



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

INSTITUTO DE ENERGÍAS RENOVABLES
INSTITUTO DE INGENIERÍA

**SIMULACIÓN NUMÉRICA DE UN
TUBO DIFUSOR DE GEOMETRÍA
VARIABLE EMPLEANDO OPENFOAM**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO EN ENERGÍAS RENOVABLES

PRESENTA

HUGO EMMANUEL CASTILLO GARCÍA

DIRECTOR DEL TRABAJO

DR. ALFONSO CAMPOS AMEZCUA



TEMIXCO, MOR., A 10 DE JUNIO DE 2018



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

RESUMEN

En este trabajo se realizó un estudio de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), empleando el software libre de simulación numérica (OpenFOAM) y el generador de malla (GMSH), para desarrollar y evaluar un tubo difusor de geometría variable. Se han evaluado las distintas modificaciones a la geometría original bajo diferentes puntos de operación, permitiendo así obtener resultados gráficos sobre el comportamiento del flujo de fluido a través de este componente. Se ha determinado el efecto que tiene la reducción del área de salida del tubo difusor, cuando se trabaja a carga nominal o a cargas parciales, a través del coeficiente de recuperación de presión promedio.

DEDICATORIA

Con especial dedicatoria a mis padres **SHCP** y **DMGL** por haber depositado en mi la confianza y darme el sustento necesario tras embarcarme en esta travesía llamada LIER. Este logro es fruto de todas aquellas enseñanzas, raíces y valores que me han inculcado durante la vida. A mi hermano **ACG** por haber sido una figura de orientación en mi elección de carrera universitaria. A **SLB** por haber dedicado gran parte de su vida a mi cuidado y orientación (Q.E.P.D.). A toda mi familia por todo el apoyo recibido de forma incondicional.

Un agradecimiento desde lo más profundo de mi corazón a **FUNUV**, **NXVAA**, **OLMOS**, **SEGUD**, **TABOL**, **MAALM** y **RAO** por haber sido mi familia temixqueña, aquella familia que no se escoge, si no, simplemente se encuentra en la vida y formará siempre parte de ella. ForeverYoung.

A **DIRAC**, **PXVAD** y **ESVIM** por haber sido cómplices de momentos muy agradables durante estos años.

De corazón y ser, quiero expresar a **INBAS** un agradecimiento especial y sincero. Los momentos que hemos compartido durante la LIER serán inolvidables ya que has dejado una huella imborrable en mi. A **ALCEM** por la confianza generada y compartir experiencias extranjeras. A **IEJUV** por ser aquel gran cómplice matemático con quien siempre pude discutir ideas.

Un agradecimiento especial a la agrupación estudiantil Cursos Facultad de Ingeniería (**CursosFI**), por haberme adoptado a pesar de no ser estudiante de la FI y permitirme desarrollar habilidades en la instrucción del conocimiento. Son amigos que conservaré por muchos años.

A mis grandes amigos **M. Carabajal**, **Bubu**, **Juampi**, **Agus**, **Gonza**, por todas aquellas grandes experiencias que compartimos del otro lado del mundo. A mi querida **Alice Sofia**

Olovsson por la gran amistad que hemos formado y que demuestra que la distancia no es ninguna barrera. A **La Banda de Jaén** por todos aquellos momentos de locura que compartimos juntos.

A mis geniales roomates **Vince V. Hoof**, **Lindi Lindi Kerschbaumer** y **Tini Christini Rautnig** por la convivencia tan genial y la amistad forjada en BCN.

Como todo alumno que forja su camino académico, siempre tiene la guía e instrucción de grandes personalidades. Quiero dedicar este trabajo a aquellos profesores que siempre compartieron su conocimiento y nunca se negaron a contestar las dudas mas allá del salón de clases. A **MLH**, **RCA**, **SCG**, **ERM**, **MRP**, **WRGF**, **OGV**, **AMJ-ibt**, **HZH**, **JCA**.

¿Qué sería la LIER, de no ser por ti? **MFP**, gracias por todo el empeño y dedicación ya que con tu trabajo, en ocasiones hasta labor de madre, has contribuido a que grandes ingenieros se formen en el IER.

Gracias **MNA** por tu valiosa amistad. Por recibirme todos los días en tu oficina y compartir el entusiasmo a través de las pláticas. Por ser una persona que alenta a los demás a hacer las cosas y siempre luchar por los valores, la equidad y justicia para la LIER.

ÍNDICE GENERAL

| | |
|---|-----------|
| 1. Introducción | 1 |
| 1.1. Antecedentes | 2 |
| 1.2. Objetivo general | 3 |
| 1.3. Objetivos específicos | 3 |
| 2. Conceptos básicos | 4 |
| 2.1. Introducción a la Mecánica de Fluidos | 5 |
| 2.1.1. Ecuaciones de conservación de la Mecánica de Fluidos | 5 |
| 2.2. Método de Volumen Finito (MVF) | 8 |
| 2.3. Turbulencia | 9 |
| 2.4. Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) | 10 |
| 2.4.1. Funcionamiento de un código CFD | 11 |
| 2.4.2. Pre - Procesamiento | 11 |
| 2.4.3. Solución (<i>Solver</i>) | 12 |
| 2.4.4. Post - Procesamiento | 13 |
| 2.5. OpenFOAM | 13 |
| 2.5.1. Estructura de OpenFOAM | 14 |
| 3. Tubo difusor | 16 |
| 3.1. Definición | 17 |
| 3.2. Principio de funcionamiento | 17 |
| 3.3. Tipos de tubo difusor | 18 |

| | |
|---|-----------|
| 3.3.1. Tubo difusor Acodado de sección transversal variable | 19 |
| 3.4. Parámetros de rendimiento de un tubo de aspiración | 19 |
| 3.4.1. Coeficiente de Recuperación de Presión Promedio | 20 |
| 4. Desarrollo | 21 |
| 4.1. Metodología | 22 |
| 4.2. Información recopilada | 23 |
| 4.3. Modificación de la geometría | 24 |
| 4.4. Proceso de mallado | 26 |
| 4.4.1. Entrada - Salida - Pared | 26 |
| 4.4.2. Parámetros de mallado | 27 |
| 4.4.3. Mallas generadas | 28 |
| 4.4.4. Importar una malla en OpenFOAM | 29 |
| 4.4.5. Calidad de la malla | 29 |
| 4.5. Configuración del solver | 30 |
| 4.5.1. Carpeta: Sistema | 30 |
| 4.5.2. Carpeta: Constante | 36 |
| 4.5.3. Definición de las condiciones de frontera / Carpeta 0 | 37 |
| 4.6. Ejecución de la simulación | 40 |
| 4.7. Criterios de convergencia | 40 |
| 5. Resultados | 42 |
| 5.1. Simulación a 100 % de carga | 43 |
| 5.1.1. Convergencia de las simulaciones | 43 |
| 5.1.2. Contornos de velocidad | 46 |
| 5.1.3. Vectores de velocidad | 49 |
| 5.1.4. Coeficiente de recuperación de presión | 50 |
| 5.2. Simulación a 75 % de carga | 51 |
| 5.2.1. Convergencia de las simulaciones | 51 |
| 5.2.2. Contornos de velocidad | 54 |
| 5.2.3. Vectores de velocidad | 56 |
| 5.2.4. Coeficiente de recuperación de presión | 57 |
| 5.3. Simulación a 50 % de carga | 58 |
| 5.3.1. Convergencia de las simulaciones | 58 |
| 5.3.2. Contornos de velocidad | 61 |
| 5.3.3. Vectores de velocidad | 63 |
| 5.3.4. Coeficiente de recuperación de presión | 64 |
| 5.4. Simulación a 30 % de carga | 65 |

| | |
|---|-----------|
| 5.4.1. Convergencia de las simulaciones | 65 |
| 5.4.2. Contornos de velocidad | 68 |
| 5.4.3. Vectores de velocidad | 70 |
| 5.4.4. Coeficiente de recuperación de presión | 71 |
| 5.5. Cp global | 72 |
| 6. Conclusión y comentarios finales | 74 |
| 6.1. Conclusiones del trabajo | 75 |
| 6.2. Comentarios finales | 76 |
| A. ¿Dónde empieza y dónde termina la máquina? | 77 |
| B. Análisis de malla | 79 |
| C. Puntos de monitorización de presión | 84 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| 1.1. Mapa de centrales hidroeléctricas CFE. Tomada totalmente del portal interno de CFE Generación. | 2 |
| 2.1. Configuración del esquema basado en celdas y en nodos [1]. | 8 |
| 2.2. Flujo a través de medio cilindro. Elaboración propia | 9 |
| 2.3. Diferencia en la interfaz para establecer las propiedades del fluido. | 14 |
| 2.4. Estructura de un caso en OpenFOAM [2]. | 15 |
| 3.1. Condiciones básicas de descarga de una turbina de reacción | 17 |
| 3.2. Tipos de tubo difusor. Tomada parcialmente de [3] | 18 |
| 3.3. Parámetros geométricos de un tubo difusor acodado [4]. | 19 |
| 4.1. Modelo 3D del tubo difusor. | 23 |
| 4.2. Ángulo de corte | 24 |
| 4.3. Geometrías resultantes. | 25 |
| 4.4. Área de salida, vista frontal. | 26 |
| 4.5. Inlet-Outlet-Wall | 27 |
| 4.6. Configuración de las condiciones de mallado. | 28 |
| 4.7. Mallas generadas. | 28 |
| 4.8. Comando gmshToFoam | 29 |
| 4.9. Comando checkMesh | 29 |
| 4.10. Contenido general de la carpeta System | 31 |
| 4.11. Fichero controlDict | 32 |

| | |
|--|----|
| 4.12. Ecuación y sintaxis de OpenFOAM | 32 |
| 4.13. Configuración de los ficheros fvSchemes y fvSolution | 34 |
| 4.14. Contenido general de la carpeta Constant | 36 |
| 4.15. Contenido del fichero transportProperties | 36 |
| 4.16. Contenido del fichero turbulenceProperties | 36 |
| 4.17. Restricciones geométricas. | 37 |
| 4.18. Contenido general de la carpeta 0 | 38 |
| 4.19. Condición de frontera, velocidad a 100 % de carga | 38 |
| 4.20. Contenido del <i>script</i> ejecutable. | 40 |
| 4.21. Puntos de monitorización de presión | 41 |
| | |
| 5.1. Residuales obtenidos de las simulaciones realizadas a 100 % de carga por geometría. | 43 |
| 5.2. Gráficos de continuidad. Simulaciones realizadas a 100 % de carga por geometría. | 44 |
| 5.3. Monitores de presión. Simulación a 100 % de carga. Geometría original. | 45 |
| 5.4. Contornos de velocidad (perfil) obtenidos por geometría. Simulación a 100 % de carga | 46 |
| 5.5. Contornos de velocidad (frontal) obtenidos por geometría. Simulación a 100 % de carga | 47 |
| 5.6. Vectores de velocidad-Contornos de presión. Simulación a 100 % de carga | 49 |
| 5.7. Residuales obtenidos de las simulaciones realizadas a 75 % de carga por geometría. | 51 |
| 5.8. Gráficos de continuidad. Simulaciones realizadas a 75 % de carga por geometría. | 52 |
| 5.9. Monitores de presión. Simulación a 75 % de carga. Geometría original. | 53 |
| 5.10. Contornos de velocidad obtenidos por geometría. Simulación a 75 % de carga | 54 |
| 5.11. Contornos de velocidad (frontal) obtenidos por geometría. Simulación a 75 % de carga | 55 |
| 5.12. Vectores de velocidad-Contornos de presión. Simulación a 75 % de carga | 56 |
| 5.13. Perfiles de velocidad [5] | 57 |
| 5.14. Residuales obtenidos de las simulaciones realizadas a 50 % de carga por geometría. | 58 |
| 5.15. Gráficos de continuidad. Simulaciones realizadas a 50 % de carga por geometría. | 59 |
| 5.16. Monitores de presión. Simulación a 50 % de carga. Geometría original. | 60 |
| 5.17. Contornos de velocidad obtenidos por geometría. Simulación a 50 % de carga | 61 |
| 5.18. Contornos de velocidad (frontal) obtenidos por geometría. Simulación a 50 % de carga | 62 |
| 5.19. Vectores de velocidad-Contornos de presión. Simulación a 50 % de carga | 63 |

| | |
|--|----|
| 5.20. Residuales obtenidos de las simulaciones realizadas a 30 % de carga por geometría. | 65 |
| 5.21. Gráficos de continuidad. Simulaciones realizadas a 30 % de carga por geometría. | 66 |
| 5.22. Monitores de presión. Simulación a 30 % de carga. Geometría original. | 67 |
| 5.23. Contornos de velocidad obtenidos por geometría. Simulación a 30 % de carga | 68 |
| 5.24. Contornos de velocidad (frontal) obtenidos por geometría. Simulación a 30 % de carga | 69 |
| 5.25. Vectores de velocidad-Contornos de presión. Simulación a 30 % de carga | 70 |
| 5.26. Coeficiente de recuperación de presión (global) | 72 |
| 5.27. Coeficiente de recuperación de presión (global) | 73 |
| | |
| A.1. Normas internacionales para la determinación de la altura neta en las centrales hidroeléctricas. Tomada totalmente de [6] | 78 |
| | |
| B.1. Análisis de malla, geometría Original. | 80 |
| B.2. Análisis de malla, geometría Modificación1. | 81 |
| B.3. Análisis de malla, geometría Modificación2. | 82 |
| B.4. Análisis de malla, geometría Modificación3. | 83 |
| | |
| C.1. Monitores de presión. Simulación a 100 % de carga. Modificación 1. | 85 |
| C.2. Monitores de presión. Simulación a 100 % de carga. Modificación 2. | 86 |
| C.3. Monitores de presión. Simulación a 75 % de carga. Modificación 1. | 87 |
| C.4. Monitores de presión. Simulación a 75 % de carga. Modificación 2. | 88 |
| C.5. Monitores de presión. Simulación a 50 % de carga. Modificación 1. | 89 |
| C.6. Monitores de presión. Simulación a 50 % de carga. Modificación 2. | 90 |
| C.7. Monitores de presión. Simulación a 30 % de carga. Modificación 1. | 91 |
| C.8. Monitores de presión. Simulación a 30 % de carga. Modificación 2. | 92 |

CAPÍTULO

1

INTRODUCCIÓN

En este capítulo se da un panorama sobre la generación de electricidad a través de centrales hidroeléctricas en México, así como su principio de funcionamiento. Se trata además el objetivo general y los objetivos específicos de este trabajo.

1.1. Antecedentes

En México la generación de electricidad alcanzó 263,152.828 GWh en 2016, de los cuales el 11.07 % fue aportado de forma hidroeléctrica¹. La disminución de las aportaciones pluviales y la reducción de 1.6 % en el uso de agua para la generación de electricidad en las centrales públicas a cargo de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), provocó la caída de 0.6 % en la producción de energía a partir del aprovechamiento hidráulico respecto a 2015 [7], con lo que la producción de electricidad mediante esta tecnología cerró el 2016 con 29,138.395 GWh. De acuerdo con Ramos-Gutiérrez y Montenegro-Fragoso [8], la Comisión Federal de Electricidad cuenta con 65 centrales hidroeléctricas a lo largo del territorio nacional, cuya distribución puede verse en la figura 1.1.



Figura 1.1: Mapa de centrales hidroeléctricas CFE. Tomada totalmente del portal interno de CFE Generación.

Una central hidroeléctrica es una central de transformación de energía donde se aprovecha la energía potencial del agua para convertirla en energía mecánica y posteriormente en energía eléctrica. De manera general, este proceso consiste en hacer pasar un flujo de agua por una turbina hidráulica acoplada a un generador eléctrico.

La descarga del agua turbinada en una central hidroeléctrica se realiza mediante un conducto llamado tubo de descarga, tubo difusor o tubo de aspiración. Este conducto está

¹Véase Sistema de Información Energética, SENER.

especialmente diseñado para las condiciones operativas de cada central y debido a su ubicación y sus dimensiones, una vez que se ha instalado el acceso a él es complicado y en ocasiones resulta imposible. Ante esta situación, resulta importante implementar herramientas ingenieriles que permitan estudiar el comportamiento de dicho componente, evaluar su rendimiento y sus condiciones estructurales sin necesidad de hacer exploración in situ, pues esto implicaría un costo económico muy alto.

La Dinámica de Fluidos Computacional (CFD por sus siglas en inglés) presenta una alternativa para el estudio de este componente, representa un camino viable y económico para analizar y entender el patrón de flujo que atraviesa por esta pieza de la turbomáquina. Además, es posible analizar distintas configuraciones de diseño bajo diferentes condiciones de operación, con un bajo costo y proponer así mejoras a la geometría original.

1.2. Objetivo general

Realizar la simulación numérica de un tubo difusor de geometría variable a través de un estudio de dinámica de fluidos computacional (CFD) para evaluar su rendimiento a carga nominal y cargas parciales a esta.

1.3. Objetivos específicos

- Utilizar software libre de simulación numérica para resolver problemas de ingeniería aplicada en el área de la hidroenergía.
- Hacer modificaciones a la geometría original a través de un software de diseño CAD para simular el efecto de geometría variable.
- Evaluar las distintas geometrías bajo diferentes puntos de operación.
- Documentar el uso de software libre que permita la elaboración de *solvers* para resolver problemas de flujo en OpenFOAM, con detalles que no están incluidos en la guía del programador, para reducir la curva de aprendizaje de nuevos usuarios.

CAPÍTULO

2

CONCEPTOS BÁSICOS

En este capítulo se resumen los conceptos básicos de Mecánica de Fluidos, así como las ecuaciones fundamentales por las que se rige esta ciencia. Se tratan los conceptos relacionados a la Dinámica de Fluidos Computacional, el método de volumen finito y se describe el software utilizado para realizar las simulaciones de este trabajo (OpenFOAM).

2.1. Introducción a la Mecánica de Fluidos

La Mecánica de Fluidos (MF) es la ciencia que se encarga del estudio de los fluidos en movimiento o en reposo. Desde el punto de vista de la MF, la materia solo puede presentarse en dos estados: sólido y fluido [9], cuya diferencia técnica sustancial entre ambos es que; *mientras que un sólido puede resistir un esfuerzo cortante con una deformación estática, un fluido no. Cualquier esfuerzo cortante aplicado al fluido, sin importar que tan pequeño sea, causará que este se mueva.* [9, 10]

Por ser una rama de la mecánica, esta se basa en un cúmulo de leyes de conservación bien fundamentadas, que favorecen un desarrollo teórico riguroso a diferentes problemas.

2.1.1. Ecuaciones de conservación de la Mecánica de Fluidos

El estado y el movimiento de cualquier volumen de fluido se pueden determinar utilizando los principios fundamentales de conservación de la masa o ecuación de continuidad, de la cantidad de movimiento y de la energía, para unas condiciones de contorno y de valor inicial determinadas [11].

El movimiento de un fluido puede analizarse desde dos puntos de vista:

1. **Enfoque estadístico molecular** : Este enfoque considera que un fluido está constituido por moléculas cuyo movimiento puede ser descrito a través de las leyes de la dinámica. Por lo que a nivel macroscópico se considera que el flujo de un fluido se debe al movimiento de las partículas que lo constituyen. Para intentar predecir el comportamiento macroscópico del fluido, se emplean métodos estadísticos para obtener las ecuaciones de conservación correspondientes.
2. **Enfoque del Continuo**: El enfoque del continuo se basa en la hipótesis de que la materia es continua, de modo que no considera la naturaleza molecular de la materia. Se supone que en cada punto de este fluido continuo hay un único valor de la velocidad, presión, densidad y otras variables denominadas variables de campo [12].

La segunda técnica se conoce como análisis integral o de *volumen de control* y será la utilizada para expresar las ecuaciones fundamentales de la MF en este trabajo.

Ecuación de Continuidad

El principio de conservación de masa estipula que: *En un volumen finito esta es invariable, es decir se mantiene constante, aunque cambie su posición y su forma,* esta condición se describe como :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U}) = 0 \quad (2.1)$$

donde ρ representa la densidad del fluido y \mathbf{U} el campo de velocidades.

Conservación de la cantidad de movimiento

La variación en la unidad de tiempo de la cantidad de movimiento es igual a la resultante de las fuerzas de cuerpo. En su forma diferencial, esta ley de conservación se puede expresar como:

$$\rho \frac{D\mathbf{U}}{Dt} = -\nabla P + \rho \mathbf{g} + \nabla \cdot \bar{\bar{\tau}} \quad (2.2)$$

donde P representa la presión, \mathbf{g} la aceleración de la gravedad y $\bar{\bar{\tau}}$ el tensor de esfuerzos viscosos. Ya que se desconocen los esfuerzos cortantes, la ecuación como está presentada es irresoluble [13].

Con la finalidad de dar solución a la ecuación 2.2, es necesario relacionar los esfuerzos viscosos con la tasa de deformación del fluido, siendo la constante de proporcionalidad, la viscosidad. Si consideramos que el fluido de trabajo es un fluido Newtoniano, como el agua y el aire por ejemplo, entonces obtenemos la ecuación de Navier-Stokes:

$$\rho \frac{D\mathbf{U}}{Dt} = -\nabla P + \rho \mathbf{g} + \mu \nabla^2 \mathbf{U} + \frac{1}{3} \mu (\nabla \cdot \mathbf{U}) \quad (2.3)$$

Para un fluido incompresible, es decir un fluido en el que la densidad se mantiene constante, por la ecuación 2.1 sabemos que $(\nabla \cdot \mathbf{U}) = 0$. De esta forma la ecuación 2.3 se reduce de la siguiente manera:

$$\rho \frac{D\mathbf{U}}{Dt} = -\nabla P + \rho \mathbf{g} + \mu \nabla^2 \mathbf{U} \quad (2.4)$$

Cuando se supone que la viscosidad del fluido es despreciable, es decir un fluido ideal, se establece la ecuación de Euler:

$$\rho \frac{D\mathbf{U}}{Dt} = -\nabla P + \rho \mathbf{g} \quad (2.5)$$

Conservación de la energía

En un volumen de control, se pueden identificar diferente formas de energía intrínseca [13] al sistema que representa dicho volumen, por ejemplo:

1. Energía cinética: Asociada al movimiento.
2. Energía potencial: Asociada a la posición.

El principio de conservación de la energía establece que la variación de la energía de un volumen fluido es igual al trabajo por unidad de tiempo de las fuerzas exteriores que actúan

sobre el mismo, más el calor recibido del exterior por unidad de tiempo [11], una de las formas de representar la ecuación de la energía en forma diferencial es la siguiente:

$$\rho \frac{D}{Dt} \left(h + \frac{v^2}{2} + gz \right) - \frac{\partial P}{\partial t} = \partial \dot{Q} - \partial \dot{W} \quad (2.6)$$

donde h representa la entalpía del fluido, z la altura, \dot{W} el trabajo transmitido o cedido por el sistema definido por el volumen de control considerado y \dot{Q} representa el calor transferido al sistema o cedido por el mismo.

2.2. Método de Volumen Finito (MVF)

El método de volumen finito (MVF) es un método de discretización espacial, el cual permite segmentar un dominio en un número finito de celdas no superpuestas a través de un proceso de mallado. De esta forma cada volumen de control¹ queda asociado a cada uno de los puntos de la malla. [14]

Existen dos posibilidades para asociar los volúmenes de control a los puntos de la malla (ver figura 2.1), a continuación se describe cada una de ellas:

1. **Esquema basado en celdas:** Los valores de las variables se asocian en los centros de las celdas. Las líneas de la malla definen los volúmenes finitos y sus superficies. Este esquema es conocido también como *cell-based* o *cell-centered approach*. [1]
2. **Esquema basado en nodos:** Los valores de las variables se asocian en los vértices de la malla, esto hace que las incógnitas estén almacenadas en los puntos de la malla. Este esquema es conocido también como *node-based* o *cell-vertex approach*. [1]

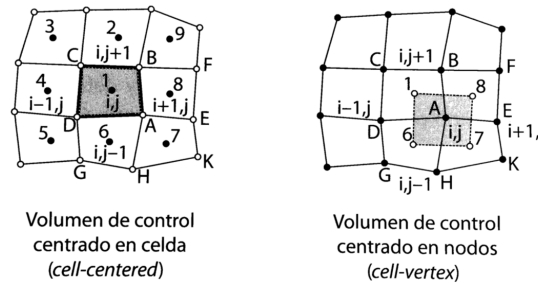


Figura 2.1: Configuración del esquema basado en celdas y en nodos [1].

De acuerdo con J. Fernández [1] normalmente se utiliza el esquema basado en celdas y se debe garantizar que la suma de todos los volúmenes cubra el dominio discretizado y no queden zonas vacías. Una vez definidos los volúmenes de control, se integran las ecuaciones fundamentales tratadas en la sección 2.1.1 sobre cada uno de ellos y posteriormente se obtienen las ecuaciones algebraicas que representan cada una de estas leyes de conservación².

En este método se garantiza la conservación de la variable en cuestión sobre cada celda, por lo tanto los flujos entrantes al volumen de control deben ser iguales a los flujos salientes [1]. Esta propiedad se cumple independientemente del tamaño de las celdas, sin embargo, que exista conservación no significa que se obtenga un resultado exacto, la solución a la variable tratada puede ser conservativa pero inexacta si la discretización tiene pocas celdas.

El MVF es el más utilizado para desarrollar códigos CFD debido a su simplicidad conceptual y su facilidad para ser implementado en cualquier tipo de mallado³.

¹En el MVF se habla indistintamente de celdas o volúmenes de control. [1]

²Para más información y ejemplos consúltese [1, 14, 15]

³Los principales tipos de mallado son **estructurado** y **no estructurado**, véase su descripción en [1, 14]

2.3. Turbulencia

Las investigaciones de Reynolds a fines del siglo XIX, establecieron que existen claramente dos tipos de flujos; el laminar y el turbulento [11], siendo este último el que se presenta con mayor frecuencia en el campo de estudio de la ingeniería.

Una característica esencial de los flujos turbulentos es que el campo de velocidades del fluido varía de forma irregular y significativamente respecto a la posición y el tiempo [16]. La turbulencia es rotacional y tridimensional por su naturaleza y se caracteriza por unos niveles muy altos en la fluctuación de la vorticidad [11], esta propiedad se define de la siguiente manera:

$$\omega = \nabla \times \mathbf{U} \quad (2.7)$$

y por lo tanto en un flujo turbulento, la vorticidad es diferente de 0.

La manifestación de la turbulencia, se da a través de la formación de remolinos, los cuales son los responsables de disipar la energía que se produce en un flujo turbulento (ver figura 2.2). Los remolinos de mayor tamaño son asociados a las fluctuaciones de baja frecuencia, mientras que los más pequeños lo son a las de alta frecuencia [11].

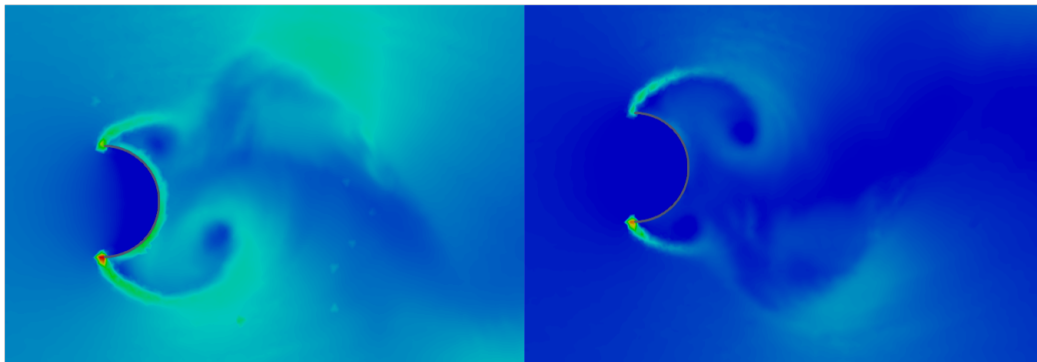


Figura 2.2: Flujo a través de medio cilindro. Elaboración propia

Aunque los mecanismos por los que una inestabilidad puede causar o desembocar en turbulencia son bien entendidos hoy en día, la turbulencia sigue siendo un motivo de estudio y una fuente inagotable de nuevos retos físico-matemáticos.

Los modelos de turbulencia que se emplean actualmente, están basados en hipótesis sobre los procesos viscosos y turbulentos que se presentan en un flujo de fluido [16]. Estos modelos tratan de describir resultados obtenidos de forma experimental por medio de funciones o constantes empíricas que justifiquen la observación.

Un posible enfoque en la modelación de la turbulencia, consiste en integrar nuevas ecuaciones algebraicas o diferenciales a las ecuaciones de flujo medio desarrolladas por Reynolds⁴,

⁴Para mayor información, consultar [11]

sin embargo estos modelos no pueden explicar a detalle el movimiento turbulento ni su origen, sino sólo su efecto sobre las características medias observadas [11].

Aunque no existe un modelo único para representar la turbulencia, algunos de los modelos que se emplean comúnmente en estudios CFD, son los siguientes:

- SpalartAllmaras: Modelo de turbulencia de una ecuación.
- K-Epsilon: Modelo estándar de turbulencia de dos ecuaciones.
- RealizableK-Epsilon: Basado en el modelo estándar K-Epsilon.
- K-Omega: Modelo estándar de turbulencia de dos ecuaciones.
- K-OmegaSST: Modelo de turbulencia de cuatro ecuaciones, basado en el modelo estándar K-Omega.
- Entre otros.

En los estudios realizados por [4, 17, 18, 19, 20], el modelo K-OmegaSST es seleccionado para ejecutar las simulaciones correspondientes, mientras que [21, 22, 23] seleccionan el modelo de turbulencia k-Epsilon. Para el desarrollo de este trabajo y con la finalidad de ahorrar recursos y tiempo computacionales, se ha seleccionado el modelo estándar **K-Omega** donde el cálculo de los parámetros iniciales se define de la siguiente manera:

$$\kappa = \frac{3}{2} (UI)^2 \quad (2.8)$$

$$\Omega = \frac{\sqrt{\kappa}}{l} \quad (2.9)$$

donde κ es la energía turbulenta, Ω la tasa de disipación de la turbulencia, U representa la magnitud de la velocidad del fluido, I es la intensidad de la turbulencia y l representa la longitud característica del modelo.

2.4. Dinámica de Fluidos Computacional (CFD)

Las técnicas numéricas en Ingeniería han experimentado un gran desarrollo en las últimas décadas, en particular, la Mecánica de Fluidos ha sido una de las disciplinas que se han visto beneficiadas con este despliegue científico [1]. El desarrollo de estos métodos en conjunción con el avance tecnológico de equipos de cómputo, nos permiten hoy en día realizar estudios de Dinamica de Fluidos Computacional, convirtiéndose en una herramienta más dentro de la ingeniería asistida por computadora (CAE). A través de una revisión histórica J. Fernández [1] afirma que las técnicas CFD se han convertido en una parte indispensable del proceso de

diseño aerodinámico e hidrodinámico de cualquier medio de locomoción o proceso productivo en nuestros días.

La Dinámica de Fluidos Computacional, es una herramienta para resolver problemas físicos que estén relacionados con el flujo de fluidos y en ciertos casos, de otros fenómenos asociados como la tranferencia de calor [1]. Un análisis CFD puede proveer información detallada del comportamiento de un fluido; por ejemplo, la distribución de presión, velocidad, temperatura, etc. Actualmente esta rama de la mecánica de fluidos tiene diversas aplicaciones en campos como la aerodinámica, la ingeniería biomédica, la turbomaquinaria, entre otras.

Algunas de las principales ventajas e inconvenientes de la Dinámica de Fluidos Computacional de acuerdo J.Fernández [1] y Versteeg, Henk Kaarle and Malalasekera [14] se muestran en la siguiente tabla:

| Ventajas | Desventajas |
|--|--|
| Reducción sustancial de tiempos y costos en los nuevos diseños | Las técnicas CFD no son baratas |
| Posibilidad de analizar sistemas o condiciones difíciles de instrumentar | Se necesita personal calificado |
| Capacidad de estudiar sistemas bajo condiciones peligrosas | No siempre es posible obtener resultados lo suficientemente precisos |

2.4.1. Funcionamiento de un código CFD

Como se mencionó con anterioridad es indispensable la utilización de equipos de cómputo para llevar a cabo este tipo de análisis, por lo que se requiere de un código computacional que esté estructurado en torno a los algoritmos numéricos que pueden emplearse para encontrar solución a este tipo de problemas.

Estos códigos se componen principalmente de 3 partes:

- Pre-procesamiento
- Solución (*Solver*)
- Post-procesamiento.

A continuación se explica cada uno de ellos.

2.4.2. Pre - Procesamiento

El pre-procesamiento consiste en definir cuáles serán los datos de entrada que se asignarán al código CFD, acerca del problema. Las actividades que se llevan a cabo por parte del usuario en esta etapa son las siguientes:

- Definir la geometría a estudiar: Esto significa establecer el dominio computacional.
- Mallas: Consiste en la división del dominio computacional en un número mayor de celdas o volúmenes de control.
- Seleccionar el fenómeno físico o químico que se requiere modelar en el problema.
- Establecer las propiedades del fluido.
- Definir las condiciones de frontera.

2.4.3. Solución (*Solver*)

Representa la parte central del programa de resolución y es el encargado de resolver de forma iterativa las ecuaciones que se han activado previamente en el pre-proceso [1].

Algunas de las tareas que desempeña el usuario en esta sección, son las siguientes:

- Definir el alcance de la simulación (solo flujo o con transferencia de calor, flujo compresible o incompresible, estado estacionario o estado transitorio).
- Determinar el método de solución (basado en la densidad o basado en la presión, segregado o acoplado).
- Definir los algoritmos de acoplamiento presión-velocidad (SIMPLE, SIMPLEC, SIMPLER, PISO).
- Definir el esquema de discretización (upwind de primer orden, upwind de segundo orden, ley exponencial, QUICK).
- Definir los criterios de convergencia para cada variable.
- Lanzar la ejecución del código y esperar que los recursos computacionales de los que dispone resuelvan el caso.

Dependiendo del fenómeno a analizar y tamaño de la malla, el tiempo de cómputo puede durar desde minutos hasta semanas o meses. De manera general las actividades que desarrolla el código computacional durante este apartado son las siguientes:

- Se plantean en cada celda las ecuaciones generales tratadas en el apartado 2.1.1.
- Las ecuaciones que sea necesario resolver se discretizan y linealizan para obtener un sistema algebraico de ecuaciones.
- Se resuelve numéricamente, de forma iterativa, el sistema algebraico para obtener la solución final del campo de fluido en movimiento.

2.4.4. Post - Procesamiento

Esta es la última parte a realizar en un estudio CFD y consiste en mostrar los resultados obtenidos de manera gráfica para su análisis, después de haber realizado las simulaciones correspondientes.

Debido al gran desarrollo tecnológico que se ha tenido en los últimos años, los diferentes software que se emplean para CFD incluyen una amplia gama de opciones para visualizar los datos, por ejemplo:

- Visualizar la geometría y la malla del problema.
- Graficar vectores.
- Hacer seguimiento de partículas.
- Manipular la vista (rotar, acercar, escalar, etc.).
- Hacer animaciones para visualizar los resultados de forma dinámica.

2.5. OpenFOAM

Debido a la complejidad de un estudio CFD y la concentración de los códigos computacionales empleados hoy en día, en gigantes de CAE como **ANSYS** y **CD-adapco**, se ha dado un progresivo incremento en los precios de las licencias del software comercial [1]. Sin embargo este panorama se puede ver contrarrestado por la aparición de nuevos códigos numéricos de distribución libre. La primera compañía en desarrollar un código CFD libre es **OpenCFD** que actualmente desarrolla un avanzado solver libre llamado **OpenFOAM**.

OpenFOAM (OF) es un software CFD libre, de código abierto, desarrollado principalmente por OpenFOAM Ltd desde 2004. Tiene una gran base de usuarios, la mayoría en las áreas de ingeniería y ciencia. OpenFOAM tiene una amplia gama de características para resolver diferentes problemáticas, desde flujos de fluidos que involucran reacciones químicas, turbulencia y transferencia de calor, hasta acústica, mecánica de sólidos y electromagnetismo. [2]

A diferencia de un código comercial, OpenFOAM no presenta una interfaz sencilla e intuitiva (*user friendly*) para llevar a cabo el pre-procesamiento, *solver* y post-procesamiento del estudio a realizar, pues la modificación de los datos de entrada y ejecución del código computacional, se llevan a cabo a través de ficheros de texto y la terminal, sin poder visualizar a la par el dominio computacional.

Una comparación entre la interfaz de un código comercial y OpenFOAM se muestra en la siguiente figura:

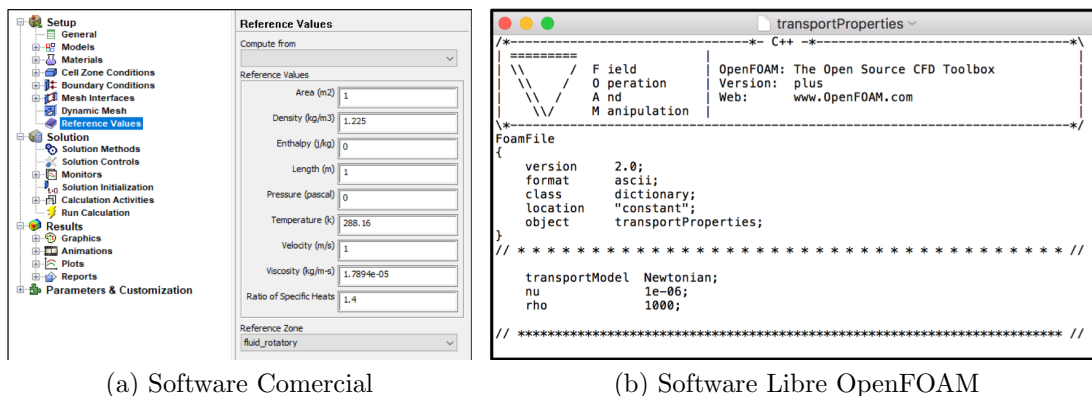


Figura 2.3: Diferencia en la interfaz para establecer las propiedades del fluido.

2.5.1. Estructura de OpenFOAM

Para estructurar un caso en OF es indispensable crear un directorio principal donde se alberguen las carpetas secundarias que contienen la información relacionada con el problema, OF distribuye la información de la siguiente manera:

- Carpeta **system**: En ella se establecen los parámetros asociados con el algoritmo de solución. Como mínimo esta carpeta debe contener los archivos de **controlDict**, **fvSchemes** y **fvSolution**.⁵
- Carpeta **constant**: Esta carpeta contiene la información detallada de la malla (dentro de la subcarpeta **polyMesh**) y los archivos que especifican las propiedades del fluido y modelo de turbulencia.
- Carpeta **0** y **directorios de tiempo**: La carpeta 0 es de vital importancia, pues es en ella donde se especifican las condiciones iniciales de la simulación. Los directorios de tiempo son subcarpetas que se generan después de un determinado *time step* y contienen archivos de datos para diferentes campos (presión, velocidad, etc.).

⁵La descripción de cada fichero, puede consultarse en la sección 4.5.

En la siguiente imagen se muestra la estructura mínima necesaria para correr una simulación en OF:

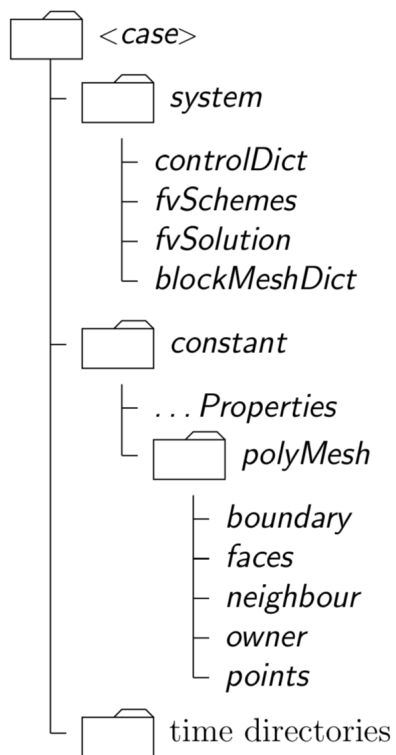


Figura 2.4: Estructura de un caso en OpenFOAM [2].

CAPÍTULO

3

TUBO DIFUSOR

En este capítulo se explica la importancia del tubo difusor como parte de una turbina, se explica su principio de funcionamiento así como los tipos de tubo difusor más comunes. Se establece además el parámetro para determinar la eficiencia de un tubo de aspiración (C_p).

3.1. Definición

Un tubo difusor, también llamado tubo de aspiración o tubo de desfogue, es un conducto que une la salida del rodete de la turbina con el desfogue de la central, guiando así el agua hasta su incorporación al cauce del río.

Este elemento es un componente básico en las turbinas de reacción¹ y su objetivo principal es crear una depresión a la salida del rodete, lo que aumenta el salto de presión en el rodete y por lo tanto incrementa la altura útil² de la turbina.[6]

Es importante aclarar que la salida del rodete, es diferente a la salida de la turbina, esto es explicado en el Apéndice A.

3.2. Principio de funcionamiento

Después de que el agua pasa por el rodete de la turbina, el fluido saliente aún cuenta con una cantidad razonable de energía cinética. Para recuperar parte de esta energía el flujo entra a un conducto donde el área se expande (tubo difusor), provocando que su velocidad disminuya. Esta disminución de velocidad hace que la presión a la salida del difusor se incremente antes de su incorporación al desfogue de la central, por lo tanto la diferencia de presión entre la entrada y la salida de la turbina es mayor³.

En la siguiente figura se muestran las condiciones básicas de descarga de una turbina de reacción.

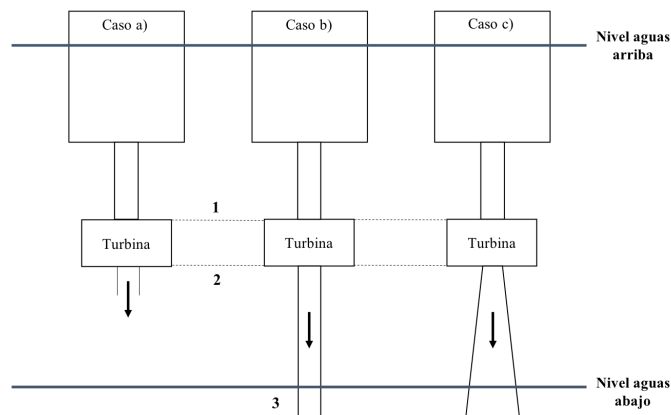


Figura 3.1: Condiciones básicas de descarga de una turbina de reacción

¹Las turbinas de reacción son aquellas cuyos rodetes operan a presiones diferentes de la presión atmosférica. [24]

²Generalmente en el área de la turbomaquinaria, la energía se suele expresar como una **altura**, la cual es determinada después de aplicar la ecuación de Bernoulli entre 2 puntos de interés. En una turbina hidráulica, la altura útil es la diferencia entre la altura neta y las pérdidas hidráulicas. [6]

³La presencia del tubo de aspiración, hace que la presión a la salida del rodete decaiga por debajo de la presión atmosférica. [3]

En el primer caso (a) se observa que la turbina descarga a la atmósfera, por lo tanto no aprovecha la carga debida a la altura entre los niveles 2-3. En el caso b) se observa que la turbina aprovecha la carga debida a 2-3 al prolongar el ducto de salida hasta el nivel aguas abajo. El caso que se estudiará en este trabajo es el último (c), donde se aprovecha la carga entre 2-3 y se genera una carga adicional en el rodete por la transición de área del tubo de desfogue.

Matemáticamente el principio de funcionamiento de un tubo difusor puede representarse con ayuda de la ecuación de Bernoulli, planteada entre los niveles 2-3 de la figura 3.1 quedando de la siguiente manera:

$$z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} = z_3 + \frac{P_3}{\rho g} + \frac{v_3^2}{2g} \quad (3.1)$$

Donde P es la presión absoluta, z es la altura y v la velocidad promedio. Agrupando términos se tiene:

$$\frac{P_3 - P_2}{\rho g} = \frac{v_2^2 - v_3^2}{2g} + (z_2 - z_3)$$

Debido al aumento de área en el tubo difusor, es evidente que v_3 es menor a v_2 , considerando que $P_3 = P_{atm}$ entonces P_2 es menor a la presión atmosférica.

3.3. Tipos de tubo difusor

De acuerdo con [3, 18], según su diseño geométrico, los tubos de aspiración se pueden clasificar de forma general en 4 tipos, los cuales se representan en la siguiente figura:

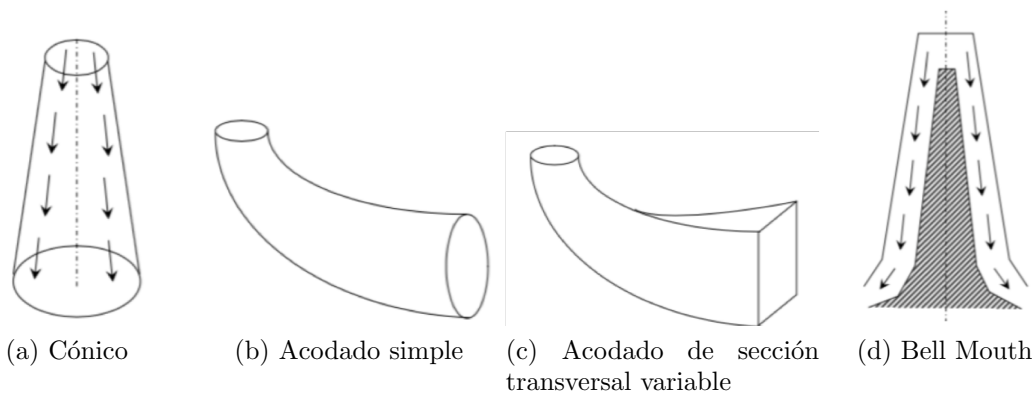


Figura 3.2: Tipos de tubo difusor. Tomada parcialmente de [3]

En este trabajo se empleará un tubo difusor acodado de sección transversal variable, que se describe a continuación.

3.3.1. Tubo difusor Acodado de sección transversal variable

Este tipo de tubo difusor transforma progresivamente la sección circular de entrada en una sección rectangular de salida. Comúnmente, este tipo de difusor consta de tres partes; el cono de descarga, la sección acodada y la salida del difusor. La figura 3.3 ilustra estas características con una vista meridional y una vista de la sección transversal de un tubo difusor.

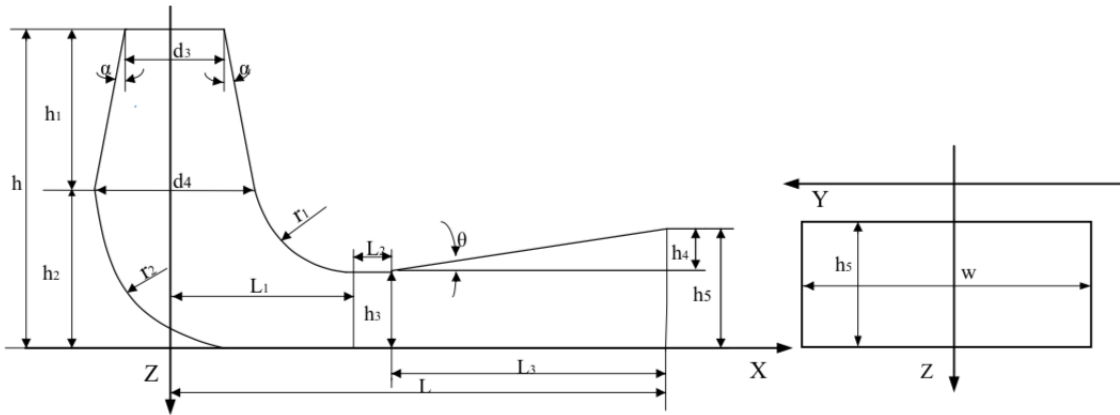


Figura 3.3: Parámetros geométricos de un tubo difusor acodado [4].

3.4. Parámetros de rendimiento de un tubo de aspiración

Como se ha visto con anterioridad, la presencia del tubo difusor en la turbina es esencial. Ante esta situación es importante definir un conjunto de parámetros que nos ayuden a evaluar el desempeño de este componente. De acuerdo con [25] hay 3 parámetros globales para evaluar el rendimiento del tubo de desfogue basado en el análisis del flujo:

1. Coeficiente de recuperación de presión promedio.
2. Coeficiente de recuperación de presión en la pared⁴.
3. Factor de pérdida de energía⁵.

Los estudios realizados por [4, 20, 26] emplean el primer parámetro como medio para establecer el rendimiento de un difusor, por lo que en este trabajo se ha optado por utilizarlo de igual manera.

⁴Este parámetro indica el grado de conversión de energía cinética a presión estática y es tomado con los valores en las paredes del tubo. Véase [25]

⁵Este factor es definido por la diferencia de presión total entre la entrada y la salida del aspirador, en relación a la energía cinética de entrada. Véase [25]

3.4.1. Coeficiente de Recuperación de Presión Promedio

Este parámetro indica el grado de conversión de energía cinética a presión estática, donde un valor mayor indica una mayor eficiencia y se define como:

$$C_p = \frac{P_{out} - P_{in}}{\frac{1}{2}\rho \left(\frac{Q_{in}}{A_{in}}\right)^2} \quad (3.2)$$

Donde los valores de presión son tomados como el promedio de la presión estática a la entrada y la salida, ρ es la densidad del fluido, Q_{in} es el flujo volumétrico de entrada y A_{in} es el área de la sección transversal de entrada del difusor.

CAPÍTULO

4

DESARROLLO

En este capítulo se establece la metodología a seguir durante el trabajo, se presenta la información recopilada acerca del caso a estudiar, el proceso de modificación de la geometría y su respectivo mallado. Se explica la configuración del solver para la ejecución de las simulaciones en OpenFOAM y los criterios de convergencia para obtener resultados confiables.

4.1. Metodología

Para cumplir con el objetivo del trabajo se hicieron simulaciones en estado estacionario, empleando cómputo en paralelo, a diferentes puntos de operación (100 %, 75 %, 50 % y 30 % de carga) variando la geometría del tubo difusor en la sección de salida. Para ello se llevaron a cabo los siguientes pasos:

1. Se recopiló la información necesaria del caso estudiado.
2. Se establecieron los parámetros de modificación de la geometría.
3. Se trabajó la geometría en un software CAD.
4. Se malló la geometría.
5. Se importó la malla a OF y se verificó su calidad.
6. Se configuró el solver.
7. Se establecieron los criterios de convergencia de la simulación.
8. Se ejecutó el código computacional.
9. Se analizaron los datos obtenidos.

4.2. Información recopilada

En este trabajo se utilizaron los datos de una unidad de 200 MW instalada en México recopilados por el Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias (INEEL).

Los datos recopilados son los siguientes:

- Planos con dimensiones del tubo de desfogue.
- Datos de operación de diseño de la unidad generadora.
- Datos de flujo a diferentes cargas.
- Modelo tridimensional del tubo de desfogue.

En la siguiente tabla se muestran los datos del flujo másico a diferentes cargas, lo cual es de vital importancia para establecer una de las condiciones de frontera de las simulaciones.

| Carga % | Flujo másico [kg/s] |
|---------|---------------------|
| 100 | 227,928 |
| 75 | 170,946 |
| 50 | 113,964 |
| 30 | 68,378 |

Tabla 4.1: Datos de flujo a diferentes cargas.

El modelo tridimensional del tubo de aspiración se obtuvo en un archivo *.step* para su tratamiento en un software CAD. En la siguiente figura se muestra la geometría original reconstruida a partir de los planos proporcionados por la central.

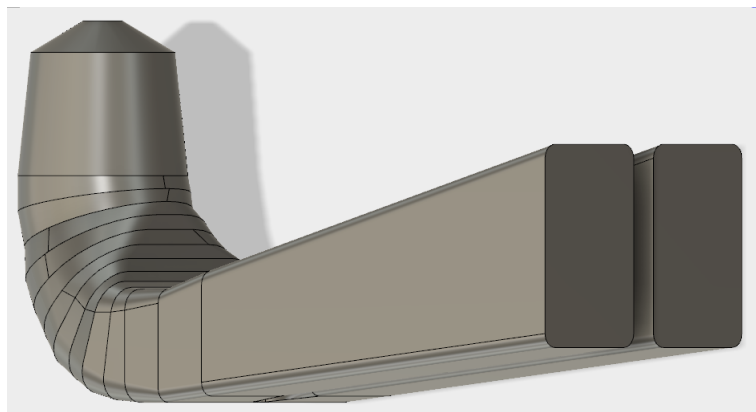


Figura 4.1: Modelo 3D del tubo difusor.

4.3. Modificación de la geometría

Como se puede ver en la figura 3.3 hay diferentes parámetros geométricos que componen la estructura de un tubo de desfogue. En este trabajo se optó por modificar la geometría reduciendo el área de salida del tubo difusor. Para ello se ha definido un ángulo de corte que denominamos “ α ”, el cual se representa gráficamente en la figura 4.2.

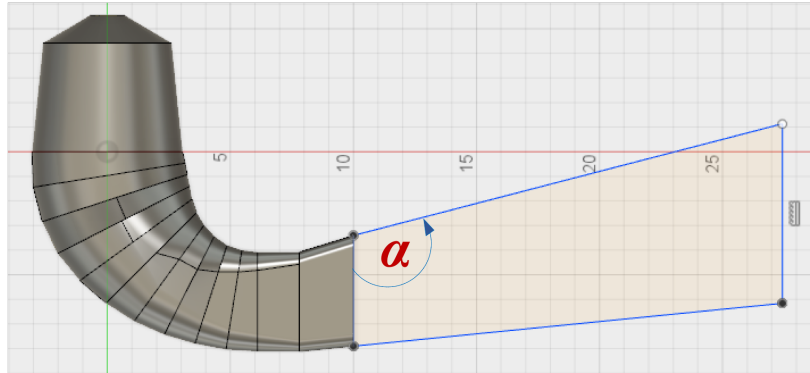
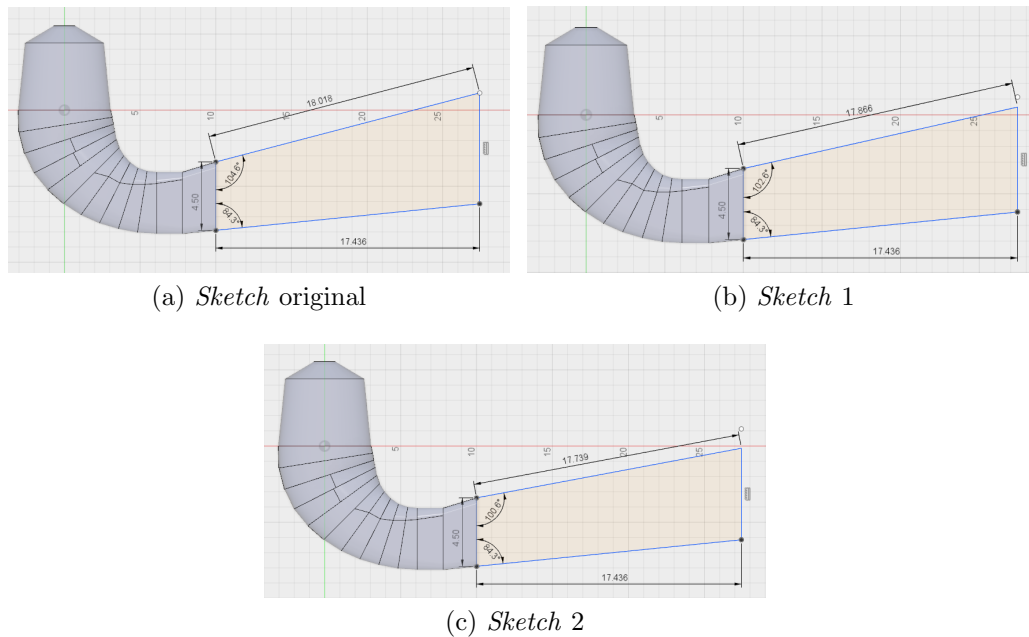


Figura 4.2: Ángulo de corte

Se ha establecido que la variación del ángulo α sea de 2° por corte. Para hacer las modificaciones correspondientes se ha utilizado el software CAD: Autodesk Fusion 360, los diferentes *sketch* de los cambios hechos a la geometría original se muestran a continuación:



Los valores de α correspondientes a cada modificación se presentan resumidos en la tabla 4.2. Es importante mencionar que el ángulo α no puede variar mas de 6° para reducir el área de salida, pues una variación mayor a este valor hace que el área de salida sea igual o menor al

área proveniente del tubo que no se ha modificado y por lo tanto el fluido no experimentaría una reducción significativa en la velocidad e incluso podría acelerarse, aumentando la presión en la salida del rodete, disminuyendo la potencia de la unidad.

| Geometría | α |
|----------------|----------|
| Original | 104.6° |
| Modificación 1 | 102.6° |
| Modificación 2 | 100.6° |

Tabla 4.2: Valores del ángulo α de las modificaciones realizadas.

Después de establecer el valor de α y dibujar su *sketch* correspondiente, se aplicaron otras funciones dentro del software CAD para construir el nuevo modelo. Las geometrías obtenidas después de realizar las modificaciones se muestran a continuación:

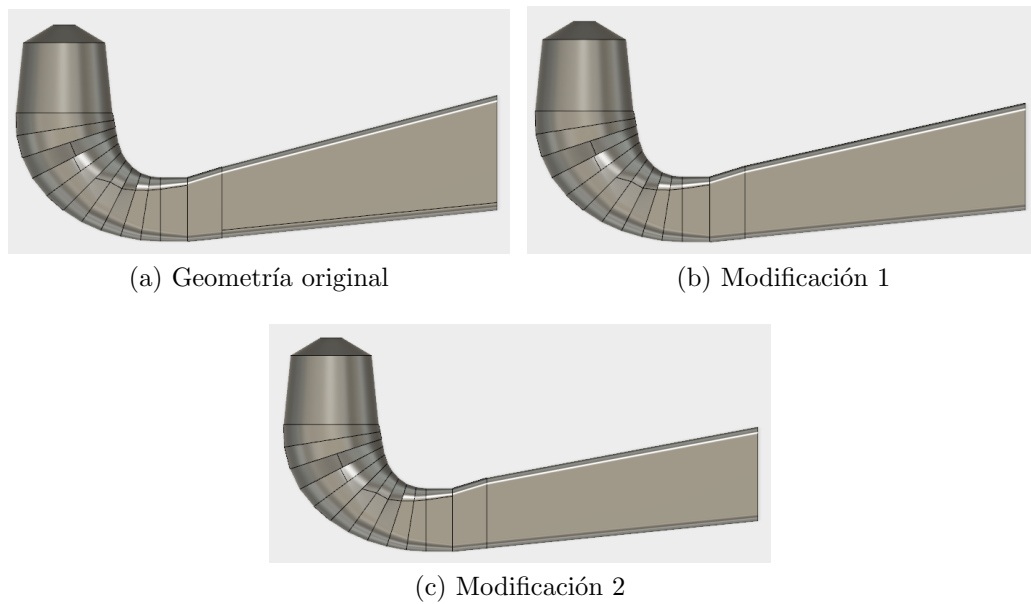


Figura 4.3: Geometrías resultantes.

Como se puede apreciar en la figura 4.3 en la sección de salida se reduce la altura, sin embargo se conserva la profundidad. En la figura 4.4 se muestra esta condición.

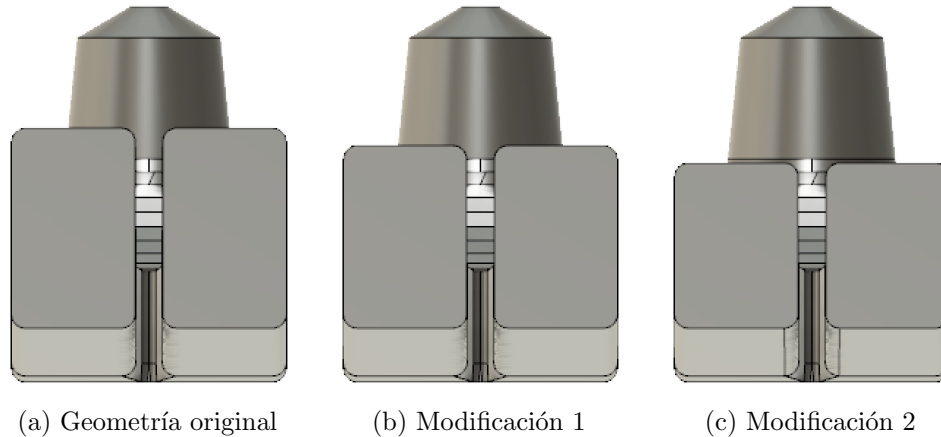


Figura 4.4: Área de salida, vista frontal.

4.4. Proceso de mallado

En un análisis CFD, la solución a un problema de flujo de fluido, se define en los nodos dentro de cada celda, por lo que la exactitud de los resultados depende, en parte, del número de nodos que se hayan obtenido después de discretizar la geometría original. Esto quiere decir que a mayor número de celdas la exactitud de los resultados obtenidos será mayor.

De acuerdo con la mayoría de autores consultados, cuando las geometrías son complejas, un mallado con elementos tetraédricos es el más utilizado [4, 17, 18, 19, 21, 22, 26]. Para este trabajo se ha optado por generar una malla no estructurada, tetraédrica para cada modelo geométrico.

El mallado de las distintas geometrías se ha hecho a través del software **Gmsh**, el cual es un software libre de código abierto que cuenta con un módulo CAD y un módulo de post-procesamiento integrado¹.

4.4.1. Entrada - Salida - Pared

Es importante que previo al proceso de mallado se definan los diferentes elementos que contendrán la información de las condiciones de frontera de la simulación, así como el volumen computacional de la geometría. En Gmsh, este proceso se realiza seleccionando las caras o superficies correspondientes a la entrada de flujo (*inlet*), a la salida de flujo (*outlet*), a la estructura del difusor (*wall*) y el volumen computacional de la geometría, a través del módulo **Physical groups / Add / Surface-Volume**. Gráficamente en la figura 4.5 se muestra esta tarea. Una vez definidas estas secciones de la geometría, se procede a establecer los parámetros de mallado.

¹Para mas información consúltese [27]

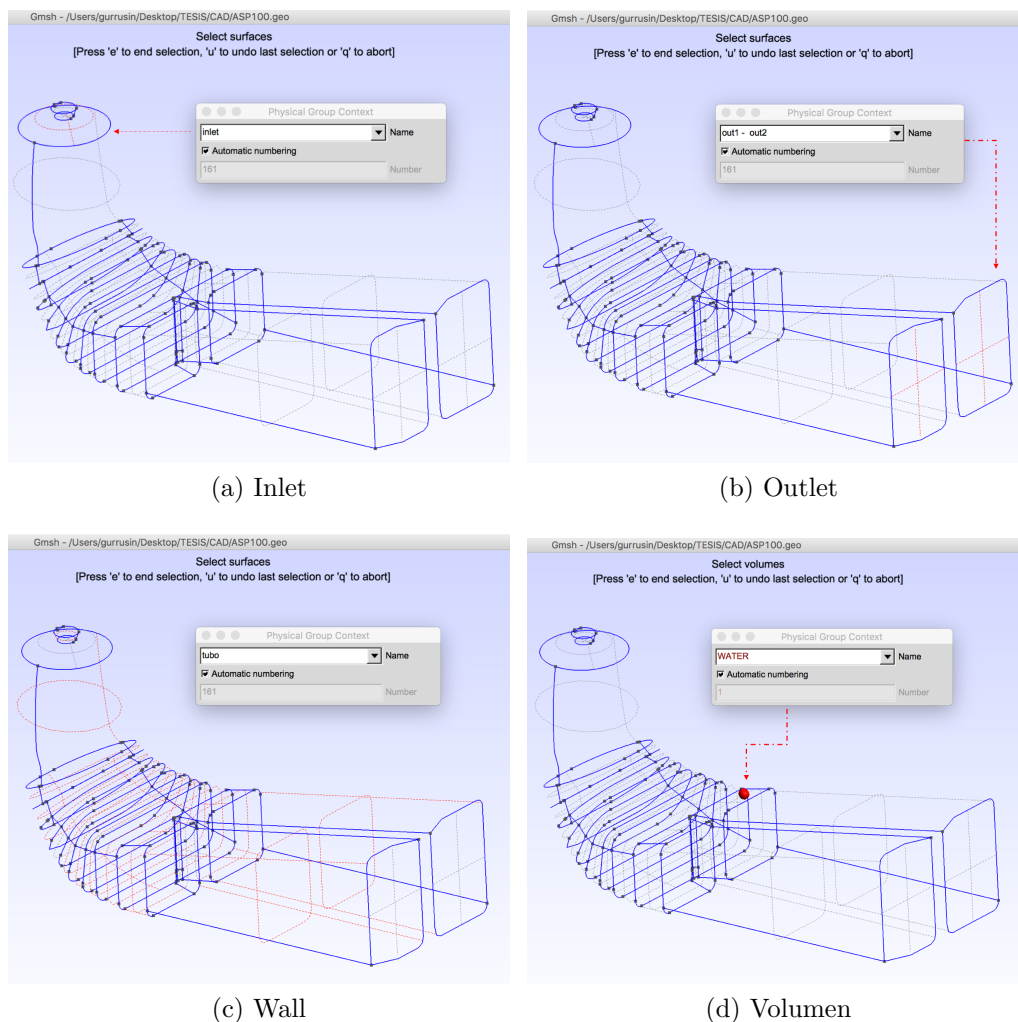


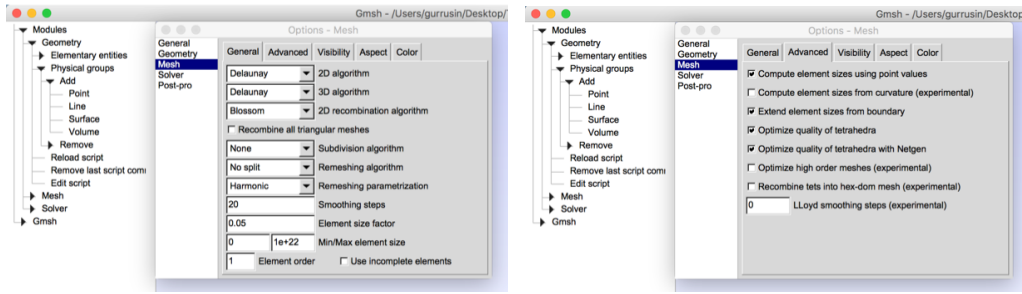
Figura 4.5: Inlet-Outlet-Wall

4.4.2. Parámetros de mallado

La figura 4.6 muestra las características seleccionadas para mallar las diferentes geometrías.

De las condiciones más importantes son el *element size factor*, donde un valor más pequeño significa un número mayor de elementos que conformarán la malla, y el algoritmo 2D *Delaunay*, el cual es un método de discretización triangular². Es importante mencionar que estas condiciones se obtuvieron después de hacer un proceso iterativo **Mallado - Importación en OF - Análisis de calidad de malla**.

²Se pueden consultar detalles en [28]



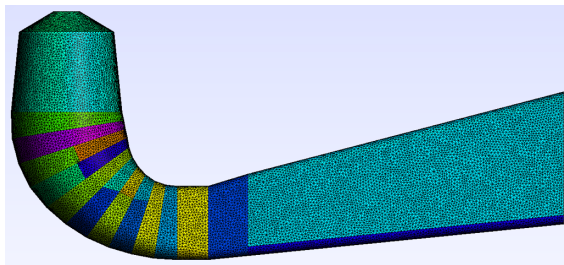
(a) Parámetros generales

(b) Parámetros avanzados

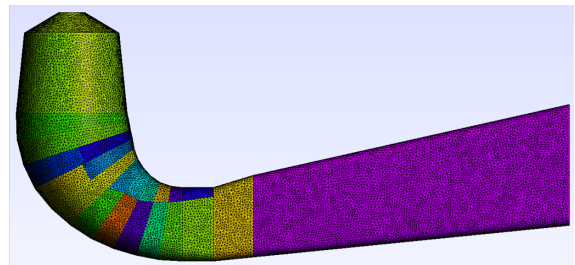
Figura 4.6: Configuración de las condiciones de mallado.

4.4.3. Mallas generadas

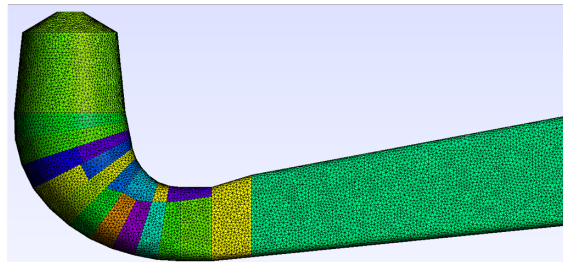
Una vez establecidos estos parámetros, de forma automática Gmsh genera una malla tetraédrica no estructurada al seleccionar el módulo **Mesh / 3D**. La figura 4.7 muestra mallas finales para cada uno de los modelos generados.



(a) Malla Geometría Original.



(b) Malla Modificación 1.



(c) Malla Modificación 2.

Figura 4.7: Mallas generadas.

4.4.4. Importar una malla en OpenFOAM

Para importar una malla generada en Gmsh en OF, el archivo con extensión “.*msh*” debe estar contenido dentro del directorio principal del caso a simular. Hasta este momento el directorio solo debe contener las carpetas 0 y system ya que al ejecutar el comando **gmshToFoam** seguido del nombre del archivo de la malla, esta se cargará a OF y creará el directorio Constant tratado en el apartado 2.3.1. La siguiente figura ejemplifica lo antes mencionado:

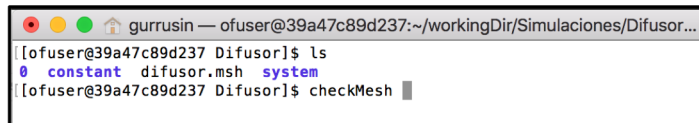


```
gurrusin — ofuser@39a47c89d237:~/workingDir/Simulaciones/Difusor...
[[ofuser@39a47c89d237 Difusor]$ ls
0 difusor.msh system
[[ofuser@39a47c89d237 Difusor]$ gmshToFoam difusor.msh
```

Figura 4.8: Comando **gmshToFoam**.

4.4.5. Calidad de la malla

Para verificar la calidad de la malla generada, OpenFOAM emplea el comando **checkMesh** (ver figura 4.9), donde ejecuta un análisis de todos los elementos que integran la malla y muestra sus indicadores generales. Es posible guardar la información del diagnóstico de malla en un fichero de texto adicional.



```
gurrusin — ofuser@39a47c89d237:~/workingDir/Simulaciones/Difusor...
[[ofuser@39a47c89d237 Difusor]$ ls
0 constant difusor.msh system
[[ofuser@39a47c89d237 Difusor]$ checkMesh
```

Figura 4.9: Comando **checkMesh**.

Como se ha mencionado anteriormente, la confiabilidad de los resultados de un estudio CFD depende, entre otras cosas, de la calidad de la malla del dominio computacional. Para ello debemos prestar especial atención en 3 parámetros centrales y que sus valores estén dentro del límite establecido por OF. Estos parámetros son los siguientes:

1. Relación de aspecto: Este parámetro indica la relación entre el lado mayor y el lado menor del elemento. Lo deseable es que este valor sea 1.
2. Oblicuidad: Mide el grado de similitud entre el elemento y el elemento ideal descrito por su circunferencia circunscrita 2D o esfera en 3D . El valor máximo permisible para acreditar el análisis de malla en OpenFOAM es 4.
3. Ortogonalidad: Es una generalización de la noción geométrica de perpendicularidad. Se determina el ángulo entre los ejes ortogonales de una cara y los vectores que definen la dirección de las caras que se generan a partir de sus aristas. El valor máximo permisible es para acreditar el análisis de malla en OpenFOAM es 70.

En la tabla 4.3 se muestra un resumen de los parámetros antes mencionados para las diferentes mallas. Como se observa, la cantidad de elementos generados es mayor que los reportados en [18, 21, 22, 25] y los valores de relación de aspecto, oblicuidad y ortogonalidad están dentro de los permisibles por OF.

| Malla | No. de elementos | Max. Relación de aspecto | Oblicuidad | Ortogonalidad |
|----------------|------------------|--------------------------|------------|---------------|
| Original | 1,137,730 | 6.81 | 0.92 | 61.27 |
| Modificación 1 | 1,062,346 | 6.81 | 0.93 | 65.90 |
| Modificación 2 | 608,127 | 8.02 | 0.85 | 65.78 |

Tabla 4.3: Parámetros de calidad de malla.

Los análisis de malla completos pueden consultarse en el Apéndice B.

4.5. Configuración del solver

Después de tener una malla adecuada para realizar la simulación, es importante configurar el solver con la estructura adecuada (ver figura 2.4) con base en los resultados que deseamos obtener. A continuación se explica directorio por directorio la configuración inicial de la simulación.

4.5.1. Carpeta: Sistema

Como se vio en el apartado 2.5.1, el directorio de Sistema (*System*) debe contener como mínimo 3 ficheros de texto que son:

- controlDict
- fvSchemes
- fvSolution

En este trabajo se han agregado ficheros adicionales que representan funciones, con el fin de extraer información del software que permita un mejor post-procesamiento de datos. El contenido de la carpeta **System** se muestra en la figura 4.10.

A continuación se hace la descripción de la configuración utilizada en los ficheros contenidos dentro de este directorio.

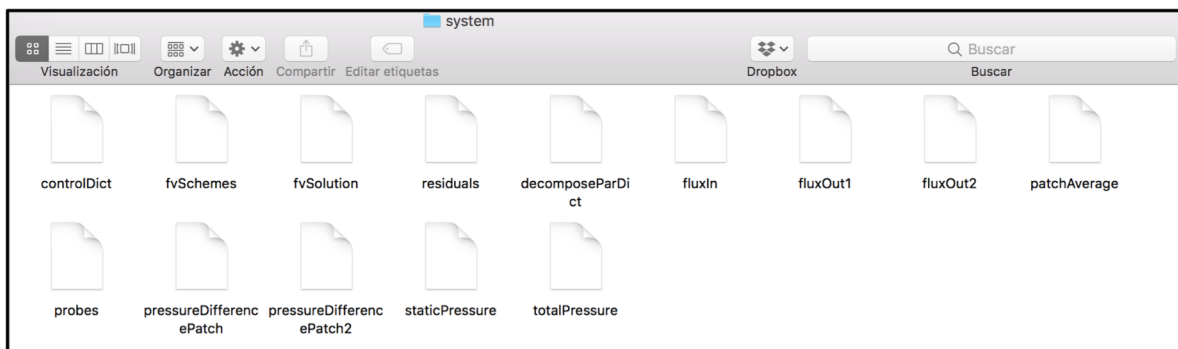


Figura 4.10: Contenido general de la carpeta **System**.

controlDict

En este fichero se establecen los parámetros de control de ejecución de la simulación. Estos controles se dividen en tres rubros centrales³:

- Control de tiempo.
- Opciones de escritura de datos.
- Otras funciones.

La configuración mostrada en la figura 4.11 realiza 2001 iteraciones de una simulación en estado estacionario, creando directorios de tiempo cada 100 iteraciones con funciones adicionales para el post - procesamiento de datos. Esta configuración se utilizó en todas las simulaciones.

³Puede consultarse la descripción detallada de cada uno de ellos en la Guía de usuario de OpenFOAM [2].

```

controlDict
-----
Field Operation And Manipulation
OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
Version: plus
Web: www.OpenFOAM.com
-----
FoamFile
{
  version      2.0;
  format       ascii;
  class        dictionary;
  location     "system";
  object       controlDict;
}
// *****

application    simpleFoam;

startFrom      latestTime;

startTime      0;

stopAt         endTime;

endTime        2001;

deltaT         1;

writeControl   timeStep;

writeInterval  100;

purgeWrite     0;

writeFormat    ascii;

writePrecision 6;

writeCompression off;

timeFormat     general;

timePrecision  6;

runTimeModifiable true;

functions
{
  #includeFunc residuals
  #includeFunc fluxIn
  #includeFunc fluxOut1
  #includeFunc fluxOut2
  #includeFunc probes
  #includeFunc staticPressure
  #includeFunc totalPressure
  #includeFunc patchAverage
  #includeFunc pressureDifferencePatch
  #includeFunc pressureDifferencePatch2
}

// *****

```

Figura 4.11: Fichero **controlDict**

fvSchemes

En este fichero OpenFOAM asigna un esquema numérico, al conjunto de operadores diferenciales involucrados en las ecuaciones a resolver, (por ejemplo: derivadas, gradientes, etc.) de esta manera, OpenFOAM transforma una ecuación matemática a un código computacional con una sintaxis que se asemeja a los términos de la expresión. (Ver figura 4.12)

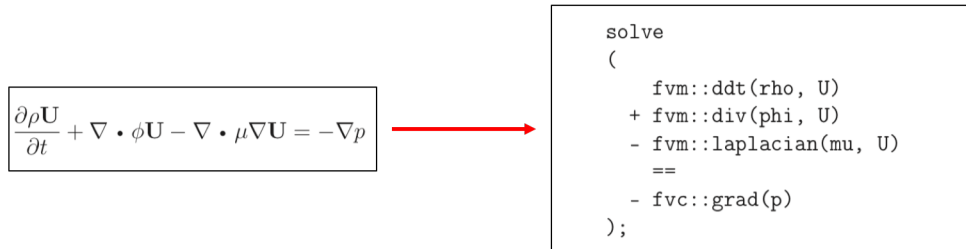


Figura 4.12: Ecuación y sintaxis de OpenFOAM

El conjunto de términos, para los cuales se deben especificar esquemas numéricos, se subdivide en las siguientes categorías:

- **timeScheme** o **ddtScheme**: Derivadas temporales de primer y segundo orden.
- **gradSchemes**: Gradiente ∇
- **divSchemes**: Divergencia $\nabla \cdot$
- **laplacianSchemes**: Laplaciano ∇^2
- **interpolationSchemes**: Valores de interpolación de una celda a una superficie.
- **snGradSchemes**: Representa la componente de un gradiente que es normal a la cara de una celda.
- **wallDist**: Cuando es requerido, se calcula la distancia a la pared.

Los esquemas numéricos asignados, se muestran en la figura 4.13a. Esta configuración será utilizada en todas las simulaciones.

fvSolution

En este fichero se establecen los controles sobre los métodos de solución de ecuaciones, tolerancias (residuales) y otros parámetros involucrados en el algoritmo de ejecución (SIMPLE). La configuración establecida para las diferentes simulaciones del tubo difusor se muestra en la figura 4.13b.

```

=====
\\ / Field      OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
\\ / Operation  Version: plus
\\ / And        Web: www.OpenFOAM.com
\\ / Manipulation
=====
FoamFile
{
  version      2.0;
  format       ascii;
  class        dictionary;
  location     "system";
  object       fvSchemes;
}
// ***** //

ddtSchemes
{
  default      steadyState;
}

gradSchemes
{
  default      cellLimited leastSquares 1.0;
  grad(U)      cellLimited leastSquares 1.0;
}

divSchemes
{
  default      none;
  div(phi,U)   Gauss linearUpwindV grad(U);
  div(phi,k)   Gauss linearUpwind grad(k);
  div(phi,omega) Gauss linearUpwind grad(omega);
  div((nuEff*dev2(T(grad(U)))) Gauss linear;
}

laplacianSchemes
{
  default      Gauss linear limited 0.5;
}

interpolationSchemes
{
  default      linear;
}

snGradSchemes
{
  default      limited 0.5;
}

wallDist
{
  method      meshWave;
}

// ***** //
    
```

(a) Fichero fvSchemes

```

=====
\\ / Field      OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
\\ / Operation  Version: plus
\\ / And        Web: www.OpenFOAM.com
\\ / Manipulation
=====
FoamFile
{
  version      2.0;
  format       ascii;
  class        dictionary;
  location     "system";
  object       fvSolution;
}
// ***** //

solvers
{
  p
  {
    solver      GAMG;
    tolerance   1e-7;
    relTol      0.01;
    smoother    GaussSeidel;
    nPreSweeps  0;
    nPostSweeps 2;
    cacheAgglomeration on;
    agglomerator faceAreaPair;
    nCellsInCoarsestLevel 10;
    mergeLevels 1;
  }
}

U
{
  solver        smoothSolver;
  smoother      GaussSeidel;
  tolerance     1e-9;
  relTol        0.01;
  nSweeps       1;
}

k
{
  solver        smoothSolver;
  smoother      GaussSeidel;
  tolerance     1e-9;
  relTol        0.01;
  nSweeps       1;
}

omega
{
  solver        smoothSolver;
  smoother      GaussSeidel;
  tolerance     1e-9;
  relTol        0.01;
  nSweeps       1;
}
}

SIMPLE
{
  nNonOrthogonalCorrectors 3;
  consistent yes;
}

relaxationFactors
{
  equations
  {
    p          0.3;
    U          0.7;
    k          0.5;
    omega      0.5;
  }
}

cache
{
  grad(U);
}

// ***** //
    
```

(b) Fichero fvSolution

Figura 4.13: Configuración de los ficheros **fvSchemes** y **fvSolution**

Directorios adicionales

Como se observa en la figura 4.11, se ha definido un conjunto adicional de funciones, las cuales complementan el solver y ayudan a extraer diferentes datos de interés. Cada función agregada debe tener su propio fichero dentro de la carpeta **System** (ver figura 4.10), los ficheros adicionales agregados son los siguientes:

- **residuals**: Para los campos especificados, extrae el valor de los residuales de cada iteración. En este trabajo se ha configurado para extraer los residuales de los campos de presión y velocidad.
- **decomposeParDict**: Como se mencionó en el apartado 4.1, se empleará cómputo en paralelo para ejecutar las diferentes simulaciones. En este trabajo se ha configurado una partición **simple** de la malla en 9 segmentos ⁴.

⁴Para mas información véase la Guia de Usuario de OpenFOAM [2].

- **fluxIn**, **fluxOut1** y **fluxOut2**: Esta función pertenece a la clase *flowRatePatch*, la cual calcula el flujo que atraviesa por un *patch*⁵ en específico, a través de la suma del flujo en las caras de las celdas que lo componen. En este trabajo se ha configurado un fichero para la entrada y las 2 salidas de flujo respectivamente.
- **patchAverage**: Esta función pertenece a la clase *surfaceFieldValue*, la cual calcula el promedio de un campo sobre una superficie seleccionada. En este trabajo se ha configurado para extraer la presión promedio en el *inlet*.
- **probes**: Esta función extrae los valores de los campos seleccionados en ubicaciones específicas⁶.
- **pressureDifferencePatch** y **pressureDifferencePatch2**: Esta función pertenece a la clase *Pressure tools*, la cual calcula la diferencia de presión entre dos *patches* seleccionados. En este trabajo se han configurado los ficheros para extraer el valor de la diferencia de presión entre *inlet - out1* e *inlet - out2* respectivamente.
- **staticPressure**: Esta función pertenece a la clase *Pressure tools*, ya que OpenFOAM trabaja con la presión cinemática, esta función calcula la presión estática escalándola a través de una densidad especificada. En este trabajo se ha configurado con la densidad del agua.
- **totalPressure**: Esta función pertenece a la clase *Pressure tools*, ya que OpenFOAM trabaja con la presión cinemática, esta función calcula la presión total escalándola a través de una densidad especificada y una presión de referencia. En este trabajo se ha configurado con la densidad del agua y una presión de referencia igual a la atmosférica.

⁵Un *patch* es un elemento de la malla que no contiene información geométrica o topológica de ésta (por ejemplo un *inlet*, *outlet*, etc.)[2].

⁶Véase la sección 4.7

4.5.2. Carpeta: Constante

Como se trató en el apartado 2.5.1, aparte de contener la información detallada de la malla, la carpeta Constante (*Constant*) debe contener dos ficheros adicionales donde se definen las propiedades del fluido y el modelo de turbulencia seleccionado para la simulación. (Ver figura 4.14)

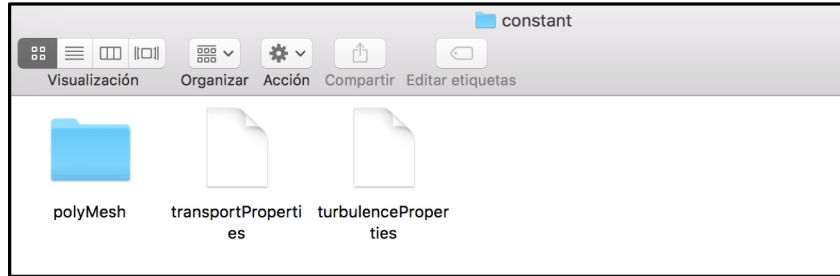


Figura 4.14: Contenido general de la carpeta **Constant**

Ya que el fluido de trabajo es agua, en la figura 4.15 se muestra cómo especificar a OF sus propiedades.

```

=====
Field      | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
Operation  | Version: plus
And        | Web: www.OpenFOAM.com
Manipulation
=====
FoamFile
{
  version      2.0;
  format       ascii;
  class        dictionary;
  location     "constant";
  object       transportProperties;
}
// *****

transportModel Newtonian;
nu              1e-06;
rho            1000;
// *****
    
```

Figura 4.15: Contenido del fichero **transportProperties**

El modelo de turbulencia que se ha escogido es el modelo k-Omega. La figura 4.16 ejemplifica la forma en que se deben establecer estas condiciones.

```

=====
Field      | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
Operation  | Version: plus
And        | Web: www.OpenFOAM.com
Manipulation
=====
FoamFile
{
  version      2.0;
  format       ascii;
  class        dictionary;
  location     "constant";
  object       turbulenceProperties;
}
// *****

simulationType RAS;
RAS
{
  RASModel     kOmega;
  turbulence    on;
  printCoeffs  on;
}
// *****
    
```

Figura 4.16: Contenido del fichero **turbulenceProperties**

4.5.3. Definición de las condiciones de frontera / Carpeta 0

Para definir las condiciones de frontera, el primer paso que se debe realizar es indicar a OpenFOAM, qué elementos de la malla corresponden a un *patch* y a un *wall*⁷, a través del fichero **boundary** localizado en la sub carpeta **polymesh** en el directorio **Constant**. La figura 4.17 muestra las restricciones geométricas⁸ hechas sobre la malla.



```

=====
\\ \ / F ield
\\ \ / O peration
\\ \ / A nd
\\ \ / M anipulation
=====
OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
Version: v1712
Web: www.OpenFOAM.com

FoamFile
{
  version      2.0;
  format       ascii;
  class        polyBoundaryMesh;
  location     "constant/polymesh";
  object       boundary;
}
// *****

4
{
  inlet
  {
    type        patch;
    physicalType inlet;
    nFaces      2308;
    startFace   2220049;
  }
  tubo
  {
    type        wall;
    physicalType wall;
    nFaces      102658;
    startFace   2222157;
  }
  out1
  {
    type        patch;
    physicalType outlet;
    nFaces      3028;
    startFace   2324815;
  }
  out2
  {
    type        patch;
    physicalType outlet;
    nFaces      3028;
    startFace   2327843;
  }
}
// *****

```

Figura 4.17: Restricciones geométricas.

Como se observa en la figura 4.17, OF reconoce los nombres asignados a las superficies durante el proceso descrito en el apartado 4.4.1. Estas condiciones son asignadas de forma análoga en las diferentes mallas utilizadas.

El proceso anteriormente descrito es de suma importancia: de no definir estas condiciones OF no reconocerá los datos y valores de entrada asignados a cada parte de la malla en el directorio 0.

Carpeta 0

Este directorio contiene los ficheros correspondientes a la información de las condiciones iniciales de la simulación. En la figura 4.18 se muestra el contenido de este directorio.

La forma de indicar las condiciones de frontera a cada parte de la malla, se ejemplifica en la imagen 4.19, la cual corresponde a la condición inicial de la velocidad para la simulación a 100 % de carga.

⁷Un *wall* es un elemento de la malla que coincide con un muro sólido de la geometría. Esta restricción geométrica se utiliza cuando se requiere de una modelación física como funciones de pared para un modelo de turbulencia. [2]

⁸Los diferentes *geometric constraint patch types* pueden consultarse en [2].

| Simulación | <i>patch - wall</i> | U | P | k | omega | nut |
|----------------|---------------------|--------------|-------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|
| Carga 100 % | inlet | (0 0 11.485) | zeroGradient | fixedValue uniform 1.97 | fixedValue uniform 0.59 | calculated uniform 0 |
| | out1 - out 2 | zeroGradient | fixedValue uniform 0 | zeroGradient | zeroGradient | calculated uniform 0 |
| | tubo | noSlip | zeroGradient | kqRWallFunction uniform 1.97 | omegaWallFunction uniform 0.59 | nutkWallFunction uniform 0 |
| Carga 75 % | inlet | (0 0 8.615) | zeroGradient | fixedValue uniform 1.11 | fixedValue uniform 0.44 | calculated uniform 0 |
| | out1 - out 2 | zeroGradient | fixedValue uniform 0 | zeroGradient | zeroGradient | calculated uniform 0 |
| | tubo | noSlip | zeroGradient | kqRWallFunction uniform 1.11 | omegaWallFunction uniform 0.44 | nutkWallFunction uniform 0 |
| Carga 50 % | inlet | (0 0 5.740) | zeroGradient | fixedValue uniform 0.49 | fixedValue uniform 0.29 | calculated uniform 0 |
| | out1 - out 2 | zeroGradient | fixedValue uniform 0 | zeroGradient | zeroGradient | calculated uniform 0 |
| | tubo | noSlip | zeroGradient | kqRWallFunction uniform 0.49 | omegaWallFunction uniform 0.29 | nutkWallFunction uniform 0 |
| Carga 30 % | inlet | (0 0 3.445) | zeroGradient | fixedValue uniform 0.178 | fixedValue uniform 0.17 | calculated uniform 0 |
| | out1 - out 2 | zeroGradient | fixedValue uniform 0 | zeroGradient | zeroGradient | calculated uniform 0 |
| | tubo | noSlip | zeroGradient | kqRWallFunction uniform 0.178 | omegaWallFunction uniform 0.17 | nutkWallFunction uniform 0 |

Tabla 4.4: Condiciones de frontera.

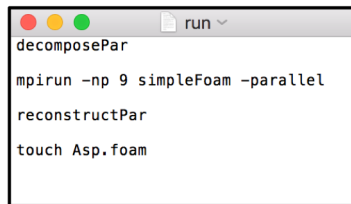
4.6. Ejecución de la simulación

Para dar inicio a una simulación en OpenFOAM empleando cómputo en paralelo, el primer paso es ejecutar el comando **decomposePar** el cual particiona la malla de acuerdo a la configuración establecida en el fichero **decomposeParDict**⁹.

Posteriormente se debe especificar la instrucción de correr la simulación con la malla ya particionada, esto mediante la orden; **mpirun -np 9 simpleFoam -parallel**. Una vez que la simulación ha concluido, se debe reconstruir la malla con la información obtenida en cada procesador, esta acción se lleva a cabo mediante el comando **reconstructPar**.

Una vez reconstruido el caso, la información resultante debe convertirse a un formato que pueda visualizarse en **ParaView**¹⁰.

Para automatizar el proceso de ejecución de la simulación, se ha creado un guión (*script*) que contiene las ordenes mencionadas; basta con ejecutarlo y esperar el tiempo de cómputo necesario. (Ver figura 4.20)



```

decomposePar
mpirun -np 9 simpleFoam -parallel
reconstructPar
touch Asp.foam

```

Figura 4.20: Contenido del *script* ejecutable.

4.7. Criterios de convergencia

Con el fin de obtener resultados confiables, se han establecido tres criterios de convergencia de la simulación, los cuales se describen a continuación.

1. **Residuales:** De acuerdo con J. Fernández [1], es habitual considerar que la convergencia se ha conseguido cuando todas las variables resueltas presentan un residuo global menor que 10^{-3} .
2. **Continuidad:** Para verificar que esta condición se cumpla, se realiza un balance de masa global utilizando las funciones **fluxIn**, **fluxOut1**, **fluxOut2** tratadas en el apartado 4.5.1.
3. **Monitores:** Se han definido cinco puntos de monitorización de presión. Se considera que ha convergido la simulación cuando esta propiedad no varía. Gráficamente cuando

⁹Ver sección 4.5.1

¹⁰ParaView es una herramienta *open - source* para el análisis y visualización de grandes bases de datos. [29]

los valores forman una recta horizontal. En la figura 4.21 se presentan las coordenadas de los puntos de monitorización de presión, así como su ubicación gráfica a lo largo del tubo de desfogue estudiado. Estos puntos se definen dentro del fichero **probes** tratado en el apartado 4.5.1.

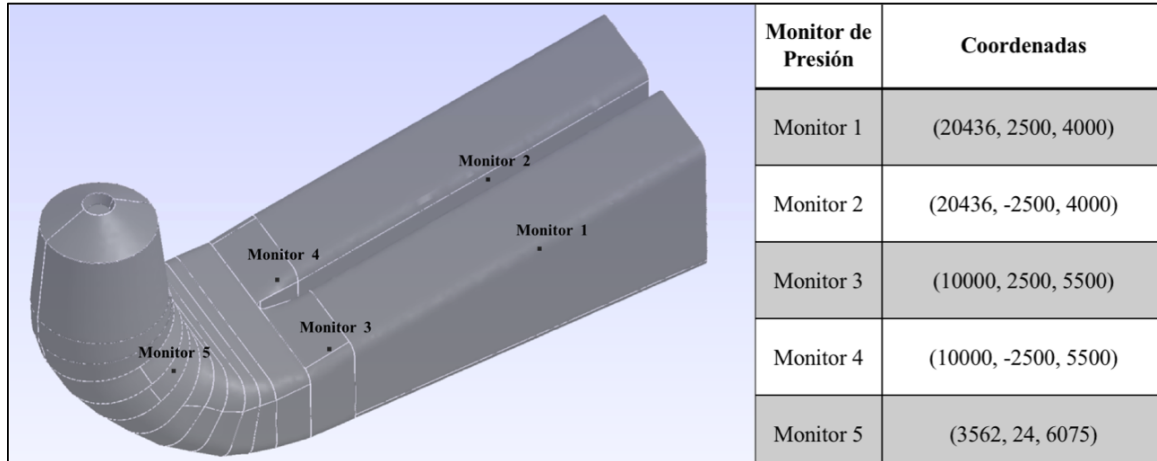


Figura 4.21: Puntos de monitorización de presión

CAPÍTULO

5

RESULTADOS

En este capítulo se muestran los resultados de las simulaciones realizadas. Los resultados se presentan en dos bloques: resultados de las simulaciones por cada punto de operación evaluando las diferentes geometrías y posteriormente se hace una comparativa entre los casos simulados presentando los resultados de forma global.

5.1. Simulación a 100 % de carga

5.1.1. Convergencia de las simulaciones

Como se trató en el apartado 4.7, se establecieron diferentes criterios de convergencia de simulación. La figura 5.1 muestra las gráficas de los residuales obtenidos en cada simulación del tubo de aspiración con parámetros de operación de 100 % de carga.

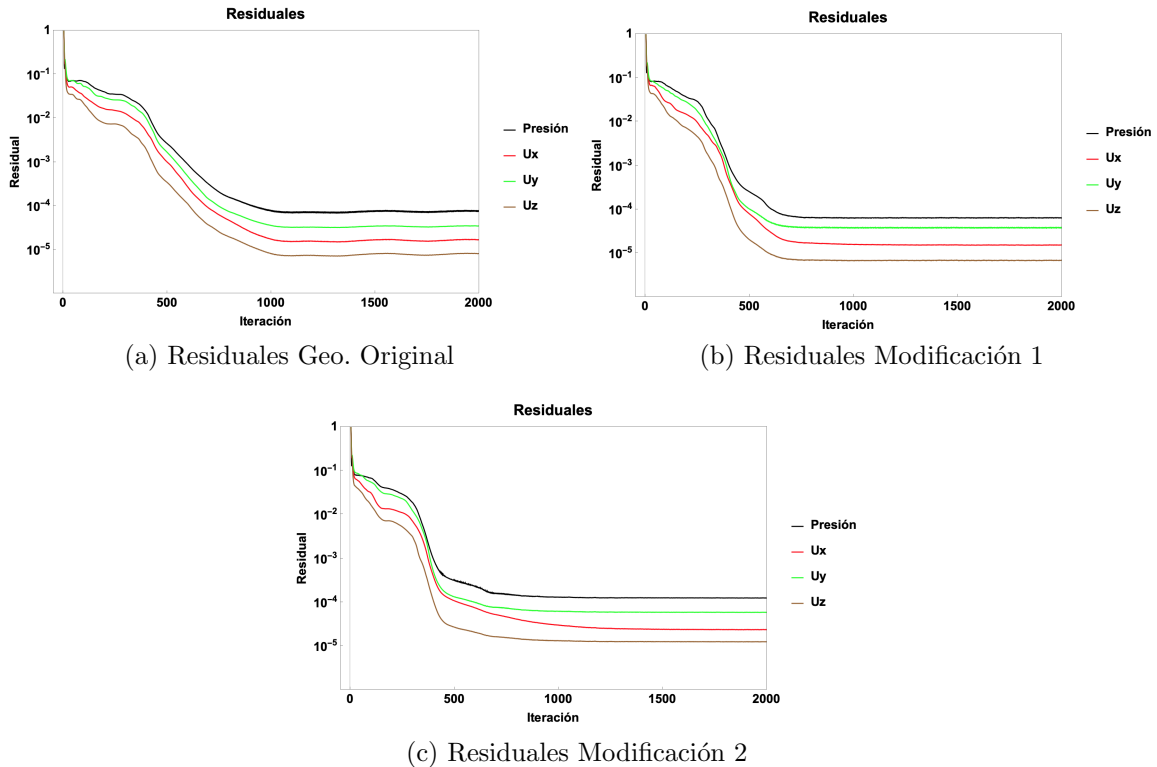


Figura 5.1: Residuales obtenidos de las simulaciones realizadas a 100 % de carga por geometría.

Como se observa en la figura 5.1 la tendencia de los residuales de las diferentes variables en cuestión presenta un comportamiento convergente hacia 0, alcanzando una magnitud entre 10^{-4} y 10^{-5} , que es lo esperado en un estudio CFD.

En la figura 5.2 se muestra el segundo criterio de convergencia utilizado, que es la continuidad. Como se puede observar después de 20 iteraciones esta condición es alcanzada en todas las simulaciones.

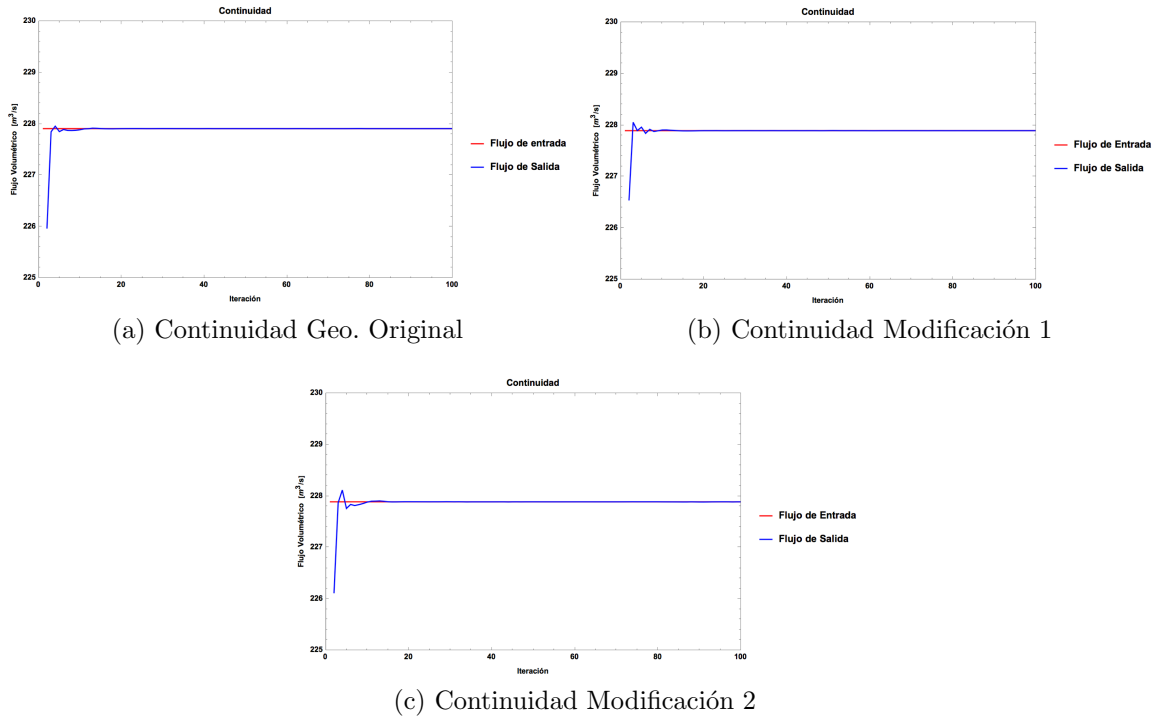
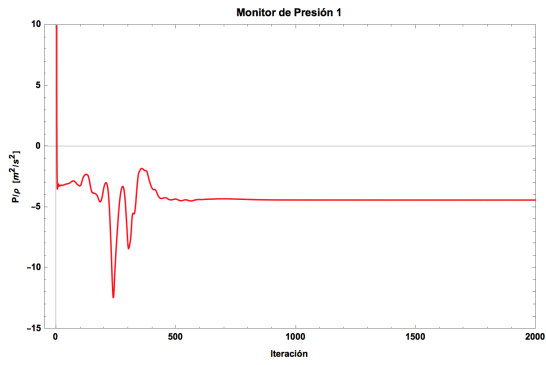
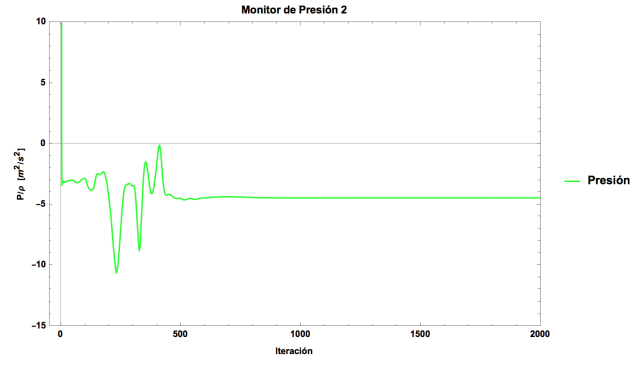


Figura 5.2: Gráficos de continuidad. Simulaciones realizadas a 100 % de carga por geometría.

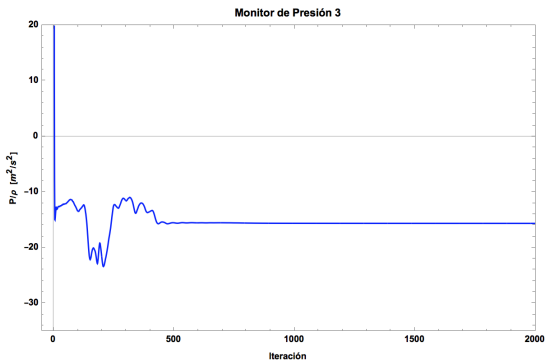
Por último se establecieron puntos de monitoreo de presión, cuya localización es tratada en el apartado 4.7. Como resultado de esta monitorización se obtuvieron 5 gráficas por cada modelo geométrico estudiado. En la figura 5.3, se muestra el comportamiento de esta variable en los diferentes puntos establecidos, donde se aprecia que después de 500 iteraciones el valor de la presión permanece constante.



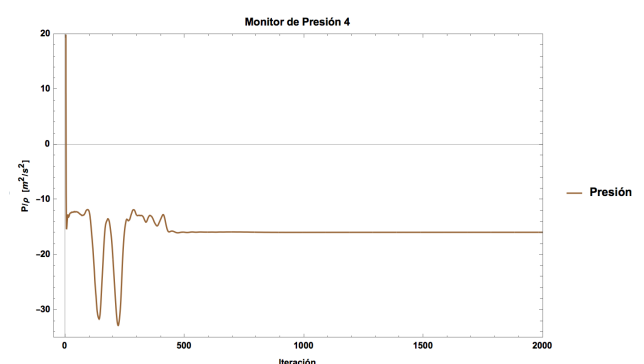
(a) Monitor 1



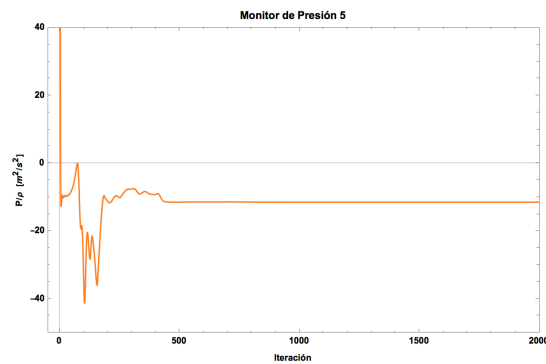
(b) Monitor 2



(c) Monitor 3



(d) Monitor 4



(e) Monitor 5

Figura 5.3: Monitores de presión. Simulación a 100 % de carga. Geometría original.

Los resultados de la monitorización en los casos de estudio restantes (modificación 1 y modificación 2), se muestran en el apéndice C, donde se observa que el valor de la presión en los diferentes puntos de monitoreo presenta un comportamiento similar al descrito anteriormente.

5.1.2. Contornos de velocidad

A continuación se presenta el campo escalar de velocidades obtenido en la sección de entrada del difusor y en la salida del mismo.

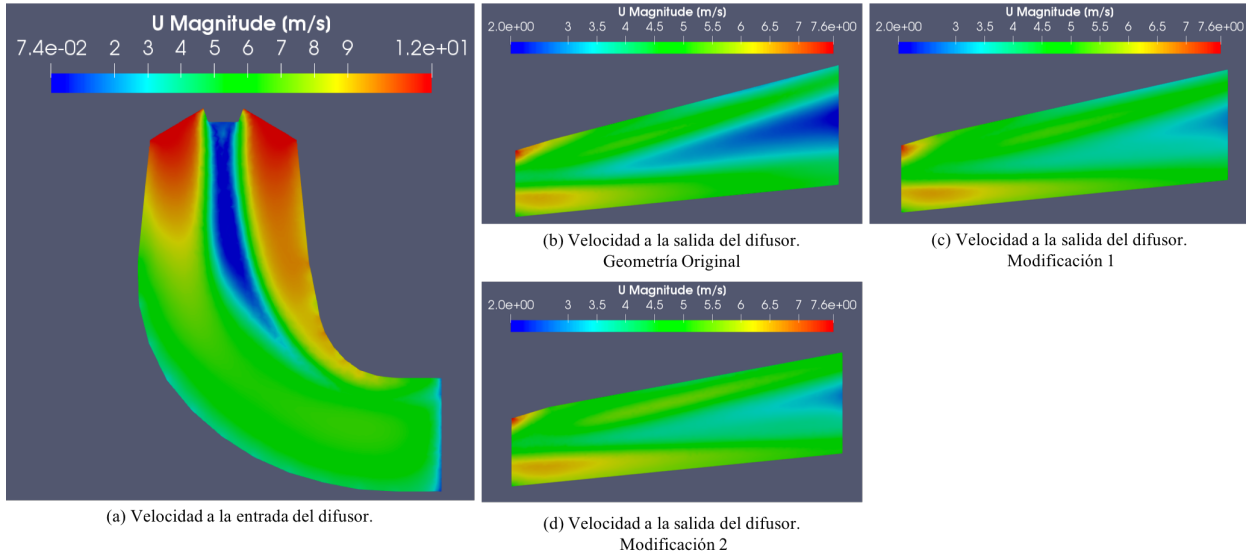


Figura 5.4: Contornos de velocidad (perfil) obtenidos por geometría. Simulación a 100 % de carga

La figura 5.4(a) muestra la magnitud de la velocidad en la entrada del tubo de aspiración. Como se observa, en la parte central existe una zona de baja velocidad. Esto se debe a que en esta región de la geometría existe una sección divergente que hace alusión al cono difusor¹ del rodete. Es importante mencionar que este campo escalar de la magnitud de velocidades a la entrada del tubo de aspiración no varía con la geometría simulada, pues esta sección del difusor no se modificó.

En la figura 5.4(b), observamos el comportamiento que tiene el difusor operando a 100 % de carga sin variaciones en la geometría. Esto nos da un panorama de su funcionamiento actual en una central. Se muestra que la velocidad más baja se obtiene en la parte central de la sección divergente, por lo que la reducción de velocidad del fluido va desde los 11.485 m/s en la entrada, hasta a 2 m/s en la parte central de la salida. Las velocidades del fluido en esta región de la sección final obtenidas por medio de simulación son 2.81 m/s y 2.88 m/s, representadas en las figuras 5.4(c), 5.4(d), respectivamente.

Los contornos de velocidad obtenidos, concuerdan con los resultados reportados por [23, 26, 30], donde se muestra que en la sección de salida del difusor se obtiene un perfil de velocidades no uniforme. Adicionalmente los resultados reportados por J. Paik [31], muestran que al graficar el perfil de velocidades en la sección de salida del tubo de aspiración,

¹La función principal es bajar la presión en la salida del rodete de la turbina para aumentar el salto hidráulico y con esto la potencia de la turbina.

la velocidad cerca de las paredes es mayor que en la región central del volumen. Este comportamiento se muestra claramente en la figura 5.5, donde se observa que al rededor de esta sección central, el fluido reduce su velocidad de 11.485 m/s en la entrada hasta a 5 m/s, que es la velocidad predominante en todos los casos, en salida.

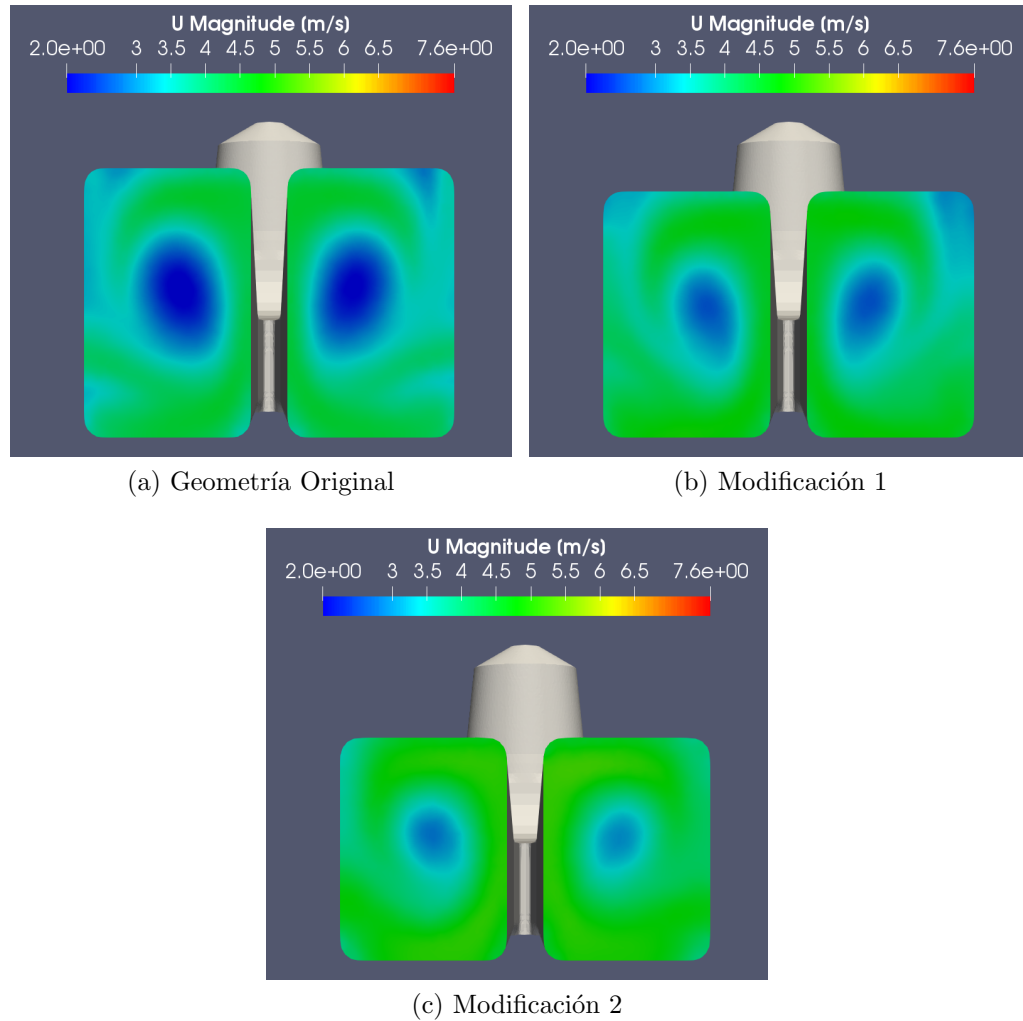


Figura 5.5: Contornos de velocidad (frontal) obtenidos por geometría. Simulación a 100 % de carga

Con la finalidad de complementar este análisis se ha calculado la velocidad promedio en la sección transversal de salida del tubo de aspiración. Se han tomado en cuenta ambas ramas de la región divergente, las cuales fueron definidas en la sección 4.4.1 como *out1*, *out2* y se muestran en la figura 5.5.

Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 5.1. Es importante mencionar que el valor de la velocidad promedio calculado para ambas secciones es el mismo.

| Geometría | Velocidad promedio [m/s] |
|------------------|---------------------------------|
| Original | 3.6335 |
| Modificación 1 | 3.9815 |
| Modificación 2 | 4.3371 |

Tabla 5.1: Velocidad promedio en la sección transversal de salida. (simulación a 100 % de carga).

Como se observa, a medida que se reduce el área de salida, el efecto reductor de velocidad se ve desfavorecido. El incremento de la velocidad con respecto a la geometría original es del 9.5 % (modificación 1) y 19.36 % (modificación 2).

5.1.3. Vectores de velocidad

En la siguiente figura se muestra el campo de velocidades, graficado sobre un plano de presión, en la sección media de la region difusora.

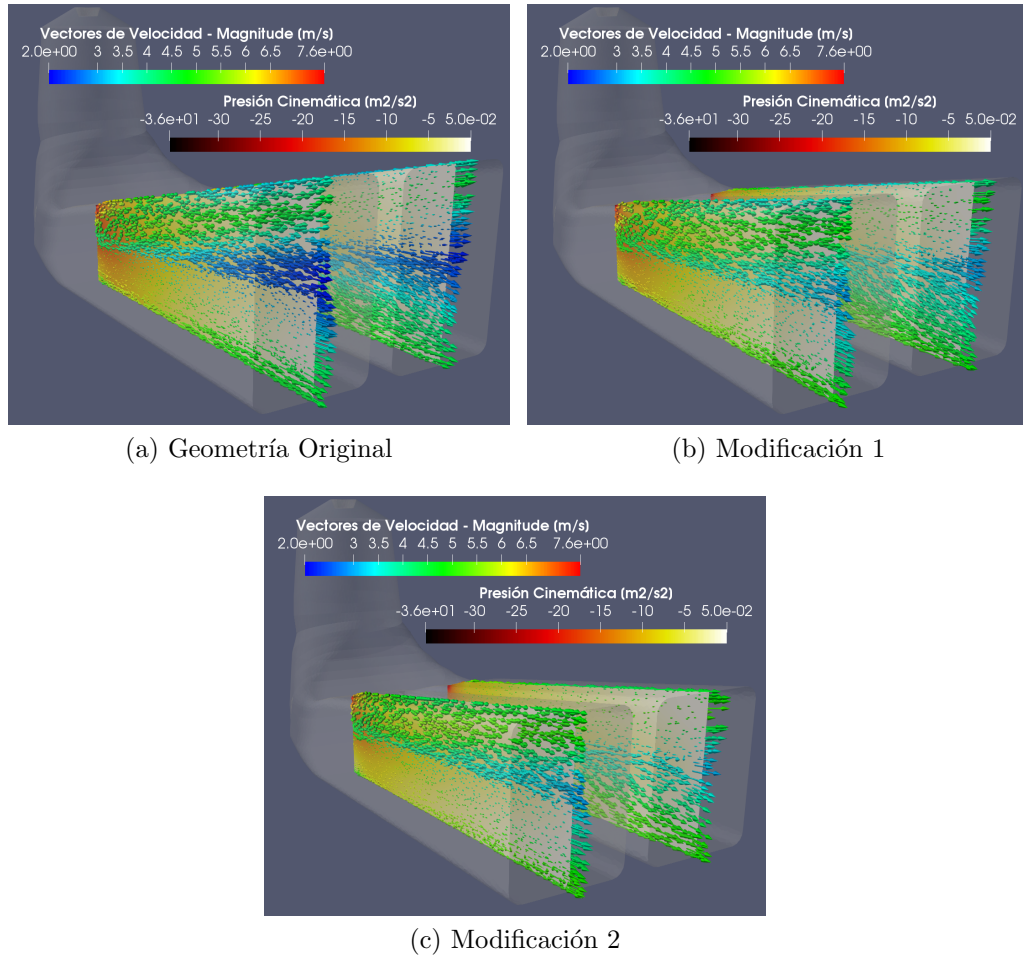


Figura 5.6: Vectores de velocidad-Contornos de presión. Simulación a 100% de carga

Como se observa en la figura 5.6, en la sección difusora del tubo de aspiración, la presión aumenta conforme se incrementa el área de la sección transversal de salida. La dirección de la corriente de fluido va de la zona de menor presión a la zona de mayor presión y en las diferentes geometrías simuladas no se presenta un flujo de retorno. Se muestra también que al reducir el área de salida (modificación 1, modificación 2), la zona de alta presión es menor, causando así que el efecto reductor de velocidad se vea desfavorecido.

5.1.4. Coeficiente de recuperación de presión

Con los datos numéricos extraídos de OF se ha calculado el coeficiente de recuperación de presión promedio. La siguiente tabla muestra los resultados obtenidos de las simulaciones a 100 % de carga, evaluando las diferentes geometrías.

| Geometría | Velocidad [m/s] | P_{out} - P_{in} [m²/s²] | C_p |
|------------------|------------------------|---|----------------------|
| Original | 11.485 | 61.882 | 0.93829 |
| Modificación 1 | 11.485 | 60.373 | 0.91540 |
| Modificación 2 | 11.485 | 58.137 | 0.88150 |

Tabla 5.2: Coeficiente de presión obtenido por geometría simulada.

Como se observa en la tabla 5.2, la diferencia de presión entre la entrada y la salida del difusor disminuye al modificar la geometría, pues como se trató anteriormente, al reducir la altura del área de salida la velocidad se incrementa provocando que la presión en la entrada del difusor aumente. Debido a que el **C_p** es directamente proporcional a la diferencia de presión e inversamente proporcional a la velocidad, este parámetro se ve afectado con la reducción del área de salida.

5.2. Simulación a 75 % de carga

5.2.1. Convergencia de las simulaciones

La figura 5.7 muestra las gráficas de los residuales obtenidos en cada simulación del tubo de aspiración con parámetros de operación de 75 % de carga.

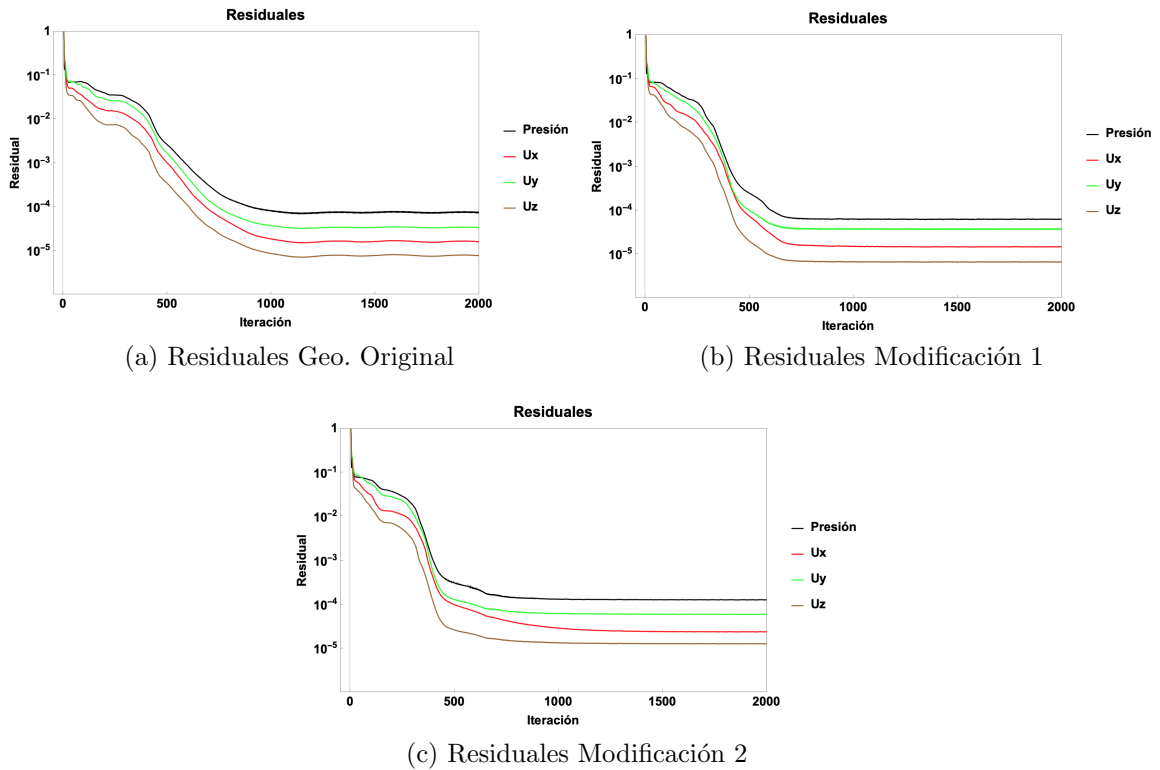
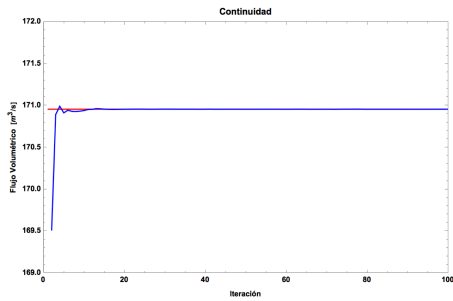


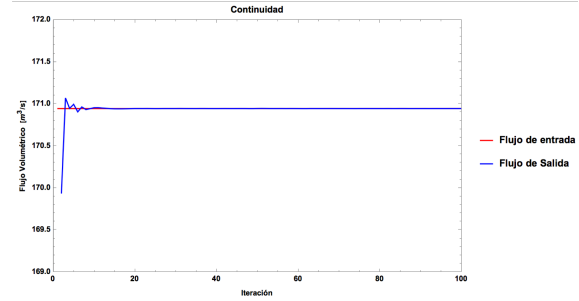
Figura 5.7: Residuales obtenidos de las simulaciones realizadas a 75 % de carga por geometría.

En la figura 5.7 se puede observar, al igual que en el caso anterior (100 % de carga), que durante las primeras iteraciones (0-500) el valor de los residuales decrece y posteriormente presentan un comportamiento constante después de 1000 iteraciones. Con este resultado, el conjunto de simulaciones realizadas con datos de operación de 75 % de carga, acredita el primer criterio de convergencia.

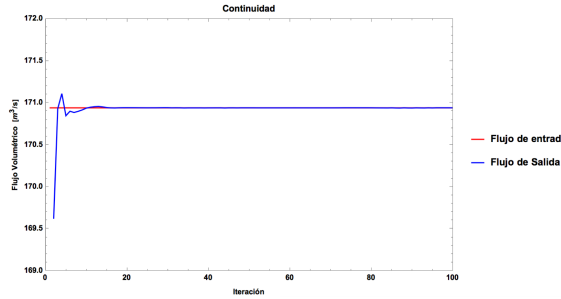
En la figura 5.8 se muestra como la continuidad es alcanzada después de 20 iteraciones en cada simulación. El comportamiento de esta condición es similar al obtenido en las simulaciones con condiciones de operación a 100 % de carga, la única diferencia es el valor del flujo volumétrico reportado en el eje de las ordenadas. Con este resultado se asume que este conjunto de simulaciones supera el segundo criterio de convergencia establecido.



(a) Continuidad Geo. Original



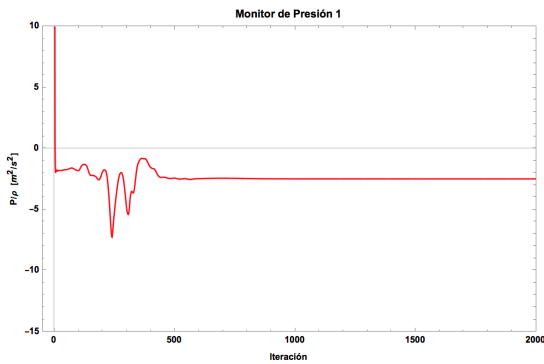
(b) Continuidad Modificación 1



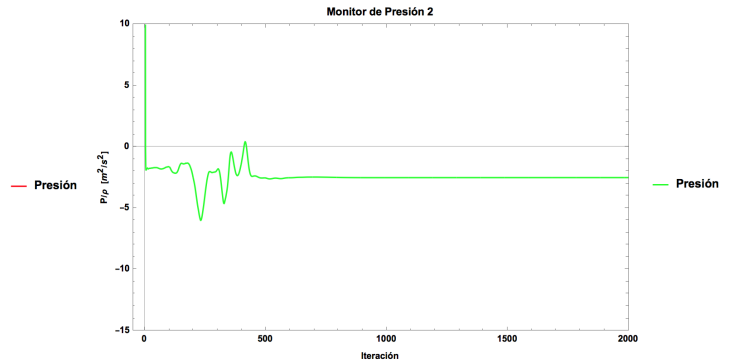
(c) Continuidad Modificación 2

Figura 5.8: Gráficos de continuidad. Simulaciones realizadas a 75 % de carga por geometría.

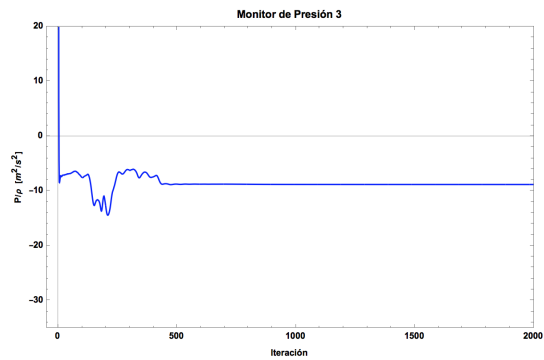
En la figura 5.9 se presenta el resultado de los puntos de monitoreo de presión en la simulación realizada a la geometría original con condiciones operativas del 75 % de carga. Se aprecia que después de 500 iteraciones el valor de la presión permanece constante en todos los puntos. El comportamiento de esta variable es similar al presentado en el caso anterior (100 % de carga) pero con una magnitud menor, donde en el arranque de la simulación la presión es inestable y posteriormente estable hasta el final del proceso.



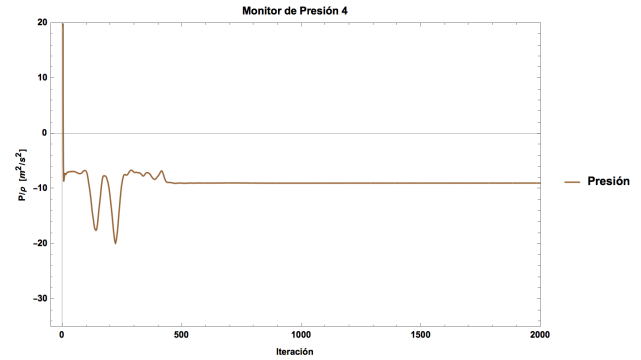
(a) Monitor 1



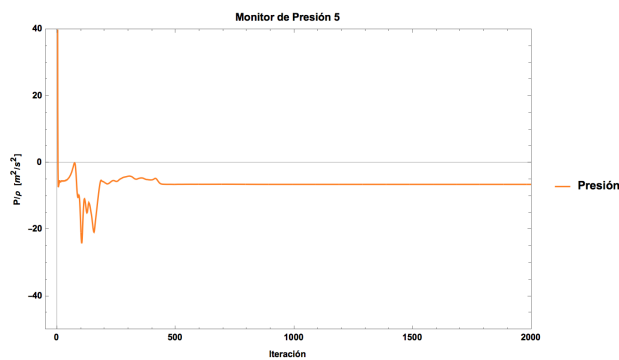
(b) Monitor 2



(c) Monitor 3



(d) Monitor 4



(e) Monitor 5

Figura 5.9: Monitores de presión. Simulación a 75 % de carga. Geometría original.

El resultado del monitoreo de presión en los demás casos; modificación 1 y modificación 2, pueden consultarse en las figuras C.3 y C.4 respectivamente.

5.2.2. Contornos de velocidad

A continuación se presenta el campo escalar de velocidades obtenido en la sección de entrada del difusor y en la salida del mismo.

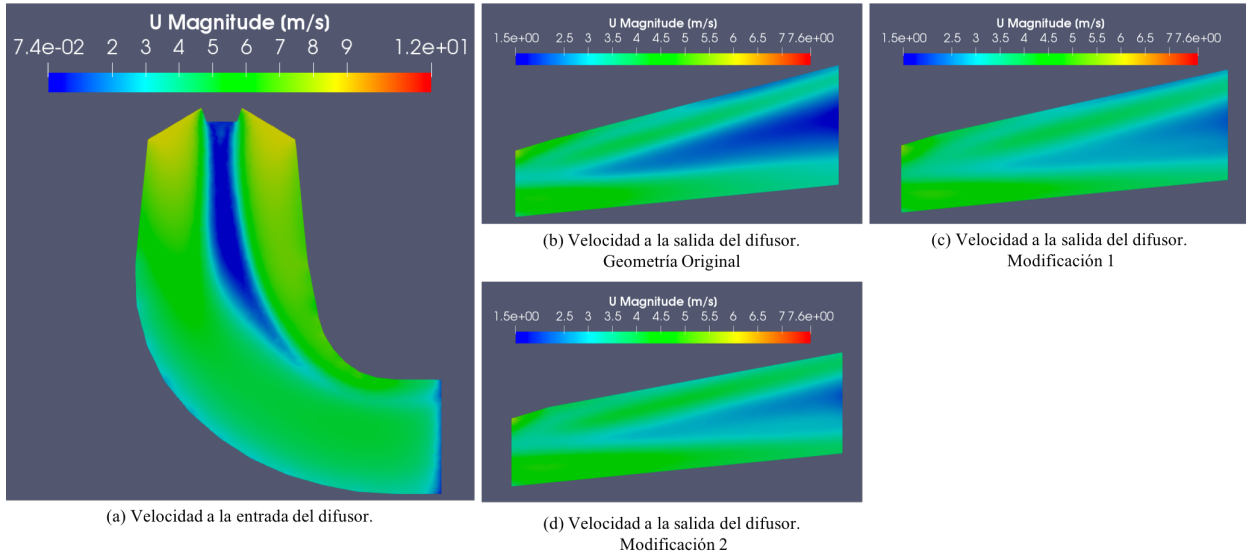


Figura 5.10: Contornos de velocidad obtenidos por geometría. Simulación a 75 % de carga

Con base en la figura 5.10(b), se observa que el difusor reduce la velocidad del flujo de 8.6155 m/s (en la entrada), hasta 1.5 m/s (en la salida). Esta máxima reducción de velocidad, al igual que en el caso anterior se, da en la región central de la sección difusora. Las velocidades del fluido en esta sección final son 2.11 m/s y 2.16 m/s, representadas en las figuras 5.10(c) y 5.10(d) respectivamente.

En la siguiente tabla se muestra el valor de la velocidad promedio en las secciones de salida del tubo de aspiración, mostradas en la figura 5.11:

| Geometría | Velocidad promedio [m/s] |
|----------------|--------------------------|
| Original | 2.7258 |
| Modificación 1 | 2.9821 |
| Modificación 2 | 3.2535 |

Tabla 5.3: Velocidad promedio en la sección transversal de salida (simulación a 75 % de carga).

El incremento porcentual de la velocidad respecto a la obtenida en la geometría original es del 9.40 % y 19.35 % para la modificación 1 y la modificación 2, respectivamente. Este resultado es similar al obtenido en el caso anterior (100 % de carga).

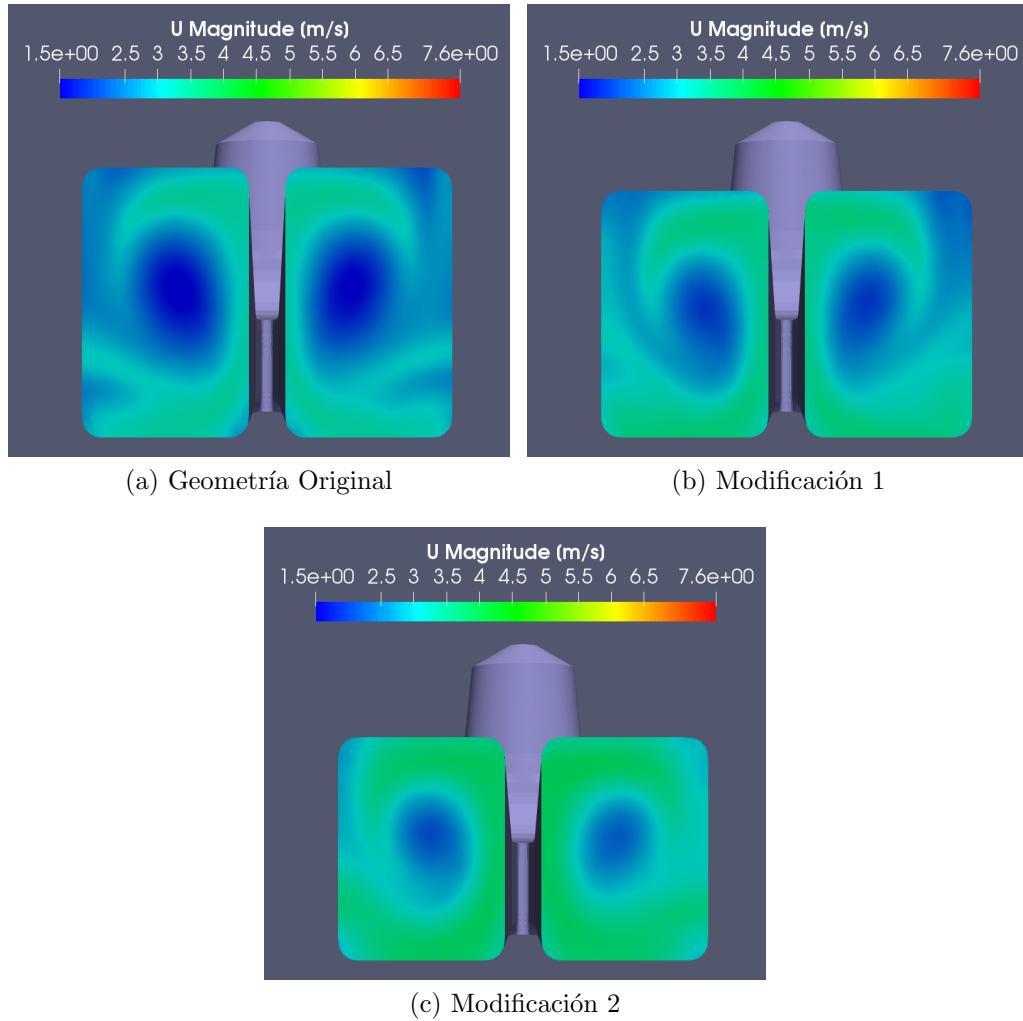


Figura 5.11: Contornos de velocidad (frontal) obtenidos por geometría. Simulación a 75 % de carga

Como se observa en la 5.11 la zona central de baja velocidad, se vuelve más pequeña conforme se reduce el área de la sección de salida. La velocidad alrededor de esta zona está en los rangos de $[2.5 - 3.5]$ m/s (figura 5.11 (a), 5.11 (b)) y $[3 - 4]$ m/s (figura 5.11 (c)). A diferencia del caso anterior (simulación a 100 % de carga) ya no es una misma velocidad la que predomina en esta región, en cada geometría.

5.2.3. Vectores de velocidad

En la siguiente figura se muestra el campo de velocidades, graficado sobre un plano de presión, en la sección media de la region difusora.

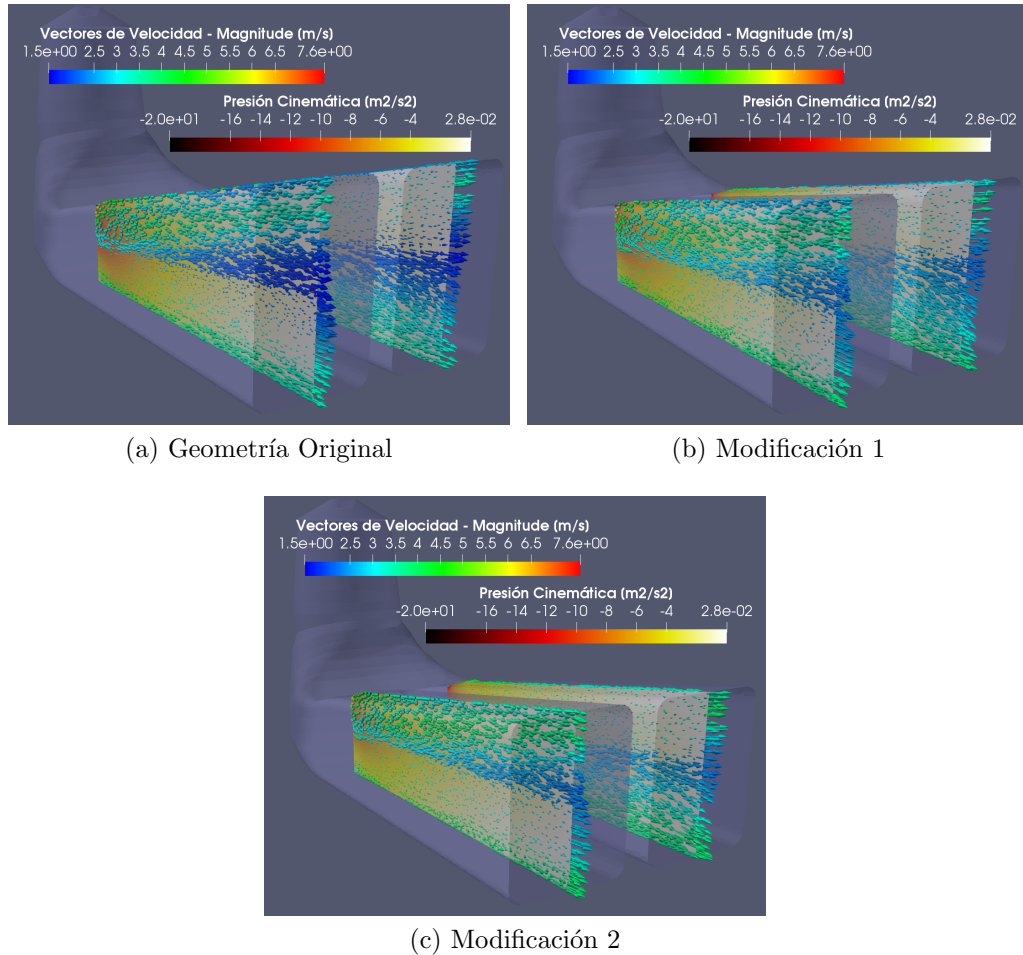


Figura 5.12: Vectores de velocidad-Contornos de presión. Simulación a 75% de carga

Al igual que en el caso anterior, se observa que no hay flujos de retorno y la dirección de la corriente del fluido va de la zona de baja a la zona de alta presión. Como se ha mencionado anteriormente el perfil de velocidades obtenido es no uniforme (figura 5.12), teniendo una velocidad menor en la región central y una velocidad mayor en la periferia. En el estudio realizado por V.Vera [5], en un ducto de sección transversal constante, este efecto no ocurre. (Figura 5.13)

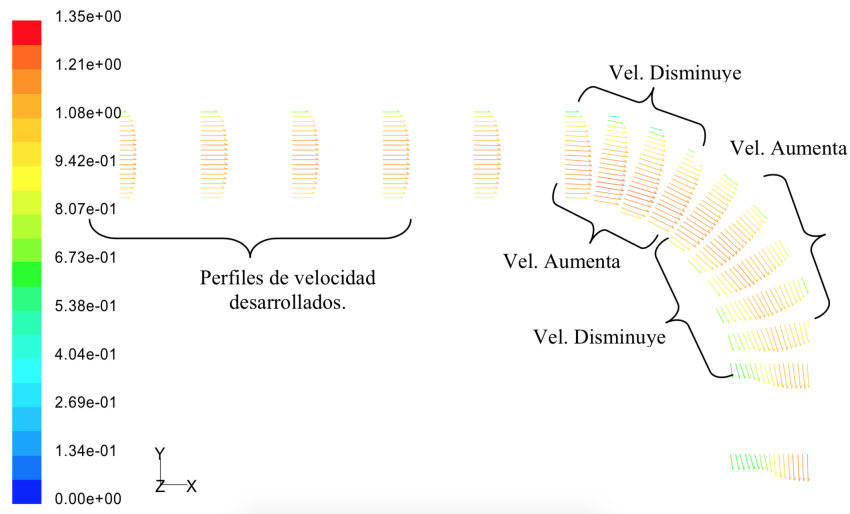


Figura 5.13: Perfiles de velocidad [5]

Este modelo consta de una sección recta horizontal y una sección acodada, un caso similar al analizado en este estudio. Haciendo una analogía entre la sección recta estudiada por V.Vera y la sección divergente que conforma el modelo de este trabajo, podemos observar que la perturbación del perfil de velocidades se debe, entre otras cosas, al cambio de sección transversal en la geometría.

5.2.4. Coeficiente de recuperación de presión

Con los datos numéricos extraídos de OF se ha calculado el coeficiente de recuperación de presión promedio, la siguiente tabla muestra los resultados obtenidos de las simulaciones a 75 % de carga, evaluando las diferentes geometrías.

| Geometría | Velocidad [m/s] | Pout - Pin [m^2/s^2] | Cp |
|----------------|-----------------|--------------------------|---------|
| Original | 8.6155 | 34.8172 | 0.93824 |
| Modificación 1 | 8.6155 | 33.9508 | 0.91489 |
| Modificación 2 | 8.6155 | 32.7061 | 0.88135 |

Tabla 5.4: Coeficiente de presión obtenido por geometría simulada.

Como se observa en la tabla 5.4, la geometría original presenta el **Cp** mas alto comparado con los demás modelos, de igual manera se observa que la diferencia de presión entre la entrada y la salida del tubo disminuye conforme se modifica la geometría. Es importante señalar que los valores obtenidos del CP en estas simulaciones difieren, respecto a los obtenidos en el caso anterior (100 % de carga), en un orden de 10^{-5} para la geometría original y del orden de 10^{-4} para la modificación 1 y 2 respectivamente.

5.3. Simulación a 50 % de carga

5.3.1. Convergencia de las simulaciones

La figura 5.14 muestra las gráficas de los residuales obtenidos en cada simulación.

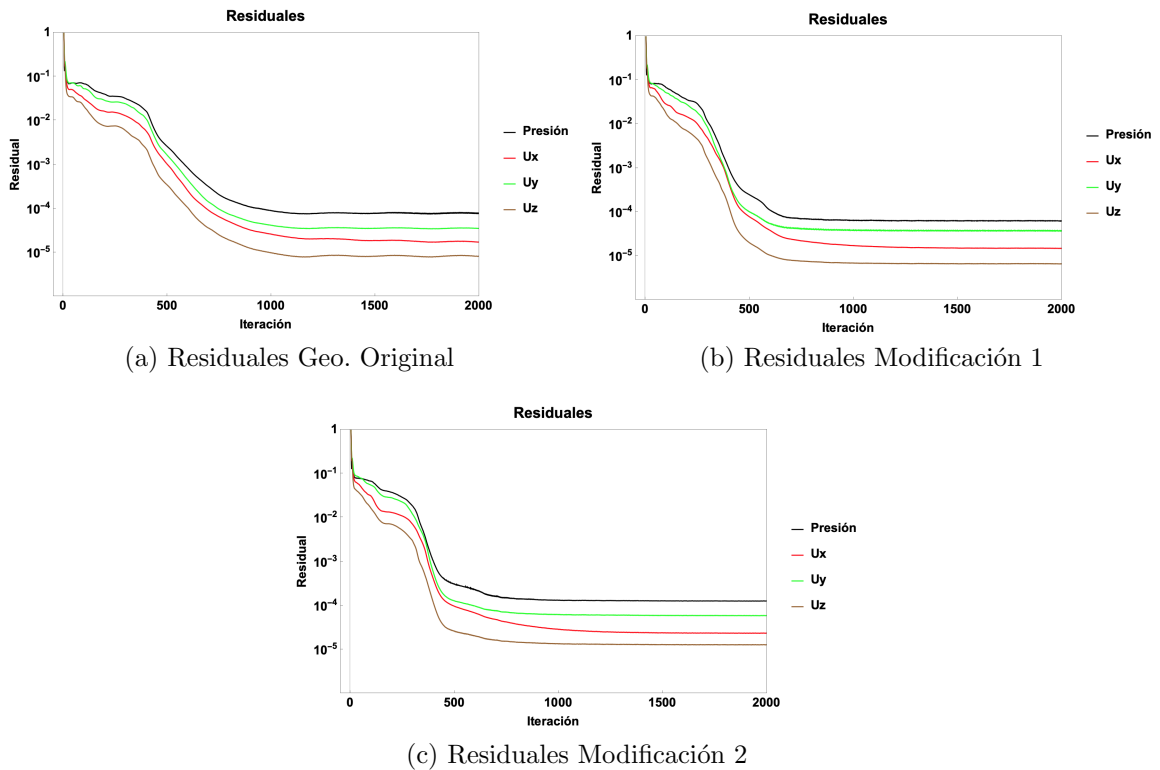


Figura 5.14: Residuales obtenidos de las simulaciones realizadas a 50 % de carga por geometría.

Durante el periodo de simulación, los residuales de las variables U_x , U_y y P alcanzaron un orden de magnitud de 10^{-5} , mientras que para la variable U_z de 10^{-6} . Estos valores fueron registrados en las simulaciones de la geometría original y las modificaciones 1 y 2.

Cabe mencionar que de acuerdo a lo establecido en la sección 4.7, estos valores son aceptables para asumir la convergencia de las simulaciones, además al igual que en los casos anteriores (100 % y 75 % de carga), en la figura 5.14 se observa que el comportamiento de los residuales es convergente hacia 0.

En la figura 5.15 se muestran las gráficas de la condición de continuidad en este nuevo conjunto de simulaciones. Como en los casos anteriores, se observa que después de 20 iteraciones esta condición es alcanzada.

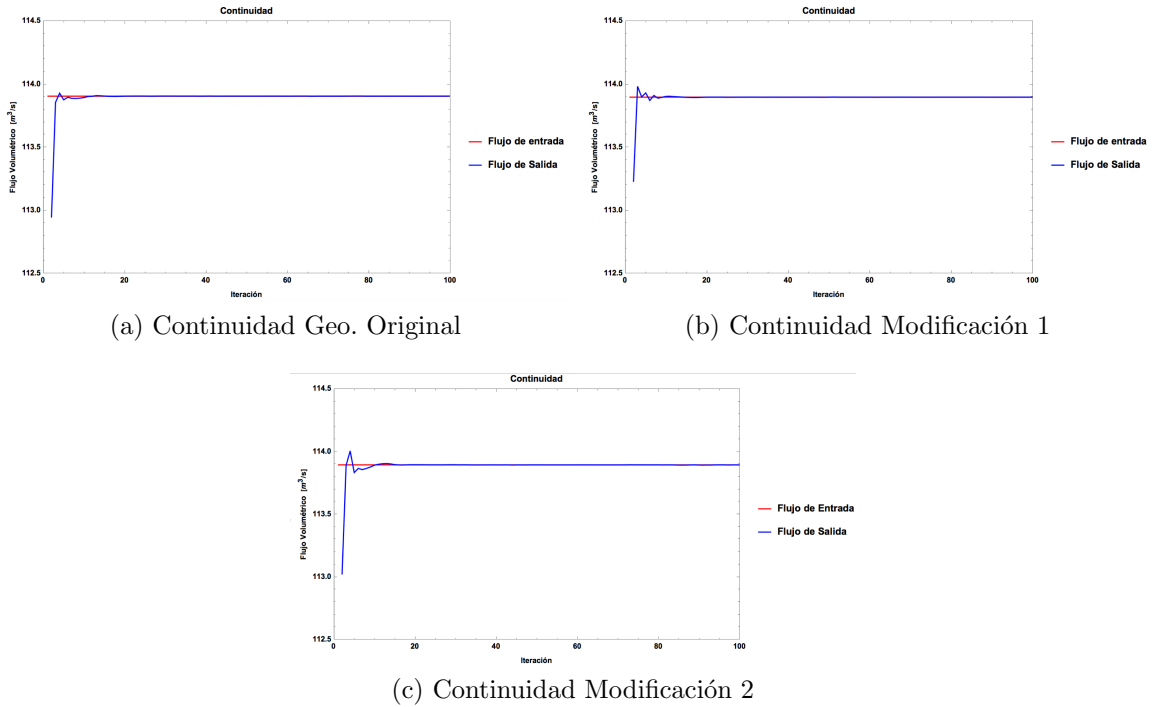
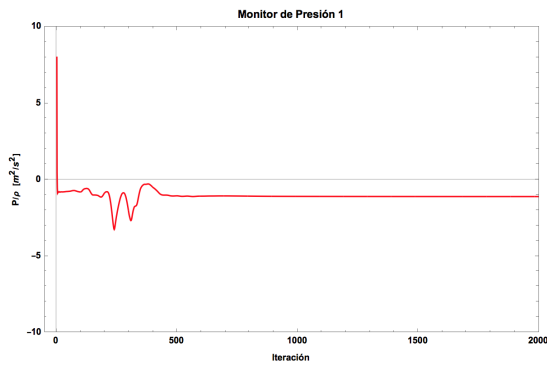


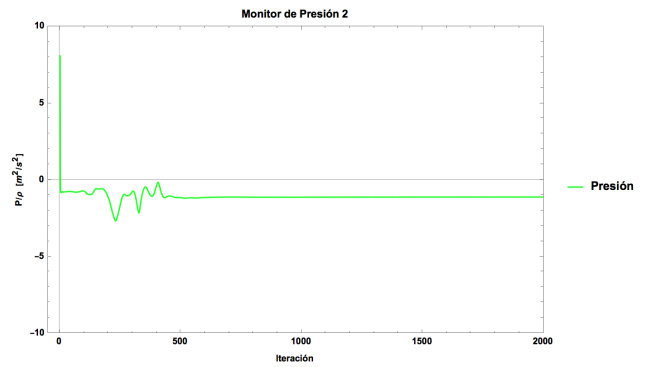
Figura 5.15: Gráficos de continuidad. Simulaciones realizadas a 50 % de carga por geometría.

El tercer criterio de convergencia utilizado se muestra en la figura 5.16. Se puede observar que el valor de la presión en los puntos de monitoreo, es constante después de 500 iteraciones. Se observa además que el comportamiento general de esta variable es similar a los casos anteriores, pero con menor magnitud debido a las condiciones de frontera de la simulación.

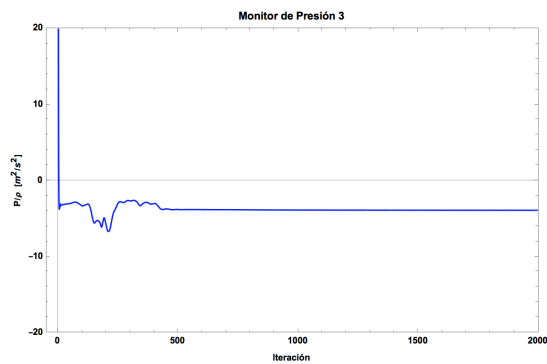
Las figuras C.5 y C.6 muestran el comportamiento de la presión en cada punto de monitorización establecido, para cada modelo geométrico estudiado, donde se observa que esta se comporta conforme a lo descrito anteriormente.



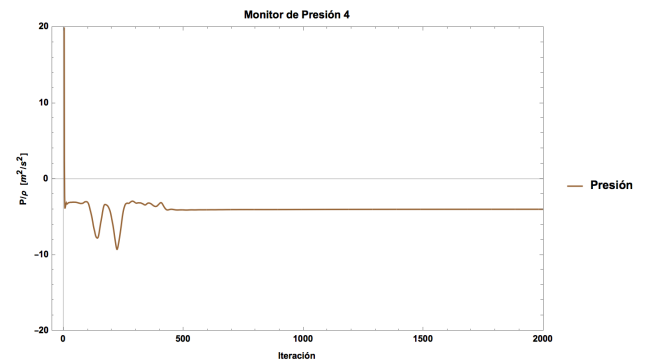
(a) Monitor 1



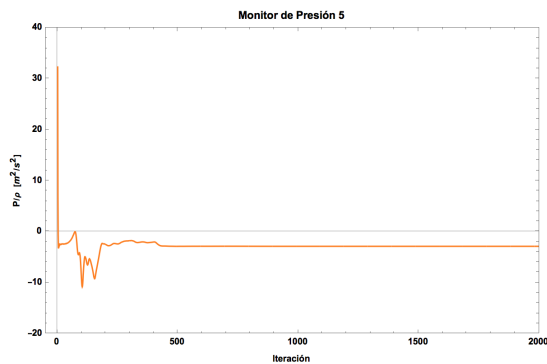
(b) Monitor 2



(c) Monitor 3



(d) Monitor 4



(e) Monitor 5

Figura 5.16: Monitores de presión. Simulación a 50% de carga. Geometría original.

5.3.2. Contornos de velocidad

A continuación se presenta el campo escalar de velocidades obtenido en la sección de entrada del difusor y en la salida del mismo.

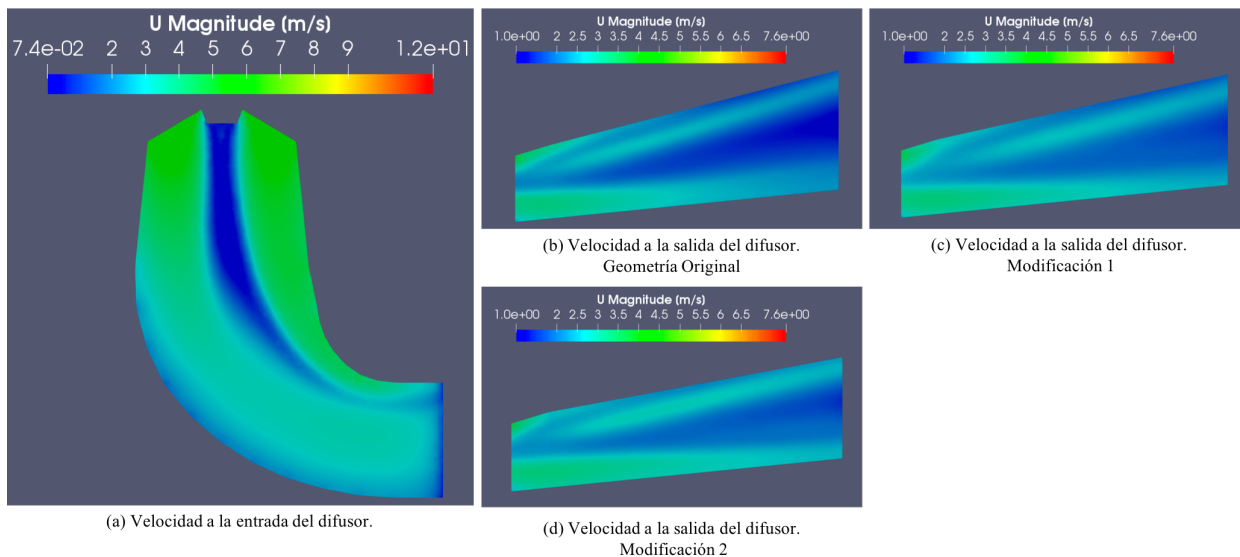


Figura 5.17: Contornos de velocidad obtenidos por geometría. Simulación a 50 % de carga

En la figura 5.17(a), se muestra que el fluido ingresa al tubo de aspiración con una velocidad de 5.74 m/s. Al igual que en los casos anteriores, la reducción más grande de velocidad se da en la región central de la sección divergente. Las velocidad alcanzada en esta zona es de 1 m/s, 1.41 m/s y 1.44 m/s, como se muestra en la figura 5.17(b), 5.17(c) y 5.17(d) respectivamente.

La velocidad promedio en las regiones *out1* y *out2* (ver figura 5.18), se muestra en la siguiente tabla:

| Geometría | Velocidad promedio [m/s] |
|----------------|--------------------------|
| Original | 1.8153 |
| Modificación 1 | 1.9867 |
| Modificación 2 | 2.1676 |

Tabla 5.5: Velocidad promedio en la sección transversal de salida (simulación a 50 % de carga).

Como se observa en la tabla 5.5 y con apoyo de la figura 5.17, al reducir el área de salida, el efecto reductor de velocidad es ve desfavorecido. El aumento de la velocidad promedio, tomando como referencia la obtenida en la geometría sin modificar, es del 9.44 % (modificación 1) y 19.40 % (modificación 2). Cabe mencionar que este incremento se da en igual proporción que en los casos anteriores (100 % y 75 % de carga).

El efecto antes mencionado se muestra claramente en la figura 5.18, donde una menor presencia de tonalidad oscura, indica un valor mayor de velocidad.

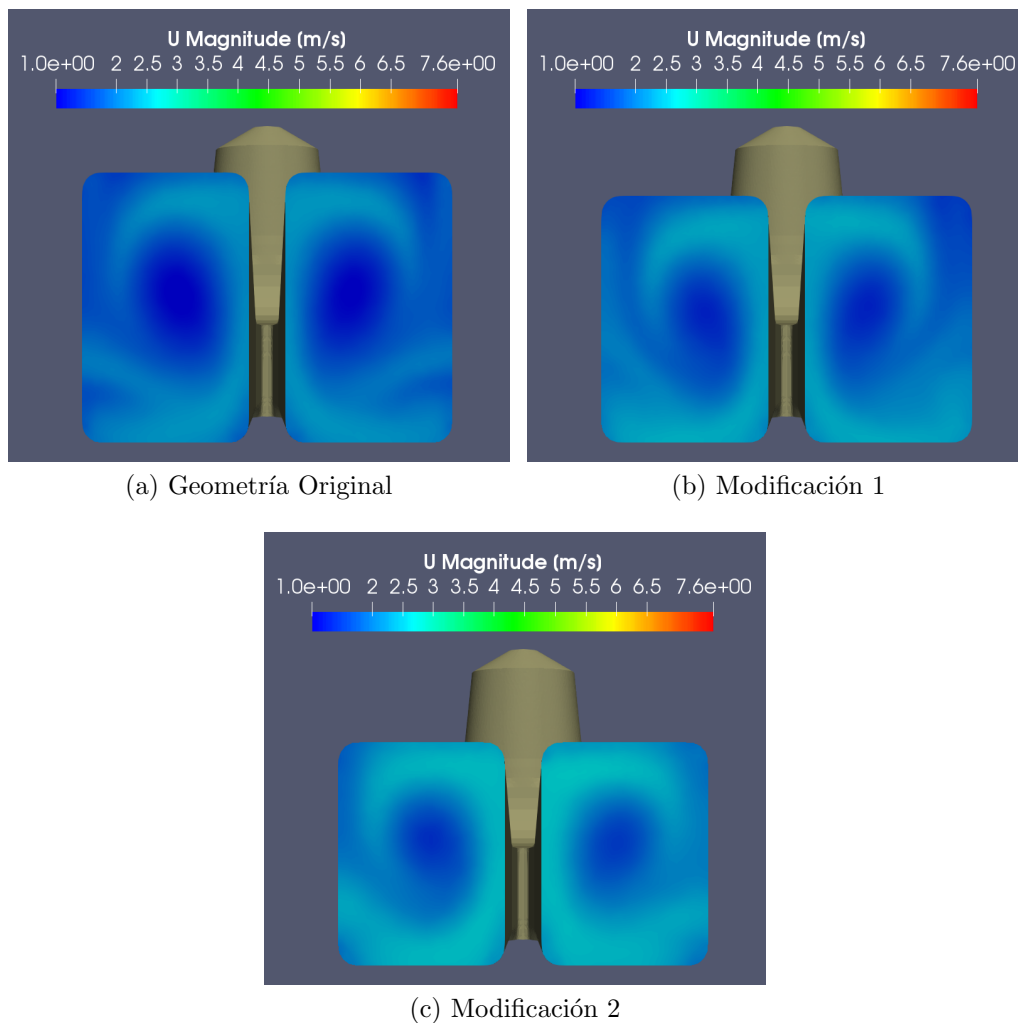


Figura 5.18: Contornos de velocidad (frontal) obtenidos por geometría. Simulación a 50 % de carga

5.3.3. Vectores de velocidad

En la siguiente figura se muestran el campo de velocidades, graficado sobre un plano de presión, en la sección media de la region difusora.

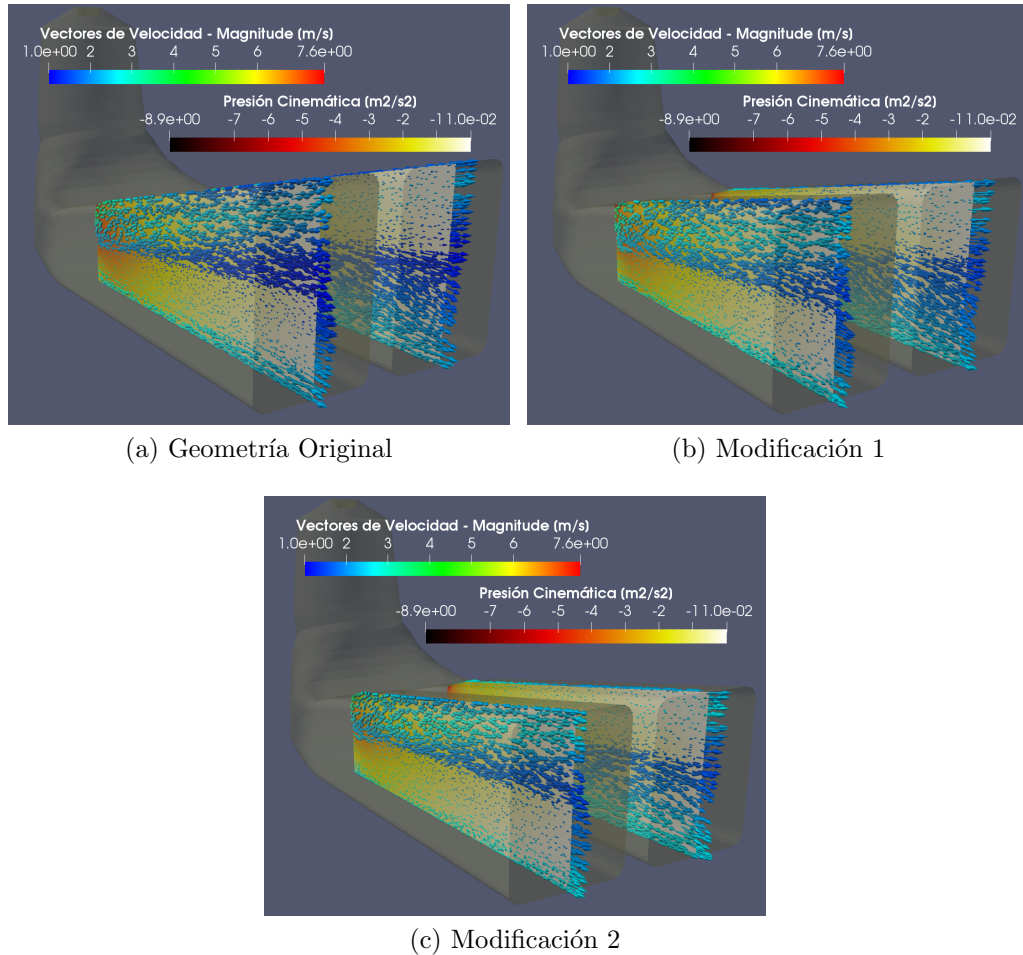


Figura 5.19: Vectores de velocidad-Contornos de presión. Simulación a 50% de carga

En la figura 5.19, se observa un comportamiento del flujo similar a los casos anteriores. La principal diferencia es la magnitud de la velocidad y la presión, ya que éstas son proporcionales a la carga de operación de la unidad que a su vez conforma las condiciones de frontera de la simulación.

5.3.4. Coeficiente de recuperación de presión

Con los datos numéricos extraídos de OF se ha calculado el coeficiente de recuperación de presión promedio. La siguiente tabla muestra los resultados obtenidos de las simulaciones a 50 % de carga, evaluado con las diferentes geometrías.

| Geometría | Velocidad [m/s] | Pout - Pin [m^2/s^2] | Cp |
|----------------|-----------------|--------------------------|---------|
| Original | 5.74 | 15.4542 | 0.93811 |
| Modificación 1 | 5.74 | 15.0681 | 0.91467 |
| Modificación 2 | 5.74 | 14.5159 | 0.88115 |

Tabla 5.6: Coeficiente de presión obtenido por geometría simulada.

La hipótesis con la cual se partió al inicio de este trabajo, era que al operar a cargas parciales a la nominal, la reducción del área de salida beneficiaría a la recuperación de presión, sin embargo se ha mostrado que no sucede de esta forma. En la tabla 5.6 se muestra que cuando se da esta modificación a la geometría el **Cp** disminuye. Es importante mencionar que los valores obtenidos en este conjunto de simulaciones difieren en un orden de magnitud de 10^{-4} , con respecto a los casos simulados anteriormente (100 % y 75 % de carga).

5.4. Simulación a 30 % de carga

5.4.1. Convergencia de las simulaciones

La figura 5.20 muestra las gráficas de los residuales obtenidos en cada simulación del tubo difusor con parámetros de operación de 30 % de carga.

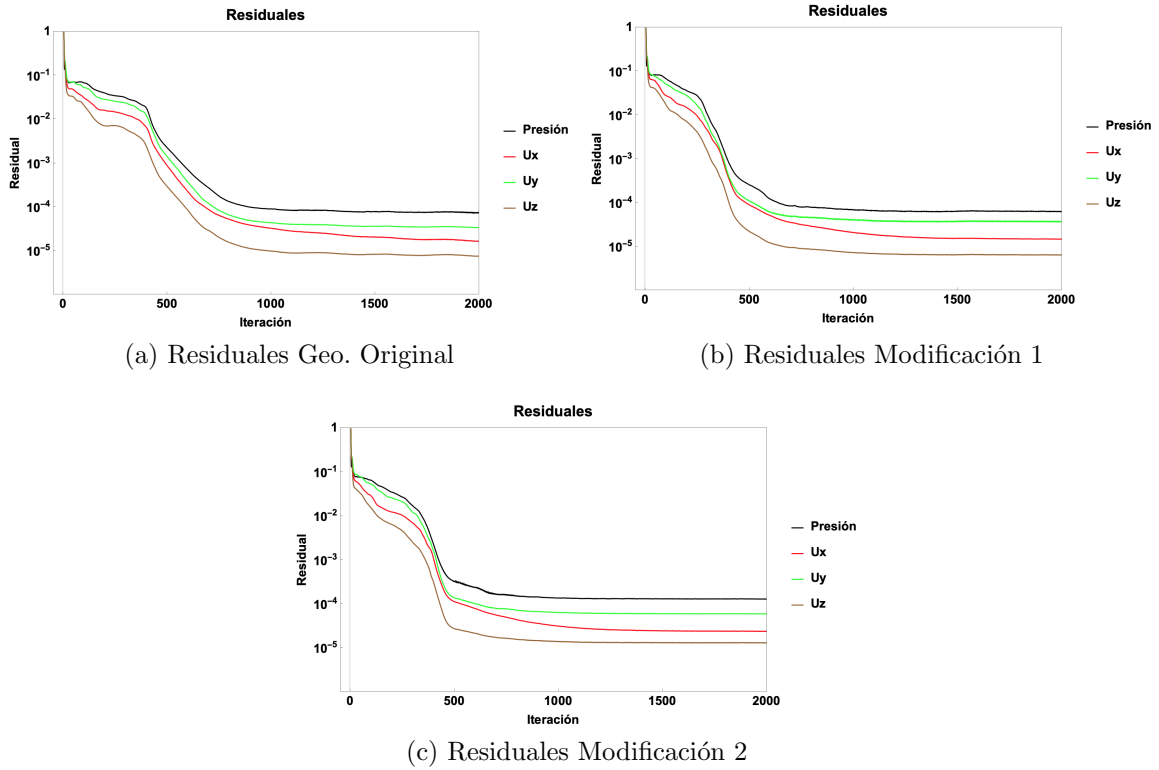
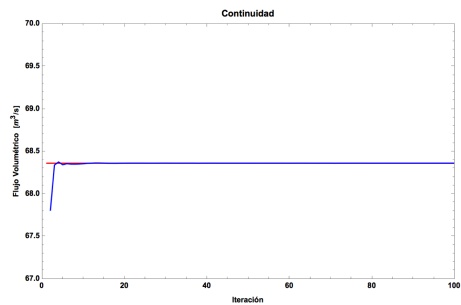


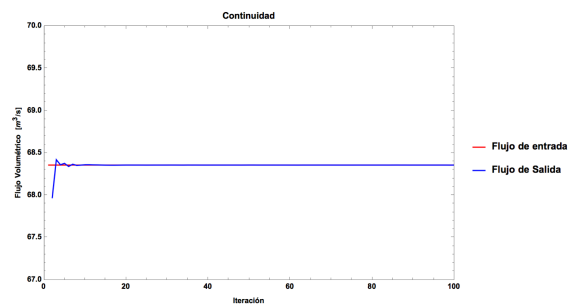
Figura 5.20: Residuales obtenidos de las simulaciones realizadas a 30 % de carga por geometría.

Como se observa en la figura 5.20 los residuales tienen un comportamiento que tiende hacia 0 para las variables graficadas. En las simulaciones correspondientes a la geometría original, modificación 1 y 2, los residuales alcanzados fueron de 10^{-5} para las variables U_x , U_y y P , mientras que para la variable U_z fue de 10^{-6} . Es importante mencionar que el comportamiento de los residuales en este conjunto de simulaciones es similar a los casos anteriores.

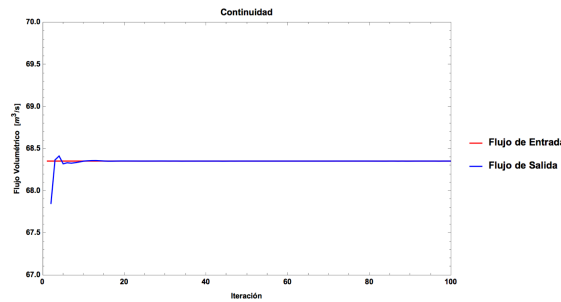
En la figura 5.21 se muestra que la condición de continuidad se satisface después de 20 iteraciones para todos los modelos geométricos simulados.



(a) Continuidad Geo. Original



(b) Continuidad Modificación 1



(c) Continuidad Modificación 2

Figura 5.21: Gráficos de continuidad. Simulaciones realizadas a 30 % de carga por geometría.

Los resultados de la monitorización de presión para la geometría original, son mostrados en la figura 5.3. Se puede observar que la presión se mantiene constante después de 500 iteraciones, en todos los puntos de monitoreo.

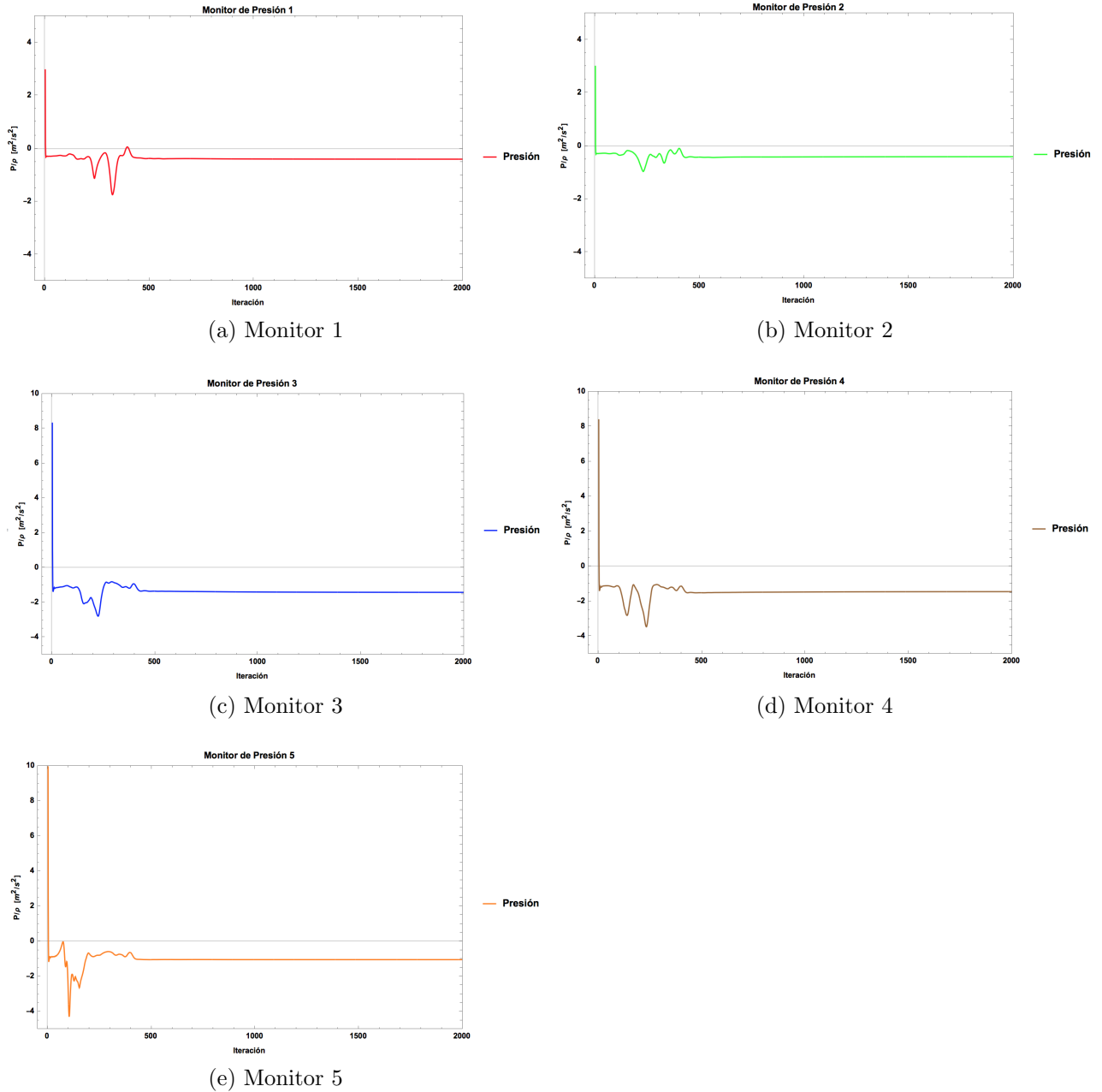


Figura 5.22: Monitores de presión. Simulación a 30% de carga. Geometría original.

En en las figuras C.7 y C.8, se muestra el resultado obtenido de este criterio de convergencia para las simulaciones restantes. Es importante mencionar que la presión se comporta conforme en lo antes mencionado en cada simulación.

5.4.2. Contornos de velocidad

A continuación se presenta el campo escalar de velocidades obtenido en la sección de entrada del difusor y en la salida.

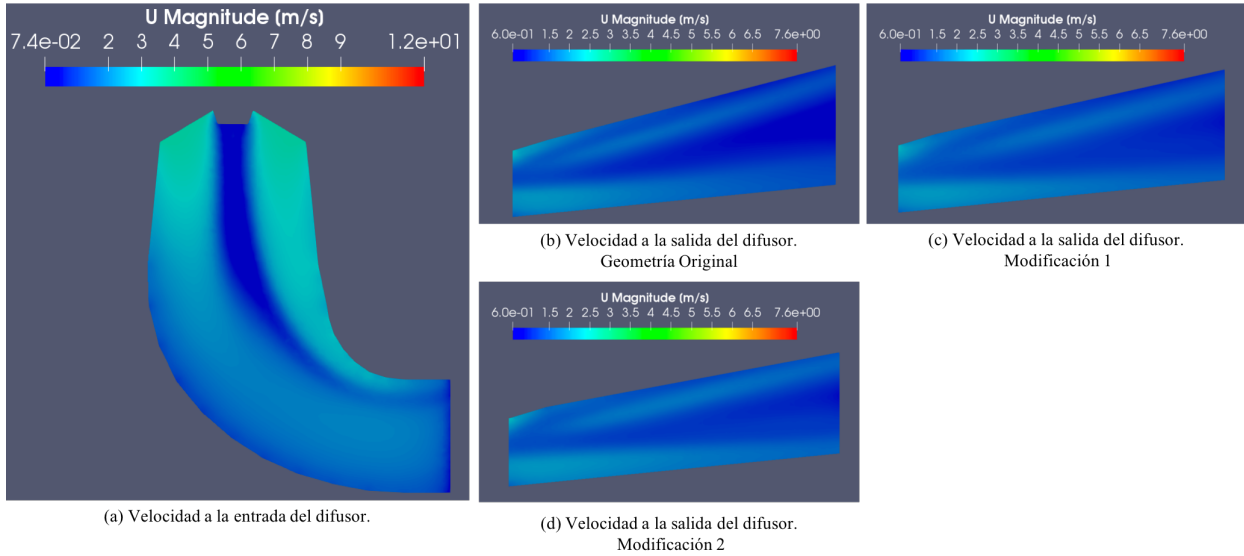


Figura 5.23: Contornos de velocidad obtenidos por geometría. Simulación a 30 % de carga

Como se muestra en la figura 5.23(a), se aprecia una zona de muy baja velocidad, lo que puede interpretarse como un desprendimiento de flujo. Esto se debe a que la formulación RAS² no representa el planteamiento adecuado para visualizar este fenómeno, por lo que los resultados obtenidos para este contorno no son del todo confiables para esta carga.

La velocidad promedio en los *patch* de salida se muestra en la siguiente tabla:

| Geometría | Velocidad promedio [m/s] |
|----------------|--------------------------|
| Original | 1.0889 |
| Modificación 1 | 1.1922 |
| Modificación 2 | 1.3008 |

Tabla 5.7: Velocidad promedio en la sección transversal de salida (simulación a 30 % de carga).

El comportamiento de la velocidad promedio es similar a lo que hasta ahora se ha mostrado, pues presenta un incremento al modificar la geometría.

²Los RAS (Reynolds-average stress models), son un conjunto de modelos matemáticos que se utilizan para representar la turbulencia en una simulación numérica; entre ellos encontramos los modelos k-epsilon y k-omega. Véase [16].

A continuación se muestran los contornos de velocidad en vista frontal.

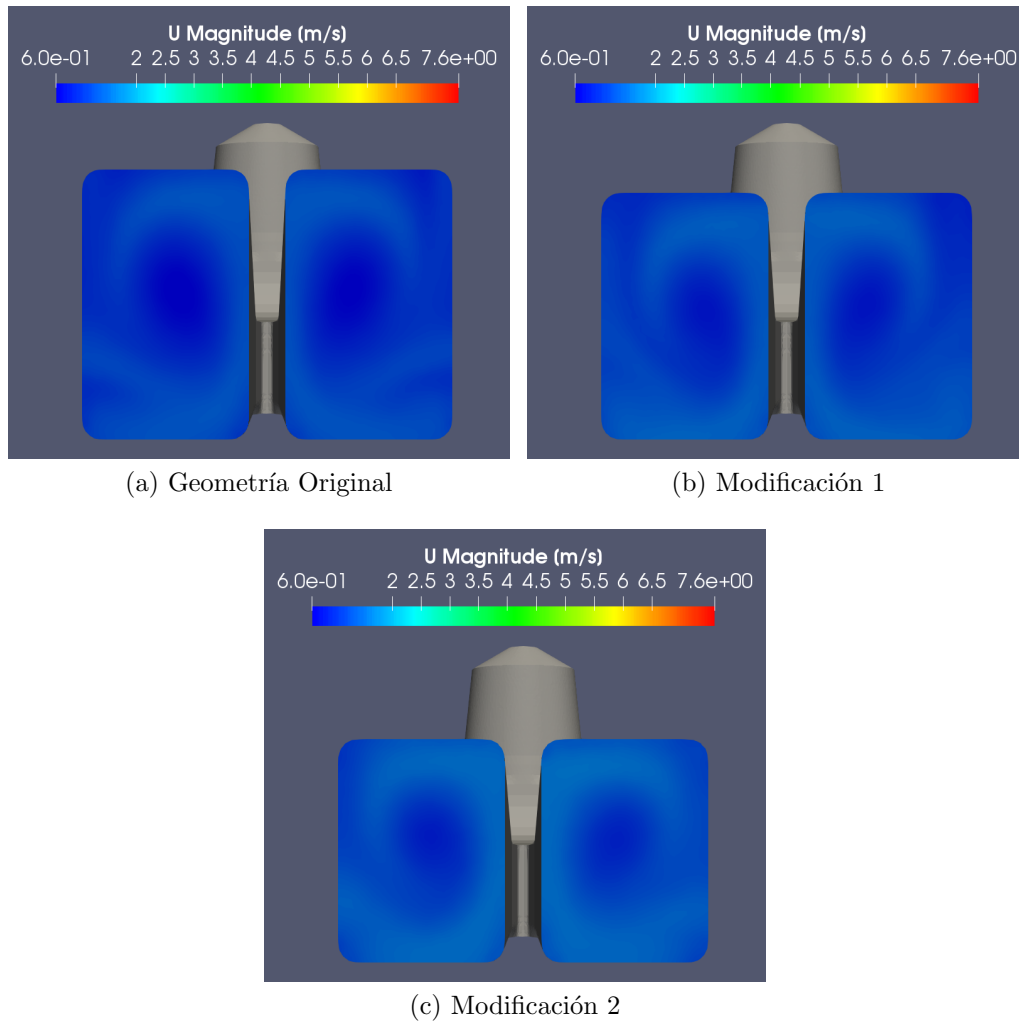


Figura 5.24: Contornos de velocidad (frontal) obtenidos por geometría. Simulación a 30 % de carga

Como se observa en la figura 5.24 y acorde a lo mostrado en la figura 5.23, la magnitud de la velocidad en la zona central de la región difusora es menor (0.6 m/s), que en la zona aledaña a esta (alcanzando valores por debajo de los 2 m/s) . Estas magnitudes comparadas con los diferentes puntos de operación son las más bajas.

5.4.3. Vectores de velocidad

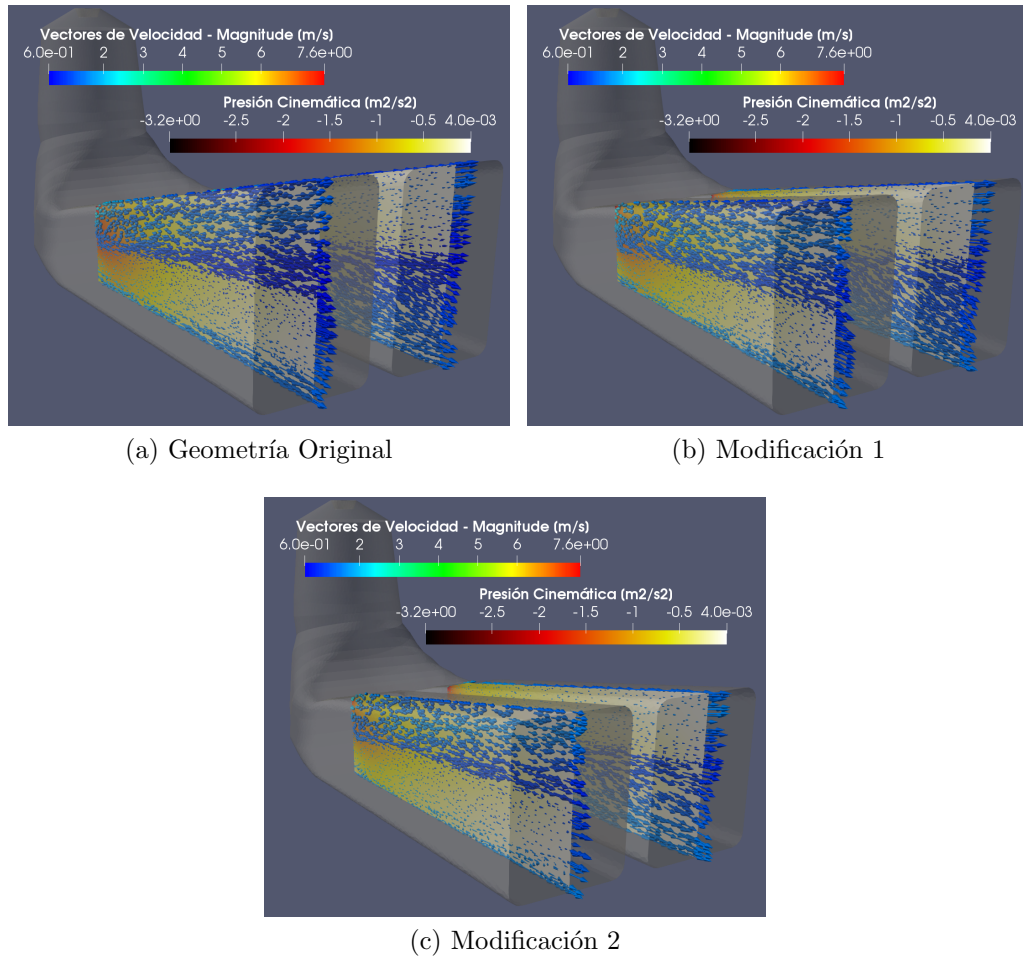


Figura 5.25: Vectores de velocidad-Contornos de presión. Simulación a 30 % de carga

En la figura 5.25, se observa que el perfil de presión es similar al encontrado en el caso anterior, de menor a mayor presión a lo largo de la sección divergente. De igual manera, no se presentan flujos de retorno en la salida del difusor. Considerando que la velocidad en la entrada es de 3.445 m/s, se observa que el efecto reductor de velocidad, se ve desfavorecido conforme se reduce el área de la sección de salida del difusor.

5.4.4. Coeficiente de recuperación de presión

Con los datos numéricos extraídos de OF se ha calculado el coeficiente de recuperación de presión promedio, la siguiente tabla muestra los resultados obtenidos de las simulaciones a 30 % de carga, evaluando las diferentes geometrías.

| Geometría | Velocidad [m/s] | Pout - Pin [m^2/s^2] | Cp |
|------------------|------------------------|--|-----------|
| Original | 3.445 | 5.56562 | 0.93792 |
| Modificación 1 | 3.445 | 5.42588 | 0.91437 |
| Modificación 2 | 3.445 | 5.22707 | 0.88087 |

Tabla 5.8: Coeficiente de presión obtenido por geometría simulada.

Como se observa en la tabla 5.8, la diferencia de presión entre la entrada y la salida del difusor ha disminuido respecto a la geometría original, por lo tanto el valor del **Cp** es menor. Los resultados son similares a los obtenidos en los casos anteriores.

5.5. C_p global

En la siguiente figura se muestran los diferentes valores del C_p obtenidos en cada simulación por geometría.

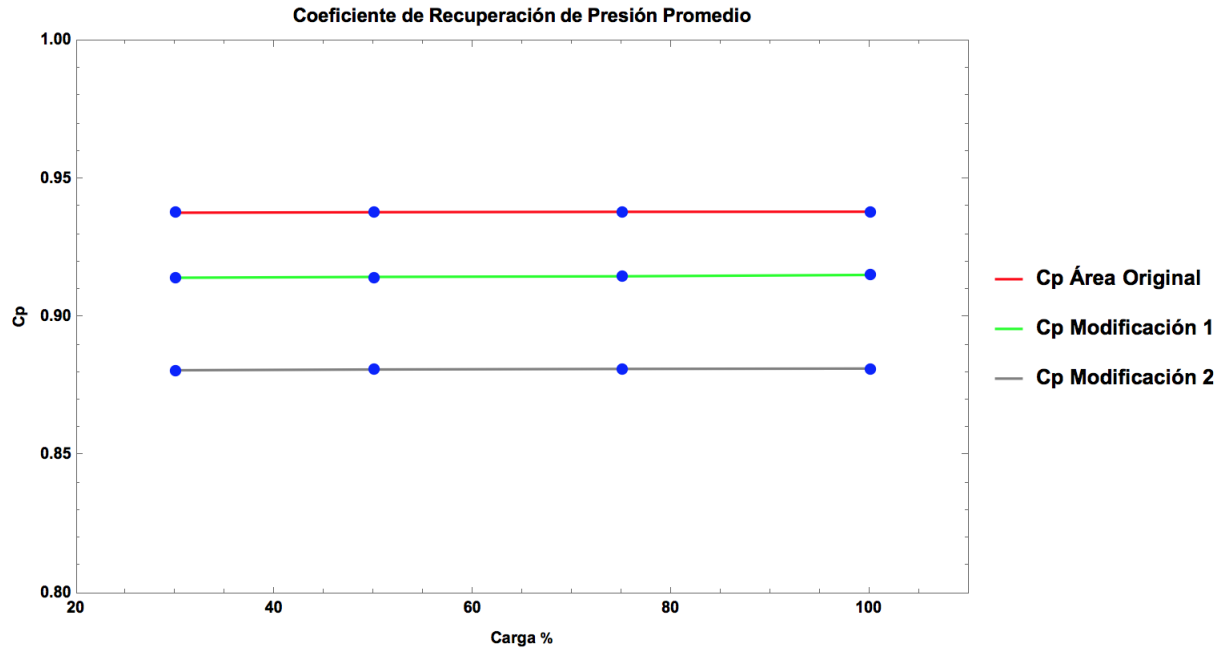


Figura 5.26: Coeficiente de recuperación de presión (global)

Es importante visualizar que cada geometría conserva de forma casi constante el C_p aunque la carga disminuya. Este comportamiento fue reportado por S.Galván [25], donde refiere que al evaluar una sola geometría con diferentes condiciones de frontera, el C_p no tiene respuesta significativa; “Al manejar solamente la presión estática, el C_p no responde a los cambios de estos parámetros”.

Por otro lado, en la figura 5.26 se muestra también que a una misma condición de operación, evaluando las diferentes piezas, el C_p sí presenta una respuesta a estos cambios geométricos. Este resultado es similar al reportado por S.Chakrabarty [26] donde evalúan el C_p de diferentes configuraciones de un tubo de aspiración, a una sola condición de operación.

De esta manera la geometría original, es la que presenta un mayor desempeño cuando se trabaja a carga nominal y cargas parciales a ésta.

Con la finalidad de complementar el análisis del C_p de los diferentes modelos geométricos, en la siguiente figura se muestran de forma conjunta el efecto de la carga y la variación del ángulo α , sobre el rendimiento de la pieza.

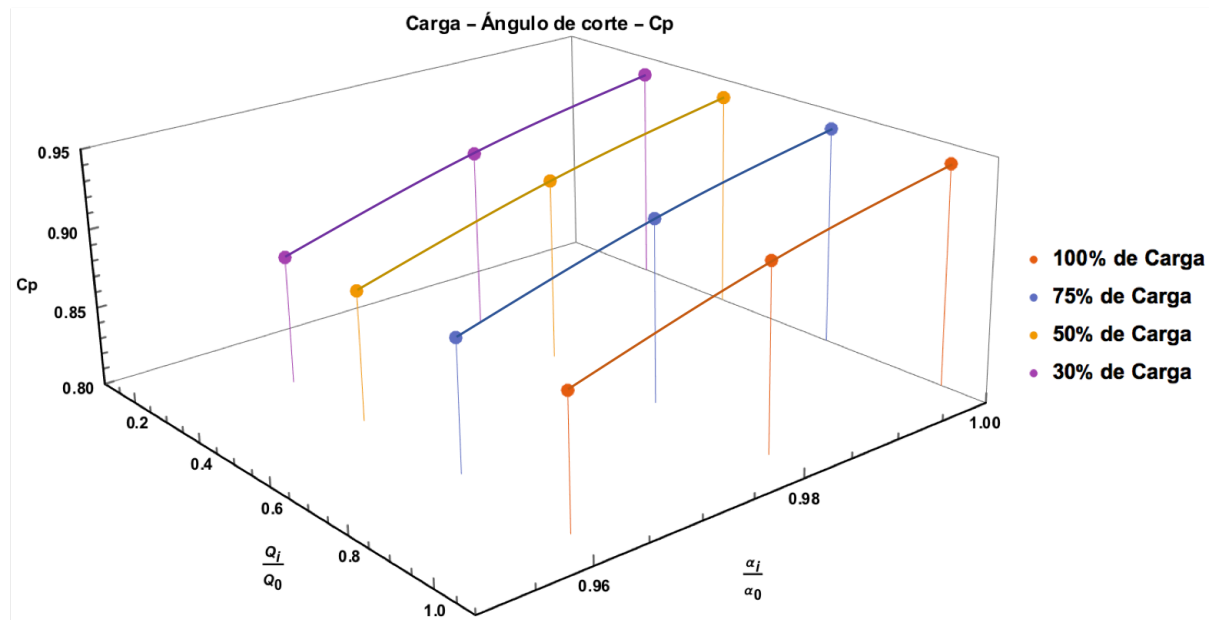


Figura 5.27: Coeficiente de recuperación de presión (global)

En el eje de las abscisas se presenta la carga de forma adimensional, donde Q_0 representa la carga nominal (227,928 kg/s) y Q_i las cargas parciales. En la ordenada se presenta el ángulo de corte de forma adimensional, donde α_0 representa el ángulo original (104.6°), α_i sus modificaciones correspondientes y en la cota se muestra el coeficiente de recuperación de presión.

Como se observa en la figura 5.27 y acorde con lo mostrado en la figura 5.26, una geometría evaluada a diferentes cargas, presenta un C_p constante. La variación de este parámetro se da cuando el ángulo se reduce, es decir existe una variación geométrica del modelo.

La disminución del coeficiente de recuperación de presión, debida a la reducción del área de salida, es una tendencia que concuerda con lo reportado por G. Demirel [32]. La diferencia radica en el parámetro utilizado para disminuir el área de la sección difusora.

CAPÍTULO

6

CONCLUSIÓN Y COMENTARIOS FINALES

6.1. Conclusiones del trabajo

Después de realizar este estudio de Dinámica de Fluidos Computacional se concluye que:

- Modificar la geometría variando el ángulo α para reducir el área de salida, no representa una opción viable para hacer el tubo difusor más eficiente cuando se opera a carga nominal o cargas parciales a ésta. Se ha demostrado que la modificación geométrica propuesta en este trabajo repercute de forma negativa en la recuperación de presión realizada por el tubo difusor.
- Es posible realizar un análisis CFD de una geometría tridimensional compleja utilizando exclusivamente software libre, en 3D (GMSH, OpenFOAM y Para View) ahorrando hasta un millón de pesos anuales en licencias de software.
- Este trabajo servirá como un testimonio documental que permita la elaboración de *solvers* para resolver problemas de flujo en OpenFOAM, ya que conjunta varias funcionalidades del software en un caso de estudio aplicado.

6.2. Comentarios finales

De la modificación de la geometría:

- Se realizaron 2 modificaciones a la geometría original a través del software CAD Inventor Fusion 360, con la finalidad de simular la geometría variable a la salida del difusor.

En cuanto al uso de software libre:

- A través del software GMSH se han generado las mallas correspondientes a cada geometría simulada.
- La simulación computacional se ha realizado a través de OpenFOAM, teniendo resultados satisfactorios.
- A través de ParaView se han visualizado y analizado los datos obtenidos de la simulación numérica (contornos de velocidad, presión y vectores de velocidad).

De la simulación computacional:

- Las mallas generadas acreditan el análisis de calidad de malla, con lo cual los resultados obtenidos son más precisos.
- Se ha evaluado la geometría original y sus modificaciones bajo 4 diferentes puntos de operación, 100, 75, 50 y 30 % de carga.
- Las diferentes simulaciones realizadas han cumplido con los parámetros de convergencia establecidos.
- Con el procesamiento de los datos obtenidos mediante simulación se obtuvieron los contornos de velocidad, presión y vectores de velocidad, los cuales ayudan a visualizar el comportamiento del fluido a través de la pieza.
- Se ha calculado el C_p para las diferentes geometrías evaluadas, siendo la geometría original la que presenta un mejor desempeño.

APÉNDICE

A

¿DÓNDE EMPIEZA Y DÓNDE TERMINA
LA MÁQUINA?

Es de suma importancia determinar en donde empieza y en donde termina la máquina. De acuerdo con [6] se establece una sección E (entrada) y una sección S (salida) según las “Normas internacionales para los ensayos de las turbinas hidráulicas en las centrales hidroeléctricas” del *Internationaler Code für Abnahmeversuche an Wasserturbinen in Kraftwerken*, Springer, Berlín 1965, de la siguiente manera:

- Sección E : “En todas las turbinas, la sección de entrada se encuentra inmediatamente detrás de la válvula de admisión (compuerta, de mariposa, de rodillos, etc). A veces, si los saltos son muy pequeños y los caudales no muy grandes (hasta $10 \text{ m}^3/\text{s}$), el canal mismo de admisión se ensancha formando una cámara, donde se instala la turbina que se dice instalada en *cámara de agua*: en dichas instalaciones la pérdida desde el nivel de aguas arriba hasta la entrada de la turbina es tan pequeña que puede despreciarse, con lo que puede tomarse el nivel de aguas arriba como sección E .”
- Sección S : “La sección de salida en todas las turbinas de **reacción** (Francis, Kaplan, etc) se encuentra en la sección de salida del tubo de aspiración. En todas las turbinas de **acción** se encuentra en el punto de tangencia del eje del chorro con un círculo cuyo centro es el centro del rodete.”

En la figura A.1 se representan gráficamente estas normas a través de sus cuatro secciones, la descripción de cada una de ellas puede consultarse en [6].

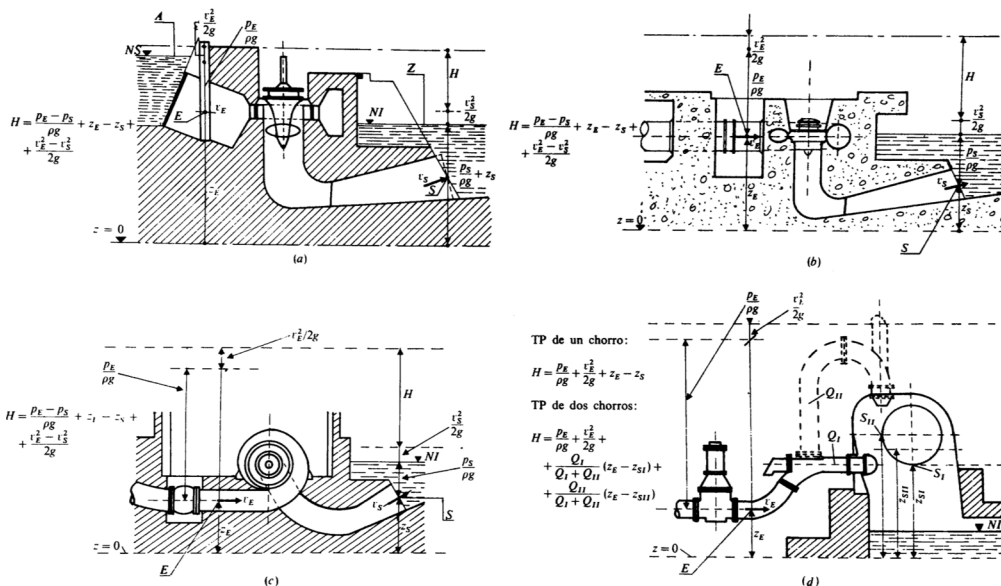


Figura A.1: Normas internacionales para la determinación de la altura neta en las centrales hidroeléctricas. Tomada totalmente de [6]

APÉNDICE

B

ANÁLISIS DE MALLA

Los resultados de los análisis de malla ejecutados se muestran a continuación.

```

Mesh stats
points:      219347
faces:      2330871
internal faces: 2220049
cells:      1137730
faces per cell: 4
boundary patches: 4
point zones: 0
face zones: 0
cell zones: 1

Overall number of cells of each type:
hexahedra: 0
prisms: 0
wedges: 0
pyramids: 0
tet wedges: 0
tetrahedra: 1137730
polyhedra: 0

Checking topology...
Boundary definition OK.
Cell to face addressing OK.
Point usage OK.
Upper triangular ordering OK.
Face vertices OK.
Number of regions: 1 (OK).

Checking patch topology for multiply connected surfaces...
Patch      Faces    Points  Surface topology
inlet      2108    1115   ok (non-closed singly connected)
tubo       102658  51526  ok (non-closed singly connected)
out1       3028    1583   ok (non-closed singly connected)
out2       3028    1583   ok (non-closed singly connected)

Checking faceZone topology for multiply connected surfaces...
No faceZones found.

Checking basic cellZone addressing...
CellZone    Cells    Points  BoundingBox
WATER       1137730  219347  (-3062 -5000 -5548.8) (27436 5000 8125)

Checking geometry...
Overall domain bounding box (-3062 -5000 -5548.8) (27436 5000 8125)
Mesh has 3 geometric (non-empty/wedge) directions (1 1 1)
Mesh has 3 solution (non-empty) directions (1 1 1)
Boundary openness (6.66003e-17 2.00863e-17 8.78007e-17) OK.
Max cell openness = 2.62298e-16 OK.
Max aspect ratio = 6.81751 OK.
Minimum face area = 930.436. Maximum face area = 62532.2. Face area magnitudes OK.
Min volume = 21927.4. Max volume = 5.06878e+06. Total volume = 1.54353e+12. Cell volumes OK.
Mesh non-orthogonality Max: 61.2749 average: 15.1814
Non-orthogonality check OK.
Face pyramids OK.
Max skewness = 0.922526 OK.
Coupled point location match (average 0) OK.

Mesh OK.

```

Figura B.1: Análisis de malla, geometría Original.

```

Mesh stats
points:          206352
faces:          2179361
internal faces: 2070023
cells:          1062346
faces per cell: 4
boundary patches: 4
point zones:    0
face zones:     0
cell zones:     1

Overall number of cells of each type:
hexahedra:      0
prisms:         0
wedges:         0
pyramids:       0
tet wedges:     0
tetrahedra:    1062346
polyhedra:      0

Checking topology...
Boundary definition OK.
Cell to face addressing OK.
Point usage OK.
Upper triangular ordering OK.
Face vertices OK.
Number of regions: 1 (OK).

Checking patch topology for multiply connected surfaces...
Patch      Faces    Points  Surface topology
tubo       101993  51181  ok (non-closed singly connected)
inlet      2108    1115   ok (non-closed singly connected)
out1       2652    1389   ok (non-closed singly connected)
out2       2585    1355   ok (non-closed singly connected)

Checking faceZone topology for multiply connected surfaces...
No faceZones found.

Checking basic cellZone addressing...
CellZone    Cells    Points  BoundingBox
WATER       1062346 206352  (-3062 -5000 -5548.8) (27436 5000 8125)

Checking geometry...
Overall domain bounding box (-3062 -5000 -5548.8) (27436 5000 8125)
Mesh has 3 geometric (non-empty/wedge) directions (1 1 1)
Mesh has 3 solution (non-empty) directions (1 1 1)
Boundary openness (9.77033e-17 -4.2931e-18 1.34532e-16) OK.
Max cell openness = 2.7237e-16 OK.
Max aspect ratio = 6.81774 OK.
Minimum face area = 958.969. Maximum face area = 64145.3. Face area magnitudes OK.
Min volume = 21899.6. Max volume = 5.73745e+06. Total volume = 1.49365e+12. Cell volumes OK.
Mesh non-orthogonality Max: 65.905 average: 15.251
Non-orthogonality check OK.
Face pyramids OK.
Max skewness = 0.93836 OK.
Coupled point location match (average 0) OK.

Mesh OK.

```

Figura B.2: Análisis de malla, geometría Modificación1.

```

Mesh stats
points:          121007
faces:          1252907
internal faces: 1179601
cells:          608127
faces per cell: 4
boundary patches: 4
point zones:    0
face zones:     0
cell zones:     1

Overall number of cells of each type:
hexahedra:      0
prisms:         0
wedges:         0
pyramids:       0
tet wedges:     0
tetrahedra:    608127
polyhedra:      0

Checking topology...
Boundary definition OK.
Cell to face addressing OK.
Point usage OK.
Upper triangular ordering OK.
Face vertices OK.
Number of regions: 1 (OK).

Checking patch topology for multiply connected surfaces...
Patch      Faces    Points  Surface topology
tubo       68531   34414  ok (non-closed singly connected)
out1       1597    848    ok (non-closed singly connected)
inlet      1543    823    ok (non-closed singly connected)
out2       1635    867    ok (non-closed singly connected)

Checking faceZone topology for multiply connected surfaces...
No faceZones found.

Checking basic cellZone addressing...
CellZone    Cells    Points  BoundingBox
WATER       608127  121007  (-3062 -5000 -5548.8) (27436 5000 8125)

Checking geometry...
Overall domain bounding box (-3062 -5000 -5548.8) (27436 5000 8125)
Mesh has 3 geometric (non-empty/wedge) directions (1 1 1)
Mesh has 3 solution (non-empty) directions (1 1 1)
Boundary openness (-2.78718e-16 -1.52852e-17 -1.69723e-17) OK.
Max cell openness = 2.41439e-16 OK.
Max aspect ratio = 8.0208 OK.
Minimum face area = 1104.94. Maximum face area = 94065.8. Face area magnitudes OK.
Min volume = 26529.6. Max volume = 8.72518e+06. Total volume = 1.44354e+12. Cell volumes OK.
Mesh non-orthogonality Max: 65.7809 average: 15.3814
Non-orthogonality check OK.
Face pyramids OK.
Max skewness = 0.853702 OK.
Coupled point location match (average 0) OK.

Mesh OK.

```

Figura B.3: Análisis de malla, geometría Modificación2.

```

Mesh stats
points:          123688
faces:          1343528
internal faces: 1271820
cells:          653837
faces per cell: 4
boundary patches: 4
point zones:    0
face zones:     0
cell zones:     1

Overall number of cells of each type:
hexahedra:      0
prisms:         0
wedges:         0
pyramids:       0
tet wedges:     0
tetrahedra:    653837
polyhedra:      0

Checking topology...
Boundary definition OK.
Cell to face addressing OK.
Point usage OK.
Upper triangular ordering OK.
Face vertices OK.
Number of regions: 1 (OK).

Checking patch topology for multiply connected surfaces...
Patch      Faces    Points  Surface topology
out1       1467    780    ok (non-closed singly connected)
tubo       67239   33762  ok (non-closed singly connected)
inlet      1525    814    ok (non-closed singly connected)
out2       1477    785    ok (non-closed singly connected)

Checking faceZone topology for multiply connected surfaces...
No faceZones found.

Checking basic cellZone addressing...
CellZone    Cells    Points  BoundingBox
WATER       653837  123688  (-3062 -5000 -5548.8) (27436 5000 8125)

Checking geometry...
Overall domain bounding box (-3062 -5000 -5548.8) (27436 5000 8125)
Mesh has 3 geometric (non-empty/wedge) directions (1 1 1)
Mesh has 3 solution (non-empty) directions (1 1 1)
Boundary openness (-6.44795e-17 1.57895e-18 -2.18046e-17) OK.
Max cell openness = 2.90958e-16 OK.
Max aspect ratio = 10.7203 OK.
Minimum face area = 1104.94. Maximum face area = 78567.6. Face area magnitudes OK.
Min volume = 47197.2. Max volume = 8.54107e+06. Total volume = 1.39436e+12. Cell volumes OK.
Mesh non-orthogonality Max: 68.6454 average: 20.9218
Non-orthogonality check OK.
Face pyramids OK.
Max skewness = 1.42293 OK.
Coupled point location match (average 0) OK.

Mesh OK.

```

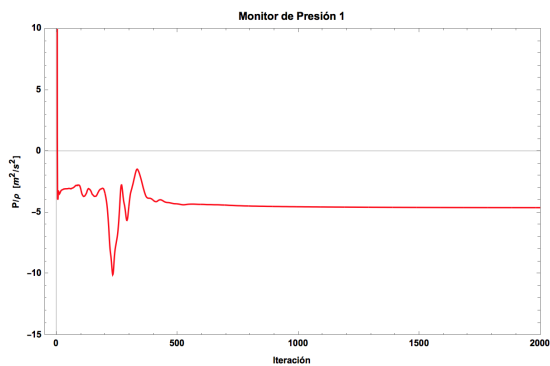
Figura B.4: Análisis de malla, geometría Modificación3.

APÉNDICE

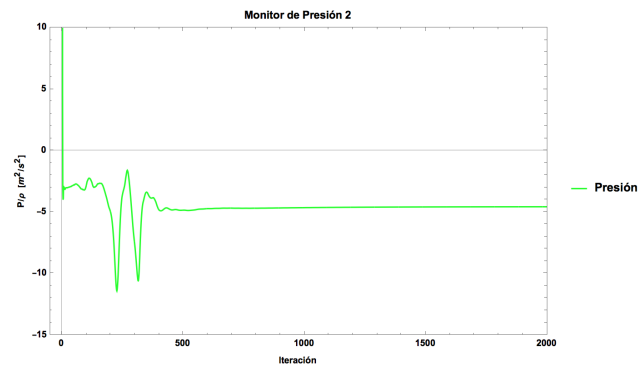
C

PUNTOS DE MONITORIZACIÓN DE PRESIÓN

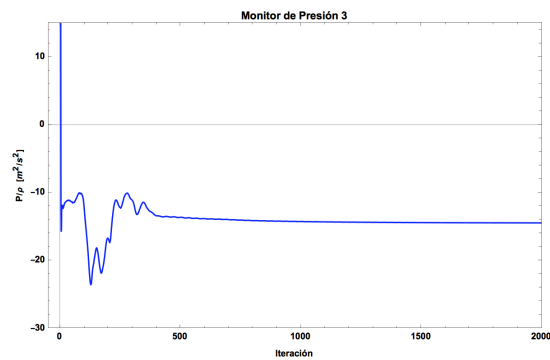
Es importante mencionar que OpenFOAM opera con **presión cinemática** por lo que las unidades que corresponden al eje de las ordenadas en cada gráfica son m^2/s^2 .



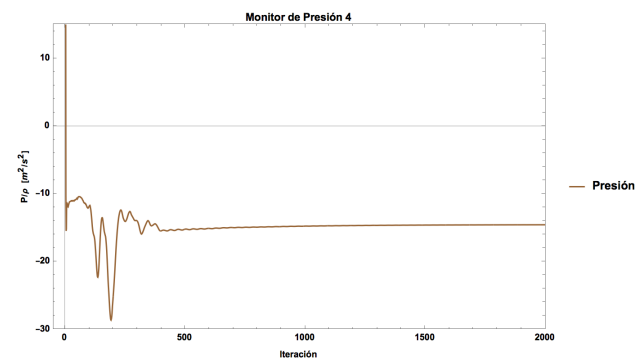
(a) Monitor 1



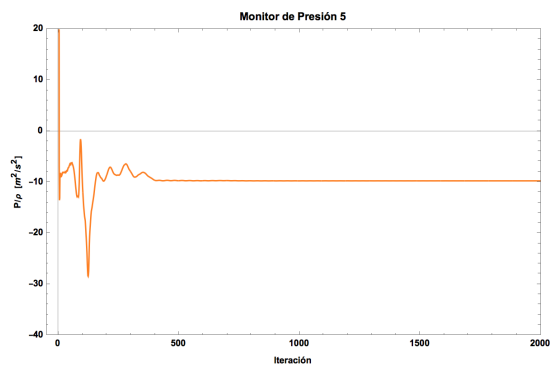
(b) Monitor 2



(c) Monitor 3

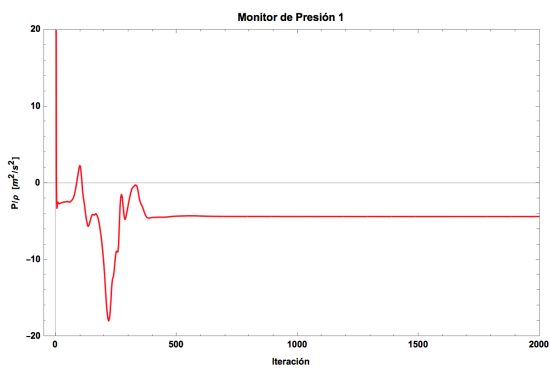


(d) Monitor 4

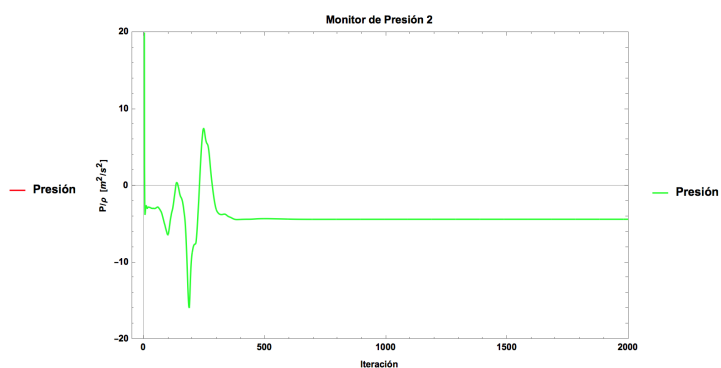


(e) Monitor 5

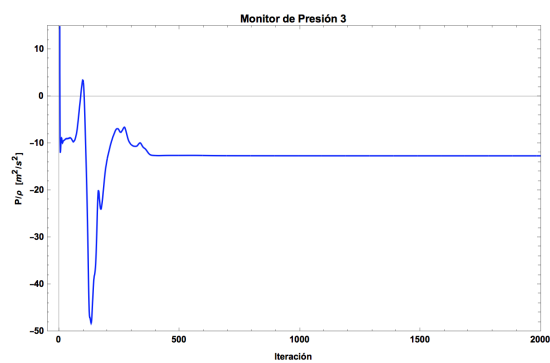
Figura C.1: Monitores de presión. Simulación a 100 % de carga. Modificación 1.



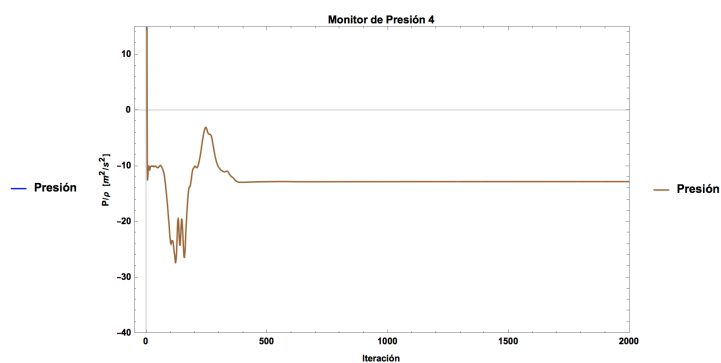
(a) Monitor 1



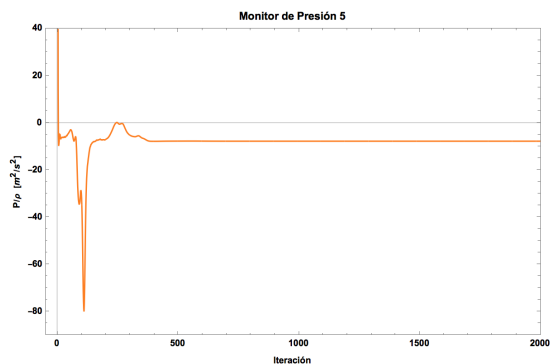
(b) Monitor 2



(c) Monitor 3

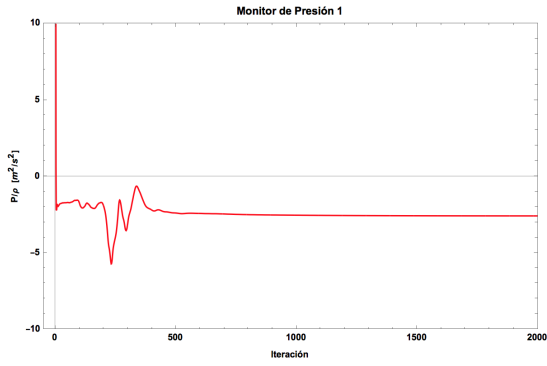


(d) Monitor 4

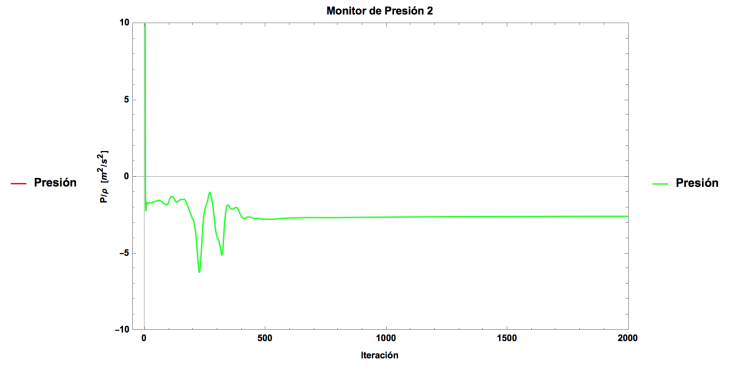


(e) Monitor 5

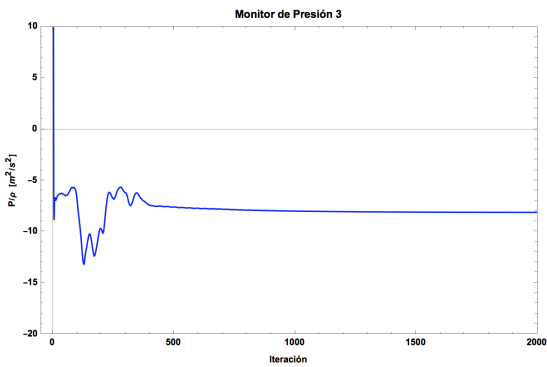
Figura C.2: Monitores de presión. Simulación a 100 % de carga. Modificación 2.



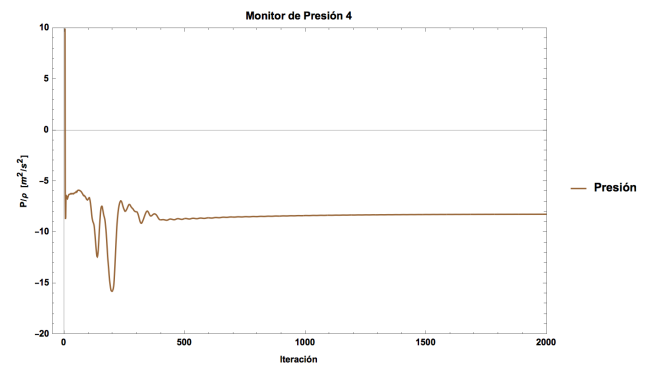
(a) Monitor 1



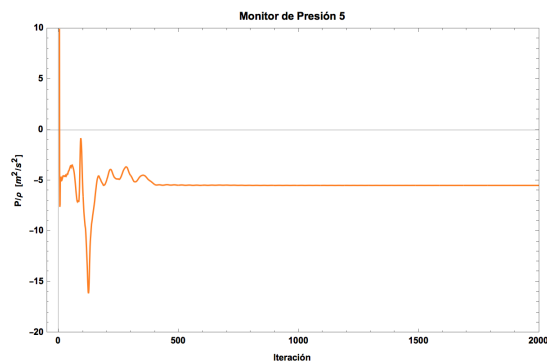
(b) Monitor 2



(c) Monitor 3

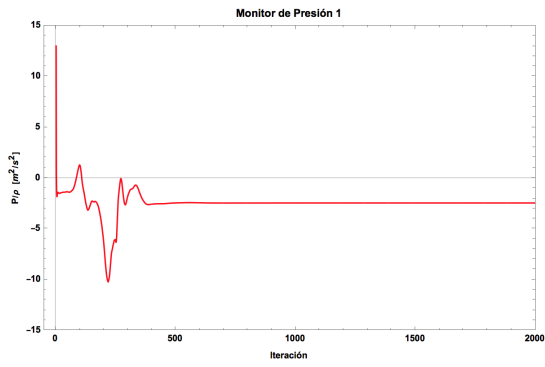


(d) Monitor 4

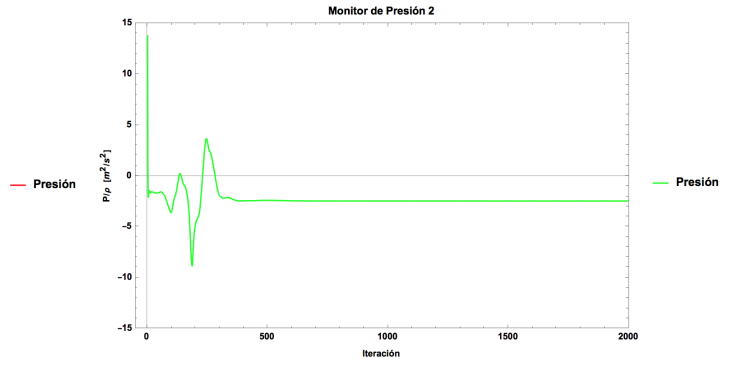


(e) Monitor 5

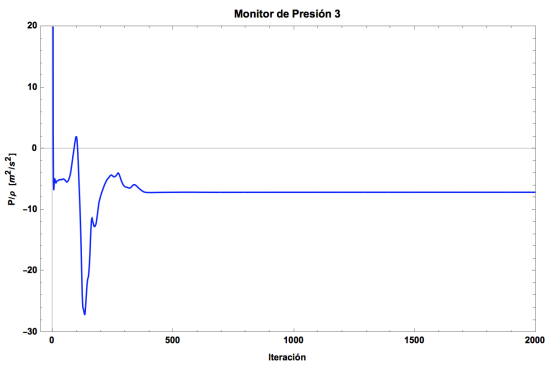
Figura C.3: Monitores de presión. Simulación a 75 % de carga. Modificación 1.



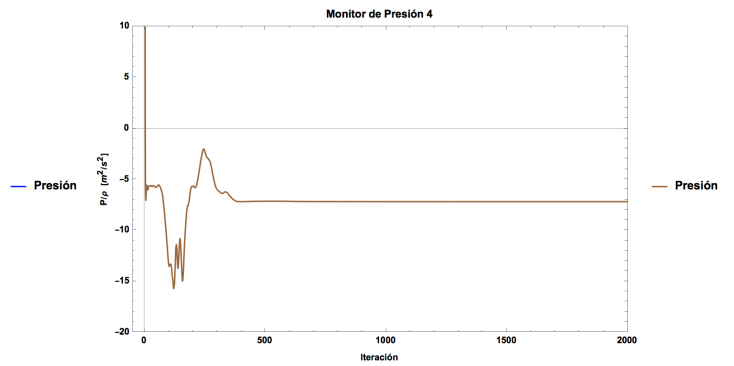
(a) Monitor 1



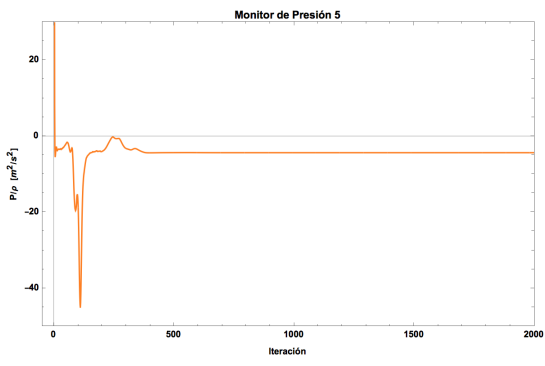
(b) Monitor 2



(c) Monitor 3

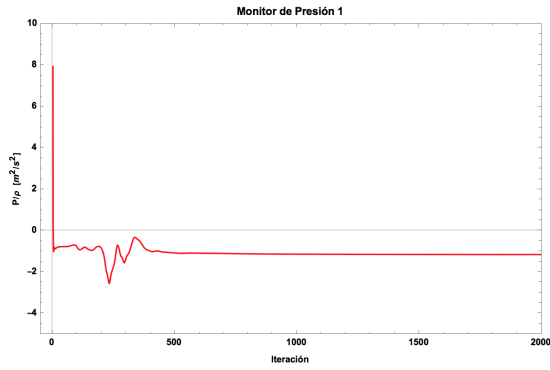


(d) Monitor 4

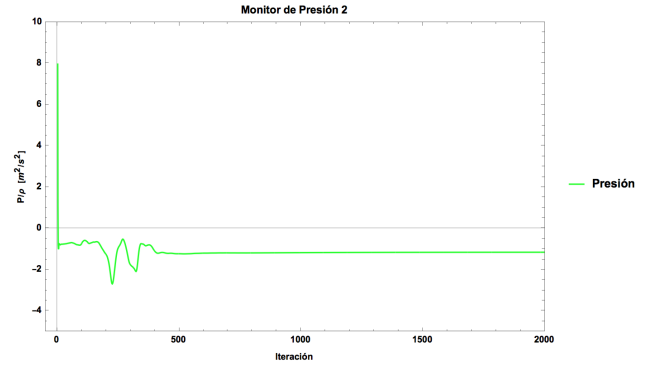


(e) Monitor 5

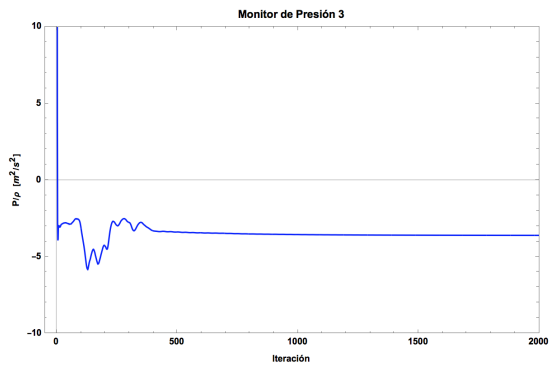
Figura C.4: Monitores de presión. Simulación a 75% de carga. Modificación 2.



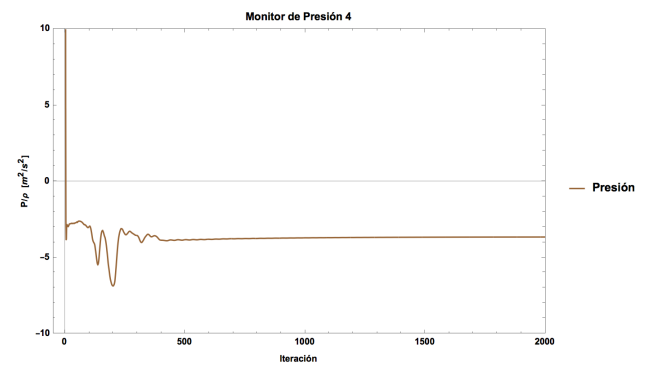
(a) Monitor 1



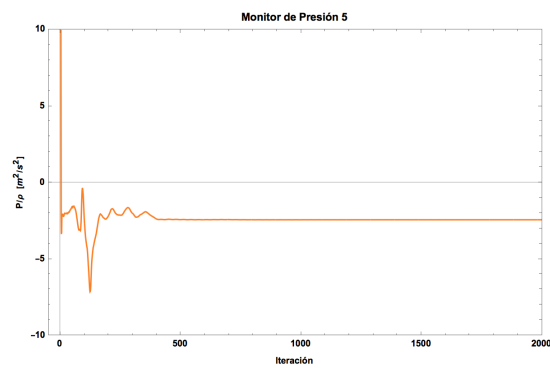
(b) Monitor 2



(c) Monitor 3

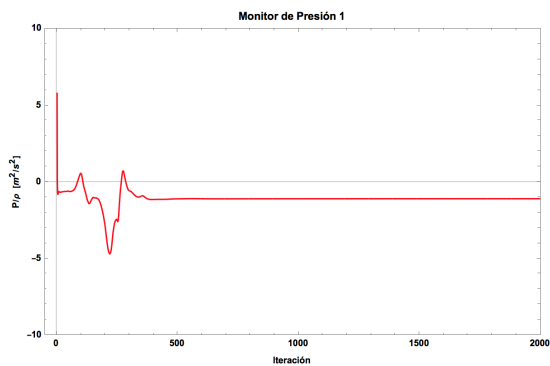


(d) Monitor 4

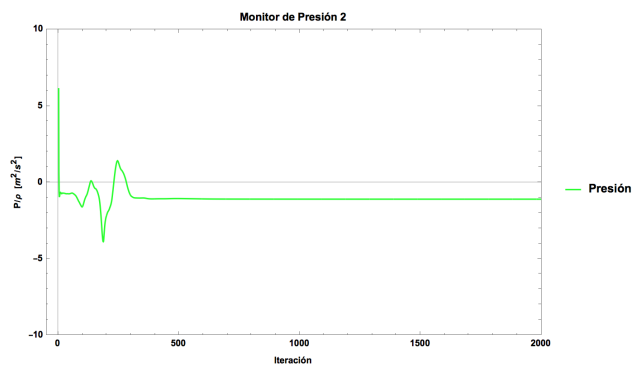


(e) Monitor 5

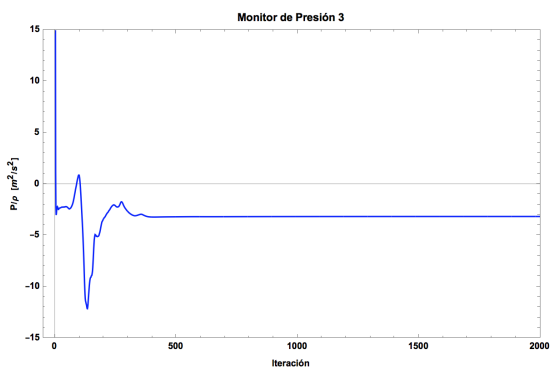
Figura C.5: Monitores de presión. Simulación a 50% de carga. Modificación 1.



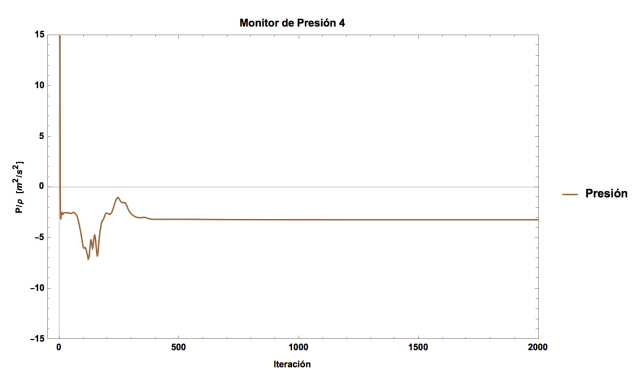
(a) Monitor 1



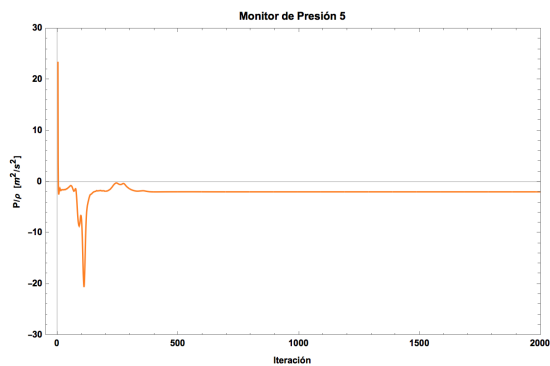
(b) Monitor 2



(c) Monitor 3



(d) Monitor 4



(e) Monitor 5

Figura C.6: Monitores de presión. Simulación a 50 % de carga. Modificación 2.

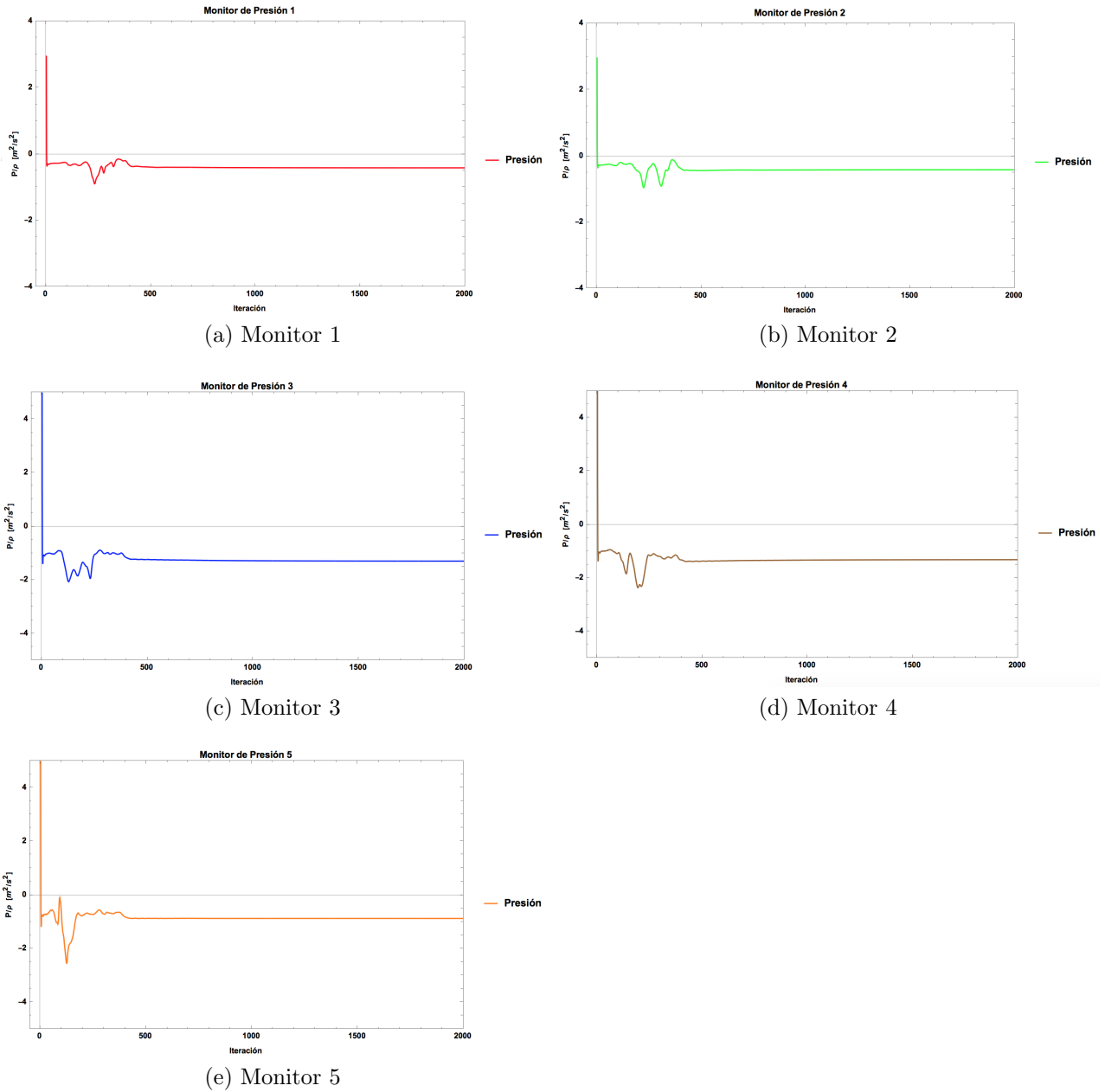
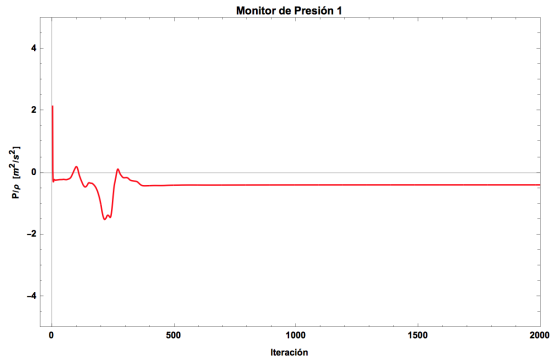
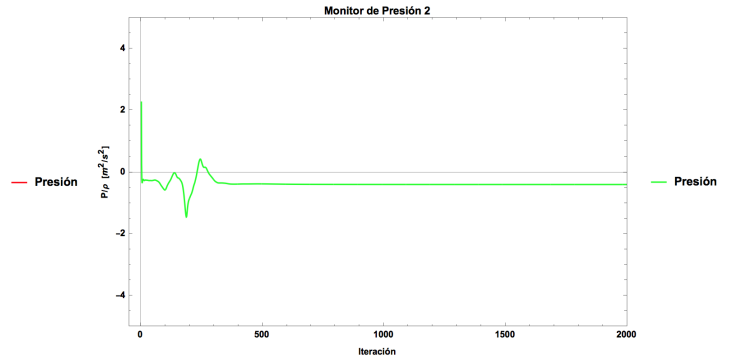


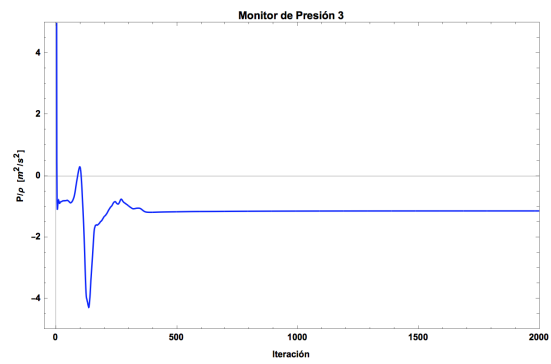
Figura C.7: Monitores de presión. Simulación a 30 % de carga. Modificación 1.



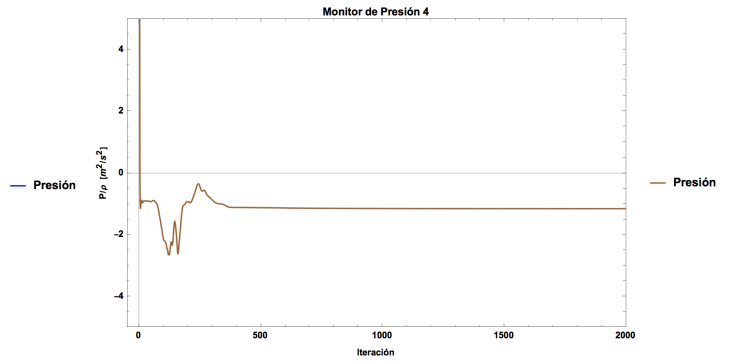
(a) Monitor 1



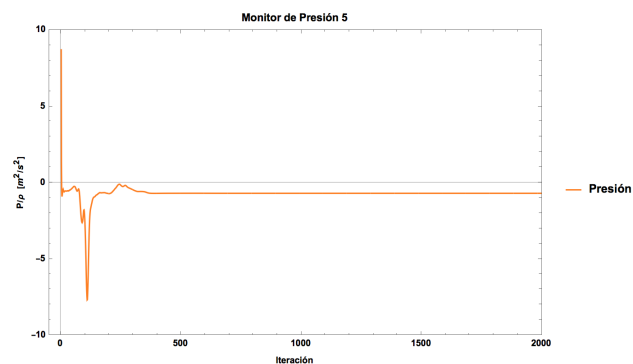
(b) Monitor 2



(c) Monitor 3



(d) Monitor 4



(e) Monitor 5

Figura C.8: Monitores de presión. Simulación a 30 % de carga. Modificación 2.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. Fernández, *Técnicas numéricas en ingeniería de fluidos*. Reverté, 2012.
- [2] OpenCFD Limited, *OpenFOAM User Guide*, 2018.
- [3] S. Wadibhasme, S. Peshne, P. Barapatre, S. Barade, S. Dangore, S. Harde, and S. Daf, “Hydraulic turbine draft tube: Literature review,” *International Journal of Science, Engineering and Technology Research (IJSETR)*, vol. 5, no. 3, pp. 673–676, 2016.
- [4] M. chol Nam, B. Dechun, Y. Xiangji, and J. Mingri, “Design optimization of hydraulic turbine draft tube based on cfd and doe method,” in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 136, p. 012019, IOP Publishing, 2018.
- [5] V. Arenas and V. Roberto, “Estudio numérico del campo de velocidad y de presiones en tuberías horizontales con combinación de codos de 90°,” Master’s thesis, Instituto Politécnico Nacional, 2006.
- [6] C. Mataix, *Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas*. Oxford University Press, 1982.
- [7] SENER, *Balance Nacional de Energía*. México: Secretaria de Energía, 2016.
- [8] M. de Jesús Ramos-Gutiérrez, Leonardo y Montenegro-Fragoso, “La generación de energía eléctrica en México,” *Tecnología y Ciencias del Agua*, vol. 3, no. 4, p. 197, 2012.
- [9] F. White, *Mecánica de fluidos*. Mc Graw Hill, sexta ed., 2008.
- [10] J. Katz, *Introductory fluid mechanics*. Cambridge University Press, 2010.

- [11] S. de las Heras, *Mecánica de fluidos en ingeniería*. Universitat Politècnica de Catalunya, 2012.
- [12] I. G. Currie and I. Currie, *Fundamental mechanics of fluids*. Crc Press, 2002.
- [13] J. Bergadà, *Mecánica de fluidos. Breve introducción teórica con problemas resueltos*. Universitat Politècnica de Catalunya, 2012.
- [14] H. K. Versteeg and W. Malalasekera, *An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method*. Pearson Education, 2007.
- [15] T. Sargsyan, “Estudio de fenómenos de transferencia de calor y dinámica de fluidos mediante los métodos de lattice boltzmann y volúmenes finitos,” 2012.
- [16] S. B. Pope, *Turbulent flows*. Cambridge University Press, 2000.
- [17] D. Crevillén García, “Simulación numérica del flujo a través del tubo difusor de una turbina de reacción: factores de mejora de su eficiencia,” tech. rep., Universidad Politécnica de Cartagena, España, 2013.
- [18] T. Agarwal, S. Chaudhary, and S. Verma, “Numerical and experimental analysis of draft tubes for francis turbine,” *Indian Journal of Science and Technology*, vol. 10, no. 23, 2017.
- [19] J. Jeon, S. Byeon, and Y. Kim, “Effects of draft tube on the hydraulic performance of a francis turbine,” in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 52, p. 052034, IOP Publishing, 2013.
- [20] S. L. Beatove, M. J. G. Ruiz, B. Q. Arboleda, and S. O. Bustamante, “Cfd numerical simulations of francis turbines,” *Revista Facultad de Ingeniería*, no. 51, pp. 31–40, 2013.
- [21] P. P. Gohil and R. Saini, “Cfd: Numerical analysis and performance prediction in francis turbine,” in *Non Conventional Energy (ICONCE), 2014 1st International Conference on*, pp. 94–97, IEEE, 2014.
- [22] M. K. Shukla, R. Jain, V. Prasad, and S. Shukla, “Cfd analysis of 3-d flow for francis turbine,” *MIT International Journal of Mechanical Engineering*, vol. 1, no. 2, pp. 93–100, 2011.
- [23] J. Hellström, B. Marjavaara, and T. Lundström, “Parallel cfd simulations of an original and redesigned hydraulic turbine draft tube,” *Advances in Engineering Software*, vol. 38, no. 5, pp. 338–344, 2007.
- [24] H. Gardea, *Aprovechamientos hidroeléctricos y de bombeo*. Trillas, 1992.

- [25] S. Galván, J. de Jesús Pacheco, C. Rubio, C. Mendoza, and M. Toledo, “Análisis de sensibilidad de las condiciones de frontera a la entrada del aspirador de la turbina 99,” *Revista Facultad de Ingeniería*, no. 64, pp. 91–103, 2012.
- [26] S. Chakrabarty, B. K. Sarkar, and S. Maity, “Cfd analysis of the hydraulic turbine draft tube to improve system efficiency,” in *MATEC Web of Conferences*, vol. 40, p. 02003, EDP Sciences, 2016.
- [27] C. Geuzaine and J.-F. Remacle, “Gmsh: A 3-d finite element mesh generator with built-in pre-and post-processing facilities,” *International journal for numerical methods in engineering*, vol. 79, no. 11, pp. 1309–1331, 2009.
- [28] C. Geuzaine and J.-F. Remacle, *Gmsh Reference Manual*, November 2017.
- [29] U. Ayachit, *The ParaView Guide*, 2017.
- [30] T. M. Arispe, W. de Oliveira, and R. G. Ramirez, “Francis turbine draft tube parameterization and analysis of performance characteristics using cfd techniques,” *Renewable Energy*, vol. 127, pp. 114–124, 2018.
- [31] J. Paik, F. Sotiropoulos, and M. J. Sale, “Numerical simulation of swirling flow in complex hydroturbine draft tube using unsteady statistical turbulence models,” *Journal of hydraulic engineering*, vol. 131, no. 6, pp. 441–456, 2005.
- [32] G. Demirel, E. Acar, K. Celebioglu, and S. Aradag, “Cfd-driven surrogate-based multi-objective shape optimization of an elbow type draft tube,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 42, no. 28, pp. 17601–17610, 2017.