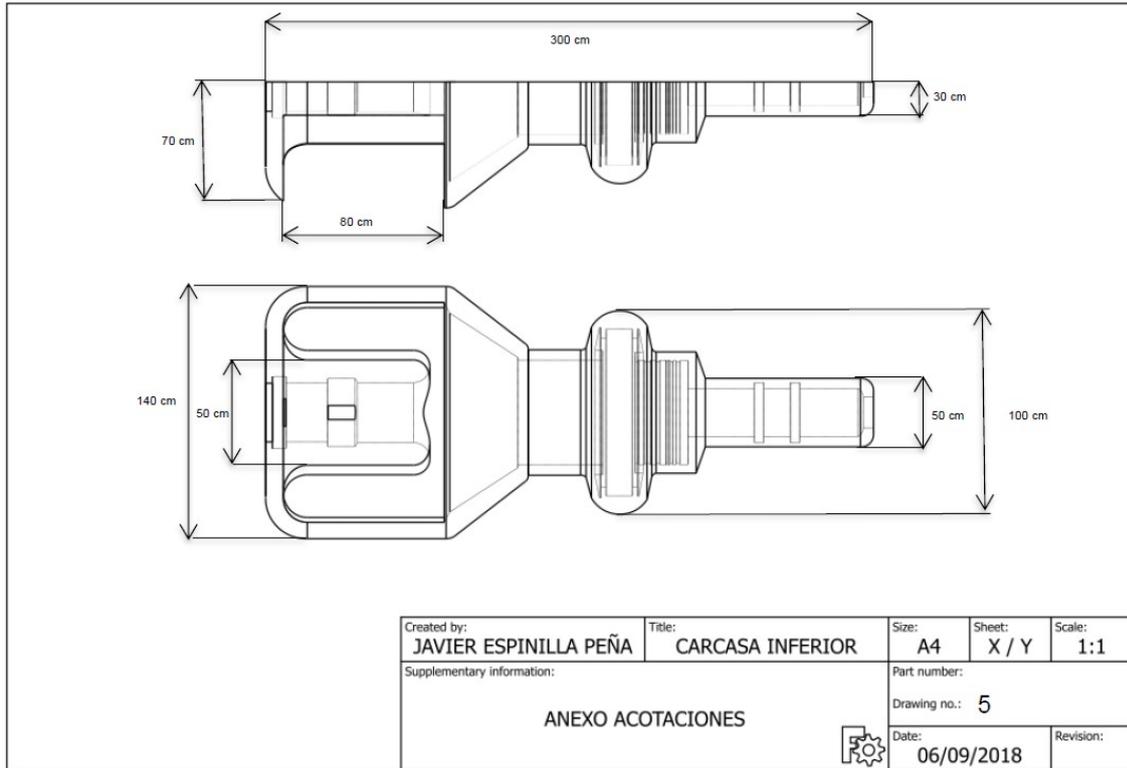
**Figura A.2:** Carcasa inferior completa  
Fuente: elaboración propia



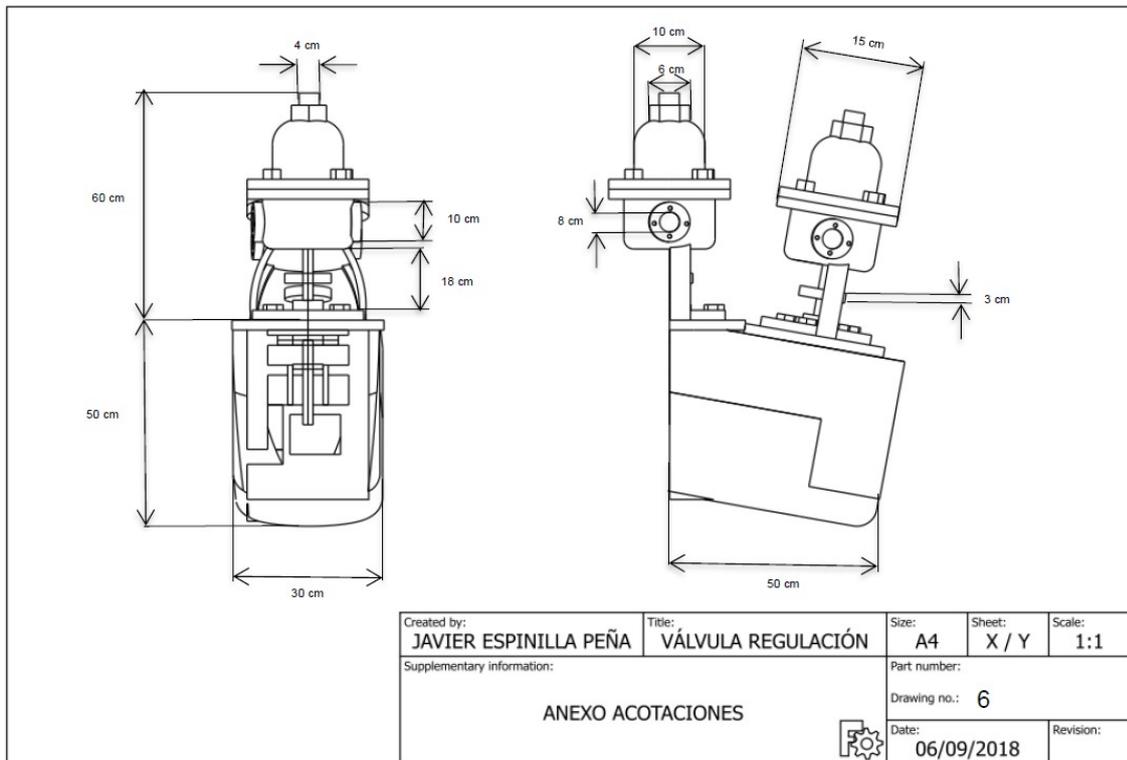
**Figura A.3:** Carcasa superior  
Fuente: elaboración propia



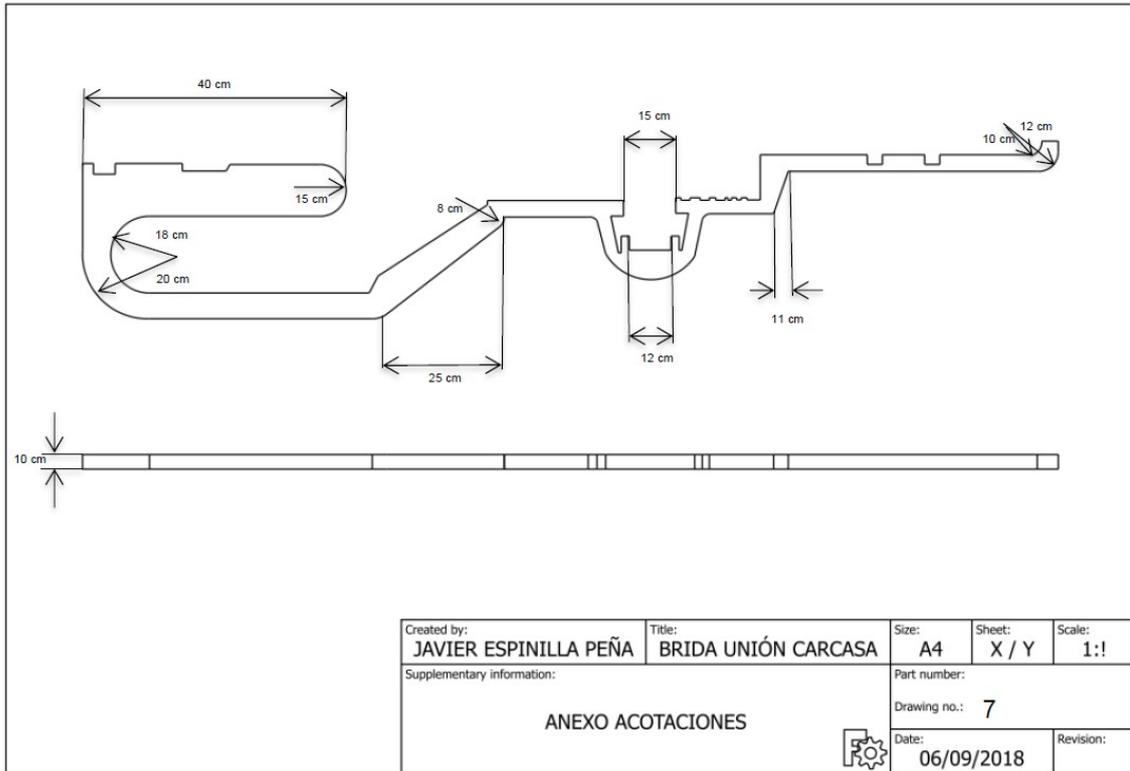
**Figura A.4:** Sección Álabes  
Fuente: elaboración propia



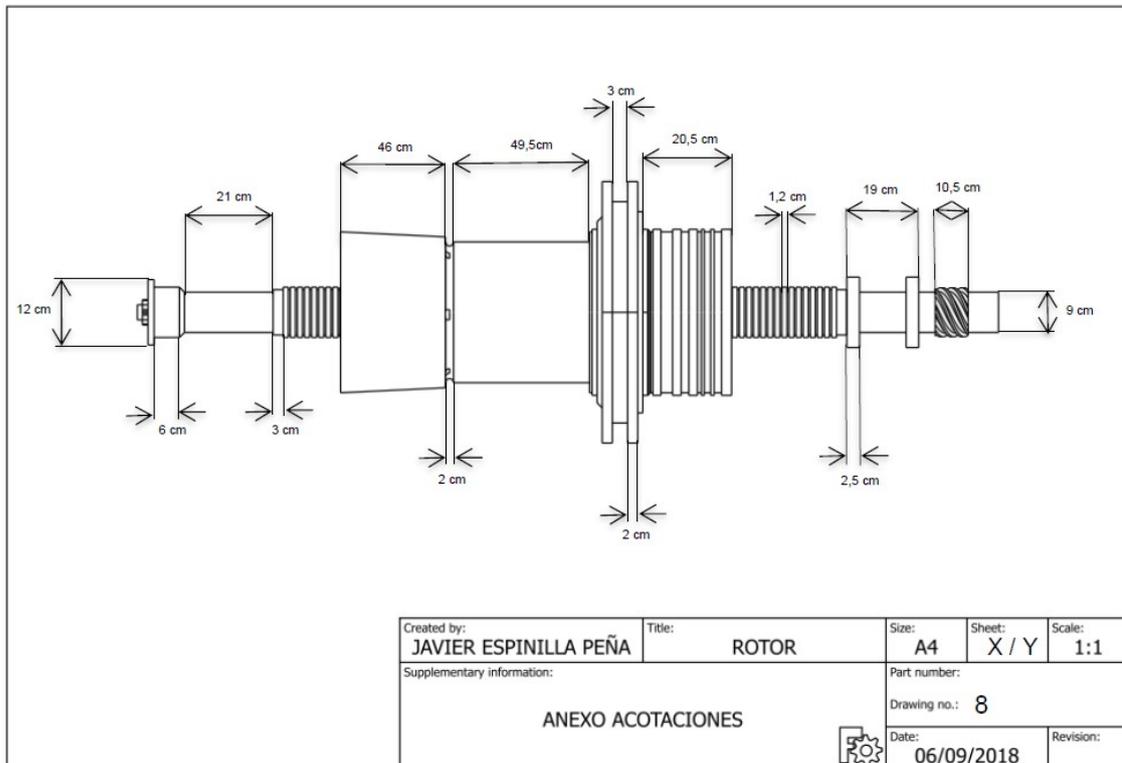
**Figura A.5:** Carcasa inferior  
Fuente: elaboración propia



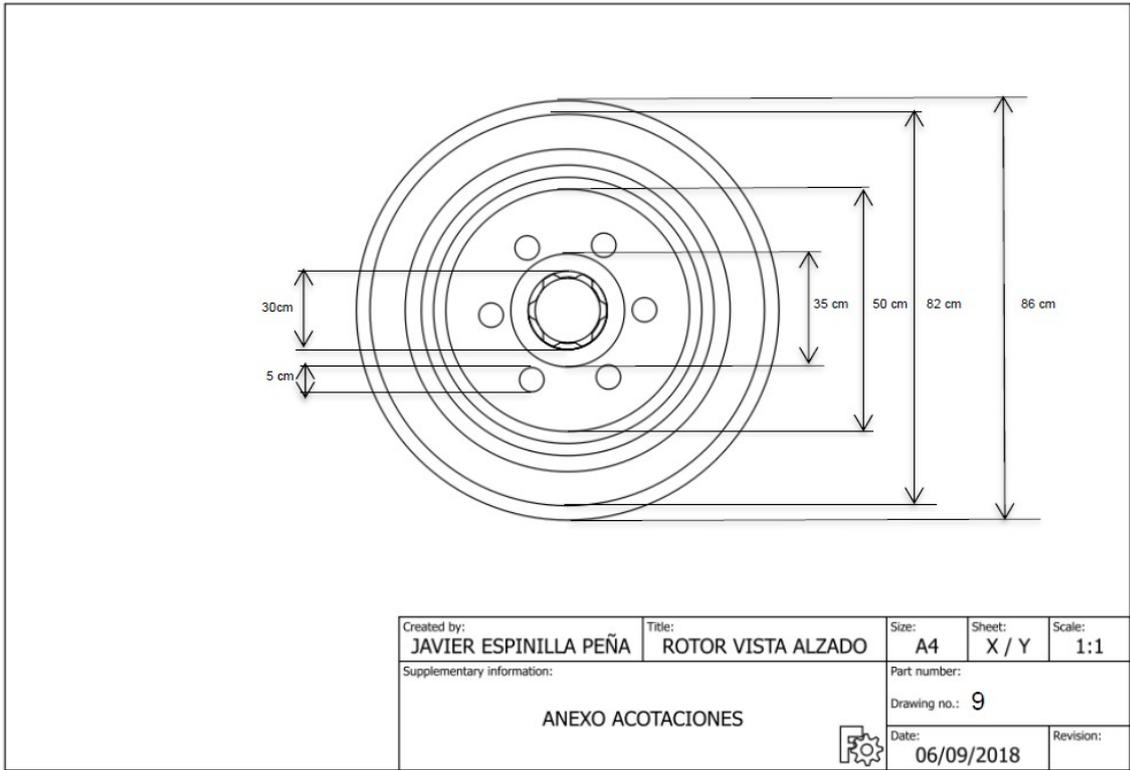
**Figura A.6:** Válvula de regulación  
Fuente: elaboración propia



**Figura A.7:** Sección brida  
Fuente: elaboración propia



**Figura A.8:** Rotor  
Fuente: elaboración propia



**Figura A.9:** Alzado del rotor  
Fuente: elaboración propia

## B Fotografías complementarias



Fuente: colección propia



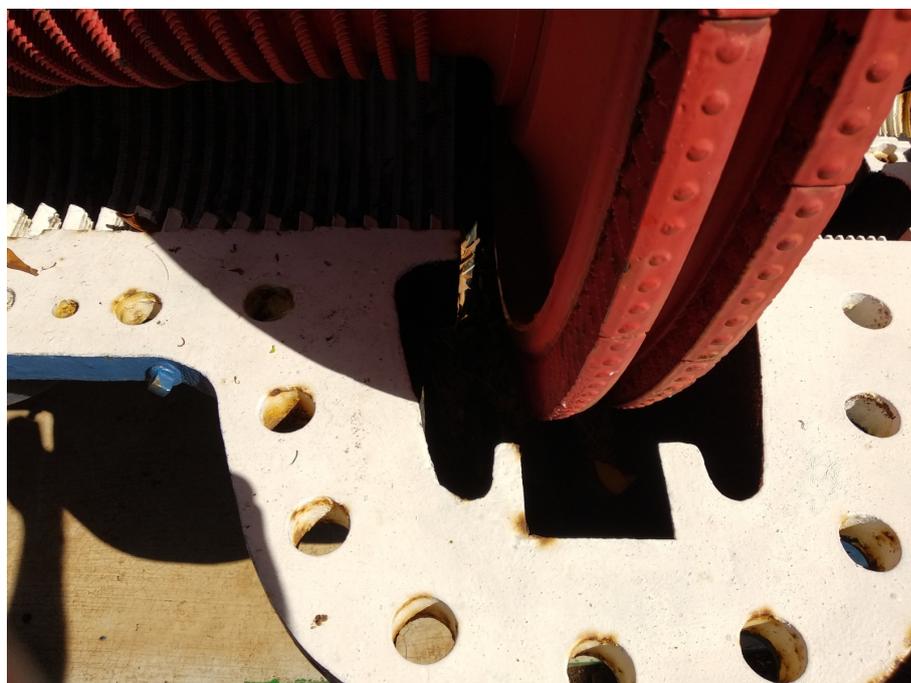
Fuente: colección propia



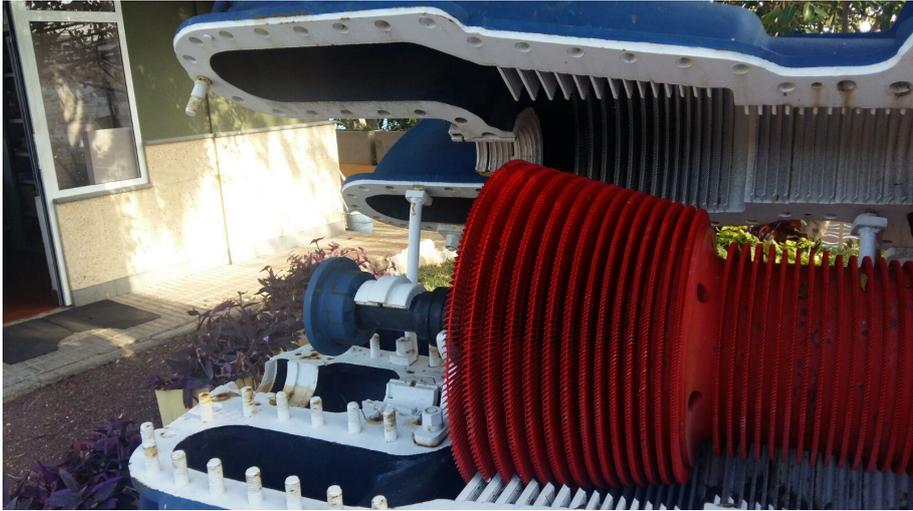
Fuente: colección propia



Fuente: colección propia



Fuente: colección propia



Fuente: colección propia



Fuente: colección propia



Fuente: colección propia



Fuente: colección propia



Fuente: colección propia



Fuente: colección propia



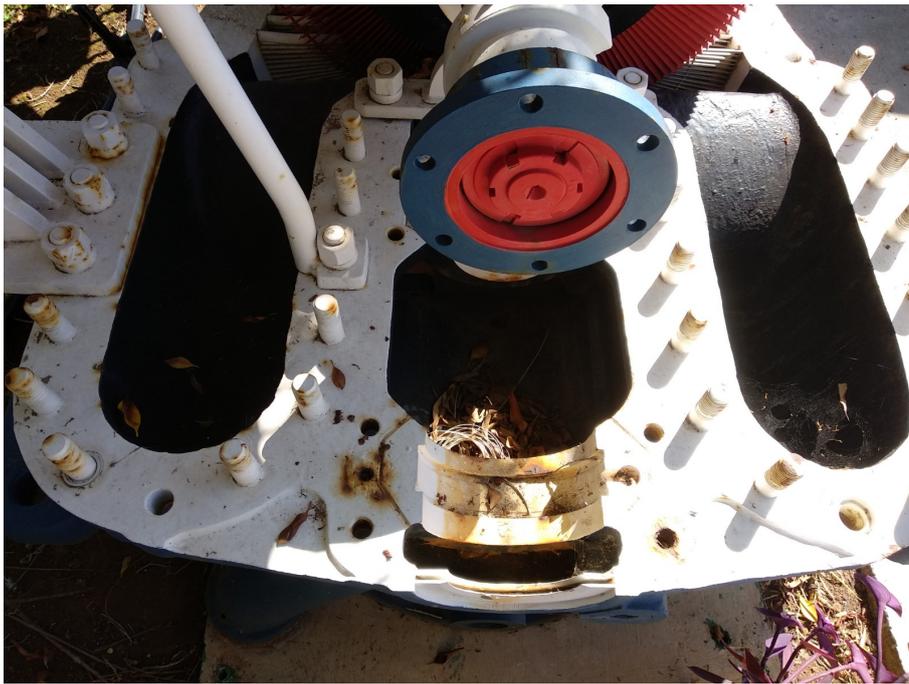
Fuente: colección propia



Fuente: colección propia



Fuente: colección propia



Fuente: colección propia



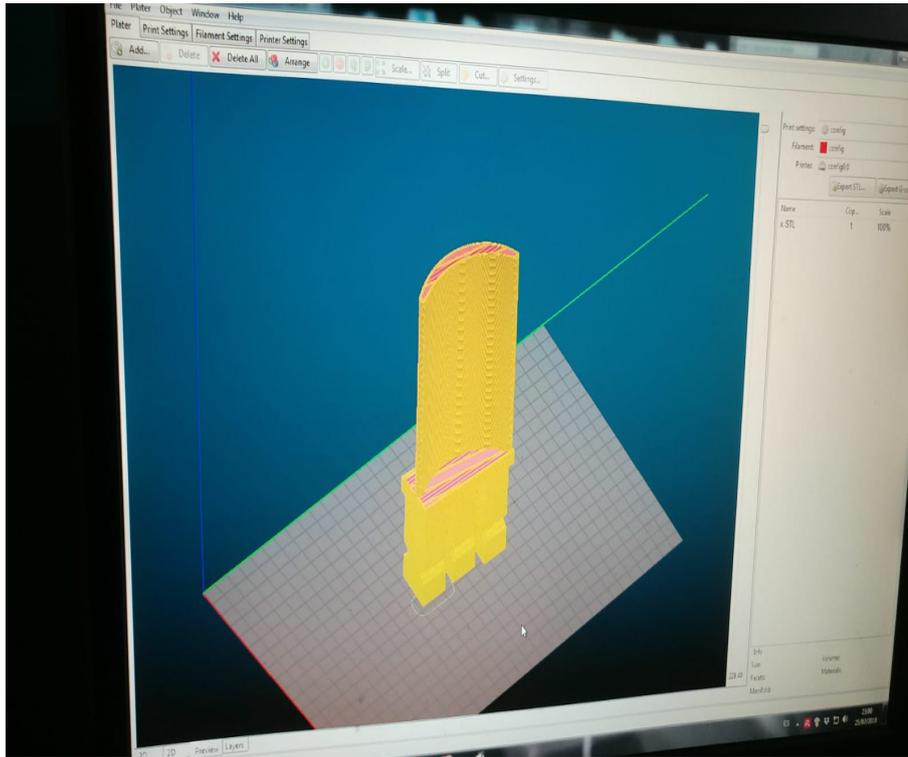
Fuente: colección propia



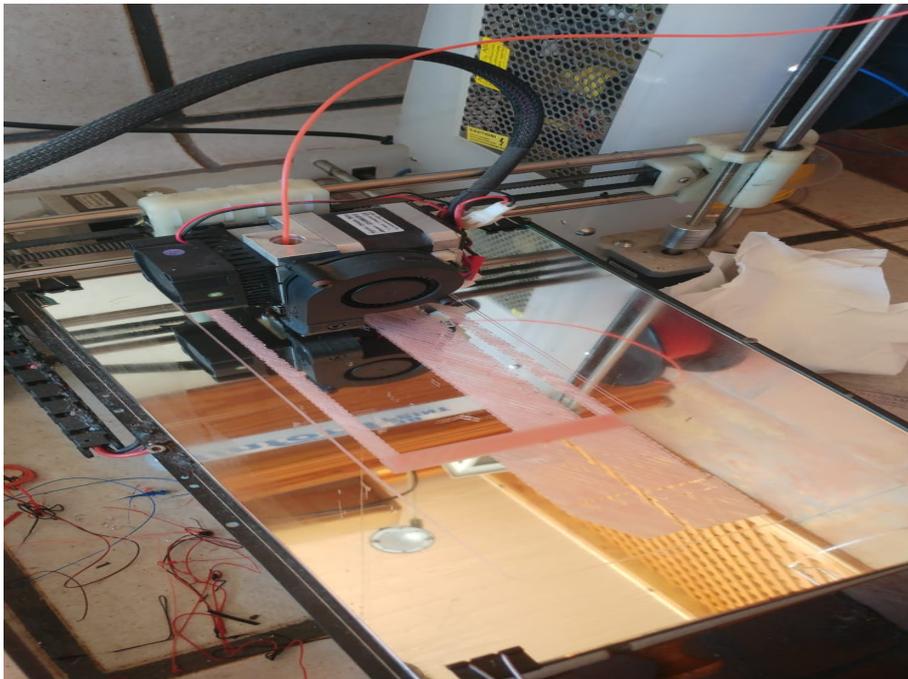
Fuente: colección propia



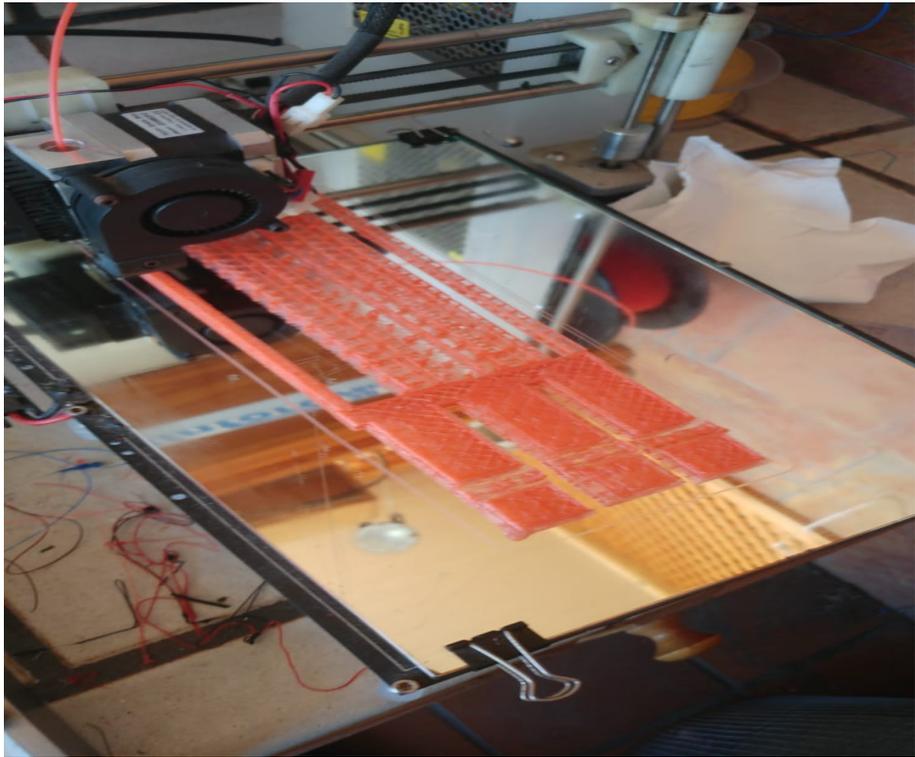
Fuente: colección propia



Fuente: colección propia



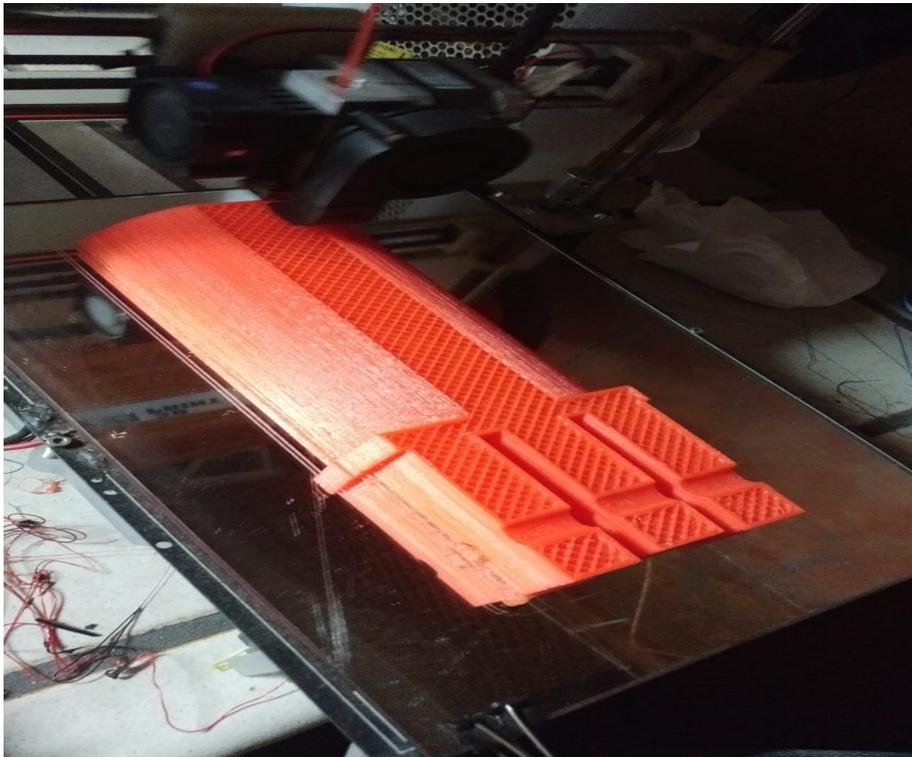
Fuente: colección propia



Fuente: colección propia



Fuente: colección propia



Fuente: colección propia

# Bibliografía

- [1] AMENGUAL MATAS, RAFAEL RUBÉN (2004), *Análisis de la evolución histórica de las máquinas térmicas durante el periodo 1826-1914 a través de las patentes españolas de la época.*
- [2] CASANOVA KINDELAN, J. *Fundamentos de turbomáquinas, motores térmicos (Madrid, España).*
- [3] JUAN GONZÁLEZ, <http://www.iearobotics.com/wiki/index.php?title=DiseñodepiezasFreecad>.
- [4] LUCIEN VIVIER *Turbinas de vapor y de gas*, 1965
- [5] MARC SACHON (2016), *Revista Antiguos alumnos IESE, Impresión 3D: la digitalización de la fabricación.*
- [6] M. LUCINI (1972). *Turbomáquinas de vapor y de gas, su cálculo y su construcción.*
- [7] M,J, MORAN, H,N, SHAPHIRO, ED REVERTE *Fundamentos de Termodinámica Técnica.*
- [8] OJOTIN, V.; *et al, Fundamentos de Termotecnia.* Mir, 1984.
- [9] P.FERNANDEZ, *Elementos Constructivos de una Turbina de Vapor*
- [10] SCHEGLIAIEV.A.V. (1978). *Turbinas de vapor: la teoría del proceso térmico y las construcciones de turbinas.* Mir Moscú.