



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



---

# **DISEÑO DE VOLUTAS DE COMPRESORES Y TURBINAS RADIALES Y CÁLCULO DEL FLUJO EN CFD**

---

TRABAJO FIN DE GRADO  
GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL



**AUTOR**

KORB, ALEXEY

**TUTOR**

GALINDO LUCAS, JOSÉ

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA  
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DEL DISEÑO  
VALENCIA, SEPTIEMBRE DE 2019

# Índice General

PARTE I: MEMORIA.....	1
Capítulo 1: Planteamiento .....	2
1.1 Antecedentes.....	2
1.2 Justificación .....	3
1.3 Objetivos.....	3
1.4 Resumen .....	4
Capítulo 2: Análisis teórico de flujo en volutas .....	5
2.1 Introducción.....	5
2.2 Turbomáquinas. Conceptos generales.....	5
2.3 Compresor centrífugo .....	8
2.4 Turbinas radiales .....	11
2.5 Volutas.....	13
Capítulo 3: Diseño paramétrico de volutas.....	16
3.1 Introducción.....	16
3.2 Diseño con Mathematica .....	16
3.2.1 Desarrollo teórico.....	16
3.2.2 Desarrollo práctico.....	19
3.3 Diseño con Spaceclaim.....	25
3.4 Resumen .....	31
Capítulo 4: Análisis del flujo con CFD .....	32
4.1 Introducción.....	32
4.2 Mallado .....	32
4.3 Condiciones de contorno.....	34

4.4 Modelos físicos .....	35
4.4.1 Modelos de turbulencia.....	35
4.5 Resultados.....	36
4.6 Resumen .....	52
Capítulo 5: Conclusiones.....	52
Bibliografía .....	54
<b>PARTE II: PRESUPUESTO.....</b>	<b>55</b>
<b>PARTE III: PLIEGO DE CONDICIONES .....</b>	<b>57</b>

# Índice de Figuras

1.1: Esquemas de motores axial y radial.....	2
2.1: Ejemplo de una turbomáquina industrial .....	6
2.2: Rotor de un compresor centrífugo .....	8
2.3: Sentido del flujo en un compresor centrífugo .....	8
2.4: Representación de partes y velocidades de un compresor radial.....	10
2.5: Diagrama h-s de un compresor centrífugo.....	10
2.6: Representación de partes y velocidades de una turbina radial.....	11
2.7: Diagrama h-s de una turbina radial.....	12
2.8: Vista transversal e isométrica de una voluta.....	14
3.1: Método Flat Spline .....	17
3.2: Curva de Bézier en un cubo .....	18
3.3: B-Splines con parámetros variables en 1ª posición.....	19
3.4: B-Splines con parámetros variables en 2ª posición.....	20
3.5: Código de Mathematica para los splines y los deslizadores.....	20
3.6: Espiral dibujada con splines.....	21
3.7: Código de Mathematica para la espiral .....	21
3.8: Sección de una voluta con splines.....	22
3.9: Código de Mathematica para la sección de voluta .....	22
3.10: Secciones de voluta grande y pequeña con botón de Guardar.....	23
3.11: Opciones adicionales para el diseño de la voluta .....	23
3.12: Resultado final .....	24
3.13: Voluta terminada con una sección adicional.....	24
3.14: Molde de la voluta original.....	25
3.15: Voluta extraída del molde.....	25
3.16: Voluta cortada por planos.....	26
3.17: Trazado de las secciones obtenida después del corte.....	27
3.18: Resultado del trazado de las secciones.....	27
3.19: Secciones desplazadas para la voluta grande y pequeña.....	28
3.20: Vista de planta de las volutas.....	28

3.21: Porción regular de la voluta grande.....	29
3.22: Conducto de entrada de la voluta grande.....	29
3.23: Porción de unión de la voluta grande.....	30
3.24: Voluta grande.....	30
3.25: Voluta pequeña .....	31
4.1: Mallado de la voluta original .....	33
4.2: Mallado de la voluta pequeña.....	33
4.3: Mallado de la voluta grande .....	34
4.4: Distribución de presiones en la voluta original.....	38
4.5: Distribución de velocidades en la voluta original .....	39
4.6: Distribución del ángulo beta en la voluta original.....	40
4.7: Evolución del ángulo beta en la voluta original.....	40
4.8: Distribución de presiones en la voluta pequeña.....	41
4.9: Distribución de velocidades en la voluta pequeña .....	42
4.10: Distribución del ángulo beta en la voluta pequeña.....	43
4.11: Evolución del ángulo beta en la voluta pequeña.....	44
4.12: Distribución de presiones en la voluta grande.....	45
4.13: Distribución de velocidades en la voluta grande.....	46
4.14: Distribución del ángulo beta en la voluta grande .....	47
4.15: Evolución del ángulo beta en la voluta grande.....	47
4.16: Presión en voluta original, pequeña y grande sin rozamiento .....	48
4.17: Velocidad en voluta original, pequeña y grande sin rozamiento.....	49
4.18: Beta en voluta original, pequeña y grande sin rozamiento.....	50
4.19: Evolución del ángulo beta en la voluta original sin rozamiento .....	50
4.20: Evolución del ángulo beta en la voluta pequeña sin rozamiento .....	50
4.21: Evolución del ángulo beta en la voluta grande sin rozamiento.....	51

# Índice de Tablas

1: Ángulo beta en diferentes condiciones .....	51
2: Coste de licencias .....	56
3: Coste de equipos .....	56
4: Coste de ingenieros .....	56
5: Coste del proyecto.....	56

PARTE I  
MEMORIA

# Capítulo 1

## Planteamiento

### 1.1 Antecedentes

Hoy en día, los compresores y turbinas en configuración axial son las más utilizadas en la aviación comercial. Son motores que están bien adaptados y diseñados para aviones, pues son motores largos y relativamente estrechos lo que hace que la resistencia aerodinámica que producen se reduzca. La relación de compresión que permiten alcanzar es alta, aunque requieran muchas etapas de compresión, lo cual los hace eficientes. En definitiva, son motores que ofrecen un alto rendimiento, con un consumo de combustible reducido para la misión que han sido diseñados.

Sin embargo, existen otra configuración distinta de motores de turbina de gas: compresores y turbinas radiales. Este tipo de motores es comúnmente utilizado en helicópteros, y existen muchos motivos que lo justifican. Los esquemas de ambos motores se pueden observar en la figura 1.1.

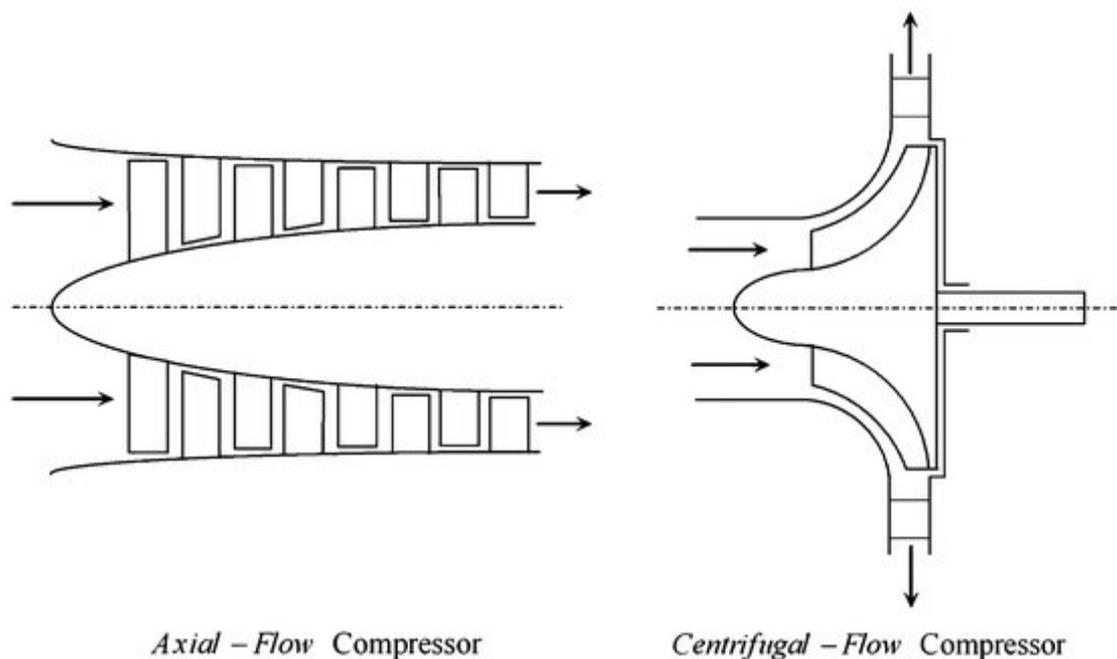


Figura 1.1: Esquemas de motores axial y radial

En primer lugar, los motores centrífugos o radiales son motores pequeños y cortos que los motores axiales. Suelen ser relativamente más anchos que los motores

axiales, pero ese aspecto se ve contrarrestado por el hecho de que suelen ir incorporados en el propio fuselaje del helicóptero, haciendo que su geometría sea irrelevante en la resistencia aerodinámica. Además, los helicópteros vuelan más lento que los aviones y, por tanto, no requieren tanta optimización geométrica.

Por otra parte, los motores radiales son más simples que los axiales. No tienen tantas partes móviles, haciendo que sea más resistente y económico, reduciendo a su vez la cantidad de labores de mantenimiento necesarias.

## 1.2 Justificación

Existe un elemento importante en el funcionamiento de los compresores y turbinas radiales: la voluta. La voluta es un conducto que en el compresor recoge el aire que ha pasado por el rotor y lo conduce a las cámaras de combustión, mientras que en las turbinas hace lo contrario, es decir, distribuye el aire saliente de las cámaras de combustión a lo largo del rotor de la turbina.

Por tanto, un diseño adecuado de la voluta es fundamental para un funcionamiento eficiente de los compresores y turbinas radiales, y esto es lo que se va a explorar a lo largo de este trabajo

## 1.3 Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es aplicar una metodología de diseño mediante el uso de programas CAD para su posterior uso en ensayos de flujo mediante CFD.

Otro objetivo ha sido crear una herramienta que permita visualizar las volutas. Para este fin se ha utilizado el programa Mathematica de Wolfram, recurriendo a conceptos teóricos como los B-Splines y las curvas de Bézier.

Durante el desarrollo de la parte del trabajo que corresponde al diseño y la creación de volutas mediante programas CAD, se ha partido a partir de un modelo digitalizado de una voluta real, para posteriormente ser modificada, creando así dos volutas nuevas, de las cuales una es más grande y otra es más pequeña.

Finalmente, utilizando un programa de simulación computacional de fluidos (CFD) se ensayan las tres volutas obtenidas variando el gasto másico en la

entrada de esta, para así poder observar el comportamiento del flujo dentro de la misma.

## **1.4 Resumen**

En pocas palabras, el trabajo consiste, primeramente, crear una herramienta informática, mediante el uso del programa Mathematica, que permita la visualización de volutas de cualquier geometría.

Más adelante, se utilizan programas de diseño CAD para crear volutas de diferente tamaño, pero con la misma geometría.

Finalmente, se ensayan dichas volutas en el programa de ensayo de flujo denominado Star CCM+.

# Capítulo 2

## Análisis teórico de flujo en volutas

### 2.1 Introducción

Antes de comenzar a explicar todo el trabajo, mencionado anteriormente, que se ha realizado a lo largo de esta memoria, será necesario introducir y explicar muchos conceptos teóricos relacionados tanto con las turbomáquinas, como con los compresores y las turbinas radiales, además de las volutas propiamente dichas.

Se realizará una definición de lo que es una turbomáquina térmica, así como el compresor y turbina radial. Posteriormente, se profundizará en las volutas, tanto en el diseño como en los parámetros más relevantes de los mismos.

### 2.2 Turbomáquinas. Conceptos generales

Se define como turbomáquina a aquella máquina cuyo elemento principal es un rotor a través del cual pasa de manera continua un fluido. El fluido experimenta un cambio de cantidad de movimiento debido a la acción de la máquina. Se produce así un intercambio de energía entre la máquina y el fluido, que puede ir en los dos sentidos: de la máquina al fluido y del fluido a la máquina.

Existen tres criterios de clasificación de turbomáquinas:

#### Según la compresibilidad del fluido

Se denominan turbomáquinas térmicas cuando el fluido sufre un cambio de densidad cuando pasa a través de la máquina. El fluido es por tanto compresible. Algunos ejemplos son los compresores o las turbinas de gas.

Por otro lado, están las máquinas hidráulicas. El fluido de trabajo de este tipo de máquinas no experimenta un cambio de densidad y, por tanto, es incompresible. Además, el fluido de trabajo puede ser tanto líquido como gas. Un ejemplo de estas máquinas podría ser un ventilador o una turbina hidráulica, como la de la figura 2.1.



**Figura 2.1: Ejemplo de una turbomáquina industrial**

### **Según el sentido de intercambio de energía**

Por una parte, se tienen las máquinas motoras, como podrían ser la turbina de gas o de vapor, en las que el fluido cede energía a la máquina, expandiéndose hasta una presión más baja.

Por otra parte, existen las máquinas generadoras, en las que la energía es comunicada al fluido y, la presión de este aumenta.

### **Según la dirección del flujo**

La dirección del flujo en una turbomáquina puede ser axial, si el flujo avanza de manera paralela al eje de rotación o, radial, si avanza en un plano perpendicular al eje de rotación. También, puede ser un flujo mixto si se tienen los dos tipos de flujo en la misma máquina.

Una vez se ha definido el concepto de turbomáquina y las maneras de clasificarlas se procede a explicar las partes más importantes de estas.

### **Rotor**

En el rotor es donde sucede el intercambio energético con el fluido y, por ello, se considera una pieza fundamental de la turbomáquina. Lo forman un disco que soporta las llamadas palas o álabes. La geometría utilizada en los álabes es mucha

importancia, pues es la que permite el intercambio energético con el fluido. El rendimiento global de la turbomáquina, así como el tipo de cambio energético, por presión o por velocidad, depende en gran parte de los álabes. Existen rotores axiales, radiales y mixtos.

### **Eje o árbol**

La función del eje tiene una función doble: transmite potencia (desde o hacia el rotor) y es el soporte sobre el que yace el rotor. En el caso de las turbomáquinas generadoras éste siempre está conectado a alguna clase de motor, como puede ser un motor eléctrico, o incluso una turbina como es habitual en los turborreactores.

### **Entradas y Salidas**

Comunes a cualquier tipo de turbomáquina, se diferencian en la forma y en la geometría. Cabe destacar, a modo de ejemplo, las máquinas de doble admisión que tienen dos entradas fácilmente distinguibles, y solo una única salida para el fluido. Por otra parte, en molinos de viento, que también se pueden considerar turbomáquinas, la entrada y la salida se tienen que suponer como superficies imaginarias que están antes y después del rotor.

### **Álabes directores**

Son álabes unidos al estator por los cuales el fluido de trabajo pasa antes o después de pasar al rotor a producir el intercambio energético. También conocidos como palas directoras, muchas turbomáquinas no las llevan implementadas, pero en las que están presentes tienen un papel importante. Se encargan de dirigir el flujo según un cierto ángulo, además de acelerarlo, haciendo que el rendimiento de la turbomáquina sea más eficiente. Se sitúan a la salida del rotor en las turbomáquinas generadoras. Adicionalmente, es posible utilizar a los álabes directores como reguladores de flujo, abriéndolos más o menos como una válvula, regulando así el caudal que atraviesa la máquina.

### **Cojinetes**

Son elementos de máquina que permiten el movimiento del eje mientras lo mantienen solidario a la máquina, pueden variar de tipos y tamaños entre todas las turbomáquinas.

## 2.3 Compresor centrífugo

Una característica propia de un compresor centrífugo es que su flujo es de descarga radial. El aire se aspira al centro de un rodete giratorio con hojas radiales y las fuerzas centrífugas lo empujan hacia el perímetro del rodete, como el de la figura 2.2. Se produce al mismo tiempo un aumento de presión, así como la generación de energía cinética, debido al movimiento radial del aire. Antes de dirigir el aire hacia el centro del rodete de la siguiente etapa del compresor, pasa a través de un difusor y una voluta donde la energía cinética se convierte en presión, como se puede ver en la figura 2.3.



Figura 2.2: Rotor de un compresor centrífugo

En cada etapa se realiza una parte del incremento general de la presión que realiza el compresor. Las máquinas industriales modernas no sobrepasan una relación de compresión de 3 en una etapa. Eso se debe a que una relación de compresión más elevada produciría una disminución de la eficiencia de la etapa. El uso de aplicaciones de baja presión y una sola etapa es habitual, por ejemplo, en plantas de tratamiento de aguas residuales.

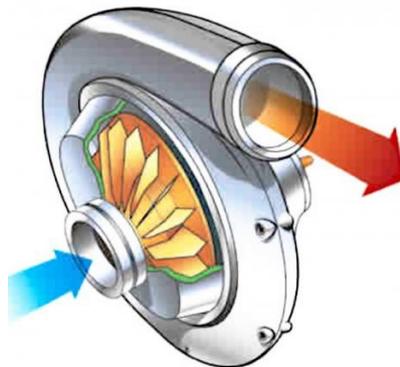


Figura 2.3: Sentido del flujo en un compresor centrífugo

El uso de varias etapas permite utilizar la refrigeración entre las mismas para así reducir la potencia necesaria. En la industria del petróleo y gas, por ejemplo, se utilizan varias etapas en serie sobre un eje de baja velocidad.

Aunque la relación de presiones por etapa es baja, se utilizan numerosas etapas o conjuntos de múltiples compresores en serie para alcanzar la presión de salida deseada. Para aplicaciones de compresión de aire, se integra una caja de engranajes de alta velocidad con las etapas del compresor para girar los rodets de piñones de alta velocidad. El rodete puede tener un diseño abierto o cerrado.

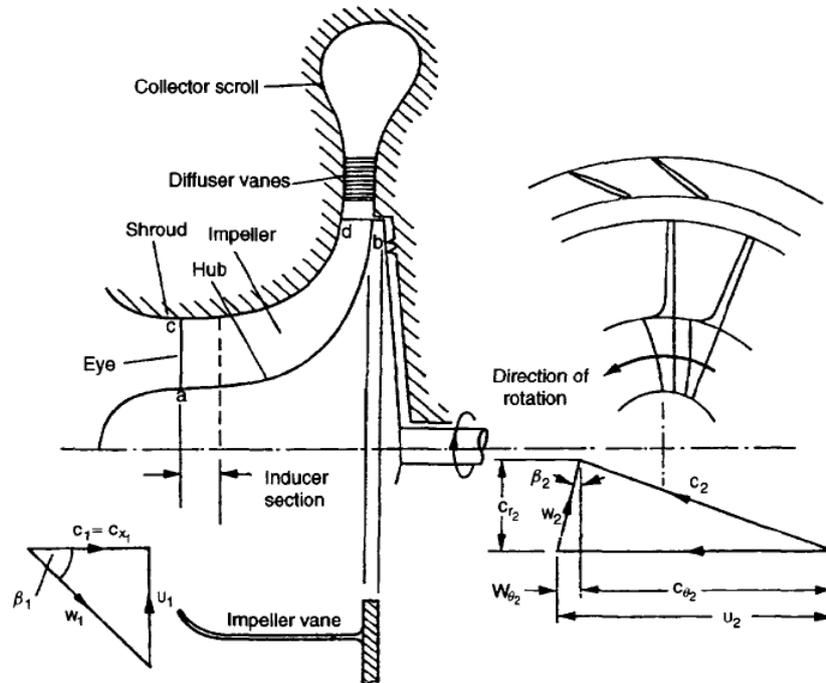
El diseño abierto se utiliza más a menudo para aplicaciones de aire de alta velocidad. El rodete se compone normalmente de una aleación especial de acero inoxidable o aluminio. La velocidad del eje del rodete es muy alta en comparación con la de otros tipos de compresores. Las velocidades de 15 000-100 000 rpm son habituales. Esto significa que el eje o el piñón del compresor de alta velocidad utilizan rodamientos con película de aceite comunes en lugar de rodamientos de rodillos.

Alternativamente, se pueden utilizar rodamientos con película de aire o rodamientos magnéticos activos para una máquina totalmente exenta de aceite. Hay dos rodets montados en cada extremo del mismo eje para contrarrestar las cargas axiales causadas por las diferencias de presión. Normalmente se utilizan 2 o 3 etapas con refrigeradores intermedios para aplicaciones estándar de aire comprimido.

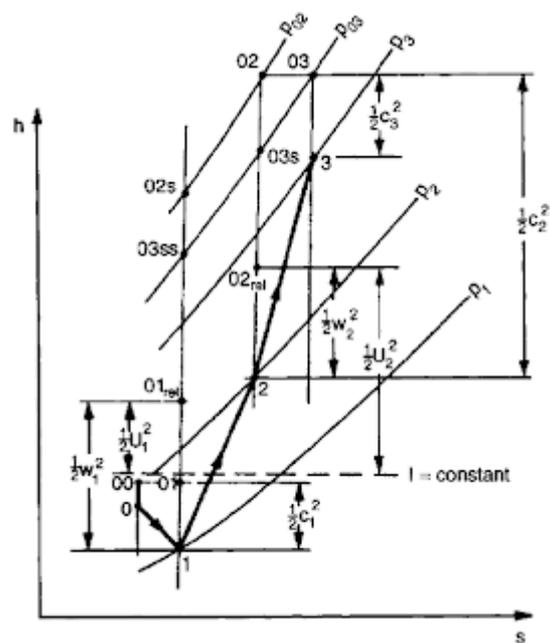
En una configuración moderna del compresor de aire centrífugo, se utilizan motores eléctricos de ultra alta velocidad para accionar los rodets directamente. Esta tecnología crea un compresor compacto sin caja de engranajes y un sistema de lubricación por aceite asociado, lo que lo convierte en un diseño de compresor exento de aceite por completo.

Cada compresor centrífugo se debe sellar de manera adecuada para reducir las fugas a lo largo del eje a través de la carcasa del compresor. Se utilizan muchos tipos de retenes, y los más avanzados se pueden encontrar en compresores de alta velocidad diseñados para altas presiones. Los tipos más comunes son los retenes de laberinto, los retenes de anillo o de separación controlada (generalmente, retenes de grafito) y los retenes mecánicos.

A continuación, en la figura 2.4, se muestran las partes de un compresor centrífugo con sus respectivos triángulos de velocidades,



**Figura 2.4:** Representación de partes y velocidades de un compresor radial. En cuanto al proceso termodinámico que realiza el compresor centrífugo, se puede representar con el diagrama de Mollier, que se puede ver en la figura 2.5.



**Figura 2.5:** Diagrama h-s de un compresor centrífugo

Donde el tramo 0-1 representa el paso del flujo por la carcasa, el tramo 1-2 el paso del flujo por el impulsor y el tramo 2-3 el paso del flujo por el difusor del compresor.

## 2.4 Turbinas radiales

Una turbina radial es una turbina en la que el flujo del fluido de trabajo es radial al eje. La diferencia entre turbinas axiales y radiales consiste en la forma en que el fluido fluye a través de los componentes (compresor y turbina). Mientras que, para una turbina axial, el rotor es 'impactado' por el flujo de fluido, para una turbina radial, el flujo está orientado suavemente perpendicular al eje de rotación, y acciona la turbina de la misma manera que el agua impulsa un molino de agua. El resultado es menos tensión mecánica (y menos tensión térmica, en el caso de los fluidos de trabajo en caliente) que permite que una turbina radial sea más simple, más robusta y eficiente (en un rango de potencia similar) en comparación con las turbinas axiales. Cuando se trata de rangos de alta potencia (por encima de 5 MW), la turbina radial ya no es competitiva (debido al rotor pesado y costoso) y la eficiencia se vuelve similar a la de las turbinas axiales. Las partes y las velocidades de la turbina se pueden observar en la figura 2.6.

En comparación con una turbina de flujo axial, una turbina radial puede emplear una relación de presión relativamente más alta ( $\approx 4$ ) por etapa con tasas de flujo más bajas. Así, estas máquinas caen en los rangos específicos de velocidad y potencia más bajos. Para aplicaciones de alta temperatura, el enfriamiento de las palas del rotor en etapas radiales no es tan fácil como en las etapas de turbina axial.

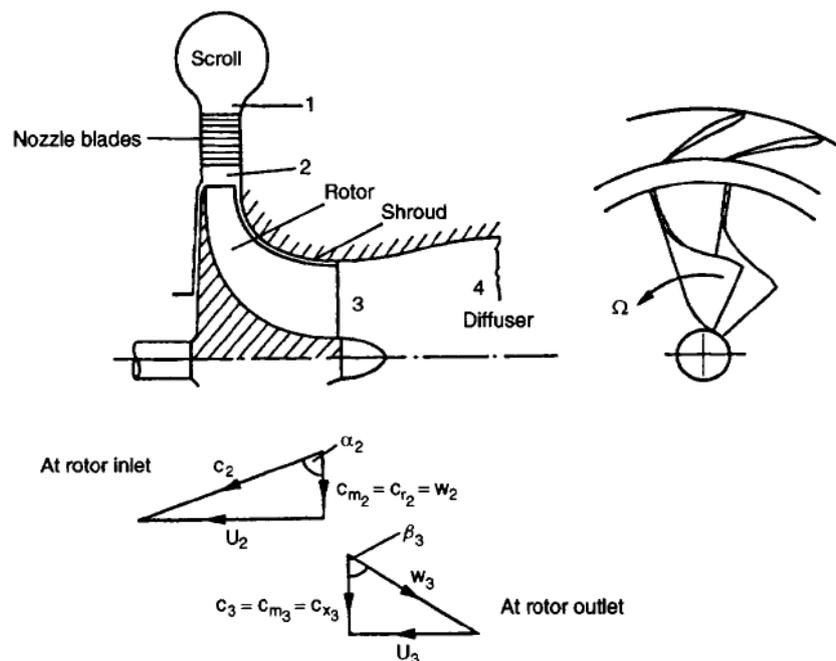


Figura 2.6: Representación de partes y velocidades de una turbina radial

Las palas de las boquillas de ángulo variable pueden brindar mayores eficiencias de etapa en una etapa de turbina radial incluso en operaciones de puntos fuera del diseño. En la familia de turbinas hidráulicas, la turbina Francis es una turbina IFR muy conocida que genera una potencia mucho mayor con un impulsor relativamente grande.

La turbina radial consta de varias partes que se muestran a continuación, junto con los diagramas de velocidades nominales

En cuanto al proceso termodinámico que sucede en esta turbina, se puede mostrar en un diagrama de Mollier, el cuál viene dado de esta manera para la turbina radial, que se puede ver en la figura 2.7.

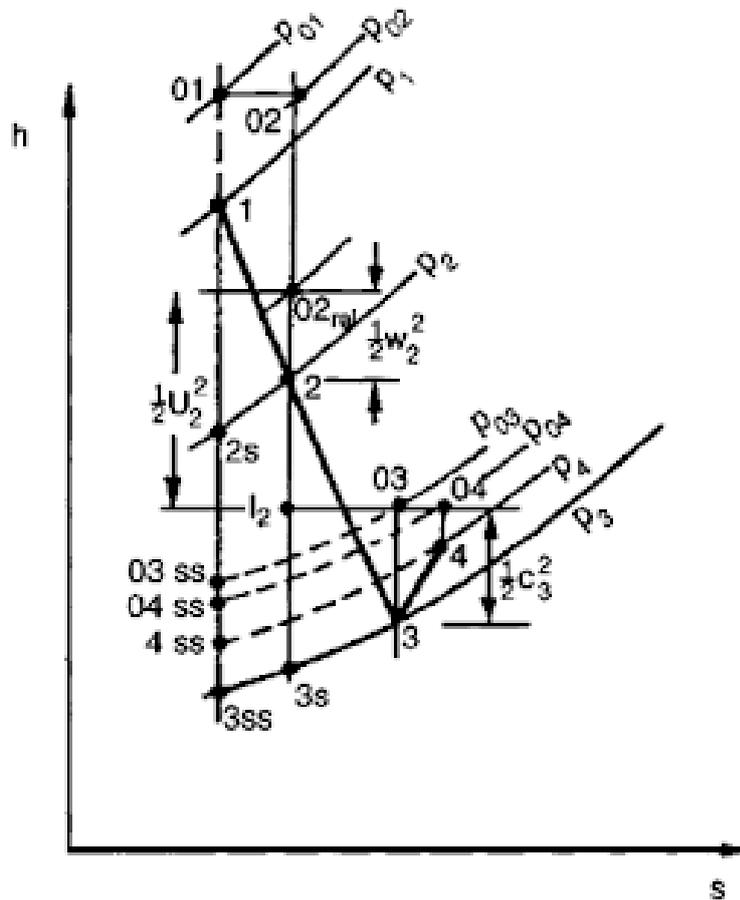


Figura 2.7: Diagrama h-s de una turbina radial

## 2.5 Volutas

En este apartado se van a explicar algunas de las características más importantes de las volutas. Se van a hablar sobre la importancia de un diseño adecuado de las volutas y se van a explicar que función cumplen dentro de una turbomáquina.

El estudio de las volutas es importante por tres motivos:

- Las volutas tienen una gran influencia en el rendimiento global de un compresor o bomba centrífuga.
- Las volutas pueden provocar una distorsión de la presión si se operan fuera de su rango de diseño, causando un flujo inestable a través del rotor, además de fuerzas radiales adicionales sobre el eje del compresor.
- También pueden afectar de manera significativa a los límites de estabilidad del compresor.

La función principal de una voluta de un compresor centrífugo es servir de transición desde el rotor y el difusor hacia el sistema de tuberías. Dependiendo de la configuración concreta, las pérdidas que se producen en volutas operando fuera de su rango de diseño, pueden ser significativamente elevadas, lo cual conduce a un bajo rendimiento y una reducción en el dominio de operación de la voluta.

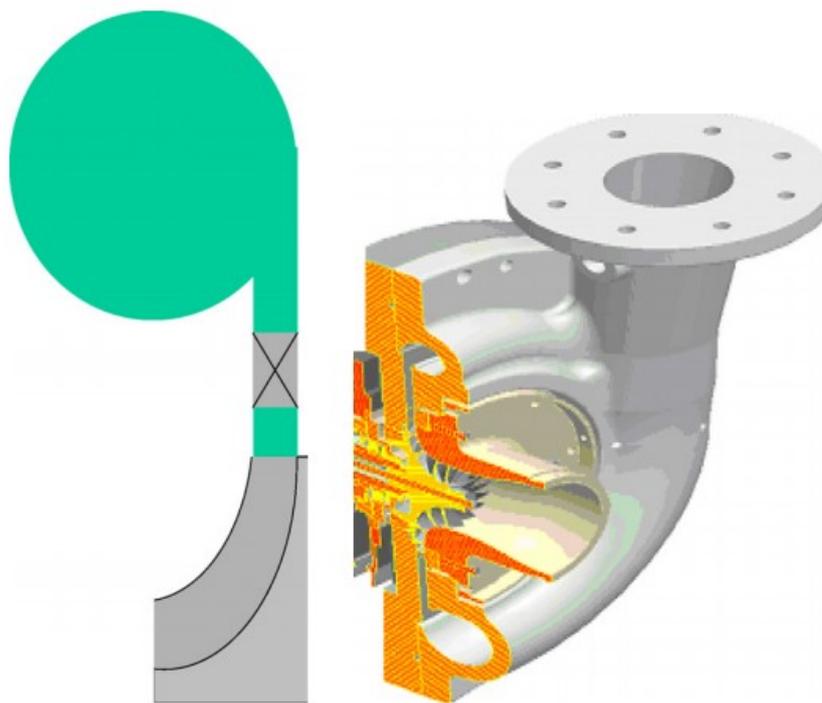
Es importante expresar que, una voluta de un compresor centrífugo que se encuentra operando fuera del rango de diseño, produce una distorsión periférica de presión. Esta distorsión de presión afecta a la salida del rotor cuando el difusor no tiene álabes, conduciendo a un estrangulamiento del flujo a través de este. Esto produce una aceleración y deceleración dentro de cada canal de rotor. Como consecuencia, se tiene una variación periódica del ángulo de flujo en la entrada, lo cual hace que el rotor sea menos eficiente y tenga menor rango operativo.

Las fuerzas alternantes que van actuando sobre las hojas del rotor, pueden causar que esta sufra un fallo, sobre todo si se tienen elevadas presiones en la entrada.

Una voluta de un compresor centrífugo tiene principalmente dos funciones: la colección y la difusión del fluido. La voluta debe recoger y transportar el fluido aguas abajo del sistema. Eso produce, además, un incremento de la presión estática, al convertir la energía cinética en energía potencial. Este hecho resulta beneficioso, puesto que aumenta la presión de descarga.

El fluido que abandona el rotor sigue una espiral logarítmica debido a la rotación de este. El intenso giro del fluido entrante en la voluta dificulta el diseño adecuado de la misma, ya que el flujo es estrictamente tridimensional. La difusión en la voluta es más efectiva para la energía cinética asociada con la velocidad tangencial. Esto se consigue mediante el incremento del área de la sección de la voluta, desde la entrada hasta la salida, creando así un difusor cónico.

Sin embargo, suele haber una pérdida de eficiencia debido a que la voluta no es capaz de convertir la energía cinética relacionada con la componente radial de la velocidad a la salida del difusor. Este efecto se ve aumentado si se utiliza un difusor con álabes, ya que los álabes producen un aumento del flujo radial en el difusor. Típicamente, se busca un término medio entre la eficiencia del difusor y la eficiencia de la voluta, llegando a la conclusión de que es necesario utilizar un difusor con álabes. A continuación, en la figura 2.8, se muestran las vistas de la voluta.



**Figura 2.8: Vista transversal e isométrica de una voluta**

Existen cinco parámetros geométricos cruciales en el diseño de volutas: la variación circunferencial de la sección transversal; la forma de la sección transversal; la posición radial de la sección transversal; la posición de la entrada de la voluta y la geometría de la “lengua” de la voluta.

La lengua de la voluta se encuentra en la posición de  $360^\circ$  de la voluta, correspondiendo a la unión de la sección con el área más grande, la sección con el área más pequeña y, el cono de salida. En este punto, el fluido de la voluta se encuentra con un plano divisor, la llamada “lengua” de la voluta, por encima de la cual el flujo abandona el compresor y por debajo de la cual vuelve a entrar en la voluta.

El borde de ataque de la “lengua” es análogo al de un perfil alar. Si es fino, no bloquea demasiado el flujo, pero es sensible al ángulo de ataque, mientras que, si es redondeado, bloquea más el flujo, siendo indiferente al ángulo de incidencia del flujo. Esa diferencia conduce a la búsqueda de un término medio durante el diseño: una “lengua” de voluta afilada produce un pico absoluto de la eficiencia, mientras que una “lengua” redondeada actúa mejor en los rangos de actuación fuera de diseño.

# Capítulo 3

## Diseño paramétrico de volutas

### 3.1 Introducción

Uno de los principales objetivos del trabajo realizado ha sido estudiar diferentes opciones para poder crear y representar volutas. Con el fin de alcanzar dicho objetivo se ha recurrido a dos programas informáticos: Mathematica de Wolfram y Spaceclaim de ANSYS.

Por una parte, el Mathematica ha servido como una herramienta de representación y visualización de volutas, mientras que el Spaceclaim se ha utilizado como un programa CAD, con el cual se han creado diferentes volutas con las que poder trabajar más adelante para realizar simulaciones en CFD.

### 3.2 Diseño con Mathematica

#### 3.2.1 Desarrollo teórico

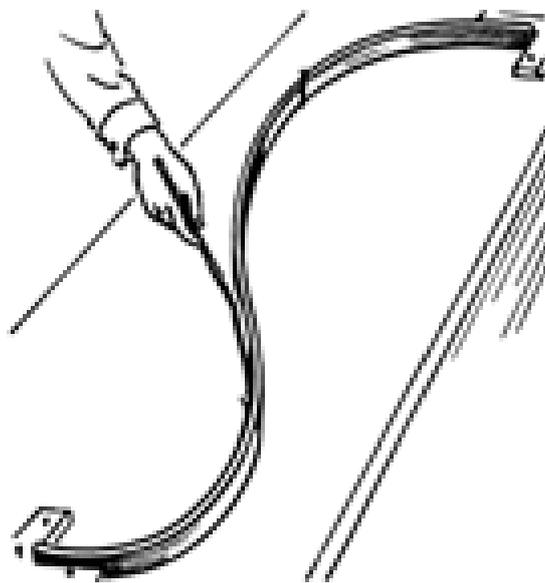
A continuación, se va a explicar cómo ha sido el diseño de la voluta en el Mathematica, partiendo desde la base hasta alcanzar el punto final. Se explicarán tanto los conceptos teóricos a los que ha sido necesario recurrir para crear el programa, como el propio código de este.

Así, hace falta empezar introduciendo unos conceptos matemáticos que han sido la base sobre la cual se ha asentado el diseño de las volutas en Mathematica: las curvas de Bezier y las NURBs.

Por una parte, las curvas de Bezier son las curvas más importantes utilizadas en la actualidad en el diseño computacional actualmente, junto a los B-Splines. Surgen en Francia, en los años 60 gracias al trabajo de Bézier y Casteljaou, cuyo objetivo era hacer frente a los nuevos retos que iban apareciendo en la industria automotriz.

Tanto Bézier como Casteljau, se dedicaban a intentar resolver los mismos problemas en las compañías automovilísticas en las que trabajaban (en Renault el primero y en Citroen el segundo). De la misma manera que sucedió con Leibnitz y Newton, llegaron a un mismo resultado de manera independiente. Trazaban las mismas curvas, aunque con herramientas matemáticas distintas.

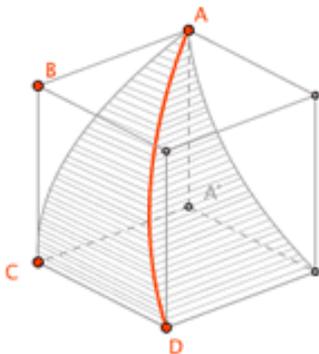
Su objetivo principal era crear curvas muy precisas, para conseguir un ensamblaje apropiado entre las diferentes partes del coche. El problema general surge ante la necesidad trazar curvas con mucha precisión, para lograr distintas piezas que puedan ensamblar correctamente. En la figura 3.1 se puede ver la confección manual de los splines.



**Figura 3.1: Método Flat Spline**

Para ello, los diseñadores de la época solían ocupar procedimientos de dibujo, por ejemplo, para trazar una aproximación de una curva que une dos puntos, usando las llamadas reglas francesas, o bien curvaban listones para generar lo que ahora se denomina «spline» (astilla, en inglés).

Pero de tal forma, no siempre se lograba la precisión necesaria; aunque ambos métodos ahora tienen su equivalente computacional, respectivamente, las Curvas de Bézier y las Splines, ambos elementos fundantes del diseño vectorial.



**Figura 3.2: Curva de Bézier en un cubo**

La primera versión de las curvas de Bézier fue en realidad tridimensional, un esquema basado en curvas cuadráticas construidas dentro de un cubo, método que le permitirá describir cualquier curva de grado 2 a partir de sólo cuatro puntos, como se puede observar en la figura 3.2.

El método parte por describir una curva usando ecuaciones paramétricas de la forma  $y = x^2$ . Luego, al transformar el cubo en un paralelepípedo cualquiera, la curva se transformará también. Así, los puntos de control son los vértices de un paralelepípedo imaginario. Con el tiempo este esquema se simplificará más, de manera que pueda describir curvas cuadráticas a partir de sólo tres puntos, y como veremos más adelante, curvas de grado  $n$  con sólo  $n+1$  puntos.

Unos años antes que Bézier, de Casteljaou trabaja en esencialmente la misma idea, pero desde una perspectiva numérica. El ahora conocido como algoritmo de de Casteljaou, es un método de aproximación numérica de los llamados polinomios de Bernstein, con los que se construye la ecuación de las curvas de Bézier:

$$B(t) = \sum_{i=0}^n \binom{n}{i} \cdot (1-t)^{n-i} \cdot t^i \cdot P_i$$

La porción en azul de la ecuación corresponde a un polinomio de Bernstein de grado « $n$ », y el resto corresponde a los puntos de control de la curva de Bézier.

Para el programa realizado en Mathematica, se han usado los B-Splines, que no son más que una generalización de las curvas de Bézier.

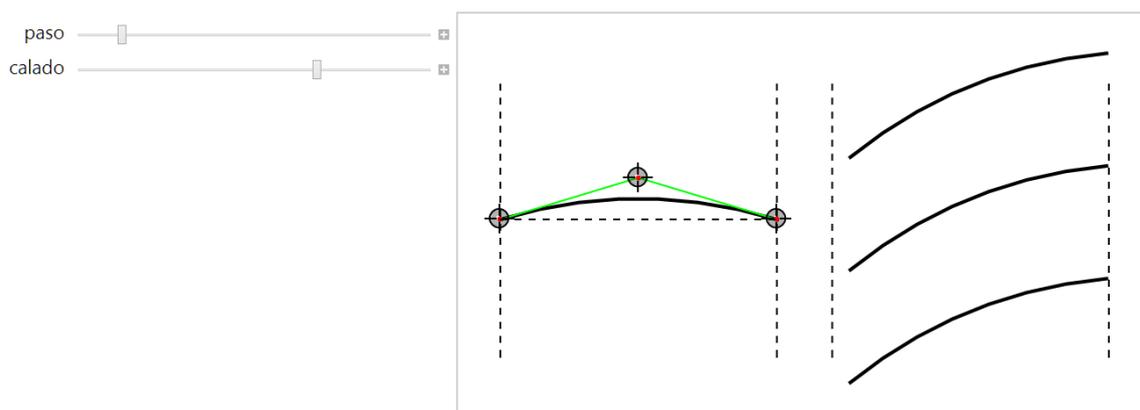
Por otra parte, están las NURBS. Las NURBS son B-splines racionales no uniformes. Son representaciones matemáticas de geometría en 3D capaces de describir cualquier forma con precisión, desde simples líneas, círculos, arcos, o curvas en 2D hasta los más complejos sólidos o superficies orgánicas de formas libres en 3D. Pueden representar con precisión objetos geométricos estándar tales como líneas, círculos, elipses, esferas y toroides, así como formas geométricas libres como carrocerías de coches y cuerpos humanos.

### 3.2.2 Desarrollo práctico

Una vez explicada la base teórica, se procede a describir el proceso que se ha seguido para poder representar una voluta con Mathematica.

Para ilustrar mejor los conceptos teóricos explicados anteriormente, se explicarán primero un par de ejemplos que muestran, de manera simple, los *B-Splines* utilizados en la práctica.

El primer ejemplo, en la figura 3.3 permite controlar la forma de una línea mediante tres puntos de control o *locators*, además de representar esa misma recta tres veces a su derecha, mediante la modificación de unos parámetros, el paso y el calado.



**Figura 3.3: B-Splines con parámetros variables en 1ª posición**

A continuación, en la figura 3.4 se pueden ver los resultados de cambiar los parámetros de control: la modificación de la forma de la recta al mover el punto de control y el cambio de posición al modificar los deslizadores de paso y calado.

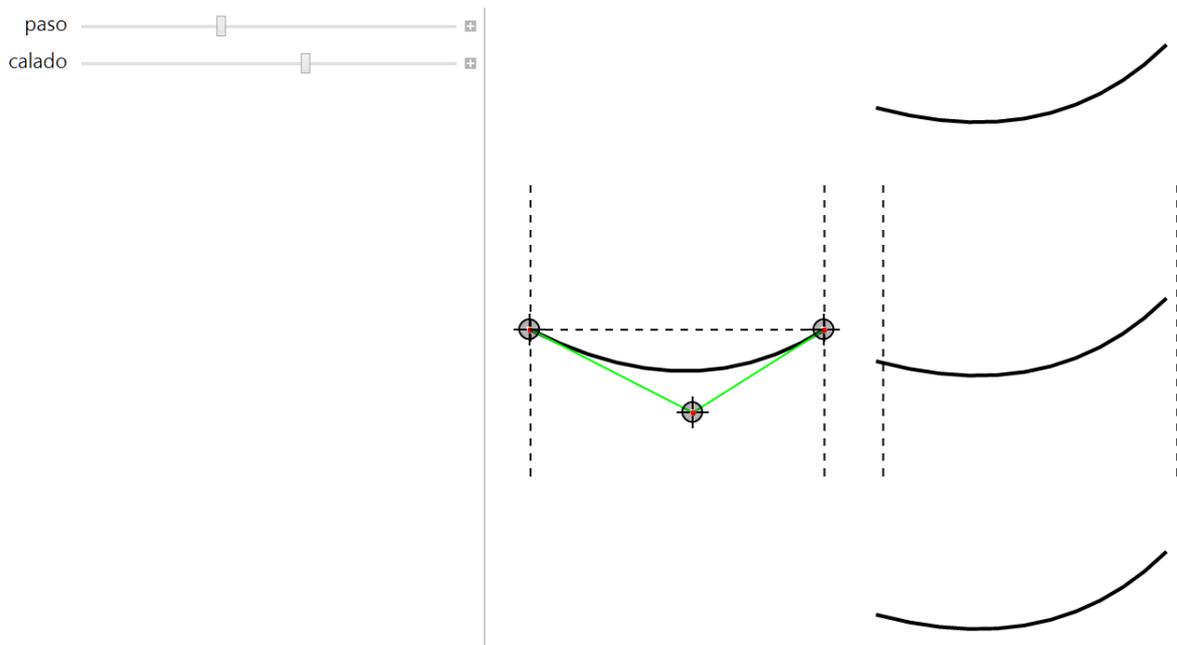


Figura 3.4: B-Splines con parámetros variables en 2ª posición

El código que se ha utilizado en este ejemplo se puede ver a continuación, en la figura 3.5, donde las funciones más importantes son *BSplineFunction* y *BSplineCurve*. Estas son las funciones que permiten representar y modificar la recta original. El resto de las funciones se encargan de representar las otras rectas, rotándolas y desplazándolas.

```

Manipulate[
  Manipula
  f = BSplineFunction[u];
  función b-spline
  Tabla = Table[f[t], {t, 0, 1, 1/Puntos}];
  tabla
  Tabla1 = u;
  Graphics[{{Thick, BSplineCurve[u]}, Green, Line[u], Red, Point[u]},
  gráfico grueso curva b-spline verde línea rojo punto
  {Dashed, Line[{{0, 0}, {1, 0}}], Line[{{0, -1}, {0, 1}}], Line[{{1, -1}, {1, 1}}],
  rayado línea línea línea línea
  Line[{{1.2, -1.0}, {1.2, 1.0}}], Line[{{2.2, -1.0}, {2.2, 1.0}}]},
  línea línea
  (*Rotate[Translate[BSplineCurve[u], {1.2, 2*paso}], calado*π/180], *) {Thick, Rotate[Translate[BSplineCurve[u], {1.2, paso}], calado*π/180],
  grueso rota traslada curva b-spline
  Rotate[Translate[BSplineCurve[u], {1.2, 0}], calado*π/180], Rotate[Translate[BSplineCurve[u], {1.2, -paso}], calado*π/180]} (*,
  rota traslada curva b-spline rota traslada curva b-spline
  Rotate[Translate[BSplineCurve[u], {1.2, -2*paso}], calado*π/180] *)
  ]],
  {{paso, 1}, {0.2, 2}}, {{calado, 0}, {-60, 60}}, {{Puntos, 100}, ControlType -> InputField}, (*{Guardar, False}, ControlType -> CheckBar}, *)
  tipo de control campo de entrada
  {{u, {{1, -.0}, {0.5, -.1}, {-0.025, -0.1}, {-0.025, .1}, {0.5, .1}, {1, 0.0}}}, Locator, LocatorAutoCreate -> True}, ControlPlacement -> Left]
  localizador autocreación de localizador verdad posicionamiento de cont izquierda

```

Figura 3.5: Código de Mathematica para los splines y los deslizados

Se puede observar otro ejemplo, en la figura 3.6, donde ahora los *B-Splines* representan una espiral, mostrando de una manera más obvia como actúan los puntos de control. También se observan líneas y puntos negros fijos.

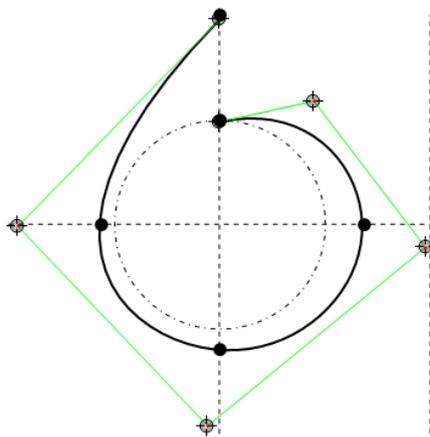


Figura 3.6: Espiral dibujada con splines

El código utilizado es similar, con las mismas funciones básicas de *BSplineFunction* y *BSplineCurve* de antes. Por otra parte, es necesario destacar otra función que una gran importancia en los dos ejemplos anteriores, que se puede ver en la figura 3.7 y, que será esencial para cualquier representación de este tipo: *Manipulate*. Esta función es dinámica, es decir, cualquier cambio que haga el usuario en los controles, ya sean puntos de control u otros parámetros, se introduce de manera inmediata en la visualización del resultado.

```
Manipulate[
|manipula
  f = BSplineFunction[u];
  |función b-spline
  Tabla = Table[f[t], {t, 0, 1, 1/Puntos}];
  |tabla
  Tabla1 = u;

  Graphics[{{Thick, BSplineCurve[u]}, Green, Line[u], Red, Point[u]},
|gráfico |grueso |curva b-spline |verde |línea |rojo |punto
  {DotDashed, Circle[{0, 0}, ra]},
  |punto-rayado |círculo

  {PointSize[0.03], Point[{0, ra}, {0, R}, {0, A}, {R90, 0}, {0, -R180}, {-R270, 0}]},
  |tamaño de punto |punto

  {Dashed, Line[{{-1, 0}, {1, 0}}], Line[{{0, -1}, {0, 1}}], Line[{{1, -1}, {1, 1}}]}]
  |rayado |línea |línea |línea
```

Figura 3.7: Código de Mathematica para la espiral

A continuación, en la figura 3.8, se puede observar un ejemplo de *B-Spline* que representa lo que sería una de las secciones de una voluta. Tiene las coordenadas  $z$  y  $r$  definidas, en dirección axial y radial respectivamente.

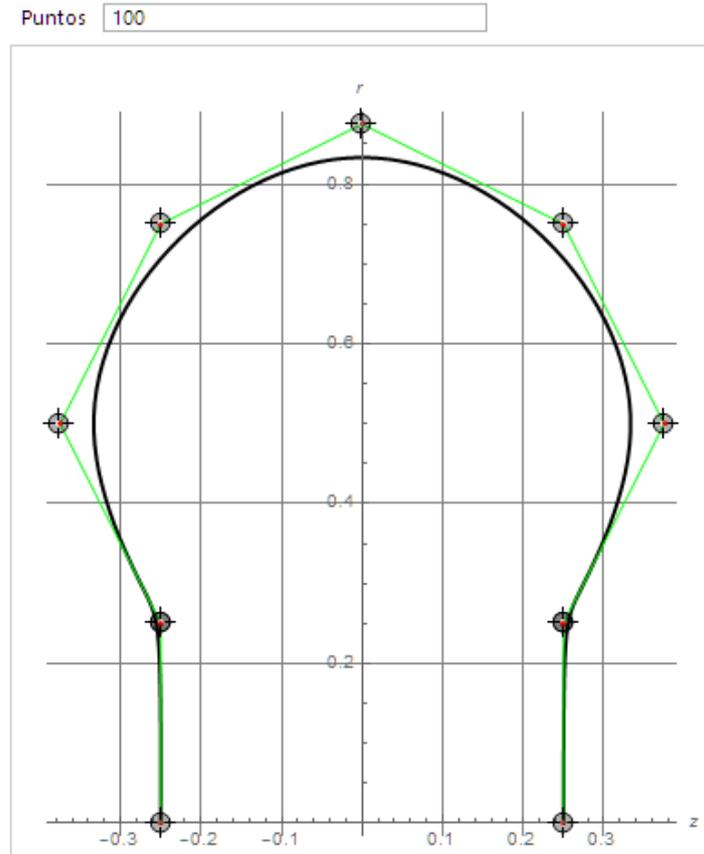


Figura 3.8: Sección de una voluta con splines

Este ejemplo es la base sobre la cual se construye el programa definitivo. El código básico que se ha utilizado se puede ver a continuación, en la figura 3.9.

```

Tabla=Table[f[t],{t,0,1,1/Puntos}];
Tabla1=u;
Graphics[{{Thick,BSplineCurve[u]},Green,Line[u],Red,Point[u]},Axes->True,AxesLabel->
{z,r},GridLines->Automatic,{{Puntos,100},ControlType->InputField},
{u,{{-0.25,0}/0.5,{-0.25,0.25}/0.5,{-0.5,0.5},{-0.75,1},{-0.5,1.5},{0,1.75},{0.5,1.5},
{0.75,1},{0.5,0.5},{0.25,0.25}/0.5,{0.25,0}/0.5}*0.5},ControlType->Locator},ControlPlacement->Top]

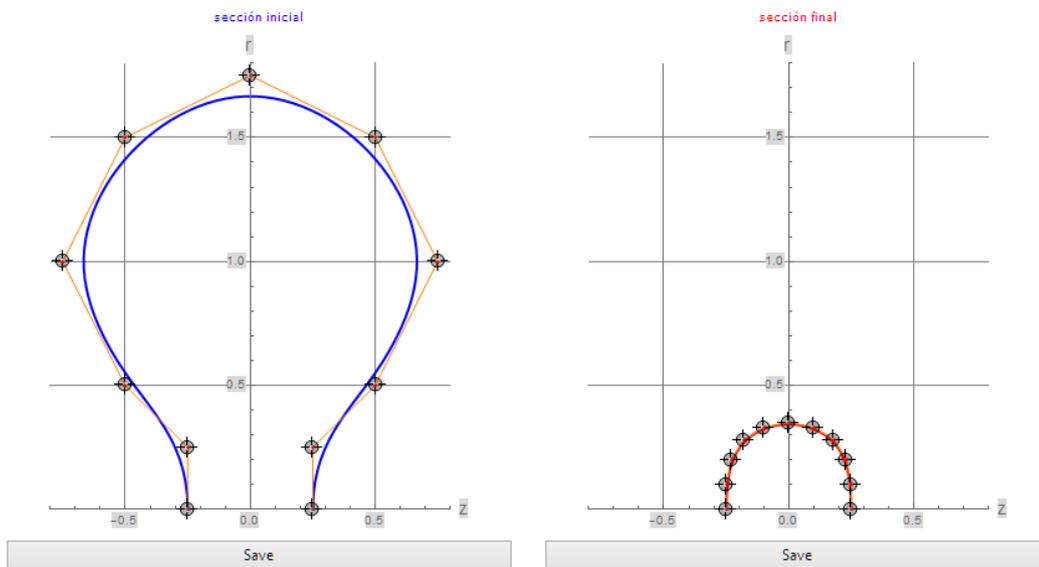
```

Figura 3.9: Código de Mathematica para la sección de voluta

Finalmente, se llega al programa completo con el cual es posible generar una voluta completa. Realmente, las volutas auténticas no cubren los 360 grados, pero

en este programa, por simplicidad, se ha decidido que sea así, pues solo servirá para una representación visual.

El proceso para generar la voluta consiste en partir de dos secciones predefinidas, la inicial y la final. Dichas secciones deben tener el mismo número de puntos de control, y cada punto de una posición de una forma una pareja con el de la misma posición de la otra. A continuación, se establece una interpolación entre las posiciones de cada pareja de puntos, obteniéndose varias secciones intermedias. Finalmente, se colocan todas las secciones adecuadamente para formar la voluta.



**Figura 3.10:** Secciones de voluta grande y pequeña con botón de Guardar

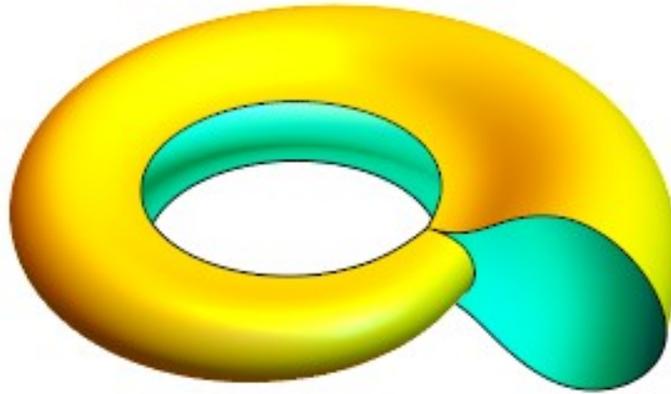
En la figura 3.10, se puede ver la sección inicial, en azul y la final, en rojo. Cada una de las secciones tiene once puntos de control y por tanto se realizan once interpolaciones lineales en total. Se añadió una opción de *Save*, que permite saber las coordenadas exactas de cada punto de control.

Al programa se le han añadido algunas opciones de control que puede ver en la imagen 3.11. Estos controles permiten cambiar el radio interior de la voluta, así como la opacidad de esta. El programa también permite exportar la figura creada en formato *stl* mediante el botón *Export*.



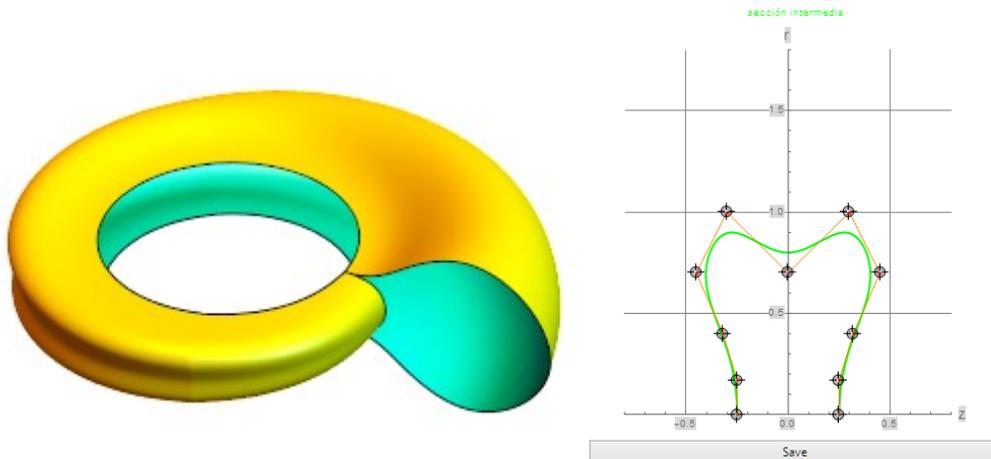
**Figura 3.11:** Opciones adicionales para el diseño de la voluta

El resultado final se puede observar en la figura 3.12.



**Figura 3.12: Resultado final**

Una última opción que tiene el programa es la posibilidad de añadir una sección intermedia. El programa funciona de la misma manera que antes, solo que, si esta opción está activa, hará dos interpolaciones lineales, una desde la inicial hasta la intermedia, y otra desde la intermedia hasta la final. Además, es posible definir dónde estará la sección intermedia mediante el deslizador de ángulo de la sección intermedia.



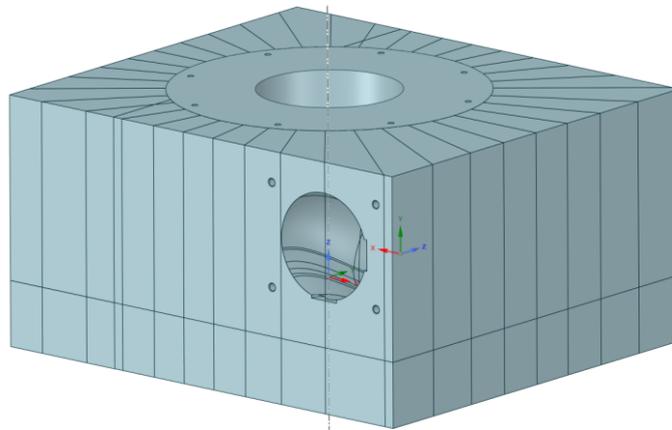
**Figura 3.13: Voluta terminada con una sección adicional**

En la figura 3.13 se puede observar la influencia que tiene la sección intermedia en la voluta final.

### 3.3 Diseño con Spaceclaim

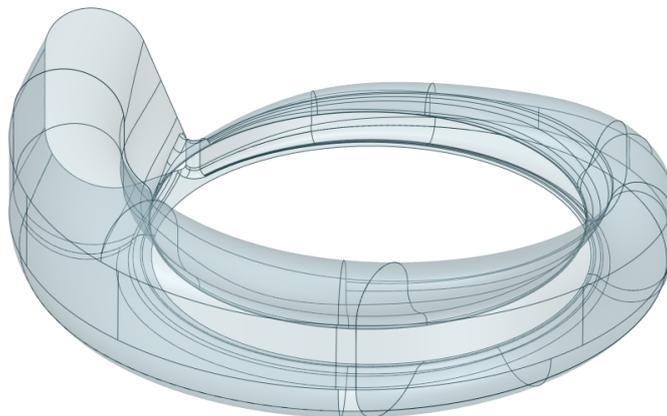
Una vez se ha creado una herramienta para la visualización de volutas con Mathematica, se procede a diseñar volutas con un programa CAD, en concreto Spaceclaim de ANSYS, para que puedan ser utilizadas posteriormente en los ensayos de flujo CFD.

Con el objetivo de aportar validez al trabajo realizado, la voluta base que se utiliza es una réplica digital de una voluta física. Dicha voluta sirve de base para todo el trabajo que se realiza más adelante. En la figura 3.14, se puede ver el cajón de la voluta. Dicho cajón, además de contener la voluta, alberga, la TGV con los álabes y las tapas inferior y superior de esta.



**Figura 3.14: Molde de la voluta original**

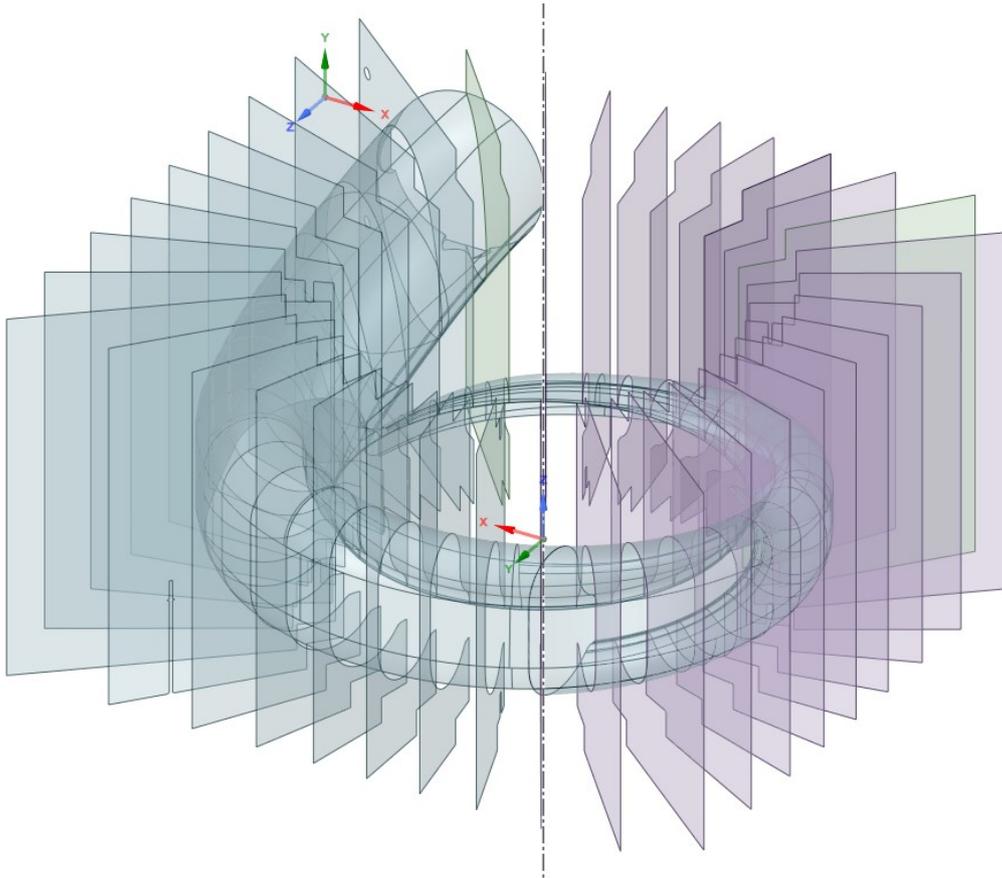
Si se eliminan todos los elementos restantes, dejando únicamente la voluta en sí, se obtiene la figura 3.15 (se ha cortado el conducto de la entrada).



**Figura 3.15: Voluta extraída del molde**

Una vez se tiene la voluta aislada de otros elementos, el objetivo pasa a generar dos volutas nuevas, una más grande y otra más pequeña, a partir de la original. Así, cuando se tengan las tres volutas, se podrán ensayar en CFD obteniéndose tendencias en el comportamiento del flujo.

Con el objetivo de generar las nuevas volutas, primero se tienen que obtener las secciones de la voluta original. Para ello se crean planos que cortan la voluta original, como se puede ver en la figura 3.16.



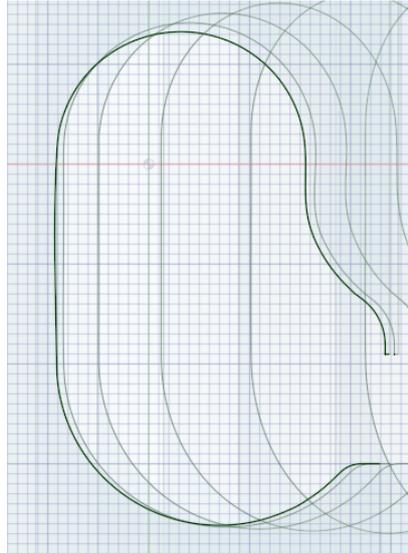
**Figura 3.16: Voluta cortada por planos**

Los cortes se realizan cada diez grados, generándose así 36 secciones en total que servirán de base para las otras volutas. En ocasiones, el plano corta la voluta dos veces, es decir, la propia voluta, así como su canal de entrada. Cuando esto se produzca, el corte del plano y el canal se ignora, pues posteriormente se creará un nuevo canal de entrada, adaptado para cada voluta.

Es necesario mencionar que no se va a utilizar la revolución completa de la voluta, puesto que será necesario ajustar de manera manual las uniones entre la voluta y

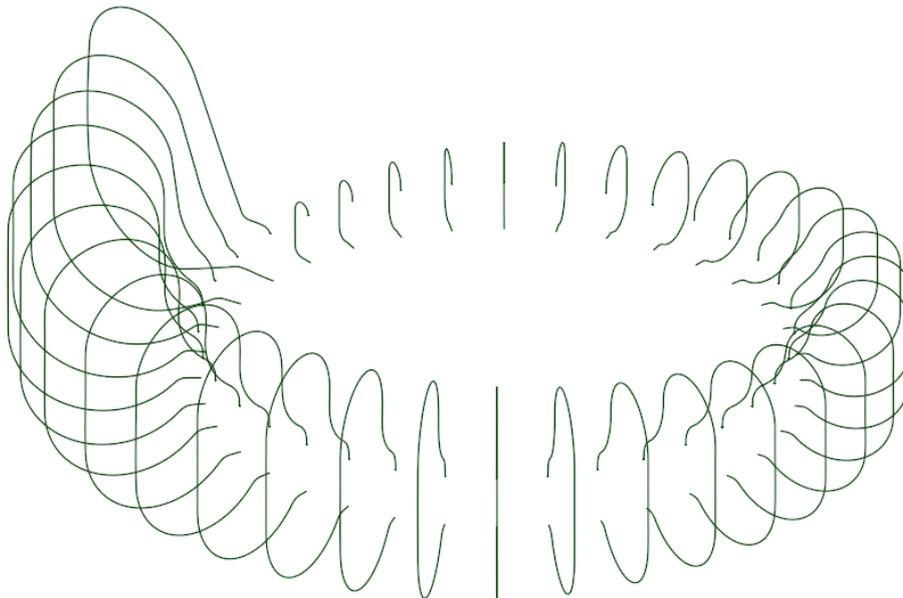
el canal. Por ese motivo, la revolución de la voluta regular, en el sentido de que sigue una circunferencia, llega hasta los 340 grados.

Una vez se ha realizado la intersección entre un plano y la voluta, se traza manualmente la sección que se obtiene mediante el uso de la herramienta de dibujo *Spline* presente en el propio programa ANSYS Spaceclaim. El resultado de uno de estos procedimientos se puede ver en la siguiente imagen.



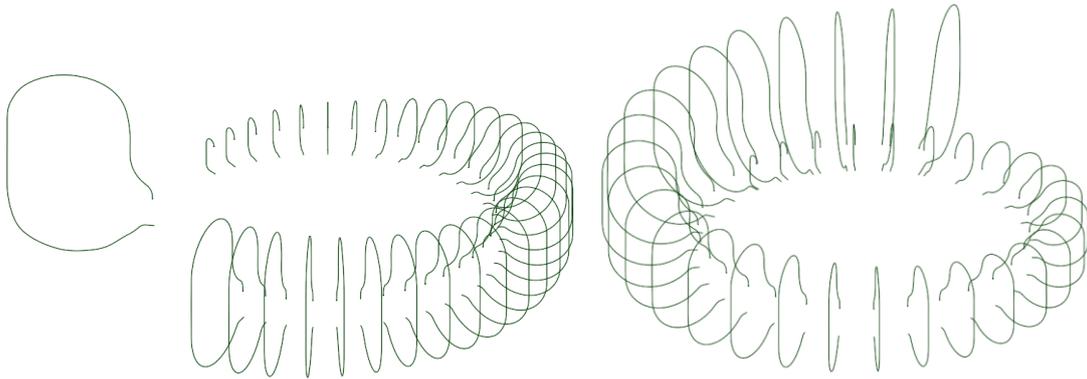
**Figura 3.17:** Trazado de las secciones obtenida después del corte

Por tanto, tras repetirse el mismo proceso para cada una de las intersecciones, se obtiene un resultado global que se observa a continuación, en la figura 3.18.



**Figura 3.18:** Resultado del trazado de las secciones

Por otra parte, se desplazan las secciones en sentido horario o antihorario, dependiendo de si se quiere hacer una voluta más grande o pequeña. En el caso de la voluta pequeña, las secciones se mueven en sentido horario, mirando desde arriba, haciendo así que haya más espacio entre cada sección. En la voluta grande sucede lo contrario, ya que las secciones se mueven en sentido antihorario, quedando menos espacio entre cada una de ellas. A continuación, en la figura 3.19, se puede observar cómo quedan las dos volutas.



**Figura 3.19: Secciones desplazadas para la voluta grande y pequeña**

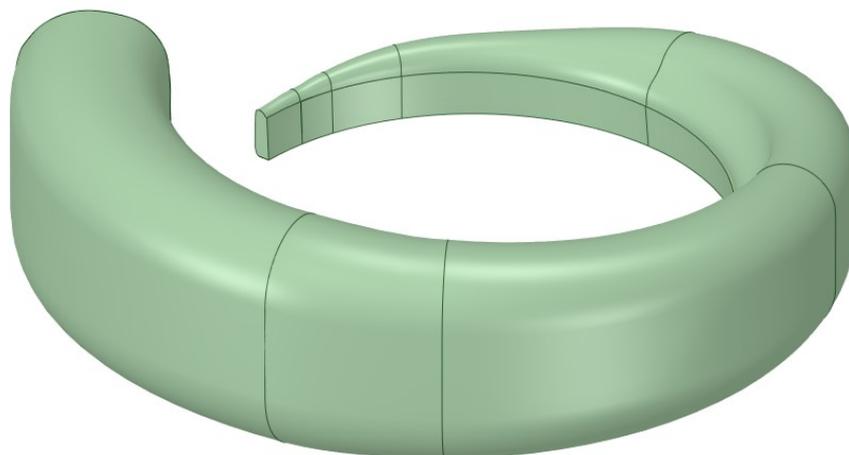
Al cambiar de posición de la primera sección original, las secciones de las nuevas volutas que ahora ocupan su lugar se han de adaptar para que se parezcan a ella. Eso se tiene que hacer puesto que el objetivo es modificar el volumen de las volutas, manteniendo su forma lo más similar posible a la original.

En la figura 3.20, se pueden ver las secciones de la voluta pequeña y grande, respectivamente. Se han dejado las secciones que no se van a utilizar para ilustrar mejor el desplazamiento que se ha producido.



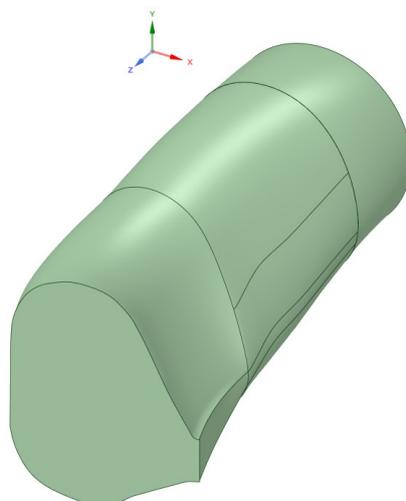
**Figura 3.20: Vista de planta de las volutas**

Una vez se tienen las secciones de cada voluta definidas, se procede a unir las con el comando *Blend* de Spaceclaim, cerrando previamente cada sección con una línea recta. Las secciones se tienen que cerrar para el resultado de usar la función mencionada anteriormente produzca un sólido. En la imagen siguiente se puede ver la porción regular de voluta grande.



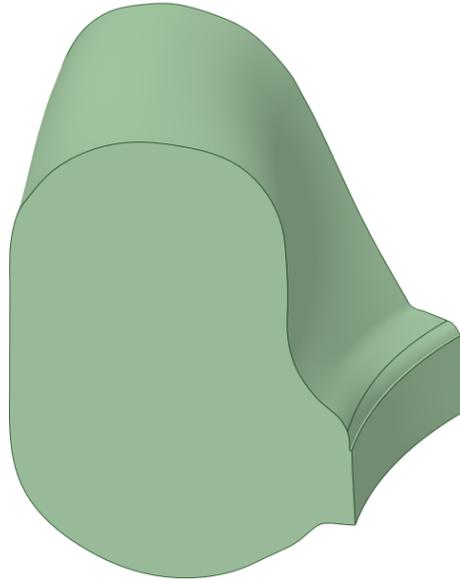
**Figura 3.21: Porción regular de la voluta grande.**

Además, se ha de diseñar un nuevo tramo de entrada para cada voluta, ya que cambia el tamaño de las secciones regulares. El conducto de entrada tiene que adaptarse al tamaño de estas secciones para que no haya zonas con cambios de curvatura muy bruscos. En la siguiente ilustración se muestra el conducto de entrada de la voluta grande.



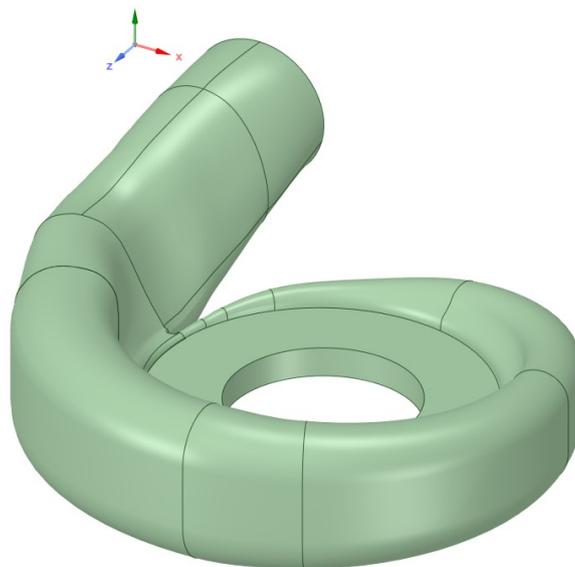
**Figura 3.22: Conducto de entrada de la voluta grande.**

Por último, se tiene crear un sólido que sirva de unión para entre la sección regular y el conducto de la entrada de la voluta. Dicho sólido tiene que adaptarse tanto a la primera sección regular de la voluta, por un lado, como al final del conducto de la entrada y la sección final de la voluta por otro. Abajo, se muestra el sólido que sirve de unión en la voluta grande.

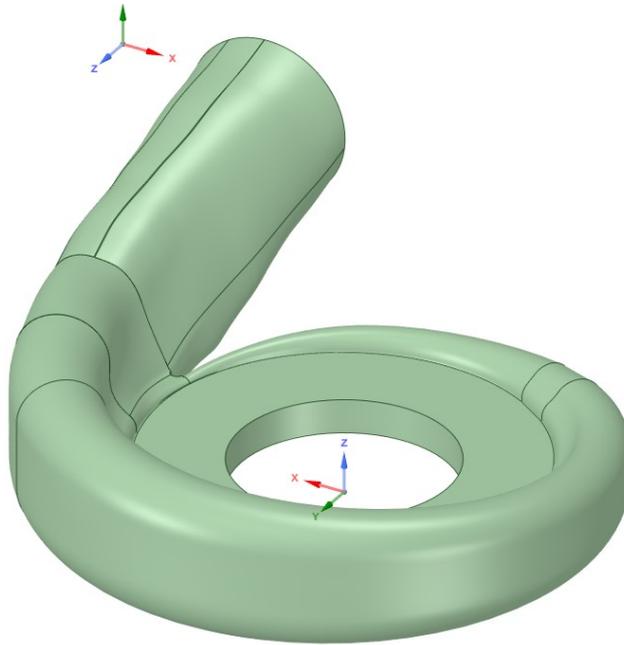


**Figura 3.23:** Porción de unión de la voluta grande

Finalmente, se realiza la unión de los tres sólidos que se han creado, en una única voluta, tanto grande como pequeña, cuyo resultado se puede ver a continuación.



**Figura 3.24:** Voluta grande



**Figura 3.25: Voluta pequeña**

### **3.4 Resumen**

Para resumir, se ha utilizado el programa de diseño CAD de ANSYS Spaceclaim con el objetivo de obtener dos geometrías de volutas nuevas. Dichas geometrías se basaron en una voluta ya existente y, el cambio que se les ha aplicado consiste en aumentar o disminuir su tamaño un 20%. Así, teniendo tres geometrías de volutas diferentes se pasa a la siguiente etapa que consiste ensayarlos en un programa de cálculo de CFD.

# Capítulo 4

## Análisis del flujo con CFD

### 4.1 Introducción

Una vez se han creado los modelos de cada una de las volutas en el programa de diseño ANSYS Spaceclaim y, habiendo explicado todo el proceso que se ha llevado a cabo para poder conseguirlo, se procede a realizar simulaciones con esas geometrías con corrientes de flujo con un programa de CFD, con el objetivo de poder visualizar y cuantificar las diferencias de comportamiento de flujo según la voluta que se esté ensayando.

En este trabajo, el software a utilizar va a ser STAR CCM+. En este capítulo se va a enseñar como se configuraron los casos, se mostrarán y comentarán los resultados obtenidos y, finalmente, se sacarán conclusiones a partir de los resultados.

### 4.2 Mallado

El primer paso para poder realizar una simulación del flujo fue obtener una malla adecuada. Dicha malla tendría que ser lo suficientemente refinada como para ser capaz de representar correctamente el comportamiento del fluido dentro de la voluta y, a la vez, no ser demasiado pesada, puesto que el presente estudio de flujo se centra en estudiar las tendencias del flujo en un mismo tipo de geometría de voluta, variando el tamaño de esta.

El mallado se basa en discretizar el espacio que ocupa un volumen en el que se pretende estudiar el flujo y, con esa discretización, calcular diferentes variables por aproximación numérica sobre él. La operación del mallado se tiene que realizar a cualquier elemento que se quiera estudiar en CFD y así se ha hecho para las tres volutas que se tenían. A continuación, se pueden ver el resultado del mallado de las tres volutas:

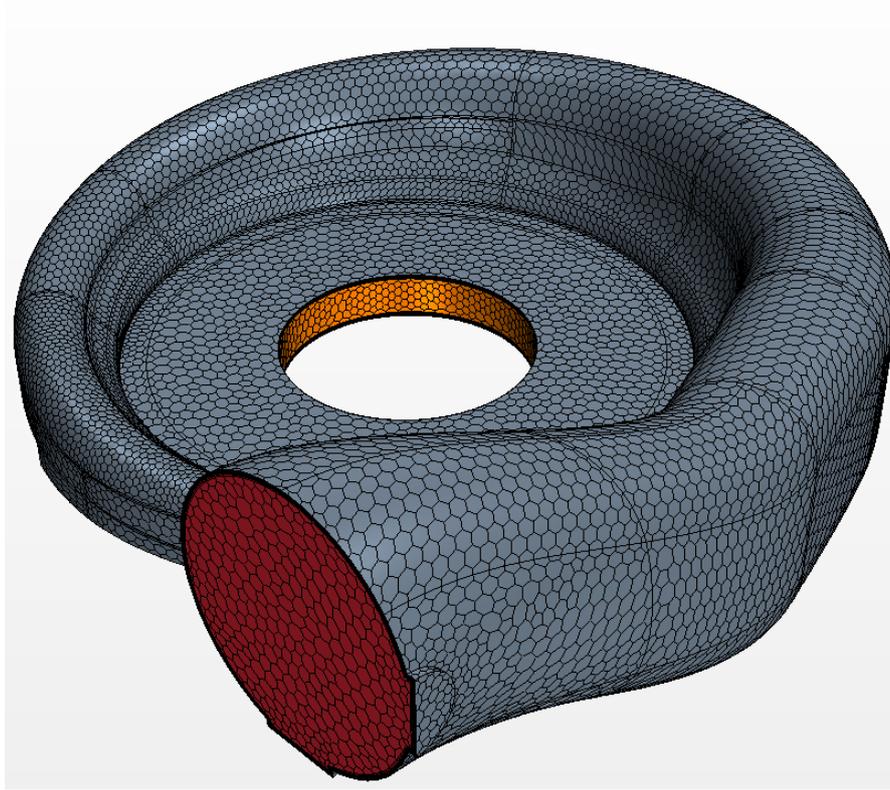


Figura 4.1: Mallado de la voluta original

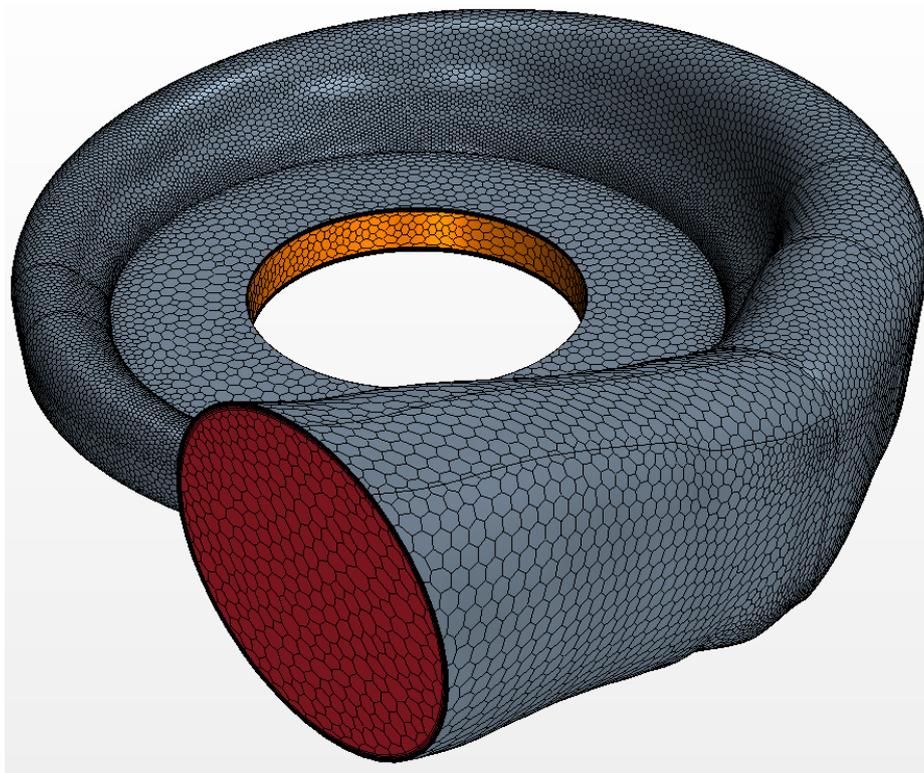
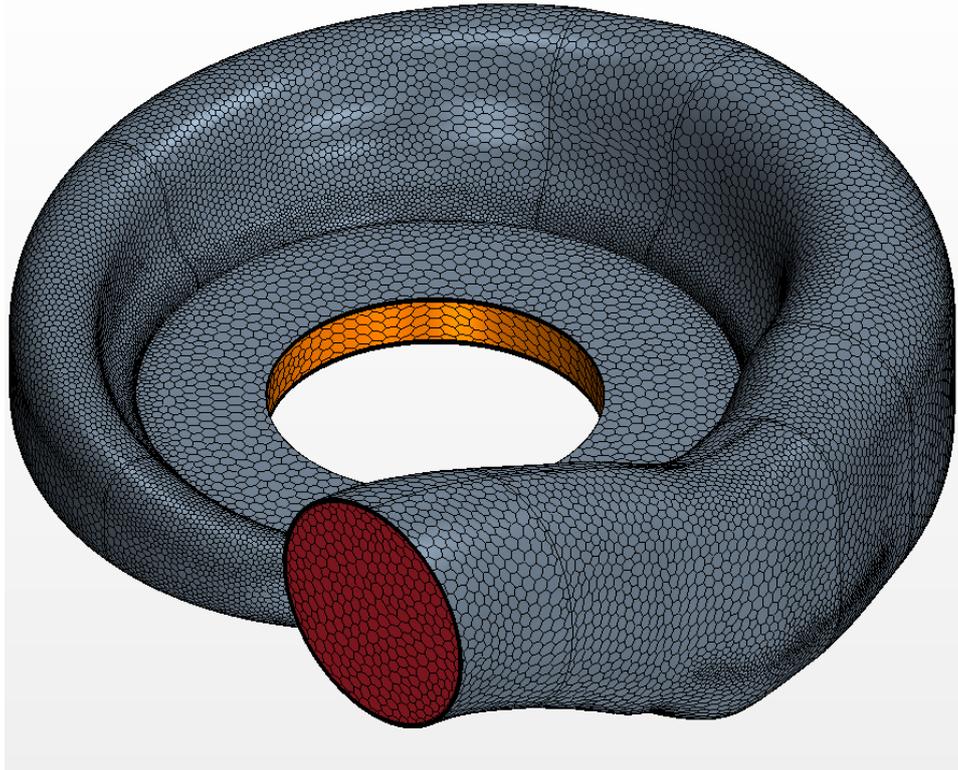


Figura 4.2: Mallado de la voluta pequeña



**Figura 4.3:** Mallado de la voluta grande

Así, teniendo cada una de las volutas, se procedió con la simulación. Cabe admitir que la configuración planteada, es decir, un caso que solo incluye la voluta sin conductos que simule las condiciones a las que el flujo se enfrenta antes y después de la voluta, no es realista. No obstante, es lo suficientemente buena como para mostrar a que comportamiento tendería el flujo en una situación real.

### **4.3 Condiciones de contorno**

Una vez se ha realizado el mallado, se procede a establecer las condiciones de contorno del caso. Las condiciones de contorno son iguales para las tres volutas. En primer lugar, se definieron las condiciones de contorno a la entrada de la voluta y se utilizó la condición de “Velocity Inlet”, para la cual se introdujeron los datos de velocidad, dejando el resto de los valores por defecto. Para cada voluta, se estudiaron cinco velocidades diferentes, que no son más que varias condiciones iniciales, lo cual permitió ver de una manera muy amplia la variación del comportamiento del flujo.

En cuanto a la salida, se sitúa la condición de contorno muy cerca de la propia voluta, lo cual hace que, debido a la recirculación, la solución no pueda converger adecuadamente como veremos posteriormente. No obstante, la condición de contorno en la salida está configurada como “Pressure Outlet”, para la cual se define la presión estática de cero pascales.

## 4.4 Modelos físicos

Tras establecer las condiciones de contorno, se eligen los modelos físicos adecuados para representar de una manera correcta el comportamiento del flujo. Se escogen los siguientes modelos:

- Gas ideal
- Tridimensional
- Estacionario
- Turbulento
- Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS).
- “Coupled Flow”
- “Coupled Energy”
- SST (Menter) K-Omega
- K-Omega Turbulence

### 4.4.1 Modelos de turbulencia

El modelo de turbulencia elegido es de tipo Reynolds-Averaged Navier-Stokes. Los modelos RANS se basan en la promediación de las ecuaciones del fluido, las ecuaciones de Navier-Stokes, para lo cual todas las magnitudes se sustituyen por la suma de su valor medio y una componente fluctuacional (7). Después de reescribir las ecuaciones de Navier-Stokes utilizando las variables promedio, se consigue un nuevo sistema de ecuaciones (RANS) similar al original pero que introduce un término adicional que necesita otras ecuaciones para poder cerrar el sistema. El grado de dificultad del cierre del sistema consiste en la elección de las ecuaciones realizada para representar el tensor  $\tau_{ij}$  en el que se engloban las tensiones turbulentas.

Para modelar el tensor  $\tau_{ij}$  existen varios modelos y el que se ha usado en este trabajo es el modelo K-Omega. El modelo de turbulencia k-omega (k- $\omega$ ) es un modelo de dos ecuaciones, que se utiliza como un cierre para las ecuaciones RANS. El modelo intenta predecir la turbulencia mediante dos ecuaciones diferenciales parciales para dos variables, k y  $\omega$ , siendo la primera variable la energía cinética de la turbulencia mientras que la segunda es la tasa específica de disipación de la energía cinética de la turbulencia k en energía térmica interna, que se pueden ver a continuación

$$\begin{aligned}\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j k)}{\partial x_j} &= \rho P - \beta^* \rho \omega k + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \sigma_k \frac{\rho k}{\omega} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right], \quad \text{with } P = \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j}, \\ \frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j \omega)}{\partial x_j} &= \frac{\gamma \omega}{k} P - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \sigma_\omega \frac{\rho k}{\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + \frac{\rho \sigma_d}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}.\end{aligned}$$

## 4.5 Resultados

En este apartado se van a mostrar y explicar los resultados que se han obtenido tras ensayar las tres volutas en el programa de CFD Star CCM+. Concretamente, para cada de las volutas se han realizado cinco ensayos con diferentes valores de la velocidad: 20, 40, 60, 80 y 100 metros por segundo. El objetivo de este ensayo era ver cómo afecta la velocidad al comportamiento del flujo dentro de la voluta.

Para explicar el comportamiento de flujo dentro de la voluta, se van a analizar los resultados de algunas magnitudes importantes. En primer lugar, la distribución de presiones, así como de velocidades, tanto en magnitud, como en sus componentes radial y tangencial. Finalmente, el parámetro más importante que se va a estudiar es el ángulo beta, que expresa una relación entre los componentes radial y tangencial de la velocidad.

El ángulo beta muestra la variación de la cantidad de movimiento dentro de la voluta y cuanto más uniforme sea, más eficiente será la voluta. Se va a estudiar el ángulo beta en dos sitios distintos: en la sección de salida, donde se hará un promedio de este sobre toda la sección y, sobre un corte horizontal de la voluta, para observar como de uniforme es la distribución. La fórmula que se empleará para calcular el ángulo beta es la siguiente:

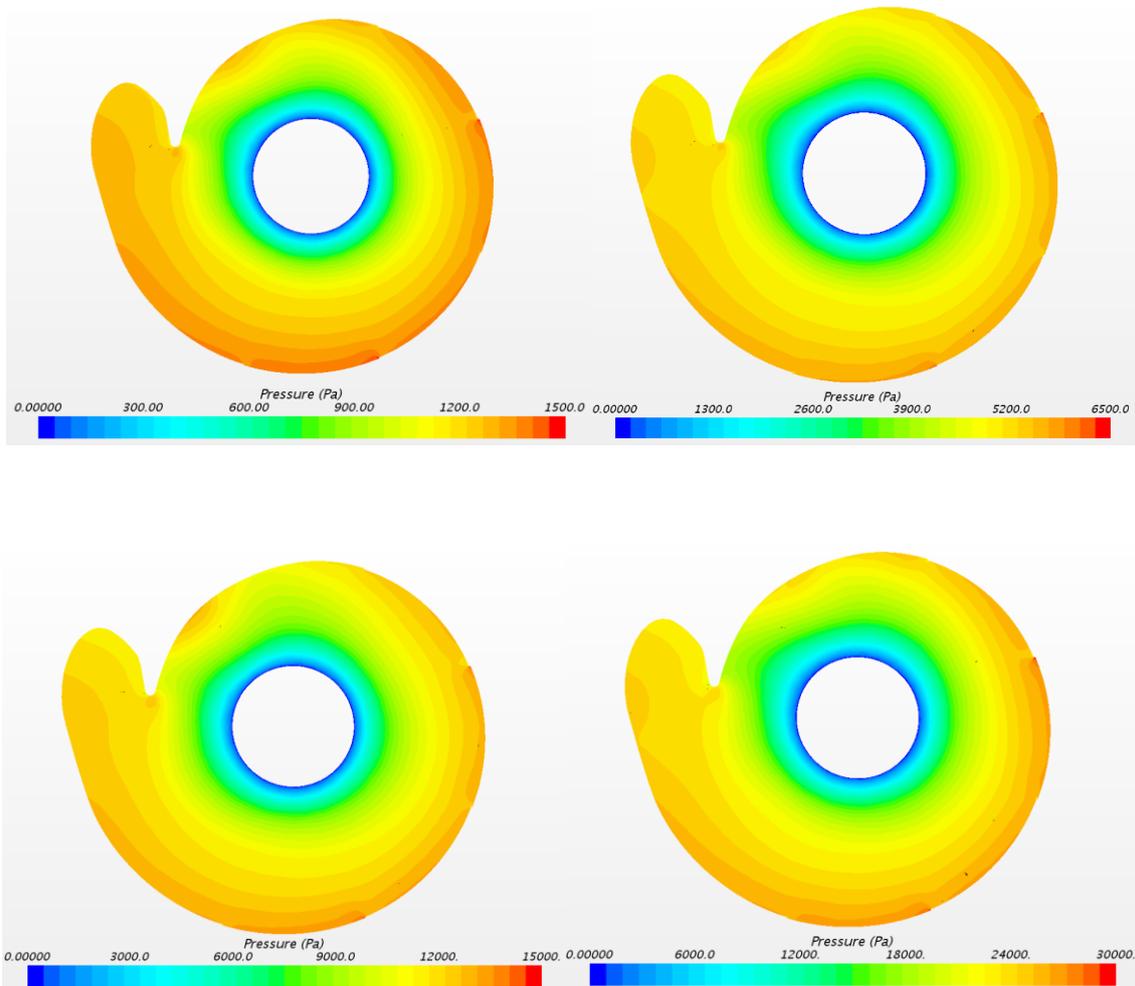
$$\beta = \tan^{-1} \left( \frac{V_{tangencial}}{V_{radial}} \right)$$

Finalmente, se harán tres ensayos más, uno para cada voluta, con un modelo no viscoso, comparando posteriormente los resultados con las ecuaciones teóricas que predicen el ángulo beta a la salida en función de los parámetros dimensionales de la voluta.

Cabe mencionar, que todos los resultados obtenidos se mostrarán según un sistema de coordenadas cilíndrico, cuyo centro se encuentra en el centro de la voluta y que las figuras aparecen en orden ascendente de velocidades: 20, 40, 60, 80 y 100.

### **Voluta original**

Se comienza con la voluta original, estudiando la distribución de presiones en el corte de sección de la voluta. Como puede verse en la figura 4.1, la distribución de presiones es prácticamente idéntica en los cinco casos y uniforme.



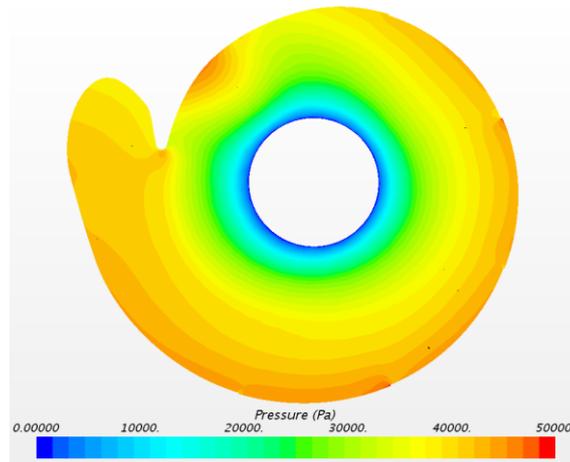
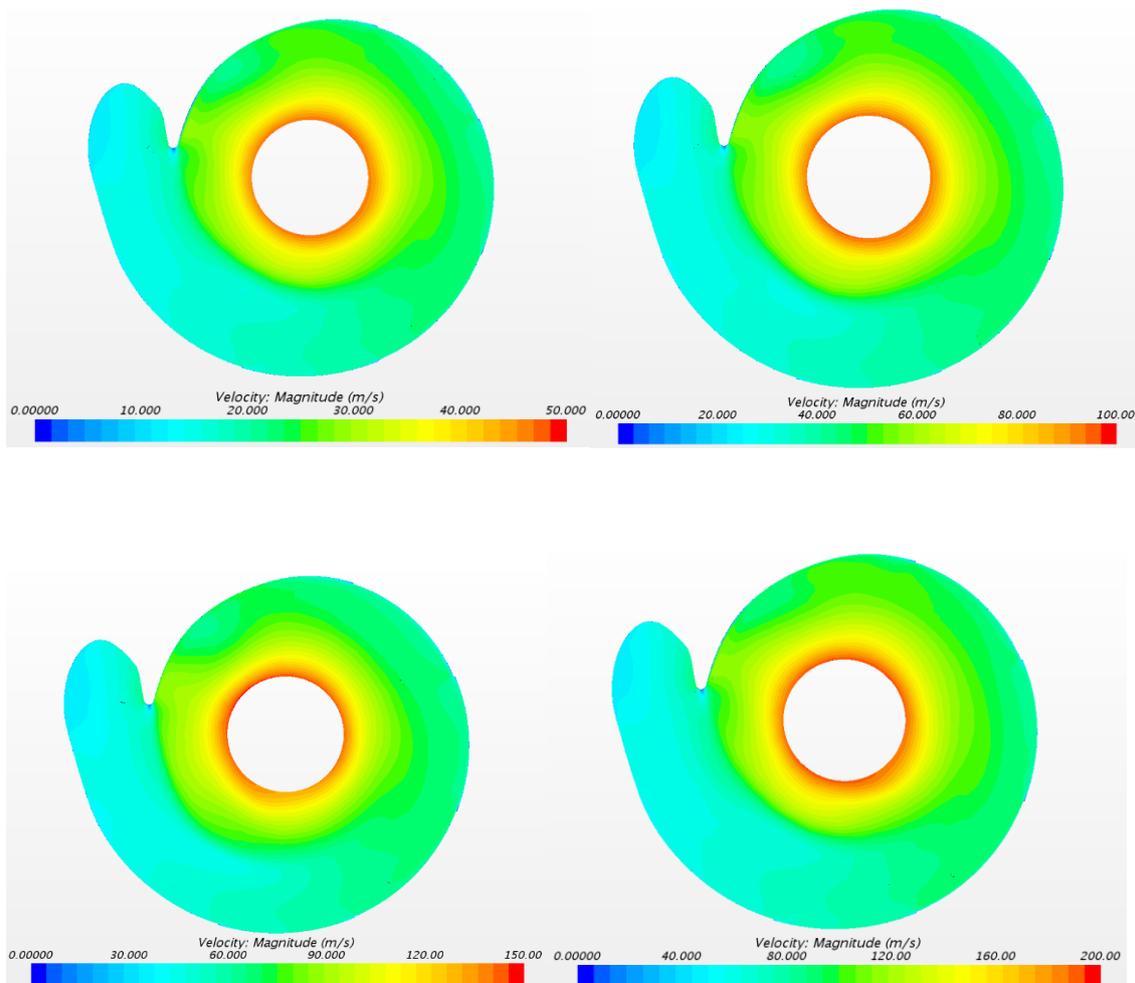
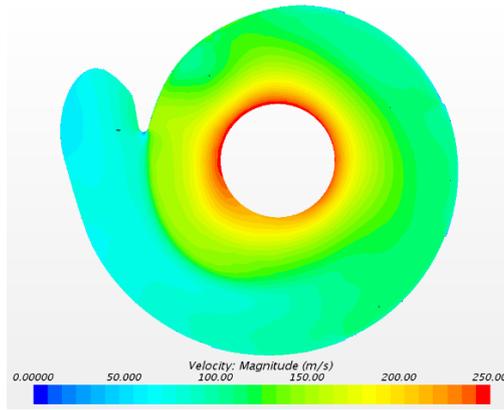


Figura 4.4: Distribución de presiones en la voluta original

A continuación, se procede a mostrar la distribución de la velocidad, en módulo, en la voluta original, lo que se puede ver en la figura 4.2.

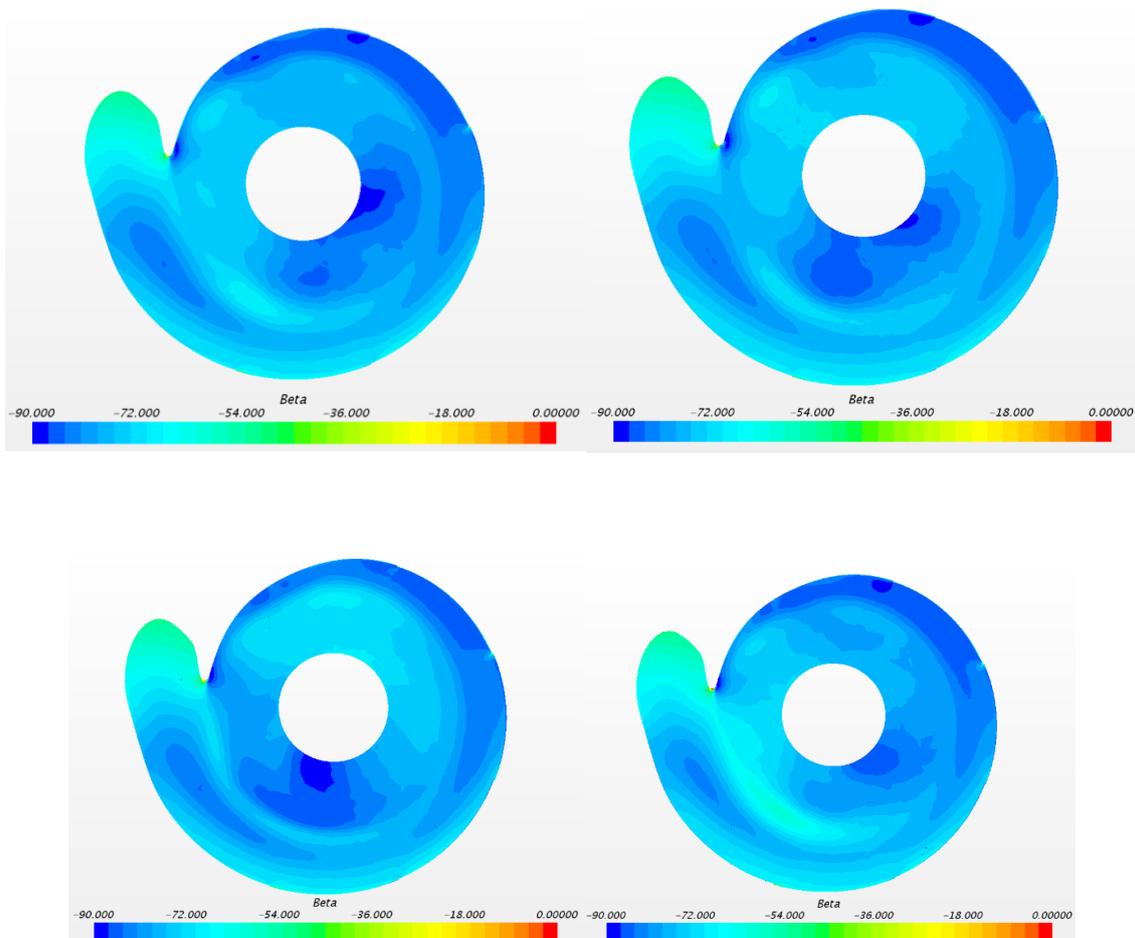


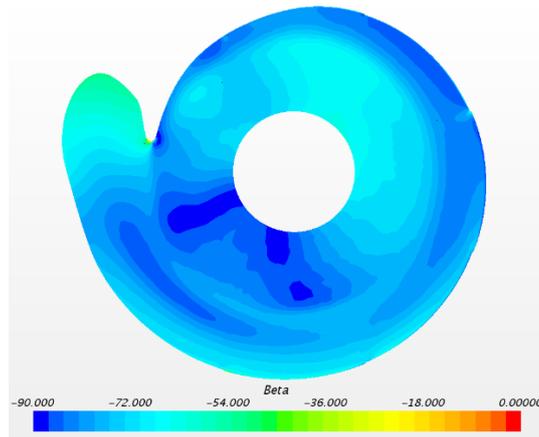


**Figura 4.5: Distribución de velocidades en la voluta original**

Se puede apreciar que la distribución de velocidades, al igual que la de las presiones, es uniforme y concéntrica.

Por último, se muestra la distribución del ángulo beta en la sección del corte en la voluta original. En la figura 4.3, se puede ver que la distribución de beta es uniforme y similar en todos los casos.

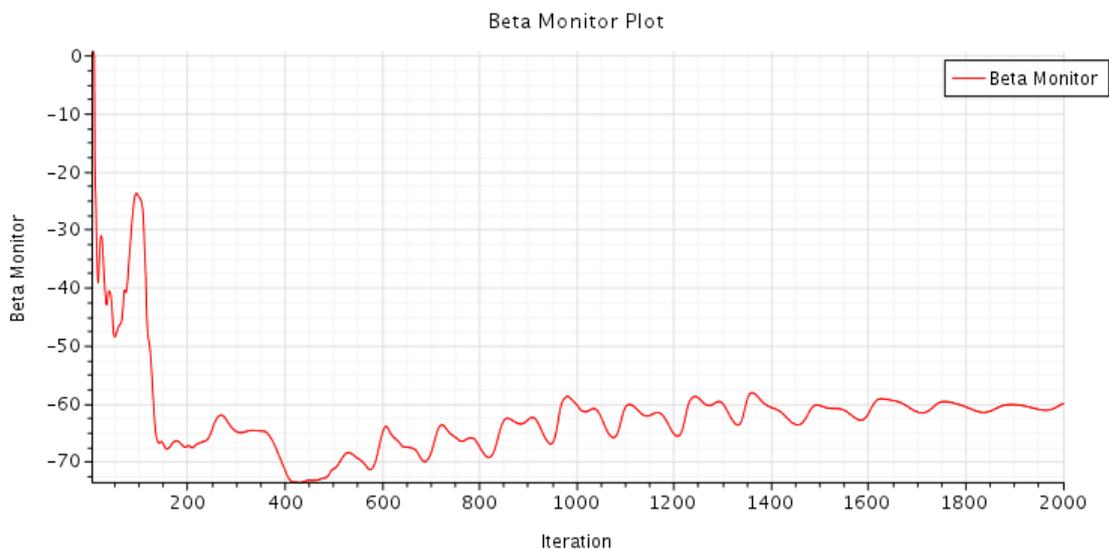




**Figura 4.6: Distribución del ángulo beta en la voluta original**

El valor de beta es parecido a lo largo de la sección de corte, alcanzándose valores dispares en zonas donde hay vorticidad, más concretamente en la zona de lo lengua de la voluta.

Por otra parte, en cuento a la salida de la voluta, interesa analizar el ángulo beta. Se cogirá el valor medio de la superficie como valor representativo. El ángulo beta tiende al mismo valor en todos los casos, por tanto, se realiza una simulación larga de un solo caso, pues todos los ensayos tienden a un valor similar, para obtener un valor preciso.



**Figura 4.7: Evolución del ángulo beta en la voluta original**

En la figura 4.4, se muestra el ángulo beta y su tendencia a un valor con el incremento del número de iteraciones en la simulación. En este caso el valor de beta se aproxima a  $-59,9^\circ$ .

## Voluta pequeña

A continuación, se procede a mostrar los resultados de los ensayos de la voluta pequeña. Al igual que antes, los resultados se muestran en orden ascendente, de 20 a 100 metros por segundo.

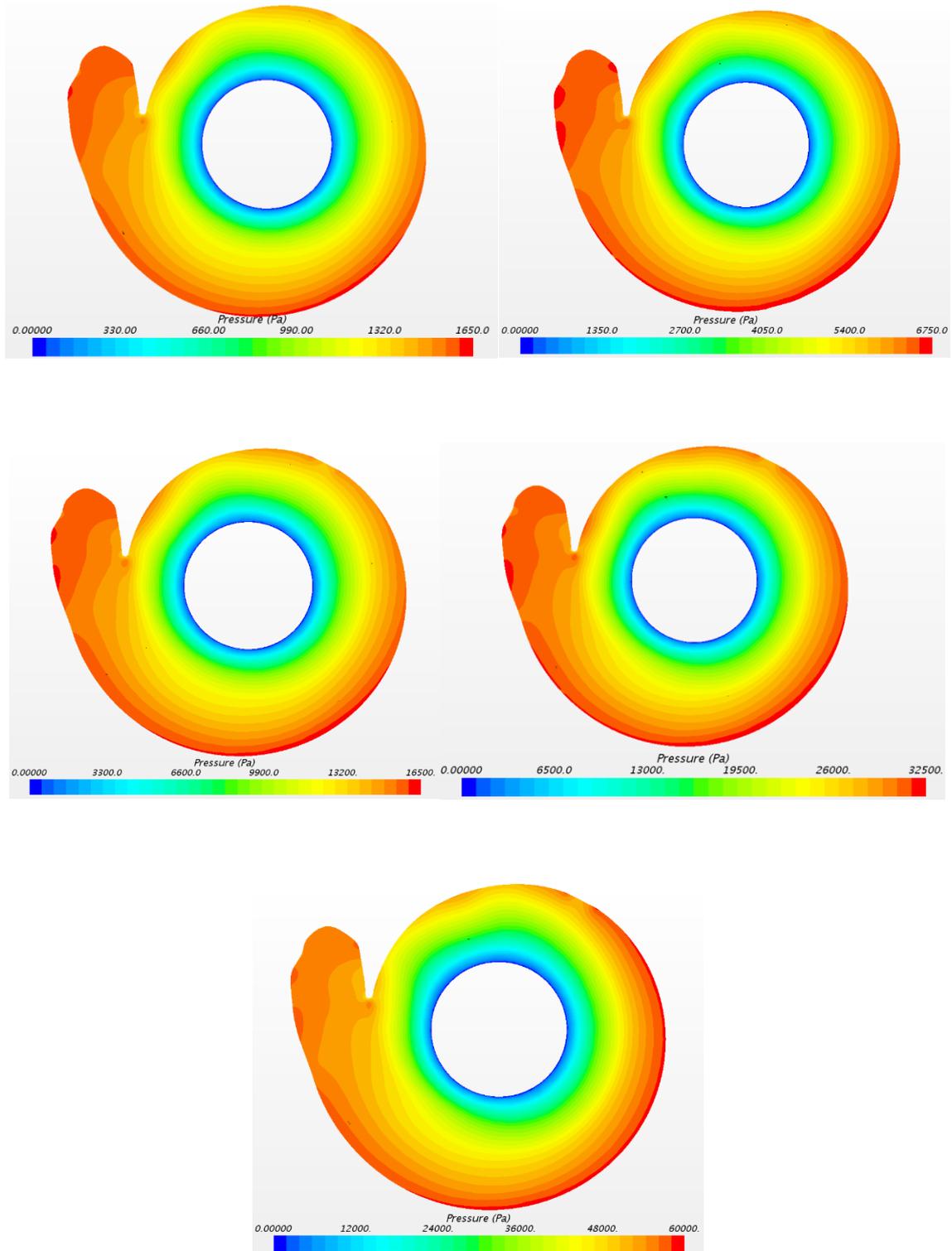


Figura 4.8: Distribución de presiones en la voluta pequeña

En la figura 4.5, se muestra la distribución de presiones en la voluta pequeña. Estas distribuciones son uniformes y concéntricas con valores ligeramente mayores que en la voluta original.

En cuanto a las distribuciones de velocidades, que se pueden observar en la figura 4.6, estas son algo mayores que en la voluta original.

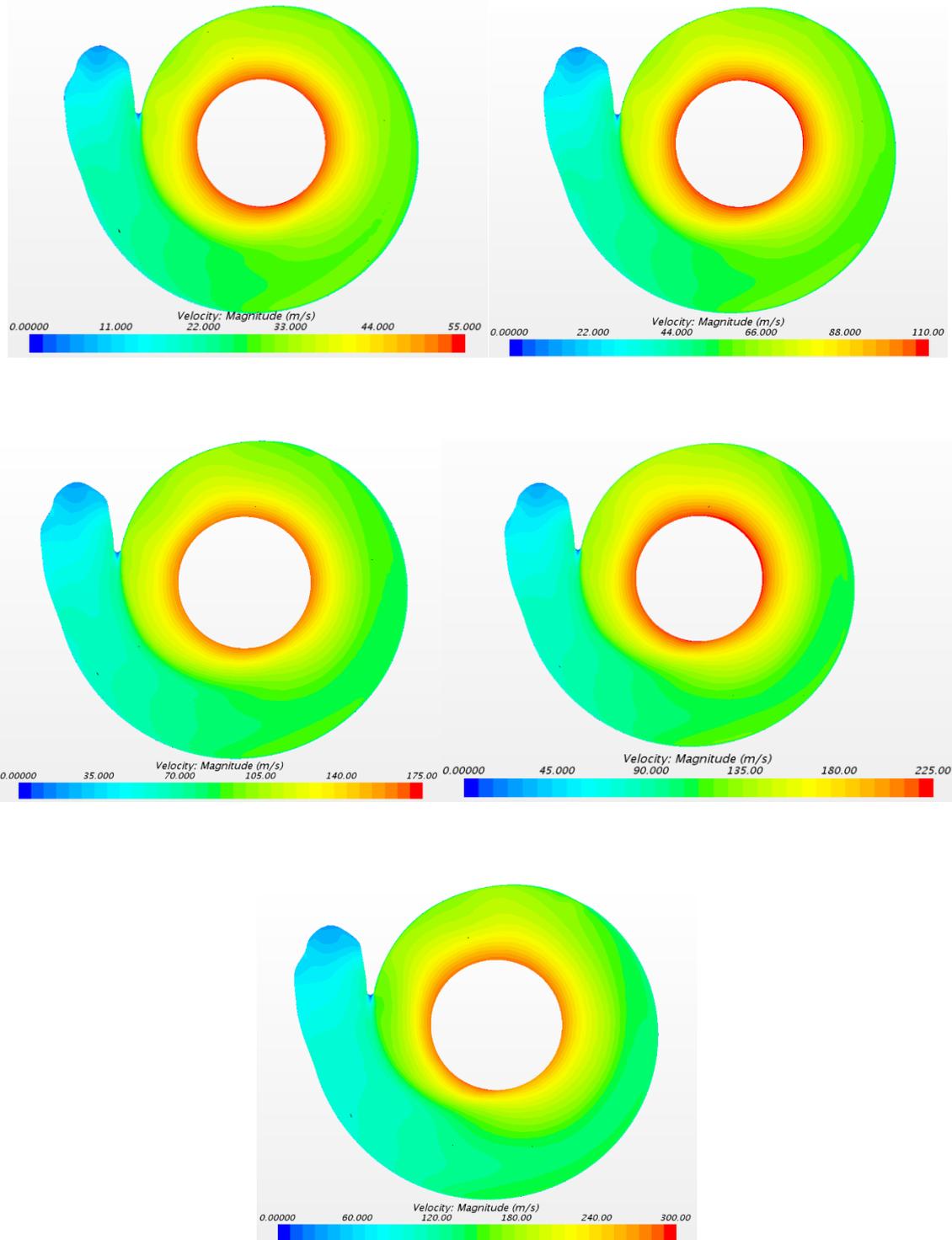
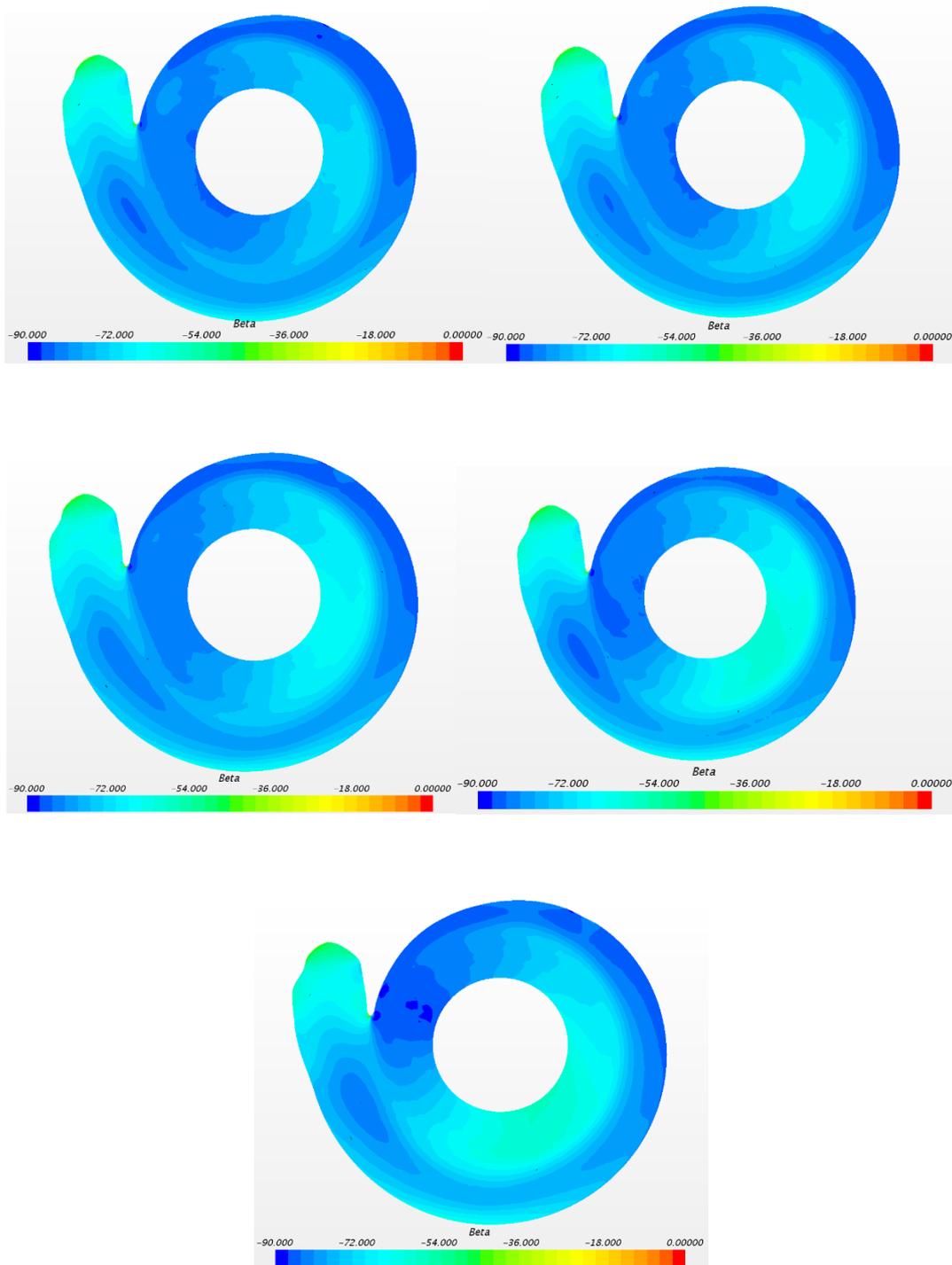


Figura 4.9: Distribución de velocidades en la voluta pequeña

Por último, la distribución del ángulo beta, al igual que en la voluta original, es uniforme en la sección del corte de la voluta.



**Figura 4.10: Distribución del ángulo beta en la voluta pequeña**

Por otra parte, se analiza el ángulo beta a la salida de la voluta, cogiendo el valor medio del mismo en toda la superficie. El resultado de la aproximación da un valor de beta promedio de  $62,9^\circ$ , y su cálculo se puede ver en la figura 4.8.

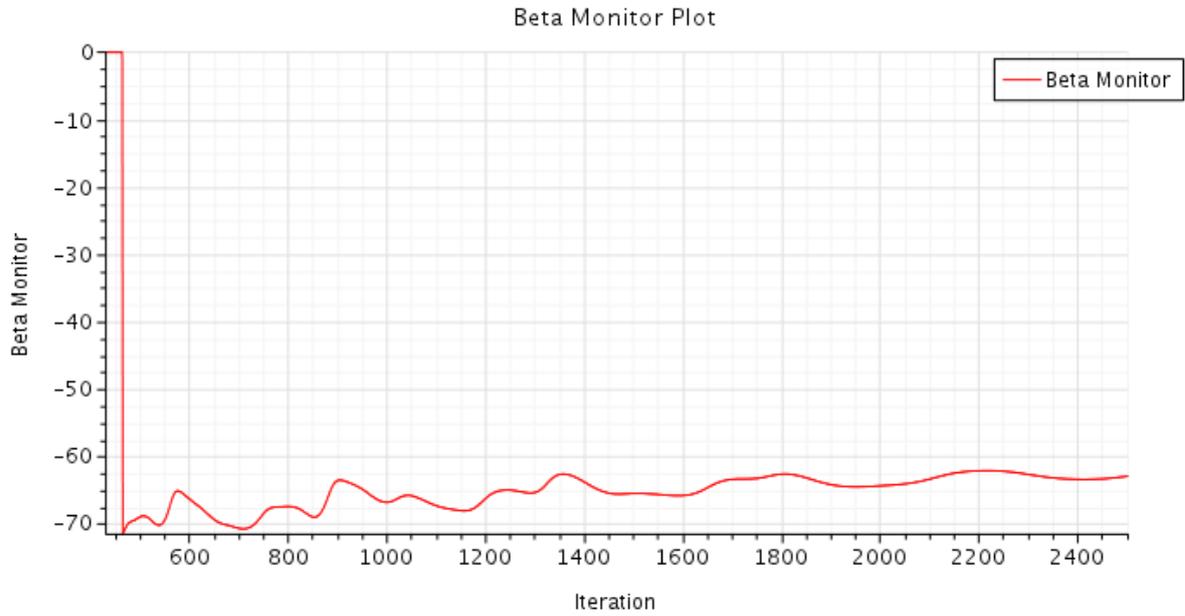
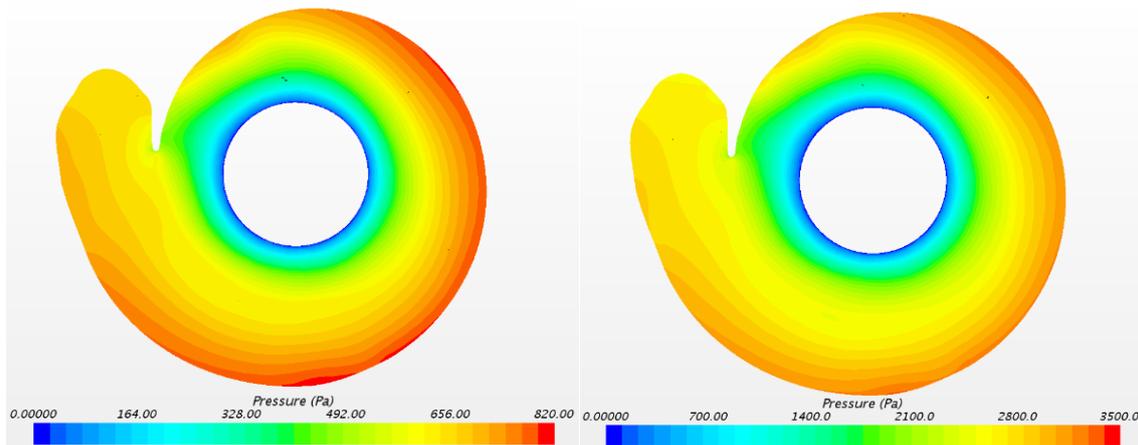
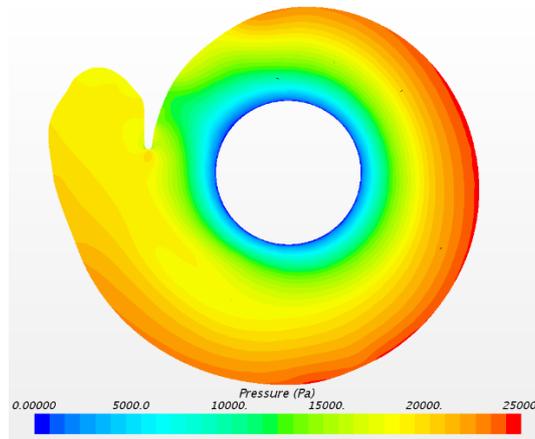
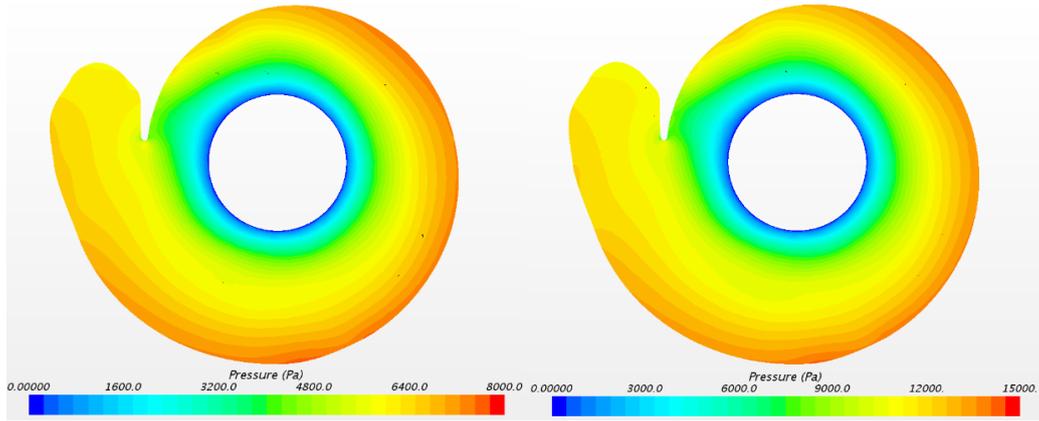


Figura 4.11: Evolución del ángulo beta en la voluta pequeña

### Voluta grande

A continuación, se procede a mostrar los resultados de los ensayos de la voluta pequeña. Al igual que antes, los resultados se muestran en orden ascendente, de 20 a 100 metros por segundo.

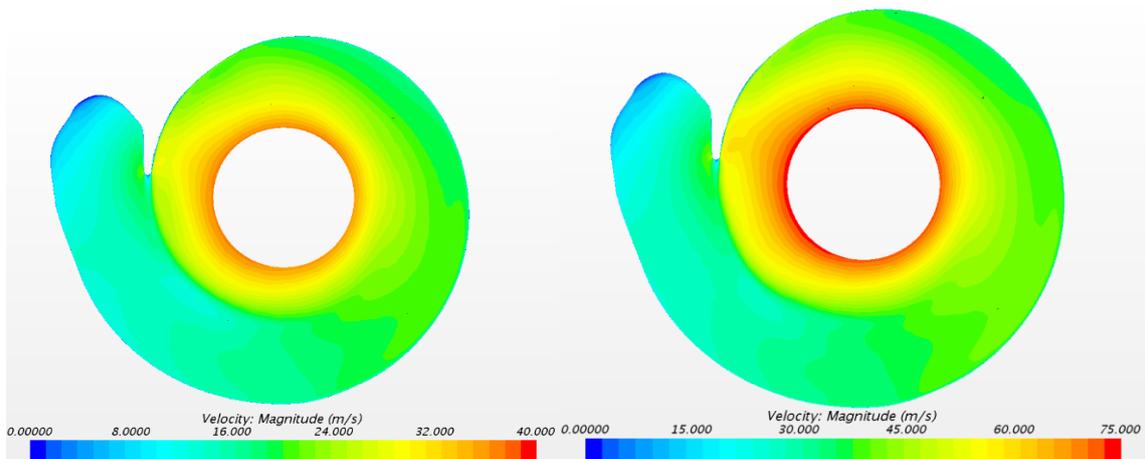


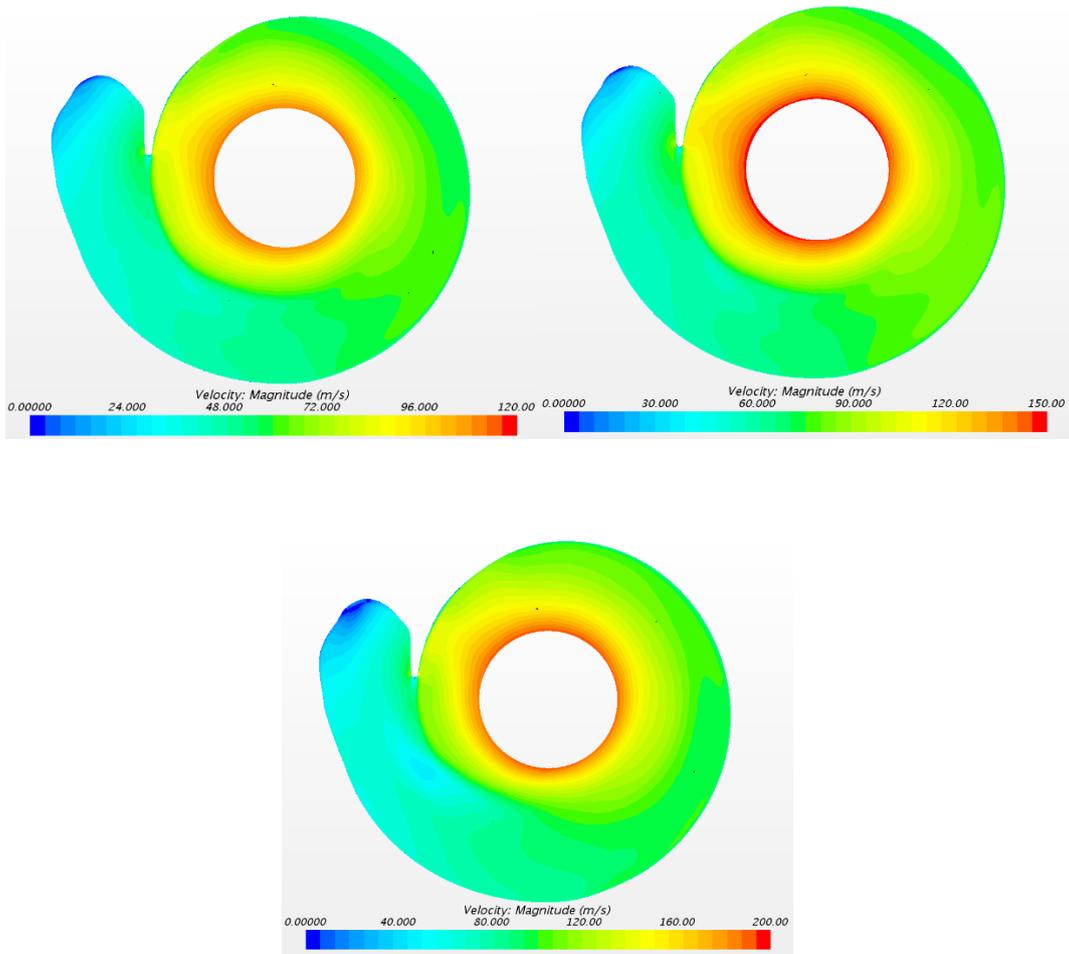


**Figura 4.12: Distribución de presiones en la voluta grande**

En la figura 4.9, se muestra la distribución de presiones en la voluta grande. Estas distribuciones son uniformes y concéntricas con valores ligeramente menores que en la voluta original.

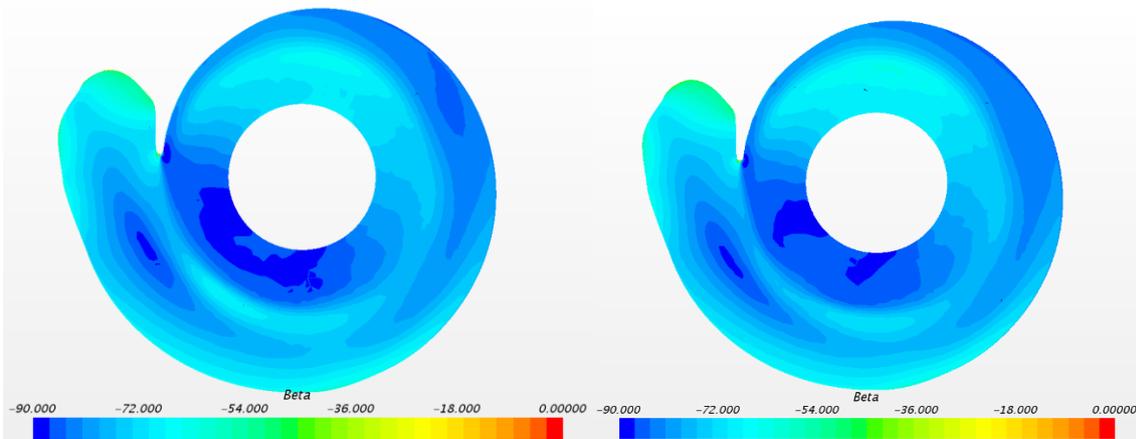
En cuanto a las distribuciones de velocidades, que se pueden observar en la figura 4.10, estas son algo menores que en la voluta original.

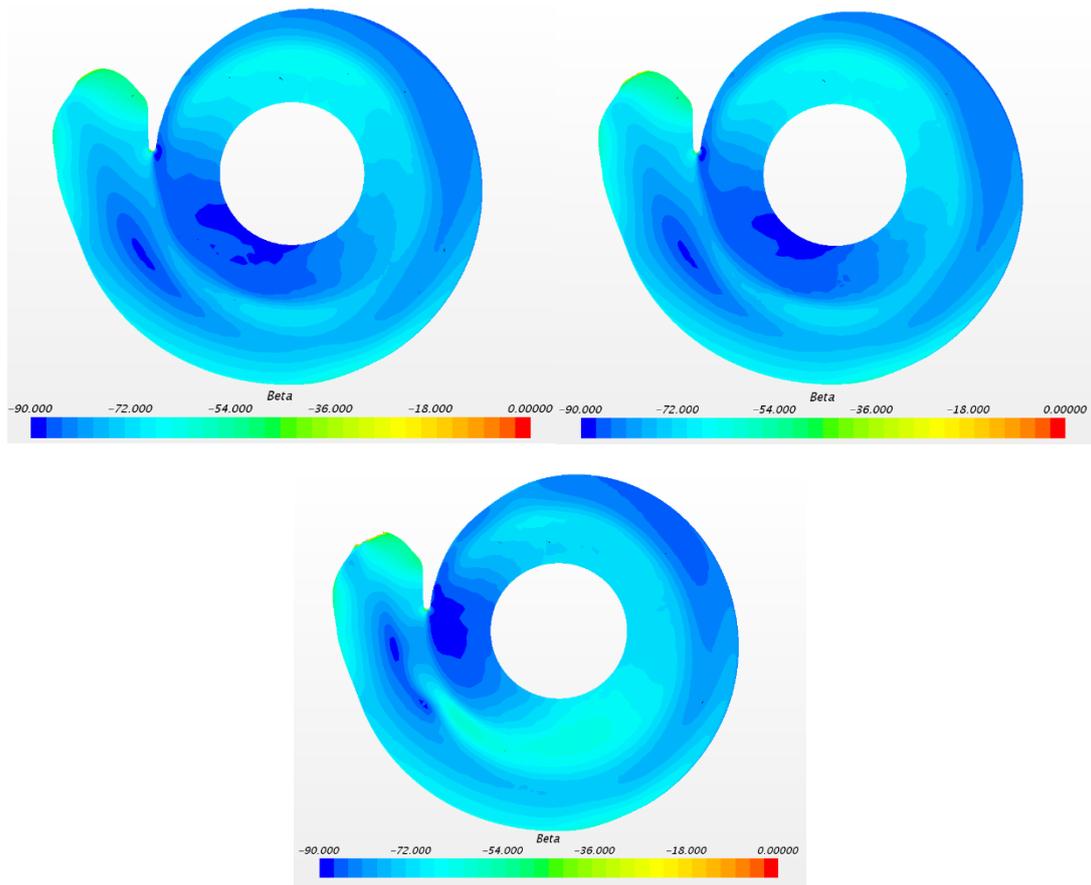




**Figura 4.13: Distribución de velocidades en la voluta grande**

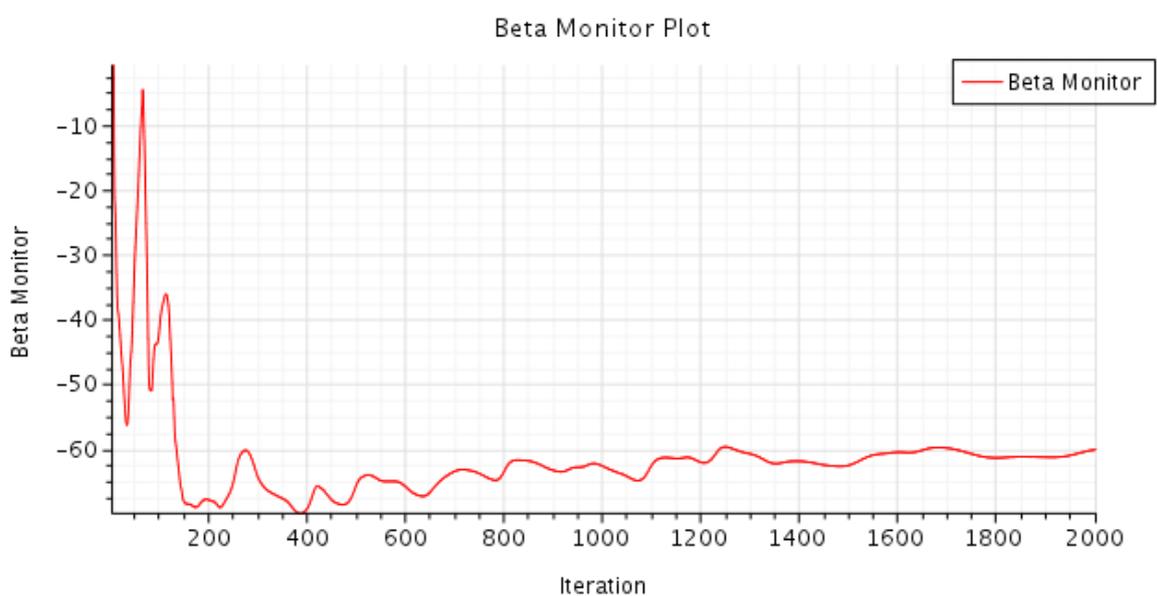
Por último, la distribución del ángulo beta, al igual que en la voluta original, es uniforme en la sección del corte de la voluta.





**Figura 4.14: Distribución del ángulo beta en la voluta grande**

Por otra parte, se analiza el ángulo beta a la salida de la voluta, cogiendo el valor medio del mismo en toda la superficie. El resultado de la aproximación da un valor de beta promedio de  $-60,1^\circ$ , y su cálculo se puede ver en la figura 4.12.

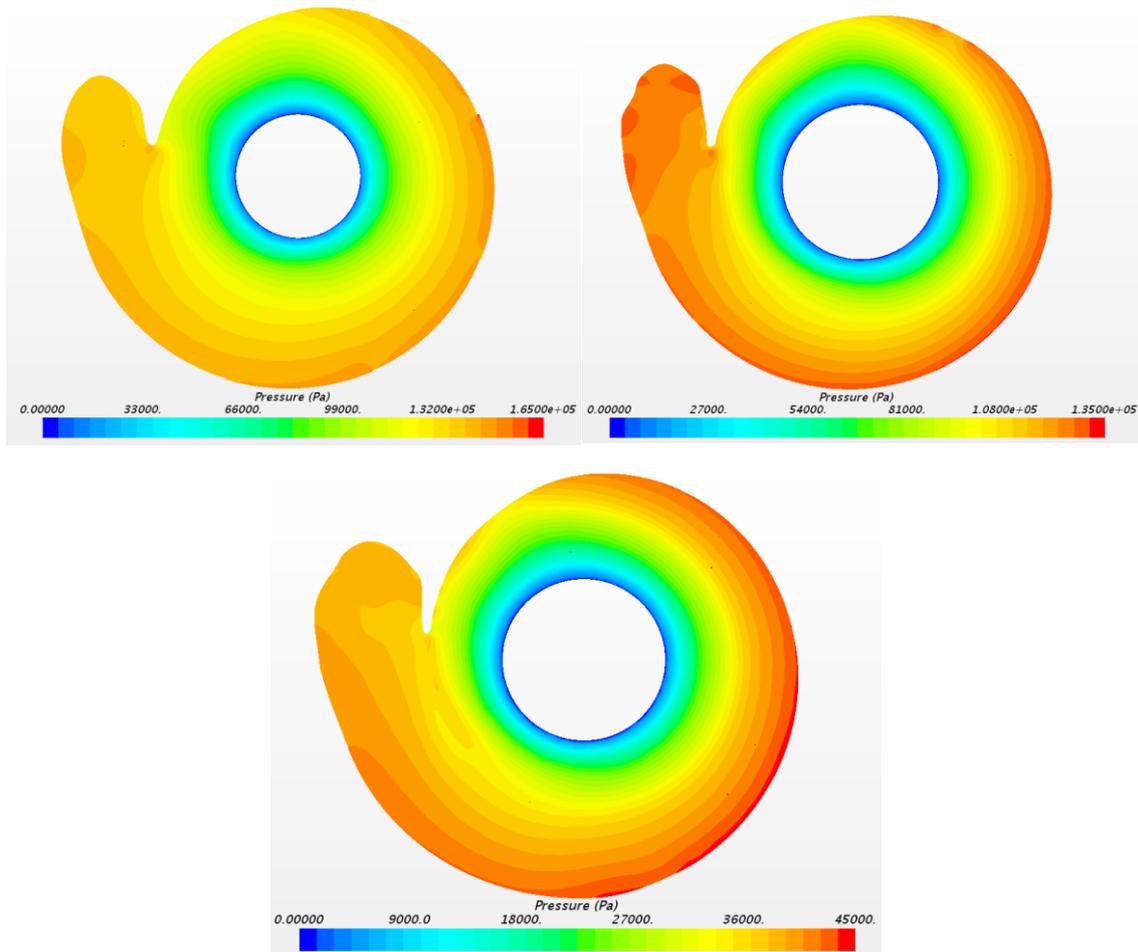


**Figura 4.15: Evolución del ángulo beta en la voluta grande**

## Casos no viscosos

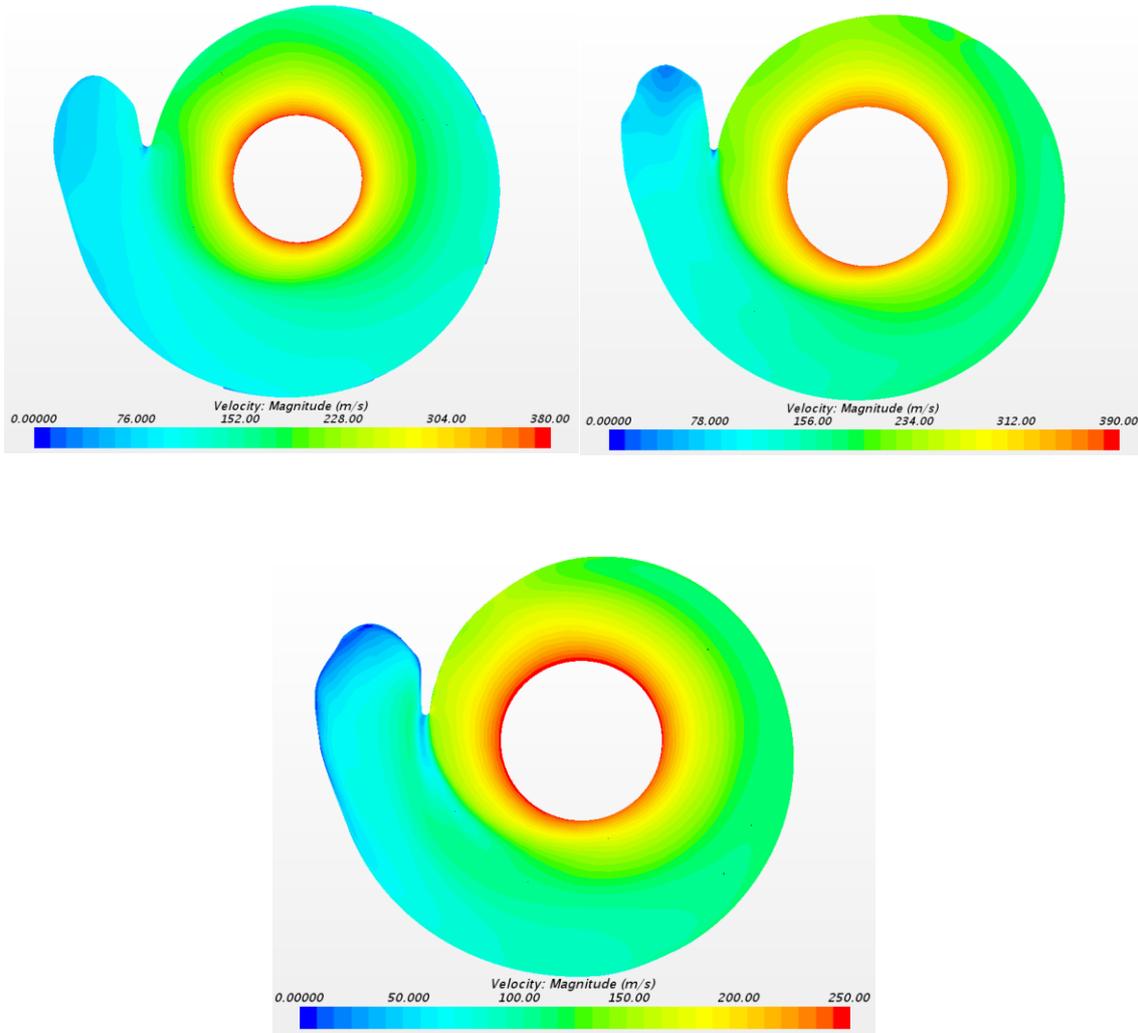
A continuación, se van a mostrar los resultados de los ensayos donde se ha considerado que no había rozamiento. Se ha elegido la velocidad de 100 metros por segundo y se ha ensayado las tres volutas.

En la figura 4.13 se muestra la distribución de presión en las volutas sin rozamiento.



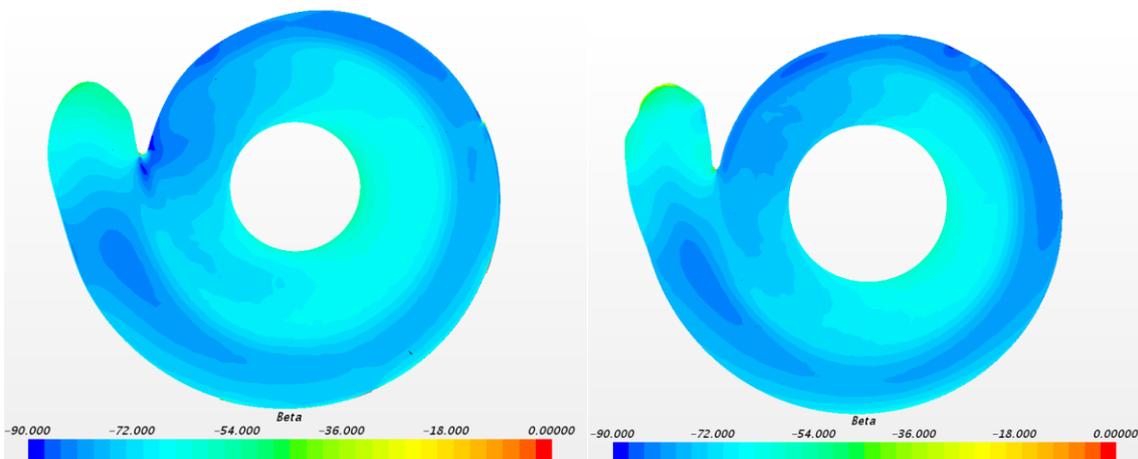
**Figura 4.16: Presión en voluta original, pequeña y grande sin rozamiento**

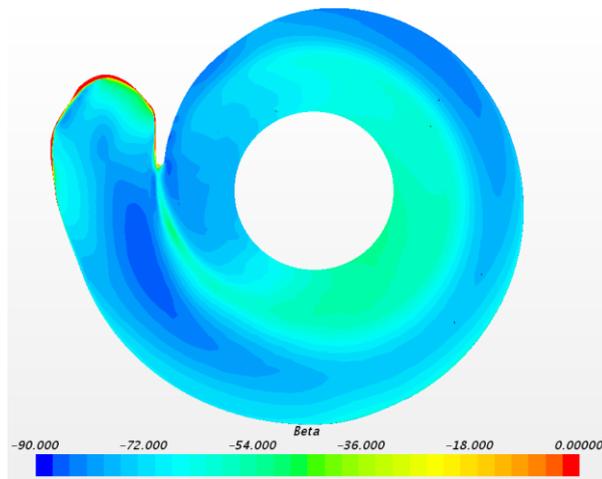
En cuanto a las distribuciones de velocidades, que se pueden observar en la figura 4.14, estas son parecidas a las de las volutas con rozamiento.



**Figura 4.17: Velocidad en voluta original, pequeña y grande sin rozamiento**

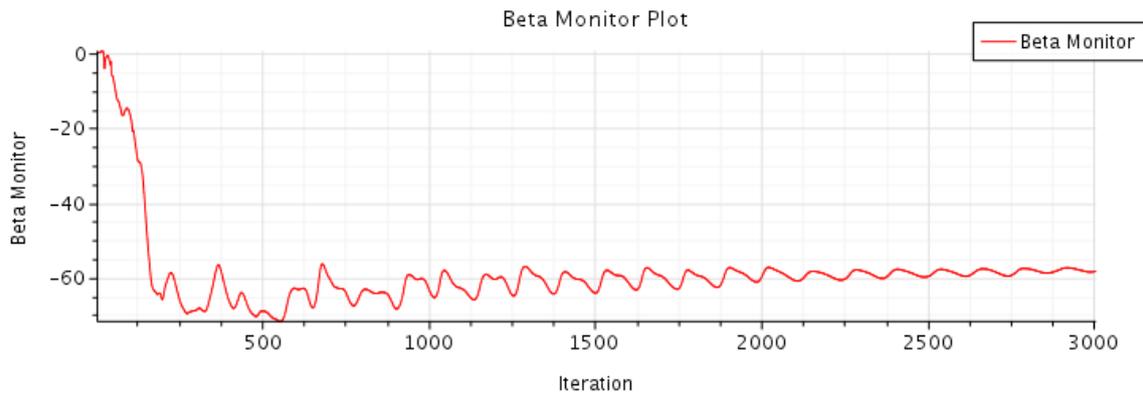
Por último, la distribución del ángulo beta, a diferencia de las volutas con rozamiento presenta zonas con diferencia. En concreto, existe más zonas a parte de la lengua de la voluta donde beta tiene valor nulo.



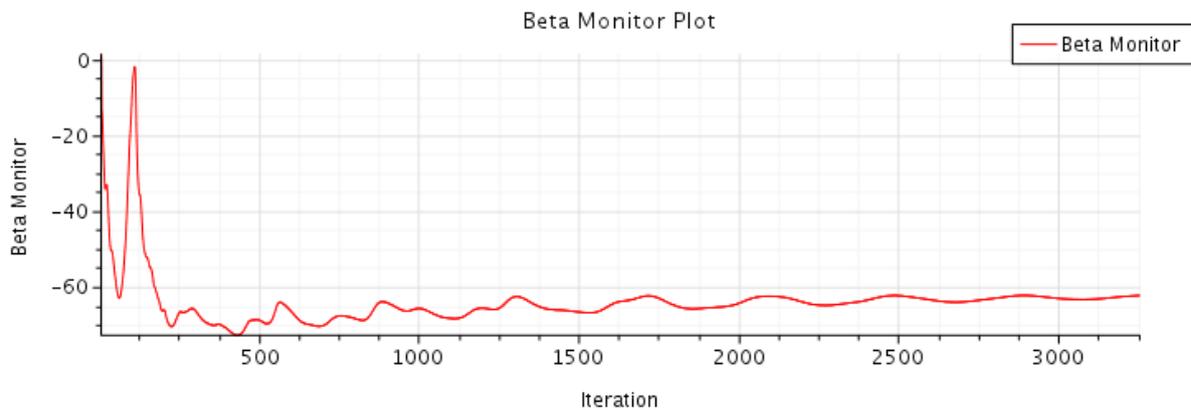


**Figura 4.18: Beta en voluta original, pequeña y grande sin rozamiento**

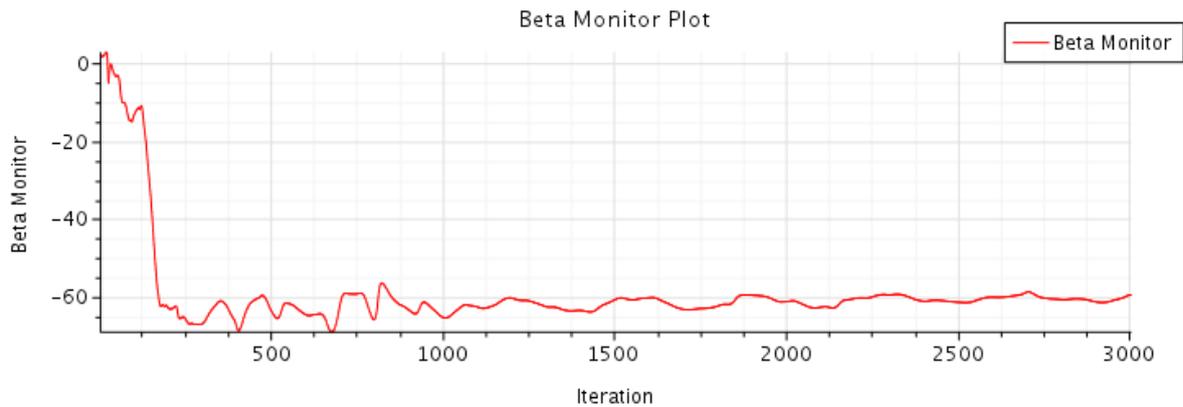
Finalmente, se tienen los valores de los ángulos beta en la salida de las tres volutas. En la voluta original vale  $-58.3^\circ$ , en la pequeña  $-62.3^\circ$  y  $-59.4^\circ$  en la grande.



**Figura 4.19: Evolución del ángulo beta en la voluta original sin rozamiento**



**Figura 4.20: Evolución del ángulo beta en la voluta pequeña sin rozamiento**



**Figura 4.21: Evolución del ángulo beta en la voluta grande sin rozamiento**

### Cálculo teórico

Las ecuaciones teóricas asumen que no existe rozamiento en la voluta y por tanto el ángulo beta no depende de la velocidad del flujo, sino de los parámetros geométricos de la voluta. Se calcula de la siguiente manera.

$$\tan^{-1} \beta = \frac{A_0}{r_0} \cdot \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot b}$$

Donde A, es el área de la sección inicial, r es el radio desde el centro hasta la sección media del conducto de la voluta y b es la garganta de la voluta.

Utilizando esta fórmula, el ángulo beta que se obtiene para cada voluta es el siguiente.

El resumen general de los valores del ángulo beta para las diferentes volutas con y sin rozamiento se pueden ver a continuación:

Tipo voluta	Beta		
	Con rozamiento	Sin rozamiento	Teórico
Pequeña	-62.9	-62.3	-62.4
Original	-59.9	-58.3	-58.6
Grande	-60.1	-59.4	-59.7

**Tabla 1: Ángulo beta en diferentes condiciones**

Como se puede observar, en todos los casos el valor de beta disminuye si se impone la condición de ausencia de rozamiento.

## 4.6 Resumen

En resumen, en este capítulo se ha explicado cómo se ha usado el programa de ensayo de flujo CFD. Se ha utilizado para representar las distribuciones de velocidad, presión y el ángulo beta en una sección de corte, así como el ángulo beta a la salida de cada voluta. Posteriormente, se ha realizado una explicación y una comparación de los resultados obtenidos.

Las distribuciones de velocidades son similares para los diferentes gastos para un tamaño dado. Se puede observar que el aumento de velocidad es uniforme respecto al radio y, es concéntrico. En todos los casos se tiene una zona inicial en la cual se acelera el flujo.

Por otra parte, las distribuciones de presión presentan ciertas distinciones en función de la velocidad para cada uno de los distintos tamaños. Al aumentar la velocidad de entrada se puede observar que los contornos de presión dejan de ser uniformes y circulares, produciéndose una zona dentro de la voluta donde se produce una disminución de presión.

Por último, las distribuciones del ángulo beta dentro de la voluta dependen de la velocidad de entrada. Se puede observar que, en las tres volutas, cuando se tiene una velocidad de entrada de flujo baja, se tiende a tener una distribución de beta más uniforme que velocidades altas.

Por otro lado, es necesario analizar los casos no viscosos y cómo se comporta el flujo en estas condiciones. En ausencia de fricción, se produce un gran aumento de la velocidad del flujo dentro de la voluta, así como de presión. El ángulo beta sigue teniendo una distribución similar que en los casos viscoso salvo que en estas condiciones tiene más zonas donde se produce irregularidades, es decir, tiene un valor igual o superior a cero grados.

# Capítulo 5

## Conclusiones

Este trabajo ha descrito diferentes del proceso de diseño de volutas mediante diferentes programas informáticos. Se ha utilizado Mathematica de Wolfram, para crear un programa para visualizar las volutas diseñadas. Posteriormente, se ha utilizado el programa de diseño de CAD Spaceclaim de Ansys, para crear volutas nuevas a partir de una voluta real. Finalmente, se ha utilizado el programa de ensayo de flujo por CFD Star CCM+ de Siemens para visualizar el comportamiento del flujo dentro de cada una de las tres volutas en diferentes condiciones.

En primer lugar, para la representación visual en Mathematica, se han definido las bases teóricas para el diseño geométrico de las volutas: los B-Splines y las NURBS. Se ha explicado cuándo y por qué surgieron, además de su gran utilidad hoy en día en diferentes campos de las matemáticas, la informática e ingeniería en general. Posteriormente, esas bases teóricas fueron trasladadas a Mathematica para poder crear un programa que permitiera visualizar las volutas, pudiendo cambiar diferentes parámetros y opciones.

En la siguiente etapa, se recurrió al programa Spaceclaim para crear, a partir de una voluta real, dos volutas nuevas, una más grande y otra más pequeña. Dichas volutas tenían la misma sección y forma que la voluta original, diferenciándose en una mayor o menor superficie en cada sección. Se realizaron diferentes cambios en el conducto de entrada y en la porción de unión entre la voluta y conducto para que las transiciones de una parte a otra fueran las más suaves posibles.

Finalmente, se ensayaron las tres volutas en el programa Star CCM+. El objetivo era ver tendencias en el comportamiento del flujo en las volutas. Para poder cuantificarlo de manera rigurosa, se ha recurrido al ángulo beta. El ángulo beta representa la relación entre las velocidad tangencial y radial, y por tanto la cantidad de movimiento, que en una voluta sin rozamiento debe ser el mismo a la entrada que a la salida. Por tanto, tras realizar las simulaciones, se obtuvieron tanto los ángulos beta, como las distribuciones de las velocidades y presiones en las volutas.

# Bibliografía

- [1] Orlando Galdames Bravo. (2011). Modelización con curvas y superficies de Bézier. Julio 20, 2019, de Universidad Politécnica de Valencia Sitio web:  
<https://polipapers.upv.es/index.php/MSEL/article/download/3071/3162>
- [2] Curvas de Bézier | Geometría Dinámica. (2019). Julio 19, 2019, Sitio web: <http://www.geometriadinamica.cl/2010/12/curvas-de-bezier/>
- [3] Rhinoceros - NURBS. (2019). Retrieved Julio 19, 2019, Sitio web:  
<https://www.rhino3d.com/la/nurbs>
- [4] SpaceClaim Tutorials: Essentials. (2019). Julio 20, 2019, Sitio web:  
<http://www.spaceclaim.com/en/Support/Tutorials/Essentials.aspx>
- [5] ANSYS SpaceClaim Tutorials. (2019). Julio 20, 2019, Sitio web:  
<https://studentcommunity.ansys.com/cat/ansys-spaceclaim/>
- [6] Conceptos Básicos. Julio 22, 2019, Sitio web:  
<http://turbomaquinastermicascct3412.blogspot.com/p/conceptos-b.html>
- [7] Copco, A. (2019). Compresores dinámicos: compresores centrífugos y axiales AtlasCopco. Julio 22, 2019, Sitio web:  
<https://www.atlascopco.com/es-es/compressors/wiki/compressed-air-articles/dynamic-compressors>
- [8] Xu, C., & Müller, M. (2005). Development and Design of a Centrifugal Compressor Volute. *International Journal Of Rotating Machinery*, 2005(3), 190-196. doi: 10.1155/ijrm.2005.190

PARTE II  
PRESUPUESTO

# Presupuesto

El objetivo de esta parte es explicar los diferentes costes que tendría la realización de este proyecto, es decir, generar una voluta nueva. Se incluyen los costes informáticos, de equipos y de personal.

Licencia de programa	Coste
<b>Mathematica</b>	2000,00 €
<b>ANSYS Spaceclaim</b>	1000,00 €
<b>Siemens Star CCM+</b>	500,00 €
<b>TOTAL LICENCIAS</b>	<b>3500,00 €</b>

**Tabla 2: Coste de licencias**

Equipos	Coste/h	Horas	Total
<b>PC Personal HP</b>	2,00 €/h	250 h	500,00 €
<b>TOTAL EQUIPOS</b>			<b>500,00 €</b>

**Tabla 3: Coste de equipos**

Ingeniero	Coste/h	Horas	Total
<b>Ingeniero</b>	15,00 €/h	300 h	4500,00 €
<b>Tutor del proyecto</b>	30,00 €/h	40 h	1200,00 €
<b>TOTAL INGENIEROS</b>			<b>5700,00 €</b>

**Tabla 4: Coste de ingenieros**

<b>COSTE TOTAL DEL PROYECTO</b>	
<b>Licencias</b>	3500,00 €
<b>Equipos</b>	500,00 €
<b>Ingenieros</b>	5700,00 €
<b>TOTAL PROYECTO</b>	<b>9700,00 €</b>
<b>Gastos extra</b>	1000,00 €
<b>TOTAL BRUTO</b>	<b>10700,00 €</b>
<b>IVA</b>	21 %
<b>TOTAL NETO</b>	<b>12947,00 €</b>

**Tabla 5: Coste del proyecto**

PARTE III  
PLIEGO DE CONDICIONES

# Pliego de condiciones

En el presente apartado se expondrán las condiciones y equipos que han sido necesarios para llevar a cabo la realización del presente proyecto. Concretamente, se ha utilizado, de manera exclusiva, varios programas informáticos.

En primer lugar, se ha utilizado el programa Mathematica de Wolfram, para la cual se necesita una licencia. En este caso, ha sido proporcionada, de manera gratuita, por la UPV. En caso de no tener acceso a una licencia por medio de una universidad o empresa, los costes de la licencia ascienden a una suma considerable de dinero, lo cual queda reflejado en los presupuestos.

Por otra parte, se ha usado el programa de CAD Spaceclaim de ANSYS. Para poder tener acceso a este programa es necesario descargar el programa ANSYS con todos los programas que vayan incluidos. Existen varias versiones, como la de estudiante o la profesional. La versión de estudiante ya incluye Spaceclaim, pero en los presupuestos se ha considerado la profesional pues puede ser más útil en trabajos posteriores.

Por último, se ha recurrido al programa de ensayo de flujos CFD de Siemens llamado Star CCM+. Dependiendo del alcance del proyecto, el uso de este programa puede llegar a requerir grandes cantidades de memoria en el ordenador. No obstante, en este proyecto las simulaciones no pretendían ser extremadamente precisas y, se ha podido efectuar en un ordenador de sobremesa estándar.