



UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ

**ESTUDIO DE LA DINÁMICA DEL FLUJO DE
AGUA ALREDEDOR DE UN CILINDRO
HORIZONTAL UTILIZANDO MÉTODOS DE
ELEMENTOS FINITOS.**

Yovanny de Jesús Rojas Jaramillo

C.I.: 18.999.925

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

**ESTUDIO DE LA DINÁMICA DEL FLUJO DE AGUA ALREDEDOR DE UN
CILINDRO HORIZONTAL UTILIZANDO MÉTODOS DE ELEMENTOS
FINITOS.**

Proyecto del trabajo de grado para optar al título de
INGENIERO MECÁNICO

Autor: Yovanny de Jesús Rojas Jaramillo

C.I.: 18.999.925

Tutor: Ing. Gruber A. Caraballo V.

San Diego, Junio 2019



FI-M -004-2019-ICR

Valencia, 14 de Marzo de 2019

Ciudadano:
Yovanny Rojas
C.I:18.999.925
Presente-

Cumplo con informarle que la Comisión de Trabajo de Grado y Pasantías de la Facultad de Ingeniería en su reunión N° 01-2019 de fecha 14-03-2019 aprobó el proyecto de trabajo de grado titulado **ESTUDIO DE LA DINÁMICA DEL FLUJO DE AGUA ALREDEDOR DE UN CILINDRO HORIZONTAL UTILIZANDO MÉTODOS DE ELEMENTOS FINITOS**. Presentado por usted(es) como requisito para optar al título de Ingeniero Mecánico.

Se ratifica la designación del Ing. Gruber Caraballo, C.I: 12.014.408 y la Ing. Alicia Yáñez, C.I: 4.598.880 como Tutores Académicos que los asesorarán en el desarrollo de este proyecto.

Atentamente,

Prof. Luis Lira
Decano de la Facultad de Ingeniería

e.e. Coordinación de Pasantías y Trabajo de Grado (1).

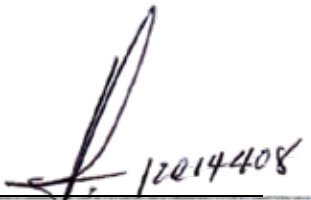


REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

ACEPTACIÓN DEL TUTOR

Quien suscribe, Ingeniero Gruber A. Caraballo V. portador de la cédula de identidad N° 12.014.408, en mi carácter de tutor del trabajo de grado presentado por el ciudadano Yovanny de Jesús Rojas Jaramillo, cédula de identidad N° 18.999.925, titulado **“ESTUDIO DE LA DINÁMICA DEL FLUJO DE AGUA ALREDEDOR DE UN CILINDRO HORIZONTAL UTILIZANDO MÉTODOS DE ELEMENTOS FINITOS”** 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, a los 10 días del mes de Junio del año dos mil diecinueve.


Firma
Ing. Gruber A. Caraballo V.
C.I. 12.014.408
Tutor Académico



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

San Diego, Junio 2019

ACTA DE REVISIÓN DEL PROYECTO DE TRABAJO DE GRADO

Quiero suscibir esta Acta, de conformidad que el Proyecto de Trabajo de Grado: "ESTUDIO DE LA DINÁMICA DEL FLUJO DE AGUA ALREDEDOR DE UN CILINDRO HORIZONTAL UTILIZANDO MÉTODOS DE ELEMENTOS FINITOS" ha sido revisado y, cumpliendo con los requisitos exigidos para su aprobación, recomiendo su tramitación ante el organismo académico correspondiente.

Ing. Geuber A. Caraballo V.

Tutor Académico

Firma

Fecha

15-5-19

Ing. Alicia de Pizzelli

Tutor Metodológico

Firma

Fecha

15-5-19

AGRADECIMIENTOS

A la primera persona que le voy agradecer es a mi madre **Aracelis Jaramillo**, mi ejemplo de lucha por ser ese motor que me motivo y animo a seguir adelante en mi carrera universitaria, a no desmayar y brindarme siempre su apoyo incondicional, gracias también por proporcionarme esas lecciones de vida tan importantes que son las que me tienen donde me estoy hoy en día.

Agradezco a mi hermana **Nohelys Rojas**, por apoyarme y brindarme siempre esa alegría que la caracteriza, ayudarme cada vez que lo necesitaba y estar siempre atenta de cómo iba en la carrera.

A mi abuela **Maria Jaramillo** por cada consejo y lección brindada que son parte fundamental del ser humano que soy, por todas esas muestras de cariño e intentar ayudarme a resolver algún ejercicio de cualquier asignatura cuando veía que me costaba.

Gracias a todas las personas que fueron partícipes en este proceso ya sea directa o indirectamente fueron responsables de realizar su aporte.

A la UNIVERSIDAD JOSE ANTONIO PAEZ por dejarme formar como profesional y a todos los profesores que me dieron clases, por aportar sus conocimientos para ir avanzando hasta llegar a este logro.

A mi tutor académico el **Ing. Gruber Caraballo** por quien siento gran admiración y respeto, gracias por brindarme su tiempo y su gran apoyo, por compartir sus conocimientos para la realización y culminar este trabajo de grado.

Finalmente gracias a la vida por este logro y a todos los que apoyaron y creyeron en mí en todo este proceso de formación GRACIAS.

ÍNDICE GENERAL

CONTENIDO	PP
RESUMEN INFORMATIVO	xii
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO	3
I EL PROBLEMA	3
1.1 Planteamiento del problema.....	3
1.2 Formulación del problema	4
1.3 Objetivos de la investigación	4
1.3.1 Objetivo general	4
1.3.2 Objetivos específicos.....	5
1.4 Justificación.....	5
1.5 Limitaciones	6
1.6 Alcance.....	6
II MARCO TEÓRICO	8
2.1 Antecedentes de la investigación	8
2.2 Bases teóricas	10
2.2.1 Flujo alrededor de un cilindro estático	10
2.2.2 Patrones de flujo para un cilindro estático	11
2.2.3 Ecuaciones para el movimiento de un fluido	12
2.2.4 Desprendimiento de vórtices.....	13
2.2.5 Velocidad reducida.....	14
2.2.6 Dinámica de fluidos computacional.....	16
2.2.6.1 Geometría CAD.....	17
2.2.6.2 Mallado.....	18
2.2.6.3 Discretización	22
2.2.6.4 Métodos numéricos para la discretización de un dominio	22
2.2.7 Modelo de turbulencia kappa- epsilon (k –	

2.2.8 Modelo de turbulencia kappa-omega ($k - \omega$).....	25
2.2.12 Modelo shear stress transport (SST)	25
2.2.13 Modelos de la capa límite.....	26
2.2.14 Niveles de aproximación numérica	26
2.3 Definición de términos básicos.....	30
III MARCO METODOLÓGICO	32
3.1 Tipo de investigación	32
3.2 Diseño de investigación	32
3.3 Nivel de la investigación.....	33
3.4 Población y muestra	33
3.5 Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	34
3.6 Fases metodológicas.....	35
IV RESULTADOS	37
4.1 Descripción de la dinámica del campo de flujo alrededor de un cilindro horizontal.	37
4.2. Modelado mediante una herramienta CAD del lecho fluidizado.....	38
4.3. Elección del modelo matemático basado en la técnica FEM, adecuado para el estudio de la dinámica del campo de flujo, considerando los efectos de turbulencia.....	40
4.4. Simulación del campo de flujo mediante una herramienta de dinámica de fluidos computacional (CFD).	40
4.4.1. Discretización del dominio.....	41
4.4.2. Configuración de la herramienta de CFD.....	44
4.4.2.1. Configuración del dominio.....	44
4.4.2.2. Configuración de la herramienta de cálculo.....	47
4.4.2.3. Convergencia de las simulaciones.....	48
4.4.3. Obtención de los resultados.....	50
4.4.3.1 Visualización de los contornos de presión.	50

4.4.3.2 Visualización de los contornos de velocidad.....	55
4.4.3.3 Visualización de las líneas de corriente.....	59
4.4.3.4 Visualización de vórtices mediante campos vectoriales.	63
CONCLUSIONES	67
RECOMENDACIONES	68
BIBLIOGRAFÍA	70

ÍNDICE DE TABLA

PP

TABLA

Tabla 1: Estadísticas del mallado.....	18
--	----

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pag
1: Flujo alrededor de un cilindro estático en un fluido infinito.....	10
2: Patrones de flujo para cilindros lisos en función del número de Reynolds.....	12
3: Secuencia de campos de presión sobre el cilindro.....	15
4: Patrones de respuesta según el valor de la velocidad relativa V_R	16
5: Pasos para resolver numéricamente un problema usando CFD.....	17
6: Malla estructurada bidimensional.....	18
7: Mallas no-estructuras bidimensional	19
8: Mallado estructurado con interfaz ajustada	20
9: Mallado estructurado en bloque 2D sin interfaces ajustadas.....	21
10: Mallado compuesto en 2D	21
11: Técnicas de aproximación numérica en mecánica de fluidos	30
12: Sketch para el modelo del lecho fluidizado de un cilindro	40

13: Bocetos para el lecho fluidizado de a) tres y b) diez cilindros.....	40
14: Proceso de simulación para ANSYS® Fluent.....	41
15: Aspectos generales del mallado para un cilindro.....	43
16: Aspectos generales del mallado para tres cilindros.....	43
17: Aspectos generales del mallado para diez cilindros.....	43
18: Definición de selecciones para el caso de diez cilindros.....	44
19: Configuración del	45
20: Preconfiguración del solver.....	46
21: Tipo de fluido del estudio y sus propiedades.....	46
22: Configuración de los datos de entrada.....	47
23: Configuración de los datos de salida.....	47
24: Configuración de los datos de salida.....	48
25: Parámetros de la herramienta de cálculo.....	49
26: Contornos de presión para el flujo alrededor de un cilindro. a) $V=20\text{m/s}$, b) $V=80$ m/s y c) $V=160\text{ m/s}$	52
27: Contornos de presión para el flujo alrededor de tres cilindros. a) $V=20\text{m/s}$, b) $V=80\text{ m/s}$ y c) $V=160\text{ m/s}$	53
28: Contornos de presión para el flujo alrededor de diez cilindros. a) $V=20\text{m/s}$, b) $V=80\text{ m/s}$ y c) $V=160\text{ m/s}$	54
29: Numeración de los cilindros en la configuración de diez.....	55
30: Contornos de velocidad para el flujo alrededor de un cilindro. a) $V=20\text{m/s}$, b) $V=80\text{ m/s}$ y c) $V=160\text{ m/s}$	57
31: Contornos de velocidad para el flujo alrededor de tres cilindros. a) $V=20\text{m/s}$, b) $V=80\text{ m/s}$ y c) $V=160\text{ m/s}$	58
32: Contornos de velocidad para el flujo alrededor de diez cilindros. a) $V=20\text{m/s}$, b) $V=80\text{ m/s}$ y c) $V=160\text{ m/s}$	59
33: Visualización de la estela de Von Karman para el flujo alrededor de un cilindro. $V=20\text{ m/s}$	60
34: Líneas de corriente a través del lecho fluidizado alrededor de un cilindro. a)	

V=20m/s, b) V=80 m/s y c) V=160 m/s.....	61
35: Líneas de corriente a través del lecho fluidizado alrededor de tres cilindros. a) V=20m/s, b) V=80 m/s y c) V=160 m/s.....	62
36: Líneas de corriente a través del lecho fluidizado alrededor de tres cilindros. a) V=20m/s, b) V=80 m/s y c) V=160 m/s.....	63
37: Campo vectorial de velocidad en el flujo alrededor de un cilindro.....	65
38: Campo vectorial de velocidad en el flujo alrededor de los tres cilindros....	66
39: Campo vectorial de velocidad en el flujo alrededor de los diez cilindros.....	67

ÍNDICE DE GRÁFICO

GRÁFICO

1 Convergencia de las ecuaciones de continuidad y momento para V=80 m/s en el caso de diez cilindros.....	49
2 Convergencia de las ecuaciones de turbulencia SST kappa k- omega □ para V=80 m/s en el caso de diez cilindros.....	49



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

ESTUDIO DE LA DINÁMICA DEL FLUJO DE AGUA ALREDEDOR DE UN CILINDRO HORIZONTAL UTILIZANDO MÉTODOS DE ELEMENTOS FINITOS

Autor: Yovanny de Jesús Rojas Jaramillo

Tutor: Ing. Gruber A. Caraballo V.

Fecha: Junio 2019

RESUMEN INFORMATIVO

La presente investigación consistió en el estudio de la dinámica del flujo de agua alrededor de cilindros horizontales, similar al modelo utilizado para los intercambiadores de calor de flujo cruzado y donde se desea estudiar los efectos de disipación viscosa, desprendimiento de vórtices, efectos de la velocidad sobre la superficie del cilindro y la influencia de la gravedad sobre el campo de flujo, utilizando una herramienta computacional de dinámica de fluidos (CFD) basada en el método de elementos finitos. También se realizó una malla computacional híbrida y refinada alrededor de los cilindros, para visualizar contornos de presión, velocidad y líneas de corriente con la finalidad de describir los patrones de flujo según la bibliografía especializada consultada y se espera que dichos resultados conlleve al aporte de ideas para el diseño de intercambiadores de calor, o corroboren la teoría que los describe. Metodológicamente es una investigación exploratoria, sustentada en un diseño documental y de nivel descriptivo.

Descriptores: Flujo externo, capa límite, estela de Von Karman, flujo viscoso, condiciones de estancamiento, perfil de presiones.

INTRODUCCIÓN

La mecánica de fluidos es la rama de la física concebida para el estudio del movimiento de los fluidos (fluidodinámica) o en reposo (fluidoestática) y el número de aplicaciones de esta disciplina es enorme ya que casi todas las cosas en el planeta son fluidos o están inmersas en un fluido. Inicialmente como ciencia estuvo basada en un compromiso entre la teoría y la experimentación, pero con el desarrollo de los computadores y la aplicación de algoritmos de métodos numéricos, en los últimos años se ha convertido en una ciencia numérica – computacional hasta el punto de tener una especialidad de dinámica de fluidos computacional (CFD por sus siglas en inglés).

Uno de los fenómenos ampliamente estudiados en mecánica de fluidos es el flujo alrededor de cuerpos, ya que dichos flujos presentan efectos viscosos cerca de las superficies del cuerpo y dentro de la estela, pero prácticamente son no viscosos lejos del cuerpo, es decir, son flujos de capa límite no confinados. Precisamente la técnica del análisis de capa límite puede utilizarse para calcular los efectos viscosos cerca de las paredes y acoplar estos al movimiento exterior no viscoso y este acoplamiento es mucho más efectivo, mientras mayor sea el número de Reynolds.

En el orden de estas dos ideas, la mecánica de fluidos presenta herramientas o más bien técnicas y protocolos de diseño para describir campos de flujo, sin embargo el uso de bancos de prueba en laboratorios acarrea costos importantes tanto financieros como humanos, pero que pueden ser reducidos por medio de la simulación de estos ensayos, con la finalidad de predecir el comportamiento y estudiar fenómenos asociados a los campos de presión, densidad y temperatura, como el desprendimiento de la capa límite y generación de vórtices en la estela del flujo alrededor de cilindros circulares como los tubos en intercambiadores de calor de flujo cruzado.

En el presente trabajo consiste en simular mediante la técnica de dinámica de fluidos computacional CFD y utilizando el método de elementos finitos, el campo de

flujo externo alrededor del dominio fluidizado en cilindros horizontales circulares con la finalidad de describir la dinámica del flujo y fenómenos termohidrodinámicos asociados. El trabajo consta de los siguientes capítulos:

Capítulo I: Explica todo lo relacionado al planteamiento y formulación del problema, además de los objetivos a alcanzar en este proyecto, así como también las limitaciones que se presentan al momento de solucionar el problema.

Capítulo II: Se refiere a toda la terminología y conceptos necesarios que servirán de base para el desarrollo del estudio, además de un breve resumen sobre los antecedentes relacionados con la investigación.

Capítulo III: Consta de las distintas fases metodológicas a emplear en el desarrollo de las estrategias, que son establecidas para cumplir con los objetivos propuestos.

Capítulo IV: Detalla los resultados obtenidos en la investigación.

El trabajo aquí presentado, está estructurado de tal manera que el lector pueda ir adquiriendo los conocimientos básicos que le permitirán entender a cabalidad la tecnología referida y las herramientas a usar. Sin embargo, cabe destacar que si el lector es lo suficientemente conocedor del tema, perfectamente puede obviar los capítulos que contengan información que considere ya conocida, y continuar con los aspectos que crea interesantes sin que se pierda la linealidad o coherencia de la información que se desea mostrar.

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA

1.1 Planteamiento del problema

El flujo alrededor de un cilindro circular es un fenómeno muy complicado y ha sido objeto de interés de numerosos estudios en mecánica de fluidos, tanto numéricos como experimentales. Esta configuración de flujo se puede encontrar en meteorología, astronomía e ingeniería. Muchas aplicaciones prácticas comprenden el flujo perpendicular al eje de un cilindro largo, tanto rígido como flexible. A título de ejemplo pueden mencionarse el flujo de viento sobre postes de luz, líneas de energía, cables de suspensión de puentes, chimeneas entre otros, el flujo de agua alrededor de las columnas de los puentes y el flujo de líquidos o gases alrededor de bancos de tubos en un intercambiador de calor industrial. Debido a la flexibilidad del cilindro se puede producir una vibración en éste inducida por el flujo. Los experimentos demuestran que a números de Reynolds aproximadamente mayores que 50 se generan remolinos aguas abajo del cilindro. Éstos se emiten de forma alternada desde las partes superior e inferior del cilindro con una frecuencia definida. Los remolinos avanzan detrás del cilindro a una velocidad del orden del 80 % de la velocidad potencial en dos hileras que forman lo que se denomina canal de remolinos de Von Karman. El patrón de líneas de corriente oscilatorio causado por el desprendimiento alterno de remolinos genera una fuerza de arrastre sobre el cilindro que fluctúa con una frecuencia igual a la de emisión de remolinos. Si esta frecuencia coincide con la frecuencia natural del cilindro flexible, la amplificación de la vibración puede dar como resultado la destrucción de la estructura.

El estudio, control y manejo de los flujos de fluidos se ha vuelto cada vez más imprescindible, debido a que cada día se desarrollan aplicaciones industriales en las cuales se requiere el mejor aprovechamiento de la energía que absorben y/o entregan los fluidos. El incremento del consumo de materias primas y desarrollo demográfico,

ha llevado a los gobiernos a establecer normas y regulaciones en el control de emisiones gaseosas a altas temperaturas, y el proceso de enfriamiento de dichos gases se realiza mediante intercambiadores de calor, algunos de ellos del tipo flujo cruzado donde existe una interacción basada en el uso de tubos por donde pasa el fluido caliente, los cuales son sumergidos en una corriente perpendicular del fluido frío que pasa alrededor de ellos generándose corrientes convectivas que incrementan la tasa de transferencia de calor, siendo ésta otra de las aplicaciones donde está asociado el fenómeno de la dinámica de fluidos alrededor de un cilindro circular y la eficiencia de este tipo de intercambio térmico depende no solo del área efectiva de transferencia de calor, sino también del régimen del flujo frío, caracterizado por la relación entre las fuerzas viscosas y las fuerzas inerciales que aumentan la posibilidad del fenómeno denominado rompimiento o desprendimiento de la capa límite, el cual afecta notablemente la transferencia de calor.

Aunque la dinámica del flujo alrededor de un cilindro horizontal no es de recién estudio, sin embargo el uso de herramientas computacionales para la descripción del mismo permite estudiar mediante la técnica de elementos finitos (FEM, por sus siglas en inglés), otros factores que podrían afectar el fenómeno de desprendimiento de la capa límite, como la temperatura del fluido caliente y el efecto de la gravedad a bajos números de Reynolds. Ésta técnica es apropiada ya que consiste en discretizar el dominio fluidizado y refinar el malla con apropiados elementos de contorno alrededor del cilindro a fin de detectar los puntos donde comienza la separación de las corrientes turbulentas del sólido...

1.2 Formulación del problema

¿Cómo se podrían describir los fenómenos asociados a la dinámica del flujo de agua alrededor de un cilindro horizontal utilizando métodos de elementos finitos?

1.3 Objetivos de la investigación

1.3.1 Objetivo general

Estudiar la dinámica del flujo de agua alrededor de un cilindro horizontal utilizando métodos de elementos finitos.

1.3.2 Objetivos específicos

1. Describir la dinámica del campo de flujo alrededor de un cilindro horizontal.
2. Modelar mediante una herramienta CAD el lecho fluidizado.
3. Elegir el modelo matemático basado en la técnica FEM, adecuado para el estudio de la dinámica del campo de flujo, considerando los efectos de turbulencia.
4. Simular el campo de flujo mediante una herramienta de dinámica de fluidos computacional (CFD).

1.4 Justificación

La dinámica de fluidos computacional (CFD por sus siglas en inglés) tiene como objetivo la simulación del flujo de fluidos y los procesos de transferencia de calor, esto con el fin de simplificar el estudio de diversos fenómenos que analíticamente serían muy complejos y difíciles de desarrollar. Se basa en la utilización de métodos numéricos para resolver las ecuaciones que describen la conservación de la masa, el momento y la energía en el seno de un fluido.

Hoy en día, con las enormes posibilidades de las computadoras y el desarrollo de los métodos numéricos, la CFD se está convirtiendo en una técnica muy práctica y eficiente para el análisis de situaciones en las que están involucrados fluidos y por consiguiente, en una inestimable herramienta de análisis y diseño. Sin embargo, esto no garantizaría una solución fiable y que se apege a la realidad. Por lo tanto, se desea realizar una simulación numérica del campo de flujo alrededor de un cilindro horizontal, discretizando el dominio o lecho fluidizado para calcular el espesor de la capa límite, así como los puntos donde ocurre el desprendimiento de la misma, lo cual es altamente difícil de lograr mediante un banco real experimental debido a la gran cantidad de variables involucradas, los diferentes estados termodinámicos implicados y los altos costos que generaría la adquisición de sensores piezoeléctricos para tal fin. Igualmente, comparar los diversos modelos matemáticos de turbulencia y determinar cuál se adapta mejor a los criterios de convergencia de las simulaciones.

1.5 Limitaciones

Toda investigación conlleva contratiempos y en su mayoría pueden ser evitados si se establece de antemano las limitaciones del proyecto, por ello en la presente trabajo se hace especial énfasis en la debilidad académica en área de dinámica de fluidos computacional (CFD) durante la formación de los ingenieros en la escuela de ingeniería mecánica de la Universidad José Antonio Páez (UJAP), y aunado a esto la carencia de una materia de matemáticas aplicadas o de problemas matemáticos de la mecánica de fluidos, donde se pueda aprender a manejar la solución aproximada de ecuaciones diferenciales. Sin embargo y dedicando el tiempo necesario para aprender dichos tópicos, también está la limitante en el lapso de tan sólo dos períodos lectivos para culminar la investigación y aun utilizando una herramienta de simulación con métodos de elementos finitos (FEM, por sus siglas en inglés), los tiempos computacionales, influenciados por las bajas prestaciones de los equipos de computación disponibles, también representan un problema para el investigador.

1.6 Alcance

Esta investigación solo se encargará del estudio de las variables del campo de flujo alrededor de un cilindro horizontal, esto en virtud de que para el tiempo establecido, no se pretende indagar en otros tipos de consideraciones geométricas como la incorporación de aletas para incrementar la transferencia de calor y/o estados termodinámicos que puedan existir. Tampoco se indagará en los cambios que puedan sufrir las propiedades por la presencia de elementos externos, como lo son la transferencia de calor generada por el medio donde se encuentra el cilindro horizontal por lo que se asumirá una frontera adiabática, también se considerará flujo estacionario sin interacciones de trabajo y sin cambio de energía potencial. El estudio y la simulación numérica solo serán referidas para un modelo matemático específico y se incorporarán las ecuaciones o condiciones para analizar la influencia de la gravedad en el desarrollo del flujo alrededor del cilindro horizontal. Los resultados

obtenidos serán arrojados en forma de datos y mediante el uso de gráficos experimentales de las variables que describen el fenómeno

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes de la investigación

Según Arias, F. (2006) **“Los antecedentes reflejan los avances y el estado actual del conocimiento en un área determinada y sirven de modelo o ejemplo para futuras investigaciones”** (p. 106). Esta sección se refiere a estudios previos, ya sean trabajos y tesis de grado, trabajos de ascenso, artículos e informes científicos relacionados con el problema planteado, es decir, investigaciones realizadas anteriormente que guarden relación con el proyecto en desarrollo. Los antecedentes sirven de asesoría al investigador para fundamentar su investigación y relacionarla con investigaciones que guarden similitud con el tema elegido.

En primera instancia Rodríguez A. (2012), en su trabajo especial de grado titulado **“Simulación numérica del flujo alrededor de un cilindro móvil utilizando ANSYS-CFX”**, para optar al título de Ingeniero Mecánico en la Universidad Simón Bolívar, validó el uso de CFXTM para modelar flujos de fluidos, en régimen laminar, alrededor de un cilindro, como primer paso antes de poder utilizarlo en estudios más complejos. Para ello, se comprobó que CFXTM fuese capaz de reproducir la zona de acoplamiento (o σ), fenómeno característico de la dinámica de las tuberías submarinas. Por último se estudió la influencia de variaciones de la masa ocasionada por un flujo tapón interno, sobre el movimiento del cilindro. Se obtuvo como resultado que el software CFXTM es capaz de reproducir la zona de acoplamiento, tanto para la amplitud como para la frecuencia reducidas. Igualmente se consiguió que, las variaciones de masa impuestas asociadas al flujo tapón, no poseen un efecto significativo en el comportamiento dinámico de las vibraciones del cilindro, limitándose sólo a la forma del movimiento y sin afectar de manera importante ni su amplitud ni su frecuencia de vibración.

El presentado antecedente fue la base para la realización de esta investigación, debido al estudio realizado sobre el campo de flujo alrededor de un cilindro, sirviendo como aporte bibliográfico para entender la fenomenología del caso en estudio.

Así mismo, Domínguez A. (2015), en su tesis **“Análisis del movimiento de un cilindro circular considerando flujo cruzado y oscilaciones lineales”** para obtener el título de Ingeniero Mecánico en la Universidad Simón Bolívar, analizó el movimiento de un cilindro circular como modelo de las tuberías submarinas para el transporte de crudo en la industria petrolera, considerando flujo cruzado y oscilaciones lineales, validando un modelo en ANSYS CFX que no consideró ningún grado de libertad, para luego agregar el movimiento lineal y adicionar el grado de libertad perpendicular. Los parámetros estudiados fueron el desplazamiento del cilindro y los coeficientes de arrastre y sustentación. Se compararon los parámetros para el cilindro con uno y dos grados de libertad, concluyendo que las predicciones numéricas de los parámetros clave como frecuencia de desprendimiento de vórtices y amplitudes de variación de los coeficientes de arrastre y sustentación pueden llegar a ser de 15%, 41% y 64% respectivamente, aun cuando las variaciones de los coeficientes de arrastre y sustentación no presentan variaciones considerables. Sin embargo, al agregar al modelo numérico el segundo grado de libertad, el tiempo de cálculo aumenta 2 a 3 veces, por lo que considerar un grado de libertad es suficiente para la representación de la dinámica del comportamiento de la tubería, aunque un análisis más preciso podría obtenerse al considerar dos grados de libertad al estimar los valores máximos de las fuerzas sobre las tuberías.

Este antecedente apoyo la investigación debido a que realiza una simulación en ANSYS CFX de un flujo alrededor de un cilindro, y sirvió como guía del procedimiento para éste proceso de simulación.

Por último, Baykal C., Sumer B. M. y Fuhrman D. R. (2015), en su artículo titulado **“Numerical investigation of flow and scour around a vertical circular**

cylinder” publicado por The Royal Society Publishing, estudiaron el flujo alrededor de un cilindro circular vertical usando el modelo tridimensional del flujo incompresible de Navier –Stokes promediadas por Reynolds (RANS por sus siglas en inglés) que incorpora (i) una ecuación de cierre basada en el modelo de turbulencia - , (ii) un modelo matemático para el desprendimiento de vórtices, (iii) un modelo para el transporte de sedimentos y (iv) la morfología del lecho fluidizado para determinar la carga hidrodinámica sobre la base y el efecto del fluido alrededor del cilindro circular. En el estudio se determinó que el efecto del desprendimiento de vórtices son limitados en el inicio de la socavación del lecho justo en la base y se analizó la estela mediante métodos de visualización de contornos proporcionados por la herramienta computacional para CFD ANSYS FLUENT.

El mencionado antecedente contribuyo para la apropiada escogencia del modelo matemático utilizado en la simulación.

2.2 Bases teóricas

De acuerdo con Arias (2006), “Las bases teóricas implican un desarrollo amplio de los conceptos y proposiciones que conforman el punto de vista o enfoque adoptado, para sustentar o explicar el problema planteado” (p.107). Por lo tanto, la correcta realización de las bases teóricas permitirá no solo obtener un sustento sobre el cual se podrá realizar el apropiado y acorde análisis de resultados, sino que también ayudará a explicar la problemática a partir de un conjunto de teorías y supuestos ya establecidos y publicados.

2.2.1 Flujo alrededor de un cilindro estático

A pesar de que el flujo alrededor de un cuerpo sumergido es muy común, el estudio de la interacción fluido-estructura que se produce, se ve dificultado por la compleja geometría de los mismos. No obstante, para el caso de un cilindro, los cálculos, suponiendo flujo bidimensional, son relativamente sencillos. El caso base de análisis consiste en un cilindro con diámetro D ,

sumergido en un flujo con velocidad uniforme “U” aguas arriba del cilindro, tal como muestra la figura 1.

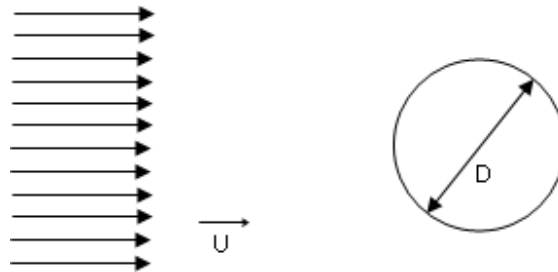


Figura 1. Flujo alrededor de un cilindro estático en un fluido infinito
Fuente: Cengel – Cimbala – (2007)

Al variar los valores de la velocidad del flujo que se aproxima (U), se modifica el Número de Reynolds, el cual establece una relación entre las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas en el fluido y se define de la siguiente manera:

$$\text{Re} = \frac{\rho U D}{\mu} \quad (1)$$

Dependiendo del valor de este número se presentarán diversos regímenes de flujo. Los valores límites que determinan el régimen de flujo deben ser aproximados debido a la gran dificultad que se presenta al momento de determinar la etapa de transición entre flujo laminar y turbulento. Los regímenes de flujo se clasifican según Munson (2007) en: Laminar ($Re < 300$), Transitorio ($300 < Re < 2 \times 10^5$) y Turbulento ($Re > 2 \times 10^5$).

2.2.2 Patrones de flujo para un cilindro estático

A medida que el número de Reynolds va en aumento, se pueden observar distintos comportamientos del flujo que rodea al cilindro, así mismo se pueden extraer los 3 rangos clásicos para los regímenes de flujo: laminar, transitorio y turbulento. La figura 2 presenta una clasificación más completa de los regímenes de flujo según Blevins (2001).

2.2.3 Ecuaciones para el movimiento de un fluido

Para poder hacer el análisis del flujo alrededor de un cilindro, sea estático o con libertad de movimiento, es necesario tener presentes las ecuaciones que describen cómo se mueve este fluido.

Primero se deben tomar ciertas consideraciones correspondientes al caso de estudio. No existe acumulación del fluido ya que éste transita de forma continua alrededor del cilindro, por lo que se debe precisar un volumen de control específico, donde no exista variación de masa. Por ende, la conservación de la masa deber ser verificada con la ecuación de continuidad (Munson, 2007). La cual, para un flujo incompresible es la siguiente:

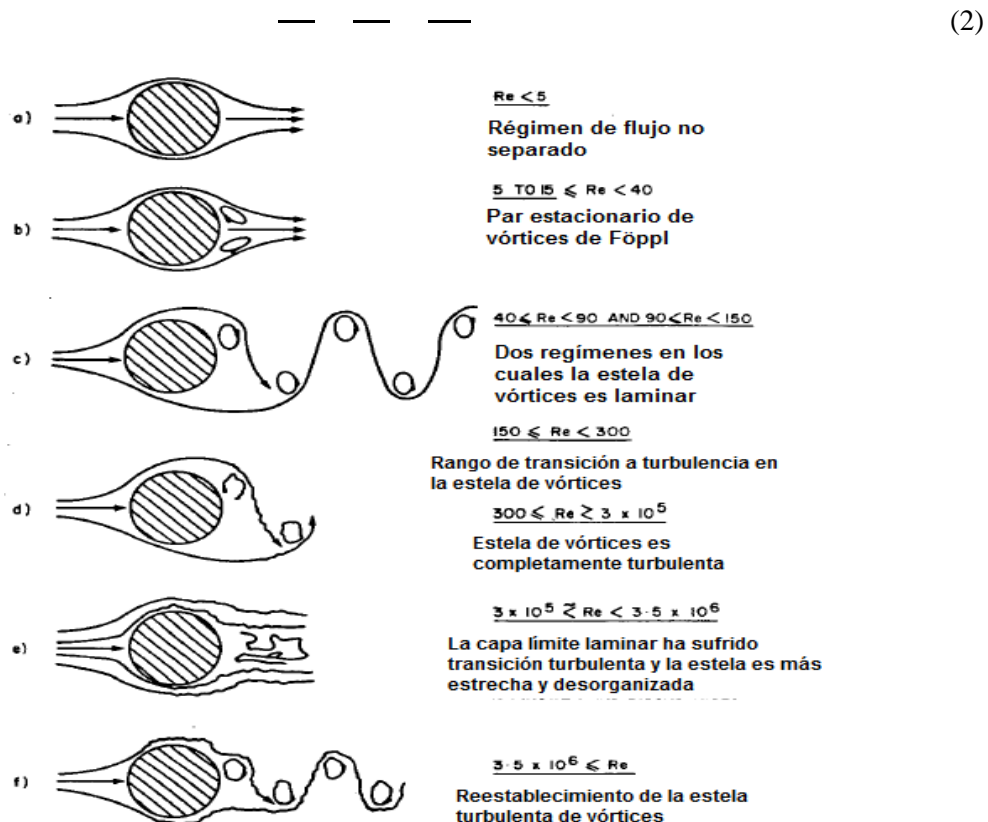


Figura 2. Patrones de flujo para cilindros lisos en función del número de Reynolds.

Fuente: Blevins – (2001)

En cuanto a las fuerzas que actúan sobre un elemento diferencial del flujo son las fuerzas de cuerpo, en este caso el peso y las fuerzas de superficie, son las resultantes de la interacción del elemento con su entorno, y corresponden a los esfuerzos normales y cortantes en la superficie del elemento (Munson, 2007). De la segunda Ley de Newton se sabe que la sumatoria de las fuerzas que actúan en el elemento del fluido debe ser igual a su masa multiplicada por la aceleración que posee el mismo. De esta premisa se deriva las ecuaciones de Navier – Stokes para un campo de fluidos:

$$\text{—} \quad (3)$$

La combinación de las ecuaciones (2) y (3) representan un modelo matemático completo para describir un campo de flujo incompresible (Potter, 2002).

2.2.4 Desprendimiento de vórtices

Para que el fluido sea forzado a moverse alrededor del cilindro y que el fenómeno de desprendimiento de vórtices pueda ocurrir, es necesaria más energía que la proporcionada por la diferencia de presión creada por la transformación de energía cinética en el punto de estancamiento, donde la velocidad es aproximadamente cero y la presión es máxima (Blevins, 2001).

Una característica importante en este tipo de flujo, es que el fluido al moverse alrededor del cilindro sin embargo al aumentar el número de Reynolds, llega a un punto donde la inercia del fluido es tal que no puede seguir la trayectoria circular y se separa del cuerpo, definiendo así el punto de separación. Esta separación causa la formación de una burbuja en la parte trasera del cuerpo, donde parte del fluido se mueve aguas abajo respecto al flujo libre (Munson, 2007). Según Blevins esta separación de la capa límite, forma a cada lado del cilindro un conjunto de capas de deslizamiento, cuyo efecto es arrastrar al fluido del borde de ataque hacia el borde de salida y confina la estela. Puesto que la capa más interna, en contacto con el cilindro, se mueve a una velocidad mucho menor que la capa más externa de las capas

deslizantes, en contacto con la velocidad del flujo libre, las capas se pliegan sobre sí mismas, formando en la estela, vórtices arremolinados discretos (Blevins, 2001).

Estos son los vórtices, que al interactuar con el cilindro causan variaciones en la presión superficial, formando un campo de presión variable alrededor del cilindro como se muestra en la figura 3, donde se representan los campos de presión y la estela generada para tiempos consecutivos. Estos campos de presión, originan fuerzas sobre el cilindro, responsables de las vibraciones observadas, tanto en el eje transversal, como en el longitudinal, en distintos trabajos de investigación numéricos y experimentales como los de Dettmer y Peric (2006), Gabbai y Benaroya (2004), Singh y Mittal (2005) y Anagnostopoulos y Bearman (1992).

2.2.5 Velocidad reducida

La velocidad reducida es un parámetro adimensional que relaciona la velocidad de flujo libre con características propias de la tubería de la siguiente forma:

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

La relevancia física de este parámetro se presenta cuando al ser combinada con la ecuación del número de Strouhal y se presenta en función de éste y de la frecuencia de desprendimiento de vórtices (Kenny J.P., 1993).

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

A medida que la velocidad reducida varía, se presentan distintos tipos de respuestas. Para el rango $1,5 < V_r < 2,5$, se desprenden dos vórtices prácticamente simétricos, uno a cada lado del cilindro, en cada ciclo (Blevins, 2001). Este patrón es inestable y aguas abajo, los vórtices se juntan y resultando en la forma usual de estela escalonada. En el rango $2,7 < V_r < 3,8$, resonancia de la frecuencia natural de la estructura ocurre con el doble de la frecuencia de desprendimiento y la estela es generada por vórtices desprendido de manera alternada a cada lado del cilindro (Blevins, 2001).

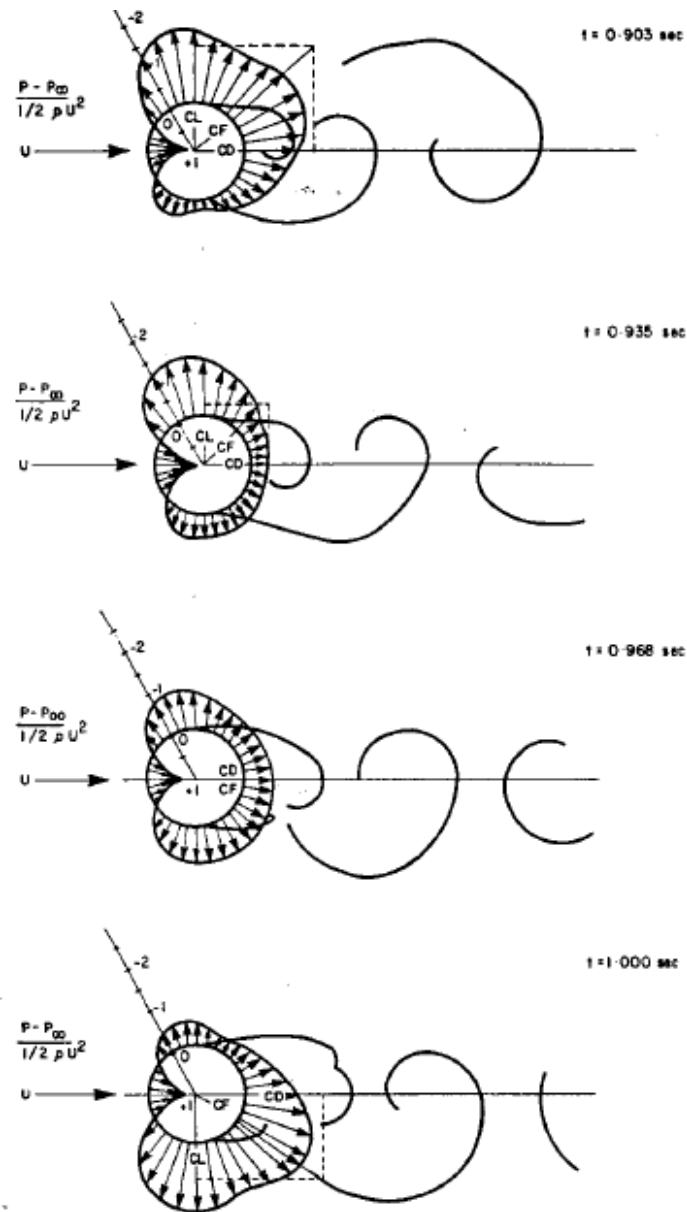


Figura 3. Secuencia de campos de presión sobre el cilindro.

Fuente: Blevins – (2001)

Cabe destacar, que hasta ahora las amplitudes cuyo eje es paralelo al de la dirección de la velocidad de flujo libre, son las dominantes, sin embargo, sólo son un décimo de las obtenidas en el siguiente tipo de respuesta, el cual se encuentra en $4 < V_r < 8$. Se sigue teniendo una estela de vórtices alternos, pero la respuesta predominante del cilindro se da en el eje perpendicular al de

la velocidad de flujo libre y es en este rango que las principales vibraciones transversales ocurren. Según Blevins estas vibraciones son usualmente de una amplitud que oscila entre 0,5 veces el diámetro y un diámetro completo (Blevins, 2001).

A continuación la figura 4 presenta una representación gráfica de los regímenes anteriormente descritos, donde se pueden apreciar, incluso, que para distintas fuentes, los rangos de dichas respuestas son muy similares.

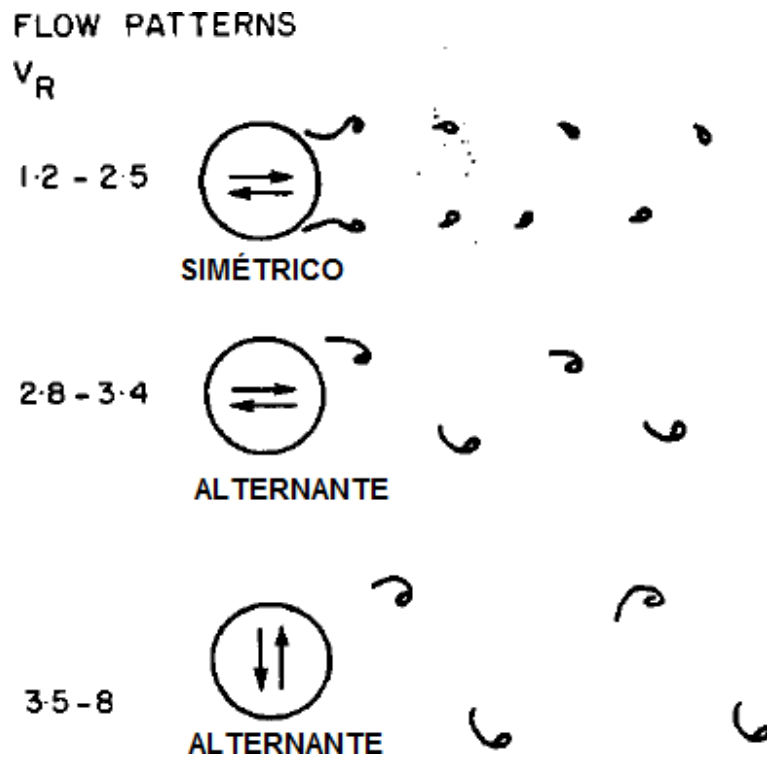


Figura 4. Patrones de respuesta según el valor de la velocidad relativa V_R

Fuente: J.P. Kenny – (1993)

2.2.6 Dinámica de fluidos computacional

Esta metodología para la solución a problemas de ingeniería que involucran fluidos, se conoce como Dinámica de Fluidos Computacional o CFD (por sus siglas en inglés), y según Cengel, Y. y Cimbala, J. (2006): Es el campo de estudio dedicado a solucionar ecuaciones del flujo de fluidos con computadora (o, en fechas recientes,

con computadoras que trabajan en paralelo). Los ingenieros modernos aplican tanto análisis experimental como CFD, y los dos métodos se complementan entre sí. Por ejemplo, los ingenieros podrían obtener propiedades globales, como sustentación, fuerza de arrastre, caída de presión o potencia, experimentalmente; pero emplean la CFD para obtener detalles acerca del campo de flujo, como los esfuerzos de corte, velocidad y perfiles de presión y líneas de corriente. Además, los datos experimentales se emplean con frecuencia para validar soluciones de DFC al comparar las cantidades globales determinadas de manera computacional y experimental.

Evidentemente, es una metodología muy empleada actualmente ya a que permite acortar el ciclo de diseño mediante estudios paramétricos, reduciendo así la cantidad necesaria de análisis experimental. Además, el análisis CFD permite estudiar variables y propiedades que mediante la instalación de un banco de pruebas serían imposibles de analizar. Sin embargo, los mejores resultados se obtienen mediante el estudio en paralelo de modelos CFD y experimentación real. En la figura 5 se observa el procedimiento estándar para la resolución de un problema de ingeniería mediante CFD.

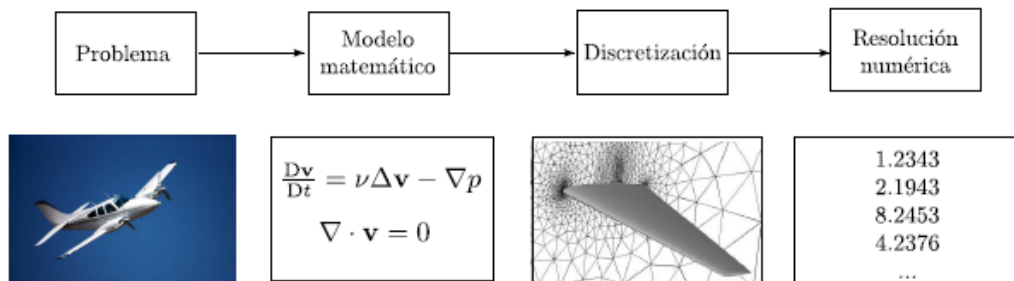


Figura 5. Pasos para resolver numéricamente un problema usando CFD

Fuente: A. Duran – (2014)

2.2.6.1 Geometría CAD

En un sentido amplio, se puede entender el Diseño Asistido por Computador (CAD por sus siglas en inglés) como la "aplicación de la informática al proceso de diseño". Puntualizando la definición, se entiende por Sistema CAD, un sistema

informático que automatiza el proceso de diseño de algún tipo de ente. Actualmente existe una amplia gama de software para diseño CAD, siendo los más utilizados, SolidWorks , AutoCAD e Inventor ambos de la empresa Autodesk .

2.2.6.2 Mallado

De acuerdo a Cengel, Y. y Cimbala, J. (2007), el primer paso (y posiblemente el paso más importante) en una solución de DFC es generar una malla que define las celdas en las que se calculan las variables de flujo (Velocidad, Presión, entre otras) en todo el dominio computacional. Esto se obtiene con la geometría del dominio en un software CAD y debe ser una versión simplificada del original con los detalles como redondeos, agujeros y otros incrementando la complejidad de la misma. El mallado se clasifica como:

i. Malla estructurada

Consta de celdas planas de cuatro lados (2-D) o celdas volumétricas de seis caras (3-D). Aunque la forma rectangular de las celdas podría estar distorsionada, cada celda se numera de acuerdo con los índices (i, j, k) que no necesariamente corresponden a las coordenadas X, Y y Z. En la figura 6 se ilustra una malla estructurada (2-D).

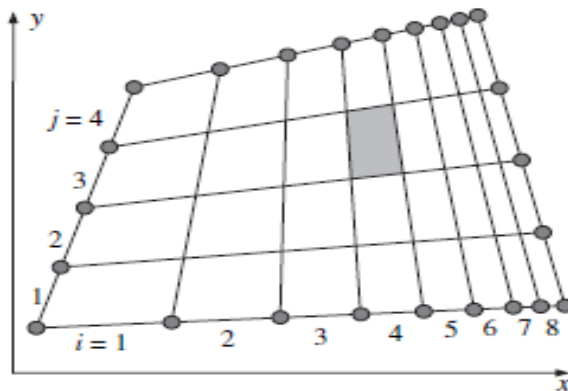


Figura 6. Malla estructurada bidimensional

Fuente: Y. Cengel, J. Cimbala – (2007)

ii. Malla no Estructurada

Una malla no estructurada consta de celdas de varias formas, pero comúnmente se emplean triángulos o cuadriláteros (2-D) y tetraedros (Ver figura 6) o hexaedros

(3-D). Se generan dos mallas no estructuradas para el mismo dominio que el de la figura 5 estructurada, con la misma distribución de intervalo en los lados; estas mallas se muestran en la figura 7. A diferencia de la malla estructurada, en la no estructurada, no puede identificarse a las celdas de manera única mediante los índices i y j ; en cambio, las celdas se numeran internamente de alguna otra manera por el paquete CFD.

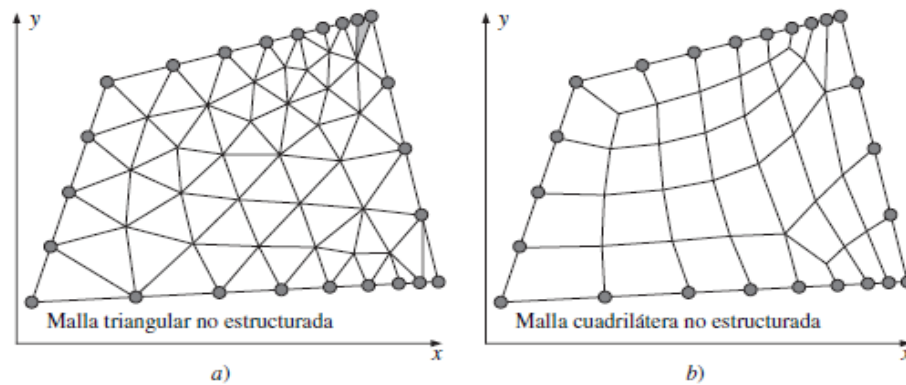


Figura 7. Mallas no-estructuradas bidimensional

Fuente: Y. Cengel, J. Cimbala – (2007)

Para configuraciones geométricas complejas, por lo general es mucho más fácil para el usuario del módulo de generación de malla crear una no estructurada. Cabe señalar que en una malla estructurada se generan menos celdas que con una no estructurada, esto se demuestra al comparar las figuras 6 y 7. En las capas límite, donde las variables del flujo cambian con rapidez en dirección normal a la pared se requieren mallas de alta resolución, las mallas estructuradas permiten una resolución mucho más fina que las no estructuradas para el mismo número de celdas. Esto puede verse cuando se comparan las mallas de las figuras 7(a) y 7(b) cerca del lado derecho, las celdas de la malla estructurada son más delgadas y están muy compactadas cerca del lado derecho, a diferencia de las celdas de las mallas no estructuradas. Sin embargo, es de aclarar que sin importar el tipo de malla que se elija, lo fundamental para los resultados de un análisis CFD es la calidad de la misma.

En las mallas estructuradas en un bloque, hay dos (o más) niveles de subdivisión del dominio. Sobre el nivel rugoso, hay bloques en el que son relativamente grandes los segmentos del dominio; su estructura podría ser irregular y pueden o no ser superpuestos. Sobre el nivel (dentro de cada bloque) es definida una cuadrícula estructurada. El trato especial es necesario en las interfaces. En la figura 8 se muestra un mallado estructurado de bloque con combinación en las interfaces, y conveniente para el cálculo de la circulación del flujo en 2D alrededor de un cilindro como es el caso para la presente investigación.

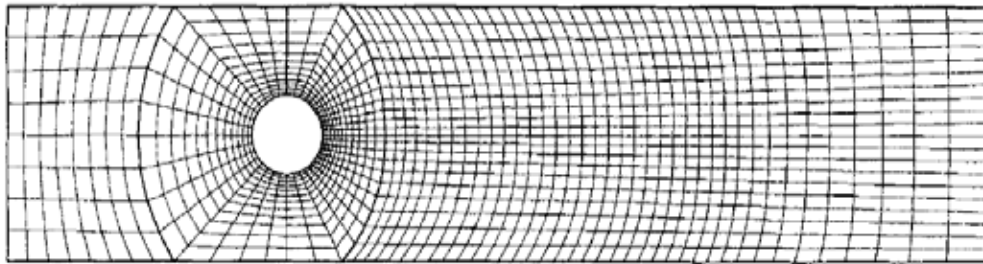


Figura 8. Mallado estructurado con interfaz ajustada

Fuente: A. Pérez y C. Garre

En la figura 9 se presenta un mallado estructurado en bloque sin ajuste en la interfaz; usado para calcular la circulación alrededor de un hidrodenslizador sumergido (hydrofoil). Consta de cinco bloques de cuadrículas de diferentes tamaños. Esta clase de cuadrícula es más flexible que los previos, cuando admite el uso de cuadrículas más finas en las regiones donde es requerida una gran resolución. El no ajuste en las interfaces puede ser tratado de una manera completamente conservadora. La programación es más difícil que para tipos de cuadrícula descritos antes. Es posible la refinación local del modo bloque (la cuadrícula puede ser refinada en algunos bloques).

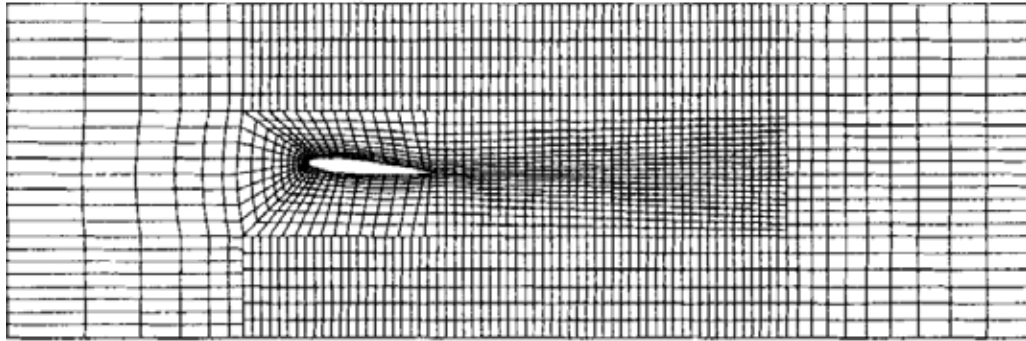


Figura 9. Mallado estructurado en bloque 2D sin interfaces ajustadas

Fuente: A. Pérez y C. Garre

Las mallas estructuradas de bloques con superposición se muestran en la figura 10. En la región de superposición, las condiciones de bordes para un bloque son obtenidas interpolando la solución del otro bloque (en superposición). La desventaja de estas cuadrículas es que las leyes de conservación no se hacen cumplir fácilmente en los límites del bloque. La ventaja de este enfoque es que los dominios complicados son arreglados con más facilidad y puede ser usado en los siguientes cuerpos móviles: un bloque es fijado al cuerpo y se mueve con él, mientras que una cuadrícula inactiva cubre los entornos.

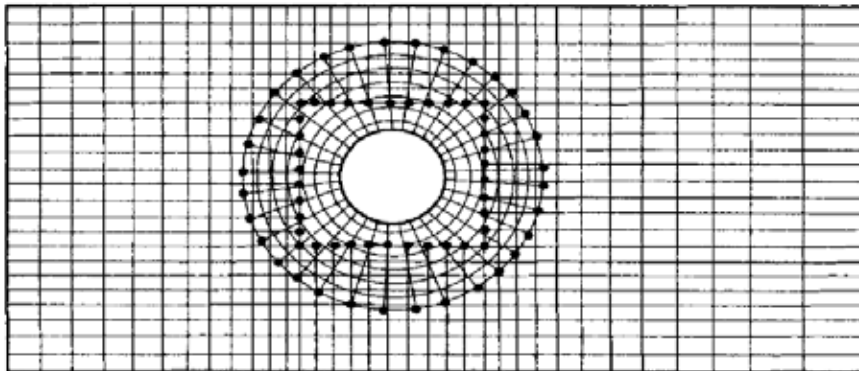


Figura 10. Mallado compuesto en 2D

Fuente: A. Pérez y C. Garre

2.2.6.3 Discretización

Para entender la Discretización, primero se deben definir los métodos numéricos, y según Saludes, A. (2015): Los métodos numéricos tratan como sus incógnitas fundamentales los valores de la variable independiente de estudio, en un número finito de localizaciones (puntos de mallado) dentro del dominio de cálculo. El método incluye proveer un conjunto de ecuaciones que describa el comportamiento de cada conjunto de puntos dentro del mallado, y un algoritmo mediante el cual poder resolver estas ecuaciones. Centrando nuestra atención en los puntos del mallado, se ha de reemplazar la información continua contenida en las soluciones exactas de las ecuaciones diferenciales por valores discretos. De esta manera se discretiza la distribución de la variable a lo largo del dominio de trabajo, obteniendo unas ecuaciones algebraicas que involucran los valores desconocidos de la variable en los puntos de mallado escogidos, conocidas como ecuaciones de discretización.

Tomando en cuenta esto, la Discretización del dominio se clasifica en:

2.2.6.4 Métodos numéricos para la discretización de un dominio

De acuerdo a investigaciones de Durán, A. (2014), la discretización es un paso indispensable para ejecutar una simulación numérica, y además: las posiciones discretas en las que las variables son calculadas están definidas por la malla numérica, que es esencialmente una representación discreta del dominio geométrico en el cual debe ser resuelto el problema. La malla divide el dominio en un número finito de subdominios, sin embargo el mallado espacial presenta mayor complejidad que el temporal, debido a que tenemos tres dimensiones, el dominio puede ser de geometría compleja y además es difícil predecir a priori en qué lugares va a ser necesario un mallado más fino. Evidentemente es un proceso complejo ya que se encarga de resolver el entorno en el cual se ejecutará la simulación, por lo cual el programa necesita tomar en consideración una gran cantidad de variables y por ello existen métodos numéricos que en función de la malla y el espacio que ocupan se pueden aplicar con la finalidad de resolver las ecuaciones matemáticas del modelo matemático ya discretizadas.

Método de diferencias finitas

La formulación diferencial de las ecuaciones. El dominio se cubre con puntos llamados nodos en los cuales la ecuación es aproximada remplazando las derivadas parciales por aproximaciones en términos de los valores nodales de la función. Cuando se aplican en mallas estructuradas son muy sencillos y efectivos. Además, es fácil obtener esquemas de alto orden. Entre sus inconvenientes están que la conservación no está garantizada si no se tiene especial cuidado y es complicada su aplicación a dominios de geometrías irregulares.

Método de volúmenes finitos

Es un método numérico utilizado para resolver las ecuaciones de gobierno de la Mecánica de Fluidos. Este método divide una geometría CAD a analizar (dominio) en un conjunto de volúmenes de control, por otra parte, utilizan la formulación integral de las ecuaciones. El dominio se divide en volúmenes de control en los cuales se aplican las ecuaciones integrales que son aproximadas mediante cuadraturas. En este caso los nodos residen en el centroide del volumen y se interpolan para obtener sus valores en las caras de dichos volúmenes. Se pueden usar cómodamente en todo tipo de mallas, tanto estructuradas como no estructuradas. Otra de sus ventajas es que son conservativos por construcción y todos los términos aproximados tienen un sentido físico claro. Entre sus desventajas esta la dificultad de obtener esquemas de alto orden, sobre todo en 3D, debido a que requieren tres niveles de aproximación: interpolación, diferenciación e integración. Es el método utilizado por la mayor 'a de software CFD.

Método de elementos finitos FEM

Utilizan la formulación débil: la ecuación diferencial es multiplicada por unas funciones llamadas funciones peso y posteriormente integradas. Son similares en cierto modo al método de volúmenes finitos. El dominio se divide en elementos y en cada uno de ellos la solución es aproximada, generalmente de forma lineal, utilizando los valores de la función en los vértices del elemento. Esta aproximación es sustituida

en la ecuación integral pesada y se impone que la derivada de dicha integral con respecto al valor en cada nodo sea cero. Son apropiados para geometrías complejas y fáciles de analizar matemáticamente.

Es conveniente aclarar que las ecuaciones matemáticas de continuidad y Navier –Stokes al ser discretizadas necesitan de un modelo adicional para cubrir los efectos viscosos e inerciales, por ello existen los denominados modelos de turbulencia que cierran el sistema de ecuaciones que definen el campo de flujo.

2.2.7 Modelo de turbulencia kappa- épsilon (k –)

El modelo de turbulencia empleado para el flujo multifásico es una generalización del modelo K – para una sola fase. Implementando el modelo – sólo para la fase continua no teniendo en cuenta los efectos de la fase dispersa sobre la turbulencia de la fase continua

$$\text{-----} \quad \text{-----} \quad (6)$$

$$\text{-----} \quad \text{-----} \quad \text{-----} \quad (7)$$

El modelo k – tiene cinco constantes, que garantizan la homogeneidad dimensional. Las cuales son: $C_\mu = 0,09$, $C_1 = 1,44$, $C_2 = 1,92$, $k = 1,0$, $\epsilon = 1,3$. Si bien los modelos estándar de dos ecuaciones, como el modelo k – , dan una buena predicción para muchos problemas de fluidos en ingeniería, existen otras aplicaciones para las cuales estos modelos pueden no ser los más adecuados. Entre estos se encuentran: Flujos con separación de capa límite, corrientes con cambios bruscos en la tasa promedio de los esfuerzos, flujos rotativos, flujos sobre superficies curvas.

2.2.8 Modelo de turbulencia kappa-omega (k –)

Una de las ventajas de la formulación k – es el tratamiento para zonas cercanas a la pared para cálculos con bajo número de Reynolds. El modelo no requiere la resolución de ecuaciones no lineales complejas, como en el modelo k – y por lo tanto es más preciso y más robusto. El modelo k – asume que la viscosidad turbulenta está relacionada con la energía cinética de la turbulencia, mediante la relación siguiente:

$$\nu_t = \frac{k}{\omega} \tag{8}$$

Donde ω = Rata de disipación específica

El punto inicial de la presente formulación es que el modelo k – desarrollado por Wilcox resuelve dos ecuaciones de transporte, una para la energía cinética de la turbulencia, k y otra para la frecuencia de la turbulencia.

Ecuación

$$\frac{dk}{dt} + \mathbf{u} \cdot \nabla k = P_k - \beta k \tag{9}$$

Ecuación

$$\frac{d\omega}{dt} + \mathbf{u} \cdot \nabla \omega = \sigma \frac{\beta k}{\omega} - \beta \omega \tag{10}$$

Las variables independientes, la densidad, ρ , y el vector de velocidad, U, son tratadas como variables conocidas provenientes del método de Navier-Stokes. P_k es la tasa de producción de turbulencia, la cuales se calculan en el modelo k – .

2.2.12 Modelo shear stress transport (SST)

El modelo k- basado en el transporte de esfuerzos cortantes, brinda una alta precisión en la predicción de la aparición y cantidad de la separación de flujos bajo condiciones de gradientes de presión adversas; esta alta precisión se obtiene limitando la formulación de “Eddy Viscosity” restringiendo el limitador de la capa límite de la

pared. Su formulación se basa en la distancia más cercana a la superficie y en las variables de flujo.

2.2.13 Modelos de la capa límite

La capa límite es la zona del campo fluido próxima a un contorno sólido en la que se manifiestan especialmente los efectos viscosos. Debido a la viscosidad y a la condición de no deslizamiento, cerca de cualquier contorno sólido aparece un gradiente de velocidades en la dirección normal a dicho contorno. Este gradiente de velocidades condiciona el intercambio energético entre las distintas partículas de fluido con velocidades diferentes, originando vorticidad y turbulencia.

El problema básico para la modelización numérica del intercambio energético en la capa límite sobre cualquier frontera sólida consiste en la definición correcta de las velocidades de las partículas en una zona muy próxima a dicha frontera. Esto implica una densidad de mallado muy elevada, necesaria para capturar los distintos fenómenos que se producen dentro de la capa límite.

Esta dificultad se ha abordado usando varias aproximaciones, que se pueden englobar en cuatro grupos: modelos de distribución de las pérdidas, modelos de capa de cortadura, modelos de capa límite y leyes de pared, que son brevemente explicados a continuación.

2.2.14 Niveles de aproximación numérica

El desarrollo de las técnicas numéricas y su aplicación a cualquier ciencia o tecnología han dado lugar al desarrollo y a la concienciación generalizada de uno de los conceptos básicos en ingeniería como es el de grado de aproximación. Esta idea es bastante clara si se considera que lo que se pretende con cualquier técnica numérica es conocer las variables físicas a partir de la resolución numérica de una serie de ecuaciones que gobiernan el fenómeno.

Se han de definir y establecer las distintas aproximaciones que introducen los métodos numéricos. En lo referente a la Mecánica de Fluidos, la primera aproximación que aparece es el planteamiento del modelo físico-matemático que

defina el comportamiento real de un determinado flujo. Dicho modelo matemático está habitualmente basado en la hipótesis del continuo, válida para la mayor parte de problemas industriales, pero que tiene sus limitaciones para casos extremos de flujos de gases. Una vez hecha esta salvedad, aplicando las leyes básicas de la física clásica se puede establecer una serie de ecuaciones diferenciales que gobiernan el comportamiento matemático de toda partícula fluida. La resolución exacta de dichas ecuaciones serviría para determinar completamente cualquier movimiento en el seno de un fluido. Se puede decir que un modelo matemático se define únicamente tras haber considerado el nivel de aproximación a la realidad requerido a la hora de obtener la exactitud deseada en el cálculo de una serie de variables dependientes. Desafortunadamente, debido a la complejidad de las ecuaciones diferenciales que aparecen, a la complejidad geométrica de los flujos, y a la complejidad de las condiciones de contorno iniciales, no resulta posible obtener soluciones analíticas de dichas ecuaciones de gobierno.

Establecidas las ecuaciones de gobierno resulta imprescindible introducir una segunda aproximación al problema. La forma clásica de abordarlo sería construir un modelo a escala reducida del flujo en cuestión y analizarlo experimentalmente en el laboratorio. La aproximación numérica implica introducir algunas hipótesis simplificadas que aproximen lo más posible los resultados finales a los que se obtendrían si se pudiera calcular la solución exacta. Dichas hipótesis se dirigen habitualmente hacia la simplificación tanto de la geometría a estudiar como de las ecuaciones a resolver. Obviamente, al no disponerse de la solución analítica exacta resulta bastante complicado establecer de antemano qué hipótesis sirven y cuales son descartables y, por tanto, en cualquier simulación aplicada a la Mecánica de Fluidos, es preciso dedicar mucho esfuerzo al análisis de los resultados obtenidos antes de aceptarlos como válidos.

Una vez definidas las ecuaciones diferenciales simplificadas, aparece otro problema relacionado con el posible tratamiento que se pueda hacer de dichas ecuaciones usando técnicas computacionales. Por medio de los ordenadores resulta muy fácil resolver una ecuación o sistema de ecuaciones algebraico, sin embargo, las ecuaciones que estudian el movimiento de los fluidos son ecuaciones diferenciales no lineales. Resulta obligatorio realizar la transformación de las ecuaciones de forma que puedan ser resueltas por un ordenador. El paso de las ecuaciones diferenciales a sus equivalentes lineales constituye otro nivel de aproximación y normalmente recibe el nombre de discretización de las ecuaciones.

En cuanto a la geometría a estudiar, se debe señalar que la aproximación a la que debe someterse no sólo es de orden descriptivo respecto a su contorno, sino que además ha de establecerse la definición del espacio ocupado por el fluido. En este sentido, resulta imprescindible referir los puntos a un determinado sistema de coordenadas en los que se pretenderá resolver las ecuaciones para obtener soluciones de las variables deseadas. Aunque el campo fluido sea un continuo, no se puede pretender resolver las ecuaciones en todos los puntos de un determinado volumen, porque entonces se tendría un número enorme de ecuaciones a resolver. Por tanto, hay que elegir cierto conjunto de puntos en los que se resolverán las mencionadas ecuaciones y que serán los puntos dónde finalmente se conocerán los valores de las variables fluidas. La definición de estos puntos es lo que se denomina habitualmente discretización espacial del dominio (también se habla de generación del mallado). El proceso descrito no deja de ser otra aproximación que se introduce en el cálculo y que define el nivel de aproximación espacial.

En el caso de tener ecuaciones que dependan de la variable tiempo (flujo no estacionario) es esencial la definición de un nivel de aproximación temporal. No es posible tampoco estudiar la evolución de las variables en el tiempo de forma continua. El nivel indicará la forma de modelizar la evolución real

introduciendo lo que se denomina discretización temporal del sistema de ecuaciones. A partir de la solución calculada se podrá realizar un promediado temporal oportuno para estudiar ciertas características medias de flujo que dependan de la evolución de las variables con el tiempo.

Finalmente, se pueden manipular las ecuaciones eliminando ciertos términos cuya influencia en un determinado problema se considere despreciable. La conclusión de que algún término no afecta a la solución de un determinado flujo se debe alcanzar tras analizar detenidamente la sensibilidad del problema ante valores dispares de dicho término. Normalmente dicho estudio se hace tras dimensionalizar convenientemente las ecuaciones y realizar el correspondiente análisis de semejanza (técnicas asintóticas). Esta cuestión es de importancia capital en la Mecánica de Fluidos y está en el origen de cualquier estudio experimental. Desde el punto de vista numérico, la eliminación de algún término en las ecuaciones introduce lo que se denomina nivel de aproximación dinámico de las ecuaciones consideradas.

Resumiendo, desde el modelo matemático (ecuaciones diferenciales no lineales) que aproxima la realidad física en un medio continuo se llega a un número finito de ecuaciones algebraicas que eliminan algún término de las ecuaciones de partida y que aproximan la evolución temporal real que, tras resolver con técnicas apropiadas, proporcionan una aproximación al valor de las variables incógnita en los puntos elegidos como discretización espacial del dominio de cálculo. En definitiva, se establece un nivel de aproximación numérico límite por debajo del cual será imposible acercarse al valor real de las variables en los puntos elegidos. Sin embargo, desde un punto de vista ingenieril, el proceso descrito es perfectamente válido y ha significado a lo largo de la evolución de las técnicas numéricas, la posibilidad de mejorar diseños y ahorrar mucho esfuerzo que de otra manera supondría trabas insalvables a la evolución de muchos sectores industriales. En la figura 11 se muestra gráficamente la panorámica explicada en este apartado.

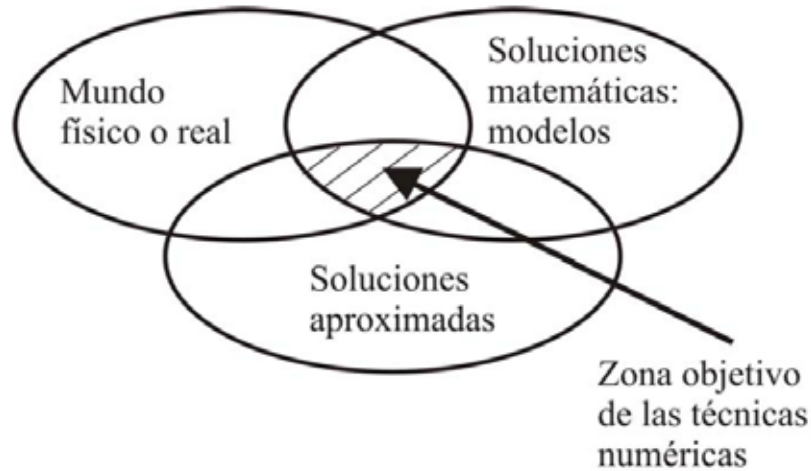


Figura 11. Técnicas de aproximación numérica en mecánica de fluidos

Fuente: ANSYS CFX-SolverTheory Guide

2.3 Definición de términos básicos

Cilindro: cuerpo geométrico formado por una superficie lateral curva y cerrada y dos planos paralelos que forman sus bases; en especial el cilindro circular.

Cantidad de movimiento: es la cantidad de movimiento por unidad de volumen integrada sobre el volumen, donde la cantidad de movimiento por unidad de volumen es la densidad de la partícula material multiplicada por su velocidad.

Condición de estancamiento: condición geométrica o termodinámica en la que el fluido se detiene alcanzando una máxima presión.

Ecuación de continuidad: se usa para relacionar la densidad del fluido, el área del fluido y la velocidad de éste en dos secciones del sistema donde existe flujo estable. Es válido para todos los fluidos, ya sean gases o líquidos.

Erosión: Desgaste producido en la superficie de un cuerpo por el roce o frotamiento de otro.

Estabilidad: una medida de la capacidad de un sistema de resistir la perturbación. La capacidad de recuperar la posición original tras el cambio.

Fluido: se define como una sustancia que se deforma continuamente bajo la acción de un esfuerzo de corte, por tanto, en ausencia de este, no habrá deformación. Los

fluidos pueden clasificarse de manera general de acuerdo con la relación entre el esfuerzo de corte aplicado y la relación de deformación.

Flujo: Cantidad de energía que en la unidad de tiempo atraviesa una superficie o sección dada.

Flujo Libre: es considerado como un flujo fluido que fluye desde un conducto hacia una zona relativamente grande que contiene fluido, el cual tiene una velocidad respecto al chorro que es paralela a la dirección del flujo en el chorro.

Flujo incompresible: es aquel en los cuales los cambios de densidad de un punto a otro son despreciables.

Flujo ideal: es aquel flujo incompresible y carente de fricción. La hipótesis de un flujo ideal es de gran utilidad al analizar problemas que tengan grandes gastos de fluido, como en el movimiento de un aeroplano o de un submarino. Un fluido que no presente fricción resulta no viscoso y los procesos en que se tenga en cuenta su escurrimiento son reversibles.

Flujo permanente: llamado también flujo estacionario. Este tipo de flujo se caracteriza porque las condiciones de velocidad de escurrimiento en cualquier punto no cambian con el tiempo, o sea que permanecen constantes con el tiempo o bien, si las variaciones en ellas son tan pequeñas con respecto a los valores medios.

Flujo unidimensional: es un flujo en el que el vector de velocidad sólo depende de una variable espacial, es decir que se desprecian los cambios de velocidad transversales a la dirección principal del escurrimiento. Dichos flujos se dan en tuberías largas y rectas o entre placas paralelas.

Flujo uniforme: este tipo de flujos son poco comunes y ocurren cuando el vector velocidad en todos los puntos del escurrimiento es idéntico tanto en magnitud como en dirección para un instante dado o expresado matemáticamente.

Gradiente: el índice de mayor cambio por unidad de longitud de una variable en el espacio a partir de un punto de interés.

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

Una vez definido el problema, se deben establecer de forma precisa los mecanismos utilizados para el análisis de la problemática de investigación y de esta manera lograr con los objetivos de la misma, así como también la descripción de cada uno de los distintos aspectos relacionados al conjunto de métodos, procedimiento y técnicas utilizados para dirigir el desarrollo y diseño de la investigación hacia su correcta realización.

3.1 Tipo de investigación

La investigación puede ser de varios tipos, y en tal sentido se puede clasificar de distintas maneras, sin embargo es común hacerlo en función de su nivel, de acuerdo a esto podemos clasificarlas en: Investigación exploratoria, la cual se efectúa sobre un tema u objeto desconocido o poco estudiado y su resultado constituye una visión aproximada de dicho objeto, Investigación descriptiva, la cual consiste en la caracterización de un hecho, fenómeno, individuo o grupo con el fin de establecer su estructura o comportamiento, y la Investigación explicativa que se encarga de buscar el porqué de los hechos mediante el establecimiento de relaciones causa y efecto

Esta investigación será de tipo descriptiva, ya que se caracteriza por describir el comportamiento del campo de flujo de agua alrededor de un banco de cilindros circulares horizontales, a través de aproximaciones numéricas, utilizando el método de elementos finitos de la Dinámica de Fluidos Computacional CFD.

3.2 Diseño de investigación

De acuerdo con Hernández S., Fernández C., Carlos y Baptista L., Pilar. (2004), el diseño de investigación constituye el plan general del investigador para conseguir una respuesta clara a sus interrogantes o comprobar una hipótesis de investigación. El diseño de la investigación se encarga de detallar las estrategias básicas que el investigador adopta para conseguir información exacta y que se pueda

interpretar. El tipo de investigación es la manera que se va a adoptar para cumplir con los objetivos, existen varios tipos de investigación los cuales pueden ser; Experimental, de Campo o Documental.

En base al objetivo general, se concibe que el nivel de la actual investigación será de tipo documental ya que en este se busca obtener y analizar datos provenientes de materiales impresos u otro tipo de documentos para realizar la simulación del flujo. Por lo tanto, el estudio se encuentra alineado en este nivel documental.

Según Zorrilla (1993), la investigación documental es aquella que se realiza a través de la consulta de documentos (libros, revistas, periódicos, memorias, anuarios, registros, códigos, constituciones, etc.).

3.3 Nivel de la investigación

El nivel de conocimiento es descriptivo, y éste consiste en la caracterización de un hecho, fenómeno, individuo o grupo, con el fin de establecer su estructura o comportamiento. Hernández (2004), señala que la investigación descriptiva busca especificar propiedades, características y rasgos importantes de cualquier fenómeno que se analice. Teniendo como objetivo indagar la incidencia y los valores en que se manifiestan una o más variables al ubicar, categorizar y proporcionar la visión de una comunidad, un evento, un contexto, un fenómeno o situación.

En este orden de ideas, la investigación se basa en describir el comportamiento de las variables del fluido que componen el campo de flujo, incluyendo el efecto de la capa límite, desprendimiento de vórtices y la influencia del calor transferido desde la superficie del cilindro para fijar los parámetros por los cuales se regirá la investigación.

3.4 Población y muestra

La población Hurtado y Toro (2001), la definen como: “es la composición de todos los elementos a ser estudiados y a quienes podrán ser generalizados los resultados de la investigación, una vez concluida ésta, para lo que es necesario que la muestra con la cual se trabaje sea representativa de la población”. Por ende, la población será las diferentes curvas características y gráficas experimentales que

muestran los fabricantes. La muestra a emplear en este proyecto es una muestra del tipo no probabilística, donde Véliz, y Arredondo determinan en su trabajo de grado titulado Aspectos Teóricos sobre tipos de Muestreo, que este tipo de muestra es: “aquel tipo de muestra para el cual no puede no puede calcularse la probabilidad de extracción de una determinada muestra”.

Por lo tanto, la muestra seleccionada son: los diferentes puntos o nodos que se generen por la discretización del dominio fluidizado y en los cuales se evaluarán las características del fluido, teniendo en cuenta que el mallado debe ser lo suficientemente fino para tener el mejor detalle de las soluciones numéricas.

3.5 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

De acuerdo con Hernández, Fernández y Baptista (1998) se define a la técnica de recolección de datos como “las observaciones que consisten en el registro sistemático, cálido y confiable de comportamientos o conductas”. Las técnicas para la recolección de datos son básicamente: revisiones bibliográficas, entrevistas, registros de prensa, observaciones directas, entre otras. Existen diversos instrumentos para la recolección de estos datos los cuales son: computadores, lápiz, hojas, grabadoras, fotografías, entre otras.

Las técnicas a utilizar en el presente trabajo serán:

Localización y consolidación de los datos.

Revisión documental: Esta técnica se realizará con el fin de profundizar la información recopilada con todas las aplicadas anteriormente, esta comprende la búsqueda de la información de documentos empresariales, que contribuyan al conocimiento del comportamiento de sucesos realizados que sirvan de apoyo para el desarrollo de teorías pertinentes para la resolución de problemas.

Y por último, en el presente trabajo se contará con la utilidad de computadoras para conseguir los resultados obtenidos por la simulación que describen el comportamiento del campo de flujo, con los cuales se procede a comparar con valores

experimentales realizados anteriormente y/o formular hipótesis en base a los principios de conservación para lograr la validación de los mismos.

3.6 Fases metodológicas

Se describirán de manera individual, las respectivas acciones, procedimientos, técnicas y actividades a realizar, para dar cumplimiento a cada uno de los objetivos específicos planteados.

Fase I: “Descripción de la dinámica del campo de flujo alrededor de un cilindro horizontal”

A través de los diferentes antecedentes seleccionado y apoyados por material bibliográfico técnico sobre la simulación del flujo alrededor de cilindros circulares sometidos a diferentes condiciones y patrones, se identificarán las variables que permiten la explicación fenomenológica del paso del flujo de agua a través del dominio fluidizado exterior al(los) cilindros, involucrando diferentes condiciones de flujo que puedan presentarse, con la finalidad de caracterizar los fenómenos hidrodinámicos.

Fase II: “Modelado mediante una herramienta CAD del lecho fluidizado”

Luego de una investigación y documentación en base a varios trabajos de grado y artículos científicos sobre el campo de flujo incompresible a través de un cilindro circular, se selecciona uno que será el modelo a estudiar. Se determinan los parámetros dimensionales y condiciones de flujo para la aplicación de la investigación y los estudios, a fin de manejarlos como data necesaria para realizar los objetivos del proyecto de investigación. Luego se modelará mediante una herramienta de dibujo asistido por computadora CAD por sus siglas en inglés.

Fase III: “Elección del modelo matemático basado en la técnica FEM, adecuado para el estudio de la dinámica del campo de flujo, considerando los efectos de turbulencia”

Una vez realizada la revisión bibliográfica satisfactoria, se determinan los modelos matemáticos más apropiados para la realización de la simulación numérica basándose en la interpretación de la investigación bibliográfica y de ser necesario la

comparación de los resultados obtenidos en la simulación de modelos similares al seleccionado en esta investigación. La idea es establecer la condiciones para que aparezca el fenómeno de desprendimiento de vórtices, desprendimiento de la capa límite y el flujo oscilatorio, para describir las inestabilidades hidrodinámicas.

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

La simulación del campo de flujo se realiza a través de la configuración del software ANSYS® Workbench CFX o FLUENT, según sea el entorno más eficiente para la simulación, es decir, una herramienta que aplica CFD (computational fluid dynamics) para ejecutar algoritmos computacionales seleccionados para la solución de los modelos matemáticos, usando métodos de elementos finitos y estableciendo también los criterios de convergencia que tendrá a la hora de realizar los cálculos, donde se especifica el número máximo de iteraciones o pasos a realizar para el cálculo, así como el valor objetivo del criterio de convergencia ya sea residual o máximo. El cálculo se detendrá al cumplirse cualquiera de estas dos condiciones y así poder generar la data, gráficos y/o diagramas para la descripción de las variables involucradas. Se espera poder generar los contornos de presión, velocidad y temperatura para la descripción del fenómeno.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

El presente capítulo explica de manera clara y concisa el desarrollo de la investigación para llevar a cabo el cumplimiento de los objetivos planteados, abarcando de manera individual cada uno de ellos. Otorgándole las propiedades necesarias al caso estudio para generar los fenómenos irreversibles que ocurren en el campo externo de flujo compresible en la descarga de una tobera CD y evaluar los resultados.

4.1 Descripción de la dinámica del campo de flujo alrededor de un cilindro horizontal.

Un cuerpo sumergido en un fluido en movimiento está sometido a fuerzas de resistencia que pueden definirse como la suma de las F_D debido a la forma del cuerpo, donde se presentan dos regiones, una frontal que frena la corriente (región de estancamiento) con presiones elevadas y otra posterior donde se desprende la corriente y las presiones son bajas, y, las fuerzas de fricción que dependen del esfuerzo cortante y su efecto sobre la superficie en contacto con el fluido.

El flujo ideal alrededor de un cilindro es el denominado modelo no viscoso, donde no existe dependencia con el número de Reynolds, generándose dos corrientes simétricas sin cambios en las propiedades del fluido, y por ende no existe resistencia en el campo de flujo, a lo que se le llama paradoja de D'Alembert del flujo potencial, sin embargo la realidad dista mucho de ese modelo, pues en los flujos reales, si existe dependencia con el número de Reynolds y las fuerzas viscosas comienzan a ejercer su efecto, cada vez más marcados, iniciando con patrones de flujo simétricos de remolinos que se desprenden del cilindro y se mueven alejándose de él a través la estela de Von Karman, y en algunos casos el desprendimiento de estos remolinos se alternan entre la parte superior e inferior generándose pulsaciones y/o

vibraciones en el cilindro que son causales de resonancia. También se presenta rotación de los vórtices superior e inferior, pero en sentidos opuestos.

4.2. Modelado mediante una herramienta CAD del lecho fluidizado.

El modelado del lecho fluidizado consiste en una superficie plana con las dimensiones apropiadas para que se logre el desarrollo del flujo antes del cilindro, se pueda visualizar la estela de Von Karman después del cilindro y que los efectos de la condición de no deslizamiento de las aristas superior e inferior no influya en los resultados. Otra razón por la cual se decidió por el modelo plano es para ahorrar tiempo computacional, ya que el fenómeno en estudio tiene un alto grado de simetría.

Se realizó en base a un sketch o boceto (ver figura 12) en el cual se dimensiona por completo el área de estudio por medio de la herramienta CAD incluida en ANSYS® Workbench . Como se explicó anteriormente, en virtud de que el flujo en cuestión es completamente simétrico, se realizó un estudio en dos dimensiones, esta característica de análisis bidimensional se definió en las propiedades del modelador, puesto que el software predetermina su configuración para este tipo de estudio. En virtud del análisis que se desea realizar se procedió a diseñar un dominio fluidizado (lecho fluidizado) en forma de rectángulo que albergará al (a los) cilindro(s), y para ello se dimensionó con una distancia de 20 veces el diámetro del cilindro antes y después de su posición central, conjuntamente con una separación de 10 veces el diámetro por arriba y por debajo del cilindro. Posteriormente se realizaron dos bocetos más para estudiar la configuración de tres y diez cilindros mostrados en la figura 13, con la finalidad de ampliar el estudio para aplicaciones en ingeniería como el diseño de intercambiadores de calor de flujo cruzado. La configuración de los tres cilindros es simétrica con uno al frente del flujo y los otros detrás, cuyos centros están dispuestos a 30° con la horizontal y separados una distancia de 1,5 veces el diámetro. Misma configuración usada para el caso del sistema formado por los 10 cilindros.

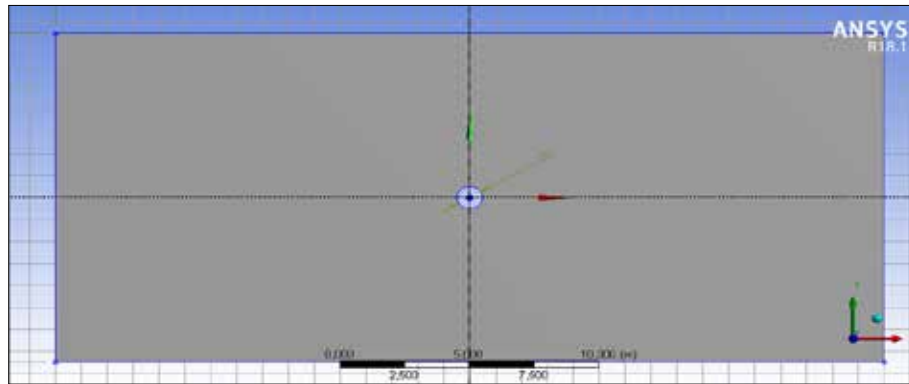


Figura 12. Sketch para el modelo del lecho fluidizado de un cilindro
 Fuente: Rojas (2019)

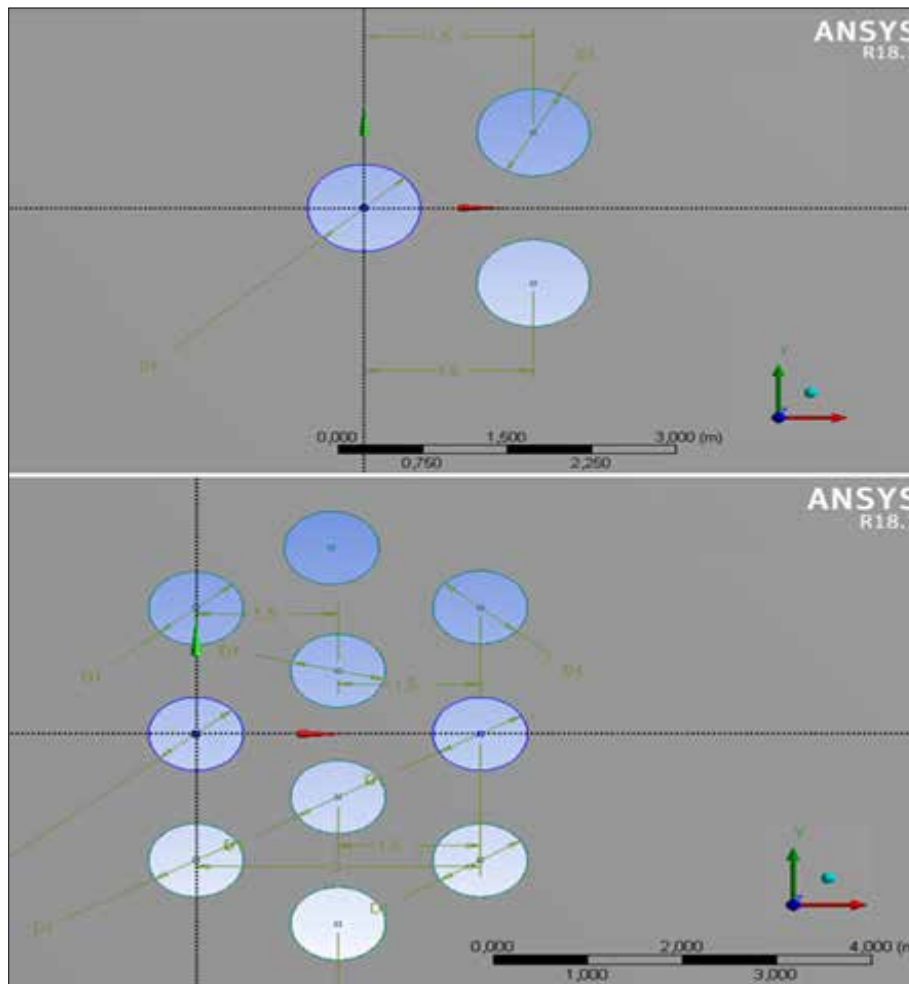


Figura 13. Bocetos para el lecho fluidizado de a) tres y b) diez cilindros
 Fuente: Rojas (2019)

4.3. Elección del modelo matemático basado en la técnica FEM, adecuado para el estudio de la dinámica del campo de flujo, considerando los efectos de turbulencia.

Fundamentándose en las consultas previas realizadas, de las diferentes fuentes bibliográficas y guías de ANSYS® Workbench, se concluyó que las ecuaciones y modelos matemáticos más adecuados para la realización del estudio son las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas por Reynolds (RANS, por sus siglas en inglés) y el modelo de turbulencia basado en el transporte del esfuerzo de corte (SST, por sus siglas en inglés). Buscando siempre las condiciones apropiadas para la aparición de fenómenos irreversibles como contornos de presión, generación de remolinos, desprendimiento de capa límite y la estela de Von Karman, en el campo de flujo incompresible definido.

4.4. Simulación del campo de flujo mediante una herramienta de dinámica de fluidos computacional (CFD).

El proceso de simulación por medio de la herramienta de CFD ANSYS® Workbench consta de una serie de pasos que deben irse cumpliendo de forma ordenada y que sin dicha estructuración no permitiría el avance del proceso, puesto que cada uno de estos pasos depende de su predecesor. En la figura 14 se puede detallar los tres procesos de simulación establecidos para uno, tres y diez cilindros.

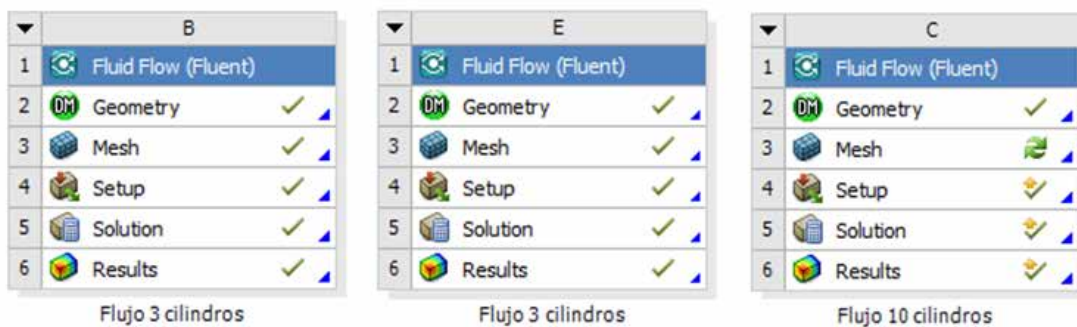


Figura 14. Proceso de simulación para ANSYS® Fluent

Fuente: Rojas (2019)

4.4.1. Discretización del dominio

Luego de realizado el modelo CAD del dominio, el punto de partida para el cálculo de las variables son las celdas de todo el dominio computacional, estas se generaran en el módulo Mesh de ANSYS Workbench. La discretización numérica seleccionada para el caso estudio, fue un mallado híbrido triangular en el lecho fluidizado y estructurado alrededor de cada cilindro, donde el tamaño máximo de las aristas de los elementos de la malla fue de 0,00125m, sin embargo, se dimensionó de manera más adecuada el contorno de los cilindros, a fin de poder obtener mejores resultados en la predicción de las condiciones de la capa límite.

En la figura 15 se observa los aspectos generales del mallado para el caso de un cilindro, así como características cuantitativas como lo son el número de nodos de 10435y 15432 elementos. En cuanto a la calidad del mallado, se observó que los elementos presentan una calidad mínima de 0,95423 y máxima de 1, con un promedio de 0,99816. Referido en porcentaje, se obtiene que la calidad de la ortogonalidad de los elementos para el caso estudio es en promedio de 99,81%, lo que traduce en una excelente calidad para proceder con la simulación del campo de flujo.

En las figuras 16 y 17 se presentan las vistas detalladas del dominio discretizado en el caso de tres y diez cilindros respectivamente, tomando en cuenta que la principal diferencia con el mallado realizado en el caso de un solo cilindro, son las zonas intercilíndricas o espacio que existe entre las generatrices de los cilindros, donde las mallas estructuradas se acoplan. Para ello se definió una cantidad mínima de líneas concéntricas a los cilindros de tal manera que el mallado diseñado para la observación de los efectos de capa límite no interfieran entre sí, y las zonas de acoples contengan elementos triangulares para una mejor distribución de los espacios. En la tabla 1 se muestran los datos estadísticos de las mallas y su porcentaje de calidad, notándose que a medida de aumenta el número de nodos y de elementos, disminuye la calidad del mallado.

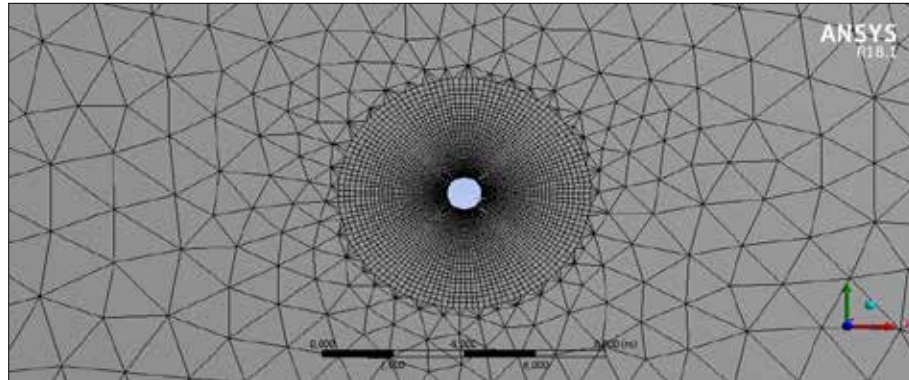


Figura 15. Aspectos generales del mallado para un cilindro
Fuente: Rojas (2019)

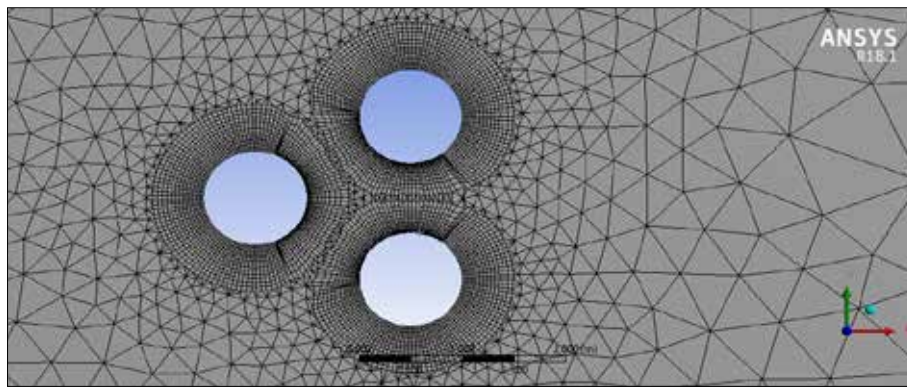


Figura 16. Aspectos generales del mallado para tres cilindros
Fuente: Rojas (2019)

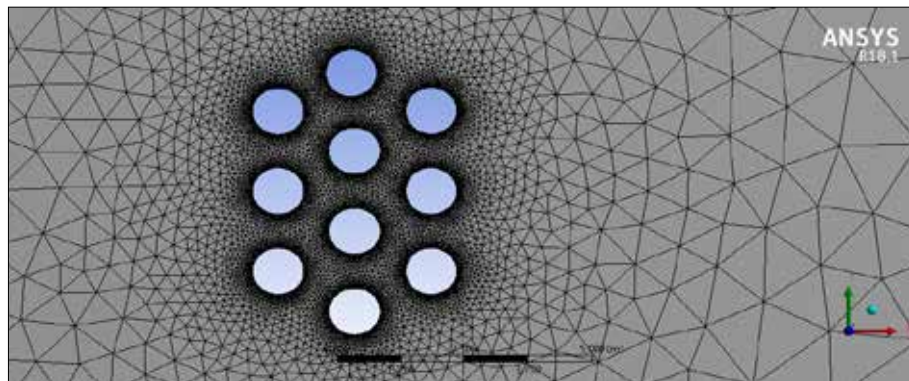


Figura 17. Aspectos generales del mallado para diez cilindros
Fuente: Rojas (2019)

	Un Cilindro	Tres cilindros	Diez cilindros
Nodos	10435	19966	29893
Elementos	15431	33801	40764
% Originalidad	99,81	99,56	99,27

Tabla 1. Estadísticas del mallado.

Fuente: Rojas (2019)

Por otra parte, se definieron los lados (aristas del rectángulo) para las condiciones del dominio, configurándose como se aprecia en la figura 18 (caso de diez cilindros), donde en el extremo izquierdo existe una serie de nombres de selecciones que definen la entrada, salida, pared superior, pared inferior y cada contorno de los cilindros, con la finalidad de dejarlas definidas para programar las condiciones de borde en el siguiente paso del proceso de simulación.

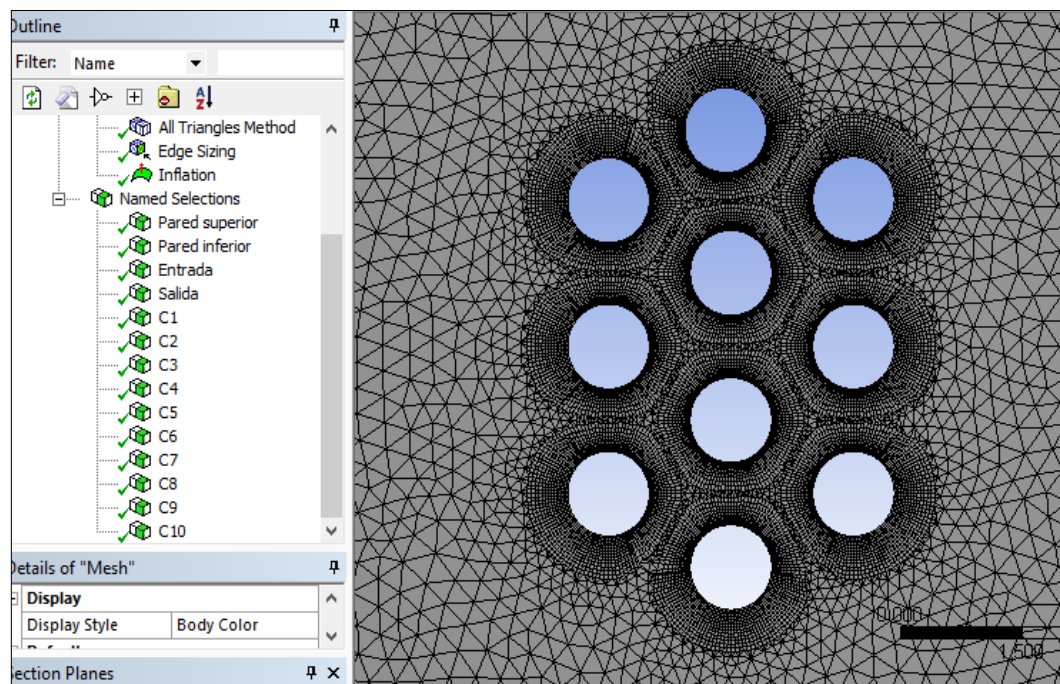


Figura 18. Definición de selecciones para el caso de diez cilindros

Fuente: Rojas (2019)

4.4.2. Configuración de la herramienta de CFD

4.4.2.1. Configuración del dominio

En este paso se definen las constantes conocidas: presión y temperatura, tanto a la entrada como a la salida, para la resolución de las ecuaciones necesarias para lograr una correcta simulación y obtención de resultados a través del módulo de (ver figura 14). Como primer paso el software de resolución de ecuaciones, se define el tipo de estudio a realizar y el hardware del que se dispone (ver figura 19), una vez iniciado el SetUp se ejecuta la preconfiguración del que incluye una herramienta para evaluar el mallado realizado en el paso precedente, como se aprecia en la figura 20 donde también se definen algunos parámetros para la solución de las ecuaciones, así como un estudio basado en la presión y para velocidad absoluta, en un tiempo transitorio.

Los modelos matemáticos se especificaron, tomándose en consideración la ecuación de energía y para la viscosidad del modelo de turbulencia SST. El fluido en cuestión es agua líquida a 25°C, con densidad constante de 998,2 kg/m³, viscosidad de 0,001003 kg/ms (ver figura 21).

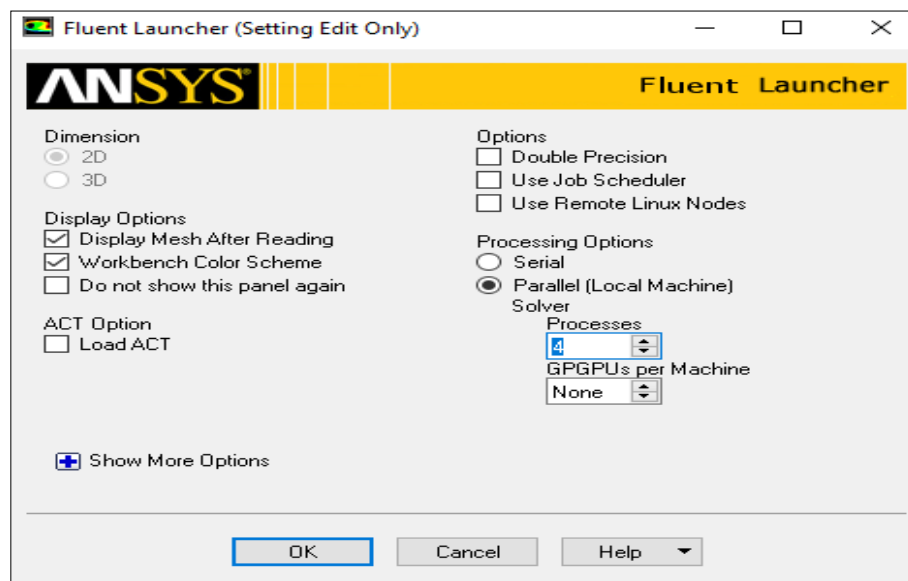


Figura 19. Configuración del
Fuente: Rojas (2019)

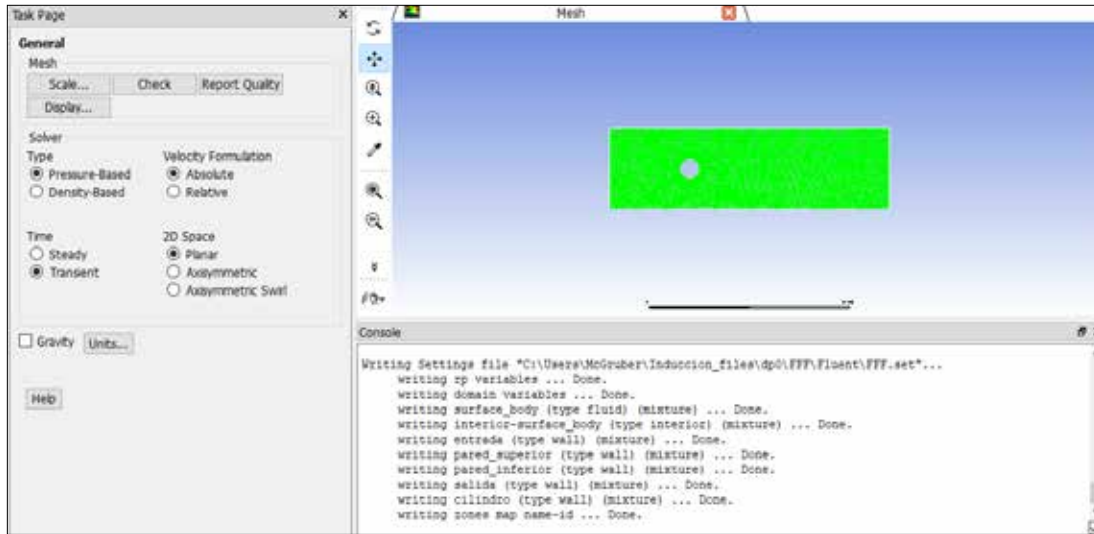


Figura20: Preconfiguración del solver
Fuente: Rojas (2019)

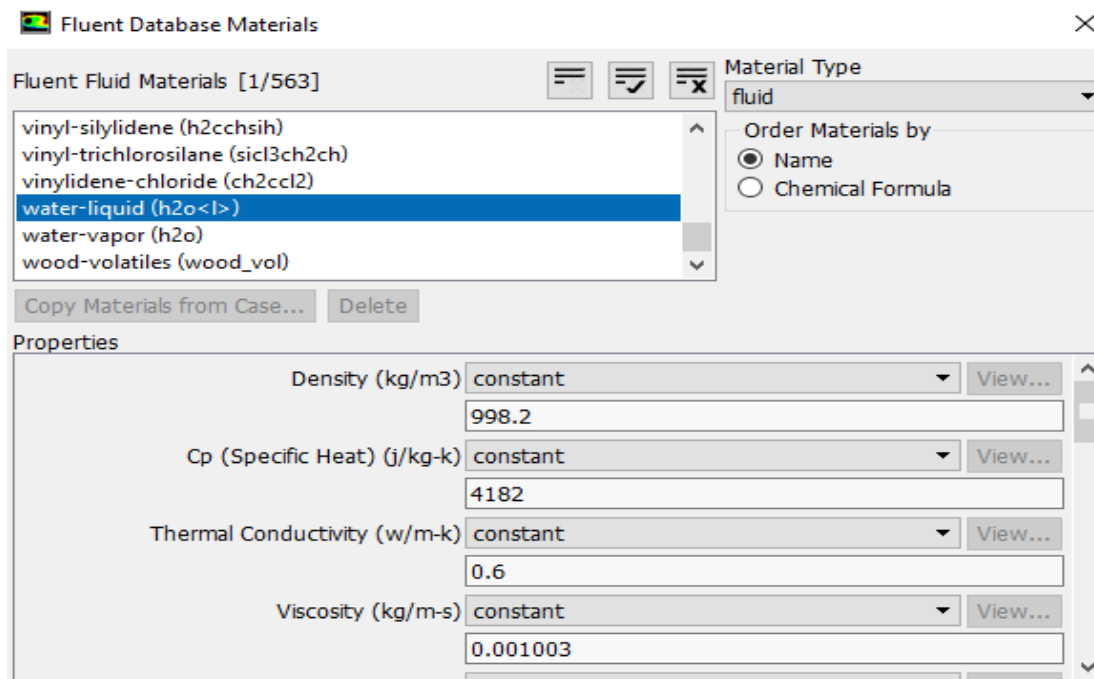


Figura 21. Tipo de fluido del estudio y sus propiedades
Fuente: Rojas (2019)

No menos importante se configuran las condiciones de borde para la realización de las simulaciones. En el caso estudio se asumió una velocidad de entrada de 20m/s, 80 m/s y 160 m/s a 298 K, mientras que se considera presión atmosférica para la

salida ($P_{man}=0$ kPa). En las figuras 22 y 23 se muestran la forma como se introducen los datos para la entrada y salida respectivamente.

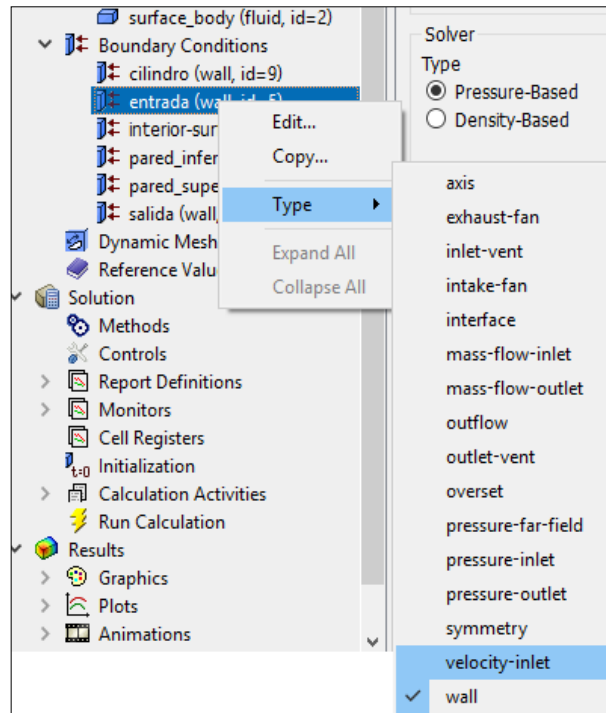


Figura 22. Configuración de los datos de entrada

Fuente: Rojas (2019)

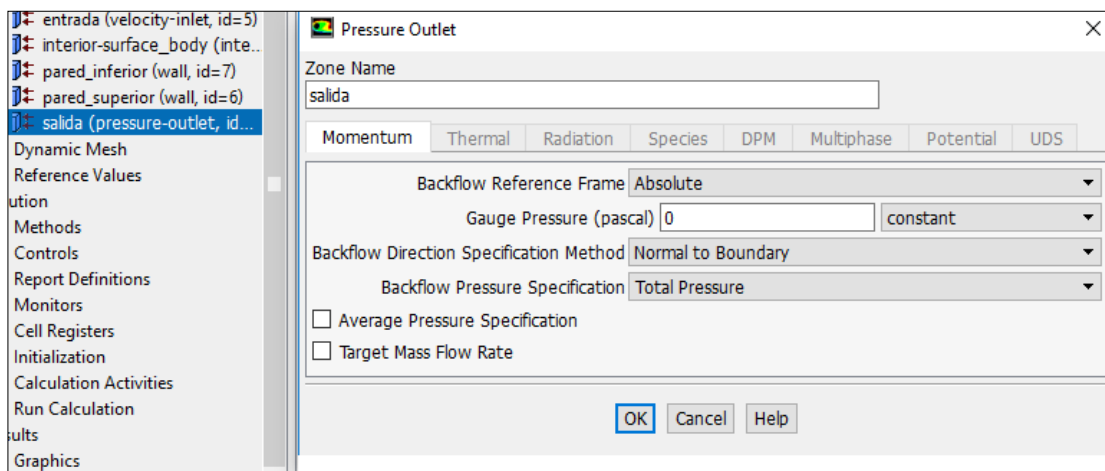


Figura 23. Configuración de los datos de salida

Fuente: Rojas (2019)

Las aristas referidas a las paredes superior e inferior del lecho fluidizado como del contorno de los cilindros se configuran como paredes estacionarias bajo una condición de no deslizamiento (ver figura 24), con la finalidad de condicionar al fluido a que tenga una velocidad nula relativa a la frontera de la pared.

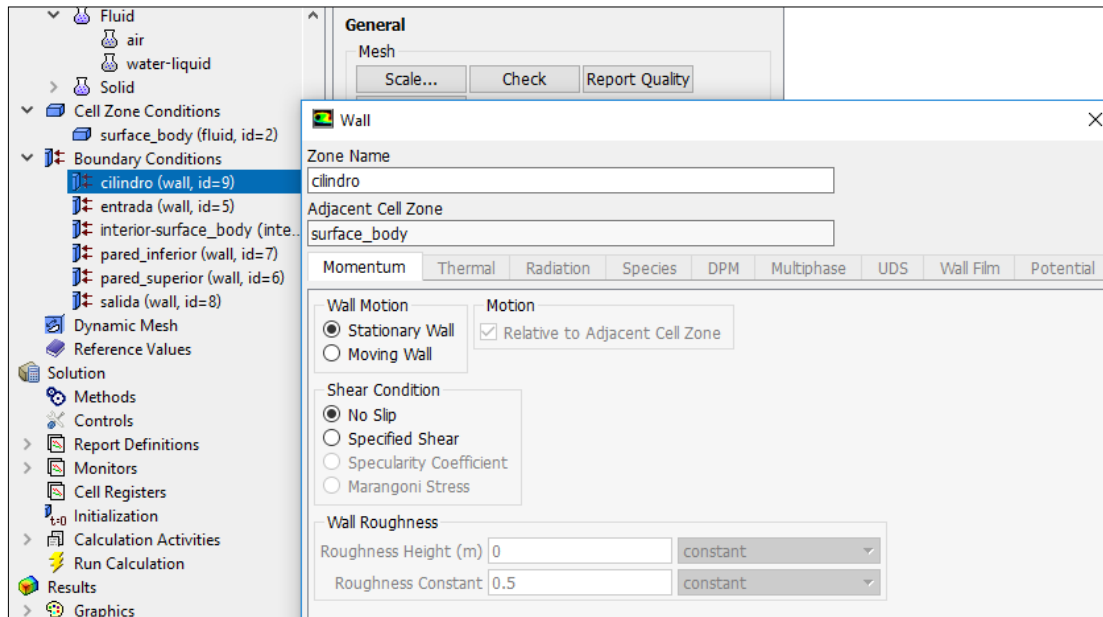


Figura 24. Configuración de los datos de salida

Fuente: Rojas (2019)

4.4.2.2. Configuración de la herramienta de cálculo

En este paso se establecen todos los criterios correspondientes a la convergencia de la simulación, y los que tendrá en cuenta el programa a la hora de realizar los cálculos. En la figura 25 se puede observar el número máximo de interacciones, así como el valor residual o raíz media cuadrática RMS. La simulación entonces convergerá al cumplirse cualquiera de las dos condiciones.

Para cada simulación se realizaron 5.000 interacciones, y los criterios de valor residual en el orden de los 1×10^{-4} como criterio de convergencia, el cual es un valor que proporciona una alta precisión en los resultados de una simulación y es extremadamente conservador para las recomendaciones del fabricante del software de CFD.

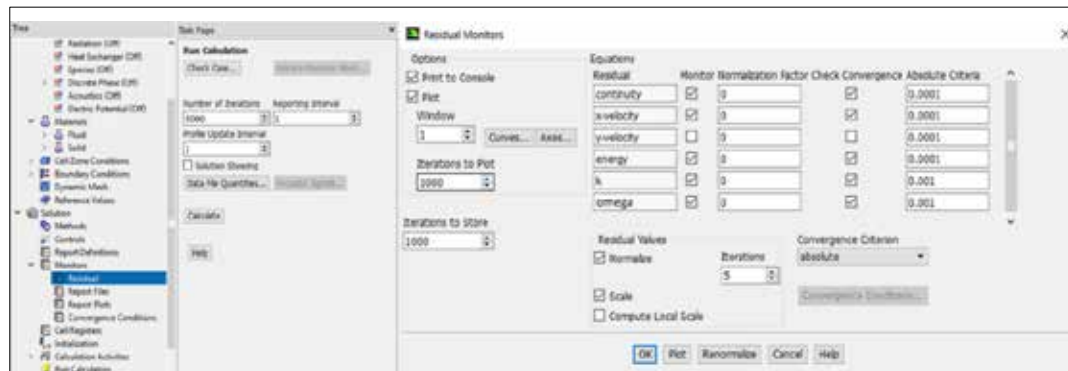


Figura 25. Parámetros de la herramienta de calculo

Fuente: Rojas (2019)

4.4.2.3. Convergencia de las simulaciones

El objetivo del módulo de la herramienta CFD, es resolver las ecuaciones del modelo matemático seleccionado. El mismo genera unas curvas de convergencia con la finalidad de asegurarse que la solución generada conserva estas cantidades. Estas curvas de convergencia deben ser analizadas para asegurar una correcta simulación evitando así, violar los principios de conservación postulados por las leyes de la física.

En las gráficas 1 y 2 se evidencia el comportamiento de las curvas de convergencia tanto para las leyes de conservación de masa y momento, así como las ecuaciones de turbulencia basado en el modelo del transporte del esfuerzo cortante SST kappa – omega (-). En dichas gráficas se presenta el resultado de convergencia para el caso de la simulación de los diez cilindros, sin embargo para los otros casos las curvas de convergencia demostraron un comportamiento similar, tanto para las leyes de conservación de momento y continuidad, así como para los modelos de turbulencia como lo son k- .

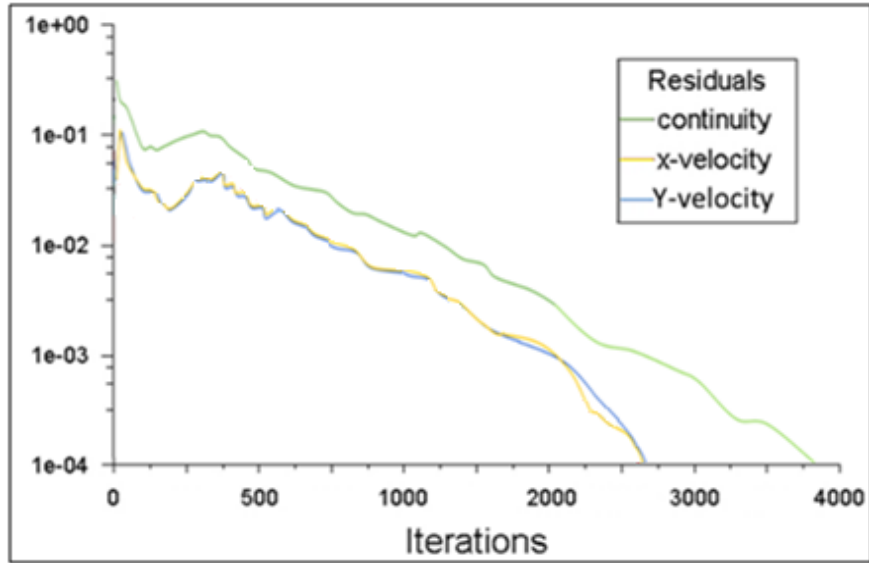


Gráfico 1. Convergencia de las ecuaciones de continuidad y momento para $V=80$ m/s en el caso de diez cilindros

Fuente: Rojas (2019)

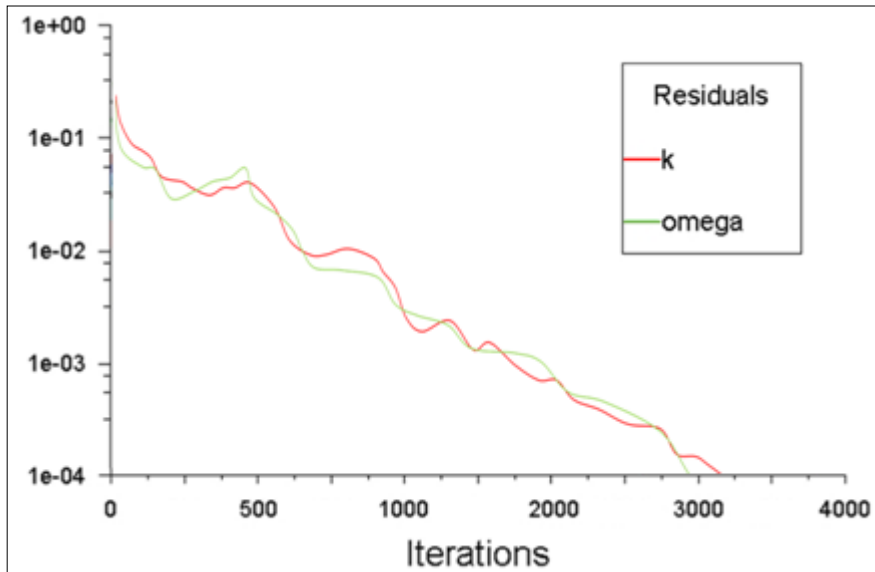


Gráfico 2. Convergencia de las ecuaciones de turbulencia SST kappa k- omega para $V=80$ m/s en el caso de diez cilindros

Fuente: Rojas (2019)

4.4.3. Obtención de los resultados.

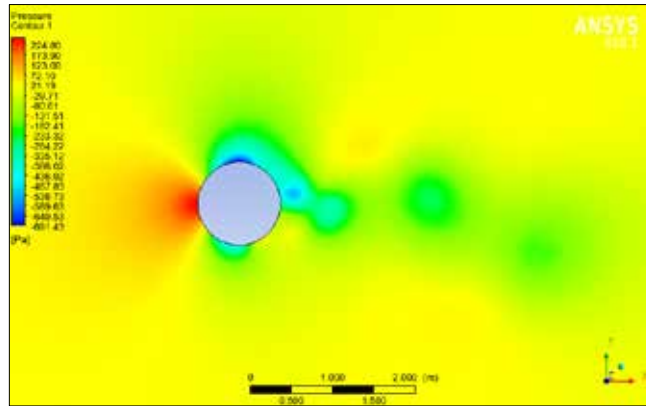
Los datos obtenidos son presentados en el módulo ANSYS® Workbench , donde estos se pueden agrupar en forma de gráficos, los cuales representan el comportamiento del flujo, ya sea en gráficos bidimensionales de contornos de velocidad, presión y líneas de flujo, donde se ven las variables del campo de flujo del en toda la extensión del dominio fluidizado, permitiendo así evaluar los resultados contra los conocimientos teóricos apoyado en las bases teóricas fundamentadas por las ecuaciones de gobierno de la mecánica de fluido.

4.4.3.1 Visualización de los contornos de presión.

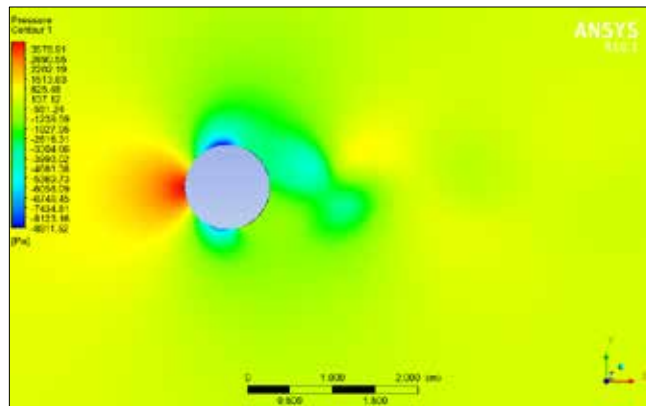
Una de las variables más influyentes en la evolución del campo de flujo alrededor de un objeto sumergido en un lecho fluidizado es la presión, ya que la interacción fluido – sólido permite determinar zonas de estancamiento donde las presiones son máximas y zonas de depresión que promueven la formación de vórtices por el incremento de la velocidad debido a aceleraciones convectivas después del paso del flujo. En las figura 26, 27 y 28 se muestran los tres perfiles o contornos de presión evaluados a diferentes velocidades de entrada a) $V=20\text{m/s}$, b) $V=80\text{m/s}$ y c) $V=160\text{ m/s}$, para los casos de un cilindro, tres cilindros y diez cilindros respectivamente.

La primera observación general de estos contornos es que efectivamente existe un punto de estancamiento justo en la parte frontal de todos los cilindros donde existen las presiones máximas, y las mismas aumentan a medida que aumenta la velocidad de entrada debido a la conservación de la energía, puesto que lograr velocidad nula en los puntos de estancamiento, conlleva una presión más elevada cuando la velocidad de entrada es más mayor. Llama la atención que no todas las zonas de baja presión sobre el contorno del cilindro son simétricas (a excepción de la figura 26c) y tampoco son diametralmente opuestas, lo que sugiere que el componente viscoso a través de las ecuaciones del modelo de turbulencia, está generando su efecto.

a)



b)



c)

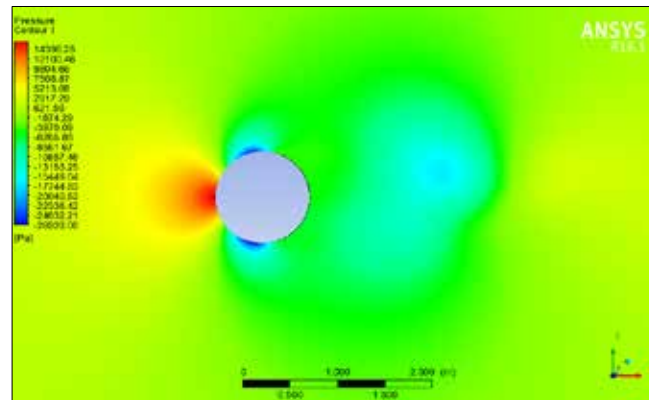
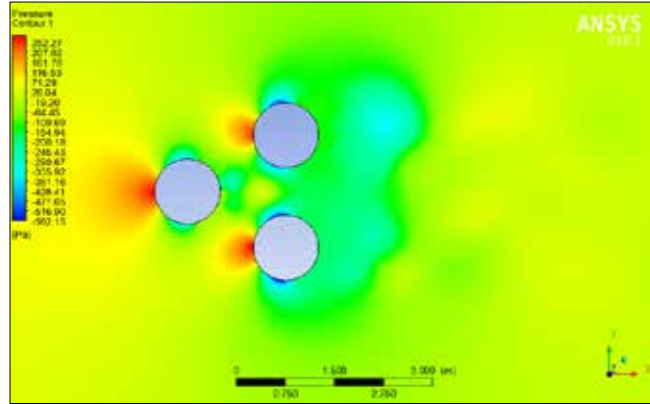
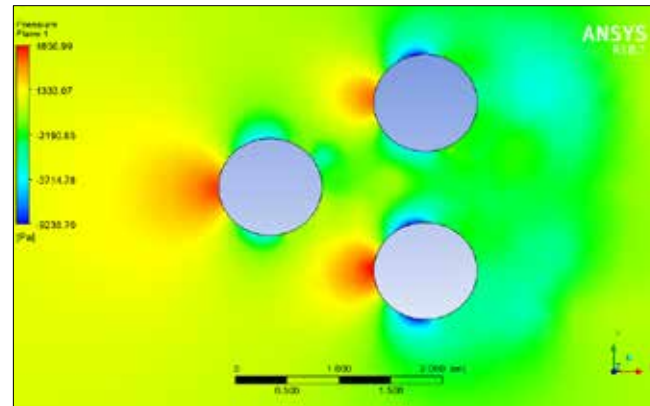


Figura 26. Contornos de presión para el flujo alrededor de un cilindro. a) $V=20\text{m/s}$, b) $V=80\text{ m/s}$ y c) $V=160\text{ m/s}$
Fuente: Rojas (2019)

a)



b)



c)

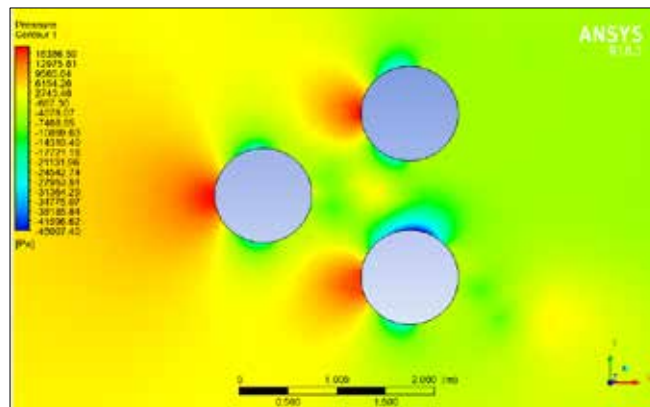
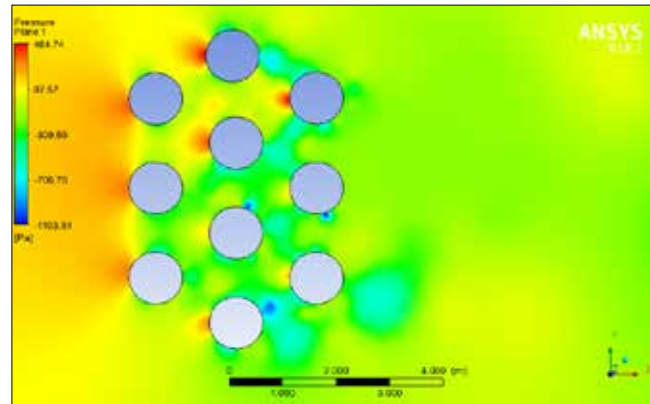
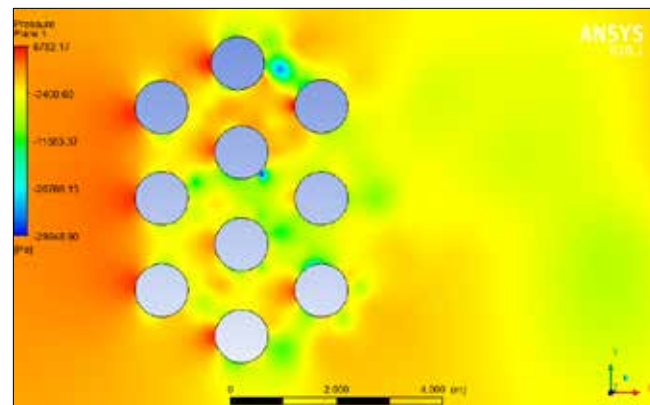


Figura 27. Contornos de presión para el flujo alrededor de tres cilindros. a) $V=20\text{m/s}$, b) $V=80\text{ m/s}$ y c) $V=160\text{ m/s}$
Fuente: Rojas (2019)

a)



b)



c)

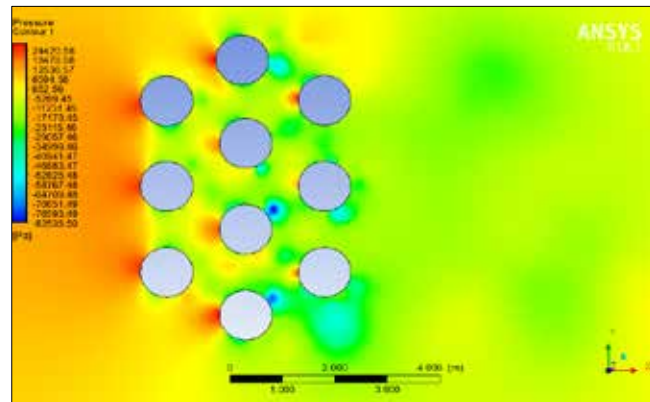


Figura 28. Contornos de presión para el flujo alrededor de diez cilindros. a) $V=20\text{m/s}$, b) $V=80\text{ m/s}$ y c) $V=160\text{ m/s}$
Fuente: Rojas (2019)

En cuanto a desprendimientos de flujo de baja presión solo pueden notarse en las figuras 26c, 27a, 27b, 28a y 28c, donde existen zonas de baja presión claramente separadas de los cilindros. Hay que recordar que los remolinos se generan por la relación entre las fuerzas viscosas y las fuerzas inerciales justo cuando el flujo pasa alrededor del cilindro y esta relación se ve afectada cuando el campo de flujo aguas abajo del cilindro no es libre, como en los casos de tres y diez cilindros, ya que las columnas subsiguientes al primer cilindro representan resistencia y destruyen los focos de remolinos (ver todas las figuras 27 y 28. Si se enumeran los cilindros según la nomenclatura blow, es decir, iniciar en el cilindro más inferior y más a la izquierda de la configuración, como lo muestra la figura 27, claramente se identifica al cilindro número 9 de la figura 28^a, como el que se encuentra sometido a las menores presiones y por ende no aparecen los valores máximos de la presión de estancamiento, ni sufre desprendimiento de remolinos.

En las imágenes correspondiente a las figura 29, se observa una tendencia a la apertura del campo de presiones máximas, en los puntos de estancamiento de los cilindros de la segunda columna, esto debido al aumento de la velocidad en el espacio entre ellos, provocando un efecto tobera y acelerando al flujo.

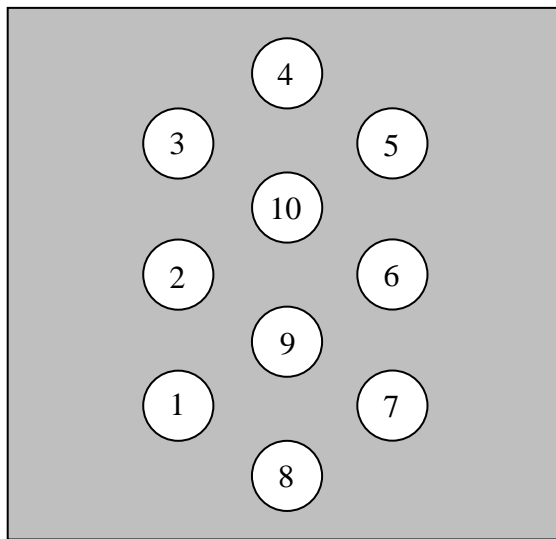


Figura 29. Numeración de los cilindros en la configuración de diez

Fuente: Rojas (2019)

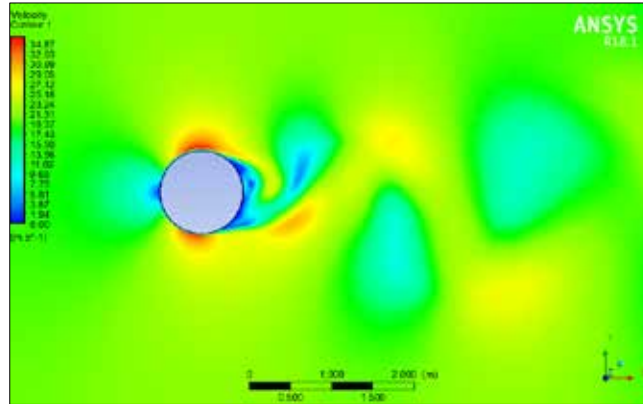
4.4.3.2 Visualización de los contornos de velocidad.

Otra de las variables que conforman el campo de flujo alrededor de los cilindros es la velocidad y por ello se procedió a contrastar los contornos de esta variable en las mismas condiciones y configuraciones que el caso de la presión, y para ello se disponen de las figuras 30, 31 y 32 donde se muestran los tres perfiles para a) $V=20\text{m/s}$, b) $V=80\text{m/s}$ y c) $V=160\text{ m/s}$ como condición de entrada al lecho fluidizado, para los casos de un cilindro, tres cilindros y diez cilindros respectivamente.

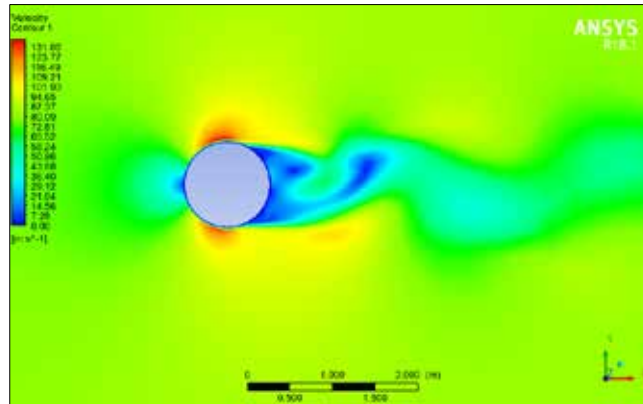
En las imágenes de la figura 30, se puede notar casi de bibliografía lo que le ocurre al campo de velocidades del flujo que se mueve alrededor de un cilindro horizontal, ya que es notable la formación de la estela de Von Karman y los desprendimientos alternativos y oscilantes de los remolinos. También se puede observar que la estela es atenuada por el incremento de la velocidad del flujo, tras comparar las figuras 30a y 30c, demostrándose así que de acuerdo a la teoría hidrodinámica esta inestabilidad se produce en rangos elevados de $(47 < \text{Re} < 10^7)$ para cilindros circulares), con remolinos en cada lado del cilindro, formando dos filas de vórtices en su estela, cuyos centros se alternan, quedando en cada fila situados en una posición intermedia con respecto a los de la otra. En la figura 33, se presenta una imagen del flujo transitorio de la estela para $V=20\text{ m/s}$, y los repetidos patrones mencionados con anterioridad, tal como se podría visualizar usando la técnica experimental de velocimetría por imágenes de partículas (PIV por sus siglas en inglés).

Las imágenes de las figuras 33 y 34, presentan con más detalle lo que se visualizó en los contornos de presión de las figuras 29 y 30, existe un bloqueo parcial del flujo producido por los cilindros subsiguientes a la primera columna que impide el desarrollo de la estela, llegando inclusive a formarse canales de velocidades bajas aguas abajo (caso de la figura 33c) y patrones caóticos detrás de los cilindros 5, 6 y 7 en la configuración de diez cilindros.

a)



b)



c)

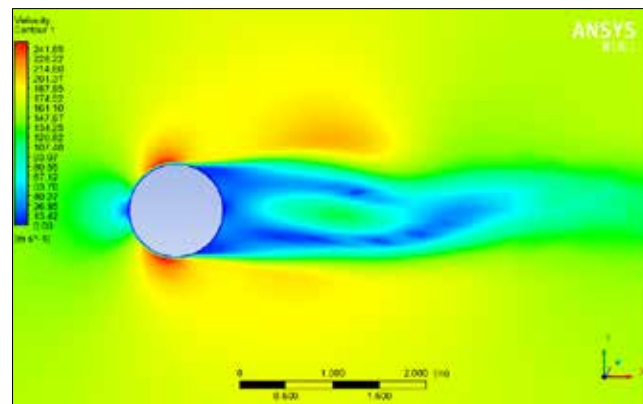
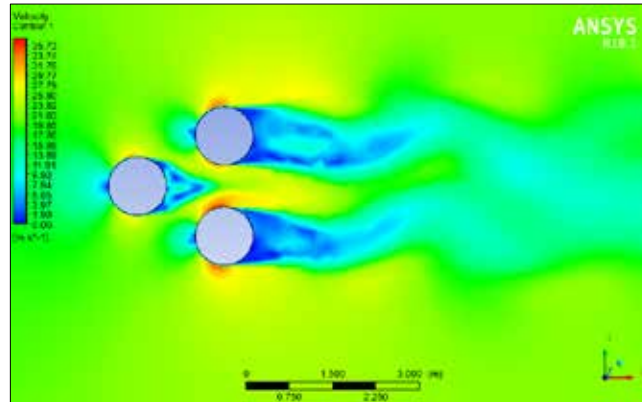
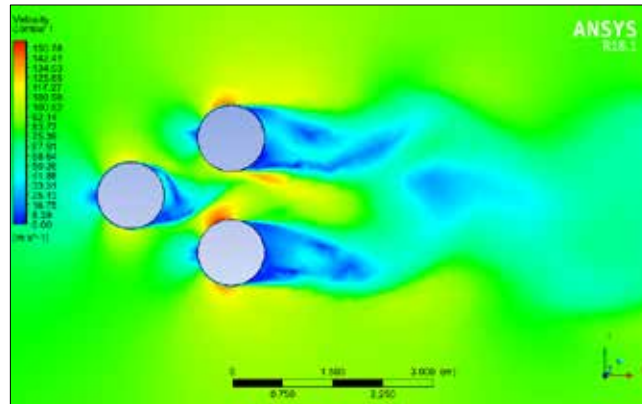


Figura 30. Contornos de velocidad para el flujo alrededor de un cilindro. a) $V=20\text{ m/s}$, b) $V=80\text{ m/s}$ y c) $V=160\text{ m/s}$
Fuente: Rojas (2019)

a)



b)



c)

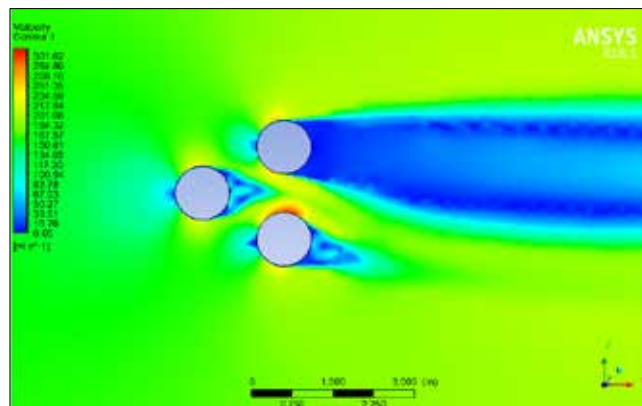
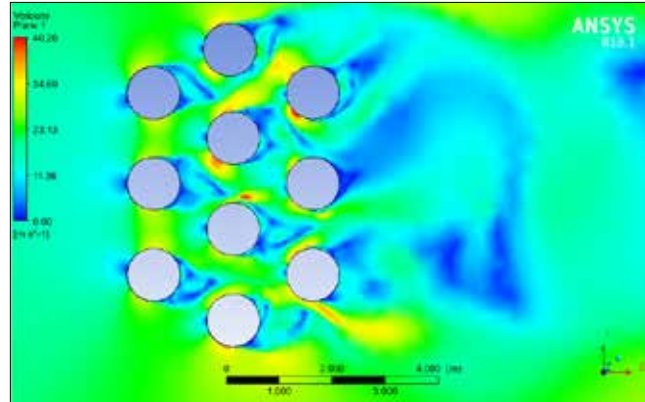
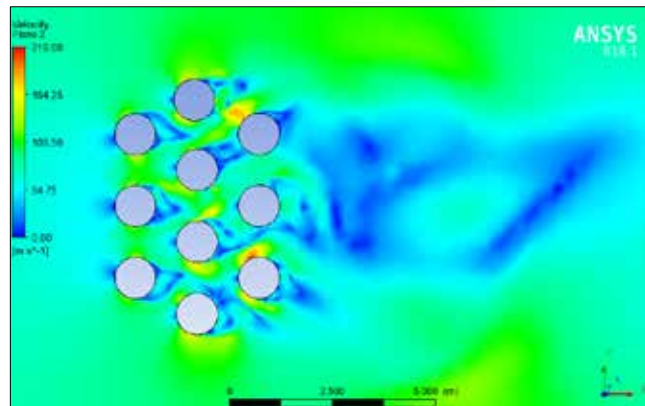


Figura 31. Contornos de velocidad para el flujo alrededor de tres cilindros. a) $V=20\text{m/s}$, b) $V=80\text{ m/s}$ y c) $V=160\text{ m/s}$
Fuente: Rojas (2019)

a)



b)



c)

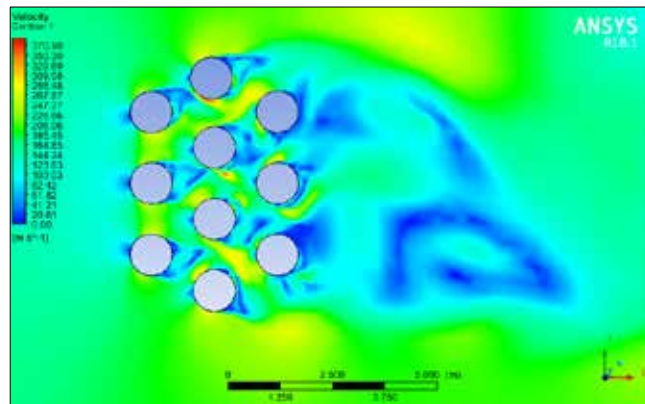


Figura 32. Contornos de velocidad para el flujo alrededor de diez cilindros. a) $V=20\text{ m/s}$, b) $V=80\text{ m/s}$ y c) $V=160\text{ m/s}$
Fuente: Rojas (2019)



Figura 33. Visualización de la estela de Von Karman para el flujo alrededor de un cilindro. $V=20$ m/s

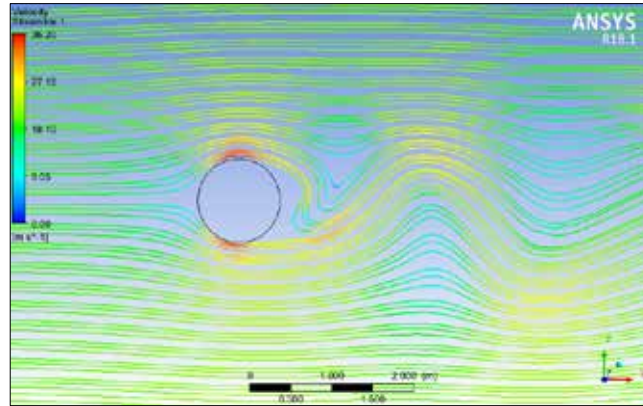
Fuente: Rojas (2019)

4.4.3.3 Visualización de las líneas de corriente.

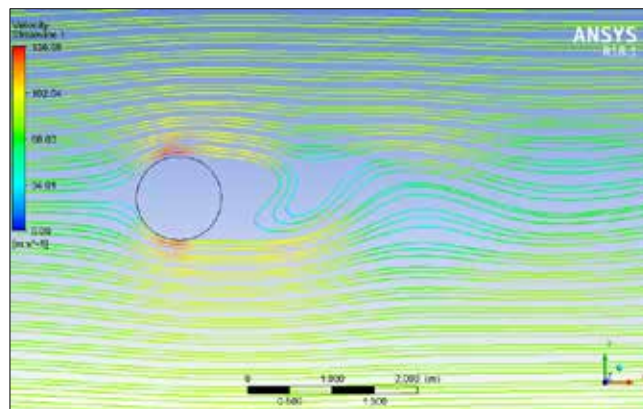
Otro de los métodos clásicos para la descripción de la dinámica del campo de flujo en cuerpos sumergidos en fluidos en movimiento, son las líneas de flujo o líneas de corriente (streamlines), con la finalidad de seguir el movimiento del flujo y detectar la presencia de remolinos ciclónicos, aceleraciones convectivas y puntos de estancamiento. Para ello se dispuso nuevamente de figuras compuestas de tres imágenes cada una aplicada a las tres configuraciones de uno, dos y diez cilindros en el lecho fluidizado. Así se presentan las figuras 34, 35 y 36 donde se muestran las líneas de corriente.

En la figura 34a) se observa el patrón oscilatorio del flujo agua abajo del cilindro horizontal y una mayor aceleración convectiva desde la parte superior del cilindro, generando la caída de las líneas de corriente superiores y una zona de baja velocidad que permite que las líneas inferiores viajen rápidamente a ocupar esos espacios, esto es el típico intercambio de dominio entre las fuerzas inerciales y las fuerza viscosas lo que en definitiva produce la estela de Von Karman. En las siguientes imágenes de la figura 34, esta condición hidrodinámica se estabiliza producto del incremento de la velocidad de entrada, de tal manera que para el caso de la imagen 34c) el patrón oscilatorio desaparece por completo.

a)



b)



c)

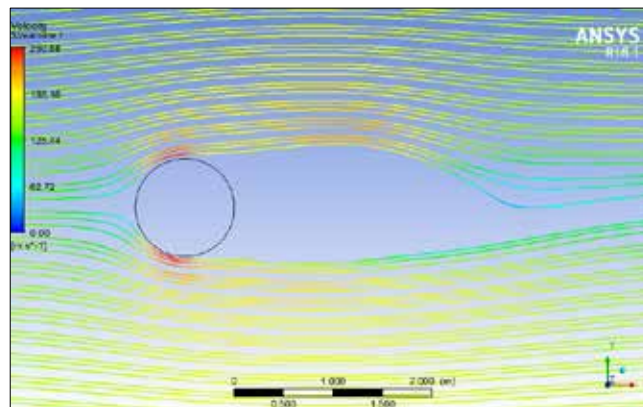
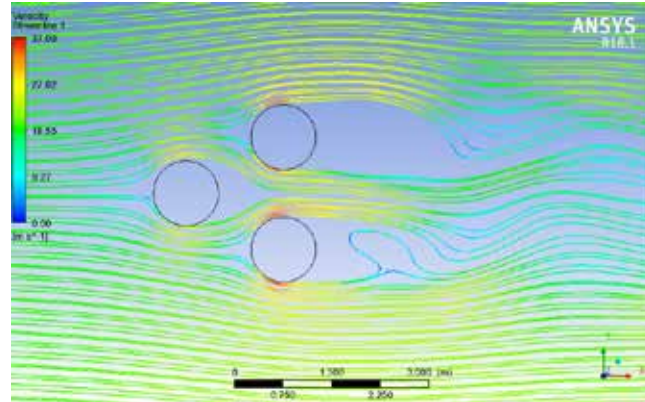


Figura 34. Líneas de corriente a través del lecho fluidizado alrededor de un cilindro.

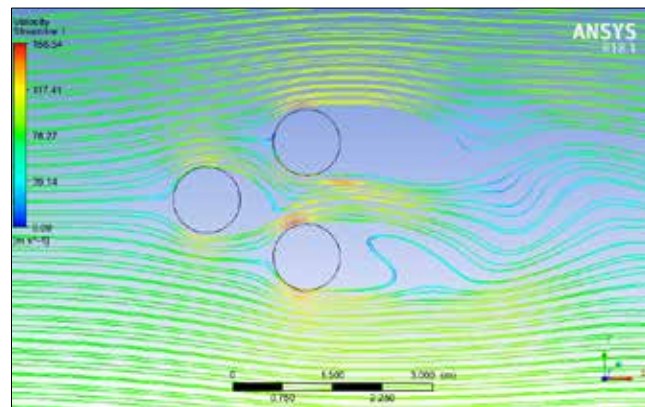
a) $V=20\text{m/s}$, b) $V=80\text{ m/s}$ y c) $V=160\text{ m/s}$

Fuente: Rojas (2019)

a)



b)



c)

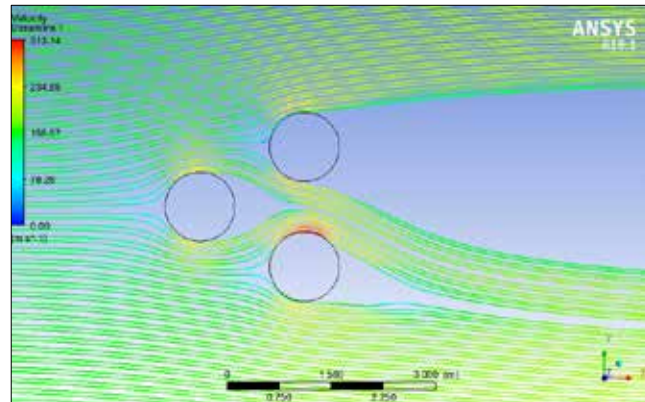
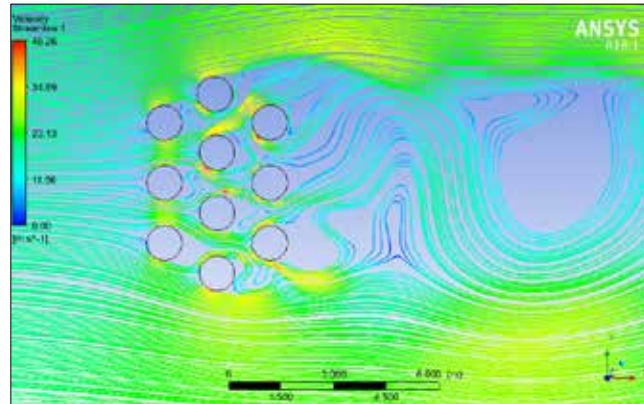


Figura 35. Líneas de corriente a través del lecho fluidizado alrededor de tres cilindros.

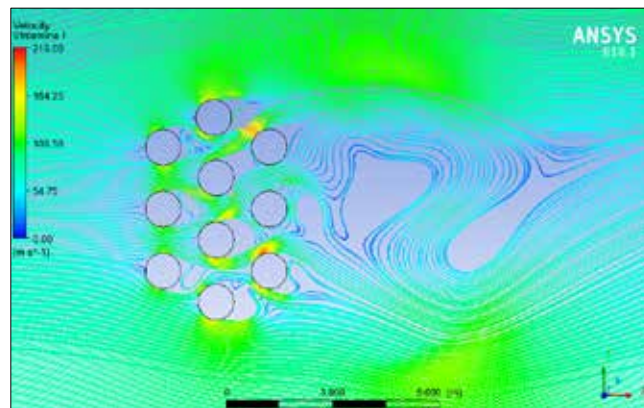
a) $V=20\text{m/s}$, b) $V=80\text{ m/s}$ y c) $V=160\text{ m/s}$

Fuente: Rojas (2019)

a)



b)



c)

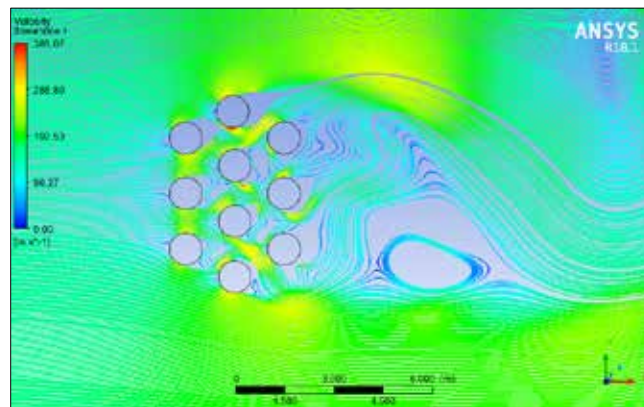


Figura 36. Líneas de corriente a través del lecho fluidizado alrededor de tres cilindros.

a) $V=20\text{ m/s}$, b) $V=80\text{ m/s}$ y c) $V=160\text{ m/s}$

Fuente: Rojas (2019)

Lo que ocurre con las líneas de corriente en las configuraciones de tres y diez cilindros de las figuras 37 y 38 respectivamente, ya no es tan claro de explicar, debido principalmente a los efectos producidos el paso del fluido en el espacio entre los cilindros, lo que incrementa la densidad de líneas de corriente, acelerando el flujo y reduciendo la presión, lo que podría causar una caída en la presión estática a expensas del aumento de la presión dinámica y provocar el tan indeseado efecto del desprendimiento de la capa límite.

Por otro lado el fenómeno que ocurre aguas abajo después de pasar a través de la configuración de diez cilindros de las imágenes a, b y c de la figura 36 es el resultado del flujo turbulento y caótico generado por la interacción fluido – sólido y que termina en un patrón de flujo con remolinos ciclónicos que ensanchan el canal de Von Karman.

4.4.3.4 Visualización de vórtices mediante campos vectoriales.

ANSYS Fluent permite realizar un campo vectorial del flujo, gracias a que el vector velocidad es tangente a las líneas de corriente y por ende nunca se cruzan. Estos diagramas permiten visualizar el efecto que tiene el esfuerzo de corte producido por las fuerzas inerciales sobre su contra parte viscosa, originando el desprendimiento de la capa límite laminar. En la figura 37 se observa el campo vectorial de velocidad alrededor de un cilindro, con clara presencia del desprendimiento de la capa límite en puntos situados aproximadamente a 45° y -45° con la horizontal y presencia de un vórtice en sentido antihorario en la zona de baja presión.

El desprendimiento de la capa límite y la formación de esos vórtices no son de fácil predicción y mucho menos control, es por ello que los ingenieros simulan los diseños de postes, columnas de puentes y chimeneas en túneles de viento, con el fin de tener una idea de las condiciones a las cuales van a estar sometidos sus diseños y hacerlos lo más resistentes posible sin incrementar en forma desproporcionada los costos del proyecto.

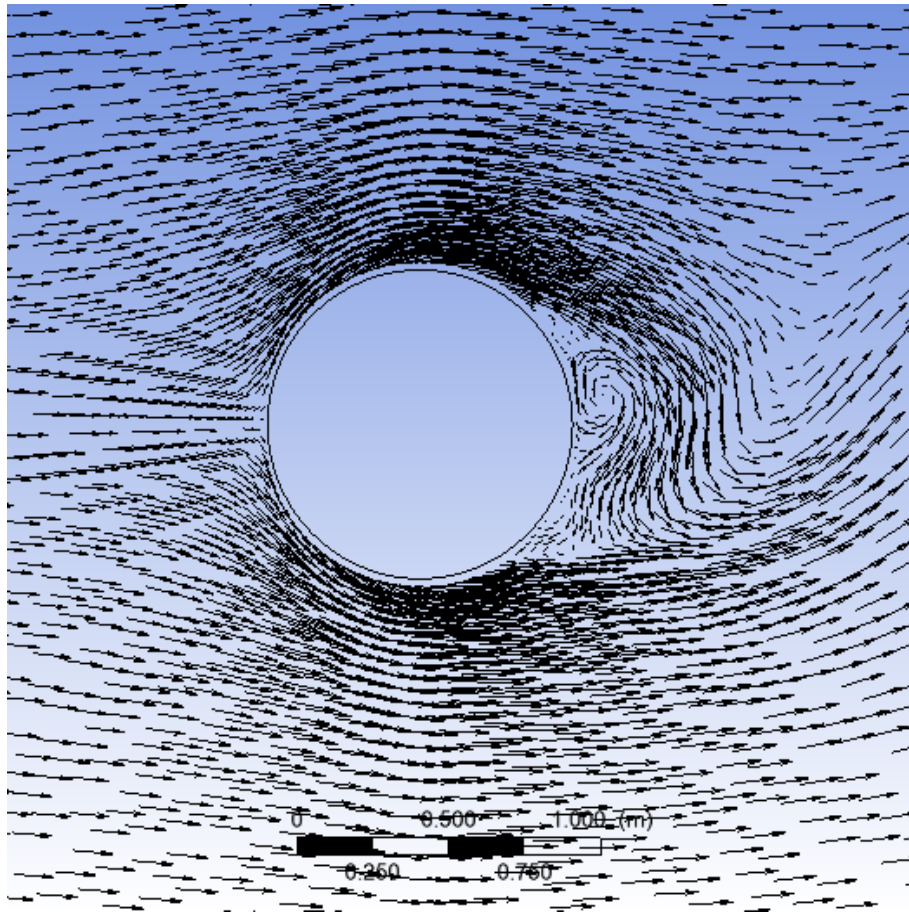


Figura 37. Campo vectorial de velocidad en el flujo alrededor de un cilindro

Fuente: Rojas (2019)

En la figura 38 se muestra el campo vectorial de velocidad alrededor de los tres cilindros, donde se observa algo de similitud con la descripción anterior para el primer cilindro exceptuando la forma del vórtice en la cara posterior del cilindro, pero en cuando a los subsiguientes situados en la segunda columna, lo anterior no se cumple, ya que el desprendimiento de la capa límite se da en ángulos contrapuestos de aproximadamente 70° y con patrones de generación de vórtices diferentes a pesar de la simetría del diseño, pero no existe simetría en el campo de flujo, porque las ecuaciones de Navier-Stokes son no lineales y cualquier perturbación inclusive por efectos de la gravedad ocasionaría la formación de líneas de corriente asimétricas.

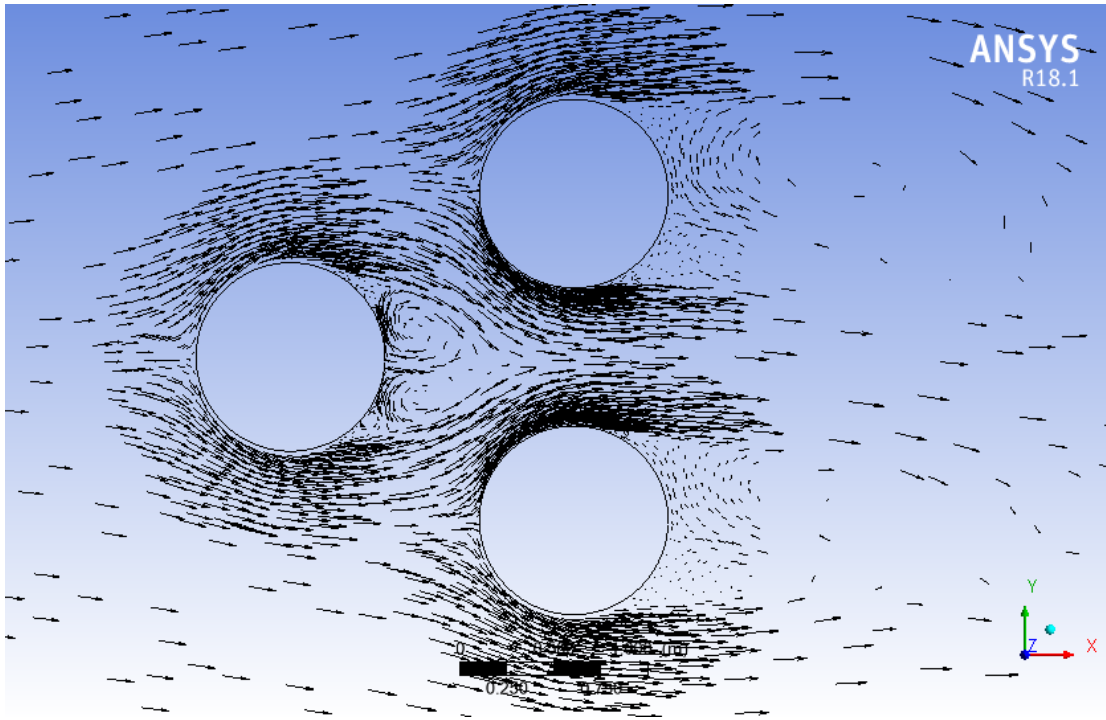


Figura 38. Campo vectorial de velocidad en el flujo alrededor de los tres cilindros

Fuente: Rojas (2019)

La figura 39 muestra el campo vectorial de velocidad alrededor de la configuración de diez cilindros, visualizándose que los patrones de flujo en cada cilindro son diferentes. El cilindro número 1 en contraste con su similar por simetría número 3 (ver figura 29) tienen ángulos de desprendimiento de la capa límite diferentes, incluso en el cilindro 3, dicho desprendimiento ocurre a un ángulo de 90° por la parte superior del cilindro, mientras que los vórtices en la parte posterior en ambos cilindros son diferentes. Tampoco existe simetría entre los campos de velocidad alrededor de los cilindros número 4 y 8, 9 y 10, o 5 y 7, en cuyos casos lo más notable es el porcentaje del perímetro de los cilindros expuestos a desprendimiento de capa límite, lo que tendría como consecuencia, en caso del diseño de intercambiadores de calor de flujo cruzado, una caída en la eficiencia del dispositivo debido a la falta de contacto entre el fluido y los cilindros.

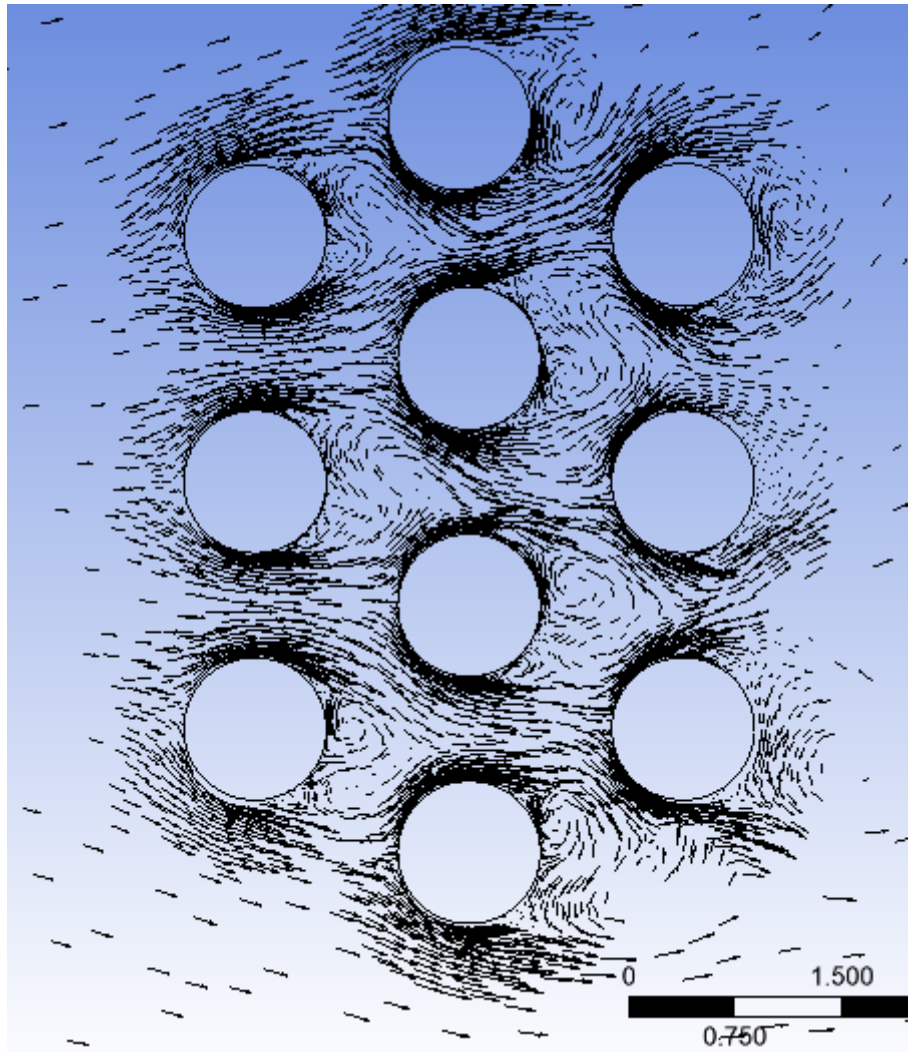


Figura 39. Campo vectorial de velocidad en el flujo alrededor de los diez cilindros
Fuente: Rojas (2019)

CONCLUSIONES

Podemos describir la dinámica del campo de flujo alrededor de un cilindro inmerso en un fluido como un flujo ideal denominado modelo no viscoso, donde no existe dependencia con el número de Reynolds, sin embargo la realidad dista mucho de ese modelo, pues en los flujos reales, si existe dependencia con el número de Reynolds y las fuerzas viscosas que también van de la mano con la velocidad así como se pudo evidenciar en la investigación, y comienzan a ejercer su efecto y es allí donde se debe experimentar como varía los frentes de presiones, contornos de velocidad y líneas en los diferentes diseños de ingeniería que estén relacionados con éste fenómeno.

La herramienta computacional de CFD, ANSYS Fluent, basada en el uso del método de elementos finitos FEM para la discretización espacial del lecho fluidizado y numérica de las ecuaciones diferenciales que describen el flujo, representa una opción fiable y económica para su simulación.

Los modelos matemáticos utilizados para la simulación del flujo de agua alrededor de un cilindro, son las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas por Reynolds (RANS) y el modelo del transporte del esfuerzo de corte “

” (SST) con su ecuación de turbulencia $k-\omega$, ya que se logró ver los torbellinos ciclónicos, vórtices y la estela de Von Karman tal como si se usara la técnica de visualización experimental por velocimetría de imágenes de partículas, (PIV).

La simulación arrojó resultado esperado que sirve de soporte a las teorías de la mecánica de fluidos, pero también se obtuvieron resultados inesperados como el caso de la asimetría del campo de flujo, demostrándose una importante dependencia de los niveles de turbulencia que generan irreversibilidades.

La visualización de los contornos de presión, velocidad y líneas de corriente, forman un conjunto de datos gráficos suficientes para describir el campo de flujo, sin la necesidad de recurrir a otro tipo de cálculos, por su parte el campo vectorial de

velocidad es una técnica excelente para determinar si existe o no desprendimiento de la capa límite.

RECOMENDACIONES

Extender el estudio a campos de flujos con la variación de la temperatura y por ende de la viscosidad del fluido.

Ampliar el estudio para el diseño de una metodología CFD, para el dimensionamiento de intercambiadores de calor de flujo cruzado.

Estudiar la resistencia de los materiales de construcción de cilindros inmersos en un flujo en movimiento, a fin de evaluar la resistencia a la fatiga provocada por la oscilación de los vórtices una vez separados del perímetro del cilindro.

BIBLIOGRAFÍA

- Anagnostopoulos y Bearman, (1992), “**Response characteristics of a vortex excited cylinder at low Reynolds numbers**”, Fluids struct.
- ANSYS-CFX. “**Release 17 ANSYS CFX-Solver Theory Guide**”. (2016).
- Arias, F. (2006). “**El Proyecto de Investigación. Introducción a la metodología**”
- Baykal C., Sumer B. M. y Fuhrman D.R. (2015), “**Numerical investigation of flow and scour around a vertical circular cylinder**”, The royal society publishing.
- Blevins R. (2003) “**Applied fluid dynamics handbook**”. (2a ed). Krieger Publishing Company.
- Cengel, Y. Cimbala J. (2007), “**Fundamentos de Mecánica de Fluidos**”. (2ª ed.). Mexico D.F: McGraw Hill Education.
- “**Científica**”, 5ta edición. Caracas, Venezuela.
- Dettmer y Peric, (2006), “**A computational framework for fluid-rigid body interaction: finite element formulation and applications**”, Elsevier.
- Domínguez A. (2015). “**Análisis del movimiento de un cilindro circular considerando flujo cruzado y oscilaciones lineales**”, Tesis de grado. Universidad Simón Bolívar. Caracas – Venezuela.
- Duran A. (2014). “**Dinámica de fluidos computacional: DFC Discretization temporal**”, Tesis de grado. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid – España.
- Gabbai R., Benayora H., (2004) “**Ann overview of modeling and experiments of vortex-induced vibration of circular cylinders**”, Journal of fluid and structures, Elsevier.
- Hernández S., Fernández C., Carlos y Baptista L., Pilar. (2004). “**Metodología de la investigación**” McGraw-Hill Interamericana. México, D. F. Cuarta edición
- Hurtado, I. y Toro, G. (2001). “**Paradigmas y Métodos de Investigación en Tiempos de Cambio**” (4ta ed); Episteme; Valencia-Venezuela.

- Kenny J.P. (1993) “**Evaluation of vortex sheffing frecuency and dynamic span response**”. Health and Safety Executive, HSE books, OTI 93614
- Munson B., Young D., Okiishi T. (2007) “**Fundamentos de mecánica de fluidos**”. (3ª ed.) Limusa Willey
- Pérez y Garre, (2004), “**Dinámica de los fluidos computacional para gráficos**” Madrid-España.
- Potter M., Wiggertuilar D., Leon y Cal, (2002), “**Mecánica de fluidos**”, (3ª ed.) Mexico D.F, Prentice Hall.
- Rodríguez A. (2012). “**Simulación numérica del flujo alrededor de un cilindro móvil utilizando ANSYS-CFX**”, Tesis de grado. Universidad Simón Bolívar. Caracas – Venezuela.
- Saludes A. (2015), “**Estudio para la resolución numérica de las ecuaciones de conservación de la masa, cantidad de movimiento y energía, aplicado a la influencia del confinamiento de un fluido en la aerodinámica de un cuerpo romo**”, Tesis de grado. Universidad Politécnica de Catalunya. Barcelona – España.
- Singh y Mittal; (2005), “**vortex induced oscillations at low Reynolds number: hysteresis and vortex shedding modes**”, Journal of fluid and structures, Elsevier.
- Zorrilla A. (1993), “**Introducción a la metodología de la investigación**”, México