



**SIMULACIÓN DEL CAMPO DE FLUJO EN
UN TURBOVENTILADOR UTILIZANDO
UNA HERRAMIENTA DE DINÁMICA DE
FLUIDOS COMPUTACIONAL**

Autores: Franco Cimmarusti Gómez
C.I. 25.754.824
María Fernanda Decán Vincentelli
C.I. 24.330.886

Urb. Yuma II, calle N°3. Municipio San Diego.
Teléfono: (0241) 8714240 (master)- Fax: (0241) 8712394.



**REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**SIMULACIÓN DEL CAMPO DE FLUJO EN UN TURBOVENTILADOR
UTILIZANDO UNA HERRAMIENTA DE DINÁMICA DE FLUIDOS
COMPUTACIONAL.**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de
INGENIERO MECÁNICO**

Autores: Franco Cimmarusti Gómez
C.I. 25.754.824
María Fernanda Decán Vincentelli
C.I. 24.330.886
Tutor: Ing. Gruber A. Caraballo V.

San Diego, Mayo de 2019



FI-M-001-2019-ICR

Valencia, 14 de Marzo de 2019

Ciudadano:
Franco Cimmarusti
C.I: 25.754.824
María Decán
C.I: 24.330.886
Presente-

Cumplo con informarle que la Comisión de Trabajo de Grado y Pasantías de la Facultad de Ingeniería en su reunión N° 14-2019 de fecha 14-03-2019 aprobó el proyecto de trabajo de grado titulado **SIMULACIÓN DEL CAMPO DE FLUJO EN UN TURBOVENTILADOR UTILIZANDO UNA HERRAMIENTA DE DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL** Presentado por usted(es) como requisitos para optar al título de Ingeniero Mecánico.

Se ratifica la designación de la Ing. Gruber Caraballo C.I:12.014.408 y Alicia De Pizzella, C.I: 4.598.880 como Tutores Académicos y metodológicos que lo asesorarán en el desarrollo de este proyecto.

Atentamente,



Prof. Luis Lira
Decano de la Facultad de Ingeniería

c.e. Coordinación de Pasantías y Trabajo de Grado (1).
L/L/e.



REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

ACEPTACIÓN DEL TUTOR

Quien suscribe, Ingeniero GRUBER A. CARABALLO V. , portador de la cédula de identidad N° V-12.014.408, en mi carácter de tutor del trabajo de grado presentado por los ciudadanos MARÍA FERNANDA DECÁN VINCENTELLI y FRANCO CIMMARUSTI GÓMEZ, portadores de las cédulas de identidad N° V-24.330.886 y V-25.754.824, respectivamente, titulado **SIMULACIÓN DEL CAMPO DE FLUJO EN UN TURBOVENTILADOR UTILIZANDO UNA HERRAMIENTA DE DINAMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL** presentado como requisito parcial para optar al título de Ingeniero MECÁNICO, considero que dicho trabajo reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a la presentación pública y evaluación por parte del jurado examinador que se designe.

En San Diego, del mes de MAYO del año dos mil DIECINUEVE.



Firma

Ing. Gruber A. Caraballo V.
C.I.: V-12.014.408



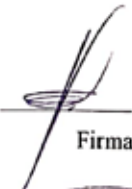
REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE MECÁNICA
CARRERA: INGENIERÍA MECÁNICA

San Diego, Junio 2019

ACTA DE REVISIÓN DEL PROYECTO DE TRABAJO DE GRADO

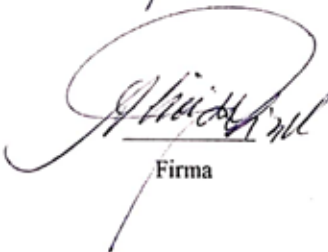
Quienes suscriben esta Acta, dejan constancia que el Proyecto de Trabajo de Grado: **SIMULACIÓN DEL CAMPO DE FLUJO EN UN TURBOVENTILADOR UTILIZANDO UNA HERRAMIENTA DE DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL**. Ha sido revisado y, cumpliendo con los requisitos exigidos para su aprobación, recomiendan su tramitación ante el organismo académico correspondiente.

Prof. Ing. Gruber A. Caraballo V.
Tutor Académico


Firma

03/06/2019
Fecha

Prof. Ing. Alicia de Pizzella
Tutor Metodológico


Firma

3-6-19
Fecha

AGRADECIMIENTOS

Primeramente, a nuestros padres, **Vicente Cimmarusti, Rafael Decán y María Eugenia Vincentelli**, quienes representan los pilares fundamentales en nuestra vida, aquellos que nos han brindado apoyo incondicional, consejos llenos de sabiduría y ejemplo de excelencia. Quienes se encargaron de forjar nuestra educación desde el principio de nuestras vidas y nos continúan dando herramientas que nos permitan mejorar como personas para así lograr cada uno de los objetivos que nos proponamos, a ellos damos gracias.

A nuestros hermanos, **Enzo Cimmarusti, Fernando Decán y María Jose Decán**, con quienes hemos podido contar desde el día uno, con su apoyo, constante motivación y compañía en todos los momentos importantes a lo largo de nuestras vidas.

A nuestro tutor y padrino de promoción, el profesor **Gruber A. Caraballo**, cuyo apoyo y guía fue fundamental para lograr culminar exitosamente este trabajo de grado, a quien nos brindó las respuestas para cada una de nuestras preguntas y también largas horas de asesorías, gracias infinitas.

A nuestros compañeros y amigos, con quienes compartimos estos 5 años de carrera, contando con su apoyo en cada asignatura cursada, ayudándonos, recíprocamente, las veces que fueran necesarias, a **Vicente Fernández, Abraham Machado, Alexis Henríquez**. Cabe también agradecer a cada uno de los integrantes de la **Promoción XXVI de Ingeniería Mecánica**, por todas las aventuras vividas y los momentos compartidos, dentro y fuera de la universidad, durante esta última etapa de nuestra carrera.

A aquellos profesores que también formaron parte de nuestra carrera universitaria en las distintas ramas de estudio, como **Carlos Ferrer, Franklin Camejo, Giovanni Pizzella, Alicia de Pizzella y Donato Romanello**, por nombrar algunos, gracias por enseñar con pasión y paciencia, por compartir con nosotros la sabiduría y conocimientos que la experiencia le ha otorgado a cada uno. Ha sido un privilegio haber sido formado por ustedes.

ÍNDICE GENERAL

CONTENIDO	P.p
ÍNDICE DE TABLAS.....	xi
ÍNDICE DE GRÁFICAS.....	xi
ÍNDICE DE FIGURAS	xii
RESUMEN.....	xiv
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I	
EL PROBLEMA.....	3
1.1 Planteamiento del problema.....	3
1.2 Formulación del problema:	5
1.3 Objetivos de la investigación.....	5
1.3.1 Objetivo general	5
1.3.2 Objetivos específicos.....	5
1.4 Justificación.....	5
1.5 Limitaciones	6
1.6 Alcance:	7
MARCO TEÓRICO.....	8
2.1 Antecedentes	8
2.2 Bases teóricas.....	12
2.2.1 Ventiladores.....	12
2.2.2 Ventiladores centrífugos.....	13
2.2.2.1 Centrífugos con rodete de pala radial	14
2.2.2.2 Centrífugos con rodete de álabe curvados hacia adelante (forward)	14
2.2.2.3 Centrífugos con rodete de álabe curvados hacia atrás (backward)	15
2.2.3 Admisión en ventiladores	16
2.2.4 Voluta	16
2.2.5 Ecuación de Navier-Stokes.....	188
2.2.6 Coeficiente de arrastre	220

2.2.7	Sustentación y ángulo de ataque.....	20
2.2.8	Modelo de turbulencia kappa-épsilon (k-	

4.4	Obtención los resultados en forma de datos, gráficos o videos para su análisis mediante una herramienta computacional de procedimiento matemático.....	75
4.4.1	Estadísticas del mallado.....	75
4.4.2	Convergencia de las simulaciones.....	77
4.4.2.1	Convergencia por criterio RMS (Raíz Cuadrada Media)	78
4.4.2.2	Convergencia por criterio de Imbalances	85
4.4.3	91
4.4.4	Visualización de resultados	93
4.4.4.1	Contornos de presión	94
4.4.4.2	Perfiles de velocidad	98
4.4.4.3	Potencia útil	105
4.4.5	Evaluación de los resultados.....	106
4.4.5.1	106
4.4.5.2	Análisis de la presión en los dominios.....	1077
4.4.5.3	Análisis de velocidad en los dominios fluidizados	108
	CONCLUSIONES.....	110
	RECOMENDACIONES.....	111
	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	112
	ANEXOS.....	114

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA		Pag.
1	Propiedades de entrada y salida a distintos caudales.	69
2	Estadísticas del mallado.....	76
3	Cantidad de nodos y elementos.....	77
4	Resultados de la simulación.....	91
5	Potencia útil de simulación.....	105

ÍNDICE DE GRÁFICOS

GRÁFICA		Pag.
1	Curva de error relativo de las ecuaciones de momento y masa.....	74
2	Curva de imbalances de las ecuaciones de dominio.....	75
3	Convergencia de las ecuaciones de momento y masa (RMS) para caudal de $Q_1=4.3844 \text{ m}^3/\text{s}$	79
4	Convergencia de las ecuaciones de turbulencia (RMS) para el caudal de $Q_1=4.3844 \text{ m}^3/\text{s}$	80
5	Convergencia de las ecuaciones de momento y masa (RMS) para el caudal de $Q_2=3.7212 \text{ m}^3/\text{s}$	80
6	Convergencia de las ecuaciones de turbulencia (RMS) para el caudal de $Q_2=3.7212 \text{ m}^3/\text{s}$	81
7	Convergencia de las ecuaciones de momento y masa (RMS) para el caudal de $Q_3=3.0336 \text{ m}^3/\text{s}$	82
8	Convergencia de las ecuaciones de turbulencia (RMS) para el caudal de $Q_3=3.0336 \text{ m}^3/\text{s}$	82
9	Convergencia de las ecuaciones de momento y masa (RMS) para el caudal de $Q_4=5.3942 \text{ m}^3/\text{s}$	83
10	Convergencia de las ecuaciones de turbulencia (RMS) para el caudal de $Q_4=5.3942 \text{ m}^3/\text{s}$	84
11	Convergencia de las ecuaciones de momento y masa (RMS) para el caudal de $Q_5=6.6390 \text{ m}^3/\text{s}$	84
12	Convergencia de las ecuaciones de turbulencia (RMS) para el caudal de $Q_5=6.6390 \text{ m}^3/\text{s}$	85
13	Convergencia por el criterio de imbalances, para el caudal Q_1	86
14	Convergencia por el criterio de imbalances, para el caudal Q_2	87
15	Convergencia por el criterio de imbalances, para el caudal Q_3	88
16	Convergencia por el criterio de imbalances, para el caudal Q_4	89
17	Convergencia por el criterio de imbalances, para el caudal Q_5	90
18	Curva característica de la simulación.....	92
19	Comparación de curvas.....	93
20	Potencia útil de simulación.....	106

ÍNDICE DE FIGURA

FIGURA	Pag.
1 Rodete de pala radial.....	14
2 Rodete de álabes curvados hacia adelante.....	15
3 Rodete de álabes curvados hacia atrás.....	15
4 Formas de la admisión de los ventiladores. a) Cilíndrica. b) Cónica. c) Abocinada. d) Compuesta. e) Guiada con álabes directores.....	16
5 Posiciones de la boca de salida del ventilador. A) derechas. B) izquierdas.....	17
6 Posiciones del difusor. a) Correcta; b) Incorrecta; c) Difusor simétrico..	17
7 Voluta. 1) sin lengua. 2) con lengua poco pronunciada. 3) con lengua pronunciada.	18
8 Separación de la superficie superior y la superficie de sustentación	21
9 Curva de sustentación.....	22
10 Malla estructurada de manera oblicua y ortogonal.....	27
11 Malla no estructurada.....	28
12 Malla híbrida.....	28
13 Relación de aspecto en un rectángulo.	29
14 Oblicuidad.	30
15 Ortogonalidad.....	30
16 Distorsión de malla.....	31
17 Elementos 2D.....	32
18 Elementos 3D.....	32
19 Croquis de la voluta, espiral de cuatro centros.....	44
20 Radios de la voluta (dimensiones en mm).....	44
21 Geometría final del dominio fluidizado de la voluta.....	45
22 Dimensiones del álabe.....	46
23 (a) Álabes del turboventilador. (b) Dominio fluidizado de los álabes.	47
24 Dominio fluidizado del álabe seccionado.....	47
25 Dominio de la succión. (a) Succión completa. (b) Succión seccionada....	48
26 Módulo de Geometría, Design Modeler.....	49
27 Conjunto armado: voluta, impulsor y succión.....	50
28 a) Interfaz del módulo “Mesh”. (b) selección de edición de mallado.....	51
29 Selección de nombres para el dominio de la succión.....	52
30 Detalles de mallado e “Inflation” para el dominio de la succión.....	53
31 Mallado en dominio de la succión.....	54
32 Selección de nombres para el dominio de la voluta.....	55
33 Detalles de mallado e “Inflation” para el dominio de la voluta.....	55
34 Mallado en dominio de la voluta.....	56
35 Selección de nombres para el dominio del impulsor.....	57
36 Detalles de “mesh” y “refinement” para el dominio del impulsor.....	57

37	Mallado del dominio del impulsor.....	58
38	Exportacion de dominios a CFX. (a) Update de mallado. (b) Inicio de Setup.....	59
39	Dominios creados en Setup.....	60
40	Configuraciones básicas de cada dominio.....	61
41	Configuraciones básicas de cada dominio. (a) Rotativo, (c) y (b) estacionarios.....	61
42	Configuración de los modelos matemáticos.....	62
43	Configuración de las interfaces. (a) Impulsor-voluta. (b)Succión-impulsor.....	64
44	Ubicación de interfaces, vista posterior.....	65
45	Configuración de periodicidades rotacionales. (a) Dominio de succión. (b) Dominio del impulsor.....	66
46	Periodicidades rotacionales. (a) Dominio de succión. (b) Dominio de impulsor.....	67
47	Condiciones de borde de los dominios estacionarios. (a) Dominio voluta. (b)Dominio succión.....	68
48	Condición de borde de entrada.....	69
49	Condición de borde de salida.....	70
50	Condición de borde en el impulsor.....	70
51	Configuración de los criterios de convergencia.....	72
52	Interfaz de CFX Solve.....	73
53	Criterios de convergencia configurados.....	78
54	Contorno de presión en el desarrollo de la voluta. (a) 6.6390 m3/s (b) 5.3942 m3/s (c) 4.3844 m3/s (d) 3.7212 m3/s (e) 3.0336 m3/s.....	95
55	Contorno de presión en el alabe. (a) 6.6390 m3/s (b) 5.3942 m3/s (c) 4.3844 m3/s (d) 3.7212 m3/s (e) 3.0336m3/s.....	96
56	Contorno de presión en durante el desarrollo de la succión. (a) 6.6390 m3/s (b) 5.3942 m3/s (c) 4.3844 m3/s (d) 3.7212 m3/s (e) 3.0336 m3/s...	97
57	Figura 57. Vectores de velocidad durante el desarrollo del paso de la voluta. (a) 6.6390 m3/s (b) 5.3942 m3/s (c) 4.3844 m3/s (d) 3.7212 m3/s (e) 3.0336 m3/s.....	99
58	Contorno de velocidad durante el desarrollo del paso de la voluta (a) 6.6390 m3/s (b) 5.3942 m3/s (c) 4.3844 m3/s (d) 3.7212 m3/s (e) 3.0336 m3/s.....	100
59	Vector de velocidad durante en el impulsor (a) 6.6390 m3/s (b) 5.3942 m3/s (c) 4.3844 m3/s (d) 3.7212 m3/s (e) 3.0336 m3/s.....	101
60	Figura 60. Vector de velocidad durante la succión. (a) 6.6390 m3/s (b) 5.3942 m3/s (c) 4.3844 m3/s (d) 3.7212 m3/s (e) 3.0336 m3/s.....	102
61	Figura 61. Contorno de velocidad durante de la lengüeta (a) 6.6390 m3/s (b) 5.3942 m3/s (c) 4.3844 m3/s (d) 3.7212 m3/s (e) 3.0336 m3/s.....	103
62	Vector de velocidad durante de la lengüeta. (a) 6.6390 m3/s (b) 5.3942 m3/s (c) 4.3844 m3/s (d) 3.7212 m3/s (e) 3.0336 m3/s.....	104



**REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**SIMULACIÓN DEL CAMPO DE FLUJO EN UN TURBOVENTILADOR
UTILIZANDO UNA HERRAMIENTA DE DINÁMICA DE FLUIDOS
COMPUTACIONAL**

Autores: Franco Cimmarusti Gómez, María Fernanda Decán Vincentelli.

Tutor: Gruber A. Caraballo V.

Fecha: Mayo de 2019

RESUMEN INFORMATIVO

En el trabajo de grado que presentan los autores con el título de **“Simulación del campo de flujo en un turboventilador utilizando una herramienta de dinámica de fluidos computacional”** tiene como objetivo general representar el campo de flujo en un turboventilador utilizando una herramienta de dinámica de fluidos computacional, conocida como CFD. Metodológicamente, es una investigación de tipo exploratoria en la que se desarrolla una simulación para observar el comportamiento del flujo que circula a través del equipo escogido, siendo este un turboventilador centrífugo de álabes rectos inclinados hacia atrás, perteneciente a la familia “SQB” de la marca “Chicago Blowers”. La investigación comprende el estudio de un número definido de caudales a una misma velocidad de rotación, valores otorgados por el fabricante, con estos se realizó una comparación de los resultados obtenidos de la curva característica y la potencia útil. Las simulaciones realizadas en ANSYS®WORKBENCH permitieron observar que mientras los caudales de trabajo disminuyen la diferencia de presiones, en la entrada del flujo y la salida del mismo, va en aumento, es por este motivo que los turboventiladores centrífugos tendrán una mejor eficiencia cuando se encuentren trabajando con un caudal igual o menor a 5.3942 .

Descriptor: turboventilador, mecánica de fluidos, simulación, Dinámica de Fluidos Computacional (CFD)

INTRODUCCIÓN

Los ventiladores poseen un número de diversas aplicaciones tanto en el ámbito residencial y comercial como en el ámbito industrial, estos son capaces de transmitir la energía necesaria para la generación de una presión que mantenga el flujo de un aire o de un gas en específico. Algunas de las aplicaciones posibles para esta turbomáquina comprenden: la extracción de gases de escape, refrigeración de máquinas, calefacción, ventilación de ambientes, aire acondicionado, introducción o extracción de gases en reactores, entre otros.

Los distintos procesos industriales en los que se pueda emplear esta máquina requiere condiciones de operación severas, estas pueden ser altas presiones y temperaturas, manipulación de partículas de diferentes tamaños, trabajar con gases corrosivos o explosivos; Es por ello que es fundamental conocer las condiciones de trabajo que se pueden presentar para que al momento de realizar el diseño, previo a la fabricación, se tome en cuenta la importancia de la eficiencia de operación del mismo. Para la manufactura de ventiladores, así como otras máquinas, se deben realizar estudios y comprobaciones de su comportamiento por medio de plataformas experimentales, también conocidas como bancos de prueba.

En la actualidad existen herramientas que permiten simular estas condiciones de trabajo, lo que constituye una opción viable a nivel académico para conocer las posibilidades de aplicación que tendrá un diseño en particular a un costo considerable, si es comparado con su equivalente que sería un banco de pruebas. Estas simulaciones permiten realizar modelaciones virtuales del objeto en estudio por medio de las características físicas elegidas por los usuarios, el sistema realiza las evaluaciones de cómo reacciona el objetos a las condiciones especificadas, mostrando como resultado información acerca del comportamiento tanto del objeto como del flujo que interactúa con él. El propósito de este proyecto de investigación es aplicar una herramienta de dinámica de fluido computacional, CFD, para la realización de la simulación de un turboventilador real. Este será recreado a través de un software de

diseño asistido por computadora, CAD, para que posteriormente este sea sometido a un campo de flujo mediante la técnica CFD con el fin de visualizar el comportamiento que tendrá el flujo a través del turboventilador escogido. La investigación es desarrollada y dividida en cuatro capítulos, presentados de la siguiente manera:

En el Capítulo I se puede visualizar el planteamiento del problema donde se definen las posibles causas que lo producen, de esta manera se podrá llegar más fácilmente a las soluciones posibles. Seguidamente se describen los objetivos de la investigación, de manera que al cumplir estos se logre, consecuentemente, cumplir también el objetivo general. Luego se expresa la justificación del trabajo, por último se explican las limitaciones y el alcance que tendrá el proyecto.

El Capítulo II es la sección del trabajo en la que se presentan los antecedentes escogidos, explicando de qué manera estos proveen un sustento para la investigación, además se encuentran aquellas definiciones teóricas y conocimientos necesarios para la comprensión y elaboración del estudio.

En el Capítulo III se indica todo lo que comprende al marco metodológico, describiendo el enfoque que se le dará a la investigación, el tipo de investigación, diseño de la investigación, población y muestra, las técnicas y herramienta para la recolección de datos, y las fases con la cual se quieren conseguir el desarrollo de la investigación, estas son las etapas del desarrollo que conforman el crecimiento y desenvolvimiento del estudio.

En el Capítulo IV se presentan todos los resultados al desarrollar cada uno de los objetivos específicos de la investigación. Conclusiones y recomendaciones.

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA

1.1 Planteamiento del problema

En la historia, el ser humano se ha visto en la necesidad de usar ciertas herramientas para facilitar el proceso de la realización de tareas cotidianas. El uso del molino, que data desde el siglo VII, también las poleas, fueron elementos que mejoraron las condiciones de trabajo en ese entonces. Para aumentar la eficacia y la facilidad de producción el ser humano continuó evolucionando la maquinaria según la demanda, lo que abrió paso a nuevas aplicaciones y de esta manera dio lugar al inicio de un campo de estudio que continua avanzando con el transcurso de los años.

Se puede observar que las primeras máquinas hidráulicas, en su gran mayoría hechas de madera, se construyeron mediante tanteos empíricos, debido a la carencia de información y poco dominio de la teoría existente en aquellos años. La evolución de las turbomáquinas ha sido el resultado de innumerables pequeñas mejoras realizadas con el fin de aprovechar al máximo la energía que interactúa entre el elemento de máquina y el fluido, siendo el principal objetivo el de reducir los costos de producción sin comprometer la calidad del producto a fabricar. Un esfuerzo sistemático ha sido realizado desde aproximadamente la segunda mitad del siglo pasado por las grandes casas constructoras del mundo.

Los ventiladores son las máquinas más usadas para producir el movimiento de diversos fluidos en las industrias manufactureras, petroleras y distintos tipos de planta. Para su selección o fabricación se toma en cuenta muchas variables, se debe asegurar que satisfaga requisitos como el caudal y la presión con que debe circular el fluido. También es importante tener claro datos como pueden ser dimensiones del elemento, ángulos de ataque de los álabes, potencia y cualquier información que ayude con la investigación para así garantizar la mayor eficiencia y un trabajo óptimo

del dispositivo. Inicialmente, para conocer el comportamiento del equipo se realiza un banco de prueba en el que se experimenta con distintas variables, para así tener un historial de las posibles condiciones de trabajo a las que este se pueda someter, y también analizar qué tan eficiente será el dispositivo. Por lo general, este método requiere una alta inversión y, también, se toman grandes riesgos, suponiendo que existan fallas que puedan ser perjudiciales tanto para el equipo como para el operador al momento de realizar la prueba.

En la actualidad se cuenta con una gran variedad de análisis matemáticos complejos que pueden ser aplicados para el estudio del flujo y sus efectos, por ello en el campo académico se está implementando una técnica que es la simulación Dinámica de Fluidos Computacional (CFD, Computational Fluid Dynamics), la cual presenta la ventaja de realizar simulaciones en 2D y 3D.

CFD es la herramienta de modelado numérico que permite resolver y analizar el comportamiento de los fenómenos de transporte de un fluido, a través de la resolución de las ecuaciones Navier-Stokes, contando también con los balances de masa y energía, y de ser necesario, agregando un modelo de turbulencia. Hechas las consideraciones anteriores las ventajas que presenta este software lo convierten en un objeto altamente útil en diversos ámbitos de la industria por lo cual es conveniente conocer y saber manejar la simulación Dinámica de Fluidos Computacional.

El uso de este programa resalta el análisis del flujo y el funcionamiento del turboventilador, donde estos datos se pueden utilizar para entender el comportamiento en distintas condiciones, lo que es esencial para disminuir las pérdidas y así conseguir la mayor eficiencia del equipo. En comparación con el método de ensayo y error aplicado en la industria, esta herramienta otorga un amplio margen de información en las pruebas realizadas, esto se logra en un tiempo menor y con menos recursos económicos, otorgando una buena viabilidad financiera y sin correr riesgos mayores, por lo tanto, este será el método por el cual se plantea realizar la simulación del comportamiento del flujo en un turboventilador.

1.2 Formulación del problema:

¿Cómo se podría describir la interacción entre las variables y su efecto sobre la estructura de un turboventilador?

1.3 Objetivos de la investigación

1.3.1 Objetivo general

Representar el campo de flujo en un turboventilador utilizando una herramienta de dinámica de fluidos computacional.

1.3.2 Objetivos específicos

1. Investigar acerca de las variables que intervienen en el comportamiento del campo de flujo a través de un turboventilador.
2. Seleccionar un turboventilador real e identificar sus características geométricas con la finalidad de modelarlo mediante una herramienta (CAD)
3. Simular el campo de flujo mediante una herramienta de dinámica de fluidos computacional (CFD).
4. Obtener los resultados en forma de datos, gráficos o videos para su análisis mediante una herramienta computacional de procedimiento matemático.

1.4 Justificación

El desarrollo de la tecnología ha tenido un impacto significativo en la manera en la que se resuelven los problemas de la sociedad en diferentes ámbitos, en el caso de la ingeniería, la aplicación de estas tecnologías agilizan y optimizan ciertas tareas que en el pasado hubiesen presentado una gran dificultad en su resolución, o hasta podrían haber representado un problema sin resolver. En la actualidad la ingeniería sigue aprovechando los beneficios de los avances tecnológicos para continuar con el desarrollo de nuevas herramientas que faciliten los estudios.

Como ejemplo de lo anterior explicado, uno de los instrumentos utilizados es el análisis de la dinámica de fluidos computacional o CFD (Computational fluid dynamics) el cual se está convirtiendo en un prerrequisito para el diseño, prueba y la optimización práctica de sistemas en ingeniería. Esta herramienta permite elaborar un

laboratorio virtual para visualizar el flujo hidráulico en cualquier turbina dando la oportunidad de estudiarlo detalladamente además de modelar el diseño y predecir el rendimiento del sistema, con esto queda demostrada la influencia que tiene la tecnología.

Por lo tanto, es conveniente utilizar estos métodos para la investigación del comportamiento del campo de flujo a través de un turboventilador, donde los resultados obtenidos en forma de datos, gráficos o videos podrán ser analizados mediante una herramienta computacional de procedimiento matemático y así ser comparados con los parámetros de trabajo requeridos. De igual manera, es significativo señalar que desde un punto de vista económico beneficiaria mucho al proyecto, ya que, al usar este método de simulación prácticamente se eliminaría la construcción por ensayo y error del dispositivo, lo cual disminuye costos, factor que siempre debe estar presente, además de no poner en riesgo la productividad del sistema. Por otra parte, el banco de prueba es una etapa que no puede ser descartada del todo, de esta manera es que se asegura la excelencia de trabajo de la maquina a diseñar.

1.5 Limitaciones

Se estima que la presente investigación posee las siguientes limitantes:

En el pensum de estudio no presenta una asignatura enfocada en el estudio computacional de la dinámica de fluidos, lo que podría dificultar el manejo del software para la resolución de los modelos matemáticos adecuados.

Es indispensable el uso de computadoras con características específicas que cumplan con el rendimiento necesario. Para obtener buenos resultados se necesita realizar un modelado geométrico de gran exactitud y mallados de alta calidad, entonces, hay que considerar que mientras mayor sea el número de puntos de esta malla mayor será la precisión y realismo de la simulación y

más difícil de generar y resolver. En casos con geometría compleja, esta fase puede ocupar días e incluso semanas.

No contar con el elemento de máquina, lo que impide la comprobación de la investigación en distintas condiciones de trabajos.

1.6 Alcance:

Este trabajo de investigación comprenderá la simulación de aquellas variables que influyan o intervengan en el comportamiento del campo de flujo a través de un turboventilador. Con el fin de lograr definir qué tan eficiente será el turboventilador realizando una tarea en específica, se simulara bajo distintos caudales, comparando también los resultados obtenidos con los parámetros de trabajo reales que tiene el equipo según el fabricante. Cabe destacar que se trabajara exclusivamente con el campo de flujo del elemento, no se harán consideraciones sobre el diseño ni las dimensiones del equipo a simular.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

El marco teórico consiste en el desarrollo de la teoría que representa una explicación teórica para poder comprender la naturaleza del hecho investigado, en otras palabras, sustentar teóricamente el estudio. Constituye un aspecto de bastante importancia dentro de la investigación. El investigador debe realizar y exponer aquellos enfoques teóricos y conclusiones de investigaciones que son consideradas válidas para que encuadre con el problema en cuestión.

2.1 Antecedentes

Tamayo (2012) afirma que “Todo hecho anterior a la formulación del problema que sirve para aclarar, juzgar e interpretar el problema planteado constituye los antecedentes del problema” (p.149). Entonces, con el conocimiento obtenido de investigaciones anteriores se logra identificar aquellas interrogantes que ya tienen respuesta, para aprovechar la información existente y así esta no será replicada. Sabiendo que las investigaciones en el análisis numérico y en el desarrollo de modelos computacionales para el estudio de la dinámica de fluidos son de data reciente, lo que se traduce en un número limitado de estudios realizados hasta ahora, podemos rescatar las siguientes investigaciones:

Suresh, P y Awash, T (2014) en la Universidad Hawassa, Etiopia, publicaron su trabajo de investigación titulado “**Análisis mediante CFD en la cascada lineal de alabes de una turbina**” donde se realizó el estudio computacional del efecto causado por la presión, la velocidad, la temperatura, entre otros, en flujos que se mueven a través de una cascada lineal de álabes, siendo el propósito fundamental la investigación de las características del flujo y la transferencia de calor existente alrededor de los álabes.

Para realizar esto, el proceso comenzó con la selección de la geometría y de las condiciones del flujo a estudiar, definiendo específicamente cuales son los resultados que se desean analizar. Una vez la geometría fue especificada, el perfil de alabe, se representó el dominio del flujo en una cuadrilla computacional, tarea en la que se utilizó la plataforma ANSYS® Workbench, donde se estudia un fragmento de la cascada considerando las dimensiones y los parámetros básicos en el diseño del ángulo de entrada del flujo. Seguidamente se aplicó una investigación numérica en el flujo de la cascada usando ANSYS® CFX, estos resultados arrojaron las características del campo de flujo en detalle, como la velocidad, presión, diseño del ángulo de entrada, entre otros, y esta información fue luego utilizada para explicar la física del flujo.

Una vez finalizado el estudio, Suresh, P Concluyó que manteniendo la presión de entrada y utilizando diferentes temperaturas totales se observan variaciones en los resultados, demostrado en los contornos del campo de flujo. Este fue examinado mediante los contornos de velocidad, presión, vectores de velocidad y líneas de corriente. En general, el desarrollo del modelo CFD proporcionó un entendimiento útil del flujo dentro de una turbina, haciendo de este método una base para trabajos futuros en los que se considere el flujo en una turbina.

Esta investigación nos demuestra que el software utilizado ANSYS® Workbench es ideal para conocer y estudiar las características del campo de flujo en una turbomáquina, y los efectos que tienen cada una de ellas en su comportamiento. Siendo este el programa a utilizar en nuestra investigación, este material es de gran relevancia para el entendimiento de la interfaz del software y conocer los diferentes estudios que esta plataforma permite realizar.

Así mismo, Pathak, Y, Baloni, B y Channiwala, S (2012) publicaron una investigación titulada **“Simulación numérica de un ventilador centrífugo mediante CFX”** en el Diario Internacional de Electrónica, Comunicación, Ciencia Computacional e Ingeniería (IJECSCE, por sus siglas en ingles). En donde se

realizó el estudio con diferentes coeficientes de flujo con el propósito de analizar el funcionamiento del ventilador.

En esta investigación la geometría se construyó mediante ANSYS® CFX Workbench. La geometría del rodete fue creada utilizando el método punto por punto. Se creó también el ducto de entrada y el difusor, para ser ensamblado junto con el rodete. Una vez elaborado el modelo, se hace el mallado en el mismo CFX. El análisis fue llevado a cabo mediante el empleo de las ecuaciones tridimensionales de Navier-Stokes, también se utilizó el modelo de turbulencia estándar kappa-épsilon ($k-\epsilon$) y como resolución de las ecuaciones empleadas se trabajó con un mallado no estructurado.

Luego de definir las condiciones límites en la entrada y en la salida, se prosigue con la simulación de cuatro distintos casos, donde los coeficientes de flujo iban desde 0,4 hasta 0,15. Luego, se repite este proceso manteniendo las condiciones de entrada pero modificando las condiciones de salida. De esta forma, los autores observan que a medida que el coeficiente de flujo disminuye, la presión aumenta, y con esto, también el coeficiente de presión. Los pasos seguidos en esta investigación constituyen una guía importante a seguir para la elaboración de nuestro proyecto de investigación. De la misma forma, esta publicación contiene información funcional que podrá ser aprovechada.

Por otra parte, Kallin, D y Nodensjöld, K (2017) en la Universidad tecnológica Chalmers desarrollaron su proyecto “**Análisis de la interacción fluido-estructura en un ventilador centrífugo**” donde se realizaron estudios con el fin de saber si es posible la mejora del análisis de fatiga en ventiladores centrífugos al incorporar las interacciones existentes entre el fluido y la estructura del mismo, esto mediante la aplicación de un método numérico que permitiría observar cómo se da esta interacción. En su investigación mencionan como el método actual utilizado para la evaluación de fatiga toma en cuenta solamente las cargas centrífugas debidas a la inercia del ventilador, lo propuesto por dichos autores fue la incorporación de la carga

de presión ejercida por el fluido en la estructura, con el propósito de observar si esta tiene un impacto en la vida útil del ventilador.

El proceso utilizado en esta investigación fue netamente numérico y se realizó por medio de la plataforma ANSYS® Workbench, el campo de flujo fue simulado mediante ANSYS®Fluent y el campo estructural a través de ANSYS® Mechanical. La interacción entre estos campos fue tratada por un método de acoplamiento unidireccional, en donde la transferencia existente entre estos campos es exclusivamente desde el fluido hacia la estructura, con la excepción de aquellos fragmentos estructurales que fueran desplazados resultando en cargas centrífugas transferidas hacia el dominio del flujo. Finalmente, el estudio concluyó que la interacción entre el fluido y la estructura tiene un impacto insignificante ante la vida del ventilador estudiado, con respecto a la fatiga. Junto con estas conclusiones, se explica que unas de las debilidades principales de esta investigación es la escasa data disponible para poder verificar los resultados obtenidos, en el proceso de moldeado y simulado se realizaron un número de simplificaciones que, potencialmente, podrían haber alterado los resultados. Sin embargo, expresan que al requerirse un aumento drástico en la amplitud de la tensión para influir en el límite de la fatiga es probable que la exclusión de carga de fluidos en el análisis de fatiga no afecte la vida estimada considerablemente.

La investigación por parte de Kallin, D está principalmente enfocada en evaluar si las cargas causadas por fluctuaciones aerodinámicas son de importancia cuando se realizan pruebas o estimaciones de límite de fatiga en las soldaduras de un ventilador, esto utilizando el método de interacción fluido-estructura FSI (Fluid-Structure Interaction) y dicho método no es de nuestro interés, sin embargo, para lograr sus objetivos fue también necesaria la simulación del fluido mediante CFD, es aquí donde se podrá apoyar nuestra investigación, analizando los resultados obtenidos y las implicaciones que tienen estos.

Finalmente, García, A (2015) en la Universidad Politécnica de Catalunya realizo su investigación de grado **“Estudio CFD del flujo turbulento alrededor de álabes de turbomáquinas con modelo TRANS SST”** en donde se llevó a cabo la calibración del modelo de turbulencia TRANS SST con la utilización de métodos basados en la simulación de fluidos computacional en un perfil hidrodinámico.

La técnica utilizada en este proyecto fue la de volúmenes de control, la cual se dividió en tres partes. La primera operación realizada fue la división en volúmenes de control discretos mediante la aplicación de una malla computacional, luego se integraron las ecuaciones en estos volúmenes de control con el fin de crear una ecuación algebraica con las variables que más tarde serian modificadas. Y finalmente, la solución de las ecuaciones se realizó mediante un proceso repetitivo.

Para cada simulación se modificó porcentualmente las variables de las ecuaciones para observar el grado de error existente con respecto a los valores registrados experimentalmente, este proceso se repitió con las variables que arrojaron menor error para lograr una calibración óptima. Este último proceso permitió comprobar que la dinámica de fluidos computacional es una herramienta útil para simular el comportamiento de un fluido y estudiar sus parámetros, ya que los resultados fueron satisfactoriamente comparados con los resultados experimentales publicados por el laboratorio de máquinas hidráulicas de la escuela politécnica de Lausane, los cuales servían como referencia. Este proceso repetitivo para observarlas variaciones con respecto a resultados ya registrados resulta atractiva para nuestra investigación.

2.2 Bases teóricas

2.2.1 Ventiladores

Los ventiladores se definen como turbomáquinas hidráulicas que trabajan con un fluido gaseoso. Son máquinas rotativas que se encargan de adicionar energía desde un punto de partida, o estado inicial, con menos energía, hasta un estado final, con mayor energía, esto con el fin de generar la presión necesaria para mantener un flujo continuo de aire o gas.

Un ventilador consta en esencia de un motor de accionamiento, que generalmente es eléctrico pero puede ser también térmico o de otro tipo, que aporta la energía mecánica que será absorbida por el eje de la turbomáquina para ser restituida al fluido en forma de velocidad o presión.

Las aplicaciones de los ventiladores van desde el acondicionamiento de ambientes, en el ámbito industrial y comercial, hasta la extracción de gases nocivos en zonas de atmosfera controlada, o reacciones químicas, así como también en la transportación y recirculación de gases en general.

2.2.2 Ventiladores centrífugos

Los ventiladores centrífugos son muy conocidos por cambiar la trayectoria del flujo a un ángulo de 90° , con esto se puede decir que el trayecto a seguir por el fluido tiene la misma dirección del eje del rodete a la entrada y, cumpliendo con el cambio de dirección, perpendicular al eje del rodete en la salida.

El rodete, también conocido como rotor o rueda, desarrolla su trabajo en el interior de una carcasa, la cual es una estructura metálica fabricada con placas de acero reforzados con acero estructural, y esta cumple dos funciones:

Dirigir el flujo de gas hacia la boca de entrada al rotor de manera controlada.

Dirigir el flujo de gas que es centrifugado hacia el exterior del rodete hacia la descarga del ventilador, también de manera controlada.

Es importante señalar que en un ventilador centrífugo se puede encontrar diferentes diseños de aspas o álabes, esto dependerá de variables como el volumen del fluido, presión, temperatura del fluido, así como del contenido de polvo que pasará a través del ventilador, entre otros aspectos.

Los tres tipos básicos de rodetes son: centrífugos con rodete de pala radial, centrífugos con rodete de alabe curvados hacia adelante, y centrífugos con rodete de alabe curvados hacia atrás.

2.2.2.1 Centrífugos con rodete de pala radial

En estos ventiladores centrífugos las palas del rodete son rectas y alineadas según un radio y dada su configuración son del tipo menos usado debido a su bajo rendimiento, sin embargo, la disposición radial de los álabes evita la acumulación de materiales sobre los mismo permitiendo que este sea utilizado en instalaciones de extracción localizada donde el aire contaminado con partículas deba circular a través del ventilador. (ver figura 1)

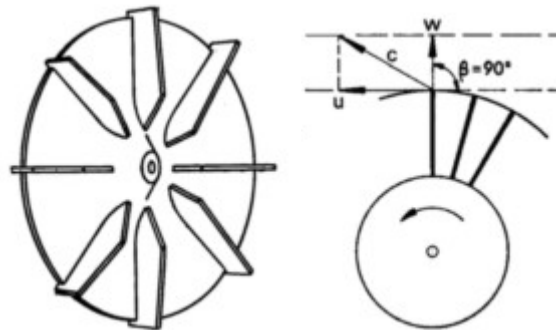


Figura 1. Rodete de pala radial.

Fuente: Fernández Diez (2019)

2.2.2.2 Centrífugos con rodete de álabes curvados hacia adelante (forward)

Los ventiladores de álabes curvados hacia adelante también llamados de jaula de ardilla por su diseño que consiste en muchos álabes de pequeña dimensión en cuestión de anchura se caracteriza por su curvatura que va en el mismo sentido de giro del rodete, son los que entregan más caudal y menos presión, también se puede decir que su eficiencia en términos de consumo energéticos no es muy buena, por otra parte son muy pequeños ocupando poco espacio y su velocidad periférica es baja por lo que no generan tanto ruido característica favorable ya que es tolerado por el oído humano. (ver figura 2)

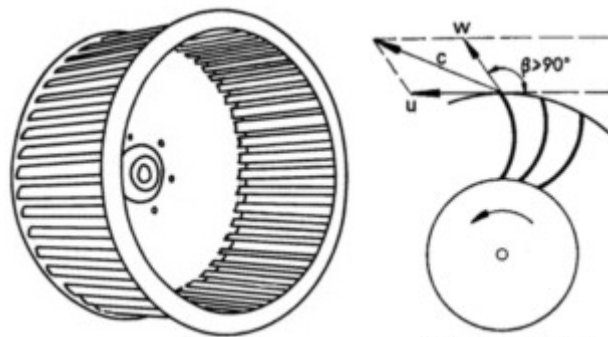


Figura 2. Rodete de álabes curvados hacia adelante.

Fuente: Fernández Diez (2019)

2.2.2.3 Centrífugos con rodete de álabe curvados hacia atrás (backward)

Los ventiladores centrífugos de álabes curvados hacia atrás tienen un rodete con los álabes inclinados en sentido contrario al de rotación. Este tipo de ventilador es el de mayor velocidad periférica y mayor rendimiento con un nivel sonoro relativamente bajo.

Este tipo de ventilador centrífugo, es uno de lo más usado, tanto que se puede decir que prácticamente es el único tipo de ventilador que se usa en potencias grandes dada la alta eficiencia que llegan a conseguir, además de su característica favorable que son auto limpiantes algo similar a los de pala recta, por lo que cuando el aire no es demasiado limpio, no se acumula suciedad en las palas, algo que sí suele ocurrir con los de álabe adelantado (ver figura 3)

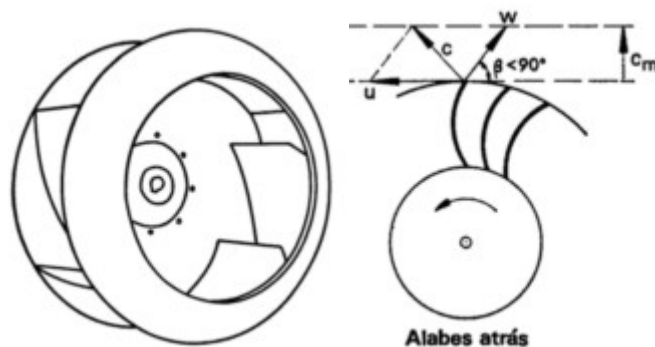


Figura 3. Rodete de álabes curvados hacia atrás.

Fuente: Fernández Diez (2019)

2.2.3 Admisión en ventiladores

En la figura 4 se muestra las formas más corrientes de la admisión de los ventiladores. La construcción correspondiente a la figura 4.a es la más sencilla pero la de peor rendimiento, mientras la construcción figura 4.c con una forma abocinada más aerodinámica permite conseguir una entrada de la corriente en el rodete más uniforme, reduciéndose el choque a un mínimo.

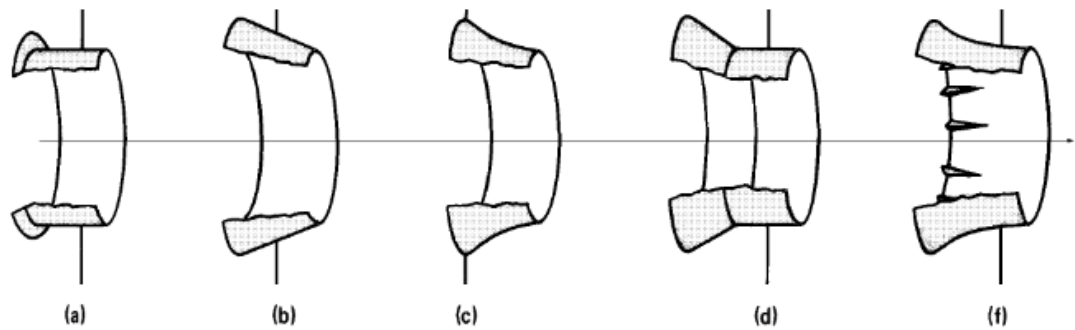


Figura 4. Formas de la admisión de los ventiladores. a) Cilíndrica. b) Cónica. c) Abocinada. d) Compuesta. e) Guiada con álabes directores.

Fuente: Fernández Diez (2019)

2.2.4 Voluta

Como se conoce, los ventiladores centrífugos tienen como característica la trayectoria del fluido paralela al eje del rodete y perpendicular a este en la salida, este aire en la salida con bastante frecuencia es recogido perimetralmente por un dispositivo llamado voluta. Esta caja espiral corresponde a la carcasa del ventilador, donde este gira en el interior.(ver figura 5)

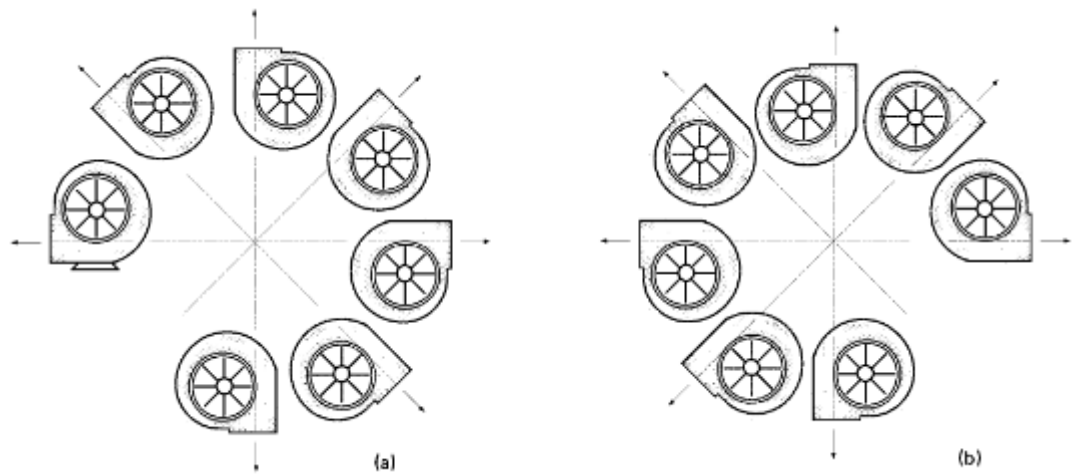


Figura 5. Posiciones de la boca de salida del ventilador. A) derechas. B) izquierdas.
Fuente: Fernández Diez (2019)

La voluta también posee lo que se denomina lengua, esta puede ser larga, corta o no existir, como muestra la figura 6, una lengua excesivamente corta es causa del aumento del ruido en los ventiladores, mientras que una lengua excesivamente larga provoca una disminución del rendimiento. Los ventiladores de alta presión son en esto más sensibles a la variación del rendimiento. También se muestra en la figura 7 las formas corrientes de posicionar el difusor en la salida de la voluta.

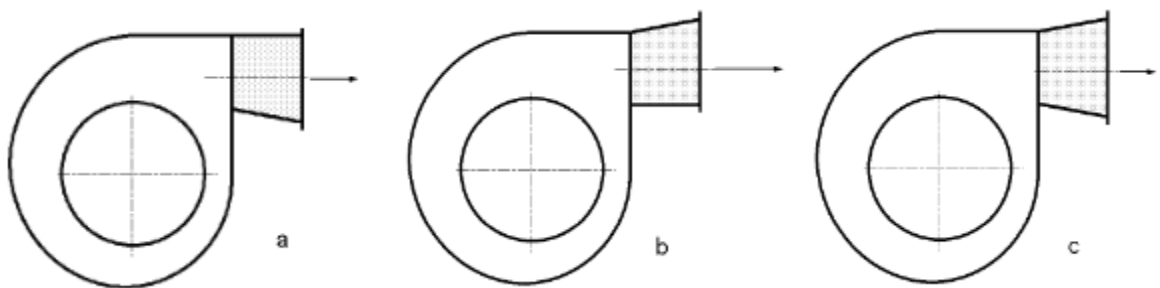


Figura 6. Posiciones del difusor. a) Correcta; b) Incorrecta; c) Difusor simétrico.

Fuente: Fernández Diez (2019)

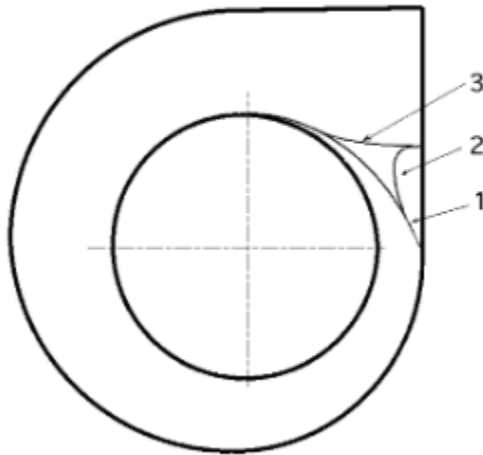


Figura 7. Voluta. 1) sin lengua. 2) con lengua poco pronunciada. 3) con lengua pronunciada.

Fuente: Fernández Diez (2019)

2.2.5 Ecuación de Navier-Stokes

Las ecuaciones de Navier-Stokes ayudan a definir el comportamiento dinámico que tiene un fluido, estas se derivan de aplicar los principios de conservación de la mecánica y de la termodinámica al fluido, es de aquí donde se consigue una formulación integral que se puede transformar en una formulación diferencial más práctica.

Para un fluido newtoniano los esfuerzos viscosos son proporcionales a la derivada de la velocidad y al coeficiente de viscosidad. En el caso de flujo incompresible, las componentes del esfuerzo viscoso para un fluido newtoniano para componentes normales serán:

$$\text{—} \quad (1)$$

$$\text{—} \quad (2)$$

$$\text{---} \tag{3}$$

Para las componentes cortantes serán:

$$\text{---} \quad \text{---} \tag{4}$$

$$\text{---} \quad \text{---} \tag{5}$$

$$\text{---} \quad \text{---} \tag{6}$$

Entonces, utilizando las hipótesis de Stokes, se sustituye estas expresiones en la ecuación diferencial de cantidad de movimiento, se obtienen las denominadas ecuaciones de Navier-Stokes:

$$\text{---} \quad \text{---} \quad \text{---} \quad \text{---} \quad \text{---} \tag{7}$$

$$\text{---} \quad \text{---} \quad \text{---} \quad \text{---} \quad \text{---} \tag{8}$$

$$\text{---} \quad \text{---} \quad \text{---} \quad \text{---} \quad \text{---} \tag{9}$$

Estas representan un sistema de ecuaciones diferenciales no lineales de segundo orden que tienen cuatro incógnitas, u , v , w y θ . Para poder ser resuelto se

necesita una cuarta ecuación que vendría siendo ecuación de continuidad para un flujo incompresible.

2.2.6 Coeficiente de arrastre

Un cuerpo que este inmerso en la corriente de un fluido se verá sometido a fuerzas ejercidas por la resistencia que este aporta, a esta reacción se le llama fuerza de arrastre. Este fenómeno se produce por un roce aerodinámico con la superficie y es conocido como efecto piel, donde las moléculas del aire se mantienen adheridas a la de superficie sólida, una superficie muy suave y encerada produce menos arrastre que una superficie rugosa.

La fuerza de arrastre depende de propiedades del fluido y del tamaño, forma y velocidad del objeto dicha velocidad tiene que ser relativa al fluido, es importante recalcar que si el objeto se desplaza a baja o alta velocidad, la fuerza de arrastre podrá ser lineal o cuadrática por lo tanto la fuerza queda expresada de la siguiente manera:

$$- \quad (10)$$

Dónde:

, se denomina coeficiente de arrastre y es una cantidad adimensional que se usa para cuantificar la resistencia de un objeto.

, corresponde a la densidad del fluido.

, es el área de la sección transversal del objeto y es la velocidad relativa del objeto respecto al fluido.

2.2.7 Sustentación y ángulo de ataque

La sustentación es la fuerza que se genera sobre un cuerpo que se desplaza a través de un fluido, de dirección perpendicular a la de la velocidad de la corriente incidente. La aplicación más conocida es la del ala de un ave o un avión, superficie generada por un perfil alar.

Es importante hacer énfasis en la relación que tiene el ángulo de ataque para poder lograr una sustentación, el ángulo de ataque se define como el ángulo que forman la línea de cuerda de un perfil alar con la dirección del aire incidente. Normalmente, cuando se aumenta el ángulo de ataque se incrementa la sustentación hasta el punto en el que ésta disminuye bruscamente, fenómeno que se conoce con el nombre de entrada en pérdida. Es decir, se produce una reducción de la velocidad aerodinámica. Esto lleva a la conclusión de que la disminución en la velocidad de un avión se efectúa mediante la modificación del ángulo de ataque. Esto se debe a que, por encima del ángulo de ataque crítico, el aire empieza a fluir de forma menos suave sobre la superficie superior de la superficie de sustentación empezando a separarse y causando el descenso del coeficiente de sustentación, entrando en la región de pérdida por lo que el avión se viene abajo. (ver figura 8 y 9)

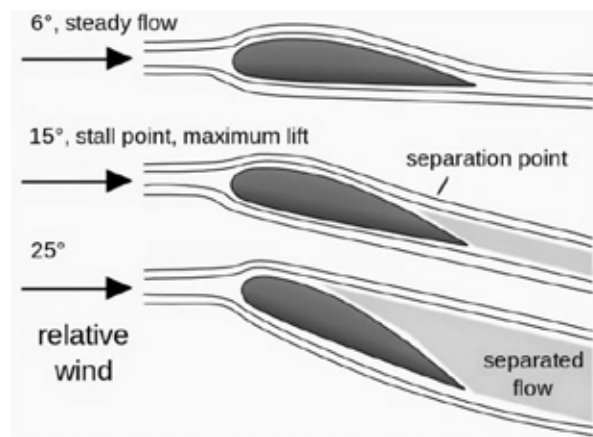


Figura 8. Separación de la superficie superior y la superficie de sustentación.

Fuente: Gudmundsson (2013)

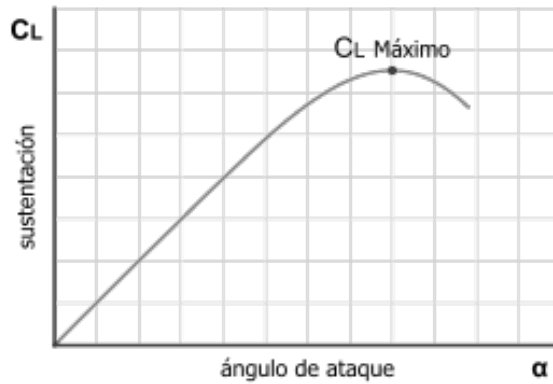


Figura 9. Curva de sustentación

Fuente: Caliver (2011)

2.2.8 Modelo de turbulencia kappa-épsilon (k-ε)

El modelo de turbulencia (k-ε) más comúnmente utilizado en el estudio computacional, este se encarga de simular las características de un flujo que se encuentre en condiciones de régimen turbulento, es un modelo que proporciona una descripción general de la turbulencia por medio de dos ecuaciones diferenciales. La primera variable es la energía cinética de turbulencia, denominada k , y la segunda variable es la velocidad de disipación de la energía de turbulencia, denominada ϵ .

Para la energía cinética de turbulencia tenemos:

$$\frac{dk}{dt} = P - \epsilon + G - D \quad (11)$$

Y para la velocidad de disipación de la energía de turbulencia:

$$\frac{d\epsilon}{dt} = \frac{\epsilon}{k} \left(\frac{dk}{dt} - P \right) + S - D \quad (12)$$

Dónde: u representa el componente de velocidad en la dirección correspondiente, ϵ es el componente de la tasa de deformación, μ es la viscosidad turbulenta, que viene dada por:

$$\mu = \frac{2}{3} \rho k \epsilon \quad (13)$$

El modelo kappa-épsilon tiene algunas constantes que ayudan a garantizar la homogeneidad dimensional, estas son:

2.2.9 Método de volúmenes finitos

Este método fue utilizado por primera vez por Mcdonald para la simulación de un problema 2D no viscoso. El método de volumen finito permite resolver numéricamente y discretizar ecuaciones diferenciales, en un principio fueron aplicadas para la resolución de las ecuaciones de Euler bidimensionales en la formulación no estacionaria. Más adelante se aplicó a flujos en turbomáquinas, donde los primeros trabajos fueron realizados en cascadas y posteriormente en flujos tridimensionales. Actualmente es uno de los métodos más utilizados en el CFD.

El método de volumen finito se basa en el hecho de que un importante número de leyes de física son las leyes de conservación, entonces todo lo que entre en un lado de una celda en particular deberá salir por el lado contrario de dicha celda. A los efectos de esta idea, se considera una malla de discretización del espacio fluido, en cada punto de esta malla se construye un volumen de control los cuales no se sobrepondrán en ninguno de los puntos adyacentes. De esta manera, el volumen total de fluido será el resultante de la suma de todos los volúmenes de control considerados por la malla. Luego, la ecuación diferencial a resolver será integrada sobre cada

volumen de control, lo que entrega como resultado una versión discretizada de la ecuación. Este método implica directamente la resolución de las ecuaciones de Euler, usualmente sigue la hipótesis de flujo adiabático, sin tomar en cuenta la hipótesis de flujo isentrópico.

La principal ventaja que posee este método es que la discretización espacial se lleva a cabo directamente en el espacio físico del problema, y es también bastante flexible ya que puede trabajar con mallas estructuradas y no estructuradas, lo que lo hace ideal y el método más empleado para la resolución de flujos que tienen geometría complejas.

2.2.10 Diseño asistido por computadora (CAD)

El diseño asistido por computadora o Computer-Aided Design, CAD por sus siglas en inglés, es una herramienta muy usada en el área de diseño, mayormente utilizados por arquitectos e ingenieros. Los grandes beneficios que aporta el software CAD han hecho que las mesas de dibujos, escuadras, reglas, lápices, entre otros instrumentos para el diseño, queden a un lado.

Un programa CAD permite modelar piezas, extraer de ellos planos técnicos, realizar renderizados, simulaciones u otro tipo de información necesaria para la producción de la misma. En la actualidad existe una variedad de estos softwares, siendo los más conocidos AutoCAD 2D, AutoCAD 3D y SolidWorks® que para este trabajo investigativo uno de ellos facilitara elaboración del ventilador con el fin de cumplir con la simulación deseada.

2.2.11 Dinámica de fluido computacional (CFD)

Es importante mencionar que el diseño y análisis de sistemas de flujo de fluidos se puede realizar mediante métodos experimentales, así como también mediante la aplicación de la dinámica de fluido computacional. Sabiendo que se denomina discretización a la aproximación de una variable continua en un número finito de puntos, los principales elementos del CFD son:

Discretización del flujo continuo, las variables de campo se aproximan a un número finito de valores llamados nodos.

Las ecuaciones de movimiento también se aproximan en función de los valores en los nodos, se transforman ecuaciones integrales en ecuaciones algebraicas.

Las ecuaciones algebraicas se resuelven y se obtienen los valores de las variables en todos los nodos.

Las aplicaciones que tiene la dinámica de fluidos computacional ha crecido exponencialmente con el paso del tiempo, en la actualidad es empleada en bastantes campos de la ingeniería, como son: la aerodinámica, motores, combustión, ingeniería de procesos, turbomáquinas, hidráulica, entre otros.

Etapas en un análisis de CFD

Al realizar un análisis completo de dinámica de fluido computacional, es necesario cubrir satisfactoriamente las siguientes etapas:

Cálculos previos: en esta etapa se formula el problema, se plantean las ecuaciones de gobierno, es importante establecer las condiciones de contorno y generar una malla de volúmenes finitos. Todo esto dependerá del análisis que se desee realizar, por ejemplo, transferencia de calor, fuerzas,..., y también dependerá de la capacidad que tenga el computador a utilizar.

Solución de ecuaciones: es la etapa principal del CFD, es aquí donde tiene lugar la solución numérica de las ecuaciones que gobiernan el problema.

Análisis de los resultados: estos resultados tienen que ver con la solución de las ecuaciones, corresponden al valor de las variables de campo en cada punto de la malla, dado a la gran cantidad de números estos deben reducirse a los fundamentales para poder ser manejados con facilidad. Una parte importante de esta etapa es la representación gráfica de las variables que rigen el flujo, esto con el fin de tener una visión satisfactoria de los resultados obtenidos. También se recomienda la comparación de estos resultados con otros anteriormente obtenidos mediante análisis de CFD, métodos experimentales, los ya tabulados en normativas, publicaciones científicas, entre otros.

Discretización espacial

El primer paso para la aplicación de la dinámica de fluidos computacional consiste en la discretización espacial del dominio para luego calcular en ella la aproximación numérica de los flujos convectivos y difusivos. Existen muchos métodos para lograr la discretización del problema, principalmente estas se pueden clasificar en tres categorías: diferencias finitas, volúmenes finitos y elementos finitos. Cada uno de ellos requiere una discretización espacial previamente para conseguir la discretización de las ecuaciones que gobiernan el fluido.

Mallas estructuradas

Cada punto de la malla está identificado con los índices i, j, k en coordenadas cartesianas. Cuando se trabaja en 2D, las celdas de la malla están constituidas por cuadriláteros, mientras que al trabajar en 3D son hexaedros. Estas pueden ser representadas en un sistema cartesiano, donde las líneas que configuran las celdas son siempre paralelas al sistema de ejes coordenados, o curvilíneo, donde el sistema de coordenadas es deformado para adaptarse a la geometría del objeto de estudio. Por otro lado, también pueden clasificarse en mallas ortogonales, que son aquellas en las que todas las líneas que la configuran se cortan entre sí con un ángulo de 90° , y en mallas no ortogonales.

Existe también una metodología denominada “Técnica de la quimera”, la idea de esta es generar mallas separadas alrededor de cada una de las entidades geométricas del dominio. Después, las mallas se combinan de forma que se produzcan solapes de elementos, lo más importante es la transferencia precisa de las cantidades entre las diferentes mallas y la región donde se produce el solape. Esta técnica permite generar mallas para problemas particulares sin tener que generar mallas particulares, independientes unas de otras. Por otro lado, el uso de esta técnica no satisface la conservación de las propiedades de las ecuaciones de gobierno del fluido en las zonas donde existe el solape de mallas.

En términos generales, la ventaja que tienen los mallados estructurados radica en la ordenación de los elementos en memoria, pues así el acceso a celdas vecinas resulta rápido y fácil. (ver figura 10)

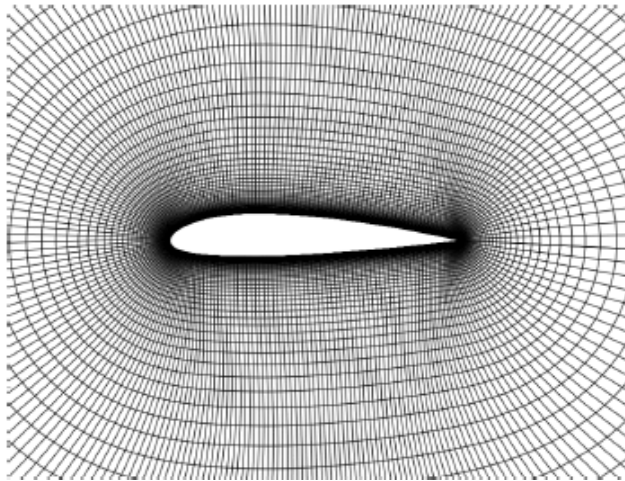


Figura 10. Malla estructurada de manera oblicua y ortogonal

Fuente: González (2017)

Mallas no estructuradas

Los nodos y celdas no tienen un orden particular, es decir, no se pueden identificar directamente por los índices. En este caso, los elementos de la malla son una mezcla de cuadriláteros y triángulos en 2D, y tetraedros y hexaedros en 3D.

Este tipo de malla ofrece una gran flexibilidad cuando se trata de trabajos con geometrías complejas. La ventaja que brindan los mallados no estructurados es que los triángulos (2D) y tetraedros (3D) se pueden generar automáticamente, independientemente de la complejidad del dominio. Con el objetivo de obtener una malla de buena calidad, es necesario determinar unos parámetros adecuados. También, el tiempo requerido por una computadora para generar un mallado no estructurado es significativamente menor que el requerido para una malla estructurada, sin embargo, el espacio que ocupa en la memoria del equipo utilizado es mayor. . (ver figura 11)

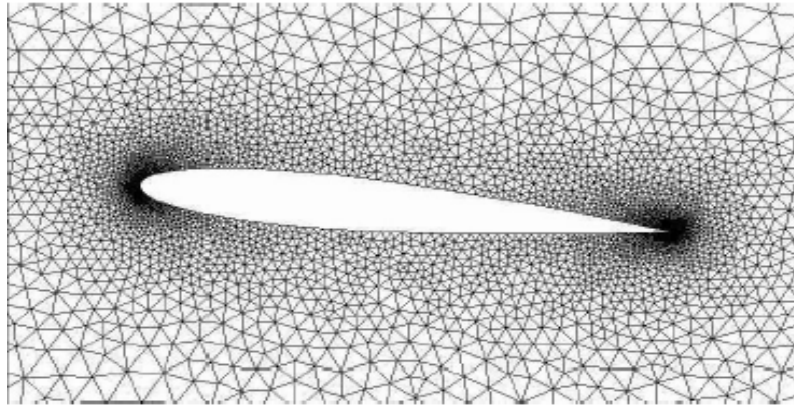


Figura 11. Malla no estructurada.

Fuente: González (2017)

Malla híbrida

Una malla híbrida es una malla que contiene porciones estructuradas y porciones no estructuradas. Se debe tener en cuenta que esta definición requiere el conocimiento de cómo se almacena la malla y como es utilizada. El término “mixto” se aplica generalmente a mallas que contienen elementos asociados con mallas estructuradas y elementos asociados con mallas no estructuradas presumiblemente almacenadas de manera no estructurada. . (ver figura 12)

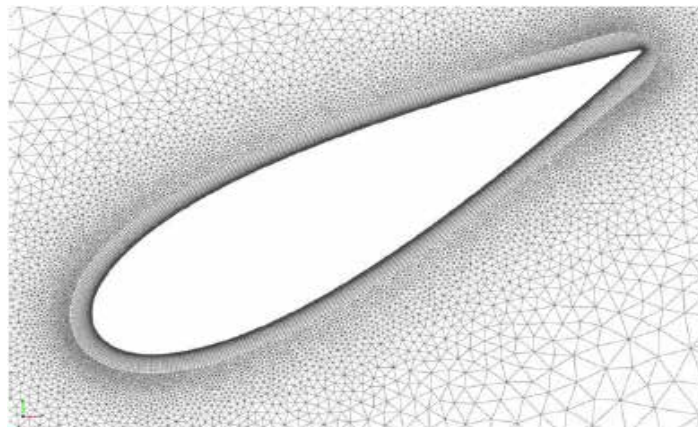


Figura 12. Malla híbrida.

Fuente: González (2017)

Criterios de calidad de mallas

Cuando se desea discretizar una geometría se tiene que definir la malla, la cual siempre podrá mejorarse ya que no existe una solución absoluta. La malla es el grado de aproximación que tiene nuestro modelo con la realidad de manera que cuanto más densa sea esta el error será menor. Existen múltiples factores para definir una buena calidad de malla. La densidad y distribución de los nodos, suavidad, esquinamiento, relación de aspecto y entre otros, son algunas propiedades que definen la calidad teniendo un importante papel en la estabilidad y exactitud de los cálculos numéricos.

Es importante que una geometría compleja tridimensional se tenga que predecir la localización de las zonas críticas especialmente donde ocurra cambios importantes de flujo con el fin de definir una malla lo suficientemente refinada ya que, el grado de exactitud con el cual se resuelven las zonas más complejas dependerá de la densidad y distribución de nodos de la malla en dicha zona.

Relación de aspecto: De una forma geométrica es una relación de sus tamaños en diferentes dimensiones. Por ejemplo, la relación de aspecto de un rectángulo es la relación de su lado más largo a su lado más corto, la relación entre dimensiones no debe ser muy desproporcional cuando se trata de mallar una geometría, es decir esta relación debe ser lo más próximo a uno. (ver figura 13)

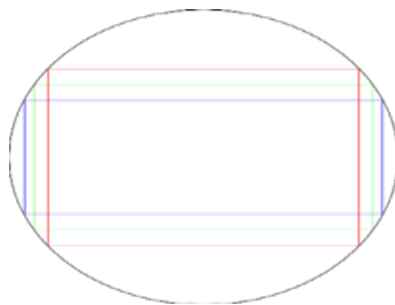


Figura 13. Relación de aspecto en un rectángulo.

Fuente: González (2017)

Relación de crecimiento: Controla la forma en que la malla crece a partir de los elementos de superficie.

Oblicuidad: mide el grado de similitud entre elemento y el elemento ideal descrito por su circunferencia circunscrita en 2D o esfera 3D. (ver figura 14)

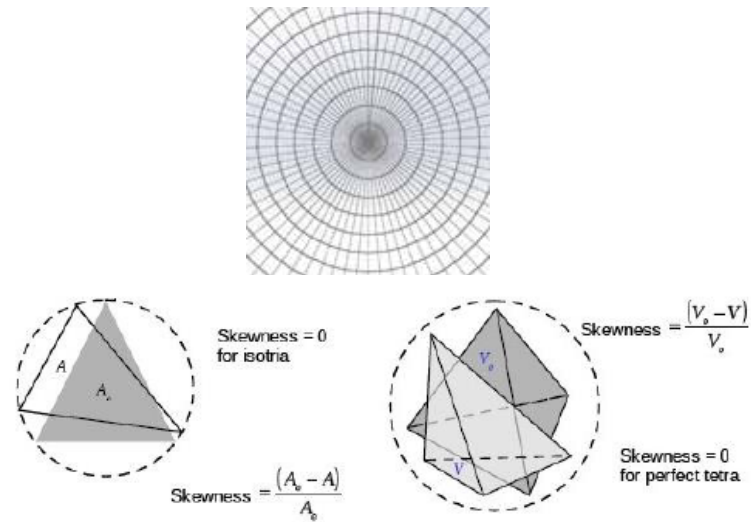


Figura 14. Oblicuidad.

Fuente: González (2017)

La ortogonalidad: es una generalización de la noción geométrica de perpendicularidad. Para su determinación se determina el Ángulo entre los ejes ortogonales de una cara y los vectores que definen las direcciones de las caras que se generan a partir de sus aristas. (ver figura 15)

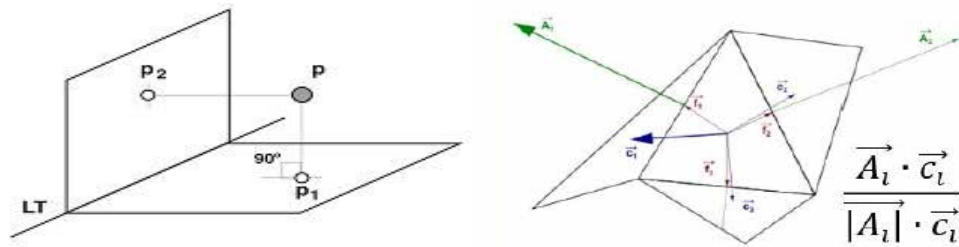


Figura 15. Ortogonalidad.

Fuente: González (2017)

Distorsión de la malla: define el grado de alteración de la malla con respecto a la geometría original. (ver figura 16)

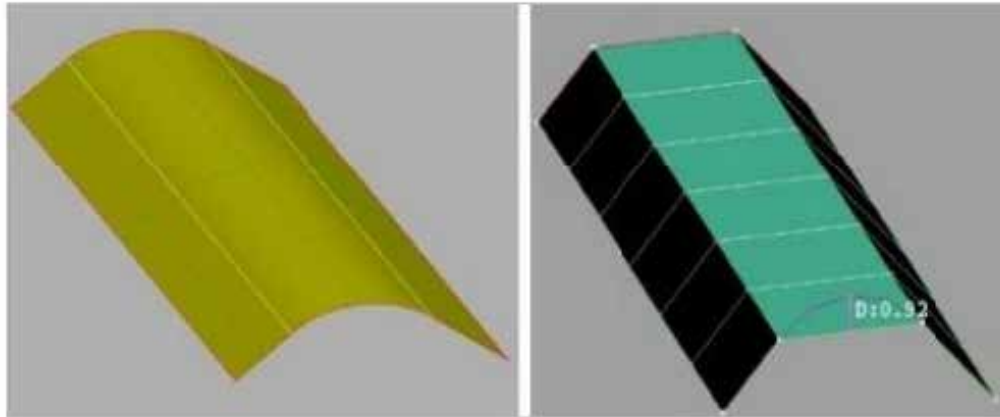


Figura 16. Distorsión de malla.

Fuente: González (2017)

Otro aspecto importante que se tiene que definir dentro de una malla es la geometría del elemento dependiendo del tipo de análisis ya que, es totalmente distinto mallar con elementos triangulares que hacerlo con elementos rectangulares pues los triángulos se adaptan de mejor manera en las zonas curvas con la desventaja que tiene una alta densidad incrementando el tiempo de simulación, sin embargo si la simulación se ejecuta en zonas planas podemos utilizar la geometría rectangular sin ningún problema pues es tan válida como la otra y además consume menos recurso. Estas se clasifican bidimensionales 2D o tridimensionales 3D. (ver figura 17)

Elementos 2D: en la mayoría de los casos los nodos de las mallas 2D se encuentra en un solo plano, pero también el nodo puede estar obligado a pertenecer a dos planos distinto. Los elementos más usados por malla 2D son cuadriláteros conocidos como (quad) y los triángulos conocidos como (tria).

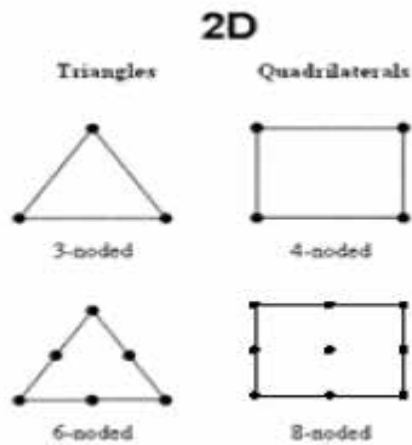


Figura 17. Elementos 2D.

Fuente: González (2017)

Elementos 3D: en las mallas 3D los nodos no están limitados en un solo plano como en las 2D y los elementos más usados son hexaedros conocidos como (hexa), tetraedros (tetra), pirámides de base cuadrada (pirámides) y triángulos extruidos (pentas o prismas triangulares). (ver figura 18)

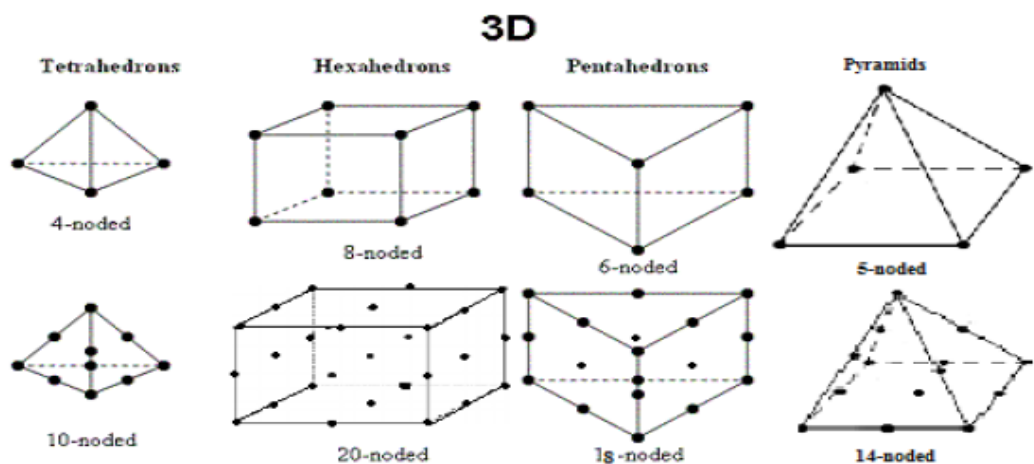


Figura 18. Elementos 3D.

Fuente: González (2017)

Discretización de las ecuaciones

Se pueden clasificar en tres categorías, siendo uno de estos el ya definido con anterioridad Método de volúmenes finitos.

El método de las diferencias finitas fue el primero aplicado para lograr la solución numérica de unas ecuaciones diferenciales, la primera persona en emplear este método fue Euler, probablemente en 1768. Este emplea el desarrollo en series de Taylor para la discretización de las derivadas de las variables de flujo. Una ventaja importante que tiene este método es la simplicidad teórica y la posibilidad de aumentar la precisión del método sin más que aumentar el orden de aproximación de las derivadas. Es solo aplicable a geometrías sencillas ya que requiere el uso de una malla estructurada, por este motivo en muy pocas ocasiones se emplea en aplicaciones industriales.

Por otro lado, el método de elementos finitos, introducido por Turner et al. En 1956, se empleó en principio para el análisis estructural y una década después comenzó a ser utilizado para resolver ecuaciones de campo en medios continuos. No fue sino hasta la década de los 90 que este método ganó popularidad en la solución de ecuaciones de Euler y Navier-Stokes. Este método comienza con la división del dominio en elementos triangulares o tetraédricos, generando una malla no estructurada, donde dependiendo del tipo de elemento y la precisión deseada, se tendrá que definir una malla más o menos fina de elementos. Resulta muy atractivo pues permite el estudio de geometrías complejas, y también es aplicado en el caso particular de fluidos no newtonianos.

El método de elementos finitos tiene una base matemática muy rígida, sin embargo, en ciertos casos este es matemáticamente equivalente al método de los volúmenes finitos, lo que explica porque el método de volúmenes finitos es tan popular. Existen ocasiones en las que estos dos últimos métodos se combinan, normalmente en mallas estructuradas.

Condiciones de contorno e iniciales

Sin importar que tipo de metodología se emplee para resolver las ecuaciones de gobierno, se deberá especificar unas condiciones de contorno e iniciales.

Las condiciones iniciales determinan el estado de las variables del fluido en el instante $t=0$. Cuanto más cercana sea la condición inicial a la solución final del problema, menor será el tiempo necesario empleado para la convergencia. Además, se reduce la posibilidad de que el problema se vuelva inevitable y se llegue a la convergencia de la solución. Una práctica general en aerodinámica es imponer como valores iniciales las condiciones de flujo libre en velocidad, presión, densidad y temperatura.

En toda simulación numérica se considera una parte del dominio fluido para la resolución de las ecuaciones, esto da lugar a un contorno artificial donde el valor de las variables debe ser especificado a través de lo que se conoce como condiciones de contorno. Estas se pueden clasificar en:

Condiciones de contorno de flujo libre: puede ser de entrada, salida, o de entrada/salida. Las condiciones de contorno de entrada de flujo se identifican mediante condiciones en el infinito (∞ , ...).

Condiciones de contorno de pared: modelan el comportamiento del flujo en las proximidades de la superficie. Se pueden imponer una condición de no deslizamiento (velocidad nula en el punto de contacto, $\vec{u} = 0$), o de tangencia (velocidad normal a la superficie igual a 0).

2.3 Definición de términos

Fluido: es todo cuerpo que tiene la propiedad de fluir, y carece de rigidez y elasticidad, y en consecuencia cede inmediatamente a cualquier fuerza tendente a alterar su forma y adoptando así la forma del recipiente que lo contiene.

Densidad: magnitud escalar referida a la cantidad de masa que tiene un cuerpo en un volumen determinado.

Presión: fuerza que ejerce un gas, un líquido o un sólido sobre una superficie.

Viscosidad: es la medida de la resistencia a las deformaciones graduales producidas por tensiones cortantes o tensiones de tracción.

Número de Reynolds: permite caracterizar el movimiento de un fluido, ya sea un flujo laminar o un flujo turbulento, dicho parámetro nace a partir de la relación entre las fuerzas de inercia y las fuerzas viscosas.

Álabe: es la paleta curva de una turbomáquina o máquina de fluido rotodinámica.

Diseño Asistido por Computadora (CAD): es el uso de un amplio rango de herramientas computacionales que asisten a ingenieros, arquitectos y a otros profesionales del diseño en sus respectivas actividades. Es todo sistema informático destinado a asistir al diseñador en su tarea específica.

Dinámica de Fluidos Computacional (CFD): rama de la mecánica de fluidos que utiliza métodos numéricos y algoritmos para resolver y analizar problemas sobre el flujo de fluidos.

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

La metodología es el conjunto de acciones destinada a lograr de manera precisa los objetivos de una investigación, por lo tanto, requiere una descripción clara de cuáles serán los métodos y técnicas para poder plantear un buen desarrollo y diseño del proyecto.

Para Balestrini (2006) el marco metodológico es: El conjunto de procedimientos lógicos, Tecno-operacionales implícitos en todo proceso de investigación, con el objeto de ponerlos de manifiesto y sistematizarlos: a propósito de permitir descubrir y analizar los supuestos del estudio y de reconstruir los datos, a partir de los conceptos teóricos convencionalmente operacionalizados. (p.125).

Para Arias (2006), la metodología del proyecto incluye el tipo o tipos de investigación, las técnicas y los instrumentos que serán utilizados para llevar a cabo la indagación. Es el “como” se realizará el estudio para responder el problema planteado. (p.110).

Es por esto que en el presente capítulo se procederá a la descripción de la metodología utilizada en la investigación, la cual se encuentra formada por los siguientes tópicos: enfoque de la investigación, tipos de investigación, nivel de la investigación, diseño de la investigación, fases de la investigación, población y muestra y técnicas e instrumentos de recolección de datos.

3.1 Naturaleza de la investigación

Es relevante resaltar que definir la naturaleza de la investigación, permite consolidar las actividades que se deben llevar a cabo. Según Hernández, Fernández y Baptista (2003), una investigación de enfoque cuantitativo se refiere a aquella que: “Usa la recolección de datos para probar hipótesis, con base en la medición numérica

y el análisis estadístico, para establecer patrones de comportamiento y probar teorías.”. (p. 15).

Por lo tanto, esta investigación se considera de enfoque cuantitativo, ya que se usa la recolección de datos para el proceso de interpretación, permitiendo obtener conclusiones y explicar los resultados de una manera breve y precisa.

3.2 Tipo de investigación

Es importante determinar el tipo de investigación, ya que la selección del mismo establecerá los pasos a seguir del estudio, dándole un enfoque influyendo en los instrumentos y la forma de cómo se analizará los resultados, recordando que “El propósito del análisis es aplicar un conjunto de estrategias y técnicas que le permiten al investigador obtener el conocimiento que estaba buscando, a partir del adecuado tratamiento de los datos recogidos.” (Hurtado, 2000: p. 181).

Existen varios tipos de investigación, la cual es definida por los objetivos de la investigación, Arias, Fidas (1999) “los estudios exploratorios tiene como objetivo examinar un teme o problema de investigación poco estudiado o que a sido poco bordado antes”

En ese contexto, se establece que la presente investigación es de tipo exploratprio teniendo en cuenta que su objetivo principal es simular el campo del flujo en un turboventilador utilizando una herramienta de dinámica de fluidos computacionales, con el fin interpretar y analizar mediante procesos matemáticos la interacción entre el flujo y el turboventilador.

3.3 Diseño de la investigación

Representa el camino que llevara a cabo el cumplimiento de los objetivos planteado en la investigación, además de contestar las interrogantes que se vayan presentando con el avance del proyecto, para Arias (2006) “El diseño de la investigación no es más que la estrategia general que adopta el investigador para responder al problema planteado. En atención al diseño la investigación se clasifica en documental, de campo y experimental.” También es importante señalar que el diseño de la investigación se define como “Es el plan o estrategia que se desarrolla

para obtener la información que se requiere en la investigación.” (Hernández, et al, 2010, p.120)

Consecuentemente, se puede determinar que la presente investigación es de tipo documental, dado que tiene como objetivo definir las variables, modelar el elemento de maquina en un software CAD seguido del uso de una herramienta CFD con el fin de obtener resultados en forma de datos, gráficos o videos para así poder analizar y entender la naturaleza del campo de flujo en un turboventilador

3.4 Nivel de la investigación

Tamayo (2007), “refiere a las investigaciones descriptivas como el registro, análisis e interpretación de la naturaleza actual y la composición o procesos de los fenómenos; trabajando así, sobre realidades de hecho y su característica fundamental es la de presentar una interpretación correcta”.

3.5 Población y muestra

Población

Para Arias, la población se define como “conjunto finito o infinito de elementos con características comunes para los cuales serán extensivas las conclusiones de la investigación. Esta queda delimitada por el problema y por los objetivos del estudio. (Arias, 2006: p. 81).

No es necesario identificar una población y muestra en este proyecto de investigación, esto debido a que la construcción de la investigación se basa de medios bibliográficos y el uso de softwares que permita realizar una simulación con los parámetros adecuados, con el fin de obtener resultados y poder llegar a una conclusión concisa, no es necesario identificar una población y muestra en este proyecto de investigación.

3.6 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

En esta sección se identificarán las técnicas y herramientas para obtener datos e información útil, dándole un enfoque objetivo que facilitará la toma de decisiones exactas y efectivas que ayuden a alcanzar los objetivos planteados en la investigación.

Según Arias, define técnicas como “el procedimiento o forma particular de obtener datos o información” (Arias, 2006: p. 67).

En el presente proyecto se utilizan recursos bibliográficos con el fin comprender el comportamiento y las variables que pueda afectar un campo de flujo. Además, de textos, artículos, trabajos de grado, páginas web, cursos y tutoriales acerca del manejo de los softwares como lo son SolidWorks® y ANSYS® Workbench.

Baena (1985) considera que “La investigación documental es una técnica que consiste en la selección y recopilación de información por medio de la lectura y crítica de documentos y materiales bibliográficos, de bibliotecas, hemerotecas, centros de documentación e información” en contexto a lo antes dicho lo instrumento utilizados para la recopilación de datos será cualquier elemento que permita obtener y registrar resultados, sin embargo se debe tener en cuenta que la investigación se basa en un laboratorio virtual es indispensable el uso de computadoras siendo este el instrumento principal.

3.7 Fases de la investigación

Conseguir el desarrollo óptimo de una investigación implica la realización de una serie de etapas que siguen una secuencia lógica, estas son denominadas fases. La presente será dividida en una serie de fases que exhiben relación con los objetivos que se desean cumplir, permitiendo lograr el objetivo macro a través de la realización de cada uno de los objetivos micro. Este procedimiento permite que el investigador pueda avanzar de manera continua, contando con la administración del tiempo y el esfuerzo invertido.

Fase I: Investigación acerca de las variables que intervienen en el comportamiento del campo de flujo a través de un turboventilador.

Esta primera fase consta básicamente en la revisión de la bibliografía ya existente, se empleó herramientas de búsqueda para conseguir la información necesaria que permita la extensión de la investigación y de la documentación con relación a las variables que intervienen en el comportamiento del campo de flujo.

Para la recolección de los datos de interés se examinó la información otorgada por investigaciones de grado, publicaciones científicas, investigaciones independientes y documentos digitales, de esta manera se logró cumplir con el primer objetivo satisfactoriamente, permitiendo comenzar la siguiente fase.

Fase II: Selección de un turboventilador real e identificar sus características geométricas con la finalidad de modelarlo mediante una herramienta (CAD).

Esta fase se basa en la selección del turboventilador real, donde luego de una extensa investigación se seleccionó como elemento de estudio un turboventilador centrífugo debido a la amplia aplicación industrial y variedad de fluidos con los estos pueden trabajar. Una vez seleccionado el turboventilador a diseñar, se buscará realizar la modelación virtual del mismo, tomando en cuenta que si las dimensiones reales son muy grandes se podrá realizar el modelado a escala con el fin de facilitar el estudio computacional requerido más adelante.

La modelación virtual del elemento se llevará a cabo mediante un software CAD, existiendo una cantidad variada de distintos programas de esta naturaleza, para realizar el modelado mecánico en esta investigación se utilizará el software SolidWorks®, pues nos ofrece como ventaja el trabajo bidimensional y tridimensional, así como también es un programa con el que se está familiarizado pues actualmente forma parte del pensum académico de la carrera. Finalmente, se contará con la herramienta ANSYS® Design Modeler, que forma parte de ANSYS® Workbench, para modificaciones más específicas que requieran las geometrías antes de realizar la simulación pertinente.

Fase III: Simulación del campo de flujo mediante una herramienta de dinámica de fluidos computacional (CFD)

Esta fase comprende la aplicación de la herramienta de fluidos computacional, conocida como CFD por sus siglas en inglés, la cual corresponde a la rama de mecánica de fluidos que aplica tanto algoritmos como también métodos numéricos con el fin de resolver problemas sobre el flujo de distintos fluidos. Es en esta fase

donde se logrará realizar la simulación del campo de flujo a través del turboventilador antes diseñado mediante la herramienta CAD aplicada SolidWorks®.

Dicho esto, se procede a seleccionar el software a utilizar para ejecutar la simulación deseada para efectos de esta investigación, sabiendo la variedad de programas en el mercado que cuentan con la herramienta CFD, se sugiere el empleo del software ANSYS® Workbench en su versión 18.1 para alcanzar este objetivo. Los dos softwares que serán aplicados para la ejecución de la simulación son ideales debido a la compatibilidad que estos presentan. Una vez cargadas las geometrías requeridas en el programa correspondiente, el paso siguiente concierne a la introducción de los datos pertinentes para efectuar la simulación, dichos datos comprenden a aquellos del flujo y también datos correspondientes al cuerpo del ventilador, en nuestro caso se tomara en cuenta los álabes del mismo.

Fase IV: Obtención de los resultados en forma de datos, gráficos o videos para su análisis mediante una herramienta computacional de procedimiento matemático.

La fase cuatro constituye la última fase de la investigación en cuestión, en esta se buscara exponer de manera clara y concisa todos los datos obtenidos por medio de las fases anteriormente descritas. Estos resultados en forma de datos serán transformados a representaciones gráficas, o videos, que faciliten la comprensión y la lectura de los mismos, de esta manera minimizamos las distracciones y las dificultades para lograr así un mejor entendimiento del comportamiento del campo de flujo a través de un turboventilador.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados de cada fase metodológica aplicada con el propósito de lograr el cumplimiento de los objetivos propuestos, de

manera precisa y clara, para la correcta realización de la simulación del campo de flujo en un turboventilador centrífugo.

4.1 Investigar acerca de las variables que intervienen en el comportamiento del campo de flujo a través de un turboventilador.

Como bien se conoce, los ventiladores son máquinas usadas para producir movimiento de aire en la industria, existe una gran variedad de investigaciones realizadas con el fin de seleccionar un ventilador que trabaje en óptimas condiciones satisfaciendo la necesidad del sistema con la mayor eficiencia posible, basándonos en la bibliografía consultada, constituida por publicaciones científicas, trabajos de grado, entre otros, se logró identificar la información necesaria para definir las variables que intervienen en el comportamiento del campo de flujo:

Presión de entrada en el turboventilador (Pa)

Flujo másico (kg/s)

Densidad del fluido (kg/m^3)

Velocidad de rotación del turboventilador (rpm)

4.2 Seleccionar un turboventilador real e identificar sus características geométricas con la finalidad de modelarlo mediante una herramienta (CAD)

Se selecciona un turboventilador centrífugo de álabes inclinados hacia atrás, del fabricante “Chicago Blowers” (ver anexo A) de la línea de modelos “SQB”, donde las dimensiones del impulsor fueron facilitadas por la empresa “Mangaire C.A”, ubicada en la zona industrial “La Quizanda”. Estos ventiladores son diseñados especialmente para trabajar con flujos corrosivos o corrientes de aire sucio, las aplicaciones más típicas para estos son: extractores de humos, extractores de polvo, sistemas de control de emisiones, ventiladores de circulación de hornos, etc. Con el fin de realizar la modelación del turboventilador, el tamaño seleccionado es de 24.5”

(0.6223 m) de diámetro, de esta manera no será necesario realizar ningún tipo de escalamiento al momento de diseñar.

Para la digitalización de los distintos componentes del turboventilador se utilizarán dos herramientas, la primera corresponde al software de diseño asistido por computadora SolidWorks® donde se realizará el modelado de las geometrías que, posteriormente, serán importadas a la herramienta computacional ANSYS® Design Modeler, perteneciente al software ANSYS® Workbench 18.1, donde se llevarán a cabo las modificaciones y detalles necesarios para la correcta aplicación del mallado a utilizar.

La geometría en cuestión se divide en tres dominios: voluta, impulsor y succión, arreglo que posibilita el estudio del flujo a través de las diferentes regiones del turboventilador seleccionado.

4.2.1 Modelado de la voluta

Para el modelado de la voluta, se obtienen las dimensiones necesarias, radios y longitudes, a través del catálogo (ver anexo A) del fabricante. Inicialmente, se trazan los ejes vertical y horizontal de manera constructiva para servir de guía para la formación de los arcos, la intersección de estos ejes sirve como centro para un cuadrado cuyos vértices servirán como centro para los distintos radios que presenta la geometría, este método es conocido en el dibujo técnico como envolvente de un cuadro o espiral de cuatro centros.

Se procede a trazar la línea con la longitud que corresponde al diámetro mayor, aquel radio que une la boca de descarga con la voluta, utilizando el primer vértice del cuadro, se traza un arco desde la punta de esta línea hasta el eje de referencia horizontal, cerrando un cuadrante aproximadamente. Luego, en sentido anti horario, con el segundo vértice disponible se traza la segunda línea correspondiente al segundo radio, se traza el arco de manera similar al caso anterior hasta la línea de referencia vertical, este proceso se repite nuevamente para el tercer radio y cuarto radio. (ver figura 19)

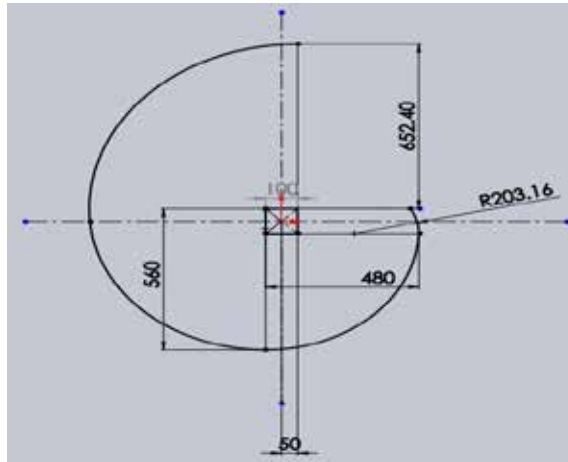


Figura 19. Croquis de la voluta, espiral de cuatro centros.
Fuente: Cimmarusti y Decán (2019).

El cuarto radio de la voluta es el que le da cierre a la geometría, se encuentra interno en la descarga y por encima de la boca, permite mejorar el flujo de aire en la salida. . (ver figura 20)

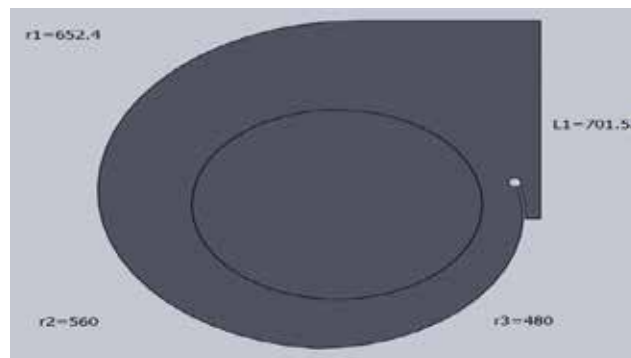


Figura 20. Radios de la voluta (dimensiones en mm)
Fuente: Cimmarusti y Decán (2019).

Una vez definido el croquis, se realiza la extrucción correspondiente al ancho de la carcasa del ventilador, 260mm, luego se procede a realizar el corte para darle entrada a la succión del flujo, siendo este el mismo diámetro externo del ventilador,

672mm. Finalmente, se recomienda hacer un alargamiento en la salida de la voluta para así evitar la recirculación del flujo de aire al momento de ejecutar los distintos métodos numéricos para realizar la simulación del fluido. . (Ver figura 21)

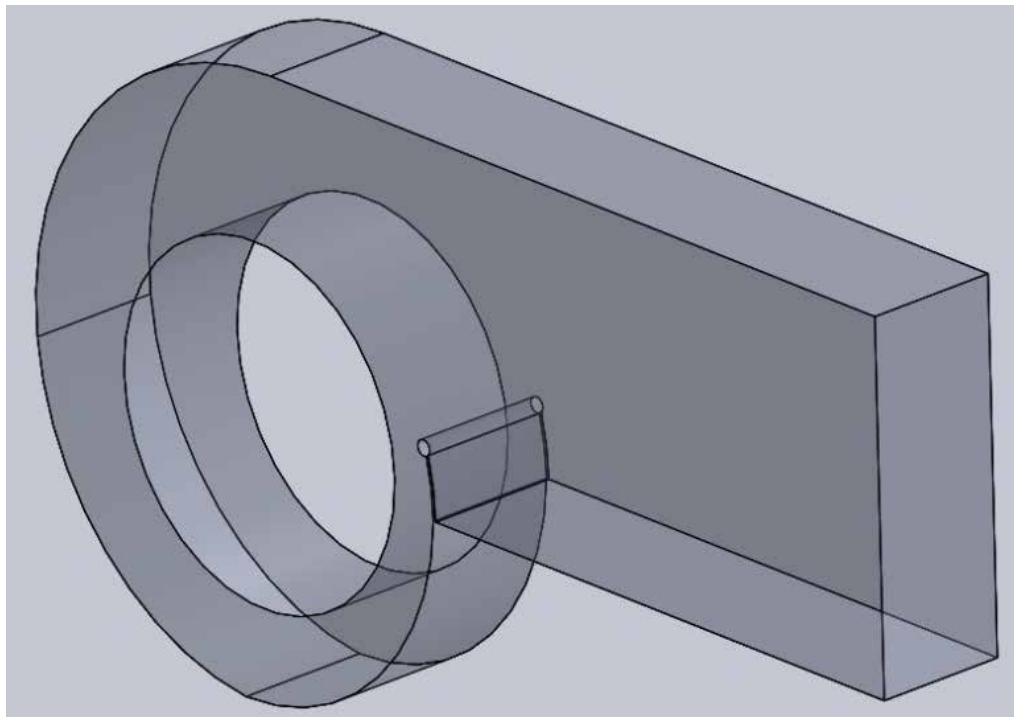


Figura 21. Geometría final del dominio fluidizado de la voluta.

Fuente: Cimmarusti y Decán (2019).

4.2.2 Modelado del impulsor

El impulsor está conformado de distintas geometrías que se digitalizaran como un conjunto. Los componentes principales de este elemento son los álabes, el ventilador en cuestión posee un total de 12 álabes separados entre sí con un ángulo de 30° . La base de este rodete es un círculo de 672mm de diámetro, donde se encuentran los álabes de naturaleza recta con una inclinación anti horario de 30° . . (Ver figura 22)

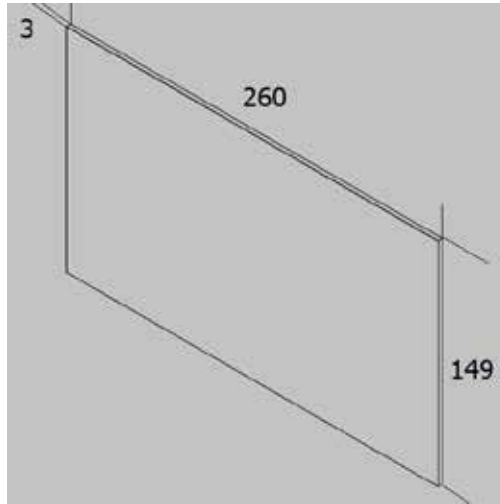


Figura 22. Dimensiones del álabe.

Fuente: Cimmarusti y Decán (2019).

Teniendo las dimensiones de cada álabe, se procede a realizar una matriz circular donde mediante el software Solidworks® se especifica la reproducción total de los 12 álabes, incluyendo la inclinación deseada de 30° , luego se lleva a cabo la extrucción de dicha geometría para conseguir el acabado observado en la figura 23 (a). Sabiendo que se trabajará con el dominio fluidizado de estos álabes, se realiza una extrucción de un cilindro de 672mm de diámetro que cubra por completo los mismos, esta tarea se ejecuta sin fusionar los resultados para luego, mediante el comando de combinar, eliminar lo que corresponde al sólido de los álabes, visto en la figura 23 (b).

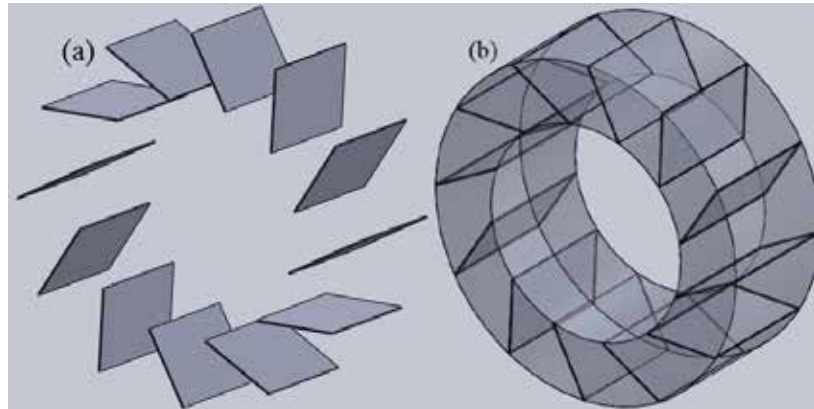


Figura 23. (a) Álabes del turboventilador. (b) Dominio fluidizado de los álabes.

Fuente: Cimmarusti y Decán (2019).

Por último, con el fin de ahorrar recursos computacionales y, en consecuencia, ahorrar tiempo de iteración, se secciona el dominio fluidizado de los álabes tomando en cuenta un solo álabe para el estudio del mismo una vez dentro del software ANSYS® Workbench. . (ver figura 24)

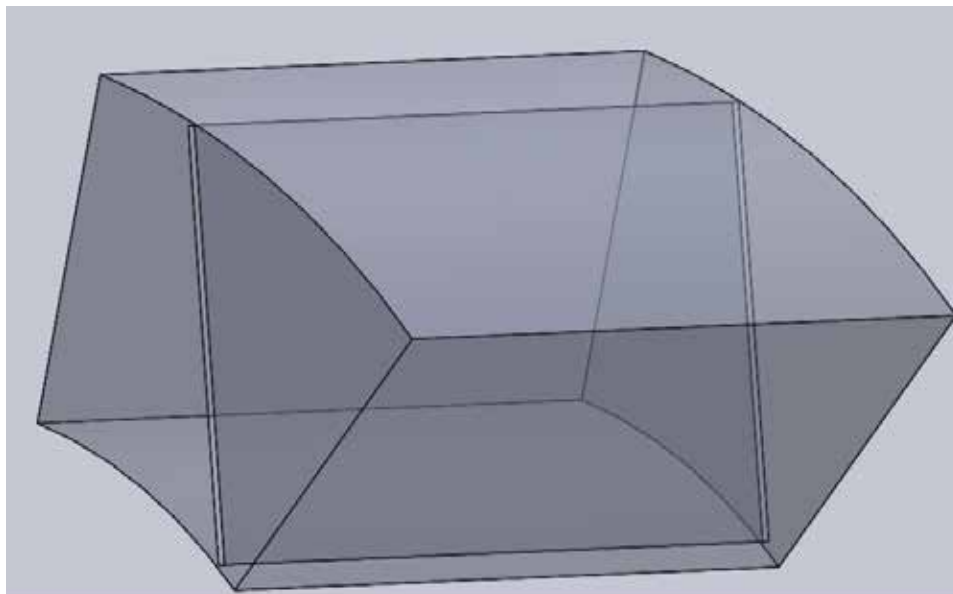


Figura 24. Dominio fluidizado del álabe seccionado.

Fuente: Cimmarusti y Decán (2019).

4.2.3 Modelado de la succión

Como elemento final requerido para la simulación del flujo, se tiene el modelado del dominio de la succión. Este componente elemental corresponde a la tobera de entrada y al ojo del impulsor. El cono de succión tiene como dimensiones los diámetros del ventilador, siendo el interno de 425mm y el externo de 672mm. El ventilador en su parte posterior posee un plato apernado, de diámetro igual a 250mm y espesor de 8mm, que se encuentra unido como refuerzo mediante 12 tornillos hexagonales, esta geometría es importante de tomar en cuenta pues, espacialmente, estos detalles se deben de tener en consideración al realizar el dominio del flujo de succión.

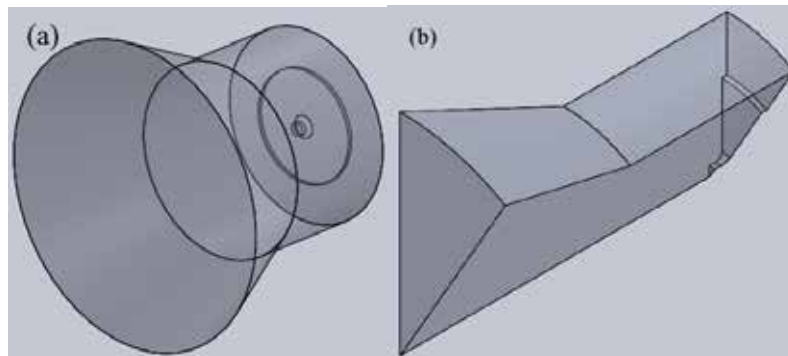


Figura 25. Dominio de la succión. (a) Succión completa. (b) Succión seccionada.

Fuente: Cimmarusti y Decán (2019).

Como se puede observar en la figura 25 (a), la geometría fue simplificada omitiendo la presencia de los tornillos de unión del refuerzo circular. También, de manera similar al seccionamiento realizado en el dominio fluidizado de los álabes, el dominio de la succión es también seccionado en 12 partes iguales, separadas cada una a 30°, para ahorrar recursos computacionales en los cálculos a realizar.

4.2.4 Ajuste geométrico de los dominios fluidizados.

Una vez generada cada una de las geometrías correspondientes a los dominios, se realiza la verificación de las dimensiones, para asegurar y garantizar que las superficies coincidentes consten de un encaje perfecto en las regiones pertinentes. Para ello, se utiliza la herramienta ANSYS® Design Modeler, que pertenece al módulo de geometría del software ANSYS® Workbench, como es mostrado en la figura 26.

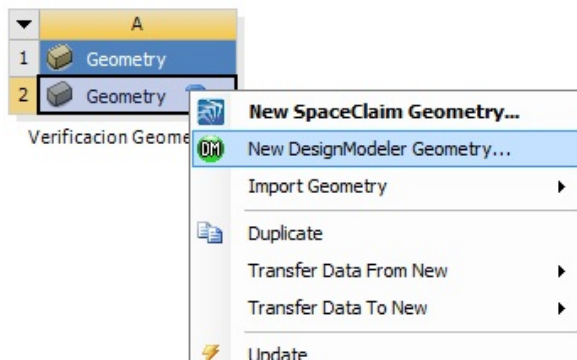


Figura 26. Módulo de Geometria, Design Modeler.

Fuente: Cimmarusti y Decán (2019).

Los diseños realizados en Solidworks® son importados al módulo de Design Modeler como archivos en formato .IGES, el cual es un formato neutro diseñado para transferir datos de dibujos 2D y 3D entre sistemas CAD dispares. Al importar las tres partes exitosamente, se logra corroborar el correcto ensamble de las geometrías, como se muestra en la figura 27 del conjunto armado.

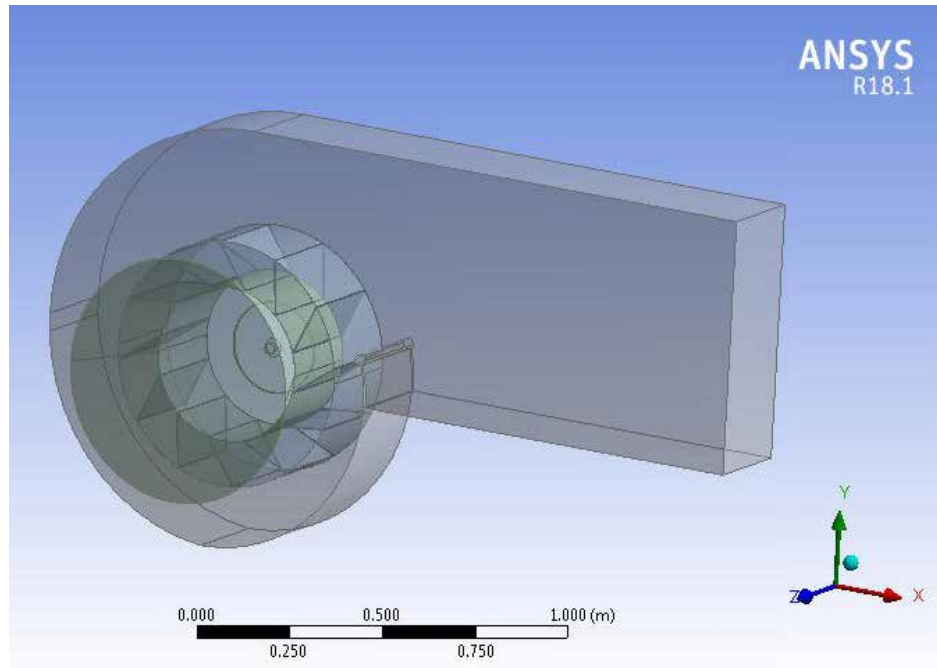


Figura 27. Conjunto armado: voluta, impulsor y succión.

Fuente: Cimmarusti y Decán (2019).

4.3 Simulación el campo de flujo mediante una herramienta de dinámica de fluidos computacional (CFD).

Al tener la geometría de cada dominio correctamente cargada en la plataforma del software, se continúa el trabajo realizando la discretización espacial de ellos. Esta tarea es muy característica de cada región de estudio, es necesario seleccionar la aplicación del mallado que mejor se adapte a cada fragmento de fluido, para garantizar resultados de alta calidad así como también una mejor convergencia de los modelos matemáticos.

Cada dominio será discretizado de manera individual, las tres regiones de estudio se mallarán mediante la herramienta ANSYS® Meshing, que aparece en el módulo de “Mesh” en el diagrama de proyecto de ANSYS®.. (ver figura 28)

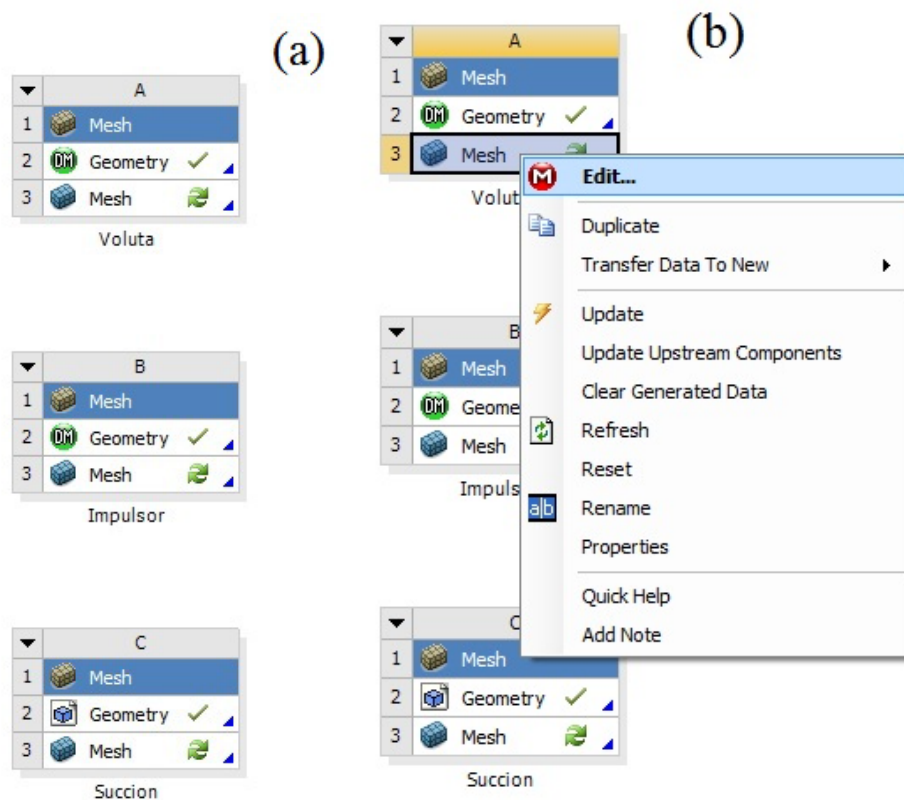


Figura 28. (a) Interfaz del módulo “Mesh”. (b) selección de edición de mallado.

Fuente: Cimmarusti y Decán (2019).

4.3.1 Mallado del dominio de la succión

La discretización correspondiente al dominio de la succión, de naturaleza estacionaria, se procesara en la herramienta ANSYS® Meshing, donde se debe especificar la geometría de los elementos que serán aplicados, también un intervalo de tamaños para la creación de estos y así conseguir que los valores que indican la calidad de la malla se encuentre dentro de los limites, garantizando resultados confiables en la iteración.

Al abrir la celda de “Mesh” la primera tarea en realizar es la asignación del nombre correspondiente a cada cara identificando estas, previo a la configuración de condiciones de borde, para más adelante agilizar la selección en el “Setup”, como es

visto en la figura 29. Debido a la sencillez de la geometría y su cualidad estática, se establecen como elementos principales de discretización los tetraédricos, contribuyendo a la disminución del tiempo de convergencia sin afectar notablemente la exactitud de los resultados. En cuanto a los elementos cercanos a las superficies sólidas, aquellas consideradas como paredes, se establecen funciones de malla avanzada, para obtener la mayor precisión posible en lo que corresponde a la capa límite del flujo, por consiguiente, se seleccionaron elementos prismáticos en la proximidad de las paredes y en la proximidad de las curvaturas. Para lograr la generación de estos elementos característicos, se hizo uso de la función “Inflation”.

En la figura 30, se presenta la configuración del tamaño elegido, se observan también funciones avanzadas de tamaño, tasa de crecimiento de los elementos, suavidad, límite de tamaño aceptado, los detalles aplicados con la función “Inflation” también son mostrados. Por otro lado, en la figura 31 se ilustra el mallado ya aplicado en la geometría del dominio de la succión, mostrando los detalles desde distintos puntos de vista.

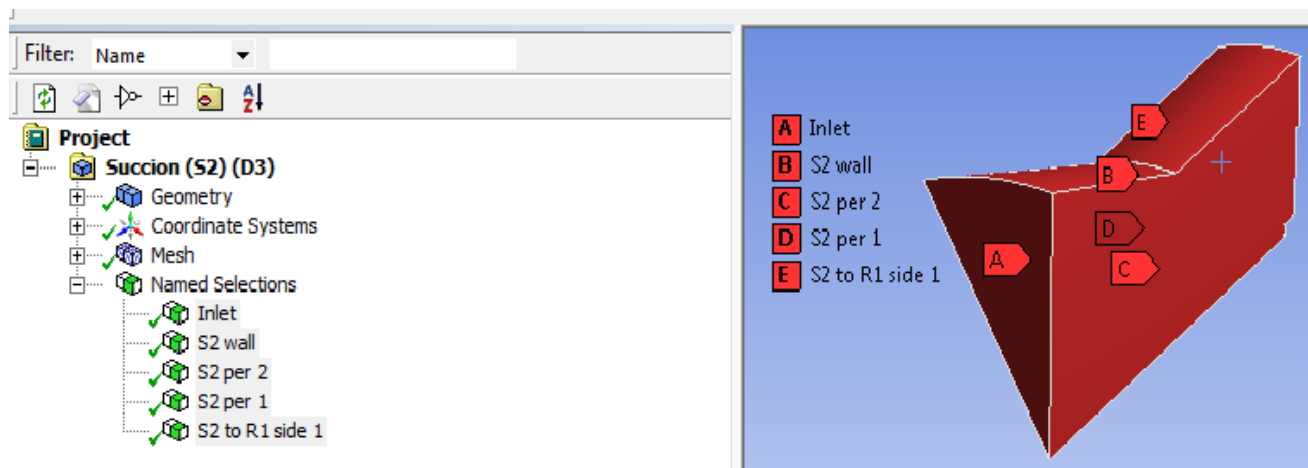


Figura 29. Selección de nombres para el dominio de la succión.

Fuente: Cimmarusti y Decán (2019).

Details of "Mesh"	
Display Style	Body Color
Defaults	
Physics Preference	CFD
Solver Preference	CFX
<input type="checkbox"/> Relevance	0
Element Order	Linear
Sizing	
Size Function	Proximity and Curvature
Relevance Center	Fine
Transition	Slow
Span Angle Center	Fine
<input type="checkbox"/> Curvature Normal Angle	Default (18.0 °)
<input type="checkbox"/> Num Cells Across Gap	Default (3)
Proximity Size Function Sources	Faces and Edges
<input type="checkbox"/> Min Size	Default (9.3539e-005 m)
<input type="checkbox"/> Proximity Min Size	Default (9.3539e-005 m)
<input type="checkbox"/> Max Face Size	Default (9.3539e-003 m)
<input type="checkbox"/> Max Tet Size	Default (1.8708e-002 m)
<input type="checkbox"/> Growth Rate	Default (1.20)
Automatic Mesh Based Defeaturing	On
<input type="checkbox"/> Defeature Size	Default (4.677e-005 m)
Minimum Edge Length	2.5e-004 m
Quality	
Check Mesh Quality	Yes, Errors
<input type="checkbox"/> Target Skewness	Default (0.900000)
Smoothing	High
Mesh Metric	None

Details of "Inflation" - Inflation	
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Body
Definition	
Suppressed	No
Boundary Scoping Method	Named Selections
Boundary	S2 wall
Inflation Option	Smooth Transition
<input type="checkbox"/> Transition Ratio	Default (0.77)
<input type="checkbox"/> Maximum Layers	5
<input type="checkbox"/> Growth Rate	1.2
Inflation Algorithm	Pre

Figura 30. Detalles de mallado e “Inflation” para el dominio de la succión.

Fuente: Cimmarusti y Decán (2019).

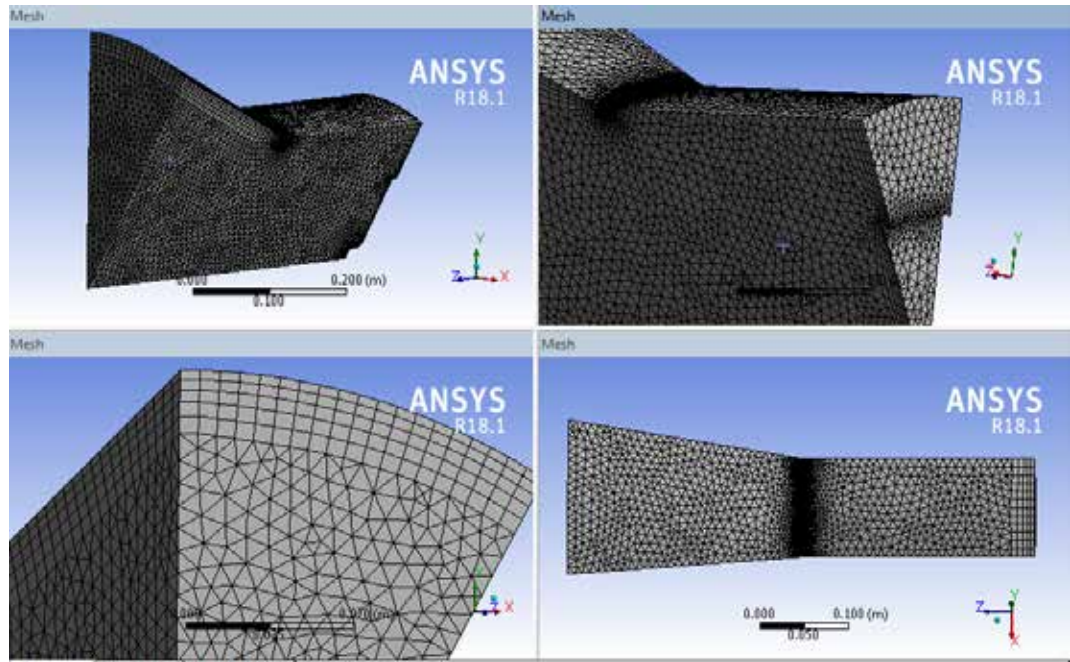


Figura 31. Mallado en dominio de la succión.

Fuente: Cimmarusti y Decán (2019).

4.3.2 Mallado en el dominio de la voluta

La metodología utilizada para la configuración del mallado perteneciente al dominio de la voluta, sigue de cerca los mismos parámetros y criterios utilizados en el mallado del dominio de la succión, debido a que ambos dominios comparten características estacionarias. Primero se realiza la asignación de nombres a cada cara, luego se configuran los datos de “mesh” e “inflation”, y finalmente se obtiene el mallado deseado, como se muestra en las figuras de la 32 a la 34.



Figura 32. Selección de nombres para el dominio de la voluta.

Fuente: Cimmarusti y Decán (2019).

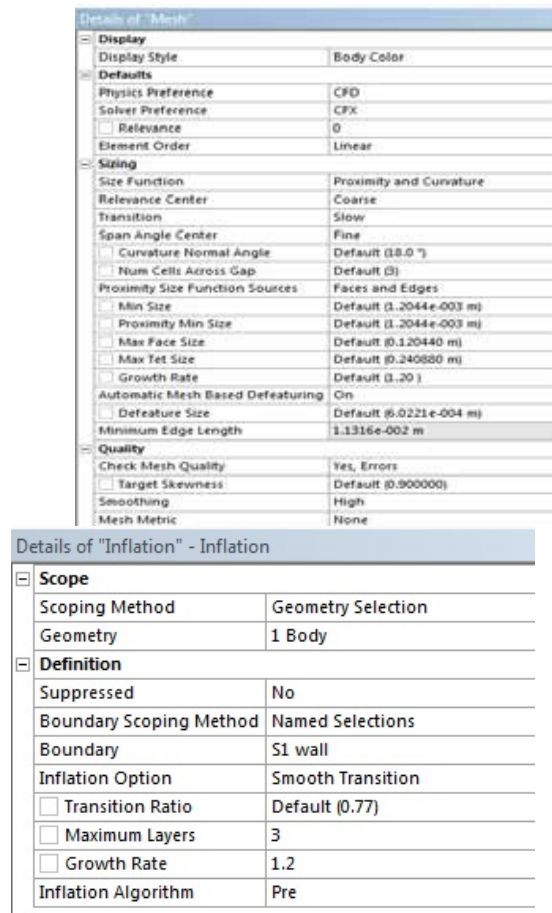


Figura 33. Detalles de mallado e “Inflation” para el dominio de la voluta.

Fuente: Cimmarusti y Decán (2019).

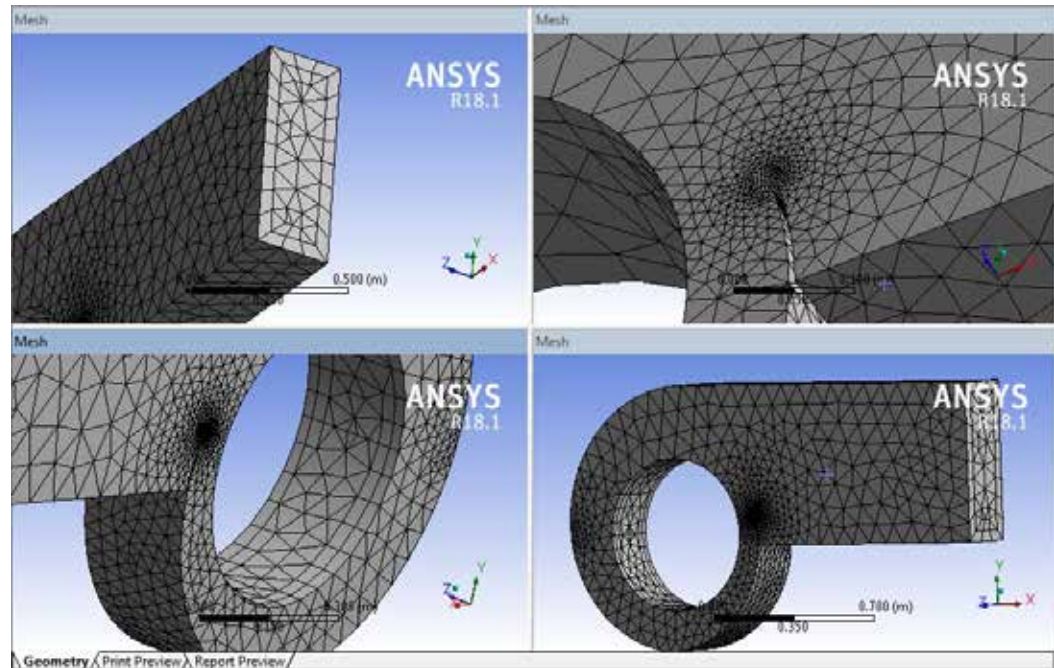


Figura 34. Mallado en dominio de la voluta.

Fuente: Cimmarusti y Decán (2019).

4.3.3 Mallado en el dominio del impulsor

El proceso de mallado en el impulsor, al igual que en los anteriores expuestos, busca tener elementos de menor tamaño en la cercanía de radios menores o paredes, especialmente en el área perteneciente al alabe, es por esto que también son aplicadas funciones de mallado avanzada. En el caso del dominio del impulsor, se utilizó la herramienta de mallado “Refinement”, aplicada en la zona del alabe. . (Ver figura 35 a la 37)

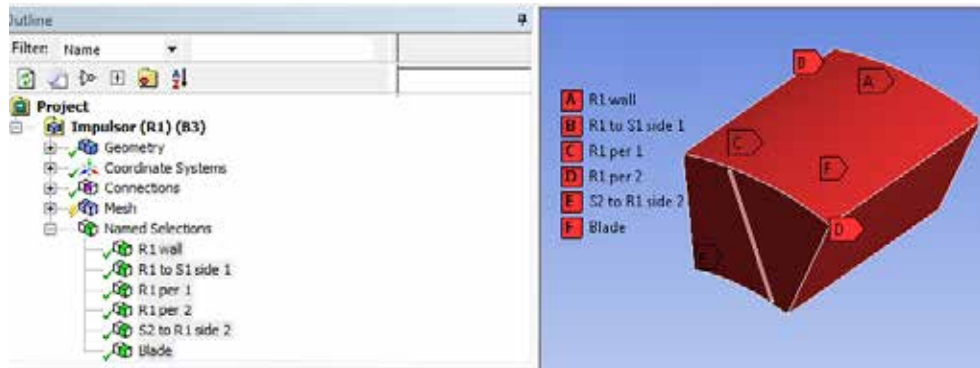


Figura 35. Selección de nombres para el dominio del impulsor.

Fuente: Cimmarusti y Decán (2019).

Details of "Mesh"	
Display	
Display Style	Body Color
Defaults	
Physics Preference	CFD
Solver Preference	CFX
<input type="checkbox"/> Relevance	0
Element Order	Linear
Sizing	
Size Function	Proximity and Curvature
Relevance Center	Fine
Transition	Slow
Span Angle Center	Fine
<input type="checkbox"/> Curvature Nor...	Default (18.0 °)
<input type="checkbox"/> Num Cells Acr...	Default (3)
Proximity Size Fu...	Faces and Edges
<input type="checkbox"/> Min Size	Default (5.0331 e-005 m)
<input type="checkbox"/> Proximity Min ...	Default (5.0331 e-005 m)
<input type="checkbox"/> Max Face Size	Default (5.0331 e-003 m)
<input type="checkbox"/> Max Tet Size	Default (1.0066 e-002 m)
<input type="checkbox"/> Growth Rate	Default (1.20)
Automatic Mesh ...	On
<input type="checkbox"/> Defeature Size	Default (2.5166 e-005 m)
Minimum Edge L...	3.e-003 m
Quality	
Check Mesh Qua...	Yes, Errors
<input type="checkbox"/> Target Skewn...	Default (0.900000)
Smoothing	High

Details of "Refinement" - Refinement	
Scope	
Scoping Method	Named Selection
Named Selection	Blade
Definition	
Suppressed	No
<input type="checkbox"/> Refinement	1

Figura 36. Detalles de “mesh” y “refinement” para el dominio del impulsor.

Fuente: Cimmarusti y Decán (2019).

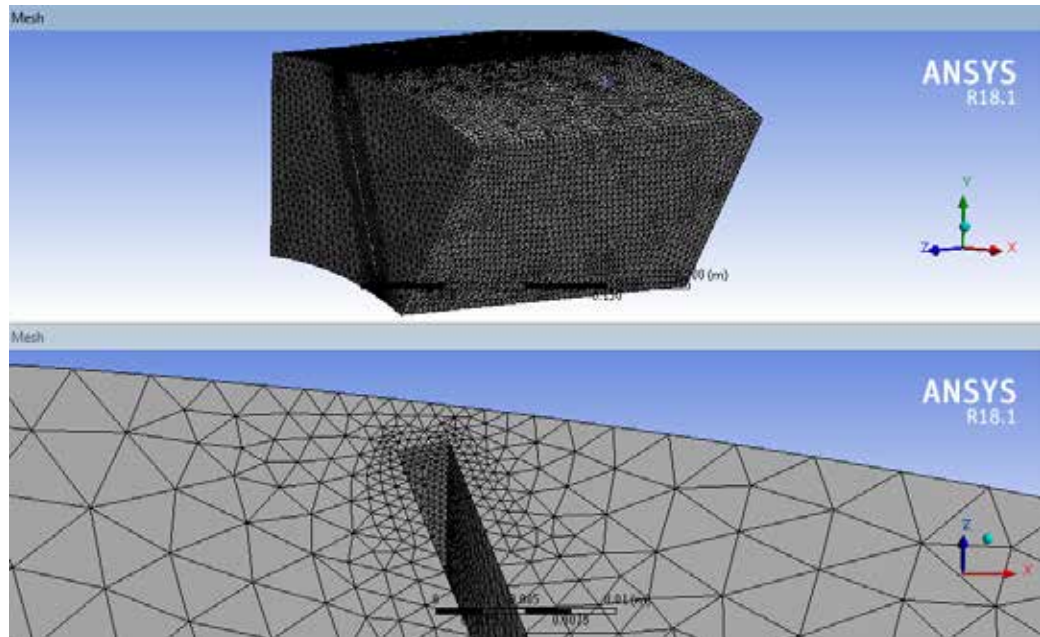


Figura 37. Mallado del dominio del impulsor.

Fuente: Cimmarusti y Decán (2019).

4.3.4 Configuración de los dominios

Teniendo una malla adecuada para cada dominio seleccionado, estos proceden a ser importados a la herramienta “CFX Pre” de ANSYS®. Este instrumento nos permite configurar las condiciones del flujo con respecto a cada dominio individualmente, “CFX Pre” se encuentra en el módulo de “CFX” de Workbench, se puede identificar como la celda “Setup”.

En la figura 38 (a) se muestra como al ser exportado el mallado de cada dominio, este requiere que se le haga un “update”, necesario para que exista compatibilidad entre el mallado realizado y la plataforma de “CFX”. Luego de hacer la debida actualización en los mallados, se puede ejecutar la edición del “Setup”, como se muestra en la figura 38 (b).

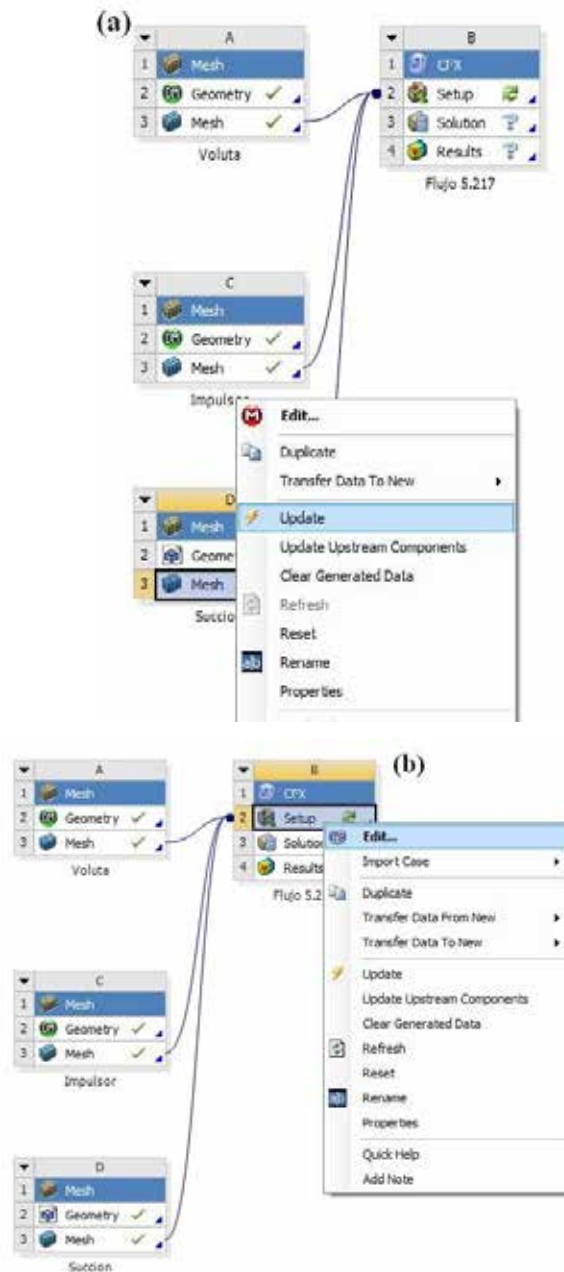


Figura 38. Exportacion de dominios a CFX. (a) Update de mallado. (b) Inicio de Setup.

Fuente: Cimmarusti y Decán (2019).

Es conveniente cumplir con una serie de pasos que comprenden la especificacion de las condiciones y características de cada dominio, con el fin de

efectuar una correcta configuración del análisis numérico. Dichos pasos se exponen en las figuras 39, 40 y 41:

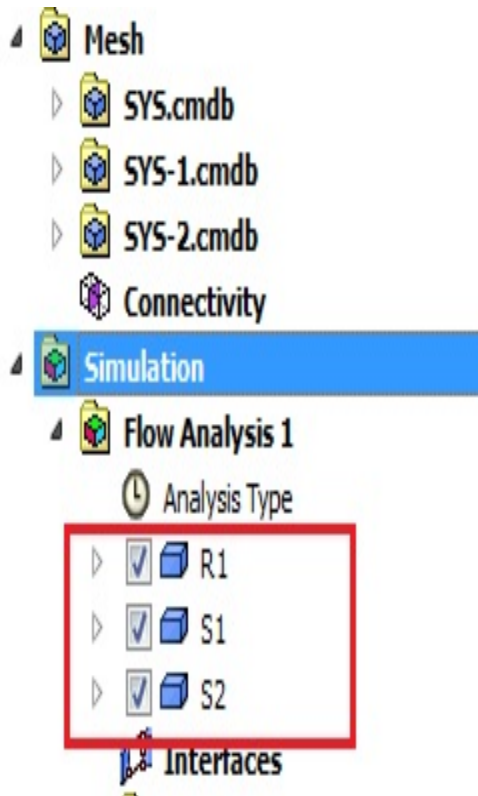


Figura 39. Dominios creados en Setup.

Fuente: Cimmarusti y Decán (2019).

Se observa la creación de tres dominios individuales, simplificando sus nombres con letras que corresponde a si son de naturaleza estacionaria o rotativa, donde: R1 representa el dominio del álabe a estudiar, S1 representa al dominio de la voluta y S2 representa al dominio de la succión seccionado. Esta configuración se hace de esta manera debido a que cada dominio posee singularidades que no son compartidas con los demás dominios.

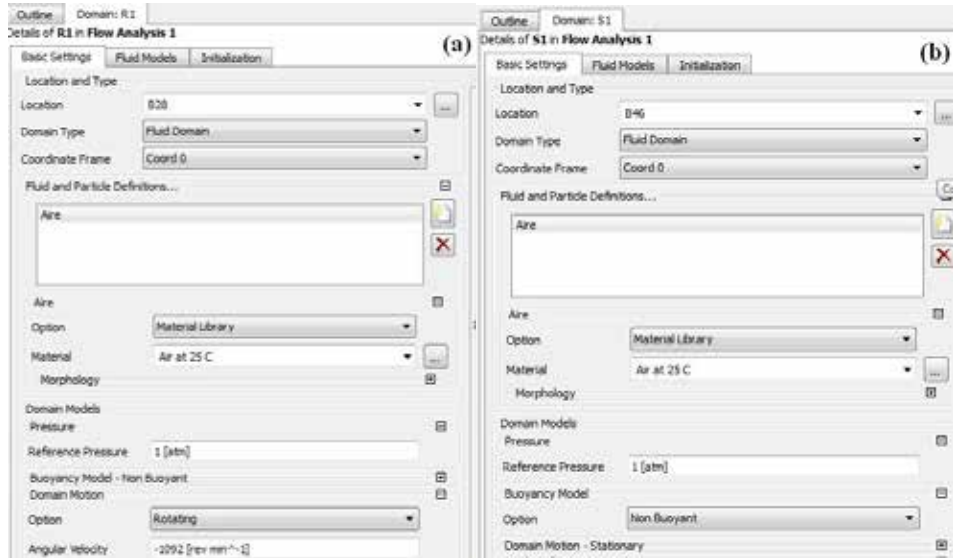


Figura 40. Configuraciones básicas de cada dominio.

Fuente: Cimmarusti y Decán (2019).



Figura 41. Configuraciones básicas de cada dominio. (a) Rotativo, (c) y (b) estacionarios.

Fuente: Cimmarusti y Decán (2019).

Se puede observar la manera en la que se configura cada dominio particularmente, en esta etapa se seleccionan las regiones que conforman cada dominio, el tipo y el sistema de coordenadas que se usará como referencia, en caso presentar rotación. Adicionalmente, se configura el fluido de trabajo, donde se escoge de la biblioteca del software aire a 25°C, también se selecciona la presión de referencia como 1atm, esto indicará que las presiones asignadas como condiciones de borde se considerarán como presiones manométricas. En último lugar, se configuran los dominios correspondientes a la voluta y la succión, S1 y S2, como dominios estacionarios, mientras que el dominio del impulsor, R1, se configura como rotativo, girando el sentido anti horario a 1092 rpm.

De manera similar, se establecen las condiciones básicas del fluido en cada uno de los dominios, así como también los modelos matemáticos a utilizar. Esta configuración es aplicada en los tres dominios de igual manera. .

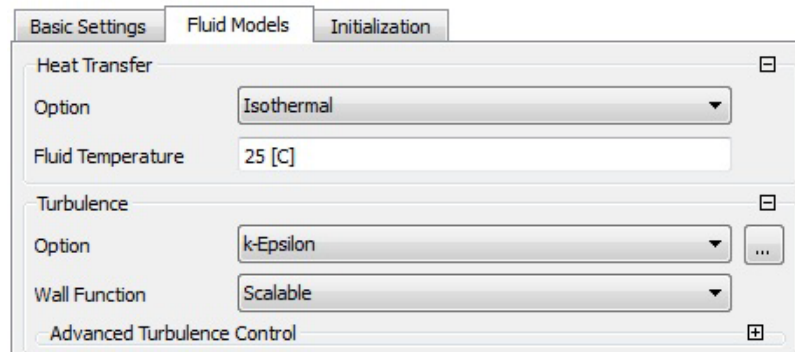


Figura 42. Configuración de los modelos matemáticos.

Fuente: Cimmarusti y Decán (2019).

En lo que se refiere a la configuración correspondiente a los modelos matemáticos, se establece como modelo de transferencia de calor: isotérmico, seleccionando 25°C como la temperatura determinada del fluido, y el modelo de dos

ecuaciones k-epsilon como modelo de turbulencia, como describe anteriormente la figura 42.

4.3.4.1 Relación entre dominios

Al trabajar con dominios separados es indispensable establecer la relación o vínculo existente entre ellos, se debe identificar las superficies que poseen contacto entre distintas regiones y definir de qué manera el flujo fluirá de una región a otra, o de un lado a otro dentro de una misma región específica. Estos vínculos son destacados como interfaces, para este estudio se crearon cuatro interfaces en total.

El primer tipo de interfaz existente corresponde a la superficie de contacto comprendida entre dos dominios, estos pueden ser de la misma o de distinta naturaleza. Para nuestro caso se configuran dos de estas relaciones: la existente entre la succión y el impulsor, S2 a R1, y la existente entre el impulsor y la voluta, R1 a S1. Son conexiones de tipo paso simple de fluido de una región a otra. En las figuras 43 y 44 se pueden observar la ubicación y la configuración efectuada para cada interface.

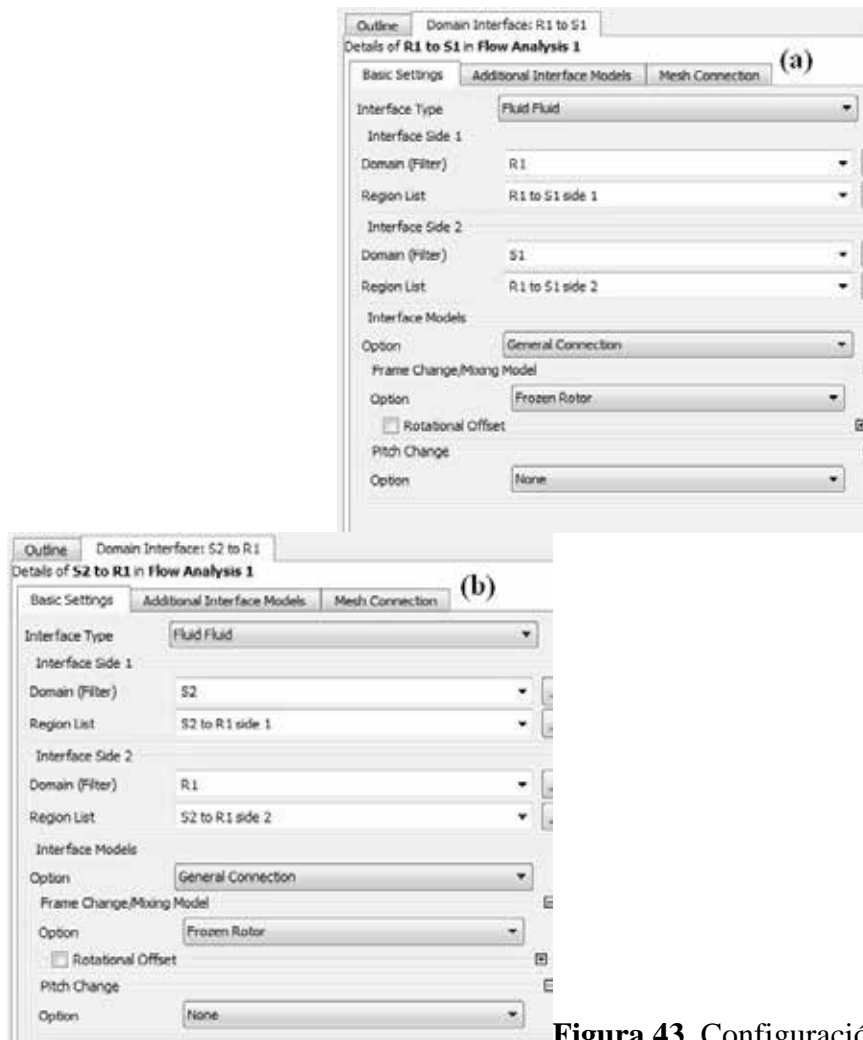


Figura 43. Configuración de las interfaces.

(a) Impulsor-voluta. (b)Succión-impulsor.

Fuente: Cimmarusti y Decán (2019).

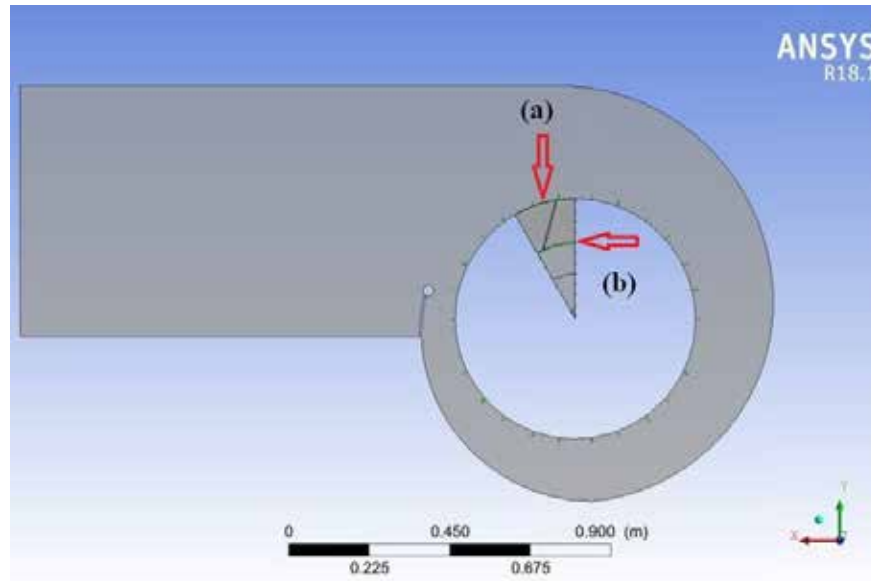


Figura 44. Ubicación de interfaces, vista posterior.

Fuente: Cimmarusti y Decán (2019).

El segundo par de interfaces concierne a las conocidas como periodicidad rotacional, este tipo de interface se establece en los dominios que, con el fin de ahorrar tiempo de iteración, se seccionan en porciones simétricas donde se estudiará uno solo de estos cuerpos para, posteriormente, replicar los resultados obtenidos en esa sección de fluido alrededor de un eje hasta cerrar una circunferencia. Para emplear este tipo de interfaz de manera conveniente, es necesario que el dominio donde se aplique esta conexión posea dos superficies de geometría coincidente y que tengan una inclinación así, si se extiende imaginariamente, estas crucen generando una línea coincidente con el eje de rotación.

Los dominios que competen a la succión y al impulsor cumplen con estas características. Entonces, para aprovechar el ahorro de tiempo computacional, son configurados con la interfaz antes descrita. . (ver figura 45y 46)

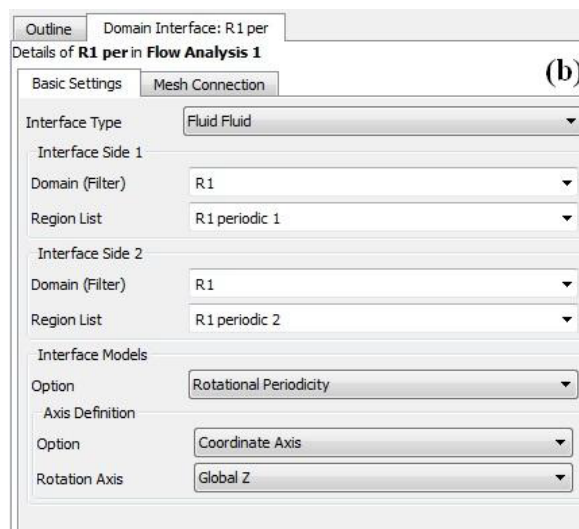
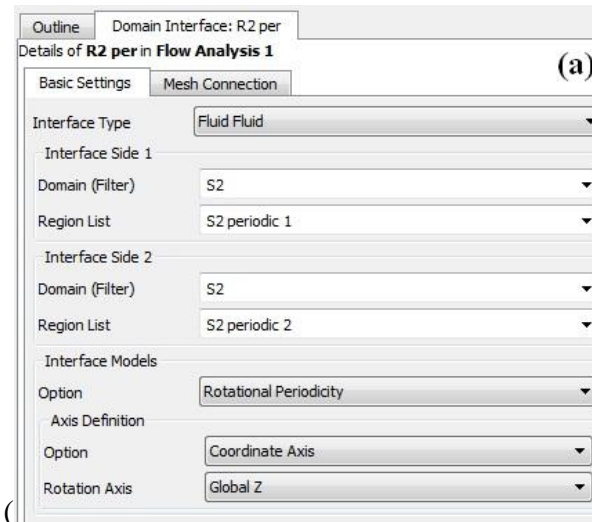


Figura 45. Configuración de periodicidades rotacionales. (a) Dominio de succión. (b) Dominio del impulsor.

Fuente: Cimmarusti y Decán (2019).

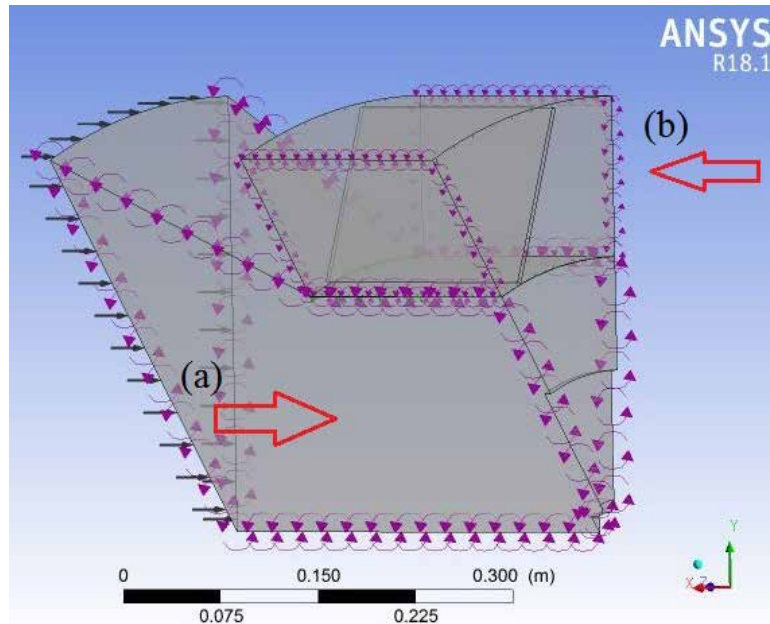


Figura 46. Periodicidades rotacionales. (a) Dominio de succión. (b) Dominio de impulsor.

Fuente: Cimmarusti y Decán (2019).

4.3.4.2 Especificación de las condiciones de borde

Con el fin de establecer los valores a partir de los cuales se resuelven las ecuaciones de gobierno, se debe asignar a cada superficie las propiedades conocidas de cada una de ellas. De tal modo, esta etapa consiste en fijar las condiciones de borde a las distintas superficies que constituyen cada dominio.

En relación a esto último, los dominios estacionarios, la succión y voluta, poseen un total de cuatro regiones con condiciones de borde. Estas comprenden: las paredes estacionarias, descritas como “S1 wall” para la voluta y “S2 wall” para la succión, la entrada, configurada en el dominio de la succión, y por último la salida, configurada en el dominio de la voluta. . (ver figura 47)

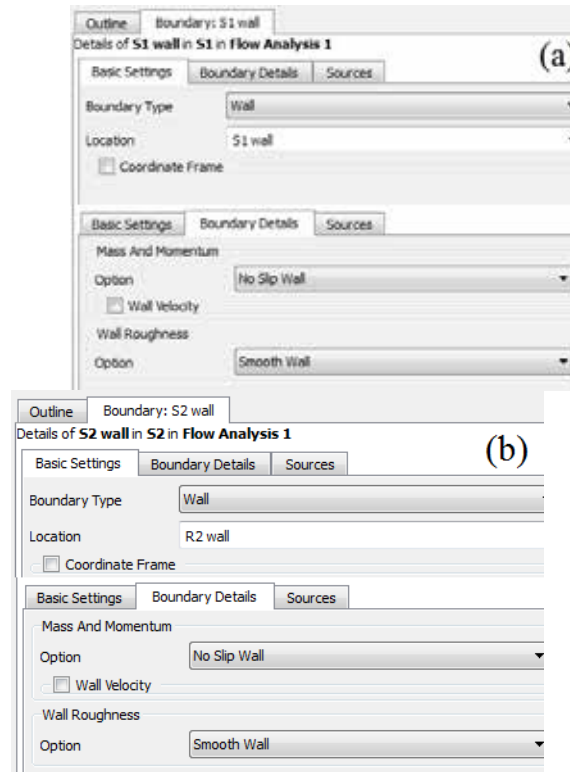


Figura 47. Condiciones de borde de los dominios estacionarios. (a) Dominio voluta. (b) Dominio succión.

Fuente: Cimmarusti y Decán (2019).

Para efectuar las condiciones en la entrada y la salida, se comienza estableciendo el sentido del flujo y alguna propiedad característica de la región a tratar. En efecto de esta investigación, se utilizó la presión total en la entrada y flujo másico en la salida como características del flujo, como se muestra en las figuras 48 y 49. Por medio de la información suministrada por el fabricante, se tomaron en cuenta tres caudales reales y dos caudales seleccionados arbitrariamente para estudiar el comportamiento en condiciones inusuales, entonces, se procede a realizar la tabla 1 donde se destacan los distintos caudales a manejar, indicando así las condiciones de borde aplicadas.

Tabla 1. Propiedades de entrada y salida a distintos caudales.

Caudal	Entrada	Salida
Q ()	Pt (atm)	()
4.3844	1	5.217
3.7212	1	4.428
3.0336	1	3.610
5.3942	1	6.500
6.6390	1	8

Fuente: Cimmarusti y Decán (2019).

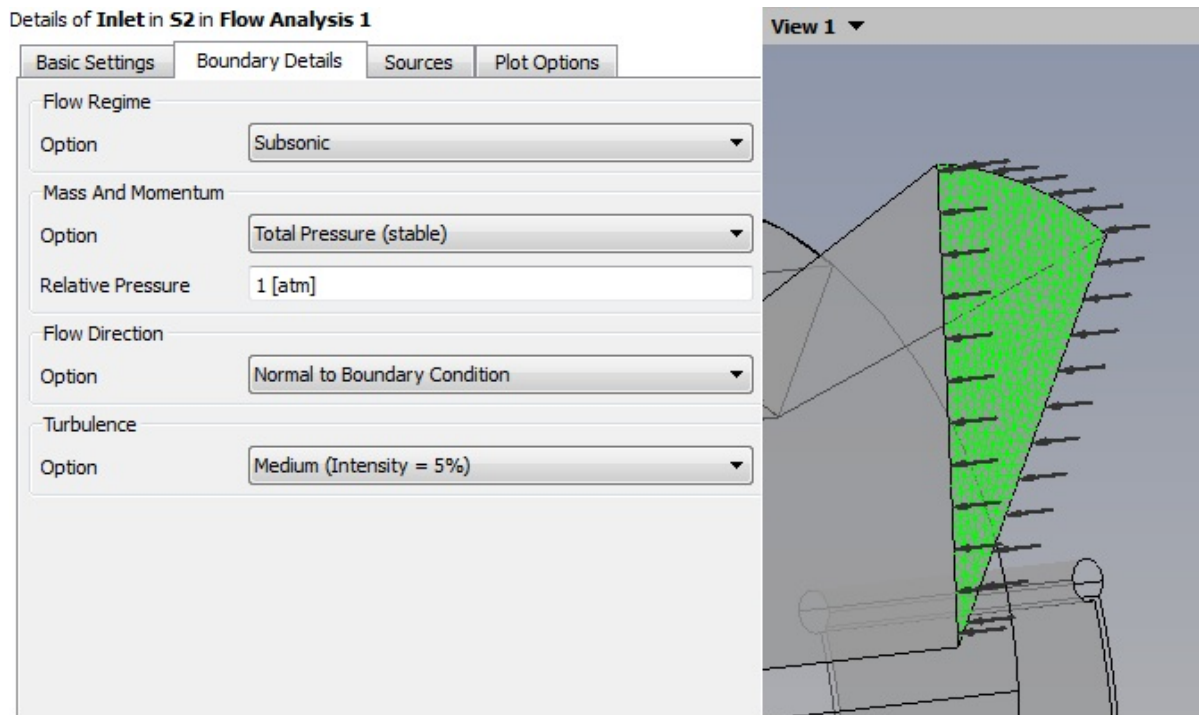


Figura 48. Condición de borde de entrada.

Fuente: Cimmarusti y Decán (2019).

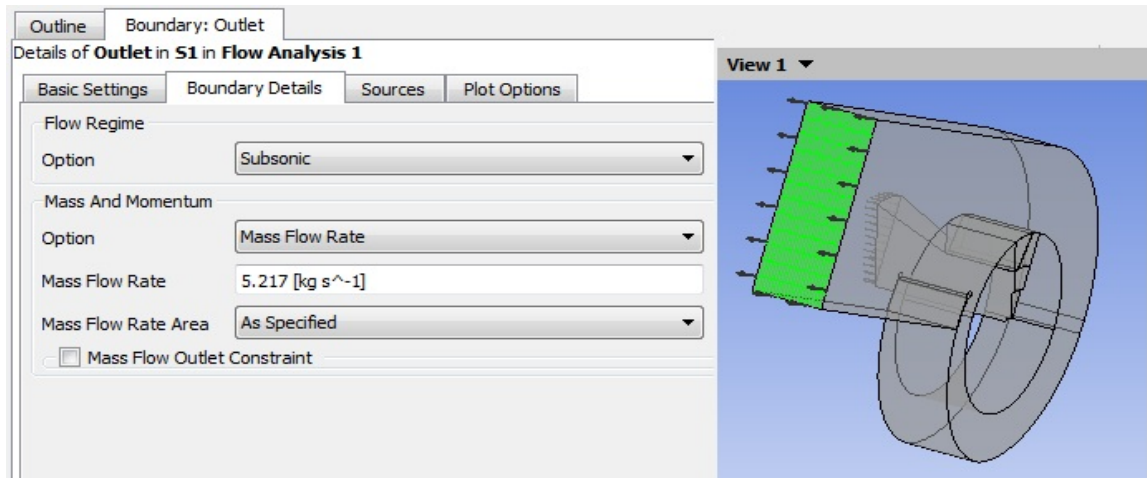


Figura 49. Condición de borde de salida.

Fuente: Cimmarusti y Decán (2019).

Por su parte, el dominio del impulsor posee una única configuración de condición de borde, es la que respecta a todas las superficies que no se encuentran vinculadas a interfaces y son consideradas como paredes sólidas del rodete. Esta condición de borde de pared no se le fija una velocidad de rotación a pesar de ser esta una pared rotativa, ya que esta velocidad está especificada como una condición en el dominio del impulsor, automáticamente se asume esta pared con la misma velocidad de rotación. (ver figura 50)

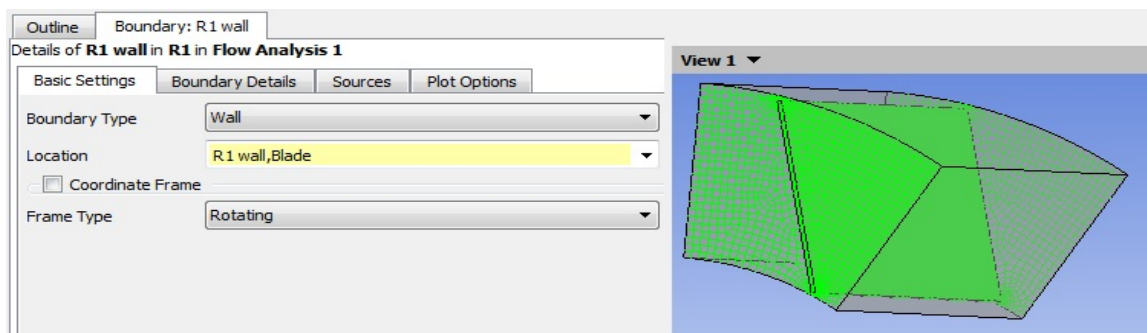


Figura 50. Condición de borde en el impulsor.

Fuente: Cimmarusti y Decán (2019).

4.3.4.3 Especificación de los criterios de convergencia

En esta fase se establece la configuración de los parámetros específicos que determinarán la forma en la cual se realizará la ejecución empleada por la aplicación “CFX solver”, obteniendo resultados con alto grado de confiabilidad permitiendo precisamente formular una comparación con la realidad física.

Uno de los criterios de convergencia determina el número de iteraciones que deben ser ejecutadas por la herramienta computacional para obtener la solución numérica de las ecuaciones de gobierno, que comprende la ecuación de continuidad y la ecuación de momento, así como también las solución correspondiente al modelo de turbulencia. La plataforma de ANSYS® otorga un manual para el usuario, en este afirma que la cantidad entre 50 y 100 iteraciones son suficientes para resolver la mayoría de las simulaciones. Basados en el criterio recomendado, se procede a configurar como intervalo de trabajo un número de 50 iteraciones como mínimo y 150 iteraciones como máximo, de esta forma aseguramos un resultado confiable.

El siguiente criterio a aplicar para conseguir la solución, permite determinar el máximo error aceptable según la precisión necesaria. Este es configurado al establecer el valor de los residuos denominados “Raíz Cuadrada Media” o “RMS”, por siglas en inglés “Root Mean Square”. Una vez más, el valor recomendado, y utilizado por defecto en el software, es de 1×10^{-5} , pues es considerado un valor apto y preciso a nivel ingenieril. La configuración de los criterios expuestos puede ser observada en la figura 51.

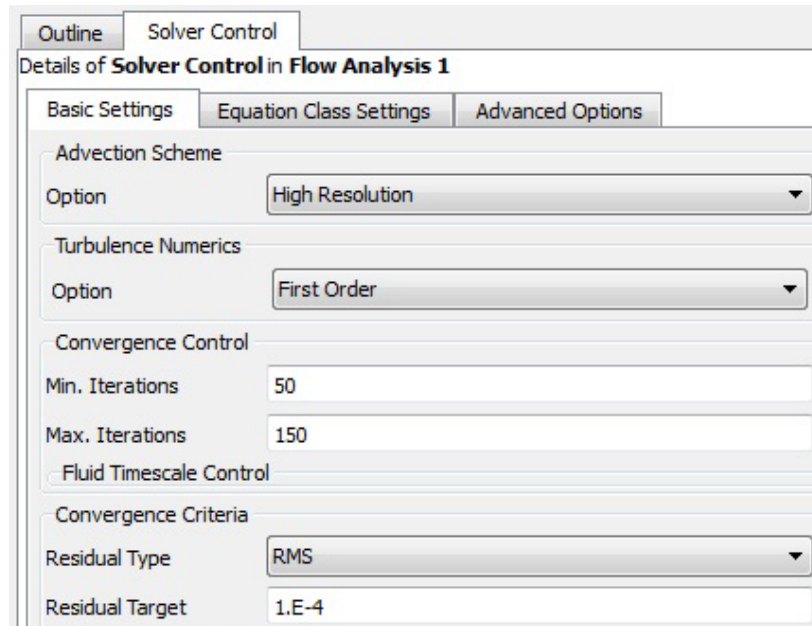


Figura 51. Configuración de los criterios de convergencia.

Fuente: Cimmarusti y Decán (2019).

4.3.5 Simulación

Una vez concluidas todas las configuraciones necesarias, se comienza con el proceso de iteración de las ecuaciones de gobierno, según los modelos matemáticos escogidos, partiendo de las condiciones de bordes especificadas y pretendiendo alcanzar cada uno de los criterios de convergencia establecidos. Para comenzar la resolución de las ecuaciones y la construcción de las curvas indicativas del error relativo de estas, se debe iniciar la herramienta “CFX solver”, la cual se encuentra ubicada debajo de la celda donde se realizó el “Setup”, en la casilla denominada “Solution”, como muestra la figura 52.

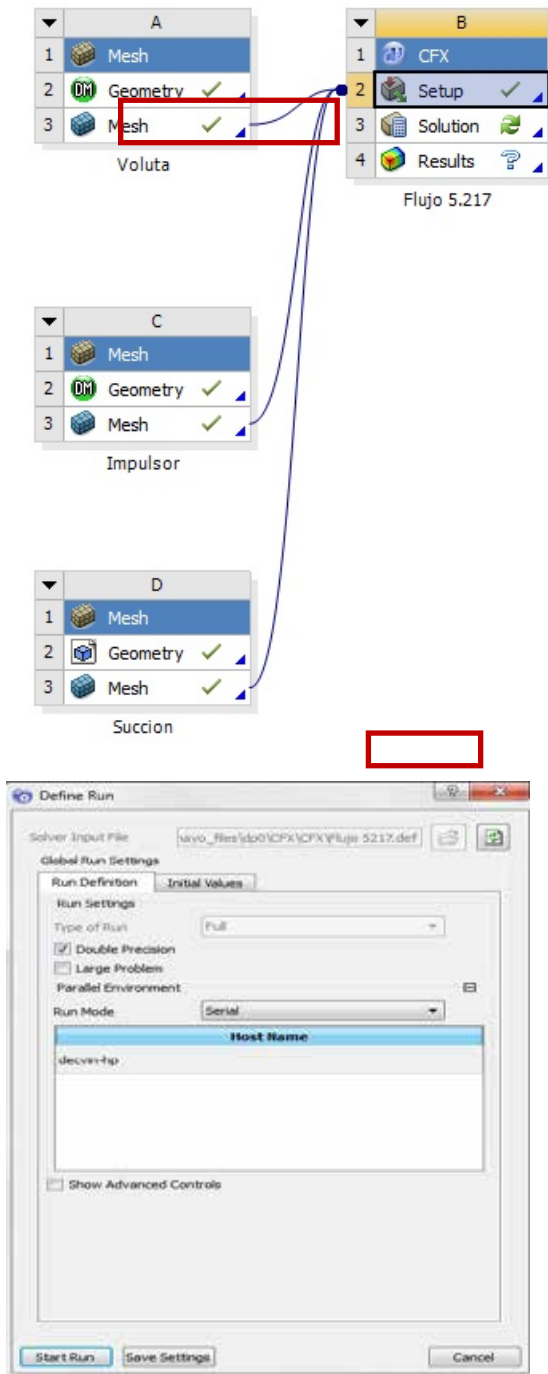
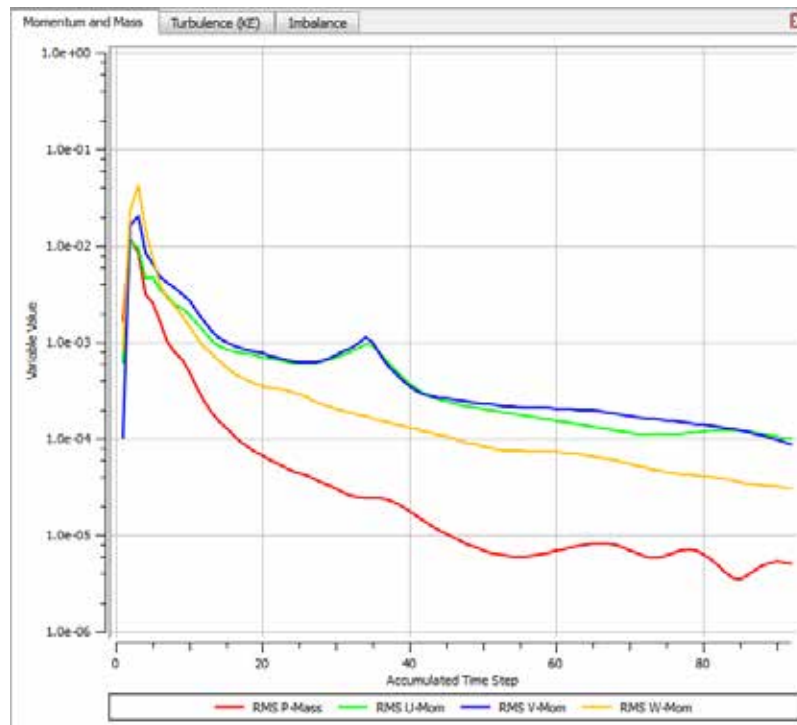


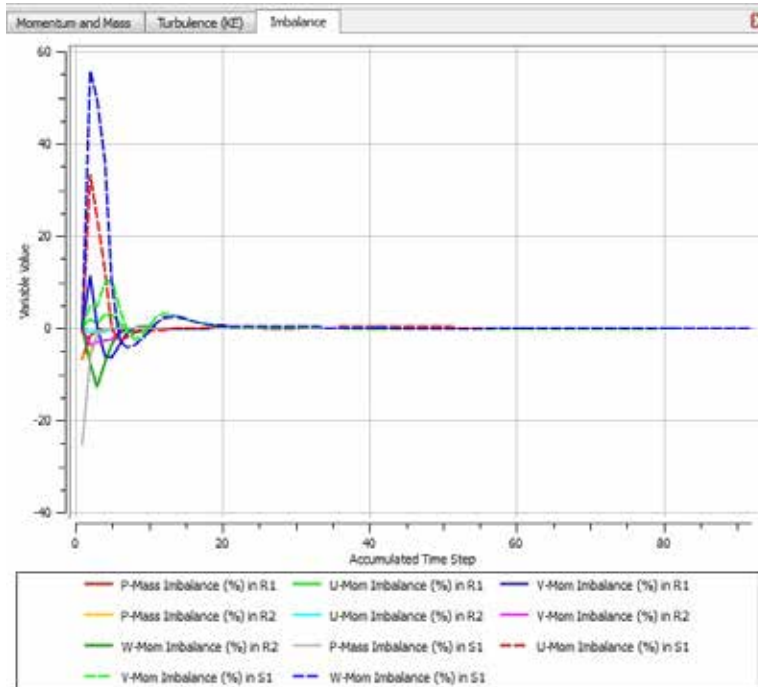
Figura 52. Interfaz de CFX Solver.
Fuente: Cimmarusti y Decán (2019).

Inmediatamente después de dar click en la pestaña de “Solution” aparecerá un cuadro llamado “Define run”, es aquí donde se comenzará finalmente con la solución de las ecuaciones establecidas una vez comencemos a correr la aplicación. Esta herramienta indicará gráficamente como es el proceso de iteración con respecto a las condiciones establecidas para luego detenerse seguidamente de haber alcanzado los criterios de convergencia. (ver gráfico 1 y 2)



Gráfica 1. Curva de error relativo de las ecuaciones de momento y masa.

Fuente: Cimmarusti y Decán (2019).



Gráfica 2. Curva de imbalances de las ecuaciones de dominio.

Fuente: Cimmarusti y Decán (2019).

4.4 Obtención los resultados en forma de datos, gráficos o videos para su análisis mediante una herramienta computacional de procedimiento matemático.

Los datos obtenidos son presentados en la celda de resultados de la herramienta de CFX, siendo esta es la última casilla de este módulo. Estos resultados serán mostrados mediante gráficos, curvas y contornos unidimensionales para observar el comportamiento en zonas localizadas a lo largo de los dominios antes definidos considerando el modelo matemático, las condiciones de bordes establecidas y los criterios de convergencia, de esta manera se lograra evaluar el comportamiento del flujo a través del turboventilador seleccionado.

4.4.1 Estadísticas del mallado

Previamente a comenzar con los respectivos cálculos numéricos, la simulación realiza deducciones denominadas estadística de mallado, es relevante que

la discretización geométrica empleada cumpla con los requisitos de calidad del programa, (ver tabla 2) los elementos generados para los distintos dominios se mantuvieron dentro de los rangos que certifican si estos son aptos o no. En otras palabras, se logró cumplir con las siguientes exigencias:

Mínimo ángulo de ortogonalidad: debe ser mayor a 20°.

Máximo factor de expansión: debe ser menor a 20.

Máximo radio de aspecto: debe ser menor a 100.

Tabla 2. Estadísticas del mallado.

Dominio	Mínimo ángulo de ortogonalidad	Máximo factor de expansión	Máximo radio de aspecto	Conclusión
Succión	41.9	14	60	Ok
Voluta	58.1	18	80	Ok
Impulsor	44.5	4	70	Ok
Global	44.5	18	80	Ok

Fuente: Cimmarusti y Decán (2019).

Entonces, se puede observar que la malla empleada para los distintos dominios cuenta con una calidad satisfactoria, esto permite que el software de CFX Solver resuelva las ecuaciones de gobierno en cada nodo arrojando resultados altamente confiables. Con la intención de trabajar con elementos de un tamaño aceptable que describan el comportamiento del flujo de manera confiable, evitando el aumento de recursos computacionales, se estableció un tamaño máximo de elemento, presentándose el tamaño máximo de 0,240880m en el dominio de la voluta. Simultáneamente, con la intención de garantizar que la malla se adaptara de la mejor forma posible a las superficies de geometría compleja, se estableció un tamaño

mínimo de elemento, encontrándose el de menor valor en el dominio del impulsor, siendo este de 5,0331x m. La combinación de estas características ayudó a determinar el número de elementos generados en cada región y aseguran describir el comportamiento del flujo a través del turboventilador. (ver tabla 3)

Tabla 3. Cantidad de nodos y elementos.

Dominio	Cantidad de nodos	Cantidad de elementos			
		Pirámides	Tetraédricos	Prismáticos	Total
Succión	109640	2105	471305	39591	513001
Voluta	18007	167	38776	18989	57932
Impulsor	203688	0	1061224	0	1061224

Fuente: Cimmarusti y Decán (2019).

4.4.2 Convergencia de las simulaciones

Como se ha mencionado con anterioridad, los criterios de convergencia aplicados nos permiten ratificar la calidad y confiabilidad de los análisis numéricos efectuados, especifican si el error conseguido se encuentra entre los rangos aceptables y, de ser correcta esta afirmación, muestra cuando la simulación converge. (ver figura 53)

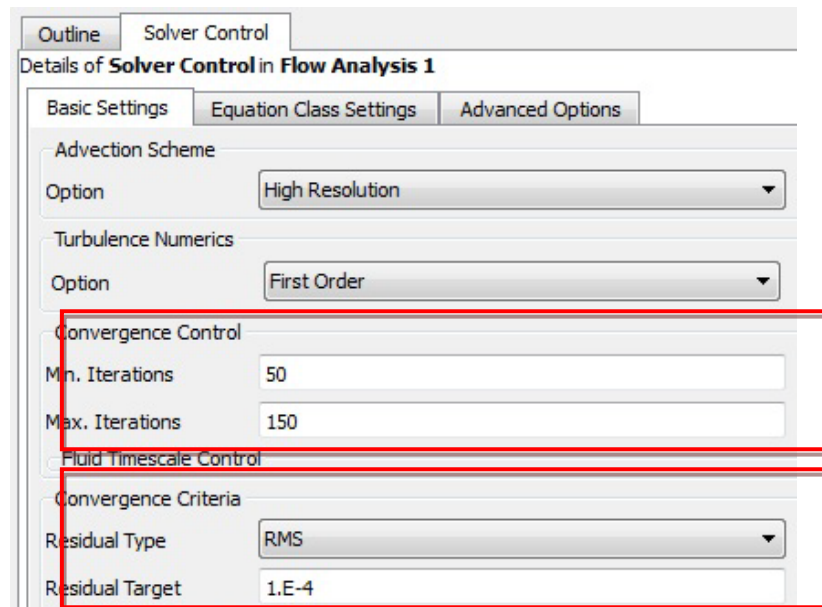


Figura 53. Criterios de convergencia configurados.

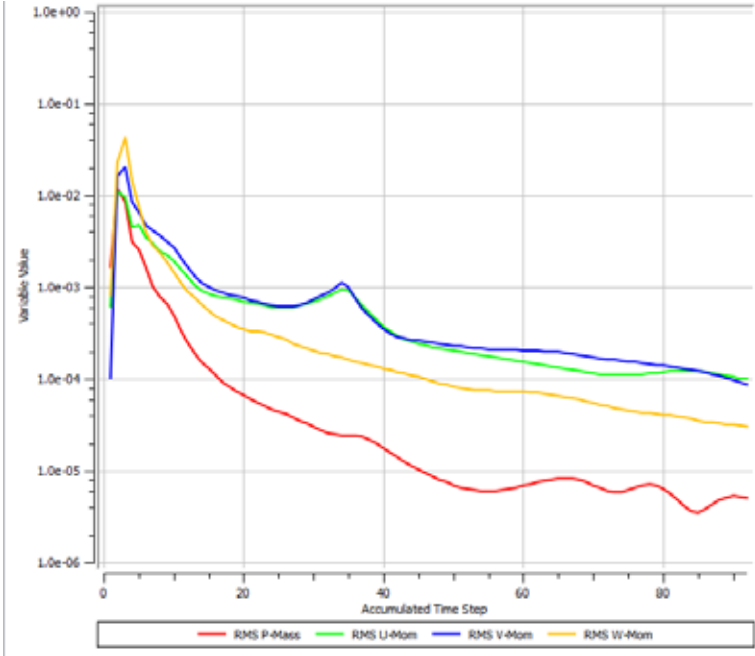
Fuente: Cimmarusti y Decán (2019).

4.4.2.1 Convergencia por criterio RMS (Raíz Cuadrada Media)

En lo que respecta a las ecuaciones de masa, momento y turbulencia, se especificó como error relativo máximo de 1×10^{-4} , valor que es considerado ampliamente preciso para efectos de la aplicación a estudiar. Después de realizar la ejecución de las simulaciones para cada caudal, se obtuvieron las siguientes gráficas.

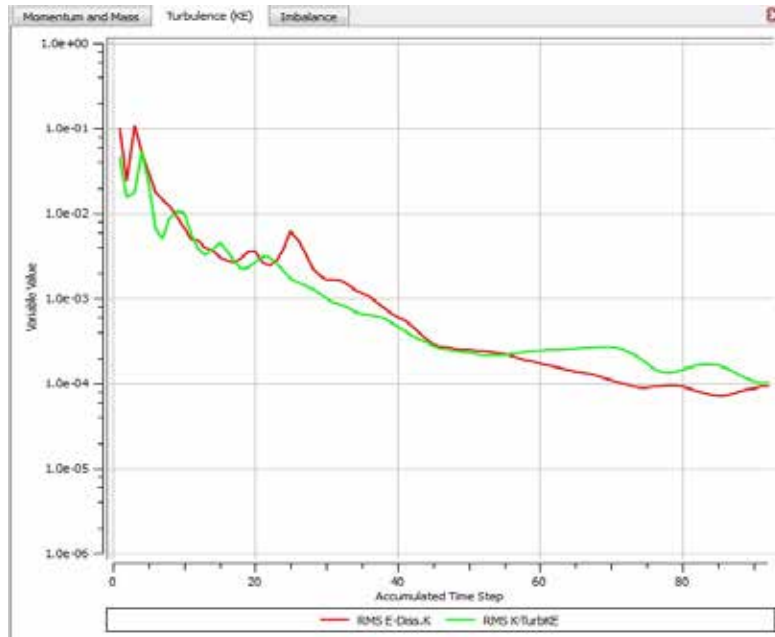
Se observa que para este caudal, en la gráfica 3, las ecuaciones de masa, P-mass, y las ecuaciones de momento, U-Mom, V-mom y W-mom, logran la convergencia en la iteración número 92, este resultado tomó 5 horas, 55 minutos con 41 segundos. De la misma manera, se puede ver en la gráfica 4 el comportamiento de los residuos de las ecuaciones de turbulencia, E-Diss.K y K-TurbKE, estas poseen modelos de transporte propio por lo que la herramienta “CFX Solver” no las evalúa de la misma manera que las de masa y momento, sin embargo, mientras el comportamiento de estas ecuaciones sea el de reducir sus residuos y los valores de

RMS se encuentren cerca de lo establecido, se puede garantizar la precisión de los resultados. (ver gráficas 5 y 6)



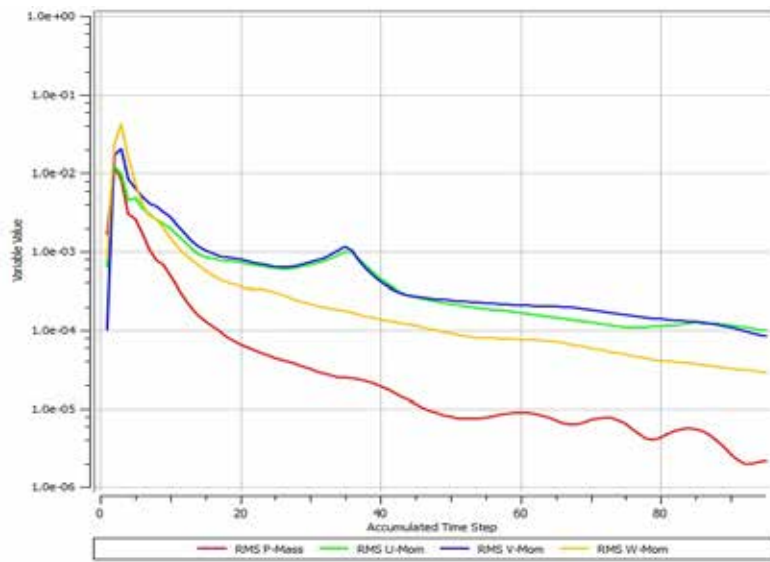
Gráfica 3. Convergencia de las ecuaciones de momento y masa (RMS) para caudal de $=4.3844 \text{ l/s}$

Fuente: Cimmarusti y Decán (2019).



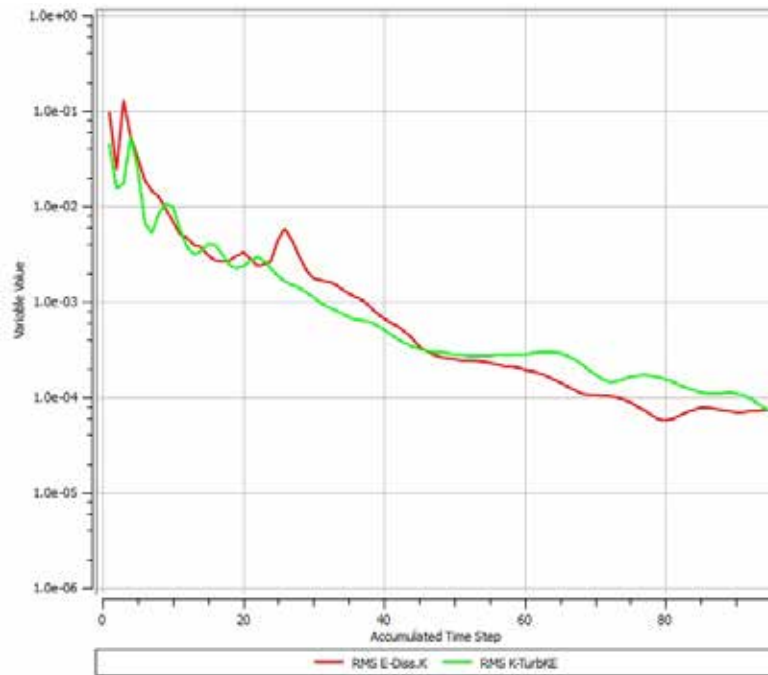
Gráfica 4. Convergencia de las ecuaciones de turbulencia (RMS) para el caudal de $=4.3844 \text{ /s}$

Fuente: Cimmarusti y Decán (2019).



Gráfica 5. Convergencia de las ecuaciones de momento y masa (RMS) para el caudal de $=3.7212 \text{ /s}$

Fuente: Cimmarusti y Decán (2019).

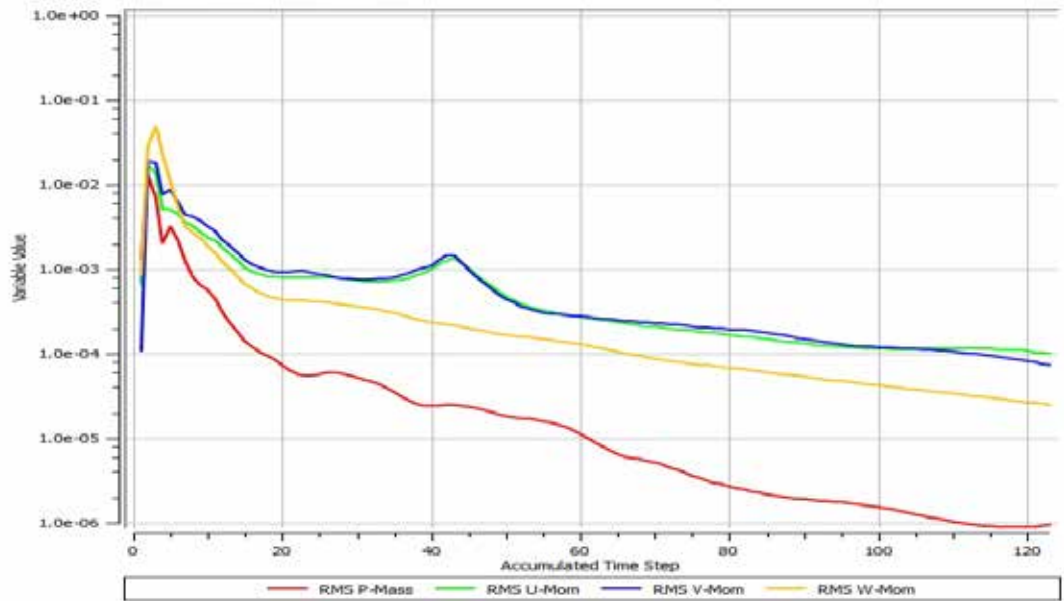


Gráfica 6. Convergencia de las ecuaciones de turbulencia (RMS) para el caudal de $=3.7212$ /s

Fuente: Cimmarusti y Decán (2019).

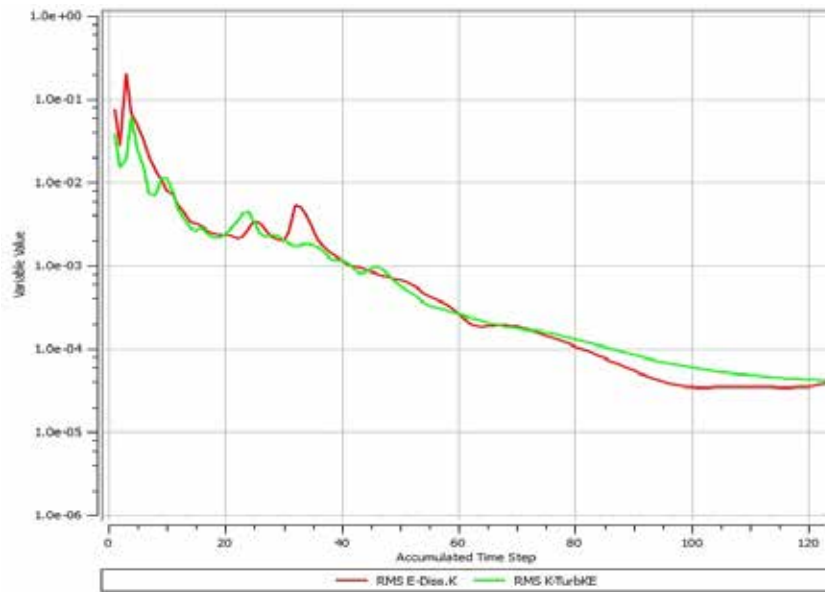
Para el caudal de 3.7212 /s se observa que los residuos de las ecuaciones de masa, P-Mom, y las ecuaciones de momento, (ver gráfica 5) U-Mom, V-Mom, y W-Mom, alcanzan la convergencia en la iteración número 95, este resultado tomó 6 horas, 6 minutos con 24 segundos. Seguidamente, se muestra en la gráfica 6, el comportamiento de las ecuaciones de turbulencia, E-Diss.k y K-TurbKE, para el mismo caudal.

Con respecto al tercer caudal de 3.0336 /s, se observa que los residuos de las ecuaciones de masa, P-Mom, y las ecuaciones de momento, U-Mom, V-Mom, y W-Mom, alcanzan la convergencia a las 123 iteraciones, (ver gráfico 7) este resultado tomó 6 horas, 56 minutos con 17 segundos. Luego se muestra, en la gráfica 8, el comportamiento de las ecuaciones de turbulencia, E-Diss.k y K-TurbKE, para el mismo caudal.



Gráfica 7. Convergencia de las ecuaciones de momento y masa (RMS) para el caudal de $\dot{Q} = 3.0336 \text{ m}^3/\text{s}$

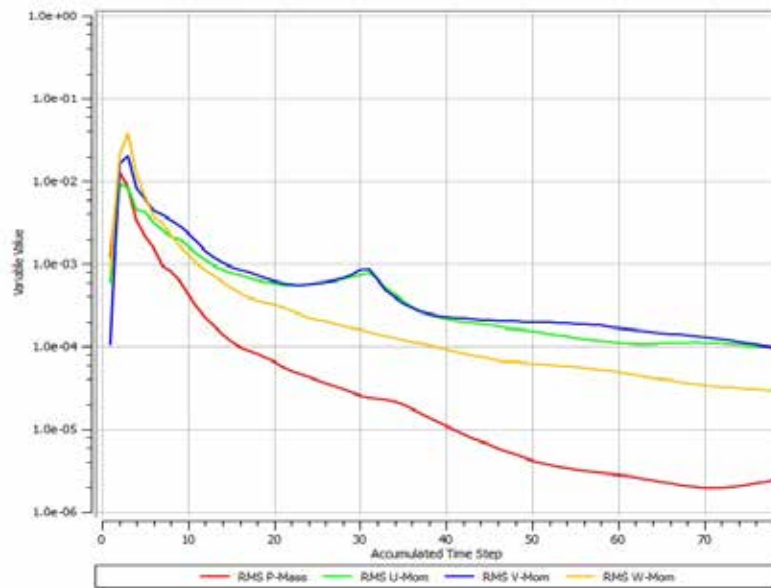
Fuente: Cimmarusti y Decán (2019).



Gráfica 8. Convergencia de las ecuaciones de turbulencia (RMS) para el caudal de $\dot{Q} = 3.0336 \text{ m}^3/\text{s}$

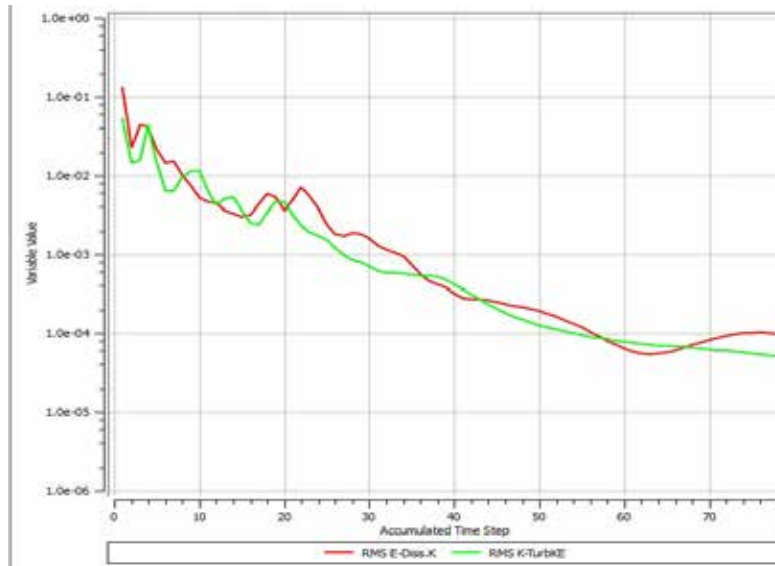
Fuente: Cimmarusti y Decán (2019).

De manera similar, Para el caudal de 5.3942 /s, se observa (ver gráfico 9) que los residuos de las ecuaciones de masa y momento alcanzaron la convergencia en la iteración número 78, tomando un total de 5 horas, 16 minutos con 7 segundos. También se muestra en la gráfica 10, el comportamiento de las ecuaciones de turbulencia, E-Diss.k y K-TurbKE, para el dicho caudal. Por último, consideramos un caudal de 6.6390 /s, para este se observa que las ecuaciones de masa y momento logran la convergencia en la iteración número 69, la más rápida en converger, (ver gráfico 11) con un total de 3 horas, 33 minutos con 32 segundos de duración. De igual manera, se muestra en la gráfica 12, el comportamiento de las ecuaciones de turbulencia, E-Diss.k y K-TurbKE, para el mismo caudal.



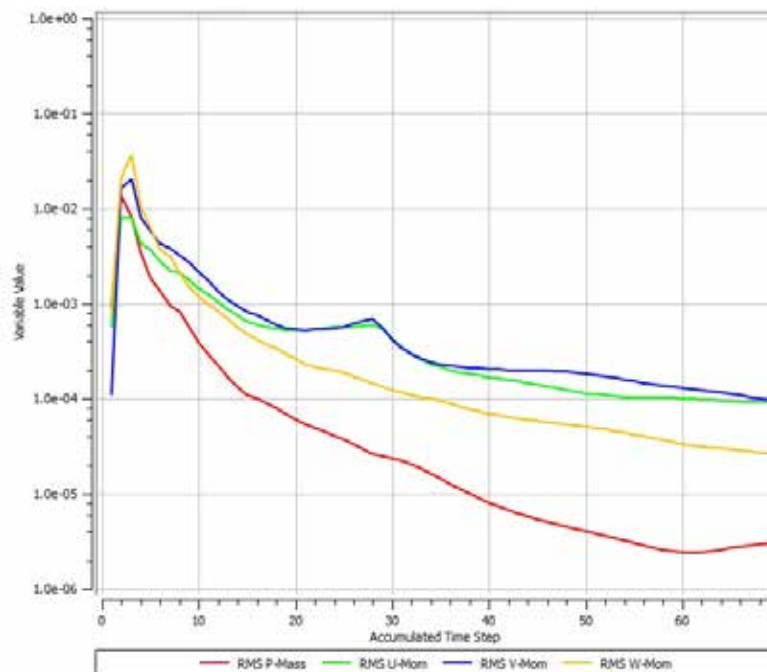
Gráfica 9. Convergencia de las ecuaciones de momento y masa (RMS) para el caudal de =5.3942 /s.

Fuente: Cimmarusti y Decán (2019).



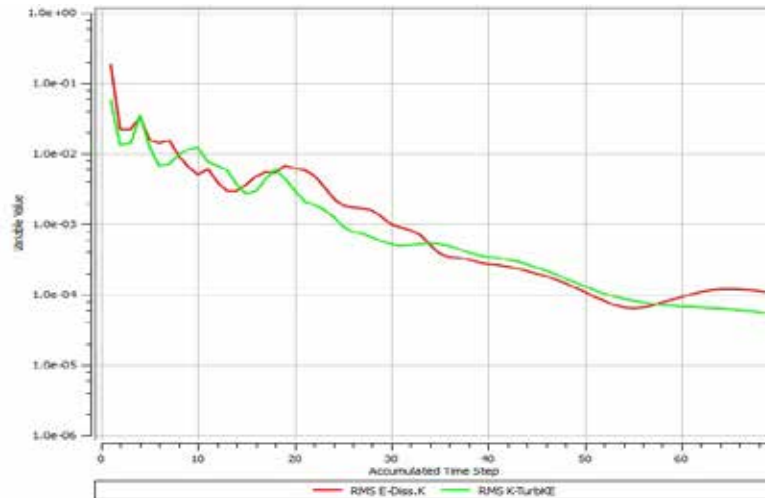
Gráfica 10. Convergencia de las ecuaciones de turbulencia (RMS) para el caudal de $=5.3942$ /s.

Fuente: Cimmarusti y Decán (2019).



Gráfica 11. Convergencia de las ecuaciones de momento y masa (RMS) para el caudal de $=6.6390$ /s.

Fuente: Cimmarusti y Decán (2019).



Gráfica 12. Convergencia de las ecuaciones de turbulencia (RMS) para el caudal de $=6.6390 \text{ l/s}$

Fuente: Cimmarusti y Decán (2019).

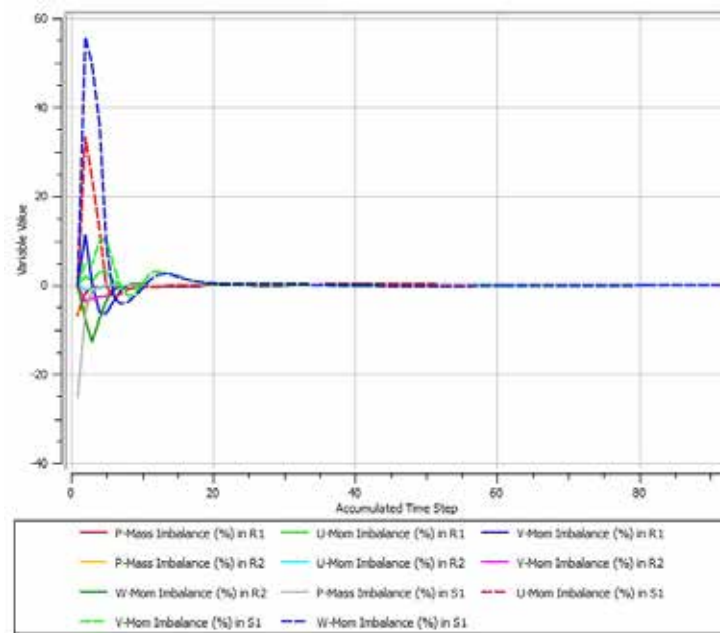
Indiscutiblemente, variar el caudal permite observar que a medida que se disminuye el valor de este, el comportamiento de las ecuaciones para llegar al punto de convergencia establecido requiere un número mayor de iteraciones, consecuentemente, el tiempo de simulación suele ser mayor para los caudales menores.

4.4.2.2 Convergencia por criterio de Imbalances

Este criterio verifica la conservación de las ecuaciones de gobierno, desde la entrada del flujo hasta la salida, partiendo de la premisa de que el imbalance global para cada ecuación sea menor a 1%. Como resultado, se presentarán las gráficas correspondientes a cada uno de los caudales de estudio.

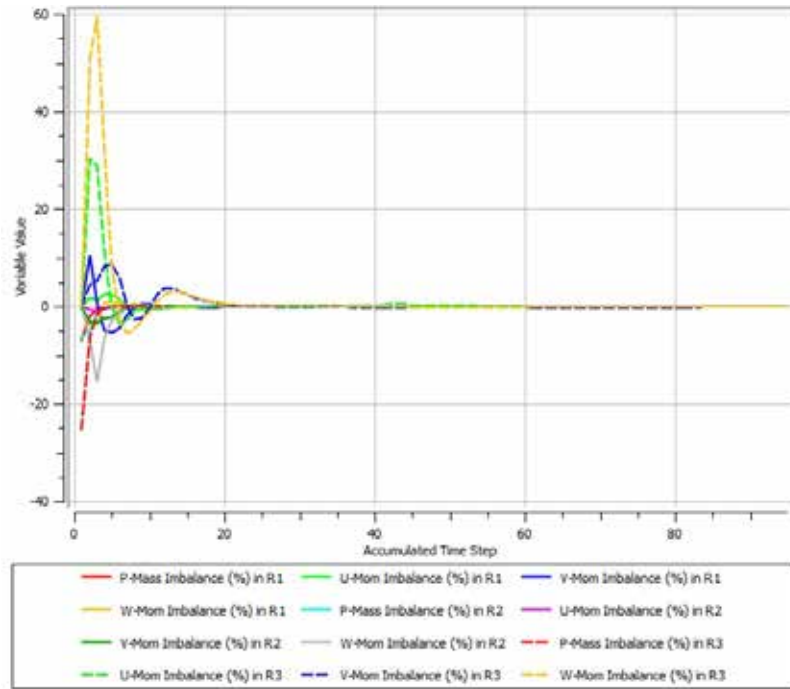
En la gráfica 13, para el primer caudal de 4.3844 l/s , se aprecia que a pesar de tener una conducta bastante estable desde la iteración 20, no es sino hasta la iteración 80 en adelante donde se observa el máximo valor de imbalance, siendo este propio de la ecuación de P-Mass del dominio de la succión con un valor de 0.0001%.

En la siguiente gráfica, correspondiente al caudal de 3.7212 /s, se observa que en la iteración 25 ya se han estabilizado en valores menores a 0.5%, una vez terminadas las iteraciones las ecuaciones de momento U-Mom y V-Mom del dominio de la succión, presentan un imbalance del 0%.



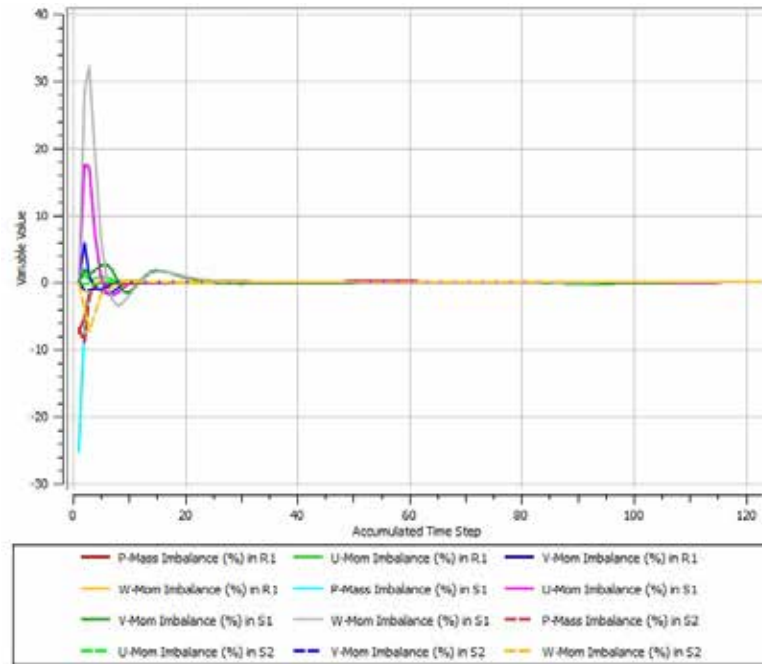
Gráfica 13. Convergencia por el criterio de imbalances, para el caudal =4.3844 /s

Fuente: Cimmarusti y Decán (2019).



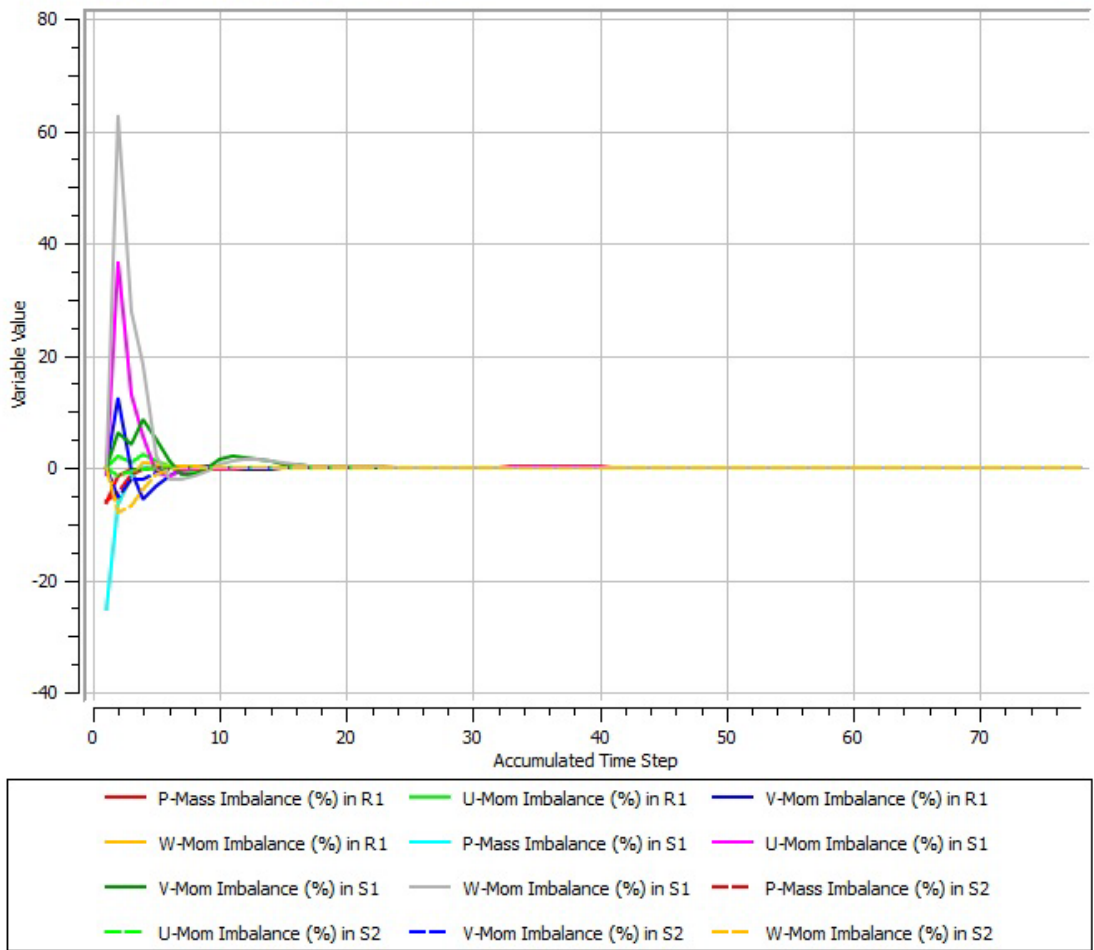
Gráfica 14. Convergencia por el criterio de imbalances, para el caudal $=3.7212 \text{ /s}$

Fuente: Cimmarusti y Decán (2019).



Gráfica 15. Convergencia por el criterio de imbalances, para el caudal $=3.0336 \text{ /s}$

Fuente: Cimmarusti y Decán (2019).

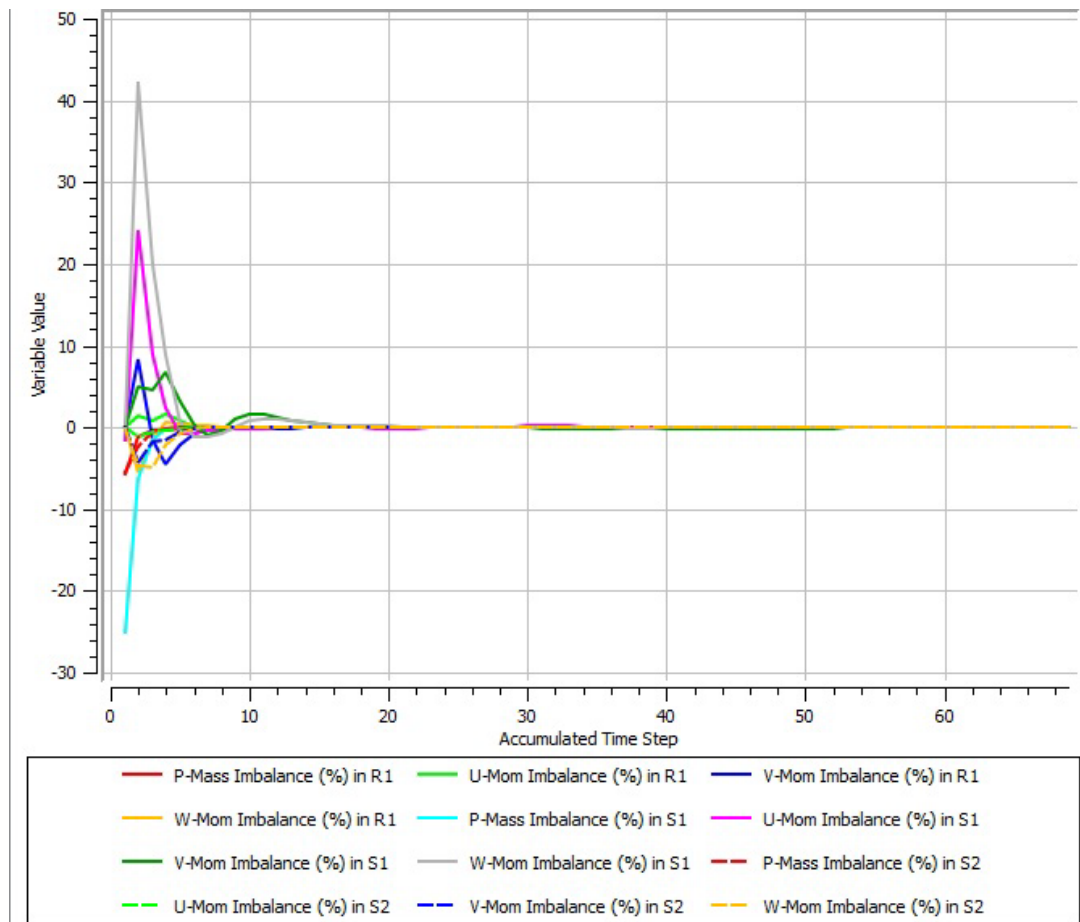


Gráfica 16. Convergencia por el criterio de imbalances, para el caudal $=5.3942 \text{ /s}$

Fuente: Cimmarusti y Decán (2019).

Para el caudal de 3.0336 /s , el valor de imbalance máximo se consigue en las ecuaciones de U-Mom, V-Mom, W-Mom y P-Mass del dominio de la succión, con un valor de 0%, y también en la ecuación de P-Mass correspondiente al dominio de la voluta, de igual forma con un valor de 0%. En esta se observa la estabilización desde la iteración 1150, aproximadamente. Por el otro lado, la gráfica para el caudal de 5.3942 /s , presenta una estabilización desde la iteración 40, terminando con un porcentaje de imbalance de 0% correspondiente a la ecuación de W-Mom del

dominio del impulsor, y el mismo valor para la ecuación de U-Mom del dominio de la succión.



Gráfica 17. Convergencia por el criterio de imbalances, para el caudal $=6.6390 \text{ /s}$

Fuente: Cimmarusti y Decán (2019).

Para esta gráfica 17, los valores se estabilizan poco después de la iteración 55, en ella encontramos el valor máximo de imbalance en la ecuación U-Mom y P-Mass, ambas del dominio de la succión, con un valor de 0.0012%.

Analizando los gráficos presentados, se puede concluir que las ecuaciones de momento y masa se conservan de manera satisfactoria para cada uno de los caudales simulados. Entonces, se puede comprobar que todas las simulaciones realizadas

convergióron según el criterio de imbalance. Dados estos resultados, podemos cerciorar que las simulaciones describen de manera acertada el comportamiento del flujo a través de un turboventilador centrífugo para los diferentes caudales seleccionados.

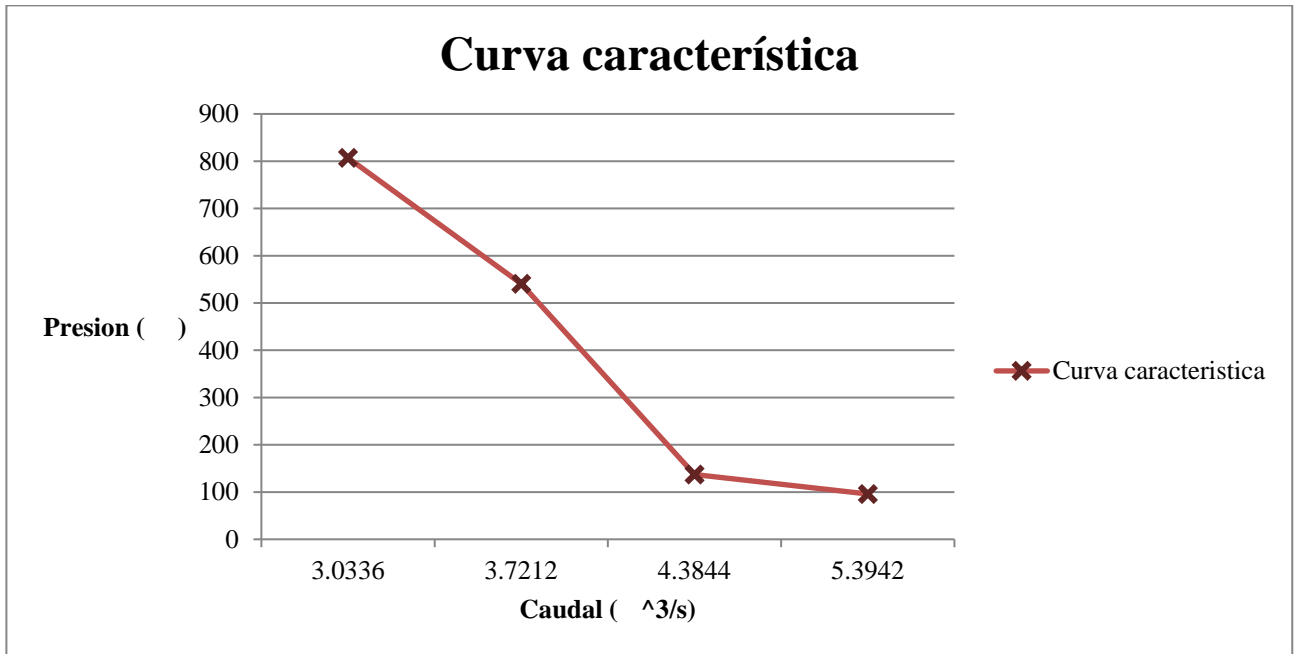
4.4.3 Curva

La curva característica será armada con los resultados obtenidos mediante las simulaciones del turboventilador antes expuestas, estos datos concuerdan con el comportamiento característico de estas máquinas, donde la presión estática disminuye cuando el caudal en el mismo aumenta. En la tabla 4 se presentan los valores considerados para la curva, exceptuando el caudal 1, que fue uno de los escogidos arbitrariamente, ya que el funcionamiento con este valor no cumple con el de una turbomáquina generadora.

Tabla 4. Resultados de la simulación.

Punto	Caudal (/s)	Flujo Másico (kg/s)	P (Pa)
1	6.6390	8	-427
2	5.3942	6.5	95.896
3	4.3844	5.217	136.995
4	3.7212	4.428	540.481
5	3.0336	3.610	807.025

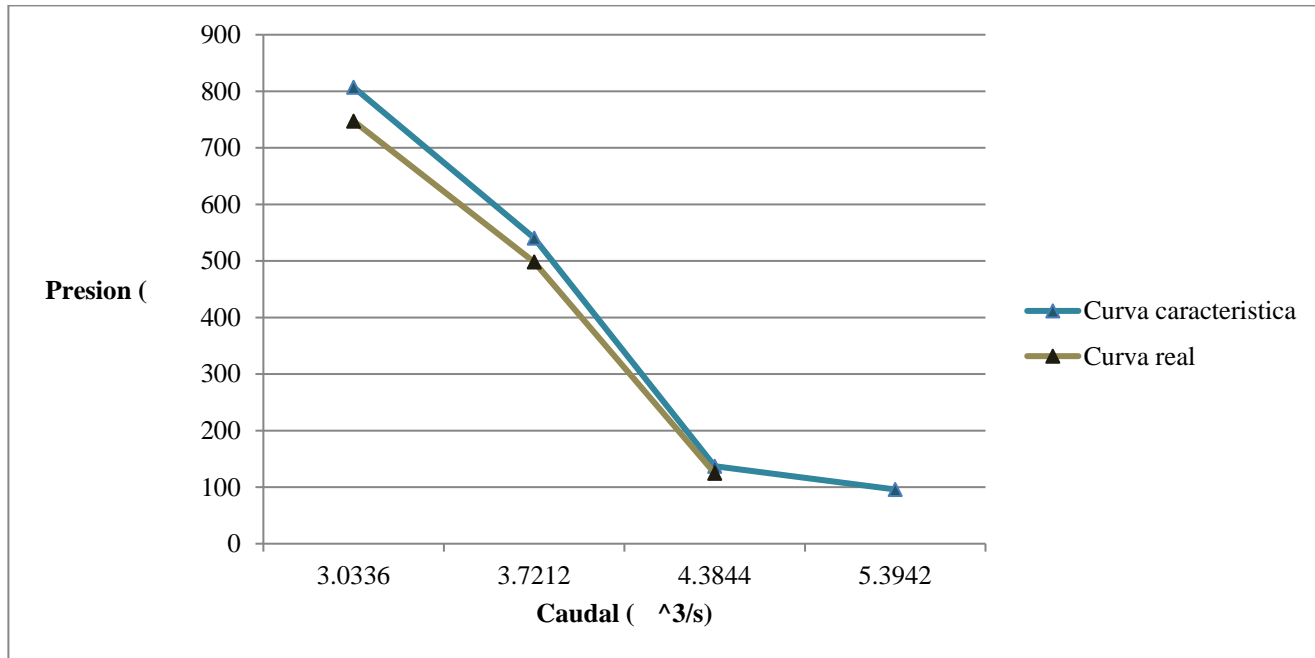
Fuente: Cimmarusti y Decán (2019).



Gráfica 18. Curva característica de la simulación.

Fuente: Cimmarusti y Decán (2019).

Se considera también mostrar la comparación entre las curvas características, la obtenida mediante la simulación y la dada por el fabricante, en la gráfica 19.



Gráfica 19. Comparación de curvas.

Fuente: Cimmarusti y Decán (2019).

Realizando esta comparación gráfica, se puede observar como el comportamiento resultante del análisis numérico es el debido, la curva obtenida posee una conducta bastante similar a la curva real de la turbomáquina seleccionada. Se muestra como a medida que aumenta el caudal, la diferencia de presiones en la entrada y la salida del ventilador disminuyen, pues a mayor caudal se presenta un aumento de velocidad y, por consiguiente, la presión disminuye.

4.4.4 Visualización de resultados

A continuación se mostraran imágenes que permitirán visualizar los diferentes fenómenos que ocurren en el flujo del turboventilador centrífugo seleccionado.(ver figuras 54 a la 56)

4.4.4.1 Contornos de presión

A continuación, en la figura 54, se muestra el comportamiento de la voluta mediante contornos de presión donde se puede observar que la presión es mayor en la sección más pequeña del paso de la voluta y que a su vez que el paso aumenta la presión disminuye cumpliendo el funcionamiento de difusor. Por otra parte, mientras mayor sea el caudal la presión en la salida de la voluta será menor. Sin embargo, en la figura a) el comportamiento de la maquina no es el correspondiente a un ventilador debido al inapropiado caudal seleccionado ya antes mencionado.

Para los alabes el contorno de presión muestra que la mayor presión se encuentra en la parte inferior trasera entre el alabe y el disco del impulsor, debido a que el aire al salir del cono de succión es enviado directamente hacia esta zona. En la figura 55 el alabe corresponde a la sección donde la presión en el conjunto armado es menor por lo tanto la presión en el ataque y salida del alabe mostrado será baja.

En la figura 56, el contorno de presión del dominio de la succión, se puede visualizar que en la entrada del domino la magnitud de la presión es alta y a medida que el caudal es mayor esta magnitud será menor.

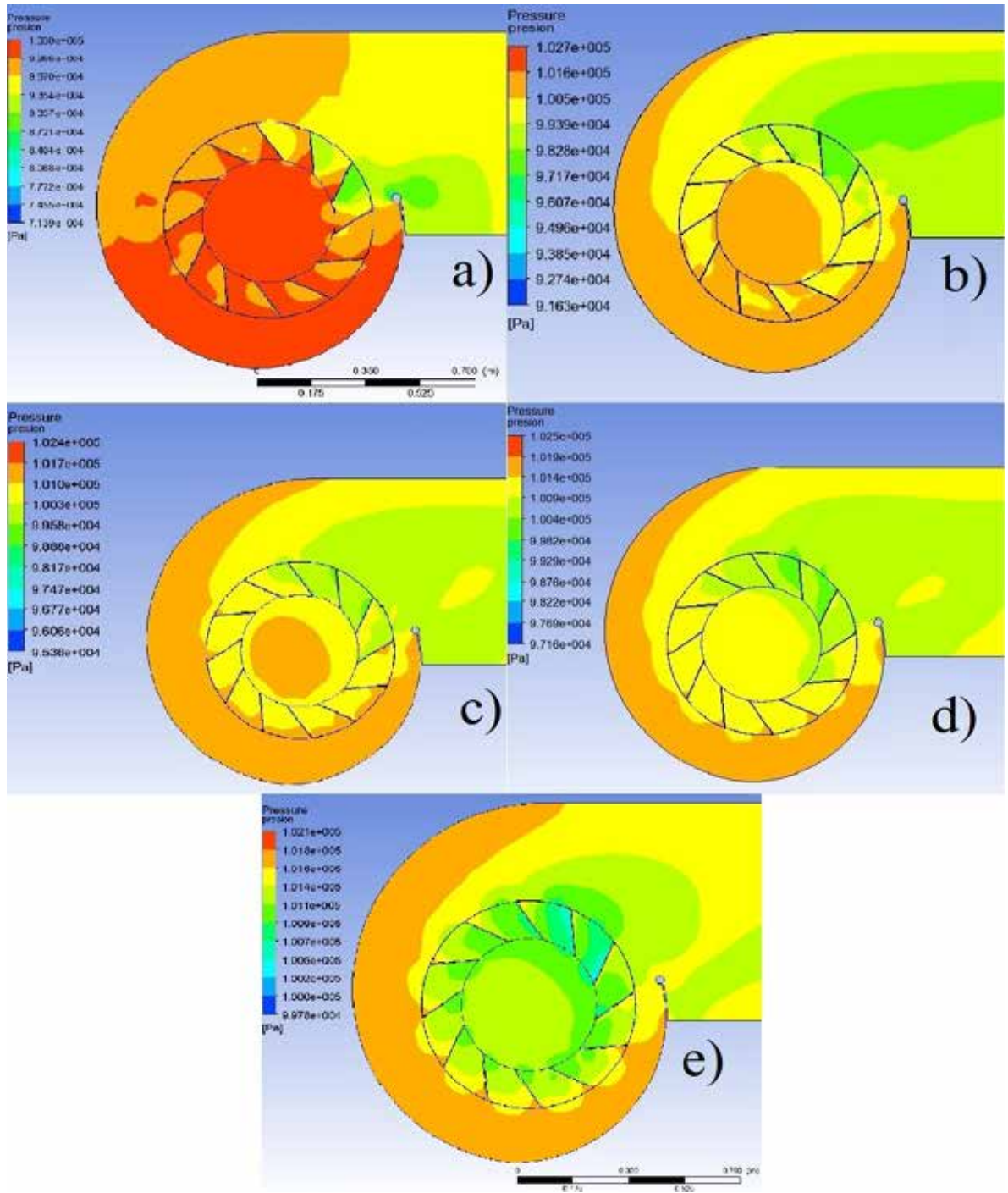


Figura 54. Contorno de presión en el desarrollo de la voluta. (a) 6.6390 (b) 5.3942 (c) 4.3844 (d) 3.7212 (e) 3.0336
Fuente: Cimmarusti y Decán (2019)

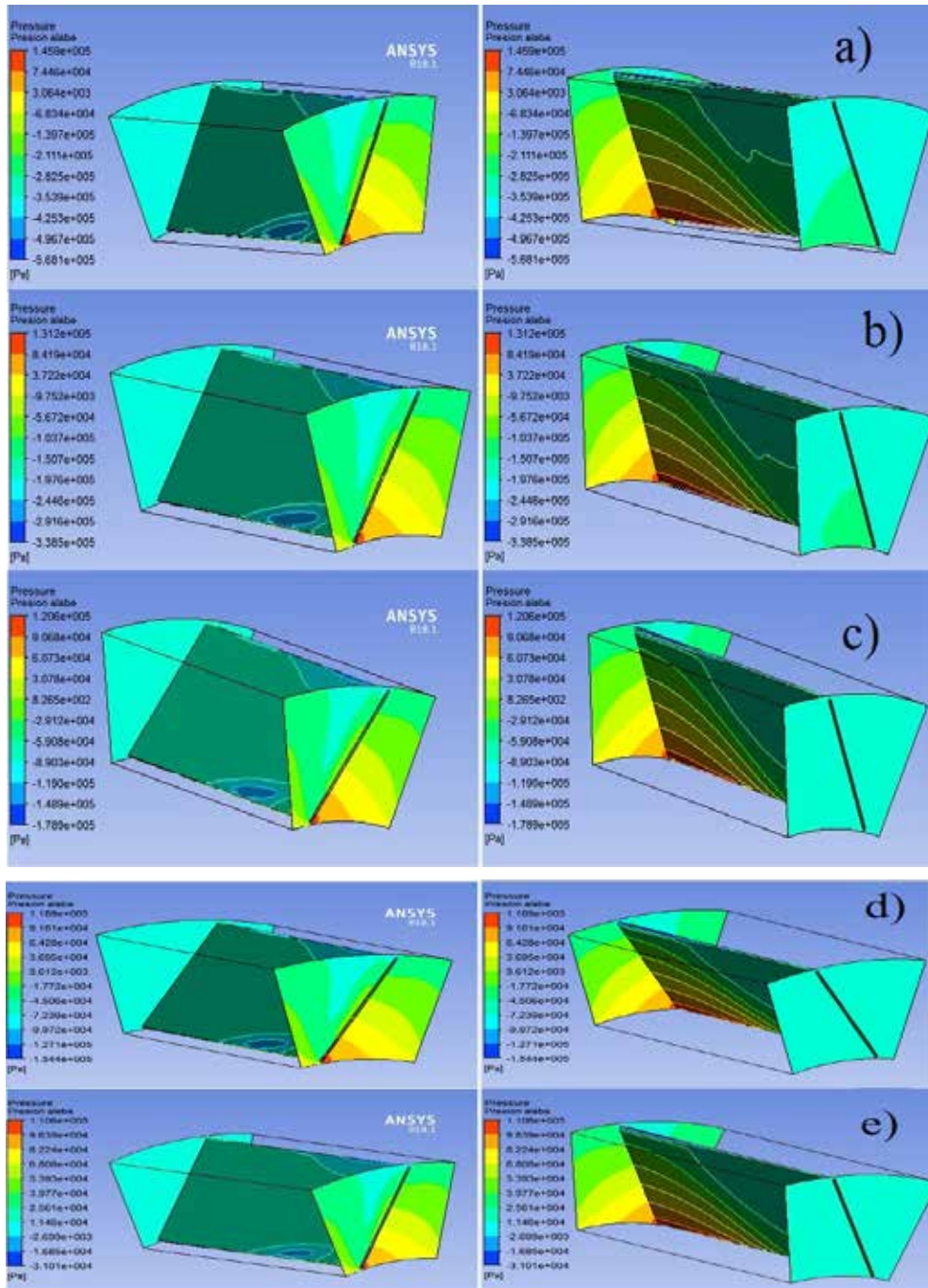


Figura 55. Contorno de presión en el alabe. (a) 6.6390 (b) 5.3942 (c) 4.3844 (d) 3.7212 (e) 3.0336
Fuente: Cimmarusti y Decán (2019)

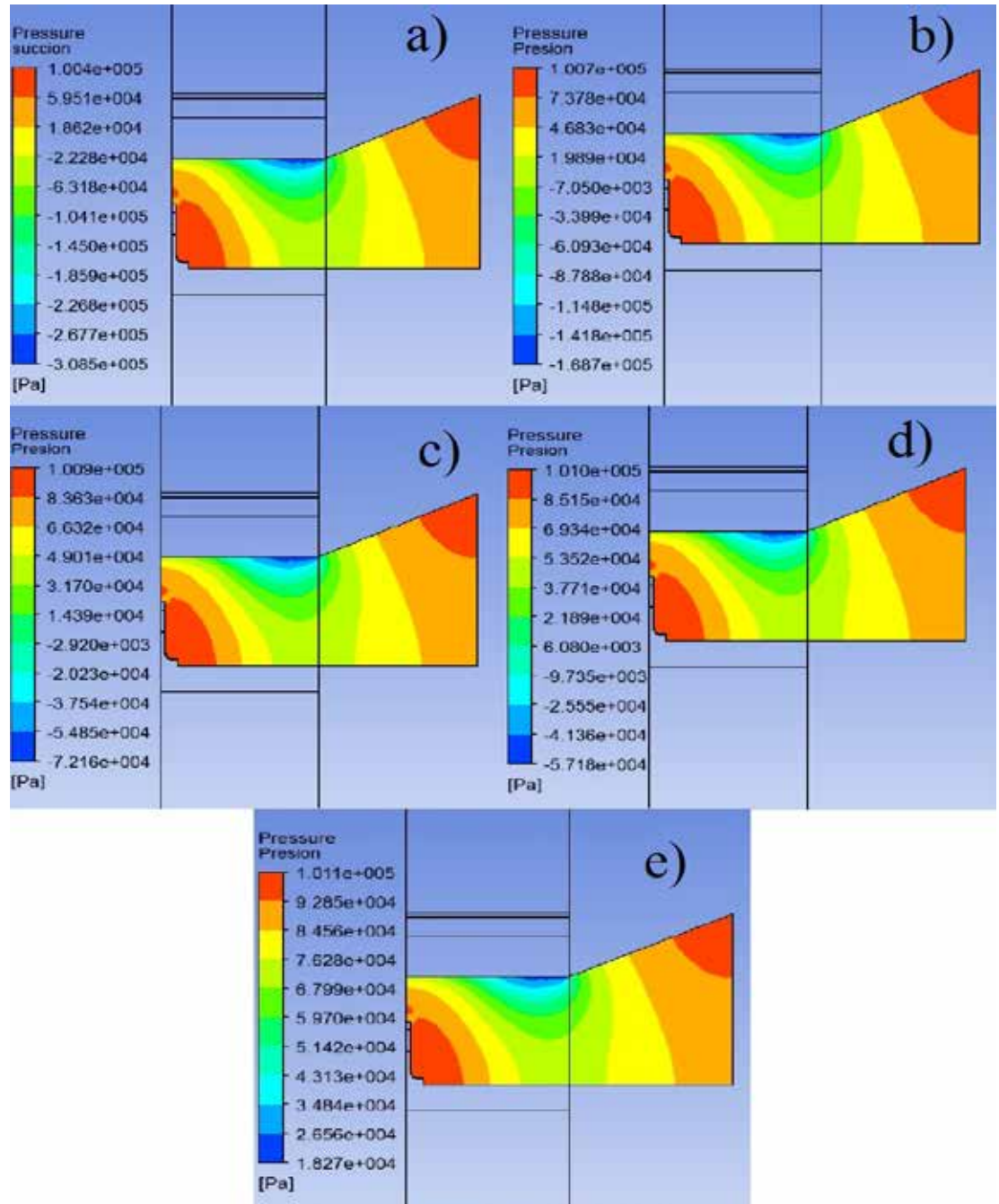


Figura 56. Contorno de presión en durante el desarrollo de la succión. (a) 6.6390 (b) 5.3942 (c) 4.3844 (d) 3.7212 (e) 3.0336
Fuente: Cimmarusti y Decan (2019)

4.4.4.2 Perfiles de velocidad

En la figuras de la 57 a la 60, se muestra el comportamiento de la velocidad para los distintos dominios fluidizados del ventilador centrífugo mediante vectores y contornos obtenidos de la simulación.

En la voluta se puede observar a través de las figuras de vectores, el aumento de velocidad a medida que el área del paso de la voluta aumenta, comportamiento lógico ya que anteriormente en los contornos de presiones se pudo observar como la presión disminuía durante el desarrollo de la voluta por lo que se cumple el principio de Bernoulli y el principio de continuidad de masa, por otra parte en los contornos de velocidades se logra visualizar la capa limite que se generan tanto en los alabes del impulsor como en las paredes de la voluta y de igual manera como se mencionó anteriormente, la figura a) muestra comportamiento de una turbomáquina motora disminuyendo la velocidad del fluido.

Los vectores de velocidad en el impulsor muestran como la velocidad de flujo aumenta a medida que el caudal aumenta, no obstante, la mayor velocidad es alcanzada en una zona específica dicha zona es donde hay menor presencia de presión que está ubicada en la salida de la voluta nuevamente cumpliendo el principio de Bernoulli y el principio de continuidad de masa.

Analizando los resultados de velocidad con respecto a la succión a diferentes caudales se visualizó que el cono de succión cumple el objetivo de comportarse como tobera aumentando la velocidad hasta salir de ella, entrando en el impulsor donde empieza a disminuir hasta ser mínima en la parte final del dominio de succión, ya que en esta zona la presión es máxima. Manteniendo el mismo comportamiento que en los dominios anteriores, que donde disminuye la presión incrementa la velocidad, cumpliendo por tercera vez el principio de Bernoulli y el principio de continuidad de masa además de las leyes de dinámicas de gases.

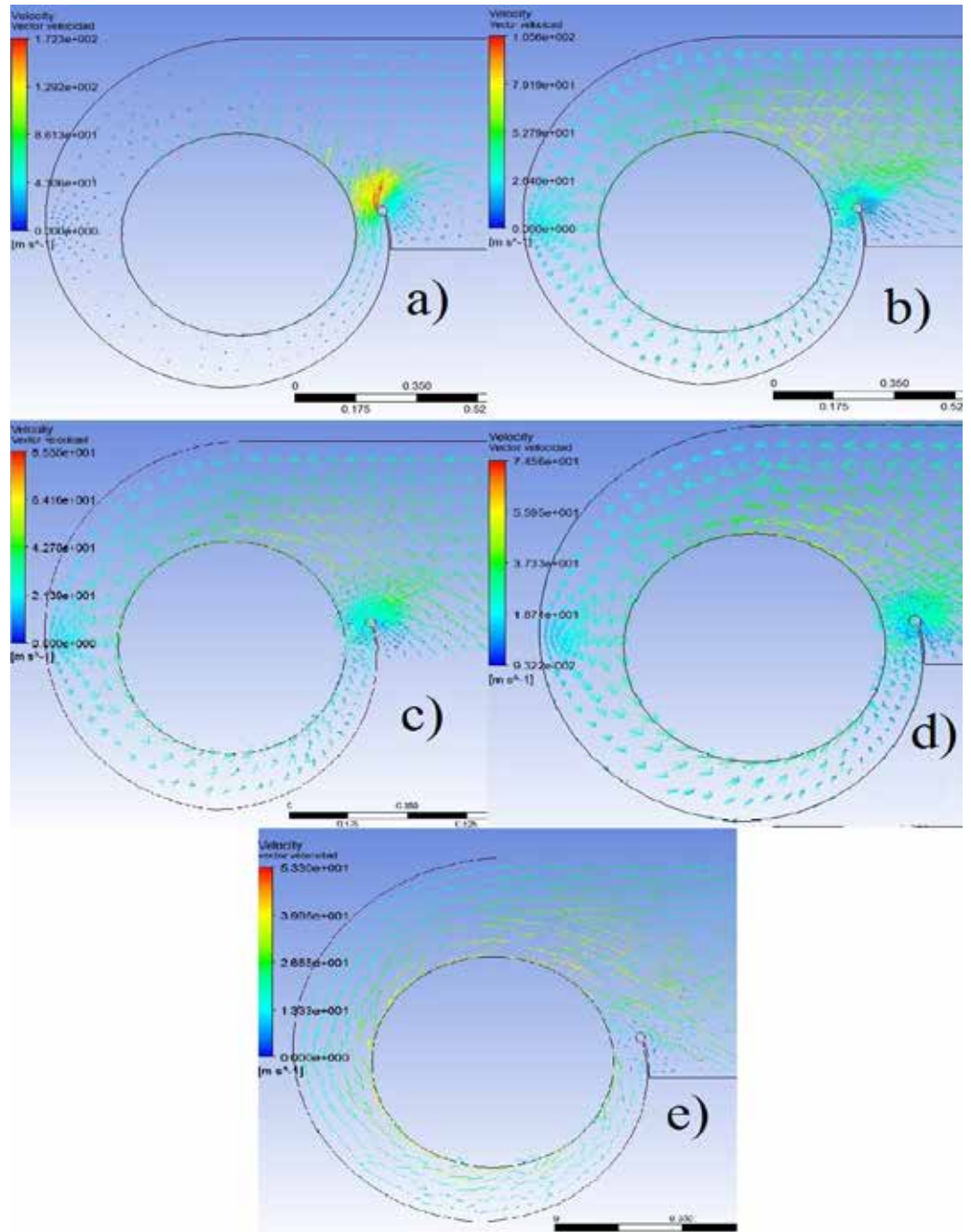


Figura 57. Vectores de velocidad durante el desarrollo del paso de la voluta. (a) 6.6390 (b) 5.3942 (c) 4.3844 (d) 3.7212 (e) 3.0336

Fuente: Cimmarusti y Decan (2019)

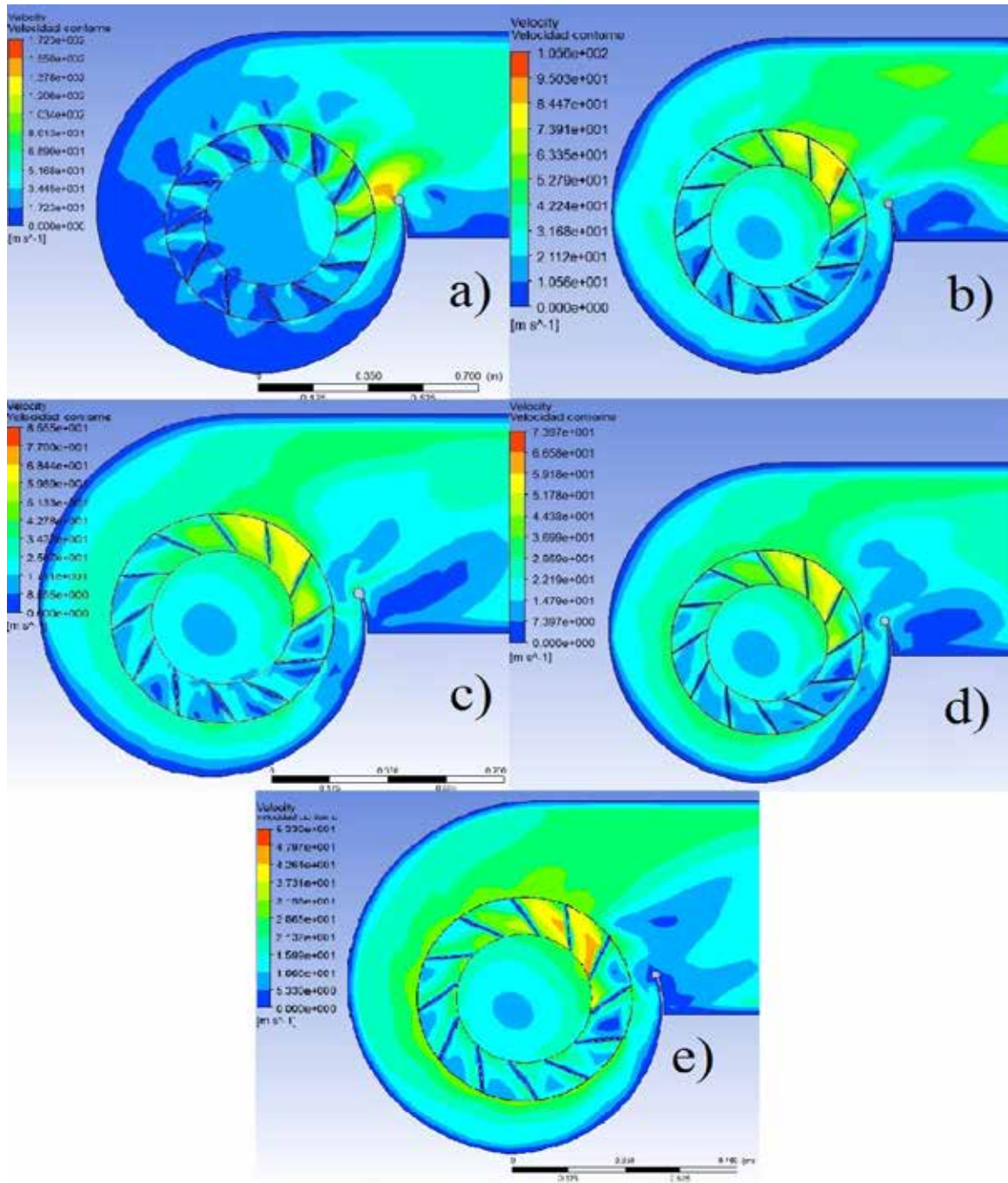


Figura 58. Contorno de velocidad durante el desarrollo del paso de la voluta (a) 6.6390 (b) 5.3942 (c) 4.3844 (d) 3.7212 (e) 3.0336 .

Fuente: Cimmarusti y Decan (2019)

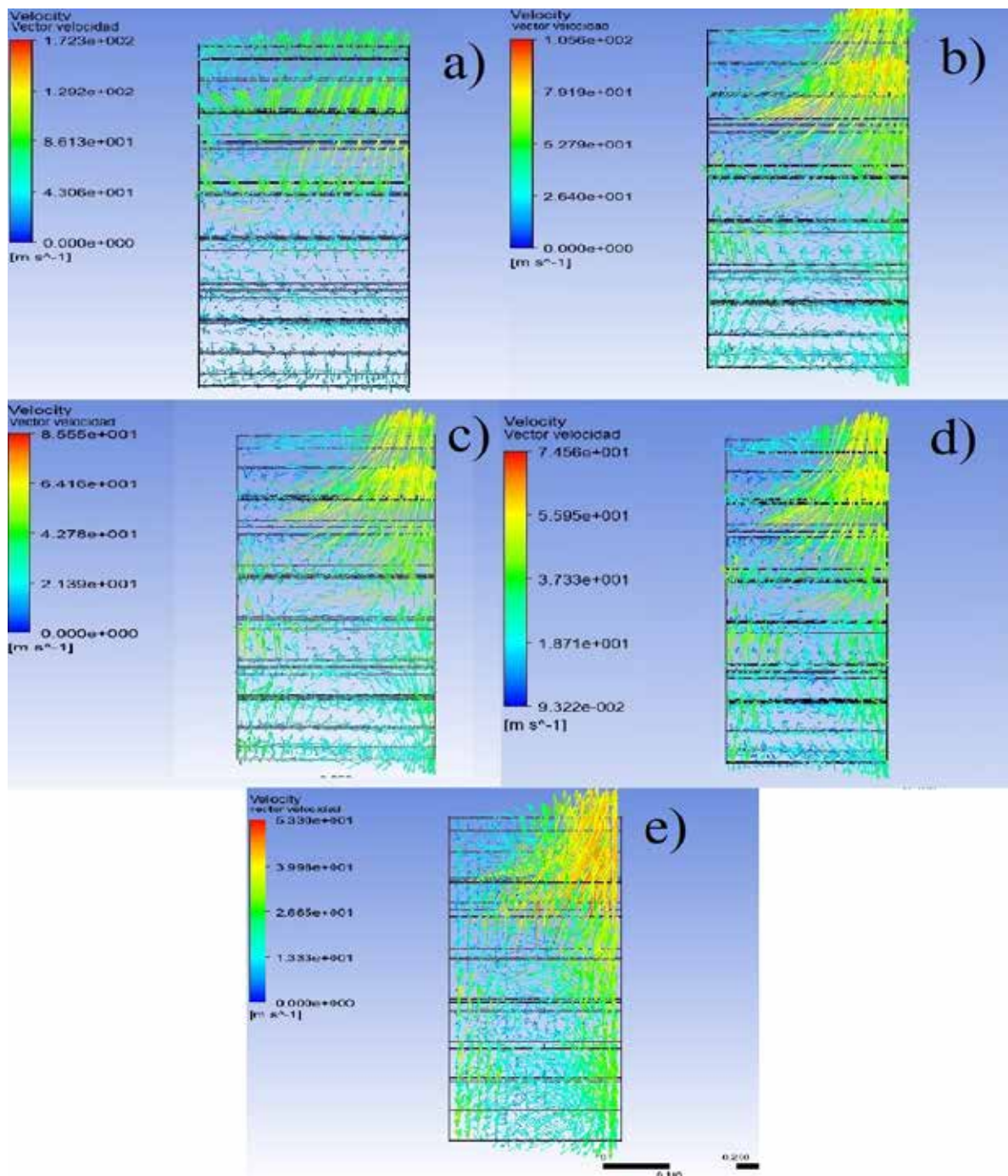


Figura 59. Vector de velocidad durante en el impulsor (a) 6.6390 (b) 5.3942
(c) 4.3844 (d) 3.7212 (e) 3.0336

Fuente: Cimmarusti y Decan (2019)

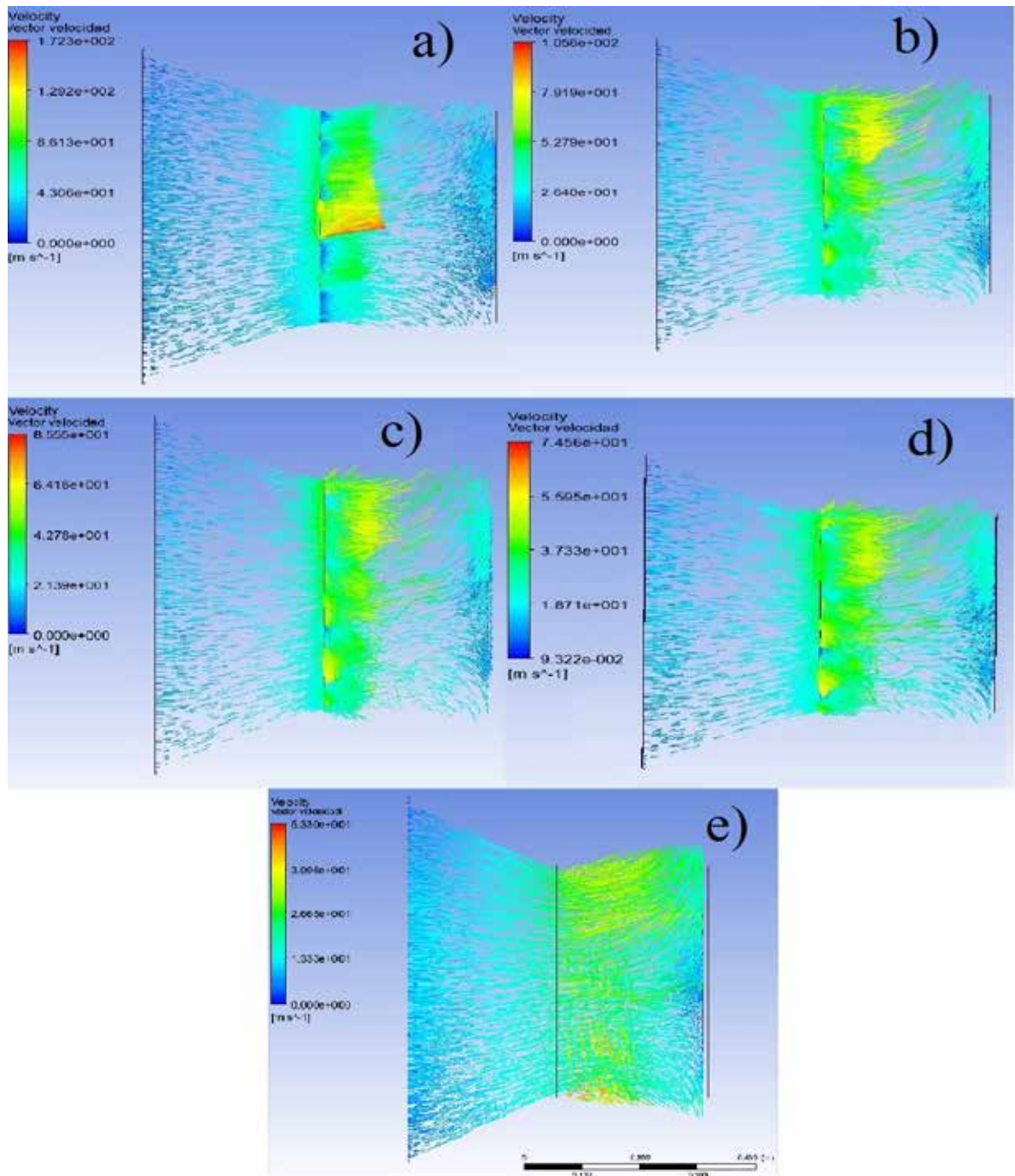


Figura 60. Vector de velocidad durante la succión. (a) 6.6390 (b) 5.3942
(c) 4.3844 (d) 3.7212 (e) 3.0336

Fuente: Cimmarusti y Decan (2019)

Efecto de la lengüeta

A continuación, se visualiza el comportamiento de la lengüeta cumpliendo la función de suavizar la salida del flujo de aire para que esta sea lo más uniforme posible, se puede observar que a medida que el caudal es mayor más eficiente será la función de la lengüeta ya que disminuye la velocidad alrededor del tubo cilíndrico que se encuentra en la parte superior de la lengüeta permitiendo que el flujo con mayor velocidad circule por encima de ella. (ver figuras 61 y 62)

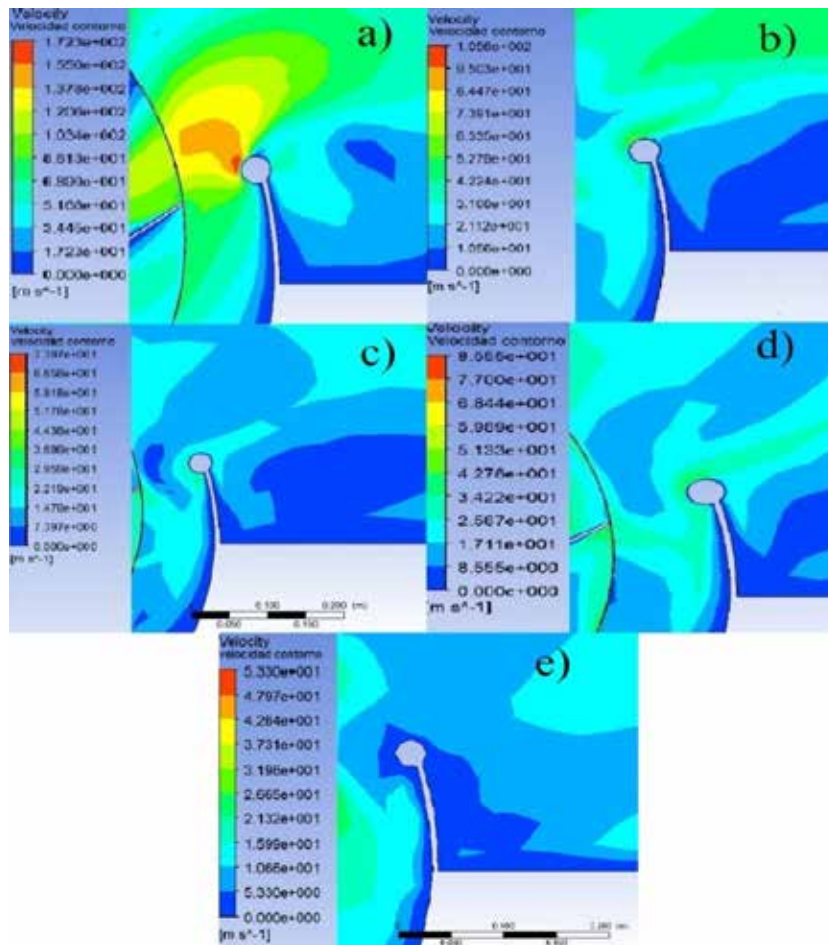


Figura 61. Contorno de velocidad durante de la lengüeta (a) 6.6390 (b) 5.3942
(c) 4.3844 (d) 3.7212 (e) 3.0336

Fuente: Cimmarusti y Decan (2019)

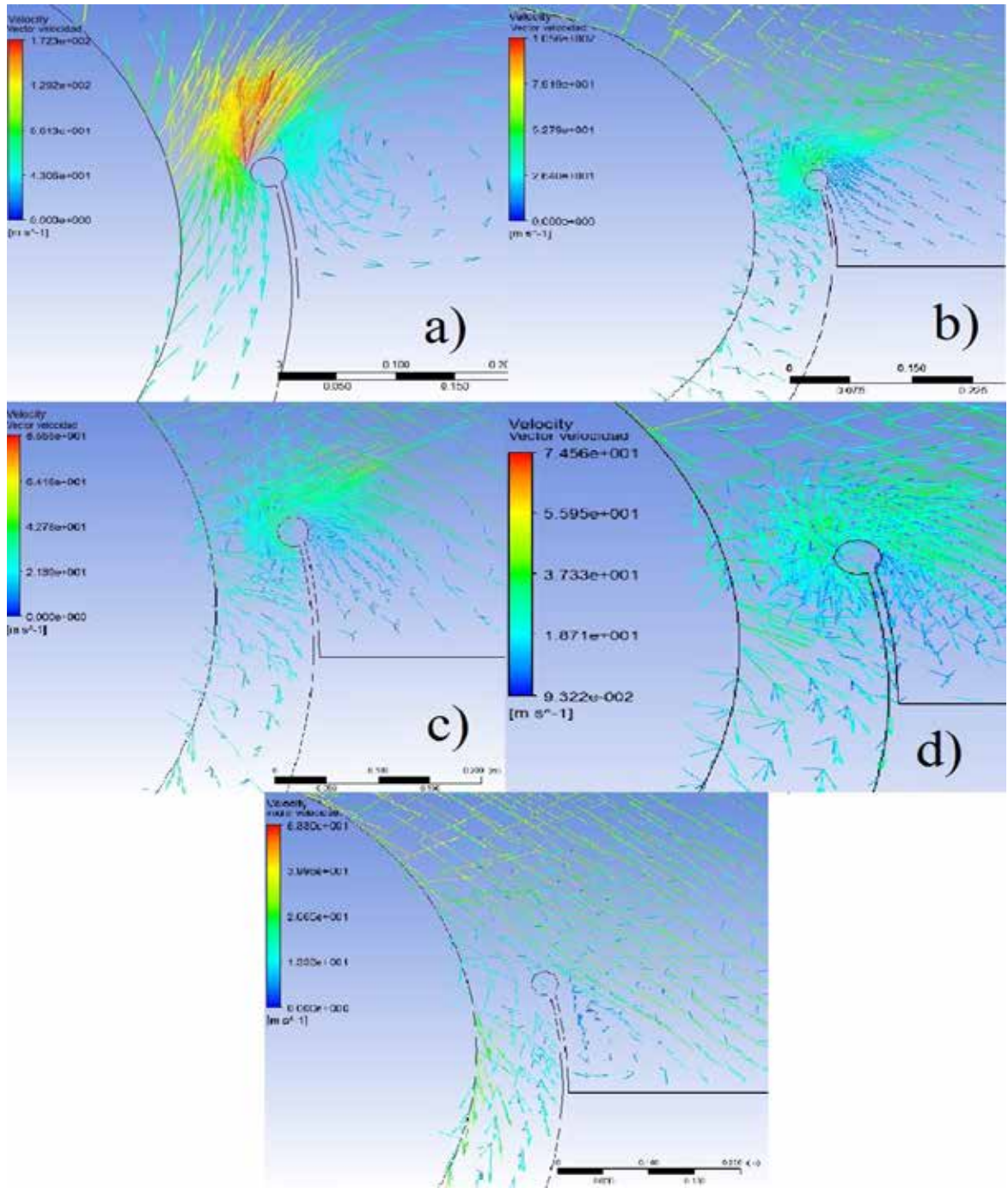


Figura 62. Vector de velocidad durante de la lengüeta. (a) 6.6390 (b) 5.3942
(c) 4.3844 (d) 3.7212 (e) 3.0336

Fuente: Cimmarusti y Decan (2019)

4.4.4.3 Potencia útil

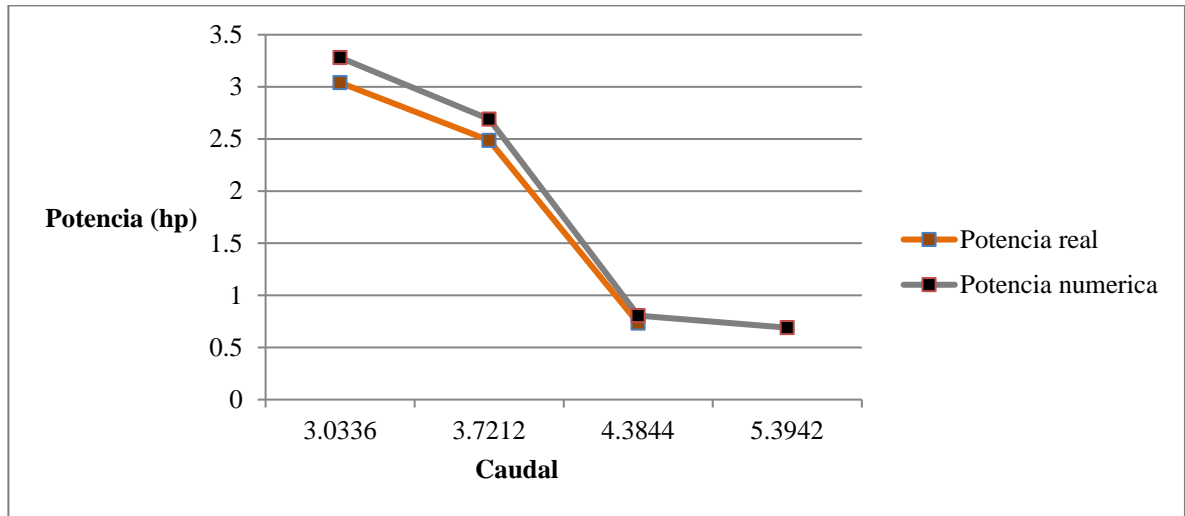
Sabiendo que la potencia que suministra un ventilador depende de forma directa de la diferencia de presión entre la entrada y la salida y el caudal considerado, se realiza el cálculo de la potencia útil suministrada por el ventilador con los datos arrojados en la simulación ejecutada, mediante la fórmula 14. Presentando así la tabla 5 , donde comparamos las potencias experimentales facilitadas por el fabricante y las que fueron calculadas.

(14)

Tabla 5. Potencia útil de simulación.

Caudal(/s)	Potencia real (hp)	Potencia útil (W)	Potencia útil (hp)
5.3942	-	517.282	0.69
4.3844	0.7	600.641	0.805
3.7212	2.5	2011.238	2.69
3.0336	3	2448.191	3.28

Fuente: Cimmarusti y Decán (2019).



Gráfica 20. Potencia útil de simulación.

Fuente: Cimmarusti y Decán (2019).

La grafica 20 muestra las curvas de potencia de simulación y la real, el comportamiento de estas es similar en trayectoria. Mientras el caudal aumenta, la potencia útil disminuye, ya que los diferenciales de presión son menores.

4.4.5 Evaluación de los resultados

4.4.5.1 Análisis de la curva característica P vs Q

Teniendo en cuenta la teoría de turbomáquinas en general, la curva característica conseguida mediante el análisis numérico posee una estructura con tendencia descendente al aumentar el caudal de trabajo, como debe suceder en un ventilador centrífugo de álabes inclinados hacia atrás. También se pudo observar que el comportamiento de esta curva sigue de manera similar el comportamiento de la curva característica de los datos del fabricante, el punto en el la pendiente comienza a disminuir corresponde uno de los valores de estudio que se escogió arbitrariamente. En líneas generales se puede decir que la simulación realizada arrojó valores correctos para la construcción de esta curva característica.

4.4.5.2 Análisis de la presión en los dominios

Haciendo una observación del impulsor de los distintos contornos de presión en la voluta presentada en la figura 54 se puede detallar el comportamiento adecuado del impulsor, cumpliendo con la teoría de ventiladores centrífugo la cual describe que debe haber un incremento de presión que va desde la entrada hasta la salida de la misma debido a que un ventilador transforma la energía mecánica en energía de presión.

Se puede apreciar como la presión disminuye a medida que el paso de la voluta crece cuya razón se debe a que el área aumenta otorgando más espacio al fluido permitiéndole fluir con mayor facilidad, de igual manera si se aumenta el caudal la presión tiende a ser más baja ya que hay menor oposición al flujo reacción del desprendimiento de la capa limite en toda la zona de la turbomáquina.

La máxima presión que se manifiestan en la parte inferior trasera entre el alabe y el disco del impulsor se debe al cono de succión que orienta al fluido hacia esta zona acumulándolo y originando el incremento de presión mientras en el lado opuesto pasa todo lo contrario, en esta zona el fluido entra de manera más suave generando el libre desprendimiento de la capa limite por lo que el alabe puede impulsar el fluido con mayor facilidad.

Como fue descrito anteriormente la presión en la succión es mayor en la entrada con tendencia a la pared del cono de succión dado que en esta zona el fluido debe superar la inercia que se genera y a medida que la inercia es vencida el fluido empieza aumentar de velocidad por lo que la presión disminuye presentando el típico comportamiento en tobera con flujos subsónicos, por otra parte, en la figura 54 se aprecia que la magnitud de la presión en el centro del dominio del impulsor es considerablemente alta a causa de que el fluido se encuentra por primera vez con un sólido, siendo este el plato que esta apernado al impulsor teniendo en cuenta que mientras mayor sea el caudal la presión en esa zona será mayor.

4.4.5.3 Análisis de velocidad en los dominios fluidizados

Con respecto a los vectores y contornos obtenidos de la simulación se aprecia como la velocidad de entrada y de salida son similares cumpliendo las leyes de continuidad y conservación de la energía. En la voluta se muestra como la magnitud de la velocidad es mayor en la salida, valor lógico porque el fluido sale del impulsor con toda la energía otorgada, energía en forma de presión que luego con el paso de la voluta se transforma en energía cinética de manera que mientras el área del paso aumente la velocidad también lo hará y mientras el caudal aumente estos valores serán mayores, comportamiento que concuerda con la definición de caudal

En la figura 57 se visualiza como en la parte alta del impulsor la velocidad posee una mayor magnitud debido a que esa zona concuerda con la salida de la voluta donde se presenta menor presión produciendo altas velocidades, sin embargo, en la parte baja del impulsor ocurre todo lo contrario. El fluido proveniente del cono de succión impacta contra el plato trasero del impulsor cambiando su trayectoria hacia una zona donde pueda seguir fluyendo por lo que entra a los alabes que se encuentra en esta parte baja del impulsor con mayor suavidad y menor velocidad. Para el cono de succión se vio un comportamiento típico de toberas donde aumenta la velocidad a medida que disminuye el área.

En la lengüeta se observa como el fluido colisiona con ella generando una capa protectora de baja velocidad sobre la cual permite que el fluido que sale por esta zona mantenga una trayectoria uniforme y estable.

CONCLUSIONES

En el trabajo realizado se pudo determinar la importancia de conocer las variables que intervienen en el comportamiento del campo de flujo del turboventilador seleccionado, debido que, al momento de realizar una simulación, una mala selección de variables en “Set up” del software ANSYS puede generar error en el cálculo o mostrar un comportamiento anormal en el turboventilador.

La veracidad de la simulación efectuada mediante la herramienta de dinámica de fluidos computacional, CFD, queda garantizada gracias a los distintos criterios de evaluación aplicados a lo largo de la realización de este proyecto de investigación. Estos criterios comprenden inicialmente la calidad conseguida en la discretización espacial de los dominios fluidizados, esta se mide acorde a los valores obtenidos de ortogonalidad, factor de expansión y radio de aspecto, consiguiendo los valores de carácter global de 44.5°, 18 y 80, respectivamente, estimaciones que están dentro del rango seguro, certificando la calidad de la malla empleada. Por otra parte, los criterios de convergencia considerados permitieron evaluar el comportamiento de los resultados de las simulaciones; aplicando el criterio de la raíz cuadrada media se concluyó que el error relativo en estos resultó apto para el estudio realizado, también el empleo del criterio de imbalances avaló la conservación de las ecuaciones de gobierno desde la entrada del flujo hasta la salida.

Las simulaciones realizadas en el software ANSYS® Workbench, permitió observar por medio de gráficas, videos e imágenes, el comportamiento del flujo en un turboventilador centrífugo, se consiguió observar los distintos efectos que tienen las variables en el flujo de aire y el funcionamiento de dicha turbomáquina. Se comprobó que mientras los caudales de trabajo sean menores la diferencia de presiones en la entrada del flujo y la salida del mismo será mayor, por este motivo, los ventiladores tendrán una mejor eficiencia dadas estas condiciones. Dicho esto, se puede concluir

que los turboventiladores centrífugos presentarán una caída importante en su eficiencia cuando se manejen caudales mayores, pues la presión estática disminuye notablemente; por ejemplo, se presentó el caso del caudal seleccionado arbitrariamente de 6.6390 /s, en el cual la diferencia de presiones arrojó una disminución de la presión en la salida con respecto a la de entrada.

RECOMENDACIONES

Realizar el estudio en turboventiladores centrífugos con álabes rectos, o álabes inclinados hacia adelante.

Realizar simulaciones en turboventiladores con álabes de perfil aerodinámico.

Profundizar el manejo del software ANSYS® Workbench, aplicando la herramienta de CFD Fluent.

Contar con recursos computacionales que estén por encima de 8gb de RAM y 2gb de tarjeta de video además de poder contar con un buen procesador

Realizar estudios del comportamiento de la interacción del fluido con la estructura del turboventilador.

Hacer estudios en distintas familias de ventiladores del mismo fabricante.

Incluir en el pensum de Ingeniería Mecánica de la Universidad José Antonio Páez una materia que comprenda estudios de dinámica de fluidos computacional, para introducir en los alumnos el manejo de dicho software.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arias, F. (2006): **El proyecto de investigación**. Quinta edición. Caracas, Venezuela. Episteme.
- Baena, G. (1985): **Metodología de la investigación**. Cuarta edición. México: Edits. Mexicanos Unidos.
- Balestrini, M. (2006): **Como se elabora el proyecto de investigación**. Caracas, Venezuela. Séptima edición. Consultores asociados.
- de los Anteproyectos, Proyectos y Trabajos de Grado**. San Diego, Carabobo,
- Fernández, P (2019): **Ventiladores**. Disponible en <http://es.pfernandezdiez.es/>
- Franco, Y. (2014): **Tesis de investigación: Capítulo III**. Venezuela. Disponible en <http://tesisdeinvestig.blogspot.com>
- García, A (2015): **Estudio CFD del flujo turbulento alrededor de álabes de turbomáquinas con modelo TRANS SST**. Universidad Politécnica de Catalunya, España.
- González, J. y Castellano, G. (2014): **Mecánica de los fluidos**. España. Editorial Club Universitario.
- Hernández, R. (2010): **Metodología de la investigación**. México. Mc Graw Hill.
- Hernández, R., Fernández, C. y Baptista, P. (2003) **Metodología de la investigación**. México. Mc Graw Hill.

- Hurtado, J. (2000): **Metodología de la investigación**. Caracas, Venezuela. Ciea-Sypal.
- Kallin, D y Nodensjöld, K (2017): **Análisis de la interacción fluido-estructura en un ventilador centrífugo**. Universidad tecnológica Chalmers, Suecia.
- Mataix, C. (2009): **Turbomáquinas hidráulicas**. España. Editorial ICAI.
- Mataix, C. (2010): **Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas**. España. Ediciones del Castillo.
- Pasinato, H. (2008): **Fundamentos de mecánica de fluidos**. Plaza Huincil, Argentina. Editorial de la Universidad Tecnológica Nacional.
- Pathak, Y, Baloni, B y Channiwala, S (2012): **Simulación numérica de un ventilador centrifugo mediante CFX**.
- S&P Sistemas de ventilación (2017): **Ventiladores centrífugos: tipos y características**. Disponible en <https://www.solerpalau.com>
- Suresh, P y Awash, T (2014): **Análisis mediante CFD en la cascada lineal de alabes de una turbina**. Universidad Hawassa, Etiopia
- Tamayo, M. (2012): **El proceso de la investigación científica**. México. Limusa.
- UNET (2016) **Ventiladores Centrífugos**. San Cristóbal, Venezuela. Disponible en <http://www.unet.edu.ve/>
- Universidad José Antonio Páez. (2007). **Normas para Elaboración y Presentación**
Venezuela

ANEXOS

ANEXO A.

Catálogo de ventiladores centrífugos SQB-Chicago Blowers.

BULLETIN SQB 108

CHICAGO



SQB CENTRIFUGAL FANS

HIGH QUALITY
HIGH EFFICIENCY

SQB "B" BLADED CENTRIFUGAL FANS

Exceptional Reliability
in Dirty or Corrosive
Industrial Environments

Chicago Blower's SQB is regarded as a high performance, trouble free fan proven in a myriad of industrial applications. With its backward inclined wheel and square housing design, the SQB is efficient, economical and versatile. It is also quickly available through Chicago's Stock Fan program. "Packaged" fans, those furnished with motor, V-belt drive, belt guard and other options, are factory aligned, run tested and shipped ready to install. By eliminating jobsite assembly, the packaged SQB fan can substantially reduce overall installation cost.

UNIVERSAL APPLICATIONS

The SQB Type "B" wheel has backward inclined blades designed to handle corrosive or dusty airstreams. Typical applications include oven circulators, dust collector exhaust fans, fume exhausters and emissions control systems. Since the blades are solid steel, the "B" wheel is ideal for custom applied corrosion resistant coatings. The SQB is also suited for high temperature gasses and air to 650°. For greater safety in explosive environments, spark resistant construction is offered. The versatile SQB is furnished in 14 sizes in Arrangements 1, 9 or 9H and in three classes of construction.

CHICAGO QUALITY

The experience gained as a leading supplier of all types of industrial and custom heavy-duty fans is reflected in the rugged construction of all Chicago built fans. It's called "Industrial Quality" and guarantees exceptional performance and reliability. If you are unsure of the suitability of a particular fan for a specific application, the Chicago air moving professionals will evaluate your needs and provide recommendations. Chicago Blower offices are located throughout North America and around the world.



The building of all Chicago "SQ" Fans is monitored by stringent Quality Control and Quality Assurance Programs. Chicago's Stock

Fan program assures expediency without sacrificing quality and reliability. "Our fan's most important feature is the reliability we are able to add to your product or system."

BACKWARDLY INCLINED WHEELS



Rugged, Class III Wheels

Class III wheels have reinforced blades plus heavy shafts and bearings to extend the rated duty to 15" static pressure. Sizes 20 to 44-1/2.



Class II wheels are available in Sizes 16-1/2 to 44-1/2 for pressures through 9". Class IIS duty substitutes heavier shaft or bearings to raise pressure capacity to 10". Sizes 12-1/4 to 36-1/4

CHICAGO TYPE "B" WHEEL

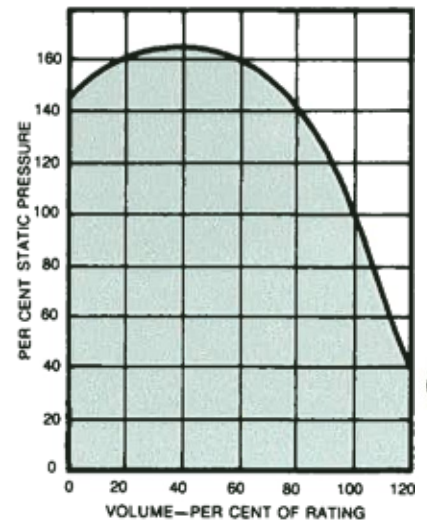
The TYPE "B" wheel consists of backwardly inclined solid steel blades continuously welded to a streamlined wheel cone and a heavy steel backplate. They can withstand temperatures to 650° using a shaft cooler. Type "B" wheels have true non-overloading horse power characteristics, mechanical efficiency over 80% and a steep stable pressure curve. All Chicago type "B" wheels exceed AMCA standards.

GREATER EFFICIENCY

Chicago SQB will perform reliably in many installations that are now using radial bladed fans. The SQB is more efficient than a radial blade fan, allowing the use of smaller, lower horsepower motors properly sized for the operating horsepower of the fan.

STEEP PRESSURE CHARACTERISTICS

Chicago's SQB fan with its steep pressure characteristics is ideal for applications with pressure variations. Even if actual system pressure should reach 30% higher than anticipated, delivered volume would be typically reduced by only 10%.



ANEXO B.

Ventilador modelo SQB, fabricado por “Magaire C.A.”

