

*Optimización geométrica de una turbina ubicada en túnel mediante:
“ANSYS Fluent Adjoint Solver”.*

OPTIMIZACIÓN GEOMÉTRICA DE UNA TOBERA UBICADA EN TÚNEL COMO SISTEMA DE APORTE DE ENERGÍA MEDIANTE “ANSYS FLUENT ADJOINT SOLVER”



TRABAJO DE FIN DE MÁSTER DE INGENIERÍA
INDUSTRIAL.

PROYECTO REALIZADO POR:

Juan Antonio González Soto.

PROYECTO CODIRIGIDO POR:

D. Cándido Gutiérrez Montes.

D. José Ignacio Jiménez González.



UNIVERSIDAD DE JAÉN

Escuela Politécnica Superior de Jaén

Departamento de Ingeniería Mecánica y Minera

D. Cándido Gutiérrez Montes y D. José Ignacio Jiménez González, tutores del proyecto fin de carrera titulado: *Optimización geométrica de una tobera ubicada en túnel mediante "ANSYS Fluent Adjoint Solver* que presenta D. Juan Antonio González Soto, autorizan su presentación para defensa y evaluación en la Escuela Politécnica Superior de Jaén

Jaén, Septiembre de 2017

Alumno:

Tutores:

D. Juan Antonio González Soto

D. Cándido Gutiérrez Montes

D. José Ignacio Jiménez González

Agradecimientos

En primer lugar, quiero mostrar mi agradecimiento a la Escuela Politécnica Superior de Jaén por la oportunidad que nos ha brindado al crear el Máster para todos los titulados en niveles inferiores. A todo el personal de la escuela tengo que agradecerle las facilidades que me ha dado, sobre todo a la hora de responder antes las adversidades de iniciación en una nueva titulación.

A mis tutores del trabajo, D. Cándido Gutierrez Montes y D. José Ignacio Jimenez González, quiero agradecerle el apoyo y dedicación que me ha dado durante los últimos meses. No sólo me ha guiado en la elaboración de este trabajo de fin de Máster, sino también me ha enseñado todo lo necesario por si en un futuro quiero realizar trabajos semejantes

A mi familia tengo que darles las gracias por el apoyo que me han dado. Siempre que los he necesitado he podido contar con ellos.

A mis amigos y compañeros, por la unidad que hemos formado durante estos dos años, y siendo un gran ayuda en los momentos difíciles afrontados.

Juan Antonio González Soto

Jaén, 2017

Resumen

La temática general del proyecto está centrada en la optimización de una tobera de aporte eléctrico ubicada en los tuneles de las carreteras. Investigaciones previas fueron llevadas a cabo por la universidad de Jaén, demostrándose el aporte eléctrico producido por dicha turbina al aprovechar las corrientes de aire por el transito de coches. Es por ello, que este trabajo se centra en la optimización de la geometría de dicha tobera. Esta optimización se centra en la minimización de la caída de presión entre la entrada y la salida del sistema de conductos. Para ello se hace uso del módulo Adjoint de ANSYS Fluent.

Esta toolbox tiene implementado un solver que permite casi de manera automática obtener las zonas de la geometría a optimizar para mayor aprovechamiento, creando un gran impacto en la industria de hoy día por el ahorro de tiempo y coste empleado para realizar cualquier optimización de geometrías.

Departamento de Ingeniería Mecánica y Minera

Area de Mecánica de Fluidos

Universidad de Jaén

Índice

Agradecimientos	i
Resumen	iii
Índice	iv
Índice de Figuras y Tablas	vi
Notación	ix
1. Introducción	11
2. Desarrollo del Proyecto	13
2.1. <i>Objetivo</i>	13
2.2. <i>Parametros del Viento</i>	14
2.2.1. Distribución de Weibull	14
2.2.2. Rafagosidad del viento	15
2.2.3. Rugosidad	16
2.3. <i>Aprovechamiento del viento en la Peninsula</i>	17
2.4. <i>Toberas</i>	19
2.5. <i>Método de optimización</i>	21
2.5.1. Ansys Fluent	23
2.5.2. Fluent Adjoint Solver	25
2.6. <i>Mallado</i>	26
3. Fluent Adjoint Solver	29
3.1. <i>Método de optimización</i>	29
3.2. <i>Enfoque discreto del adjoint</i>	31
3.2.1. Entradas especificadas por el usuario	31
3.2.2. Ecuaciones gobernantes del sistema de fluidos	32
3.2.3. Parámetros observable de interés	33

3.3. <i>Uso de los datos de sensibilidad para mejorar diseño</i>	36
3.4 <i>Suavizado y modificación de la malla</i>	38
3.5 <i>Procedimiento general</i>	40
4. Óptimización de la geometría de la tobera	43
4.1. <i>Generación de geometría y malla 2D</i>	43
4.2. <i>Resolución con Fluent 2D</i>	46
4.3. <i>Módulo Adjoint 2D</i>	51
4.3.1. Definición del parámetro observable de interés	52
4.3.2. Definición del método de resolución	53
4.3.3. Controles de solución del adjoint	54
4.3.4. Configuración de los monitores y cálculo	56
4.3.5. Pos-procesado de la solución adjoint	58
4.3.6. Modificación de la geometría	60
4.3.6.1. Modificación después de la entrada de la tobera (1)	63
4.3.6.2. Modificación de la tobera después de la entrada y antes de la salida (2)	69
4.3.6.3. Modificación de la tobera en la zona de entrada (3)	72
4.3.6.4. Modificación de la tobera en la zona de salida (4)	74
4.4. <i>Generación de geometría y malla 3D</i>	77
4.4.1.1. Modificación de la tobera en la zona de entrada (5)	79
4.4.1.2. Modificación de la tobera en la zona de salida (6)	83
4.5. <i>Resultados obtenidos</i>	86
4.5.1. Comparación de geometrías	86
4.5.2. Contornos de presiones y velocidades	89
5. Conclusiones	92
Referencias	94

ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS

Figura 1 Curva de distribución de Weibull. [5].	17
Figura 2 Variación del viento con la altura. [6].	18
Figura 3 Velocidad del viento en España a 80 m [3].	20
Figura 4 Metodología Adjoint [7]	43
Figura 5 Generación de 2D Catia .	45
Figura 6 Malla focalizada en la zona de la tobera .	47
Figura 7 Parámetros de fluido a la entrada	49
Figura 8 Parámetros de fluido a la salida .	49
Figura 9 Método de ecuaciones de resolución .	50
Figura 10 Residuales solución inicial	51
Figura 11 Caída de presión en la tobera .	51
Figura 12 Flujo de velocidades en la tobera	52
Figura 13 Vectores de velocidad en el plano .	52
Figura 14 Parámetros de evaluación de caída de presión .	54
Figura 15 Método de resolución del Adjoint	55
Figura 16 Parámetros de control y esquema de estabilización	57
Figura 17 Parámetros de monitorización .	59

Figura 18 Establecer numero de iteraciones .	59
Figura 19 Residuales bajo el módulo adjoint	60
Figura 20 Sensibilidad en la zona de la tobera .	61
Figura 21 Cuadro de coordenadas a modificar	62
Figura 22 Cuadro de coordenadas a modificar (1)	66
Figura 23 Representación de las coordenadas a modificar .	67
Figura 24 Presión, velocidad y deformación tobera final (1).	68
Figura 25 Valores de presión bajo la modificación (1).	70
Figura 26 Presión, velocidad y deformación tobera final (2).	71
Figura 27 Sensibilidad y tobera modifica (2).	72
Figura 28 Valores de presión bajo la modificación (2).	73
Figura 29 Presión, velocidad y deformación tobera final (3).	74
Figura 30 Valores de presión bajo la modificación (3).	75
Figura 31 Presión, velocidad y deformación tobera final (4).	77
Figura 32 Valores de presión bajo la modificación (4).	78
Figura 33 Túnel y tobera como CAD.	79
Figura 34 Mallado del túnel.	80
Figura 35 Vectores de velocidad en el plano.	81
Figura 36 Contorno bajo los parametros de optimización (5).	82
Figura 38 Comparación de geometrías antes y después de la modificación.	83
Figura 39 Contorno bajo los parametros de optimización (6).	85

Figura 40 Presión, velocidad y deformación (6).	86
Figura 41 Valores de presión bajo la modificación (6).....	87
Figura 42 Geometría antes y después de la optimización 2D.....	89
Figura 43 Geometría antes y después de la optimización 3D.....	90
Figura 44 Isocontornos de presión y velocidad final 2D.....	92
Figura 45 Isocontornos de presión y velocidad final 3D.....	93
Tabla 1 Parametros α según la rugosidad del terreno [6].....	19
Tabla 2 Valores de presión bajo la modificación (1).....	69
Tabla 3 Valores de presión bajo la modificación (2).....	73
Tabla 4 Valores de presión bajo la modificación (3).....	75
Tabla 5 Valores de presión bajo la modificación (4).....	77
Tabla 6 Valores de presión bajo la modificación (5).....	84
Tabla 7 Valores de presión bajo la modificación (6).....	87

Notación

La notación mostrada está expresado en unidades del Sistema Internacional (SI). Si durante está trabajo se utilizarán estos términos en otras unidades se especificarán, de lo contrario se entiende que las unidades están SI

h ; Entálpia del fluido (kJ)

C ; Velocidad del fluido (m/s)

G ; Gasto másico (Kg/s)

ρ ; Densidad del fluido (Kg/m³)

A ; Sección del dispositivo (m²)

a ; Velocidad del sonido (m/s)

C_p ; Capacidad calorífica del fluido a presión constante (J/k)

C_v ; Capacidad calorífica del fluido a volumen constante (J/k)

p ; Presión del Fluido (Pa)

T ; Temperatura (°C)

M ; Número de celdas de la malla

L ; Condiciones de las celdas del mallado

$P(v)$; Probabilidad estaística de que aparezca una velocidad (v)

c ; Factor de escala, su valor es aproximadamente la velocidad media [m/s]

k ; Factor de forma

h_{ref} ; Altura conocida [m]

v_{ref} ; Velocidad del viento a altura h_o [m/s²]

α ; Parámetro de rugosidad del terreno dependiendo de los obstáculos.

1. INTRODUCCIÓN

Investigadores de la Universidad Jaén han llevado a cabo un proyecto para lograr el aprovechamiento eólico de los túneles de carretera, con el objetivo de que éstos sean autosostenibles energéticamente.

Según informes publicados, se partió de la idea de si era viable el aprovechamiento de las corrientes de aires que generan los vehículos a su paso. El problema es que, en las autovías, esas corrientes no son constantes y cuando pasa un vehículo deja una estela, que es suficiente para establecer una generación eléctrica continua. Por ello, su grupo decidió centrar sus investigaciones en túneles de carretera o de autovía, donde sí que parece que puede haber corrientes eólicas suficientemente grandes.

Los trabajos se están llevando a cabo en túneles de grandes dimensiones, ya que conectan ambas caras de una montaña, donde hay diferencias de presión, con lo cual, simplemente, el propio túnel ya tiene unas corrientes de aire establecidas a lo que se suman las corrientes que también originan los vehículos de gran tonelaje a su paso.

El objetivo principal de la investigación fue caracterizar, tanto experimental como numéricamente, el flujo interior, qué velocidades aparecen, qué periodicidad tienen, qué continuidad y si esas corrientes de aire son aprovechables para poner una mini turbina que genere electricidad”.

El siguiente paso es saber si existe un dispositivo, tipo tobera, un elemento estructural, en el cual se puedan concentrar esas corrientes, de manera que si se disminuye el área de paso, lo que se haga es aumentar la velocidad. Si al final de esa tobera se pueden poner mini turbinas o mini aerogeneradores, se vería si es o no viable. Lo que se ha de conseguir en la tobera es un aumento de la velocidad en la zona central, en la cual se ubicará la turbina consiguiendo el máximo rendimiento posible.

La velocidad del viento es aprovechable para generar energía eólica cuando ésta es de cinco metros por segundo, como condición mínima. En Andalucía la dirección del viento predominante es de oeste-este, y se da la peculiaridad que en muchos túneles con esa orientación puedes obtener un potencial eólico importante. Este tipo de inversión estaría justificada en grandes ciudades, donde cuentan con numerosos túneles, que podrían ser autosuficientes, no tanto para la generación eléctrica del consumo, sino para la propia luz y la alimentación del túnel. [1]

2. DESARROLLO DEL PROYECTO

Este proyecto se centra en el estudio de la optimización geométrica de las toberas colocadas en una posición característica del túnel para un mayor aprovechamiento del viento creado en tuneles.

Por ello los conceptos desarrollados en epígrafes siguientes están enfocados a todos aquellos conceptos que sean de relevancia para la construcción y conocimiento de una tobera.

2.1. Objetivo

Como acometida principal de este proyecto es la instalación de turbinas y con ello toberas en túneles, es la captación del viento, en concreto de su energía cinética, para que a su paso por tobera y a posteriori por una turbina se transfome en energía eléctrica, permitiendo esto hacer de un túnel autosuficiente para el suministro eléctrico requerido en elementos de iluminación y señalización.

Esta compleja temática ha abierto varios frentes de estudios y mejoras en la actualidad. En este caso, y haciendo uso de datos aportados por estudios de la Universidad de Jaén, se centrará el problema en uno de los elementos necesarios para la producción de energía eléctrica. Otros parámetros, como posicionamiento, caracterización del túnel, y variables como velocidades y presiones serán en base a reportes emitidos.

2.2. Parametros del Viento

El viento existe debido a las corrientes creadas por los rayos de sol. Estos al impactar con el suelo calientan el aire cercano a él, lo que provoca que, debido a la diferencia de densidades, la circulación de este se mantenga al enfriarse y calentarse continuamente diferentes capas de aire en todo el espacio terrestre. Existe de igual manera viento creado a partir de la diferencia de temperatura entre la tierra y el mar y también brisas localizadas en los valles por variaciones de calor con los montes que los delimitan.

En este apartado se toman como dato inicial de partida los parámetros propios del viento que pueden afectar de un modo u otro al sistema a optimizar. Aunque no es objeto de este proyecto, se ha de decir que existen formulas que permiten obtener para valores concretos del viento en función de la localización, dimensiones de la turbina y morfología del terreno a partir de consideraciones adecuadas para el autor.

2.2.1. Distribución de Weibull

Para saber si un emplazamiento es viable para utilizar el viento según nuestras necesidades energéticas hay que realizar un estudio previo. En este estudio tienen que obtenerse datos de velocidades de viento en el punto a instalar la turbina y a continuación aplicarse un método de cálculo estadístico para evaluar de entre la aleatoriedad de los datos los recursos eólicos disponibles.

El tratamiento de los datos más común se realiza mediante la función de probabilidad. Al representarla aparece la distribución de Weibull de la zona a estudio. Mediante esta representación se puede percibir

la viabilidad de instalar el sistema según las necesidades.

$$P(v) = \frac{k}{c} * \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} * e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (1)$$

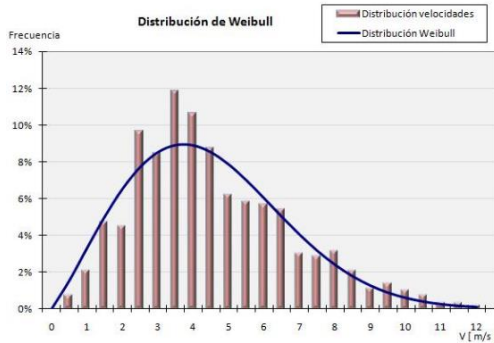


Figura 1 – Curva de distribución de Weibull. [5]

La figura 1 se muestra un caso concreto en el cual se ha realizado un cálculo estadístico que permita conocer entre que rangos de velocidades se va a trabajar, y que velocidad será más frecuente encontrar en esta zona geográfica y bajo las condiciones calculadas.

2.2.2. Rafagosidad del viento

La rafagosidad del viento tiene que ver con la variación del viento durante las 24 horas del día. Su intensidad no se mantiene constante sino que varía constantemente con ráfagas de distintas velocidades.

Además hay diferencias muy palpables entre las horas de día y las de noche. Durante el día el viento cambia más de dirección y es más fuerte e inestable que por la noche, principalmente debido a la mayor diferencia entre las temperaturas de la superficie terrestre y el mar.

2.2.3. Rugosidad

La rugosidad se refiere al efecto de la morfología del terreno sobre el viento. A mayor altura el viento es más uniforme al no encontrarse con obstáculos en su recorrido. Para sistemas a bajas alturas incluso en terreno llano y con poca presencia de obstáculos el viento presenta turbulencias debido a los efectos del rozamiento con el suelo. Se puede ver en la Figura

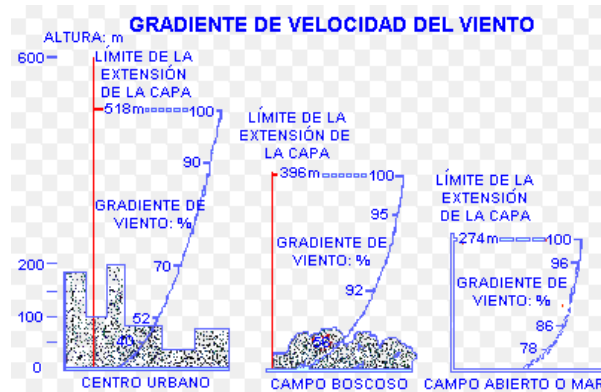


Figura 2 – Variación del viento con la altura. [6]

En la figura anterior se puede observar como climas brusco, o zonas edificadas hace que se disminuya la velocidad del viento, y lo que es incluso peor, la aparición de turbulencias que inestabilizan corrientes.

La variación de la velocidad del viento en un terreno idealmente plano viene dada por la siguiente ecuación:

$$v(h) = v_{ref} * \left(\frac{h}{h_{ref}}\right)^\alpha \quad (2)$$

El grado de rugosidad del terreno puede variar según el contenido de la superficie en la zona. Puede hacer incluso de acelerador del viento en zonas con pendientes relativamente suaves o normalmente la morfología, naturaleza y edificación reducen el flujo según los valores de la Tabla

Grado de rugosidad del terreno	α
Sin rugosidad (arena, nieve, mar)	0,10-0,13
Rugoso (bosque, edificios bajos)	0,20-0,27
Muy rugoso (edificios altos)	0,27-0,40

Tabla 1 – Parámetro α según la rugosidad del terreno. [6]

2.3. Aprovechamiento del viento en la Península

La caracterización y la comprensión de la variabilidad del viento han despertado gran interés recientemente. Un mejor conocimiento del comportamiento del viento podría beneficiar a varios sectores, como las energías renovables, en concreto la energía eólica, el estudio de la erosión costera, o el transporte de aerosoles y contaminantes

Velocidad y dirección del viento responden de una manera compleja a los cambios en la circulación a gran escala, los flujos de energía de superficie y la topografía. Como resultado, los campos de viento presentan una alta variabilidad en diferentes escalas temporales y espaciales.

Si la Península fuese más llana y su altitud media bastante inferior a la real, entonces los mapas de isobaras medias, al nivel del mar, nos darían una fiel imagen esquemática de la circulación media del aire, ya que de acuerdo con las leyes de la dinámica atmosférica, y descartando los efectos perturbadores del relieve y del rozamiento con el suelo, el aire fluye siguiendo aproximadamente la dirección de las isobaras. Pero debido a la compleja orografía de la Península Ibérica, hay una gran influencia en la distribución espacial de las distintas regiones de viento.

En base a los estudios y como se puede observar en la siguiente figura, se concluyó que las zonas con más viento en la Península Ibérica son la costa gallega, el valle del Ebro y el Estrecho de Gibraltar junto con otros puntos dispersos ubicados en altitudes elevadas, mientras que las zonas menos ventosas se encuentran principalmente a lo largo de la costa mediterránea y el valle del Guadalquivir [3].

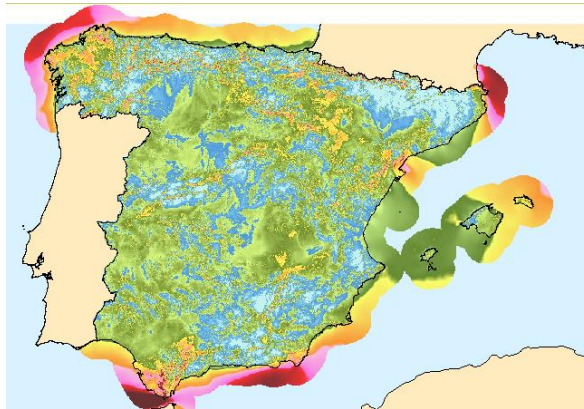


Figura 3 – Velocidad del viento en España para a 80m [3].

En este epígrafe se da a conocer valores de velocidad del viento que son necesarios para ver corrientes en diferentes zonas, y un valor de velocidad del viento necesario, ya definido por estudios previos.

2.4. Toberas

Una tobera es un dispositivo que convierte la energía térmica y de presión de un fluido (conocida como entalpía) en energía cinética. Como tal, es utilizado en turbomáquinas y otras máquinas, como inyectores, surtidores, propulsión a chorro, etc. El fluido sufre un aumento de velocidad a medida que la sección de la tobera va disminuyendo, por lo que sufre también una disminución de presión y temperatura al conservarse la energía.

La tobera es la encargada de convertir energías, adaptando las presiones y velocidades de los gases eyectados. Son de uso común a régimen de vuelo subsónico ($M < 1$) y supersónico ($M > 1$). En el caso supersónico se hace necesaria la existencia de un sistema de ondas de choque al inicio del difusor de entrada para decelerar el fluido y así producirse la combustión en condiciones óptimas.

Como anteriormente se ha nombrado, en la tobera, el fluido sufre un aumento de velocidad a medida que la sección de la tobera va disminuyendo, por lo que sufre también una disminución de presión y temperatura al conservarse la energía. Es comúnmente utilizada en turbomáquinas y otras máquinas, como inyectores, surtidores, propulsión a chorro, etc. En cambio, un difusor es un dispositivo que aumenta la presión de un fluido, es una tobera invertida por lo tanto el área de entrada es menor que el área de salida y por consiguiente la velocidad se disminuye dentro del difusor.

Debido a los cambios que hay en la velocidad el cambio en la energía cinética es bastante apreciable y como el fluido experimenta poco o ningún cambio en la elevación la energía potencial es despreciable. Son muchos los avances en cuanto al tema de las toberas, primeramente orientados a la mejora de aeronaves ya sea en la mejora de la velocidad, la eficiencia del fluido, la potencia del motor y muchos otros aspectos.

Hoy en día sabemos que estos dispositivos no se utilizan principalmente en turbinas de aeronaves sino en muchos otros dispositivos de la vida diaria, por ejemplo podemos observar difusores en las regaderas de baño, en mangueras de jardín e incluso en aspersores, todos estos a fin de manejar el fluido según se necesite. En cuanto a toberas podemos mencionar muchos usos en la rama de la mecánica, en los motores existen una infinidad.

Para el estudio de estos dispositivos se deben suponer algunas condiciones ya que de esta manera se facilita el trabajo y se pueden desarrollar modelos para acercarse un poco a los fenómenos reales. Entre estas suposiciones están las siguientes:

- Son isentrópicas (se trataría de un proceso reversible, sin pérdidas), y por tanto adiabáticas (no hay una transmisión de calor del fluido a la tobera o al exterior).
- Se mantendría en régimen estacionario (con lo cual, el flujo másico de fluido (compresible) que se desplaza a lo largo de la tobera permanecería constante todo a lo largo de la misma).

Estas condiciones hace que una simulación difiera de la realidad, y que los resultados sean aproximaciones las cuales sirva de apoyo y base para entender un problema, y en cierta medida extrapolarlo a la realidad.

2.5. Método de optimización

Para realizar la optimización de una forma geométrica, en la actualidad existen diferentes métodos y programas. En concreto para este trabajo, se pretende conocer el cuerpo en una estructura general del proceso de optimización

Optimización usando Ansys

➤ Visión general

Considerar todos los parámetros que pueden tener influencia a la hora de realizar la optimización de la geometría. Una correcta selección asegura, bajo coste de simulación, facilidad de manejo de parámetros, y una correcta conducción del problema hacia una solución.

➤ Diseño del experimento

Con mucho menos esfuerzo que en un simple lanzamiento, se puede usar un software para crear un diseño de experimento de un lanzamiento con muchas variaciones.

➤ Respuesta tras la simulación

El definir de manera exactiva los parámetros, facilita un entendimiento de los parámetros de salida, para una mejor interpretación de los mismo facilitando la actuación sobre los parámetros de entrada.

➤ Resultado u objetivo hacia el cual se dirige la optimización

Uso de un algoritmo de optimización junto con una visualización gráfica del problema para una mejor interpretación y descubrimiento del diseño candidato

Dentro del programa Ansys a su vez podemos encontrar diferentes herramientas o toolbox las cuales permiten realizar una optimización de la geometría:

- Ansys DesignXplorer
 - Unified Workbench solution
- Ansys Fluent
 - Built-in morphing and optimization tools
 - Adjoint Solver
- Ansoft optimerics
- Ansys MAPDL
 - DX VT
- Icepak Optimization

Una buena simulación es aquella que en tres grandes pasos es capaz de obtener una solución óptima:

1. Identificación de los parámetros claves del diseño o del propio diseño.
2. Identificación de la caracterización de la actuación o del diseño con respecto a la variación de los parámetros de diseño.

3. Tomar la correcta decisión basadas en la correcta información con las herramientas apropiadas.

Como resumen general del uso de Ansys se puede obtener:

- Disponibilidad de la exploración de un extenso diseño y fácil optimización y con un mínimo esfuerzo para simulaciones simples
- Rápido procesado de la optimización del diseño bajo criterio propio
- Requiere entendimiento de ingeniería para la fase de elección de parámetros y actuación

2.5.1. Ansys Fluent

ANSYS, es un software de simulación ingenieril. Está desarrollado para funcionar bajo la teoría de elemento finito para estructuras y volúmenes finitos para fluidos [7].

ANSYS está dividido en tres herramientas principales llamados módulos: pre-procesador (creación de geometría y mallado), procesador. Tanto el pre-procesador como el pos-procesador están provistos de una interfaz gráfica.

Este procesador de elemento finito para la solución de problemas mecánicos incluye: análisis de estructuras dinámicas y estáticas (ambas para problemas lineales y no lineales), análisis de transferencia de calor y fluidodinámica, y también problemas de acústicas y de electromagnetismo.

Normalmente el uso de estas herramientas se utiliza simultáneamente logrando mezclar problemas de estructuras junto a problemas de transferencia de calor como un todo. Este software es usado también en ingeniería civil y eléctrica, física y química.

La mayoría de los errores y desventajas de ANSYS, más que basarse en el programa mismo, se basan en el elemento finito utilizado por el programa para realizar los análisis.

- La solución otorgada por el programa es una compleja mezcla de cálculos discretos. Y los esfuerzos, temperaturas y otras propiedades representan parámetros continuos. Dicho esto, los resultados arrojados por ANSYS son aproximaciones que dependerán del número de elementos utilizados.
- La geometría del objeto que se deseé analizar, puede generar errores en la solución debido a que si el mallado realizado no mantiene ciertos parámetros en rangos predeterminados como son los ángulos de las aristas, así como las relaciones de tamaño en las aristas, el método puede fallar en un punto lo cual afecta la convergencia del sistema.
- La densidad de elementos utilizados se debe parametrizar de manera manual. Es decir el usuario debe hacer diferentes iteraciones en ANSYS para que esto permita llegar a una conclusión en los cuales los valores sean fiables. Esto genera gran coste computacional y de tiempo por parte del usuario.
- Debido a la utilización de un rango discreto en cuanto a las propiedades de la materia, se debe aumentar la cantidad de puntos en el mallado del objeto para obtener resultados más precisos.

- El tipo de elemento, así como algunas propiedades son definidas por el usuario de forma manual, lo cual genera errores de tipo humano en la utilización de ANSYS, que en ocasiones el programa no muestra una alerta sobre los rangos normalmente utilizados.

2.5.2. Fluent Adjoint Solver

La forma de las toberas como dispositivo de aumento de la velocidad del aire utilizado para cualquier dispositivo o sistema está previamente estudiado como elemento que produce una aceleración del fluido, es decir, un gran estudio en secciones de entrada y salida, pero se suele obviar más el tránsito entre ambas secciones. Como resultado, la forma de los conductos puede ser compleja, siendo muy difícil encontrar una geometría óptima. Para acelerar el proceso de desarrollo de este tipo de conductos y encontrar una solución que minimice la caída de presión entre sus extremos se ha utilizado “ANSYS Fluent Adjoint Solver”. Con esta herramienta, tras haber obtenido una solución con el solver original de ANSYS Fluent y haciendo uso del módulo Adjoint, se puede identificar las regiones de la superficie más sensibles a cambios respecto a la caída de presión. Estos datos pueden ser usados como entradas para una modificación del volumen o superficie y la forma puede ser optimizada.

Existen muchos métodos de optimización, pero presentan limitaciones en cuanto al tiempo y al número de variables de diseño. El módulo de Adjoint se fundamenta en el método basado en el gradiente. Este método puede hacer frente a muchas variables de diseño.

El gradiente de una función es el factor clave para las posteriores optimizaciones de la forma. Se pueden obtener las sensibilidades de una función en base a muchas variables de diseño llevando a cabo un único cálculo. Posteriormente el método de adaptación de la malla de ANSYS Fluent, ajusta el sistema de manera que maximiza el efecto del cambio. En zonas donde hay altos valores de sensibilidad, pequeñas variaciones de la forma ocasionarán un gran impacto en la función objetivo.

El método Adjoint ha sido utilizado principalmente como herramienta de optimización en la industria aeronáutica. Fue desarrollado originalmente por Lions y Pironneau en los años setenta.

En el presente proyecto, el método Adjoint se centra en flujo interno en conductos, siendo la caída de presión nuestra función objetivo.

Se comienza con una parte teórica en la que se explica el funcionamiento interno del solver Adjoint. Posteriormente se describe la metodología utilizada para la optimización de conductos. El objetivo final de este proyecto es la optimización de una tobera que provoca la aceleración del fluido a su entrada a una turbina.

2.6. Mallado

La generación numérica de mallas juega un papel fundamental en cualquier problema computacional científico en el cual la geometría de una región sea compleja o cuando la solución tiene una estructura muy complicada.

Aún con las actuales herramientas de software, la generación de mallas en un problema computacional científico se lleva una gran parte del esfuerzo necesario para resolver el problema.

Propiedades que deben tener las mallas

- Tipo geométrico:
 - La variación de tamaño entre los elementos adyacentes debe ser progresiva.
 - La densidad de elementos en algunas regiones de la malla debe ser más altas. Esto sucederá en aquellas zonas que necesitemos un elevado gradiente de soluciones.
 - En las mallas de elementos triangulares se deben evitar los ángulos obtusos.
 - En general, los elementos deben ser suficientemente regulares y satisfacer ciertas propiedades relativas a su forma: distorsión, esbeltez,...
- Tipo físico:
 - Puede haber aspectos físicos del problema que condicionen la geometría de los elementos: anisotropía, formas de los elementos impuestas,

Técnicas o algoritmos de mallado

Existen distintas técnicas o algoritmos para definir una malla:

- Manual o semi-automático.
- Métodos basados en la transformación de un dominio con geometría simple.
- Métodos basados en la solución de un sistema de ecuaciones en derivadas parciales.

- Métodos basados en la deformación y modificación local de una malla sencilla.
- Métodos basados en la composición de mallados de subconjuntos del dominio a mallar, obtenidos por métodos del tipo 2 o 3.
- Métodos automáticos que obtienen la malla final, elemento por elemento, a partir de la definición del contorno:
 - Métodos de avance frontal.
 - Algoritmos basados en la construcción de Voronoi-Delaunay.

Los elementos tetraédricos son más adecuados para discretizar formas geométricas complejas y son menos sensibles a la forma inicial del elemento. Si la función de forma es de primer orden resultan normalmente más rígidos y requieren una malla muy fina para obtener resultados fiables, aunque se debe considerar su menor coste computacional.

Los elementos hexaédricos permiten obtener soluciones de exactitud equivalente con un coste computacional menor. Estos elementos tienen una sensibilidad menor a la orientación del mallado, siendo recomendable su uso en problemas con dificultades de convergencia. Los elementos de primer orden funcionan mejor si su forma es aproximadamente rectangular.

3. FLUENT ADJOINT SOLVER

De entre todos los métodos de optimización de geometrías expuestos en capítulos anteriores, por todas las ventajas nombradas, en especial tiempo, y coste haciendo de esta herramienta y medio de alta potencia, este proyecto se centrará en la optimización de la geometría de una tobera mediante la toolbox de Fluent Adjoint Solver.

3.1. Método de optimización

El desarrollo de métodos de optimización de la forma unidos con la mecánica de fluidos computacional ha sido un tema investigado durante décadas. La necesidad de reducir el tiempo invertido en el ciclo de desarrollo, desde el inicio hasta el producto final, ha conducido a la aparición de diferentes metodologías de optimización.

Un factor clave que define la utilidad de un método de optimización es la habilidad de manejar muchas variables de diseño, como múltiples modificaciones de forma en la geometría dada. A continuación se muestran algunos métodos de optimización:

- Intuición: su efectividad disminuye con el aumento de las dimensiones del problema.
- Rejilla o de búsqueda aleatoria: el coste de buscar los espacios de diseño se incrementa rápidamente con el número de variables de diseño.
- Evolutivo/ Algoritmos genéticos: son buenos para variables de diseño discretas, muy robusto. No es factible al usar un

gran número de variables de diseño.

- Simplex no lineal: es simple y robusto pero ineficiente para más de unas pocas variables de diseño.
- Basado en el gradiente: es el más eficiente para un gran número de variables de diseño. Se asume que la función objetivo tiene un “buen comportamiento”.

El método basado en el gradiente puede hacer frente a muchas variables de diseño, resolviendo el gradiente de la función coste, el cual es un factor clave para adicionales optimizaciones de forma.

Ya que en la optimización de conductos están implicadas muchas variables de diseño, se aplica el método basado en el gradiente para obtener la forma óptima con respecto a una función objetivo, en nuestro caso la caída de presión.

El enfoque adjoint requiere menos tiempo computacional para derivar el gradiente de la función coste que con el método de diferencias finitas, principalmente se debe al hecho de necesitar una única resolución para obtener el gradiente, siendo independiente de las variables de diseño.

Al implementar el Adjoint solver se puede usar un enfoque continuo o un enfoque discreto.

El enfoque continuo del Adjoint depende fuertemente en las propiedades matemáticas de las ecuaciones diferenciales en derivadas parciales que definen la física del problema. En este caso, las ecuaciones de Navier-Stokes. Con este enfoque, un conjunto de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales adjuntas son formuladas explícitamente y son acompañadas por las condiciones de contorno adjuntas que son también derivadas matemáticamente. Una

vez que se ha completado la derivación, las ecuaciones diferenciales adjuntas pueden ser discretizadas y resueltas.

Como solver presenta la ventaja de estar desacoplado del solver de flujo original pero las inconsistencias en el modelado, discretización y solución pueden ensuciar significativamente la información de sensibilidad.

El enfoque discreto del Adjoint no está basado en la forma de las ecuaciones diferenciales en derivadas parciales que gobiernan el fluido, sino en la forma particular y discretizada de las ecuaciones usadas en el solver de flujo principal. En este enfoque el solver Adjoint está más unido a la implementación específica del solver de flujo original. ANSYS Fluent ha adoptado el enfoque discreto para implementar este módulo.

3.2. Enfoque discreto del adjoint

El método Adjoint puede ser usado para obtener la derivada de un parámetro observable de interés del sistema fluido respecto a cualquier parámetro especificado por el usuario.

Los tres pasos claves para desarrollar el método, son los expuestos en los siguientes tres epígrafes:

3.2.1. Entradas especificadas por el usuario

En primer lugar como entrada principal se ha de definir las entradas del problema. Estos valores serán datos previos y conocidos:

- Todos los valores establecidos por el usuario en los contornos (condiciones de contorno).

- La malla computacional. Más específicamente la localización de los nudos de la malla y cómo estos definen las aristas, caras y celdas usadas en el cálculo en los volúmenes finitos. Incluye los nudos interiores y de contorno.
- Propiedades de los materiales.
- Parámetros del modelo, como los coeficientes para modelos turbulentos.

Los parámetros que definen el problema han sido diferenciados de los parámetros que definen cómo el avance de la solución se lleva a cabo para que el problema converja. Se denota con la letra c al vector de todos los valores antes mencionados. Estas serán consideradas las variables de control del problema, es decir, las variables que el usuario puede establecer explícitamente y afectan a la solución. En este apartado veremos detalladamente cómo crear cada uno de los distintos elementos del texto.

3.2.2. Ecuaciones gobernantes del sistema de fluidos

El esfuerzo principal en el cálculo reside en la determinación del estado del flujo, velocidad, presión, densidad y otras propiedades relacionadas. Para una estrategia de volumen finito centrada en la celda, el estado del flujo está definido en el centroide de la celda por un vector de valores reales. En el caso más simple esos valores son los componentes de presión y velocidad del flujo. Se denota al vector de variables en la v -ésima celda como q^v .

Una vez convergida la solución, las variables del flujo satisfacen:

$$R_i^u = (q^0, q^1, \dots, q^{M-1}; c) = 0 \quad (7)$$

$$\mu = 0, \dots, M - 1$$

$$i = 0, \dots, L - 1$$

Donde M es el número de celdas en el problema y hay L condiciones en cada celda. Esta expresión es una forma compacta de escribir la conservación de la masa, momento y otras restricciones

3.2.3. Parámetros observable de interés

$$J(q^0, q^1, \dots, q^{M-1}; c) = 0 \quad (8)$$

Dejamos que J denote un escalar de interés que depende del estado del flujo y de las variables de control. Se asume que el observable es diferenciable respecto a ambos.

La meta es determinar la sensibilidad del observable respecto a las variables de control especificadas por el usuario. Si varían las entradas varía el estado del flujo, el cual indirectamente hace que varíe el parámetro observable de interés. El método Adjoint tiene un papel específico gestionando esta cadena de influencias al proveer un mecanismo para la eliminación de los cambios específicos que ocurren en el flujo cada vez que las entradas cambian.

Si se introduce una variación δc_j en las variables de control, entonces una linealización de las ecuaciones gobernantes muestra que las variaciones en el estado del flujo δq_j^v debe satisfacer:

$$\frac{\partial R_i^u}{\partial q_j^v} \delta q_j^v = \left. \frac{\partial R_i^u}{\partial c_j^v} \right]_q \delta c_j^v \quad (9)$$

$$\mu = 0, \dots, M - 1$$

$$i = 0, \dots, L - 1$$

Donde se entiende una sumatoria sobre j y v , y q denota que la solución del flujo se mantiene constante mientras la derivada se lleva a cabo.

Si las variables de control y el estado del flujo cambian, entonces el parámetro observable cambiará:

$$\partial J = \left. \frac{\partial R_i^u}{\partial q_j^v} \partial q_j^v + \frac{\partial R_i^u}{\partial c_j^v} \right]_q \delta q_j^v \quad (10)$$

La forma en que el flujo responde a los cambios en las variables de control puede ser calculada usando la ecuación (9) después de elegir los cambios específicos en δc_j .

A causa del tiempo de cálculo excesivo, se eliminan las variaciones de la solución del flujo de la expresión (10). Se produce una relación explícita entre los cambios en las variables de control y el observable de interés.

Esto se logra mediante la adopción de una combinación lineal ponderada de las ecuaciones gobernantes (9) de una forma particular. Un conjunto de variables adjuntas q_i^u es introducida con una correspondencia directa con las ecuaciones gobernantes (7). Esto resulta en la relación:

$$\left[q_i^u \frac{\partial R_i^u}{\partial q_j^v} \right] \delta q_j^v = -q_i^u \left. \frac{\partial R_i^u}{\partial c_j^v} \right]_q \delta c_j^v \quad (11)$$

El término entre corchetes a la izquierda se corresponde con el coeficiente de variación del flujo en la ecuación (9) con el fin de definir

los valores para las variables adjuntas:

$$q_i^u \frac{\partial R_i^u}{\partial q_j^v} = \frac{\partial J}{\partial q_j^v} \quad (12)$$

Estas son las ecuaciones adjuntas discretas, la solución de este sistema es el objetivo principal del Adjoint solver. Es importante reconocer que estas ecuaciones no se han derivado. Han sido definidas de esta manera con un objetivo específico en mente, la eliminación en la ecuación (9) de las perturbaciones en el campo fluido como se muestra a continuación:

$$\begin{aligned} \delta J &= \left. \frac{\partial R_i^u}{\partial q_j^v} \right|_q \delta q_j^v + \left. \frac{\partial R_i^u}{\partial c_j} \right|_q \delta c_j = q_i^u \left. \frac{\partial R_i^u}{\partial q_j^v} \right|_q \delta q_j^v + \left. \frac{\partial J}{\partial c_j} \right|_q \delta c_j \\ &= \left\{ \left. \frac{\partial J}{\partial c_j} \right|_q - q_i^u \left. \frac{\partial R_i^u}{\partial c_j} \right|_q \right\} \delta c_j \end{aligned} \quad (13)$$

Nótese el uso de la ecuación (11) y la ecuación (12) en la derivación de la Ecuación (13). La perturbación de flujo ha sido ahora eliminada de la expresión, dando una relación directa entre las variables de control y el parámetro observable de interés.

Hay varias observaciones importantes sobre la ecuación (12):

- La dimensión del problema a resolver es el mismo que el problema de flujo original, aunque el problema del adjunto es lineal.
- Mientras que la solución adjunta puede considerarse estrictamente como un vector de valores numéricos, la experiencia con el método continuo del adjunto proporciona una orientación sobre cómo se puede interpretar la solución.

El vector asociado a los componentes de los residuales de la ecuación del momento en cada celda se denota con la velocidad del adjunto. El valor adjunto asociado con el residual de la ecuación de continuidad se denomina presión del adjunto.

- El lado derecho se define exclusivamente sobre la base del observable que es de interés.
- La matriz en el lado izquierdo es la transpuesta del jacobiano de las ecuaciones que gobiernan el sistema, ecuación (7). Esta transposición aparentemente inocente tiene un fuerte impacto en cómo el sistema adjunto está resuelto.
- Las ecuaciones adjuntas se definen por el estado actual del flujo y la física específica que se emplea en el modelado. Cada solución del adjunto es específica para el estado de flujo.

A primera vista parece que la resolución del problema adjunto puede ser sencilla. Después de todo, simplemente implica creación y resolución de un sistema lineal de ecuaciones. En la práctica, ambas medidas pueden representar un desafío importante, sobre todo cuando el problema es grande.

3.3. Uso de los datos de sensibilidad para mejorar diseño

Los datos de sensibilidad del Adjoint se pueden utilizar para guiar cómo modificar un sistema con el fin de mejorar el rendimiento. El observable de interés se puede hacer más grande o más pequeño, dependiendo del objetivo que se persiga.

Una estrategia común para decidir cómo modificar el sistema se basa en el algoritmo de gradiente. El principio subyacente es, sencillamente, que la modificación de un sistema en las zonas más sensibles maximiza el efecto del cambio. El cambio en una variable de control se realiza en proporción a la sensibilidad del valor de interés con respecto a esa variable de control.

Se denota la sensibilidad del costo con respecto a la forma como sigue

$$\partial J = \frac{\partial J}{\partial x_j^n} \delta x_j^n \quad (14)$$

Dónde x_j^n es la j -ésima coordenada del n -ésimo nodo de la malla. Aquí x_j^n es una notación para el subconjunto de las variables de control c_j del sistema que se corresponden a las posiciones de los nodos de malla.

$$\delta x_j^n = c \frac{\partial J}{\partial x_j^n} \quad (15)$$

Entonces, proporcionará el máximo ajuste a J para una determinada norma L2 de δx_j^n , donde c es un factor escalar arbitrario. Se tiene en cuenta que este factor puede ser elegido para ser positivo o negativo dependiendo de si J va a ser aumentado o disminuido respectivamente. Por otra parte, se estima que el cambio de primer orden es:

$$\delta J = c \frac{\partial J}{\partial x_j^n} \frac{\partial J}{\partial x_j^n} \quad (16)$$

Para un ajuste suficientemente pequeño, el cambio en el observable tendrá estrictamente el mismo signo que el factor de escala c , Siempre que el gradiente no sea idénticamente cero.

En las regiones donde la sensibilidad es alta, pequeños ajustes en la forma geométrica tendrán un gran efecto sobre el observable de interés. Si una configuración muestra sensibilidades altas, entonces el rendimiento probablemente estará sujeto a grandes variaciones si hay inconsistencias de fabricación. Para un diseño robusto, el objetivo es que la sensibilidad sea tolerablemente pequeña.

3.4 Suavizado y modificación de la malla

Como se ha señalado, para los problemas típicos de ingeniería, el campo de sensibilidad de forma puede tener propiedades de suavizado que no son suficientes para definir una modificación de la forma. La tecnología de modificación de la malla se utiliza aquí tanto para sistemas de dos y tres dimensiones con una doble funcionalidad. La primera función es suavizar el campo de sensibilidades de la superficie. La segunda función es proporcionar suaves distorsiones no sólo de la frontera de malla, sino también en la malla interior.

Se utiliza un volumen de control rectangular que encierra los contornos, o parte de ellos, cuya forma se quiere modificar. Una serie regular de puntos de control se distribuye en el volumen de control.

En este punto, las propiedades de los polinomios de Bernstein son usadas para definir un mapeado con un sistema coordenado local.

Las coordenadas estándar, x^k , de cada nodo frontera y del interior de la malla, situado dentro del volumen de control, se definen por una coordenada local, (u_k, v_k) . En un volumen de control, con $l \times m$ puntos

de control, la relación lineal entre la k -ésima posición de los nodos en la malla y la ij -ésima ubicación del punto de control es

$$x^k = \sum_{i,j}^{l,m} \xi^{i,j} B_{i,j}(u_k) B_{j,m}(v_k) \quad (17)$$

donde $B_{i,l}(u)$ es el i -ésimo polinomio de Bernstein de grado l ,

$$B_{i,j}(u) = \binom{l}{i} u^i (1-u)^{l-i} \quad (18)$$

Y ξ_{ij} denota la coordenada del ij -ésimo punto de control.

Si la matriz regular de puntos de control se modifica moviendo uno o más puntos de control, el mapeo proporciona un suave reposicionamiento de los nodos de la red.

Ya se ha discutido cómo la variación del observable varía con la ubicación de los nodos de la malla:

$$\delta J = \frac{\partial J}{\partial x_j^n} \delta x_j^n \quad (19)$$

Usando el mapeado entre los nodos de la malla y los puntos de control, se observa que

$$\delta J = \sum_{i,j}^{l,m} \delta \xi^{i,j} W^{ij} \quad (20)$$

$$W^{ij} = \sum_n \frac{\partial J}{\partial x_j^n} B_{i,j}(u_n) B_{j,m}(v_n) \quad (21)$$

Donde es el punto de control del campo de sensibilidad, y $\delta\xi_{ij}$ denota el ajuste de la posición de los puntos de control.

Puesto que típicamente hay menos puntos de control que nodos en la malla, la operación de suma en la ecuación (21) tiene un efecto de suavizado en el campo de sensibilidad.

Un algoritmo de gradiente simple basado en la elección de

$$\delta\xi^{i,j} = cW^{ij} \quad (22)$$

conduce a una deformación de la malla de contorno suave, que mejora el diseño para un c suficientemente pequeño.

3.5 Procedimiento general

Se ha desarrollado una metodología para reducir la pérdida de presión en un sistema de conductos. En este apartado se describe el procedimiento general llevado a cabo para garantizar la optimización de los conductos.

Se puede observar un resumen del procedimiento seguido en la figura

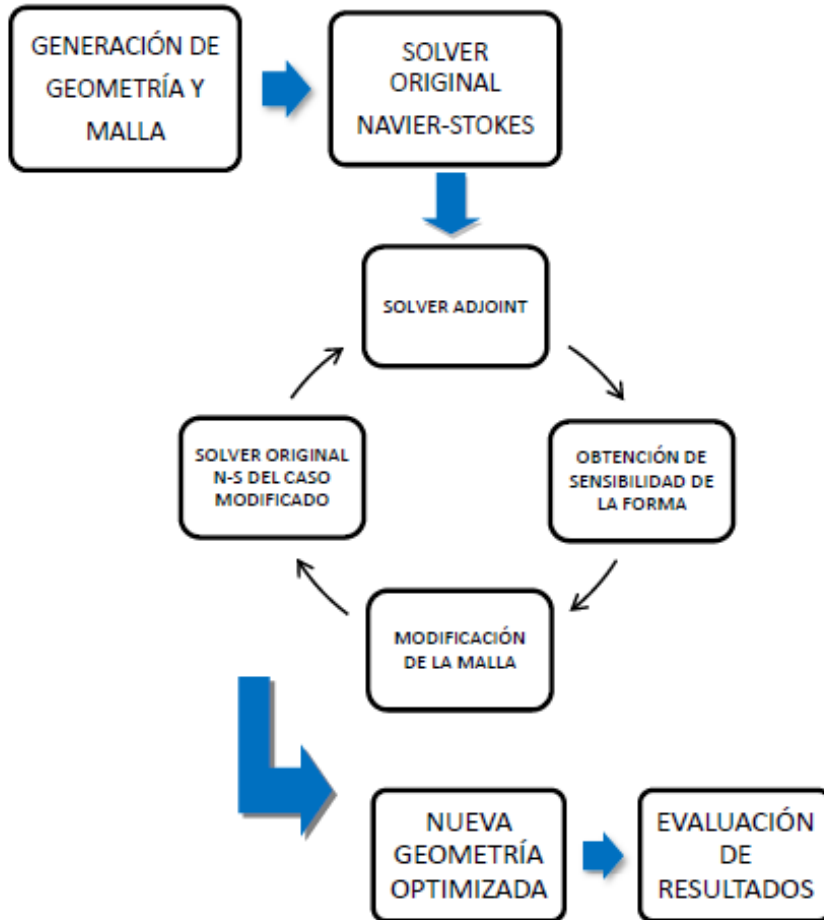


Figura 4 – Metodología Adjoint [7].

Se comienza con el diseño geométrico del sistema en estudio. Posteriormente se realiza el mallado de la geometría

convenientemente. Los primeros pasos son similares a los dados en cualquier simulación numérica llevada a cabo con ANSYS Fluent.

Tras obtener la solución dada por el solver original de Fluent se realiza otra simulación con el módulo Adjoint. Una vez que ambas soluciones han convergido completamente obtenemos el campo de sensibilidades del sistema. Esta información nos da una idea de los puntos donde la deformación será mayor. A continuación se utiliza la herramienta de modificación de la malla, antes de proceder nos informa del cambio pronosticado. Una vez aceptada la modificación de la forma disponemos de una malla diferente a la original. Se procede a resolver el caso con el solver original de Fluent y se comprueba que la solución obtenida efectivamente es mejor que la anterior. Se repite este bucle obteniendo sucesivas mejoras hasta alcanzar el óptimo o una solución que sea aceptable para nuestros propósitos.

Es importante recordar que este bucle se alimenta de una malla y una solución del flujo inicial. Si estas no son adecuadas los resultados obtenidos tampoco lo serán, rompiéndose el bucle al obtener divergencias en la solución y mallas con una mala calidad en sus celdas.

4. ÓPTIMIZACIÓN DE LA GEOMETRÍA DE LA TOBERA

Óptimización de la geometría como proceso de minimización de la presión entre la entrada y la salida al conducto bidimensional y tridimensional, modificando su geometría a excepción de la garganta de entrada y de salida, de tal modo que la forma obtenida de unos parámetros idóneos para el viento a la entrada a una turbina para el aprovechamiento energético.

4.1. Generación de geometría y malla 2D

Se realiza el diseño de un plano del túnel longitudinalmente por medio de la tobera de tal forma que se represente de forma esquemática la geometría en un plano 2D. Para ello se ha hecho uso de la herramienta CATIA V5, permitiendo de manera sencilla obtener la siguiente geometría:

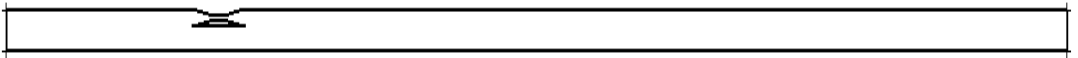


Figura 5 – Generación de 2D con Catia V5.

En esta imagen se aprecia 4 zonas bien diferenciadas, y que se han de tener en cuenta a la hora de realizar el mallado. La primera corresponde a la sección de entrada, extremo izquierdo anterior a la

zona de la tobera, comprende una longitud de 52.400 m y una sección transversal y constante a la entrada y salida de 8.200 m. Segunda zona, perteneciente a la tobera. La sección de paso de la tobera es de 3.2 m, reduciendo dicha sección hasta alcanzar una diámetro de 1.07 m. Tercera zona, es la inmediatamente inferior a la tobera con una sección de 5 m y una longitud de aproximadamente 15.2 m, y por ultimo el tramo más largo y de salida de la tobera hacia exterior del túnel, comprende una longitud de 232.4 m.

El diseño se ha llevado a cabo cogiendo de manera individual puntos de una representación 3D de tal forma que la geometría sea lo más próximo a la realidad dimensionalmente. Importante destacar, y para evitar errores a posteriori, es que la geometría se encuentre totalmente cerrada y sobre un plano de dibujo adecuado al que se muestra en fluent.

Llevada a cabo la geometría se exporta en formato .igs para que con el mallador ICEM de Fluent de manera simple se pueda conseguir la malla.

El mallado bajo dicho programa se fundamenta en la obtención de bloques que de manera sencilla permite mallar por zonas diferentes areas con un número diferentes de elementos en cada bloque, bloques que previamente han sido identificados y que únicamente hay que dibujarlos en este software para mallar el elemento.

Por último y como paso final, hay que definir las zonas de interés de nuestro sistema antes de ser exportado como malla para fluent. Dentro de estas zonas, se identifican:

- Inlet: Como elemento dependiente de la velocidad del fluido.

- Tobera y Wall: Elementos tipo Wall en el cual la velocidad del fluido tiende a cero.
- Outlet: Elemento de salida con variable restrictiva la presión.

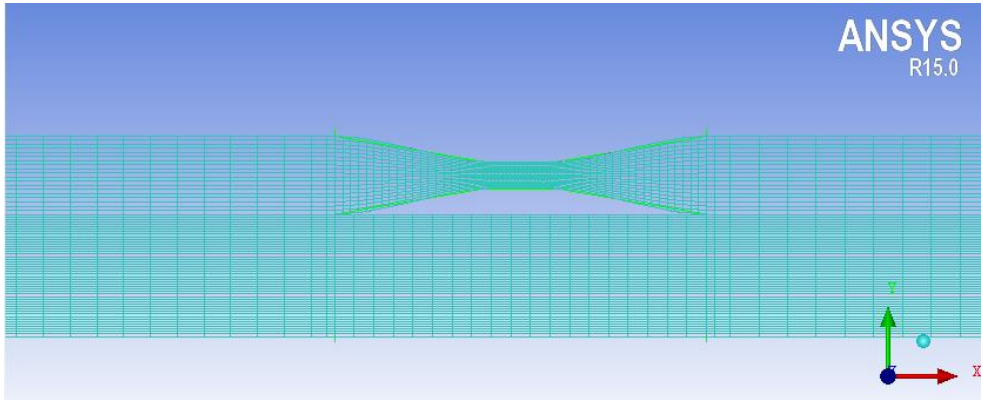


Figura 6 – Malla focalizada en la zona de la tobera.

En la figura superior, se ha realizado un detalle de la zona tobera, zona que se muestra como se ha reafinado la malla para que como anteriormente se ha nombrado, aumentar la precisión en la zona a optimizar nos lleve a unos resultados reales. El resto de la tobera, aguas arriba y abajo, se ha definido un mallado constante el cual permita reducir el coste computacional, pues no tendrá una repercusión sobre los resultados obtenidos. Llevada a cabo la geometría se exporta en formato .igs para que con el mallador ICEM de Fluent de manera simple se pueda conseguir la malla.

4.2. Resolución con Fluent 2D

Una vez definidas las condiciones de contorno de la geometría a estudiar, como son paredes, zona de entrada del fluido, zona de salida del fluido, se pasa a realizar la resolución del problema.

NOTA: El procedimiento a llevar a cabo para la resolución en 2D será el explicado de manera general en estos primeros apartados. Dicho como se ha de proceder, se optimizará la geometría actuando sobre cada zona de manera independiente para conocer cuál es el máximo porcentaje a optimizar y procediendo de forma similiar a la explicada.

Se determinan los parámetros generales de solución:

- Tipo: Pressure-Based.
- Formulación de la velocidad: absoluta.
- Tiempo: estacionario.
- Materiales: se han seleccionado los valores por defecto. Usamos aire para el fluido, con propiedades constantes y aluminio (para simplificar) para zonas tipo muro.
- Modelos: k-epsilon; Realizable; con funciones de pared estándar.

Condiciones de contorno:

A la zona llamada “inlet” se ha asociado “velocity inlet” y se ha establecido una velocidad de entrada de 3 m/s (aunque la velocidad mínima necesaria para poder generar electricidad se ha definido que era 5 m/s, se quiere estudiar con la introducción y optimización de la tobera que la aceleración del fluido en la sección central es superior a los requerimientos mínimos para generar electricidad) normal a la superficie de entrada. La temperatura definida son 300 K y constantes.

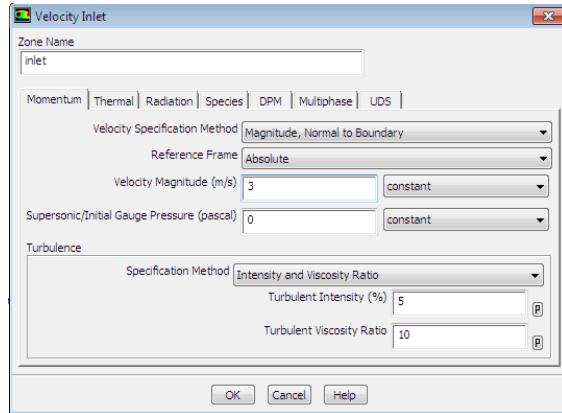


Figura 7– Parametros del fluido a la entrada.

La zona llamada “outlet” se establece como “pressure outlet”, fijando la presión a cero Pascales. Igualmente la temperatura son 300 K y constantes.

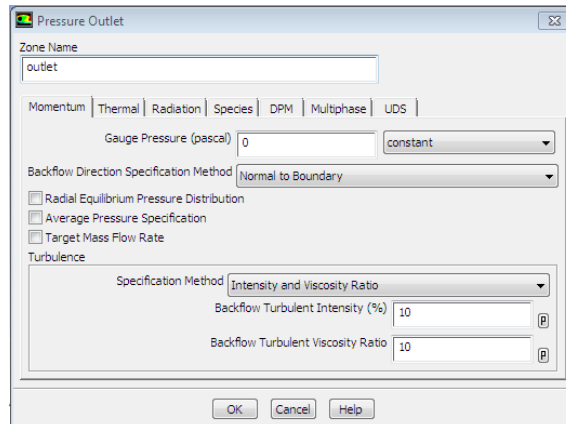


Figura 8 – Parametros del fluido a la salida.

Método de resolución:

Los parámetros seleccionados son los siguientes:

- Scheme → Coupled.

Discretización espacial:

- Gradient → Green Gaus Cell Based.
- Pressure → Standard.
- Momentum → First Order Upwind.
- Turbulent kinetic energy → First order upwind.
- Turbulent dissipation rate → First order upwind.
- Energy → First order upwind.

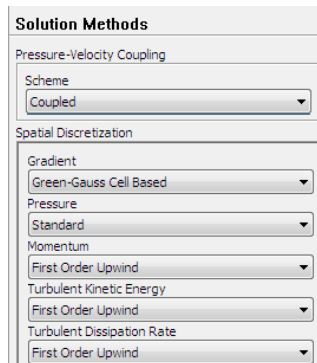


Figura 9 – Metodo de ecuaciones de resolución.

En la figura 10 se muestra una imagen del método de solución usado. Este ha sido elegido teniendo en cuenta las limitaciones establecidas por el módulo Adjoint el cual no soporta algunos métodos de resolución. Para evitar disparidad de resultados se ha definido el mismo modelo de resolución. No utilizar el mismo método en ambos

solucionadores puede conducir a una deterioración de la calidad de los resultados aunque en algunos casos puede ser práctico al aumentar la estabilidad en la solución.

Se configuran los monitores, se inicializa el programa, se establece el número de iteraciones y se lanza la simulación.

La gráfica de residuales obtenida para un caso es la siguiente:

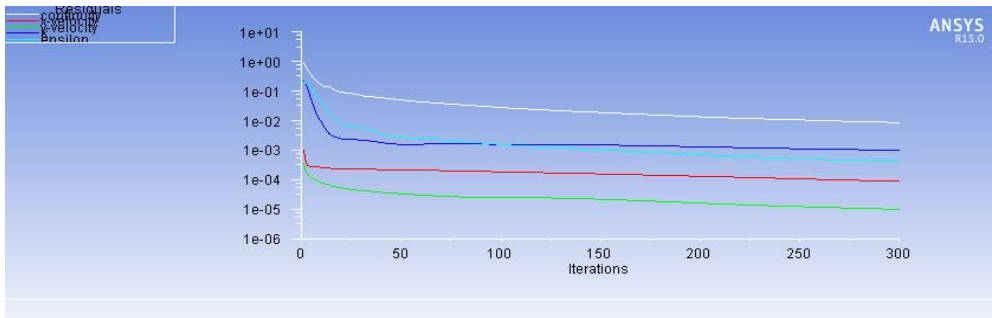


Figura 10 – Residuales de la solución inicial.

Como se puede apreciar en los residuales, no existe convergencia hacia valores pequeños dado que la solución de partida era bastante cercana a la solución. No obstante esta resolución asegura que tenemos un problema estabilizado en el cual se puede obtener una solución controlada.

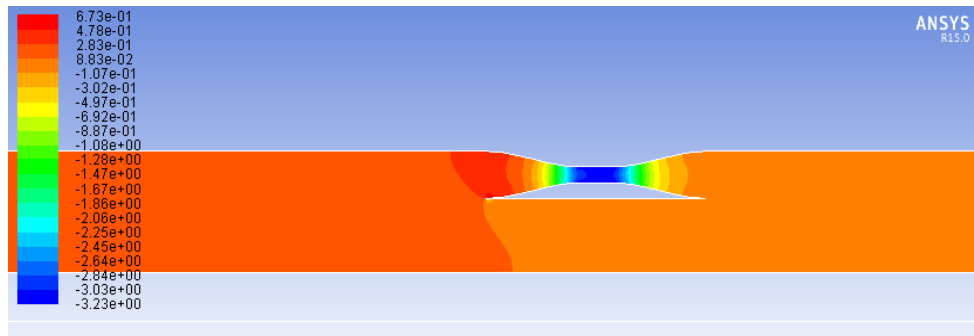


Figura 11 – Caída de presión sobre la tobera.

En la figura de la caída de presión se muestra la diferencia de presión que existe entre la entrada y la salida, siendo más pronunciada en la sección central de la tobera. Estos valores nos dan una primera intuición de como va a ser la velocidad del fluido en dicha sección. Es de interés mencionar, el salto de presiones que se produce en la esquina inferior de la entrada de tobera, ya que como se nombró anteriormente un ángulo obtuso (agudo en la zona contraria a la entrada) produce distorsiones.

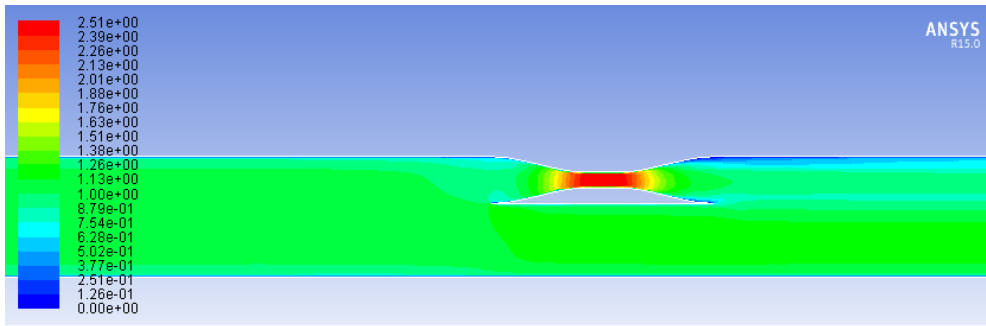


Figura 12 – Flujo de velocidades en la tobera.

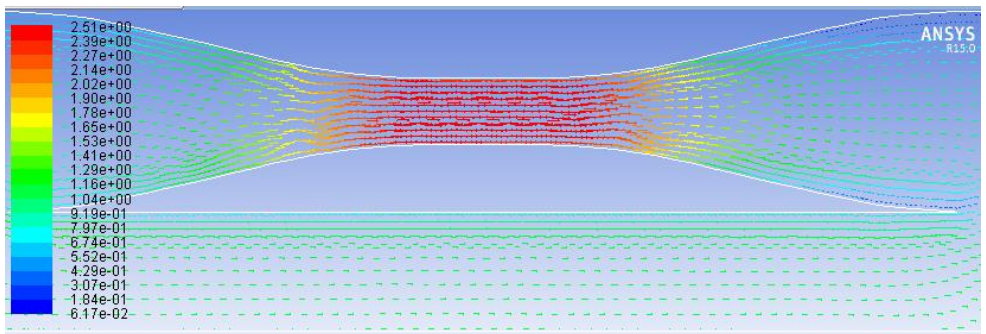


Figura 13 – Vectores de velocidad en el plano.

En ambas imágenes se presenta la velocidad del fluido a su paso por la tobera, ya que aguas arriba y abajo el flujo está estabilizado. De la imagen 13, merece la pena mencionar dos grandes factores, en primer lugar la recirculación o la pérdida de expansión del flujo a la salida de la tobera, factor que ha de interarse de evitar. Por otro lado la esquina inferior a la entrada de la tobera, la cual produce una pérdida de la velocidad del flujo y recirculación. La figura 14, muestra la ordenación y aceleración del flujo a su paso por la zona central. Como anteriormete se comentó, hay una gran relación entre la figura de la velocidad y presiones, ya que caídas de presiones producen aceleraciones y viceversa.

4.3. Módulo Adjoint 2D

El primer paso es cargar el módulo de Adjoint solver. Esto se realiza escribiendo en la interfaz de texto de ANSYS Fluent lo siguiente:

```
define ↵ models ↵ addon-module ↵
```

El uso del módulo Adjoint viene asociado a un cálculo anterior con el solver convencional de Fluent.

El Adjoint solver se implementa siguiendo los siguientes principios básicos:

- El estado del flujo debe ser estacionario, incompresible, flujo de una fase que puede ser laminar o turbulento yaciendo en un sistema de referencia inercial.
- Para flujos turbulentos se asume que es de tipo “frozen turbulence”. En estos casos el efecto de los cambios de estado de la turbulencia no se tiene en cuenta al calcular las sensibilidades.

- Para flujos turbulentos, en las paredes se emplea funciones de pared estándar.
- El Adjoint solver usa por defecto métodos de primer orden de precisión en espacio.
- Las condiciones de contorno sólo pueden ser del siguiente tipo:
 - Wall.
 - Velocity inlet.
 - Pressure outlet.
 - Symmetry.
 - Rotational and translation periodic.

4.3.1. Definición del parámetro observable de interés

El observable de interés que se define en este apartado es el parámetro respecto al cual se buscan las derivadas. En nuestro caso es la caída de presión.

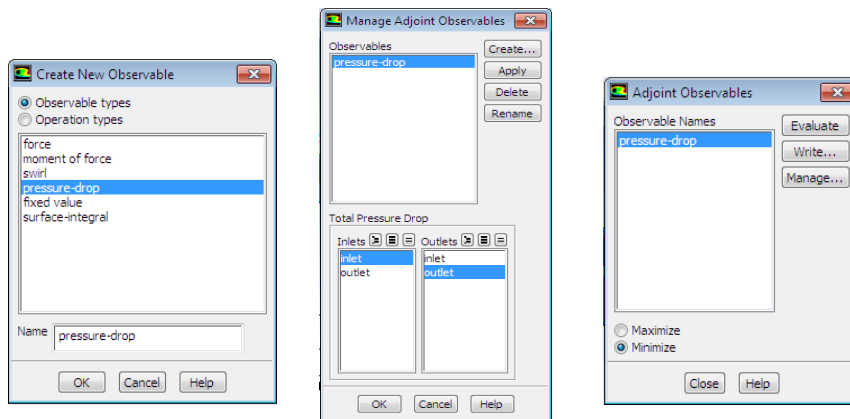


Figura 14 – Parámetros de evaluación de caída de presión.

En la figura superior se muestran por orden los cuadros de diálogo que nos permiten evaluar y gestionar el parámetro observable de interés.

Se pueden crear distintos tipos de observables haciendo clic en:

Adjoint → Observable...

En nuestro caso seleccionamos “pressure-drop”, en el segundo cuadro de diálogo elegimos las zonas de entrada y de salida respecto a las cuales se calculará la caída de presión. Finalmente en el tercer cuadro de diálogo tenemos la opción de maximizar o minimizar la pérdida de presión. En este cuadro, haciendo clic en el botón “Evaluate”, el programa calcula la cantidad especificada en función de las entradas y salidas seleccionadas. El valor mínimo de caída de presión según lo calculado son 0.25153944 Pa.

4.3.2. Definición del método de resolución

Se puede especificar el método para resolver el caso con Adjoint en el mismo cuadro de diálogo usado en el solver de Fluent convencional.

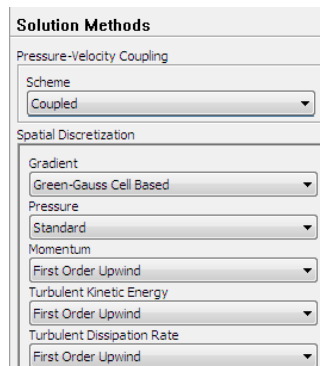


Figura 15– Método de resolución Adjoint.

Si se usa el mismo esquema para ambas soluciones el cálculo será más preciso. Como se dijo anteriormente, el Adjoint solver no soporta todos los esquemas que se pueden usar en el solver convencional.

4.3.3. Controles de solución del adjoint

Se dispone de un cuadro de diálogo para establecer los controles de solución. Se debe hacer clic en:

Adjoint → Controls...

Se puede elegir usar precondiciones seleccionando el recuadro de "Apply Preconditioning". Esto es necesario en muchos casos que involucran un flujo turbulento. Si se activa esta opción será necesario establecer un número de Courant para el cálculo. Un valor alto se corresponde con un avance agresivo del cálculo y riesgo de inestabilidad. Si deseccionamos esta opción estamos estableciendo un valor infinito para el número de Courant.

Se puede establecer el valor de compresibilidad artificial. Es razonable un valor de 1 o menor. También se puede seleccionar el valor para "Flow Rate Courant Scaling". Este valor debe ser mayor que cero, por defecto se establece el valor de uno.

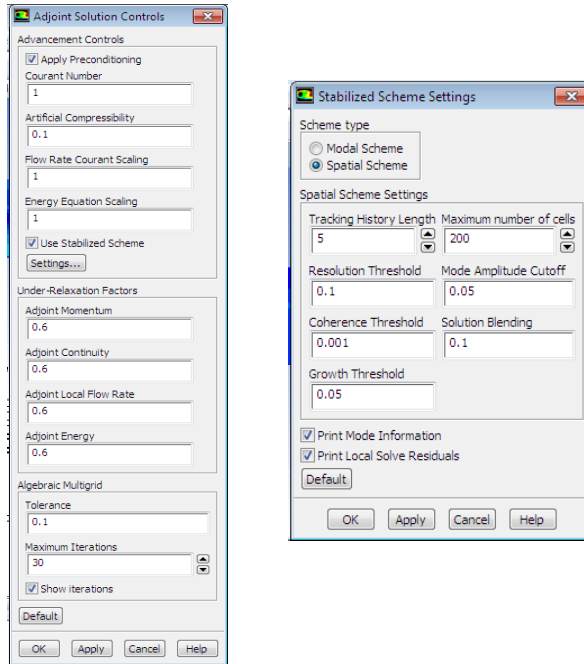


Figura 16 – Parámetros de control y esquema de estabilización.

Haciendo clic en el recuadro de “Use Stabilized Scheme” elegimos usar un programa de avance estabilizado de la solución. Haciendo uso del botón Settings... obtenemos el segundo cuadro de diálogo mostrado. El uso de este programa de estabilización será necesario para obtener la solución del Adjoint en problemas con un alto número de Reynolds y con geometría compleja.

“Tracking History Length” define el número de iteraciones que son empleadas en el proceso de identificación de inestabilidades. Se elige entre un rango de 2 a 5. Cuanto mayor sea, mejor es la calidad del proceso de identificación.

“Resolution Threshold” define un umbral de separación entre modos basada en su amplitud.

“Coherence Threshold” define un umbral que debe cumplirse para el acercamiento del modo a un crecimiento exponencial como el proceso de iteración.

“Growth Threshold” define el umbral de tasa de crecimiento para los modos inestables que se deben cumplir antes de que el algoritmo responda a la presencia del modo.

“Maximum Number of Cells” define un límite en el número de celdas para el que se aplicará la estabilización cuando se encuentra un modo inestable.

“Mode Amplitude Cutoff” define la fracción de la amplitud pico del modo, más allá del cual se incluirán las celdas para la estabilización.

“Solution Blending” define un factor de baja relajación para mezclar la parte de estabilización con el programa de avance estándar.

En el apartado de “Under-Relaxation Factors” se puede fijar el valor de “Adjoint Momentum”, “Adjoint Pressure” y “Adjoint Local Flow Rate”. Estos valores se encuentran en el rango de cero a uno. Un valor alto conduce a un algoritmo más agresivo, haciendo menos estable el cálculo. Un valor unidad se puede usar para casos simples sin dificultad. La figura 17 muestra como ha de quedar los campos y los valores de cada uno de ellos.

4.3.4. Configuración de los monitores y cálculo

El proceso de iteración y el monitorizado de la convergencia del Adjoint solver se controla en el cuadro de diálogo “Adjoint Residual Monitors”.

Adjoint → Monitors...

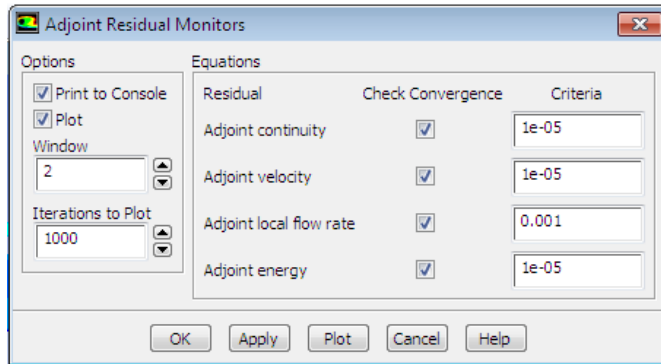


Figura 17 – Parámetros de monitorización.

En este apartado decidimos si queremos que se muestre por pantalla la evolución de los residuales, impreso o en gráfica. El número de iteraciones que se mostrarán y el valor usado como criterio de convergencia para cada caso.

Para lanzar la solución inicializamos y ejecutamos el solver de Adjoint en el cuadro de diálogo “Run Adjoint Calculation”

Adjoint → Run Calculaton...

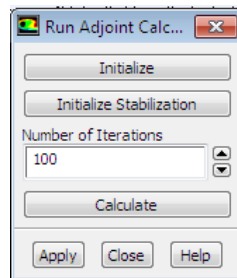


Figura 18 – Establecer el número de iteraciones.

Al inicializar establecemos el valor de la velocidad y presión del Adjoint a cero en todas las partes del dominio. Al hacer click en “Calculate”, lanzamos el Adjoint solver con el número de iteraciones indicado. En la siguiente gráfica se muestra la evolución de los residuales para un caso en concreto

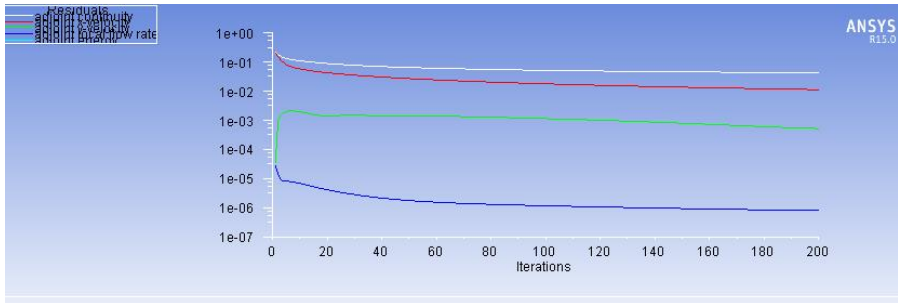


Figura 19 - Residuales bajo el módulo Adjoint.

De igual forma que para la solución general en la figura 19 se plotea los valores de la velocidad en la sección de la tobera. Como anteriormente se nombró, esta imagen muestra que la solución es estable pues los valores de entrada son parecidos a los de salida.

4.3.5. Pos-procesado de la solución adjoint

Una vez que se obtiene la solución, se puede hacer uso del pos-procesador. Este nos proporciona una gran cantidad de datos que nos permite conocer el efecto de realizar cambios en el sistema. La información obtenida con el pos-procesador es muy útil en el proceso de diseño del sistema a la hora de tomar decisiones.

Los datos de la solución obtenida con Adjoint se pos-procesan usando las herramientas del pos-procesador convencional de ANSYS Fluent.

En el cuadro de diálogo “Contours”, bajo “Sensitivities...” se pueden encontrar los siguientes campos:

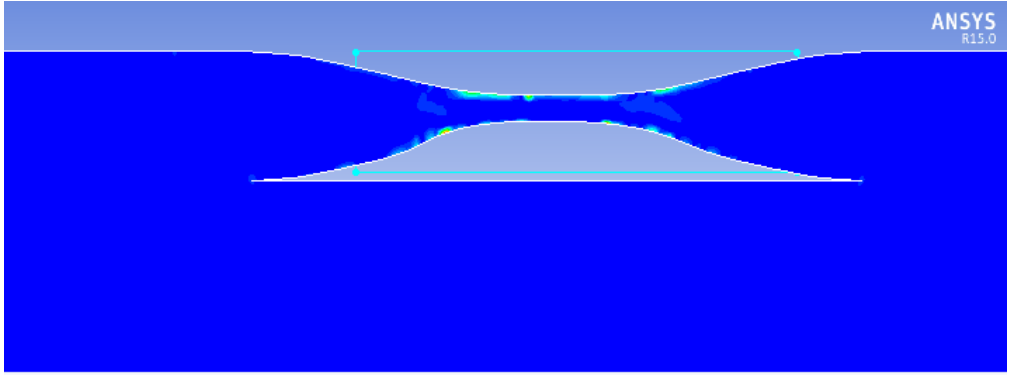


Figura 20 - Sensibilidad de la zona de la tobera.

La figura superior es de gran importancia, ya que esta nos da idea de como van a ser las modificaciones que se van a producir a la hora de realizar la optimización. Como se puede apreciar, las zonas más sensibles, y con ello las zonas más propensas a sufrir cambios, se encuentran en la zona anterior al estrechamiento, y en la zona centra. Como se ha definido en apartados anteriores, la zona central, a pesar de ser la que permita optimizar, debe de ser invariantes, con lo cual sobre ella no se ha de actuar.

Para la realización de este proyecto se ha creído conveniente visualizar los contornos del tipo “Shape Sensitivity Magnitude”. Este campo define la magnitud de la sensibilidad del observable (caída de presión) respecto a la deformación aplicada a la malla. Cuando se traza en la superficie del cuerpo, los lugares donde esta cantidad es grande indica que pequeños cambios en la superficie tendrán un gran efecto en el parámetro observable de interés. Si el valor de la sensibilidad es pequeño, entonces el efecto de realizar cambios en esa

región no tendrá relevancia en el observable.

A continuación se muestra los contornos de sensibilidad de la forma para nuestro problema.

Como se puede observar, los valores máximos de sensibilidad de la forma respecto a la caída de presión se da en la entrada del conducto. Los cambios de la malla en esa región tienen mayor efecto en la caída de presión.

Si se cambia el rango de valores de sensibilidad, eliminando los más elevados, obtenemos la siguiente distribución de sensibilidad.

NOTA: Está modificación sirva de ejemplo explicativo sobre el procedimiento a llevar a cabo para cada una de las iteraciones y modificaciones llevadas a cabo a lo largo de dicho documento.

4.3.6. Modificación de la geometría

Se dispone de una herramienta para la modificación de la malla interior y de contorno basándose en la solución del Adjoint. Las modificaciones se realizan usando un algoritmo de gradiente simple y esta herramienta permite llevar a cabo una optimización de manera interactiva como se muestra en el cuadro de diálogo "Control-Volume Morphing Control".

Adjoint → Controls-Volume Morphing...

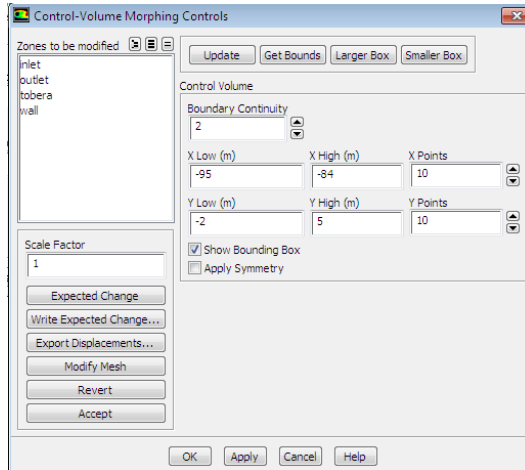


Figura 21 - Cuadro de coordenadas a modificar.

En la imagen superior, se muestra un cuadro de dialogo cuyos valores definidos para optimizar, son valores generales, y que han de definirse de manera especifica para cada una de las zonas a modificar sobre la tobera.

El procedimiento para deformar la malla es el siguiente:

1. Se seleccionan las zonas que pueden ser deformadas en “Zones to be modified”, en nuestro caso solo se deformará la superficie externa de la tobera. Las zonas que no sean seleccionadas y que intersecten al volumen de control harán frente a una restricción de no movimiento.

2. Se define un volumen de control dentro del cual la malla interior y de contorno será deformada. Se puede activar la opción “Show Bounding Box” que hará visible el volumen de control y el tubo en la ventana gráfica.

En “Boundary Continuity” establecemos el orden de continuidad del proceso de deformación en los límites del volumen de control. Este parámetro es relevante cuando el límite del volumen de control intersecta una pared. El orden de continuidad elegido controla la suavidad de la transición de la parte de la pared fuera del volumen de control, que no se va a deformar, y la parte interna que sí experimentará cambios.

Se puede introducir manualmente los puntos que definen el volumen de control y el número de puntos de control en cada una de las direcciones.

El subíndice L viene de la palabra inglesa “low”, es el punto inferior.

El subíndice H proviene de la palabra inglesa “high”, es el punto superior.

Se ha seleccionado un total de diez nodos por centímetro en cada dirección. Se muestra el volumen de control en la siguiente figura.

Los puntos de control se especifican y se distribuyen uniformemente en cada dirección coordenada. El espacio entre los puntos de control define la escala espacial característica de la operación de deformación. Cuanto más elevado sea el número de puntos de control, más pequeño será el espacio y por lo tanto más pequeña será la escala espacial en la cual los cambios serán realizados.

3. Se elige un factor de escala en “Scale Factor” para la deformación. Un factor de escala unidad conduce a un movimiento máximo del punto de control del orden de una sub-celda del volumen de control. Para preservar la calidad de la malla durante el proceso de modificación es razonable usar un factor de escala de 1.

4. Al hacer clic en “Update” se produce la evaluación de las sensibilidades en los puntos de control y el campo de deformaciones en la superficie. Si se hace clic en “Expected Change” se obtiene el ajuste esperado del valor del observable de interés.

5. Para finalizar se hace clic en “Modify Mesh” para deformar la malla usando el campo de sensibilidades.

Una vez que la malla ha sido modificada conforme a los parámetros de control, se puede lanzar el cálculo con el solver convencional de Fluent.

El módulo Adjoint es una herramienta muy poderosa a la hora de optimizar cualquier diseño pero es el diseñador el que tiene la labor de seleccionar correctamente los parámetros de resolución. Las soluciones pueden ser muy dispares en función de los parámetros seleccionados.

El volumen de control puede ser desplazado en cada deformación hacia las zonas que nos interese deformar.

4.3.6.1. Modificación después de la entrada de la tobera (1)

Se parte de la hipótesis de que en la zona central de la tobera existe una turbina, haciendo que las condiciones geométricas de la misma en este tramo sean invariante. Como hipótesis previa, se parte de que la geometría de entrada y salida de la tobera son invariantes de igual forma. Bajo esta premisa quedan dos zonas por atacar a la hora de realizar la optimización de la geometría.

Un primer tramo comprendido entre metros posteriores a la entrada y antes de llegar a la zona central. Y un segundo tramo, que abarca la

zona trasera desde metros aguas abajo de la zona central de la tobera, y antes de llegar a la sección final.

Es con ello que se optimizará de la siguiente forma:

1. Modificación de la zona anterior a la tobera:

Es importante mencionar que para este y todos los tres casos siguientes, las modificaciones no tienen en cuenta la pared inferior, pues se considera que solo vamos a optimizar la geometría interna de la tobera.

Definimos el cuadro de coordenadas sobre el cual se va aplicar la optimización de la geometría.

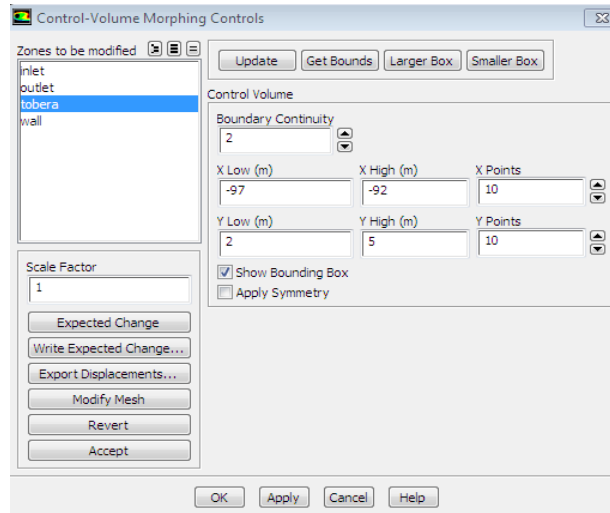


Figura 22 - Cuadro de coordenadas a modificar (1).

Como se comentó en apartados previos, los valores definidos en la imagen anterior, son valores que el propio usuario define como datos de entrada. Dependiendo de que valores se elijan, la solución obtenida puede ser diferentes. Es por ello que la experiencia, restricciones de la geometría y la zona de sensibilidad han de ser de primordial ayuda a

la hora de elegir dichos valores.

De igual forma se plotea el cuadro a modificar dentro de la tobera:

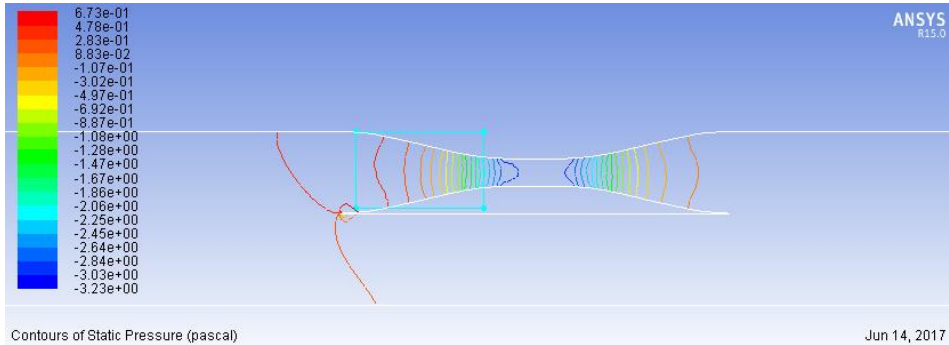


Figura 23 - Representación de coordenadas a modificar (1).

En la imagen anterior, se muestra de manera gráfica los valores anteriormente elegidos. Es importante el visualizar la imagen sin el filled seleccionado, ya que de lo contrario se puede perder los puntos y la perspectiva de la zona sobre la cual se está actuando.

Tras una serie de iteraciones, realizando los mismos pasos comentados en apartados anteriores, se puede apreciar la perturbación en la zona inferior de la tobera. Es ahí donde se alcanzan mayores valores de sensibilidad y donde, de manera correcta se debe actuar para modificar. Bajo esta modificación y tras una serie de iteraciones se puede observar que las presiones y velocidades son:

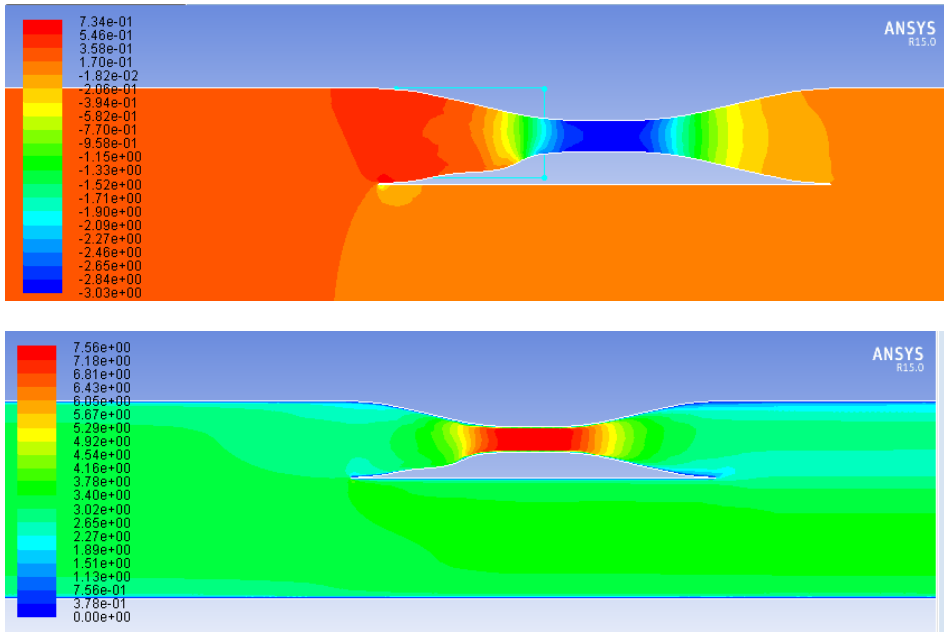


Figura 24 - Presión, velocidad y deformación tobera final (1).

En la imagen de presiones son varios factores los que se pueden visualizar. En primer lugar el rango de valores, cambia con lo cual nos lleva a pensar que va a existir un cambio de velocidad. Por otro lado, los isocontornos de presión en la entrada y salida dejan de ser tan uniformes como ocurría en la tobera inicial.

En cuanto a la figura de la velocidad, se puede destacar como aspectos importantes de mejora, el aumento de la velocidad en la sección central de la tobera. Un menor desprendimiento del flujo a la salida de la tobera, y menor salto de velocidades un la zona inferior de la tobera (zona correspondiente al túnel).

La deformación producida, tiende a estrechar y con ello concentrar más el fluido hacia la zona central. Este estrechamiento o deformación se produce de manera irregular, pues existen zonas de mayor sensibilidad en la que las modificaciones serán más pronunciadas.

Los valores y datos de caída de presión en cada una de las iteraciones se pueden observar en la siguiente tabla y gráfica:

<i>ITERACIÓN</i>	<i>CAIDA DE PRESIÓN (PA)</i>	<i>% Mejora</i>
1	0.28652066	-
2	0.26643318	7.01
3	0.26972669	5.86
4	0.26594475	7.18
5	0.26330391	8.1
6	0.26043278	9.01
7	0.257934	9.98
8	0.25581303	10.72
9	0.25473884	11.09
0	0.25153944	12.20

Tabla 2 - Valores de presión bajo la modificación (1)

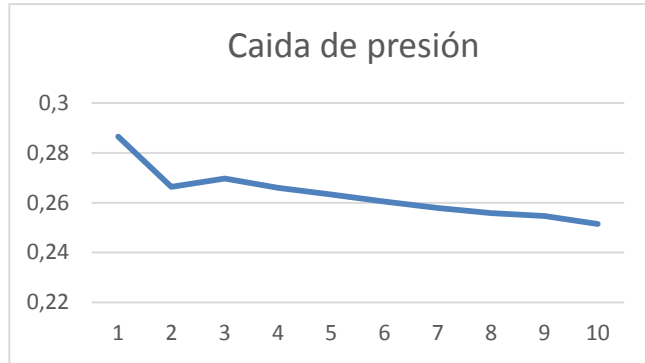


Figura 25 - Valores de presión bajo la modificación (1).

Tras los datos anteriormente mostrados se puede ver como la máxima caída de presión produce una mejora de un 12.2% con las deformaciones producidas por lo cual este valor se ve reflejado en un incremento de velocidad traducido en mayor energía producida. Esto indica que el camino de la modificación es correcto, es por ello que en busca de una mejora superior, se procede a modificar otras zonas partiendo de los parámetros de esta modificación. Cabe la oportunidad mencionar que el caudal a la entrada de la tobera es de 9.6 m²/s.

Datos de la sensibilidad nos muestran que esta era la zona cuya optimización tiene gran relevancia sobre los valores finales. El entrar en la modificación más o menos en la sección central de la tobera hubiera permitido una mejora en los resultados, no obstante esta área está expuesta a producir perturbaciones del fluido que podrían afertar a los componentes mecánicos del generador eléctrico.

4.3.6.2. Modificación de la tobera después de la entrada y antes de la salida (2)

Procediendo de la misma forma que para la modificación anterior, y bajo la idea de que se quiere obtener una mejora optimización de la tobera anteriormente modifica se llega a las siguientes conclusiones: (Nota: *todos los datos son comparados con la solución inicial descritas en paginas anteriores antes de realizar ninguna optimización*).

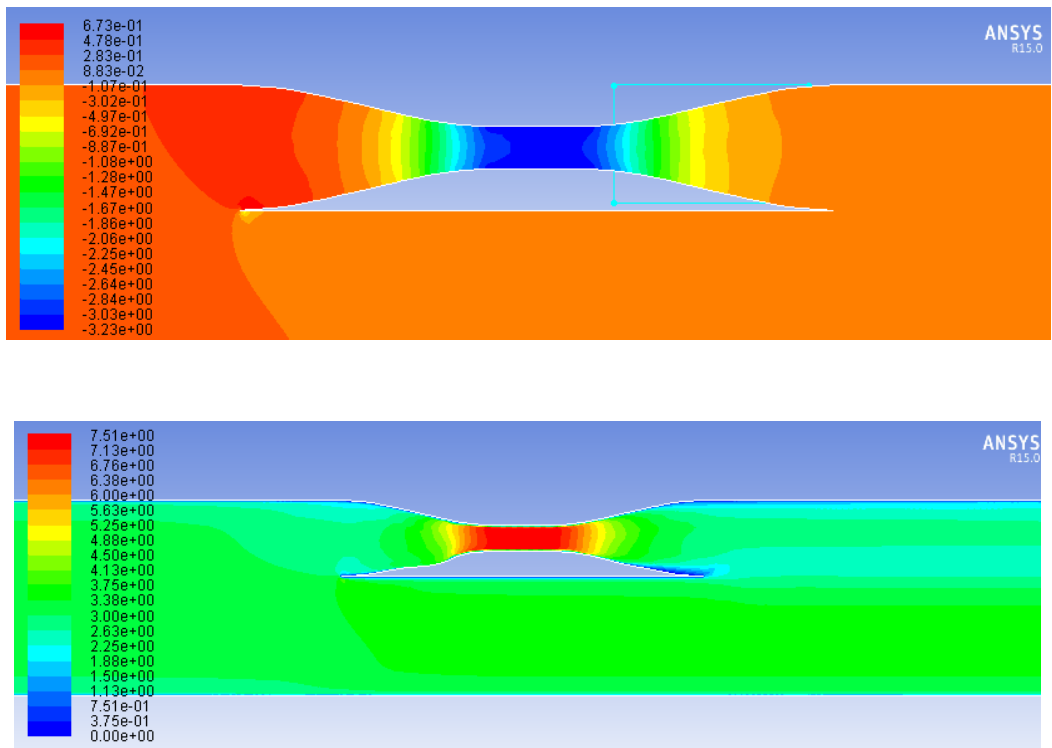


Figura 26 - Presión, velocidad y deformación (2)

Bajo las imágenes se llega a la conclusión de que el introducir modificación en la salida no produce un incremento de velocidad en la sección intermedia de la tobera (zona en la cual se va a ubicar la turbina).

Un factor a observar de las velocidades es el gran desprendimiento que se produce a la salida. En balace general la caída de presión es menor.

Como era de esperar no se produce modificación en la tobera, ya que la zona que más perturbación produce en el flujo, es la zona de entrada. Es por ello que la sensibilidad en esa zona es muy inferior a la inicial. Si se observa la geometría a la salida no tiene ninguna deformación significativa, pues la inicial es la más óptima.

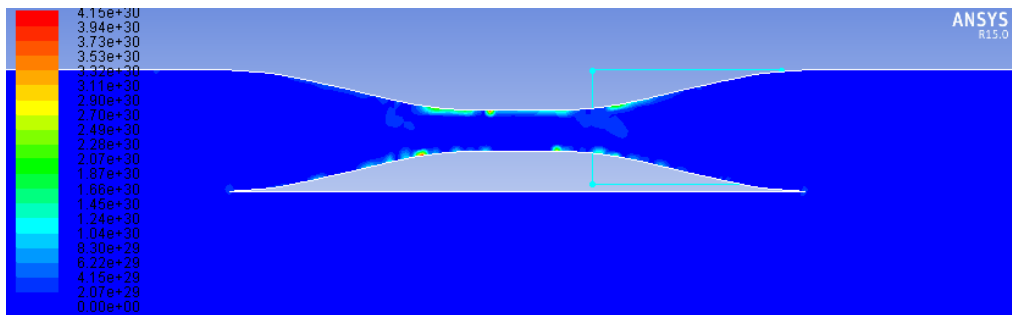


Figura 27 - Sensibilidad y tobera modifica (2).

Es con ello que los datos de caída de presión tras cada una de las iteraciones realizadas se pueden ver:

ITERACIÓN	CAIDA DE PRESIÓN (PA)	%Mejora
1	0,25153944	-
2	0,25154001	~0
3	0,25153912	~0
4	0,2515401	~0
5	0,25154026	~0
6	0,25154002	Reparada y no mejora

Tabla 3 - Valores de presión bajo la modificación (2).

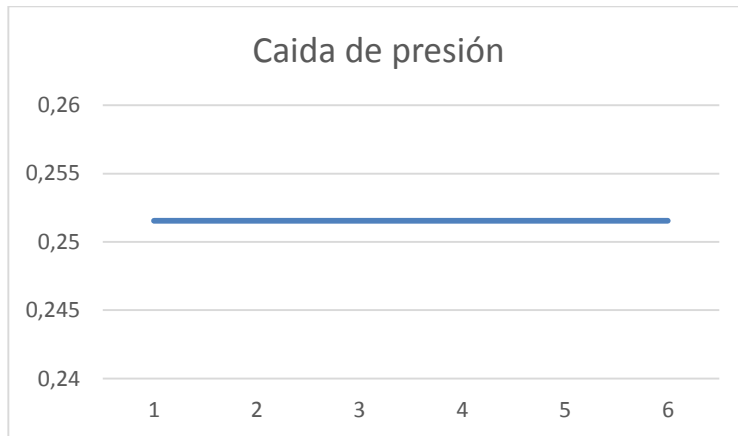


Figura 28 - Valores de presión bajo la modificación (2).

Como conclusión de los datos y valores obtenidos, se deduce que modificar la zona anterior a la salida no supone ninguna mejora en términos de velocidad en el centro de la tobera el cual nos lleve a conseguir un incremento de energía producida.

En los siguientes pasos, se dejará de lado la premisa de que no se puede tocar la zona de la entrada y salida, para ver que tanto por ciento de mejora se tendría si existiera la posibilidad de realizar una modificación en la sección de entrada y salida siempre y cuando se respete la normativa de altura permitida a la calzada para el tránsito de todo tipo de vehículos de ruedas sin característica especial.

4.3.6.3. Modificación de la tobera en la zona de entrada (3)

De igual forma que en pasos previos y partiendo de la geometría ya optimizada bajo la modificación (1), se procede a realizar el ciclo de iteraciones con la premisa de que en este caso si se permite modificar la sección de entrada. Dicho esto, los valores que se obtiene son:

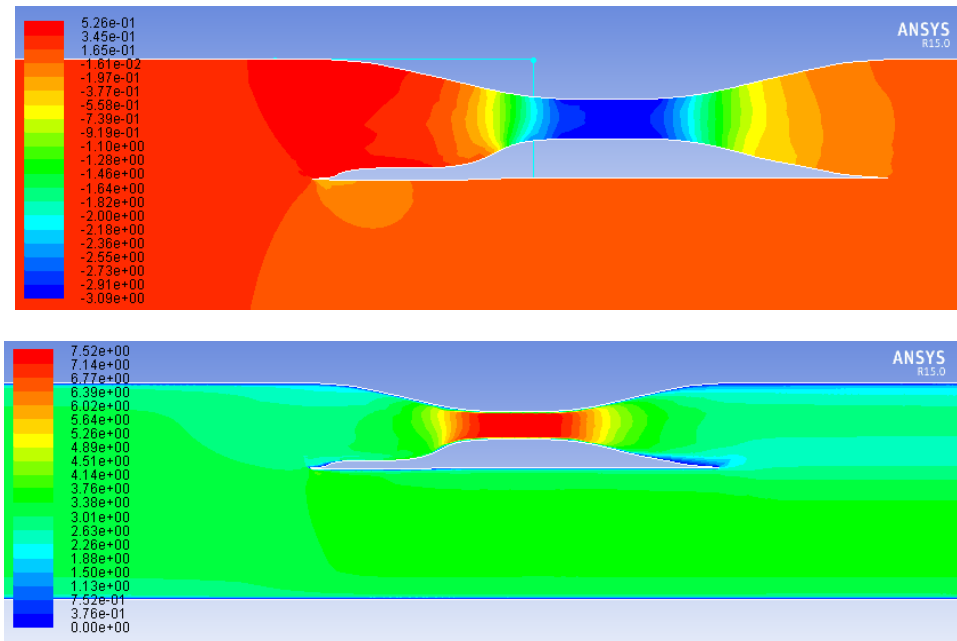


Figura 29 - Presión, velocidad y deformación (3)

Como se puede apreciar en las figuras anteriores, la caída de presión y con ello el aumento de velocidad que se produce es mayor, que en los datos de partida. En cuanto a la geometría obtenida lo que se produce es un savizado de la entrada para que con ello las perturbaciones y el desperendimiento del flujo en la sección de la entrada (esquina inferior) sean menores.

Si se muestran los datos obtenidos de la caída de presión se observa:

ITERACIÓN	CAIDA DE PRESIÓN (PA)	%Mejora
1	0,25153944	-
2	0,25000402	~0
3	0,25233787	-0.3
4	0,2518654	-0.1
5	0,2515423	~0
6	0,2514963	~0

Tabla 4 - Valores de presión bajo la modificación (3).

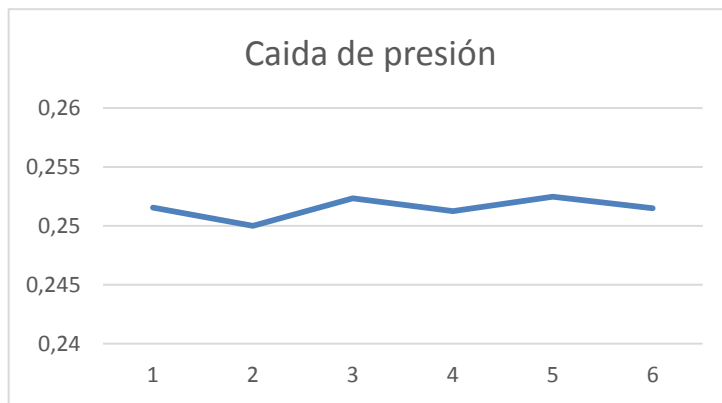


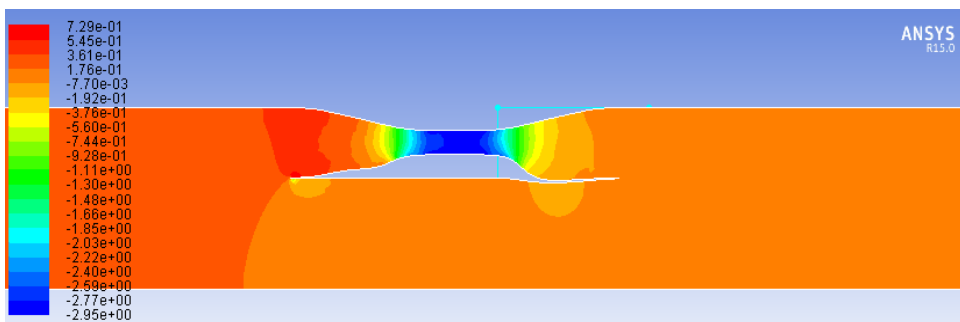
Figura 30 - Valores de presión bajo la modificación (3).

La conclusión de los datos, son que el realizar una modificación sobre la entrada no asegura una mejora pues se aprecia una gran variabilidad de los valores. Esta optimización no se tendrá en cuenta como mejora pues esta variabilidad se incrementa si cualquiera de otros factores no considerados como hipótesis en este proyecto, como una componente de velocidad que no sea pura longitudinal (cosa que suele ocurrir con frecuencia en la realidad) puede perjudicar la velocidad en la sección central de la tobera.

Por último, se procederá a una nueva optimización de la tobera partiendo de la ya optimizada en la modificación (1) y con la idea de que es permisible modificar la zona de la salida.

4.3.6.4. Modificación de la tobera en la zona de salida (4)

Misma forma que la indicada en previas paginas se procede a optimizar la geometría para conseguir el máximo de velocidad en la sección central de la tobera.



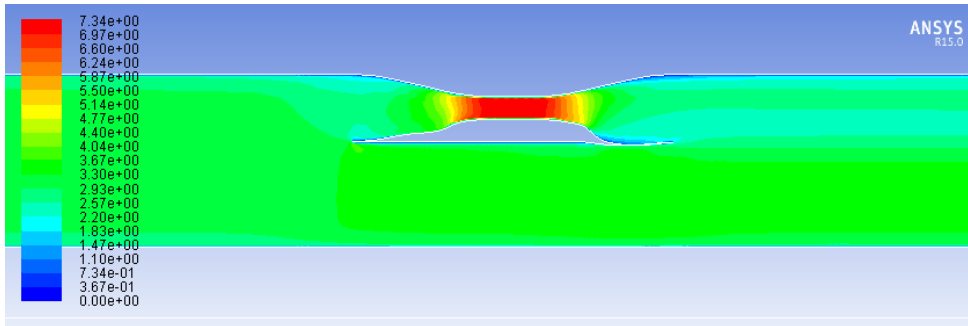


Figura 31 - Presión, velocidad y deformación (4).

Mejora con respecto a la optimización llevada a cabo en la modificación (2) y (3), aunque se produce una geometría que amplía la zona de salida a costa de producir una perturbación mayor. Esta geometría obtenida es compleja y costosa a la hora de implementarla en la realizada, por lo cual se debe hacer una valoración para conocer si es viable y de interés el implementar esta geometría.

Si se muestran los datos obtenidos de la caída de presión se observa:

ITERACIÓN	CAIDA DE PRESIÓN (PA)	%Mejora
1	0,25153944	-
2	0,24937206	0.8
3	0,2526543	-0.4

Tabla 5 - Presión, velocidad y deformación (4)

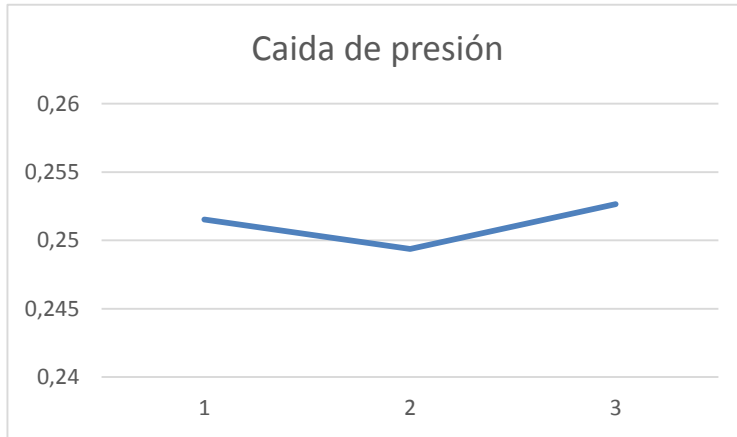


Figura 32 - Valores de presión bajo la modificación (4).

La mejora obtenida llevando a cabo esta optimización es de 0.8% con respecto a la geometría de modificación (1), con lo cual y como conclusión general se puede decir que la máxima optimización que se consigue si se implementa esta al mismo tiempo que la primera, es una optimización de un 12.96%.

Como se ha mencionado anteriormente, se ha de tener en cuenta que se esta trabajando en un plano en el cual las componentes de la velocidad son puramente longitudinal, y que las condiciones meteorológicas pueden hacer que esta optimización sea solo como condición optima de funcionamiento.

4.4. Generación de geometría y malla 3D

Para la parte 3D se parten de unos datos y dimensiones conocidas, las cuales se extrapolan en 3D mediante el uso de un software denominado Catia v5 R21. El presente proyecto no tiene por objetivo la explicación de la creación de este fichero, es por ello que paso a mostrar cual es el estatus final tras realizar la labor.

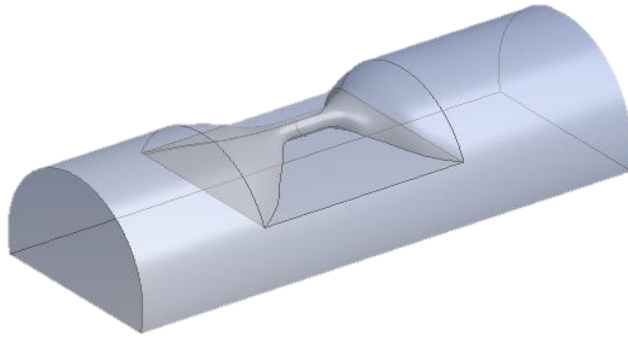


Figura 33 – Túnel y tobera como CAD.

Esta geometría mostrada no tiene en cuenta la longitud real del túnel, ya mostrada en el 2D, pues los datos de interés a optimizar es la zona de la tobera, se obviará gran parte de la zona de entrada, y de la zona de salida. La sección de paso de dicho elemento es de 9.7m.

La extrapolación geométrica de la figura 2D a una 3D a lo largo del eje Z supondría un mallado con millones de celdas pues sería kilómetros lo que se han considerado. Bajo previo conocimiento y pruebas previas, se comprobó que el hardware utilizado no tenía la capacidad para afrontar esta malla.

Definida como zona de entrada, aquel tramo de menor longitud comprendido entre la entrada del túnel y la entrada en la tobera, y la

zona de salida, como aquel de tramo (zona de la derecha de la imagen) de mayor longitud para estabilización de flujo.

Flujo estable se producirá inmediatamente aguas arriba de la tobera, y después de la estabilización aguas debajo de la tobera.

Los pasos a seguir para mallar, son de forma similar a los realizados para la geometría 2D, es por ello que se considera oportuno en esta zona el explicar solo aquello que difiere a lo realizado en el 2D.

El mallado para esta geometría por precisión se lleva a cabo con el mallador de Fluent, el cual de manera simple permite realizar un refinamiento de la malla, así como una definición del tamaño de los elementos

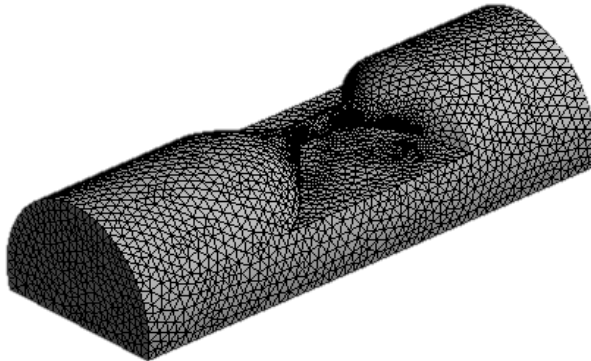


Figura 34 –Mallado del túnel.

En la imagen superior se puede visualizar como se ha realizado un refinamiento de la malla en la zona central de la tobera. El número mínimo de celdas posibles, es el que aparece en la imagen, ya que el hardware no permite reducir el tamaño de la celda. Como anteriormente se nombró, esto es uno de los parámetros que hacen que los resultados se asemejen más a la realidad.

En la imagen inferior quiere mostrar los vectores de velocidad en el túnel. Esta figura es de gran interes, ya que nos permite conocer las recirculaciones que se producen, así como la máxima velocidad alcanzada en la zona central.

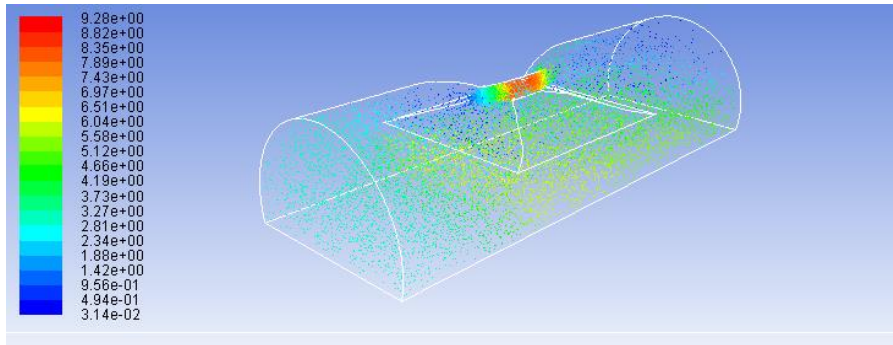


Figura 35 – Vectores de velocidad en el plano.

4.4.1.1. Modificación de la tobera en la zona de entrada (5)

De la misma forma que para la optimización 2D, se parte de la premisa que la zona inicial y sección central en la cual va a ir ubicada la tobera, son secciones que han de permanecer invariantes ante la optimización de la geometría. El realizar la simulación 2D también, nos ha servido para conocer cuales son las zonas a optimizar y con ello conseguir de manera más directa el resultado final con la máxima optimización.

Los datos de presión y velocidad como datos de partida, son los anteriormente mostrados. Por ello, queda a la vista de definir el cuadro sobre el cual se lleva a cabo la optimización de la geometría.

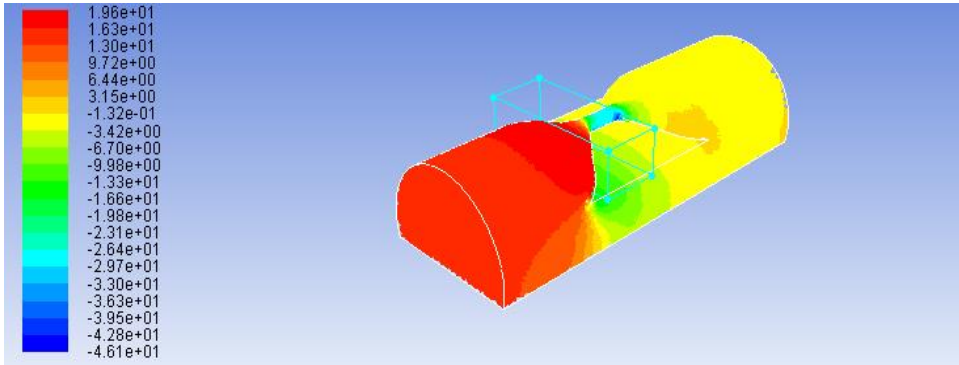
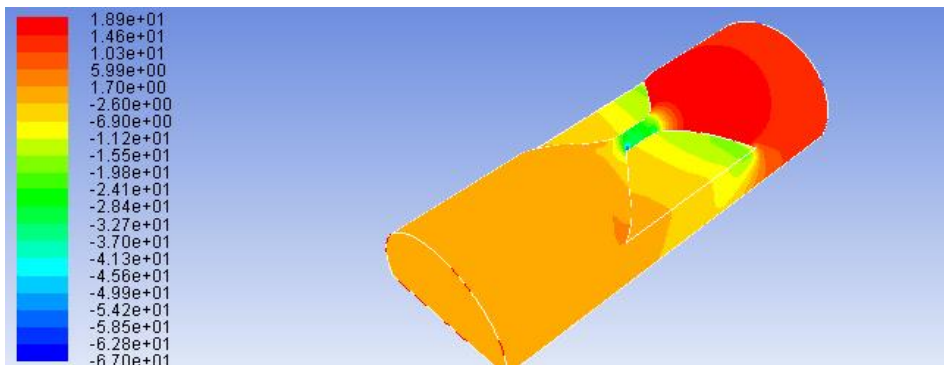


Figura 36 – Contorno definido bajo los parámetros de optimización (5).

Tras llevar a cabo una serie de iteraciones, la modificación modificación, presión y velocidad es mostrada en las siguientes figuras:



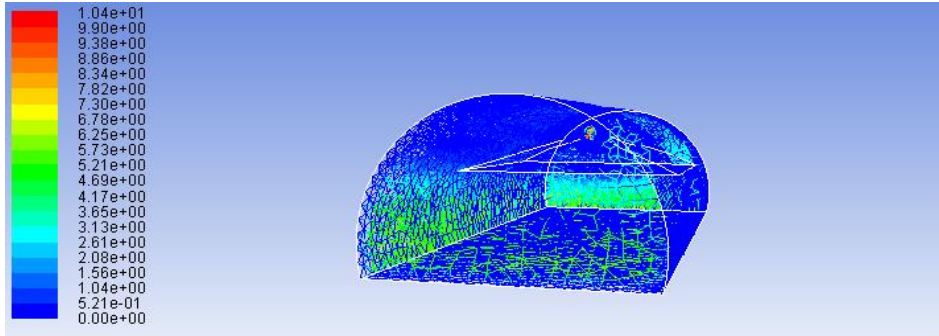


Figura 37 - Presión, velocidad y deformación (5).

En las imágenes anteriores, se puede apreciar algo similar a lo ya visto y comentado para la optimización 2D. En este caso las velocidades son más elevadas que para el caso anterior, y la deformación presenta un grado más de libertad a poder ser modificado.

Haciendo una sección central para visualizar cual a sido la modificación y con ello correlar datos con 2D se observa:

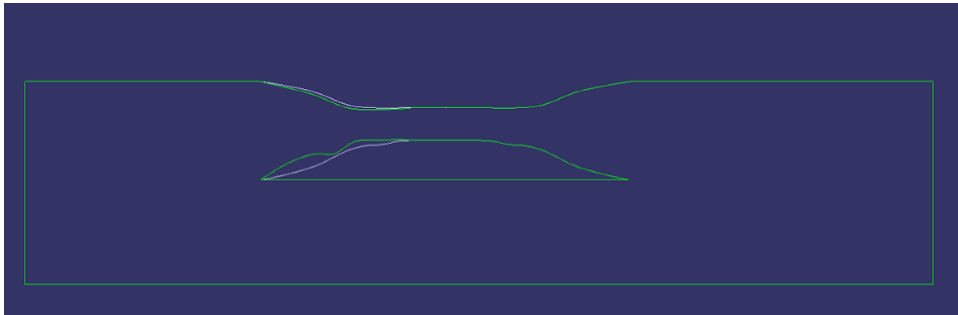


Figura 38 - Comparación de geometrías antes y después de la deformación (5).

Como se puede apreciar, al igual que aparecía en la optimización del 2D, se tiende a producir un estrechamiento (línea verde la nueva configuración, y línea gris geometría inicia), o focalización del flujo a la entrada, de tal manera que se suaviza el pico para reducir las sobrepresiones en esa zona.

Si se observa la velocidad en la sección central de la tovera, vemos como pasamos de tener una velocidad de 3m/s a la entrada a 10,4m/s.

Esta aceleración se puede junto con valores de caída de presión en cada una de las iteraciones se pueden observar:

ITERACIÓN	CAIDA DE PRESIÓN (PA)	%Mejora
1	10,402124	-
2	10,005698	3.81
3	9.96589	4.21
4	9.436529	9.28

Tabla 6 - Valores de presión bajo la modificación (5).

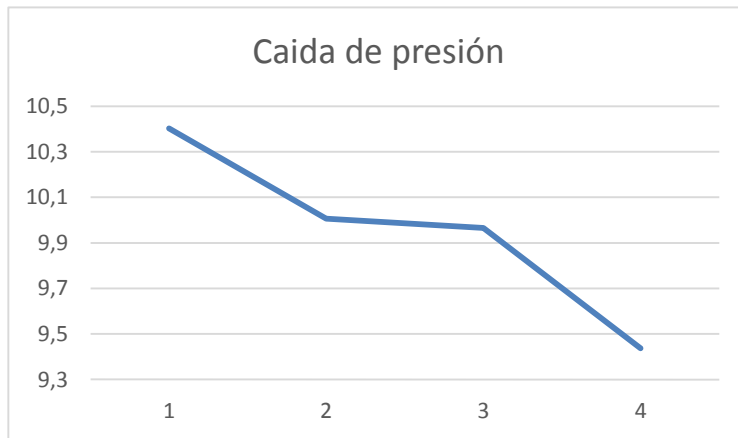


Figura 67 - Valores de presión bajo la modificación (5)

Estos valores muestran que el máximo de optimización que se puede conseguir es de un 9.28%. Como se puede apreciar, esta mejora y ligeramente inferior a la obtenida en la optimización 2D, pues son

muchos los factores (diferentes posibles geometrías, componentes de velocidad, etc) que tiene relevante importancia.

4.4.1.2. Modificación de la tobera en la zona de salida (6)

La zonal final a optimizar, es la considerada como zona de salida. Esta es aquella que comprende un sección inmediatamente posterior a la tobera, y ligeramente anterior a la salida, misma forma que se llevo a cabo en la modificación (2).

La zona a optimizar queda representada en la siguiente imagen, en la cual se muestra un isocontorno (inicialmente mostrado) de presiones junto con el cuadro que engloba.

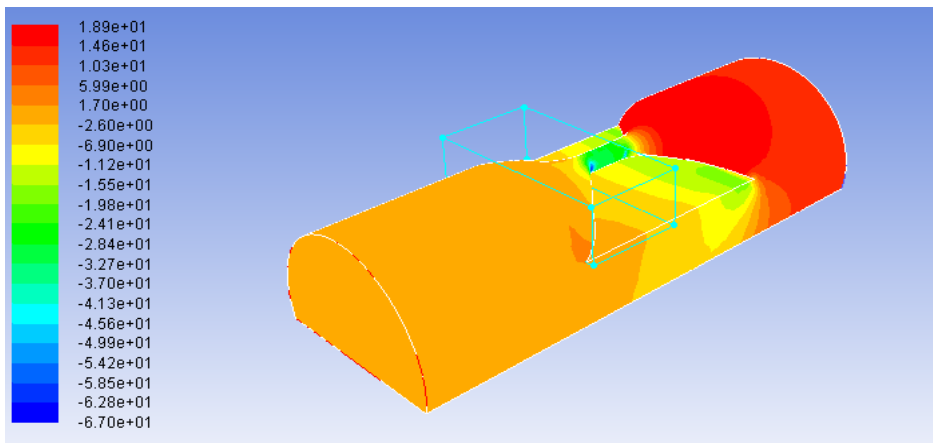


Figura 39 – Contorno definido bajo los parámetros de optimización (6).

De igual forma que en apartados anteriores, tras una serie de iteraciones se obtiene que la caída de presión viene representada en los isocontornos de la siguiente imagen.

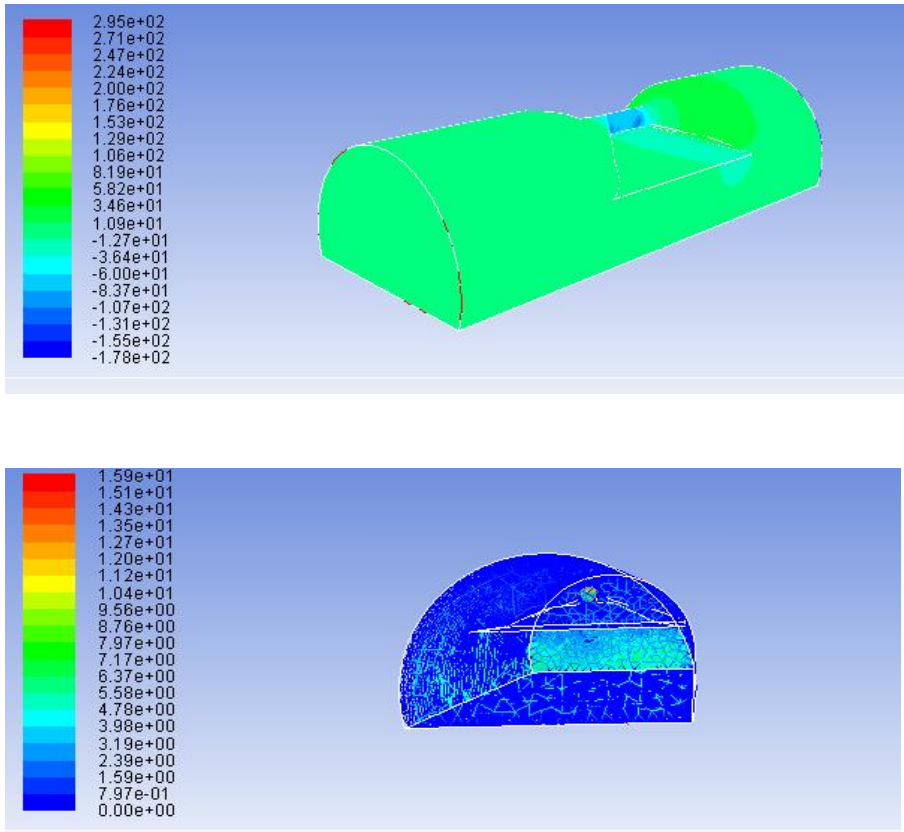


Figura 40 - Presión, velocidad y deformación (6).

En la figura de las presiones se observa como la caída de presión bajo esta optimización es mayor (cambia los valores de la leyenda) y en consecuencia esto induce a lo mostrado en la imagen inferior, es decir, un aumento de la velocidad. Esta modificación produce una gran aceleración del fluido en la zona central de la tobera, de tal forma que el fluido en su sección central presenta una velocidad de 15.9 m/s. Esto da idea de la optimización que se va a producir.

Esta optimización, se ejecuta de forma consecutiva a la anterior, es decir, que una vez optimizado con la modificación anterior, lo que se busca es una mejora de lo ya obtenido.

Los valores y datos de caída de presión en cada una de las iteraciones se pueden observar en la siguiente tabla y gráfica:

ITERACIÓN	CAIDA DE PRESIÓN (PA)	%Mejora
1	9.436529	-
2	9.469568	-0.3
3	8.89659	5.72
4	9.1023659	3.54

Tabla 7 - Valores de presión bajo la modificación (6).

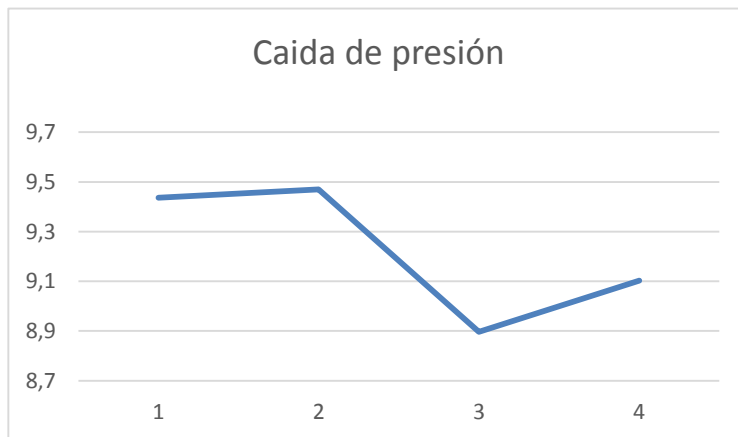


Figura 41 - Valores de presión bajo la modificación (6).

Considerando hasta la iteración 3 (pues es el máximo valor de caída de presión y con ello de mejora) se puede conseguir un 5.72% de mejora en esta optimización. Calculando el porcentaje de mejora total (14.47%) se puede apreciar, esta mejora es superior a la obtenida en la optimización 2D, pues son muchos los factores (diferentes posibles geometrías, componentes de velocidad, etc) que tiene relevante importancia.

4.5. Resultados obtenidos

Para la resolución de la tematica de este trabajo fin de máster se partió de la premisa de conocer la optimización de la geometría de la tobera bajo el criterio de un diseño 2D en el cual se podía (por temas de hardware al ejecutar un gran numero de celdas) llevar a cabo la optimización representada la longitud total del túnel.

Bajo esta hipótesis, discretizando parámetros, se ha buscado la máxima optimización posible considerando que hay criterios a no modificar, pues de lo contrario se pierde un factor importante de la realidad.

Para el caso de la geometría 3D, se ha considerado una parte del total del túnel, la cual incluye la zona de estabilizado de la tobera. Pequeña distancia antes de la entrada a la tobera, y una mayor distancia aguas abajo de la salida de la tobera, que permita la estabilización del flujo.

4.5.1. Comparación de geometrías

En esta sección se pretende presentar ambas geometrías antes y después de las modificaciones realizadas para ver cual sería el estatus final de nuestro diseño una vez realizado el proceso de optimización:

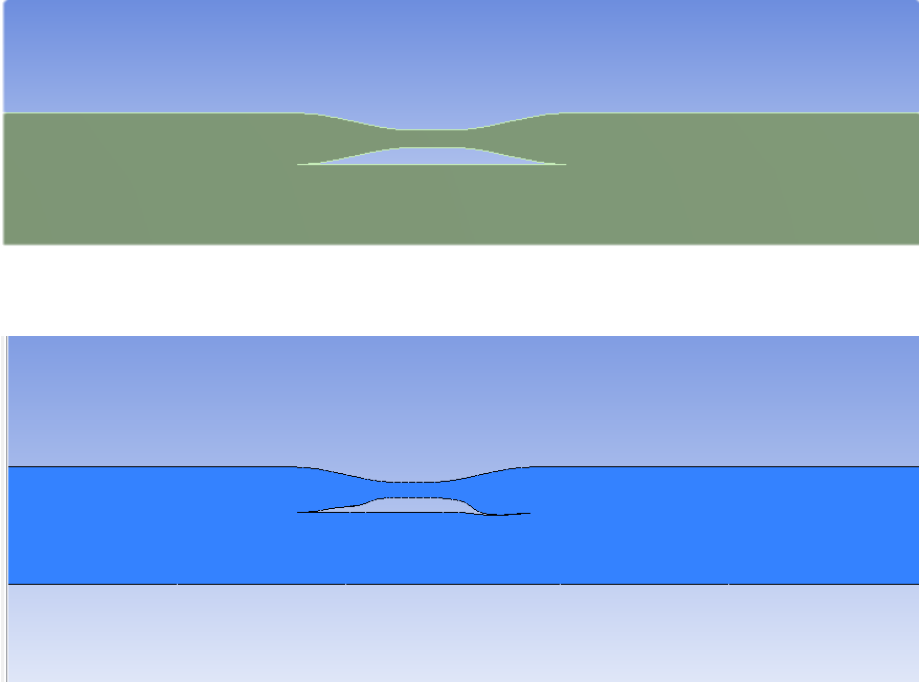


Figura 42 – Geometría antes y después de la optimización 2D.

Como se puede apreciar se produce una deformación no regular ya que los criterios definidos sobre los rangos a actuar, no solo limitan el máximo porcentaje de flujo a obtener, sino que los contornos exteriores e invariantes por normativa hacen que esta solución obtenida tenga que ser un poco más imprecisa.

Para el caso de la geometría 3D se tienen que la geometría obtenida es:

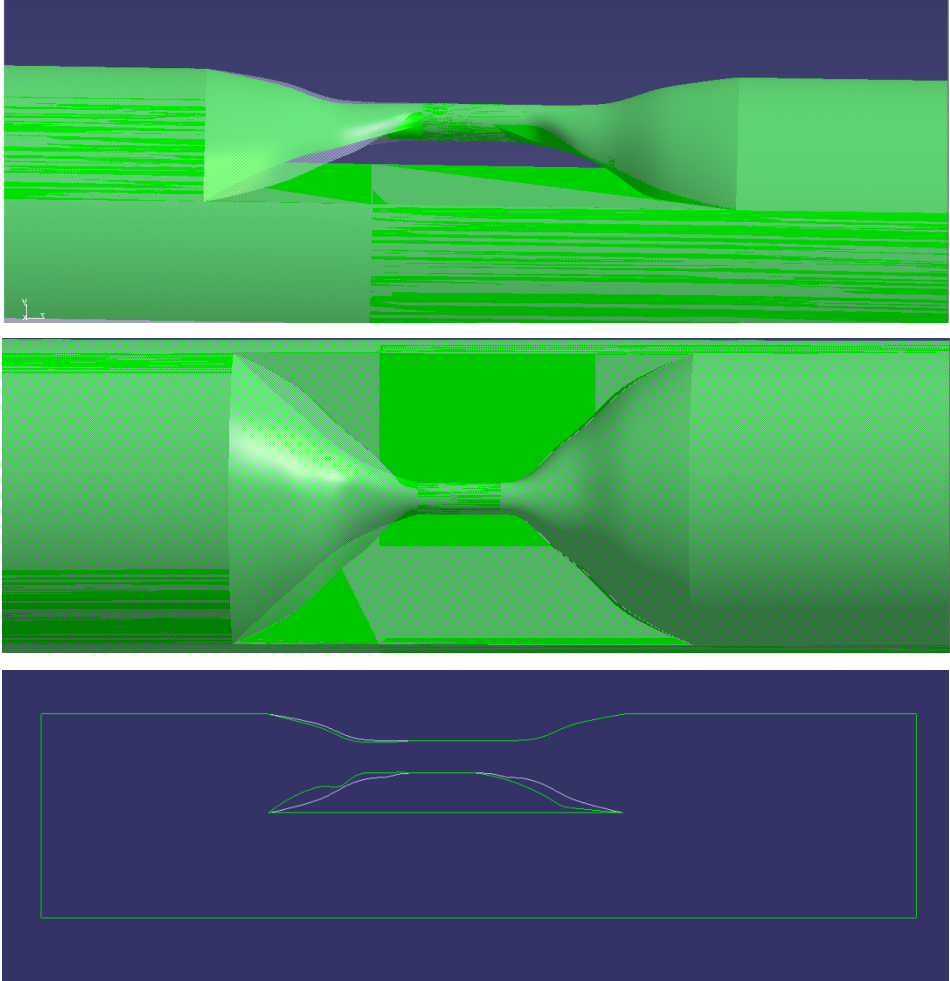


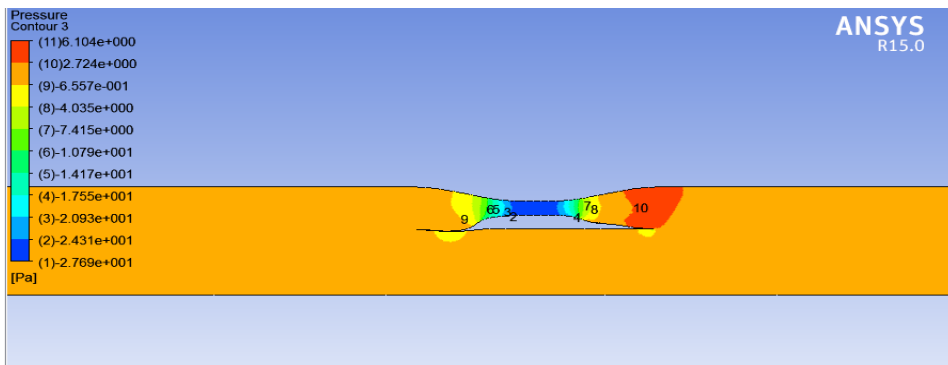
Figura 43 – Geometría antes y después de la optimización 3D.

En un tono verde oscuro se puede apreciar cual es la forma inicial y final de la tobera una vez se a realizado el proceso de optimización. Tanto en la zona inicial como en la zona final, tiende a obtener una configuración similar a la ya vista y calculada en la simulación 2D, ya que la sensibilidad por caída de presión se localiza en zonas críticas.

4.5.2. Contornos de presiones y velocidades

En este apartado final lo que se quiere muestra a modo resumen para identificar el objetivo de este trabajo, es tener un conocimiento genérico, tanto para el 2D como 3D cuales son los contornos de presiones y velocidades antes, y después de las modificaciones de las geometrías. Ambos conceptos, se conocen que deben ir de la mano, es decir que una mejora en uno tiene implicación en otro.

Es importante tener en cuenta que el visualizador de resultados del dicho programa, representa la geometría en sentido inverso colocando la entrada en la zona vista a la derecha y la salida en la zona izquierda.



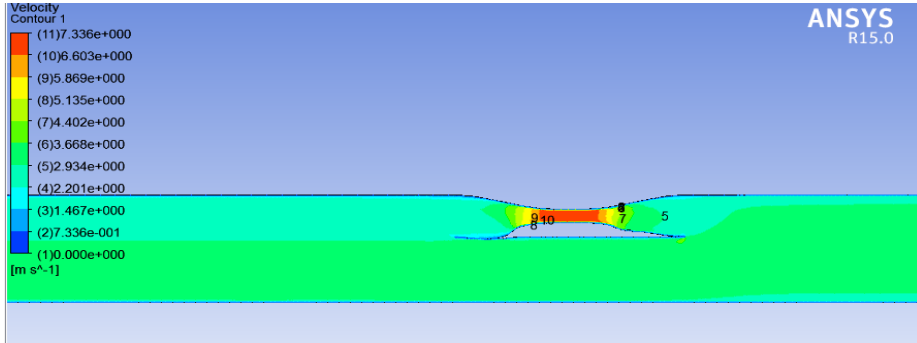
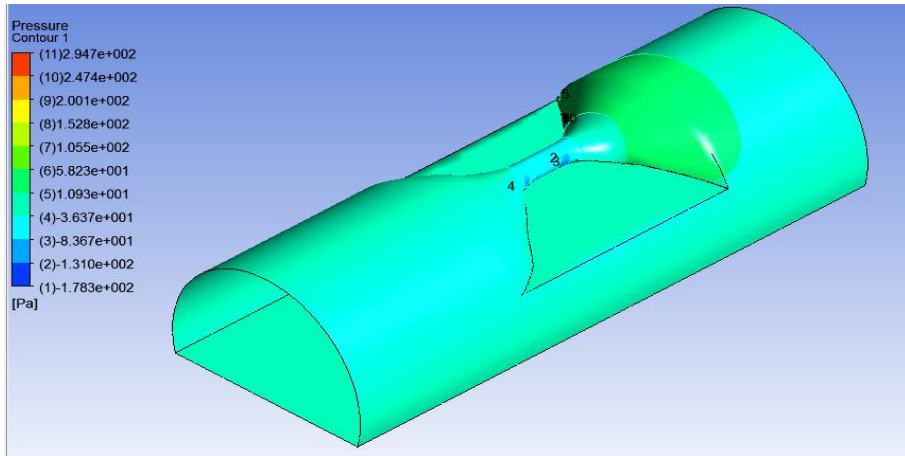


Figura 44- Isocontornos de presión y velocidad final 2D.



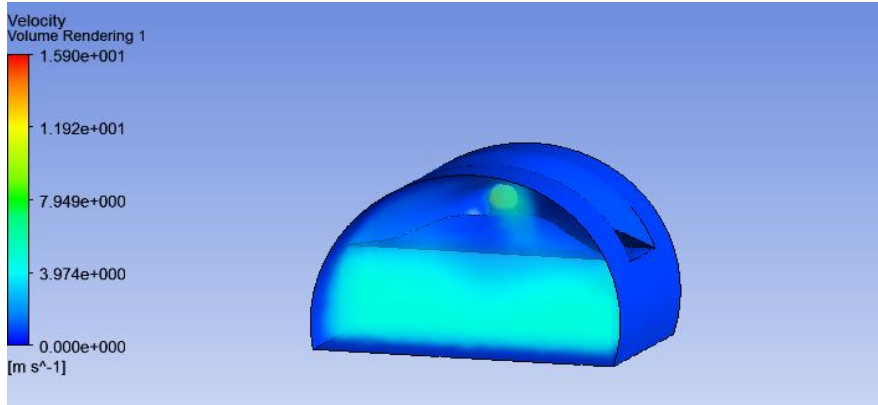


Figura 45 – Isocontornos de presión y velocidad final 3D.

Estas figuras han sido mostradas ya anteriormente, sirvan para focalizar a modo resumen y de manera rápida y visual cuales son y donde se encuentra los máximos valores de presión y velocidad en cada una de las geometrías.

5. CONCLUSIONES

Este trabajo de fin de máster se centra en la optimización de la geometría de una tobera para el aprovechamiento del viento interior de un túnel, y que con ello la energía producida por una turbina en su interior sea máxima para el autoabastecimiento energético del túnel.

De los resultados obtenidos hay que destacar que para la optimización 2D son varios los factores a mencionar:

- En primer lugar al caracterizar los parámetros del viento, las diferentes variables juegan un papel primordial. Es importante notar, que algunas de las variables son elegidas por el usuario, lo cual hace que los datos obtenidos sean subjetivo. Discretizar, e incluso obviar la influencia de algunos parámetros, hacen que los datos obtenidos carezcan de veracidad e incluso los datos obtenidos son una distorsion de la realidad.
- El actuar sobre ciertas zonas de la tobera hace que las limitaciones de optimización sean diferentes. Es con ello que si se parte de unas restricciones de diseño, como son altura permitida, ancho de la turbina a colocar, la optimización sea inferior.
- Una simulación 2D sirve para dar información de la deformación que se puede obtener, pero el porcentaje de optimización se aleja de la realidad al no considerar parámetros influyentes del viento.

Una optimización 3D, puede llegar a ser todo lo compleja y representativa de la realidad dependiendo de los parámetros que se conozcan. Ciertamente es que el viento, y como se nombra en capítulos anteriores, la localización geográfica juegan un papel primordial que hacen que los valores oscilen entre diferentes rangos.

Bajo estos criterios, se puede decir que la optimización del 3D es bajo unas condiciones de viento consideradas en un momento determinado y estación del año.

Para la parte de optimización 3D no se ha realizado la comprobación de optimización teniendo en cuenta la zona de la entrada y de la salida, puesto que estas secciones son invariantes, y se ha verificado en 2D que su modificación lleva a una escasa optimización muy variable y no ideal para implementar.

Queda pendiente y como posible estudio en futuras proyecciones el determinar si la posición de la tobera sobre el túnel es óptima o si colocándola más adelante o atrás la optimización conseguida puede ser mayor.

REFERENCIAS

- [1] Publicación de la Universidad de Jaén en el diario de Sevilla de marzo 2014
- [3] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE); <http://www.idae.es/>
- [4] Duct optimization using CFD software `ANSYS Fluent Adjoint Solver'. Master's thesis in Automotive Engineering (ATHANASIOS TZANAKIS)
- [5] Solarweb; de acuerdo a lo establecido en la Ley Orgánica 15/1999, de 13 de diciembre (<http://www.solarweb.net/>)
- [6] Biblioteca virtual de desarrollo sostenible y salud ambiental
- [7] Ansys Fluent manual solver user guide
- [8] Tutorial Sensitivity analysis, optimization and robust design with optiSLang and ANSYS Workbench
- [9] Design Exploration and Robust Design using ANSYS DesignXplorer