

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
**UNIVERSIDAD
CATÓLICA**
DEL PERÚ

**ESTUDIO DEL FLUJO EN UN TANQUE AGITADOR
VERTICAL DE IMPULSOR PTB CON SUPERFICIE LIBRE
MEDIANTE EL PROGRAMA ANSYS CFX V.14.0**

Tesis para optar el Título de **INGENIERO MECÁNICO**, que presenta el bachiller:

Hebert Oswaldo Huerto Bujaico

ASESOR: Dr. Quino Valverde Guzmán

Lima, Octubre del 2013

RESUMEN

El presente trabajo de tesis es motivado por la necesidad de contribuir con la mejora y optimización de nuevos diseños, en la fabricación de tanques agitadores, que permitan minimizar el tiempo de operación, incrementar la eficiencia de mezcla y disminuir los costos de fabricación.

El lector encontrará dentro de este trabajo una breve explicación de las generalidades técnicas en tanques agitadores, números adimensionales utilizados en mezcla, ecuaciones matemáticas que gobiernan el comportamiento de los fluidos, estadísticas de mallado, así como la descripción de los principales modelos de turbulencia en CFD (Dinámica de Fluidos Computacional).

Una gran parte del tiempo de este proyecto se dedicó a proponer un procedimiento para simular y mostrar el comportamiento del flujo dentro de un tanque agitador vertical con superficie libre; para ello se utilizó el software Ansys versión 14.0 (herramienta computacional de simulación de CFD) considerando la interacción impulsor-deflector, flujo turbulento, fluido newtoniano, simulación bifásica, régimen estacionario y un impulsor PTB (turbina de paletas rectas inclinadas 45°) de cuatro álabes.

Luego, los resultados obtenidos de la simulación, tomando como principal variable los modelos de turbulencia k-Epsilon, k-Omega o Shear Stress Transport (SST), fueron comparados, en base a la curva de potencia (Re vs Np) para este tipo impulsores, con los resultados experimentales proporcionados por la empresa, fabricante de agitadores, Chemineer.

El modelo de turbulencia SST resultó ser el más adecuado para este tipo de caso de estudio por presentar un error menor al 8% en la comparación con las curvas de potencia; con lo cual, podemos concluir que el presente trabajo nos propone un procedimiento válido para simular y mostrar el comportamiento del flujo que se produce en un tanque agitador vertical de impulsor PTB con superficie libre y régimen estacionario mediante el software Ansys versión 14.0.



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA

TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

TÍTULO : Estudio del flujo en un tanque agitador vertical de impulsor PTB con superficie libre mediante el programa ANSYS CFX V.14.0

ÁREA : Diseño # 238

PROPUESTO POR : Dr. Quino Valverde

ASESOR : Dr. Quino Valverde

TESISTA : Hebert Oswaldo Huerto Bujaico

CÓDIGO : 2007.2267

FECHA : 16 de Abril 2013



DESCRIPCIÓN Y OBJETIVOS:

El proceso de agitación es uno de los más importantes dentro de la Industria Minera, depende de una mezcla eficaz. Sin embargo, debido a la complejidad de los fenómenos del transporte, es uno de los procesos más difíciles de analizar y caracterizar. En ese sentido, no existen correlaciones generales para configuraciones arbitrarias de agitación que describan cantidades útiles como la velocidad de mezcla o el grado de homogeneidad alcanzada.

La necesidad de mejorar y optimizar los nuevos diseños, en la fabricación de tanques agitadores, nos permite minimizar el tiempo de operación, incrementar la eficiencia de mezcla y disminuir costos de fabricación.

Los objetivos de la presente tesis son proponer, validar y realizar el estudio en un tanque agitador vertical de impulsor PTB (Pitchet Blade Turbine) con superficie libre mediante el software ANSYS CFX versión 14.0.






PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA

TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

**Estudio del flujo en un tanque agitador vertical de impulsor PTB con superficie libre
mediante el programa ANSYS CFX V.14.0.**

1. INTRODUCCIÓN
2. ANTECEDENTES GENERALES
3. CONSIDERACIONES MATEMÁTICAS
4. SIMULACIÓN BIFÁSICA MEDIANTE ANSYS CFX V.14.0.
5. DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA Y VALIDACIÓN
6. ANÁLISIS DEL FLUJO

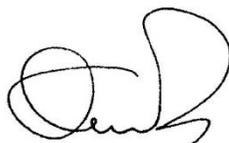
Conclusiones

Recomendaciones

Bibliografía

Anexos

Máximo: 100 páginas



Prof. Quino Valverde G.
Asesor





A mi madre Máxima

Por haberme apoyado en todo momento, por sus consejos, sus valores, por su perseverancia para lograr las cosas, por la motivación constante que me ha permitido ser una persona de bien, pero más que nada, por su amor incondicional.

A mi padre Walter

Por los ejemplos de humildad y constancia que lo caracterizan y que me han motivado siempre, por el valor mostrado para salir adelante y por su amor incondicional.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar me gustaría agradecer a Dios por haberme bendecido para llegar con vida hasta el día de hoy y por hacer realidad este sueño tan anhelado.

A mis hermanos Roy y Estiven por ser grandes ejemplos de hermanos mayores, por sus consejos y por haberme guiado. También, a mis tíos, a mis primos, a mis cuñadas y mi sobrino Royer.

A la Pontificia Universidad Católica del Perú y a la sección de ingeniería Mecánica por hacer de mí un profesional capaz y competente con valores y disciplina.

A mi asesor de tesis, a quien considero un gran amigo y estupenda persona, Dr Quino Valverde Guzmán por su esfuerzo, su dedicación, sus conocimientos, sus consejos, experiencias, paciencia, motivación y apoyo desinteresado ha logrado que pueda culminar con este trabajo.

Al Ing. Miguel Torres Santos, Gerente de país ESSS – Ansys Perú, un gran jefe y amigo, quien me brindo las instalaciones de su empresa para poder desarrollar parte del presente trabajo. Además del conocimiento adquirido en las instalaciones de la empresa, el cual me fue de mucha ayuda.

Finalmente, al Ing. Herbert Yépez, al Ing. Gastón Cruz, al Ing. Victor Anicama y a todas aquellas personas que me ayudaron directa o indirectamente de la elaboración de esta tesis.

INDICE DEL CONTENIDO

RESUMEN	i
APROBACIÓN DEL TEMARIO DE TESIS.....	iv
ÍNDICE DEL CONTENIDO.....	vi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xi
ÍNDICE DE TABLAS	xiv
LISTA DE SIMBOLOS.....	xv
INTRODUCCIÓN	1
1. ANTECEDENTES GENERALES	4
1.1.Plantamiento del problema.....	4
1.2Agitadores	5
1.2.1Definición	5
1.2.2.Equipo de Mezcla	6
1.3.Tipos de Agitadores	8
1.3.1.Agitadores De Hélice.....	10
1.3.2. Agitadores de Paletas.....	10
1.3.3.Agitadores De Turbina.....	12
1.4.Patrón de Flujo.....	13
1.5.Otras Consideraciones Geométricas	15
1.5.1.Formación de Vórtices.....	15
1.5.2.Tubos de Aspiración	17
1.6.Números Adimensionales en Mezcla	18
1.6.1.Número de Reynolds (Re)	19
1.6.2. Número de Caudal	19
1.6.3. Número de Potencia (Np)	20
1.6.4. Eficiencia Hidráulica (Nh).....	21
1.6.3. Efectividad (n):.....	22
2. CONSIDERACIONES MATEMÁTICAS	23

2.1. Principio de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD).....	23
2.1.1. Ventajas de Dinámica de Fluidos Computacional	24
2.1.2. Aplicaciones de Dinámica de Fluidos Computacional	25
2.1.3. Limitaciones de Dinámica de Fluidos Computacional	26
2.2. Descripción general del modelado en Dinámica de Fluidos Computacional .	26
2.2.1. Pre-Procesamiento	28
2.2.1.1. Definición de Dominio	29
2.2.1.2. Creación de la Malla	29
2.2.1.3. Definición de las Condiciones de Contorno.	32
2.2.2. Solución	34
2.2.3. Visualización de resultados (CFD-Post).....	35
2.3. Discretización Numérica.....	37
2.3.1. Discretización de Ecuaciones	37
2.4. Modelos de Turbulencia en el programa Ansys CFX v.14.0.....	39
2.4.1. El Modelo Laminar	40
2.4.2. El modelo de Ecuación Cero	40
2.4.3. El Modelo k-Epsilon (k- ϵ)	41
2.4.4. El Modelo RNG k-Épsilon	41
2.4.5. El Modelo k-Omega y el Modelo SST	41
2.5. Estadísticas del Mallado	43
3. SIMULACIÓN BIFASICA MEDIANTE ANSYS CFX 14.0.....	46
3.1. Recopilación de Antecedentes	46
3.2.Descripción del Problema	46
3.3.Estructura de la Simulación	48
3.3.1.Propiedades del Fluido.....	48
3.3.2. Definición del Modelo de Turbulencia.....	49
3.3.3.Diseño CAD de Geometrías e Interacción con ANSYS CFX v. 14.0.	50
3.3.4.Generación del Mallado.....	53
3.3.5.Ajuste de Parámetros de Control de Simulación.	56

3.3.6. Resumen de Parámetros que Definen la Simulación	56
4. DESARROLLO DE LA MÉTODOLÓGÍA Y VALIDACIÓN	58
4.1. Desarrollo del Procedimiento	58
4.2. Validación del Procedimiento.....	63
5. ANÁLISIS DEL FLUJO.....	72
5.1. Muestra del Patrón de Flujo.....	72
5.2. Muestra del campo de velocidades	74
5.3. Muestra de la influencia del tipo de impulsor.....	78
5.4. Muestra de la interacción entre las fases del sistema (agua y aire)	81
CONCLUSIONES	82
RECOMENDACIONES.....	84
BIBLIOGRAFÍA	85

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Agitador convencional con deflectores	6
Figura 1.2. Configuración estándar del estanque de agitación	8
Figura 1.3. Impulsor de flujo axial (a), y de flujo radial tipo Rushton (b)	9
Figura 1.4. Izquierda: patrón de flujo generado por una turbina axial, derecha: patrón de flujo generado por una turbina radial	9
Figura 1.5. Algunos tipos de agitadores de paletas	11
Figura 1.6. Algunos tipos de agitadores de turbina	12
Figura 1.7. Ejemplo de un gráfico de vectores de velocidad en un tanque agitador	14
Figura 1.8. Ejemplo de comportamiento de un fluido en un estanque de agitación impulsado por una turbina Rushton	14
Figura 1.9. Agitador con el eje del impulsor no centrado	15
Figura 1.10. Agitador con el eje del impulsor horizontal	17
Figura 1.11. Tanque agitador con cuatro placas deflectoras	17
Figura 1.12. Tubos de aspiración en un tanque con placas deflectoras: (a) turbina; (b) hélice	18
Figura 2.1. Esquema de la descripción general del modelado en CFD	27
Figura 2.2. Etapa de Pre – Procesamiento en CFD.....	28
Figura 2.3. Dominio de la tubería en CFD	29
Figura 2.4. Tipos de mallado en la sección de paso ducto	36
Figura 2.5. Métodos de mallado	31
Figura 2.6. Ejemplo de condiciones de contorno	33
Figura 2.7. Curva de convergencia en Ansys CFX 14.0	34
Figura 2.8. Diferencias en la solución, ante la cantidad de iteraciones	35
Figura 2.9. Visualización de resultados en CFD-Post Ansys 14.0	36
Figura 2.10. Definición del volumen de control.....	37
Figura 2.11. Elemento de la malla	39

Figura 2.12. Estadísticas de Mallado en Ansys CFX v. 14.0	44
Figura 2.13. Umbrales de calidad del mallado	45
Figura 3.1. Esquema estándar del equipo	47
Figura 3.2. Geometría del impulsor del tanque agitador	50
Figura 3.3. Volumen de control que encierra el impulsor o dominio del impulsor.....	51
Figura 3.4. Volumen de control del fluido en el tanque agitador	51
Figura 3.5. Volumen de control del fluido en el tanque agitador mediante DM	55
Figura 3.6. Superficie mallada del dominio del impulsor.	53
Figura 3.7. Mallado por capas en las superficies de los alabes del dominio impulsor..	54
Figura 3.8. Mallado del dominio del tanque agitador.....	57
Figura 3.9. Estadísticas del mallado en el tanque agitador.....	55
Figura 4.1. Calculo del torque del impulsor a través del simulador	65
Figura 4.2. Curva de potencia para impulsores inclinados Chemineer	68
Figura 4.3. Comparación de las curvas de potencia de los tres modelos de turbulencia con la curva experimental para impulsores inclinados Chemineer.....	70
Figura 4.4. Comparación del modelo de turbulencia SST con la curva experimental para impulsores inclinados Chemineer	71
Figura 5.1. Vectores de velocidad en el plano de corte ZY	72
Figura 5.2. Líneas de corriente de velocidad en todo el dominio del tanque agitador ...	73
Figura 5.3. Contorno de velocidades en el plano de corte ZY	74
Figura 5.4. Contorno de velocidades en las secciones XZ	75
Figura. 5.5. Sección de contorno de velocidad a 60 mm.....	76
Figura. 5.6. Sección de contorno de velocidad a 55 mm.....	76
Figura. 5.7. Sección de contorno de velocidad a 50 mm.....	76
Figura. 5.8. Sección de contorno de velocidad a 45 mm.....	76
Figura. 5.9. Sección de contorno de velocidad a 40 mm.....	76
Figura. 5.10. Sección de contorno de velocidad a 35 mm.....	76
Figura. 5.11. Sección de contorno de velocidad a 30 mm.....	76
Figura. 5.12. Sección de contorno de velocidad a 25 mm.....	76

Figura. 5.13. Sección de contorno de velocidad a 23 mm.....	76
Figura. 5.14. Sección de contorno de velocidad a 21 mm.....	76
Figura. 5.15. Sección de contorno de velocidad a 20 mm.....	77
Figura. 5.16. Sección de contorno de velocidad a 18 mm.....	77
Figura. 5.17. Sección de contorno de velocidad a 15 mm.....	77
Figura. 5.18. Sección de contorno de velocidad a 10 mm.....	77
Figura. 5.19. Sección de contorno de velocidad a 5 mm.....	77
Figura. 5.20. Patrón de flujo del tanque agitador	79
Figura. 5.21. Influencia del tipo de impulsor en las líneas de corriente de velocidad....	80
Figura. 5.22. Fracción de volumen de aire en el tanque agitador	81

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1. Parámetros geométricos del tanque.....	47
Tabla 3.2. Propiedades del aire.....	48
Tabla 3.3. Propiedades del agua.....	49
Tabla 3.4. Propiedades de la glicerina.....	49
Tabla 3.5. Resumen de los parámetros que definen la simulación.....	56
Tabla 4.1. Procedimiento específica de la simulación.....	58
Tabla 4.2. Calculo del número de Reynolds perteneciente al régimen transitorio – turbulento.....	64
Tabla 4.3. Calculo del número de Reynolds perteneciente al régimen laminar.....	64
Tabla 4.4. Calculo del número de potencia para el modelo de turbulencia k-Épsilon.....	66
Tabla 4.5. Calculo del número de potencia para el modelo de turbulencia k-Omega.....	66
Tabla 4.6. Calculo del número de potencia para el modelo de turbulencia SST.....	66
Tabla 4.7. Resultados para el modelo de turbulencia k-Épsilon.....	67
Tabla 4.8. Resultados para el modelo de turbulencia k-Omega.....	67
Tabla 4.9. Resultados para el modelo de turbulencia SST	67

LISTA DE SIMBOLOS

ρ	: Densidad del fluido [Kg/m^3]
μ	: Viscosidad molecular [$\text{Kg}/\text{m}\cdot\text{s}$]
T	: Tensor de Tensiones [Pa]
μ_t	: Viscosidad Turbulenta [m^2/s^2]
ε	: Velocidad de disipación turbulenta [m^2/s^3]
ω	: Velocidad específica de disipación turbulenta [s^{-1}]
$\mu\cdot\varphi$: Tasa de conversión de energía térmica por unidad de volumen debido al roce viscoso [W/m^3]
β	: Coeficiente de expansión térmica [K^{-1}]
ω	: Velocidad angular [rad/s]
D	: Diámetro del Agitador [m]
N	: Velocidad angular [rev/s]
t	: Tiempo [s]
Q	: Caudal movido por el agitador, caudal de bombeo [Kg/s]
T	: Temperatura [K]
U	: Velocidad media [m/s]
V	: Volumen [m^3]
P	: Potencia [W]

INTRODUCCIÓN

Los procesos de agitación y mezcla son quizá los más comunes procesos industriales. Tanto la transferencia de calor como la transferencia de masa son altamente afectadas en la mezcla, haciendo de este proceso una parte integral del procesamiento de químicos y de otras aplicaciones. A pesar de ello el proceso de mezclado ha sido un área de investigación difícil de tratar.

Aunque con frecuencia tienden a confundirse, *agitación y mezcla* no significan lo mismo. La agitación se refiere al movimiento inducido de un material en una forma específica por la acción de medios mecánicos, generalmente con un modelo circulatorio dentro de algún tipo de contenedor (tanque). La mezcla es una distribución al azar de dos o más fases inicialmente separadas; por ejemplo, un único material homogéneo, tal como un tanque con agua fría, puede ser agitado, pero no puede mezclarse mientras no se le adicione otro material, como una cierta cantidad de agua caliente o algún sólido pulverizado.

Desde mediados de la década de los noventas, los estudios de este tipo de sistemas se han volcado a la mecánica de fluidos computacional. Los resultados que han arrojado la resolución de ecuaciones en medios discretizados han sido satisfactorios al momento de comparar con resultados experimentales. En variados artículos científicos se puede ver la evolución en los métodos de predicción en Mecánica de Fluidos Computacional para modelar tanques agitadores.

En el contexto internacional, los procesos de agitación y mezcla es un trabajo de empresas muy desarrolladas tecnológicamente, en países con un alto desarrollo económico. Muchas empresas, como la MiningWatch de Canadá, la Cochilco de Chile y la Pola de Lena de España, son paradigmas de su aplicación.

En el Perú son pocas las empresas que aplican este sistema de simuladores y la gran mayoría lo desconoce; sin embargo las empresas como Yanacocha y Siderperu, implementan este sistema brindando resultados favorables para la rentabilidad de la empresa.

El grupo Investigación asistida por computadora (INACOM) de la **Sección Ingeniería Mecánica de la Pontificia Universidad Católica de Perú** detectó que el proceso de agitación y mezcla de productos sólidos, líquidos o gaseosos es muy importante dentro del área de producción minera en el Perú, pero este se viene dando sin mucha eficiencia en base al grado de mezcla y tiempo de operación, todo esto traducándose en pérdidas económicas.

Mejorar y optimizar nuevos diseños en la fabricación de tanques agitadores permite minimizar el tiempo de operación, incrementar la eficiencia de mezcla y disminuir costos de fabricación. CFD (Dinámica de Fluidos Computacional) es una herramienta muy potente para realizar el análisis, cálculo y diseño de sistemas muy complejos donde existe transporte de masa, energía y cantidad de movimiento. Además de simular geometrías muy complejas, resolver una amplia gama de problemas donde a veces las restricciones son bastante severas, optimizar unidades de proceso sin necesidad de construir prototipos y ahorro de tiempo y dinero.

Por todo lo antes expuesto en el presente trabajo se plantean los siguientes objetivos:

Objetivo general:

Proponer un procedimiento para simular y mostrar el comportamiento del flujo en un tanque agitador vertical de *impulsor PTB* (Pitchet Blade Turbine - impulsor de cuatro álabes rectos inclinados 45°) con superficie libre en régimen estacionario utilizando el software *ANSYS CFX versión 14.0* y validarlo mediante la comparación con la curva de potencia (Re vs Np) experimental para impulsores PTB de cuatro álabes generada por la empresa Chemineer.

Objetivos específicos:

Desarrollar curvas de potencia (Np vs Re) para los modelos de turbulencia (k- ϵ , k- ω y SST) y seleccionar el modelo de turbulencia más adecuado que valide el procedimiento de simulación, mediante la comparación con la curva de potencia experimental, que describa el correcto comportamiento del flujo en un tanque agitador vertical de impulsor PTB con superficie libre en régimen estacionario mediante el software Ansys CFX versión 14.0.

Constatar a través de la curva de potencia (Re vs Np) que los números adimensionales logran describir el comportamiento del flujo independientemente del tipo de fluido con el que se trate.

Mostrar el campo visual de líneas de corriente y contorno de velocidades, el patrón de flujo, constatar la influencia del tipo de impulsor en el patrón de flujo y la interacción entre la fase líquida (agua) y gaseosa (aire) que se generan en un tanque agitador vertical de impulsor PTB con superficie libre mediante el software Ansys CFX versión 14.0.

A continuación se presente una breve descripción de lo desarrollado en el proyecto:

En el primer capítulo se presenta una breve descripción del planteamiento del problema, generalidades técnicas de los tanques agitadores, números adimensionales utilizados en mezcla; en el segundo capítulo, una descripción general del modelado en CFD (Dinámica de Fluidos Computacional), ecuaciones matemáticas que gobiernan el comportamiento de los fluidos, descripción de los diferentes principales modelos de turbulencia en CFD y estadísticas de mallado; en el tercer capítulo se plantea el procedimiento específico, etapa de pre procesamiento, procesamiento y post procesamiento, para simular el comportamiento del flujo del caso de estudio establecido; en el cuarto capítulo, la selección del modelo de turbulencia que describa mejor el comportamiento del flujo y la validación del procedimiento mediante la comparación de la curva de potencia (Re vs Np) generada con la simulación y la curva de potencia realizada experimentalmente dispuesta en la bibliografía; finalmente se presento el quinto capítulo en el cual se muestra el campo visual de líneas de corriente y contorno de velocidades, el patrón de flujo y se constata la influencia del tipo de impulsor en el patrón de flujo, y la interacción entre la fase líquida y gaseosa que se genera en el tanque agitador.

CAPÍTULO 1

ANTECEDENTES GENERALES

1.1 Planteamiento del problema

El proceso de agitación es uno de los más importantes dentro de la Industria Minera, depende de una mezcla eficaz. Sin embargo, debido a la complejidad de los fenómenos del transporte, es uno de los procesos más difíciles de analizar y caracterizar. En ese sentido, no existen correlaciones generales para configuraciones arbitrarias de agitación que describan cantidades útiles como la velocidad de mezcla o el grado de homogeneidad alcanzada.

En la actualidad, los procesos de diseño y optimización de agitadores son realizados en base a la experimentación de agitaciones y mezclas de una gran cantidad de sustancias (líquidos, gases y sólidos).

La necesidad de mejorar y optimizar los nuevos diseños, en la fabricación de tanques agitadores, nos permite minimizar el tiempo de operación, incrementar la eficiencia de mezcla y disminuir costos de fabricación. En el presente trabajo de tesis se propuso un procedimiento a través del software **ANSYS CFX versión 14.0** para estudiar el comportamiento del flujo en un tanque agitador vertical de impulsor PTB con superficie libre y en régimen estacionario.

1.2 Agitadores

1.2.1 Definición

En la Actualidad, muchos de los procesos realizados a nivel industrial dependen en su gran mayoría de una eficaz mezcla de fluidos. Aunque con frecuencia tienden a confundirse, *agitación* y *mezcla* no significan lo mismo.

La agitación se refiere al movimiento inducido de un material en una forma específica por la acción de medios mecánicos, generalmente con un modelo circulatorio dentro de algún tipo de contenedor (tanque). La mezcla es una distribución al azar de dos o más fases inicialmente separadas; por ejemplo, un único material homogéneo, tal como un tanque con agua fría, puede ser agitado, pero no puede mezclarse mientras no se le adicione otro material, como una cierta cantidad de agua caliente o algún sólido pulverizado.

Para evitar malas interpretaciones, en la presente tesis se denomina a la acción de agitar y mezclar como procesos de *agitación*, debido a que ambas operaciones son idénticas en el principio mecánico de funcionamiento [1].

El proceso de agitación en la industria tiene como objetivos más frecuentes:

- Suspensión de partículas sólidas.
- Promoción de la transformación de calor entre el líquido y un serpentín o encamisado.
- Mezcla de gases con otros gases.
- Gases en líquidos: dispersión.
- Gases con sólidos granulares: fluidización, neumáticos
- Líquidos en gases: pulverización y atomización.
- Líquidos con líquidos: disolución, emulsificación y dispersión
- Líquidos con sólidos granulares: suspensión. Pastas de unos con otros y con los sólidos.
- Sólidos con sólidos: la mezcla de polvos, transporte y el secado.

1.2.2. Equipo de Mezcla

Los fluidos son agitados en tanques o recipientes, el equipo consiste en un recipiente cilíndrico (la parte superior del recipiente puede estar abierta al ambiente o cerrada), y un agitador mecánico, montado en un eje y accionado por un motor eléctrico. El fondo del tanque debe ser redondeado, con el fin de eliminar los bordes rectos o regiones en las cuales no penetrarían las corrientes del fluido. El cilindro debe presentar placas deflectoras, para evitar la formación de vórtices (remolinos). La altura del líquido, es aproximadamente igual al diámetro del tanque. Sobre un eje suspendido desde la parte superior, va montado un agitador. El eje está accionado por un motor, la mayor frecuencia es a través de una caja de engranajes reductores.

El agitador crea un tipo de flujo dentro del sistema, dando lugar a que el líquido circule por todo el recipiente.

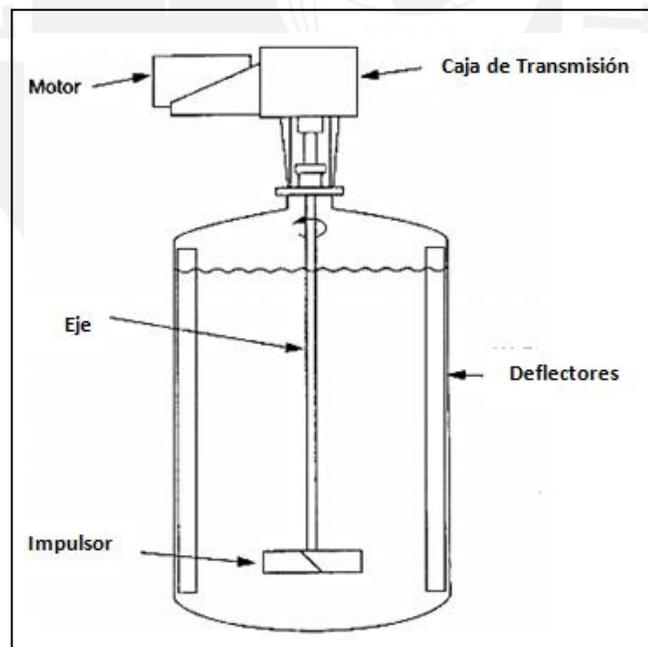


Figura 1.1. Agitador convencional con deflectores¹

¹⁵Edward L. Paul, Victor A. Atiemo-Obeng (2004) "Handbook of Industrial Mixing". A John Wiley Sons, Inc., publication.

A continuación trataremos sobre el diseño básico de un tanque de agitación.

Tanque

De fondo redondeado para evitar regiones donde no penetrarían corrientes de flujo, además de requerir de una menor energía en el funcionamiento. Cuando se utiliza un solo impulsor posicionado en el centro del tanque, tener un nivel de líquido igual al diámetro es lo más óptimo; sin embargo, por consideraciones económicas y de fabricación, a menudo se dicta una mayor proporción de la profundidad con el diámetro[2].

Deflectores

Los deflectores previenen formación de vórtices (remolinos) y la rotación de la masa líquida en su conjunto. El ancho debe ser una doceava parte del diámetro del tanque ($w = D / 12$) y una longitud desde la mitad del diámetro del impulsor, $d / 2$, hasta la línea tangente en la parte inferior del nivel de líquido, pero a veces termina justo por encima del nivel del fluido. Cuando los sólidos están presentes o cuando una chaqueta de transferencia de calor es utilizada, los deflectores son desplazados de la pared a una distancia igual a un sexto del ancho del deflector.

Cuatro deflectores equidistantes en un espacio circular es lo estándar, tener seis es un poco más efectivo, y tres apreciablemente menor; se puede colocar una mayor cantidad, pero esto solo depende de condiciones de diseño. Cuando el eje mezclador está situado fuera del centro (un cuarto a una mitad del radio del tanque) o posicionado horizontalmente, el patrón de flujo resultante tiene menos remolino, y los deflectores pueden ya no ser necesarios [2].

Impulsor

El tamaño depende del tipo de impulsor y las condiciones de operación descritas por los números de Reynolds Froude, así como las características individuales, cuyos efectos están relacionados; por ejemplo, para el impulsor de turbina, la relación de diámetros del rotor y del tanque tienen un intervalo, $d / D, =0.3-0.6$, los valores más bajos son para altas revoluciones por minuto (rpm), por ejemplo en dispersión de gases [2].

En la siguiente figura 1.2 se muestra la configuración estándar del agitador, muestra un impulsor radial en la parte inferior y otro axial en la parte superior. Cuatro deflectores estándar equidistantes. H = altura del nivel del líquido, D = diámetro del tanque, d = diámetro del impulsor. Para impulsores radiales, $0,3 \leq d/D \leq 0,6$ [2].

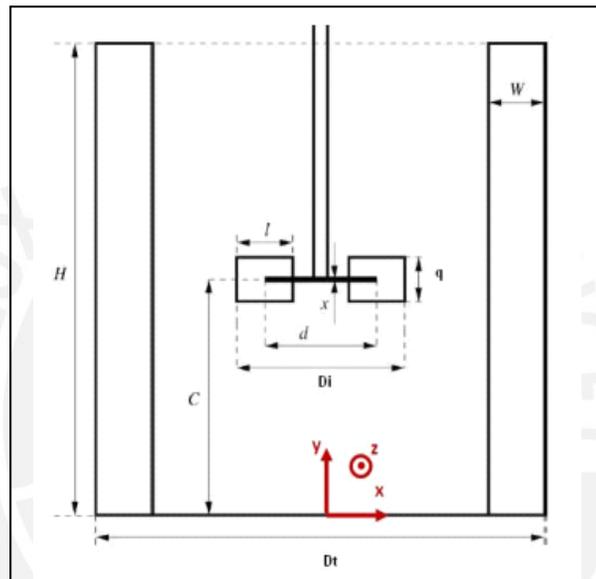


Figura 1.2. Configuración estándar del estanque de agitación⁵

1.3. Tipos de Agitadores

Los agitadores se dividen en dos grandes clases: Generación de corriente paralela al eje del agitador y los que dan origen a corrientes en dirección tangencial o radial al eje del agitador. Los primeros son denominados *agitadores de flujo axial* y los segundos *agitadores de flujo radial*. En la siguiente figura 1.3 se muestra ejemplos de los tipos de agitadores y el patrón de flujo que originan.

⁵MARTINEZ NELIS, Felix Marcos (2010) "Estudio Numérico de la Fluido dinámica de un Estanque de Agitación Utilizando el Método de las Mallas Deslizantes". Memoria Para Optar al Título de Ingeniero Civil Mecánico. Santiago de Chile: Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.

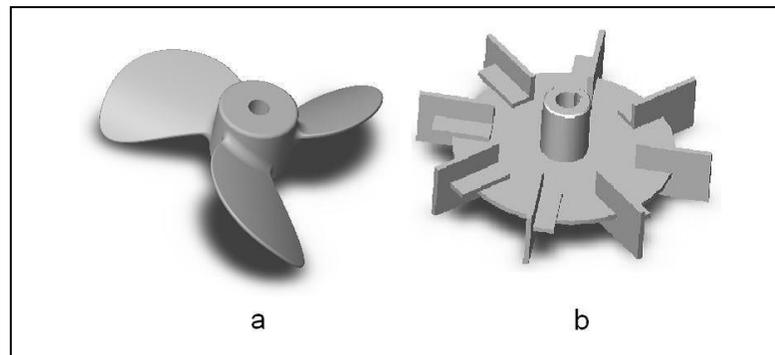


Figura 1.3. Impulsor de flujo axial (a), y de flujo radial tipo Rushton (b)¹⁶

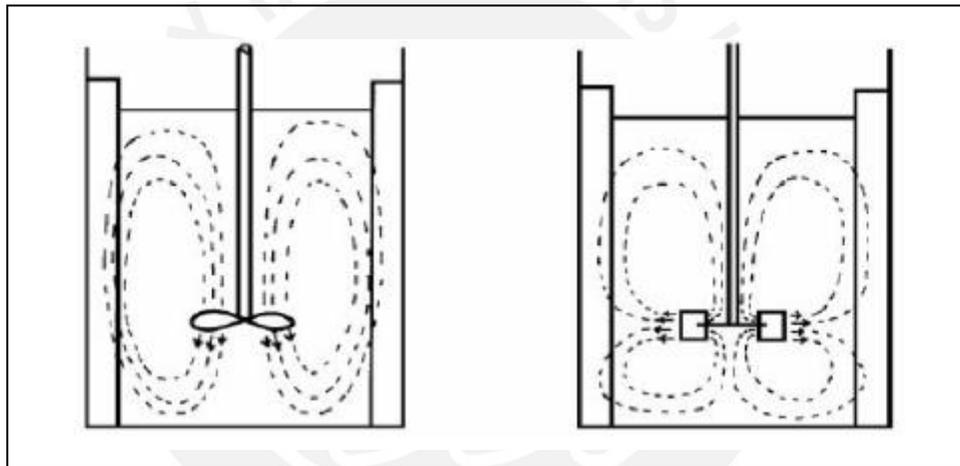


Figura 1.4. Izquierda: patrón de flujo generado por una turbina axial, derecha: patrón de flujo generado por una turbina radial¹⁶

Existen tres tipos de agitadores más usados en la industria: de hélice, de paletas y de turbina. Cada uno de estos tipos comprende muchas variaciones y subtipos. En algunos casos son útiles agitadores especiales, pero con los tipos de agitadores mostrados se resuelve el 95% de problemas de agitación fluidos.

¹⁶Guardo, Alfredo (2008) "Simulación de una turbina radial mediante CFD FLUENT". Tesis para optar el título de Ingeniero Mecánico. Barcelona: Escola Tècnica Superior d'Enginyers Industrials de Barcelona (ETSEIB).

1.3.1. Agitadores De Hélice

Los agitadores de hélice son agitadores de flujo axial, por lo general operan a altas velocidades y se emplean en líquidos poco viscosos. Las hélices más pequeñas, giran a una máxima velocidad rotacional, en el rotor de 1150 ó 1750 rpm; Las grandes giran de 400 a 800 rpm. Las corrientes de flujo, que parten del impulsor, se mueven a través del líquido en una dirección determinada hasta que son desviadas por el fondo o las paredes del tanque. La columna de remolinos de líquido de elevada turbulencia, que parte del impulsor, arrastra en su movimiento al líquido estancado, generando un efecto considerablemente mayor que el que se obtendría mediante una columna equivalente creada por una boquilla estacionaria.

Los álabes de la hélice cortan ó friccionan vigorosamente el líquido. Debido a la persistencia de las corrientes de flujo, los agitadores de hélice son eficaces para tanques de gran tamaño y de gran altura, pueden disponerse dos o más hélices sobre el mismo eje, moviendo el líquido generalmente en la misma dirección. El diámetro de los agitadores de hélice, difícilmente es mayor de 45 cm, independientemente del tamaño del tanque. A veces dos agitadores operan en sentido opuesto creando una zona de elevada turbulencia en el espacio comprendido entre ellos.

1.3.2. Agitadores de Paletas

El más sencillo en cuanto a su geometría. Para problemas sencillos de agitación de fluidos, un agitador eficaz está formado por un impulsor de paleta plana, que gira sobre un eje vertical.

En el agitador el flujo de líquido tiene una componente radial grande en el plano de la paleta y también un gran tangencial. Las corrientes de líquido que se originan se dirigen hacia la pared del tanque y después siguen hacia arriba o hacia abajo. Los agitadores de pala sencillos producen una acción de mezcla suave, que es con frecuencia la conveniente para el trabajo con materiales cristalinos frágiles. Son útiles para operaciones de simple mezcla, por ejemplo, la mezcla de líquidos miscibles o la disolución de productos sólidos. A velocidades muy bajas, un agitador de paletas produce una agitación suave, en un tanque sin placas deflectoras o cortacorrientes, las cuales son necesarias para velocidades elevadas.

De lo contrario el líquido se mueve como un remolino que gira alrededor del tanque, con velocidad elevada, pero con poco efecto al momento de la mezcla.

Las paletas se pueden adaptar a la forma del fondo del tanque, de manera que su movimiento rasca la superficie del fondo o pasan sobre ella con holgura muy pequeña. Un agitador de este tipo se conoce como agitador de ancla. Estos agitadores son útiles cuando se desea evitar depósitos de sólidos sobre una superficie de transmisión de calor, pero no son buenos mezcladores. Generalmente trabajan conjuntamente con un agitador de paletas de otro tipo, que se mueve con velocidad elevada y que gira normalmente en sentido opuesto.

La longitud del rodete de un agitador de paletas es del orden de 50 al 80% del diámetro interior del tanque. La anchura de la paleta es de un sexto a un décimo de su longitud.

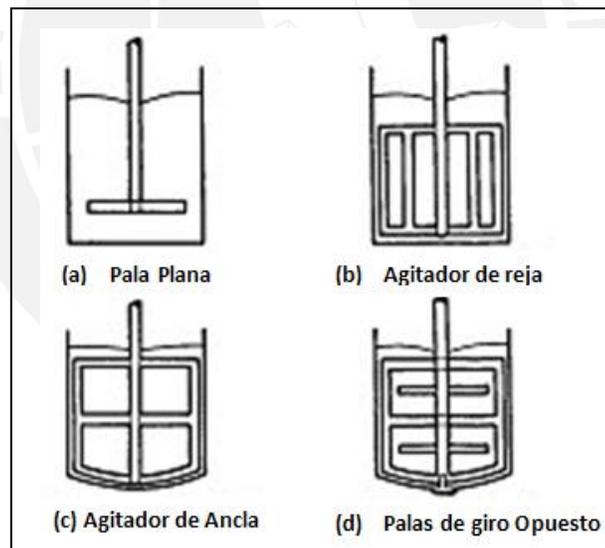


Figura 1.5. Algunos tipos de agitadores de paletas⁴

⁴ "Agitación". Slideshare. Consulta: 10 de febrero 2012
<<http://www.slideshare.net/guest6d731e/agitacion-1735401>>

1.3.3. Agitadores De Turbina

Los agitadores de turbina son eficaces en intervalos de viscosidades; en líquidos poco viscosos, producen corrientes intensas, que se extienden por todo el tanque y destruyen las masas de líquido estancado.

Las proximidades del impulsor se presenta zonas de corrientes rápidas, de alta turbulencia e intensos esfuerzos cortantes. Las corrientes principales son radiales y tangenciales. Las componentes tangenciales dan lugar a vórtices y torbellinos, que deben evitarse por medio de placas deflectoras o un anillo difusor, con el fin de que el rodete sea más eficaz.

En cuanto a su diseño, la mayor parte de ellos se asemejan a agitadores múltiples y cortas paletas. Giran a elevadas velocidades sobre el eje vertical del tanque. Las paletas pueden ser rectas o curvas, inclinadas o verticales. El rodete puede ser abierto, semi-cerrado o cerrado. El diámetro del rodete es menor que en el caso de agitadores de paletas, siendo del orden del 30 al 50% del diámetro del tanque.

El tipo de impulsor más representativo es el agitador de turbina semi-abierto, conocido como agitador de disco con aletas (Turbina Rushton), que se emplea para dispersar o disolver un gas en líquido. El gas entra por la parte inferior del eje del rodete; las aletas lanzan las burbujas grandes y las rompen en pequeñas, con lo cual se aumenta grandemente el área interracial entre el gas y el líquido.

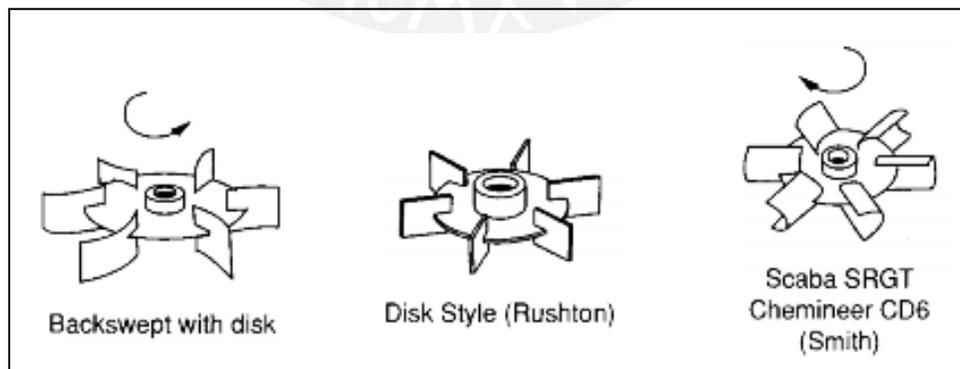


Figura 1.6. Algunos tipos de agitadores de turbina⁴

⁴“Agitadores”. Slideshare. Consulta: 10 de febrero 2012
<<http://www.slideshare.net/guest6d731e/agitacion-1735401>>

1.4. Patrón de Flujo

Las líneas de corriente de velocidad, más conocidas como patrón de flujo, se producen en el agitador dependen de los siguientes factores:

- Tipo de rodete o impulsor.
- Propiedades termo físicas del fluido (densidad, viscosidad, fracción de volumen, etc.).
- Dimensiones del tanque.
- Placas deflectoras

La velocidad del fluido en un punto del tanque tiene tres componentes, el patrón de flujo global, depende de las variaciones de estas tres componentes de la velocidad, de un punto a otro. La primera componente de velocidad es radial y actúa en dirección perpendicular al eje del rodete. La segunda es longitudinal y actúa en dirección paralela al eje. La tercera es tangencial o rotacional, y actúa en dirección tangencial a la trayectoria circular descrita por el rodete.

Las componentes radial y longitudinal son útiles porque dan lugar al flujo necesario para que se produzca la mezcla. Cuando el eje es vertical y está dispuesto en el centro del tanque, la componente tangencial de velocidad es generalmente perjudicial para la mezcla. *El flujo tangencial sigue una trayectoria circular alrededor del eje y crea un vórtice en la superficie del líquido debido a la circulación en flujo laminar,* da lugar a una estratificación permanente en diferentes niveles, de sustancias sin mezclar, sin que exista flujo longitudinal de un nivel a otro. Si están presentes partículas sólidas, las corrientes circulatorias tienden a lanzar las partículas contra la pared del tanque, debido a la fuerza centrífuga, desde donde caen acumulándose en parte central del fondo del tanque. Por consiguiente en vez de mezcla, se produce la acción contraria.

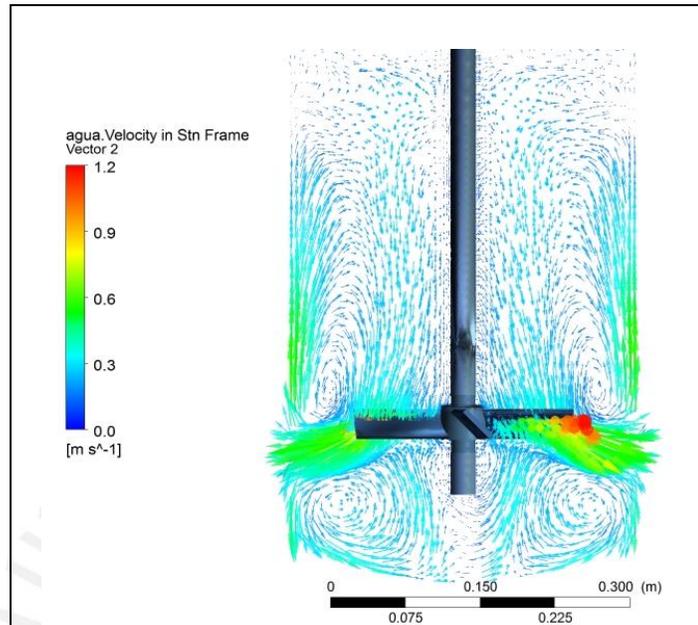


Figura 1.7. Ejemplo de un gráfico de vectores de velocidad en un tanque agitador.

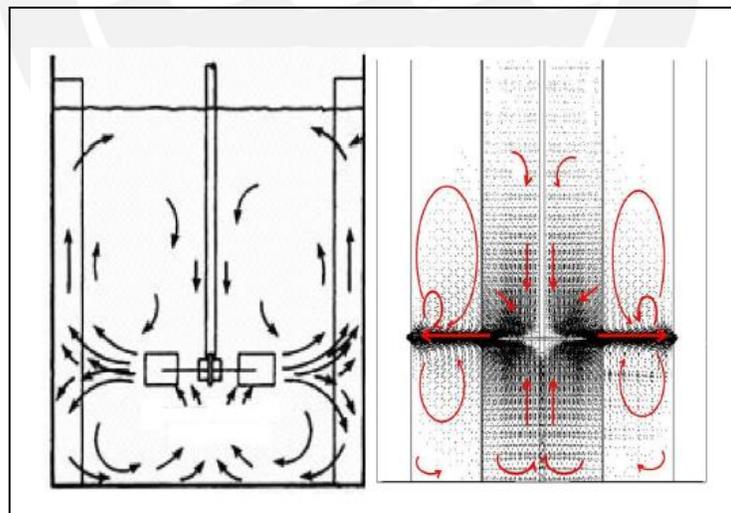


Figura 1.8. Ejemplo de comportamiento de un fluido en un estanque de agitación impulsado por una turbina Rushton⁴

⁴“Agitadores”. Slideshare. Consulta: 10 de febrero 2012
<<http://www.slideshare.net/guest6d731e/agitacion-1735401>>

1.5. Otras Consideraciones Geométricas

1.5.1. Formación de Vórtices

La componente tangencial del flujo sigue una trayectoria circular alrededor del eje, lo que crea un vórtice o remolino en la superficie del fluido. Esto puede evitarse por tres métodos:

- **Rodete Separado del Centro del Tanque**

Para tanques pequeños se puede posicionar el impulsor no centrado o desalineado del centro del tanque, como se muestra en la figura 1.9. El eje se mueve así alejado de la línea que pasa por el centro del tanque, inclinándose después según un plano perpendicular a la dirección del movimiento.

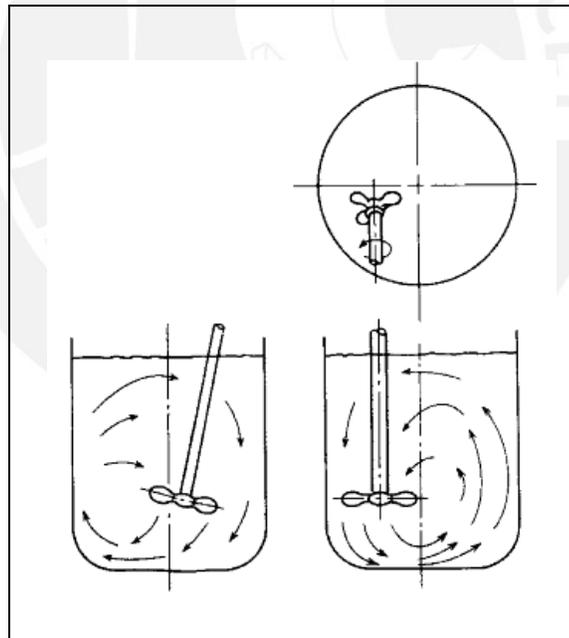


Figura 1.9. Agitador con el eje del impulsor no centrado⁴

⁴ "Agitadores". Slideshare. Consulta: 10 de febrero 2012
<<http://www.slideshare.net/guest6d731e/agitacion-1735401>>

En tanques medianamente grandes, el agitador puede montarse en la parte lateral del tanque, con el eje en un plano horizontal, pero formando un cierto ángulo con el radio, según se indica en la Figura 1.10.

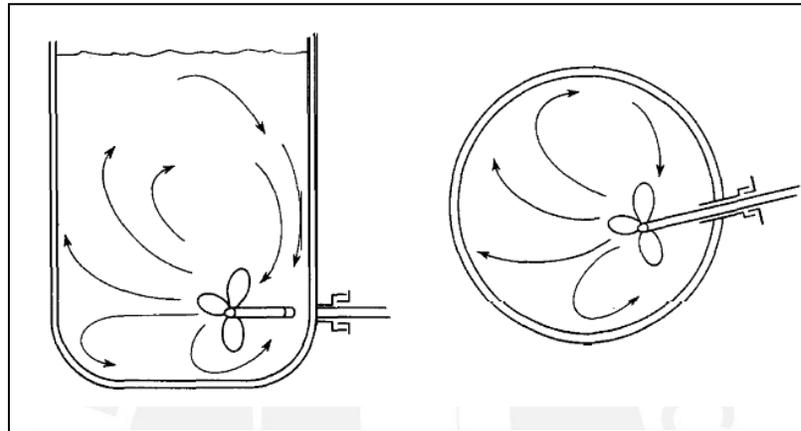


Figura 1.10. Agitador con el eje del impulsor horizontal⁴

- **Placas Deflectoras**

En los tanques de gran tamaño, con agitadores verticales, el mejor método existente es instalar placas deflectoras, que impiden el flujo rotacional, sin afectar al flujo radial y longitudinal. Un método sencillo y eficaz de destruir los remolinos, se consigue instalando placas verticales perpendiculares a la pared del tanque. En la Figura 1.11 se representan placas deflectoras de este tipo, y el tipo de flujo. Excepto en tanques muy grandes, son suficientes cuatro placas deflectoras, para evitar los remolinos y la formación de vórtice.

⁴“Agitadores”. Slideshare. Consulta: 10 de febrero 2012
<<http://www.slideshare.net/guest6d731e/agitacion-1735401>>

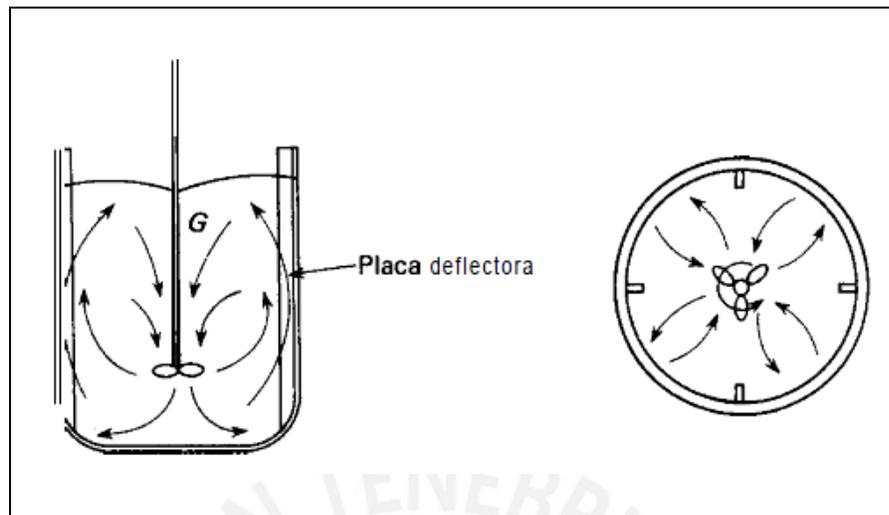


Figura 1.11. Tanque agitador con cuatro placas deflectoras⁸.

1.5.2. Tubos de Aspiración

Se usa para controlar la dirección y velocidad de flujo en la succión del impulsor de retorno al impulsor de manera axial a la entrada del impulsor. Estos dispositivos pueden resultar ser muy útiles cuando se desea un elevado esfuerzo constante en el rodete. Consta de una carcasa cilíndrica alrededor y ligeramente más grande en diámetro que el impulsor. Se montan alrededor de los mismos, mientras que el caso de turbinas se montan inmediatamente encima, tal como se muestra en la figura 1.12. Su altura puede ser un poco más grande que el diámetro del impulsor ó se puede extender a toda la profundidad del fluido, según el patrón de flujo que se requiere. Los tubos de aspiración se utilizan con hélices axiales para la aspiración directa y las corrientes de descarga. Los tubos de aspiración aumentan la fricción del fluido en el sistema, para una potencia de entrada dada, reducen la velocidad de flujo, de tal manera que deben de usarse solo si son necesarios.

⁸“Agitación”. Slideshare. Consulta: 18 de febrero 2012
<<http://www.slideshare.net/guest6d731e/agitacion-1735401>>

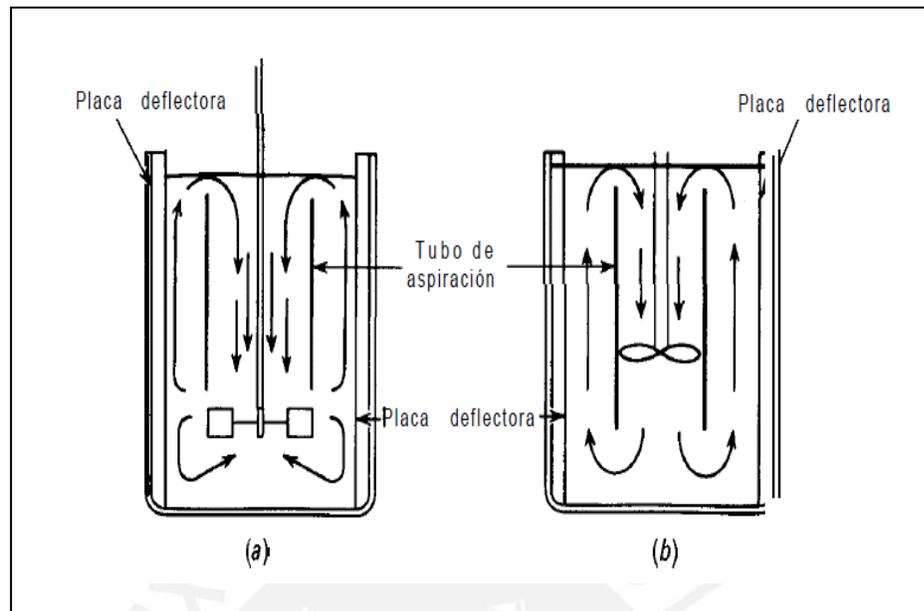


Figura 1.12. Tubos de aspiración en un tanque con placas deflectoras: (a) turbina; (b) hélice⁸ .

1.6. Números Adimensionales en Mezcla

Las correlaciones empíricas para estimar la potencia necesaria que hace girar un impulsor a una determinada velocidad, con respecto a otras variables del sistema son:

- Dimensiones del tanque y el impulsor
- Distancia del impulsor al fondo del tanque
- Profundidad del líquido
- Dimensiones de los deflectores
- Viscosidad, densidad y velocidad del fluido

Es necesaria la validación de la simulación, esto se hace comparando el número de potencia (N_p), en función del número de Reynolds (Re), con los valores del ensayo experimental. A continuación presentamos los principales números adimensionales involucrados en la validación de mezcla de fluidos.

⁸“Agitación”. Slideshare. Consulta: 18 de febrero 2012
 <<http://www.slideshare.net/guest6d731e/agitacion-1735401>>

1.6.1. Número de Reynolds (Re)

El número de Reynolds representa una medida de la magnitud relativa de los esfuerzos inerciales con respecto a los esfuerzos viscosos, es decir controla los efectos de la viscosidad; *si Reynolds es pequeño*, se tiene flujo con una viscosidad dominante, lo que nos indica que en el movimiento de las partículas, la dirección de la velocidad es gobernada por la viscosidad, el nombre que recibe este flujo es *Laminar*.

Si el Reynolds es elevado, los efectos viscosos son despreciables frente a los de inercia, excepto en las zonas donde se tengan elevadas velocidades, las partículas se mueven desordenadamente originado flujo denominado *turbulento*.

Entonces, podemos decir que el Re es usado para determinar si el flujo es Laminar o Turbulento, se calcula de la siguiente manera:

$$Re = \frac{ND^2 \rho}{\mu}$$

La clasificación del tipo de régimen, para un flujo originado en un agitador, basado en el Número de Reynolds:

- Régimen laminar: $Re \leq 10^2$
- Régimen transitorio: $10^2 < Re \leq 10^3$
- Régimen turbulento: $Re > 10^3$

1.6.2. Número de Caudal

$$N_Q = \frac{Q}{ND^3}$$

Conocido como capacidad de bombeo, es un número adimensional que representa una idea del caudal que atraviesa en plano del impulsor. El cálculo de este número adimensional

dependerá de las características del agitador (impulsor axial o radial), así como de los límites de integración que son impuestos; por ejemplo, para el cálculo de una turbina radial (flujo radial), el caudal que origina el impulsor es el siguiente:

$$Q = \pi D \int_{Z^-}^{Z^+} U(Z) dZ$$

Donde $U(z)$ es la componente radial de la velocidad.

De las ecuaciones anteriores obtenemos:

$$Q = \frac{\pi D \int_{Z^-}^{Z^+} U(Z) dZ}{ND^3}$$

1.6.3. Número de Potencia (N_p)

El parámetro da una idea de la cantidad total de potencia necesaria para el funcionamiento del agitador. El cálculo se realiza con la fórmula:

$$N_p = \frac{P}{\rho N^3 D^5}$$

El cálculo del número de potencia es al tipo de régimen del flujo (laminar o turbulento). Si el flujo es laminar, P se calcula como el producto del torque (T) que experimenta el agitador en su funcionamiento por la velocidad angular (ω) a la que gira (es decir, P representa la energía que aporta el eje y el impulsor al recipiente).

$$P = M \cdot \omega, M = [N \cdot m], \omega = [rad/s]$$

Para régimen turbulento, P se calcula según la siguiente ecuación:

$$P = \int_V (\rho\varepsilon + \mu\varphi) dV$$

El primer término de la ecuación ($\int_V (\rho\varepsilon) dV$) representa la energía disipada por la turbulencia, mientras que el segundo ($\int_V (\mu\varphi) dV$) representa la pérdida de energía por rozamiento viscoso. Entonces, en régimen turbulento ($\rho\varepsilon \gg \mu\varphi$) por lo que la ecuación queda:

$$\int_V (\rho\varepsilon) dV$$

ε : Velocidad de disipación turbulenta.

μ : Viscosidad Molecular

ρ : Densidad del fluido

$\mu\varphi$: Tasa de conversión de energía térmica por unidad de volumen debido al roce viscoso.

1.6.4. Eficiencia Hidráulica (n_H)

La eficiencia hidráulica es un parámetro de la cantidad de energía útil aportada al fluido que no se convierte en calor debido al rozamiento viscoso y se calcula con la siguiente expresión:

$$n_H = \frac{E_{imp} - E_D}{E_{imp}} \times 100$$

Donde E_{imp} es la potencia total que necesita el agitador para su movimiento y E_D es la potencia disipada por el fluido en forma de calor debido al rozamiento viscoso. El cálculo

de E_D se puede obtener de la ecuación de conservación de energía, es expresada más adelante.

En la ecuación de conservación de la energía da un término que representa la energía disipada por rozamiento viscoso. A continuación, se muestra la tasa de energía térmica, disipada por fricción, por unidad de volumen:

$$\mu\phi = 2\mu \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right] + \mu \left[\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right]$$

Integrando esta ecuación en todo el dominio se obtiene la potencia disipada en forma de calor (E_D), finalmente la expresión final para de la ecuación de eficiencia hidráulica es:

$$n_H = \frac{P - \int \mu\phi dV}{P} \times 100 \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{En régimen laminar: } P = M \cdot \omega \\ \text{En régimen turbulento: } P = \int \rho \epsilon dV \end{array} \right.$$

1.6.3. Efectividad (n):

La efectividad (n) se establece como la razón entre el número de caudal (N_Q) y el número de potencia (N_P). Su interpretación física es el caudal entregado por unidad de potencia consumida, debido a que el resultado es un parámetro adimensional, se puede utilizar para comparar diferentes tipos de agitadores. Su fórmula es la siguiente:

$$n = \frac{N_Q}{N_P}$$

Cuanto mayor sea este parámetro mucho mejor la efectividad, significa que el impulsor está expulsando mayor cantidad de fluido sin consumir demasiada potencia.

CAPITULO 2

CONSIDERACIONES MATEMÁTICAS

2.1. Principio de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD)

Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) es la ciencia que predice el comportamiento del flujo de fluidos, transferencia de calor, transferencia de masa, reacciones químicas, y fenómenos conexos mediante la resolución de las ecuaciones matemáticas que gobiernan estos procesos. Las ecuaciones utilizadas hacen uso de la conservación de masa, momento, energía, etc.

Se utiliza en todas las etapas del proceso de diseño, como: estudios conceptuales de nuevos diseños, desarrollo de productos, solución de problemas, rediseño. El análisis complementa las pruebas y experimentación por la reducción total del esfuerzo y el costo requerido para la adquisición de la experimentación y los datos. El solucionador CFD está basado en el método de los Volúmenes Finitos (FVM). Además, la base fundamental de cualquier problema son las ecuaciones de **Navier-Stokes**, que definen cualquier tipo de fluido de una sola fase. Estas ecuaciones pueden simplificarse mediante la eliminación de los términos que describen viscosidad para las ecuaciones de Euler. Una mayor simplificación, mediante la eliminación de términos que describen el rendimiento de las ecuaciones de vorticidad potencial.

Además utiliza métodos numéricos para resolver las ecuaciones diferenciales no - lineales fundamentales para las pre-definidas geometrías y condiciones de contorno a la forma lineal.

El resultado es una cantidad de predicciones de velocidad de flujo, temperatura, fase, presión, etc. para cualquier región donde el flujo se produce. Existen diversos paquetes de dinámica de fluidos computacional **PHONICS, CFX, FLUENT, FLOW 3D, STAR – CD, etc.** Estos paquetes están basados en el método de volúmenes finitos y se utilizan para resolver el comportamiento de flujo, transferencia de calor y transferencia de masa.

2.1.1. Ventajas de Dinámica de Fluidos Computacional

Durante las últimas décadas, CFD ha sido utilizado para mejorar el proceso de diseño permitiendo a los ingenieros simular el funcionamiento de configuraciones alternativas, eliminando conjeturas que normalmente se utilizan para establecer la geometría del equipo y las condiciones del proceso. El uso de esta herramienta permite a los ingenieros obtener las mejores soluciones para los problemas de geometría compleja y las condiciones de contorno. Además resulta ser muy atractivo para la industria y la investigación, se tiene muchas ventajas como las siguientes (Park., 2009):

- **Rentabilidad.-** Realizar simulaciones proporciona un costo relativamente bajo con respecto al uso de las pruebas físicas, experimentos y pruebas para obtener los datos esenciales de ingeniería para el diseño. Las simulaciones son relativamente baratas y los costos tienden a disminuir a medida que las computadoras se vuelven más rápidas.
- **Velocidad.-** Simulaciones se pueden ejecutar en un corto período de tiempo. Los ingenieros pueden evaluar el desempeño de todo un problema de ingeniería sin necesidad de invertir mucho tiempo.
- **Flexibilidad.-** Proporciona flexibilidad para cambiar los parámetros de diseño (parametrizar) sin necesidad de cambios en todo el sistema, lo que permite a los ingenieros obtener más alternativas en los diseños y poder realizar la optimización del sistema.
- **Capacidad para simular condiciones reales de flujo.-** Muchos de los procesos de transferencia de calor no pueden ser (fácilmente) puestos a prueba, por ejemplo, flujos hipersónicos y procesos operativos a altas temperaturas y presión. Mediante esta herramienta se proporciona la capacidad para simular teóricamente cualquier condición física.
- **Amplia información.-** Permite al analista examinar un gran número de lugares en la región de interés. Los ensayos experimentales sólo permiten extraer datos en un número limitado de lugares del sistema.

- **Confiabilidad.**- Los resultados obtenidos son validables con ensayos experimentales, esquemas numéricos y métodos sobre los que está basado. Se está mejorando rápidamente, por lo que los resultados son cada vez fiables.

2.1.2. Aplicaciones de Dinámica de Fluidos Computacional

CFD es útil en una amplia variedad de áreas de aplicación industrial y no industrial. Su principal aplicación esta dado como un método de ingeniería para proporcionar datos, los cuales sean adaptados para la solución de problemas reales del mundo físico. Las aplicaciones son numerosas y variadas, a continuación se indican algunos (Bakker., 2002).

- *En la industria de procesos químicos.* Es útil para el diseño de equipos que ayudan a analizar el flujo, y el rendimiento de equipos de procesos de producción: tanque agitador, reactores de lecho fluidizado, separadores, sistemas de combustión, intercambiadores de calor, polímeros y procesamiento de materiales y equipos de manipulación.
- *Es utilizado para el diseño eficiente de la aerodinámica* de los vehículos terrestres, aviones y misiles.
- *La ingeniería biomédica* es un campo de rápido crecimiento y utiliza CFD para estudiar los sistemas circulatorios, respiratorios, y el flujo sanguíneo en las arterias y las venas.
- *Es utilizado para estudiar el flujo y transferencia de calor* en los sistemas de generación de energía (calderas, equipos de combustión, bombas, ventiladores, tuberías, etc.)
- *También está relacionado con las aplicaciones de arquitectura* como la simulación del aire interior, exterior (alrededor del edificio), estado del medio ambiente, ventilación, calefacción, flujos de refrigeración en los edificios y la carga del viento.
- *Ha encontrado su aplicación en la industria de semiconductores, en el enfriamiento de equipos*, incluyendo micro-circuitos. Los resultados que nos ofrece pueden ayudar enormemente a reducir el número de experimentos necesarios para diseñar diversos equipos de fabricación de chips. Varias industrias de

semiconductores han empezado a utilizar esta herramienta para ayudar a sus ingenieros de diseño.

- *Se utiliza en el diseño relacionado con las aplicaciones de turbo maquinaria, como difusores, compresores y turbinas.*

2.1.3. Limitaciones de Dinámica de Fluidos Computacional

A pesar de las grandes ventajas y aplicaciones de CFD, tiene algunas limitaciones, como las siguientes (Bakker., 2002):

- **Modelos físicos.**- Las soluciones están basadas en modelos físicos de los procesos del mundo real (por ejemplo, la turbulencia, reacciones químicas, la compresibilidad, flujo multifásico, etc.). Los resultados que nos ofrece sólo pueden ser tan exactas como los modelos físicos en los que están basados.
- **Errores numéricos.**- La resolución de ecuaciones a través de una computadora siempre induce a errores numéricos. Errores de redondeo aunque puede ser pequeña en la mayoría de los casos). Un segundo error, son los errores de truncamiento, debido a las aproximaciones de los modelos numéricos.
- **Condiciones de contorno.**- Al igual que con los modelos físicos, la precisión en los resultados depende en gran medida a las condiciones iniciales y límites previstos en el modelo numérico.

2.2. Descripción general del modelado en Dinámica de Fluidos Computacional

El acceso para poder resolver todos los paquetes comerciales de CFD, incluyen interactuar con una interface de usuario para el ingreso de parámetros del problema y examinar los resultados. La resolución de aplicaciones en ingeniería se desarrolla como un proceso de tres pasos:

1. Pre-procesamiento
2. Solución
3. Post-procesamiento

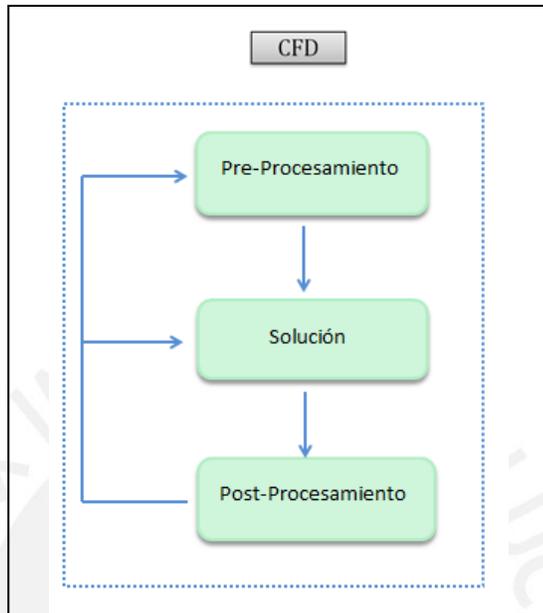


Figura 2.1. Esquema de la descripción general del modelado en CFD¹⁴ .

Todos los pasos anteriores son parte esencial de cualquier proyecto de CFD. En la etapa de pre-procesamiento, se realiza la creación de la geometría y la malla con las condiciones de frontera apropiadas. En la parte del solucionador (Solver) se lleva a cabo las soluciones de las ecuaciones que rigen el modelo. Una vez que la solución está disponible, en la etapa de post-procesamiento, se visualizan los resultados mediante gráficos a color, gráficos de curvas de nivel, vectores de velocidad, etc [14].

A continuación se hará una revisión de cada etapa:

¹⁴ LearnCAX 2012

“Introducción to CFD”. Consulta: 30 marzo 2012

<<http://blog.learncax.com/2012/04/introduction-to-cfd-part-ii-pre.html>>

2.2.1. Pre-Procesamiento

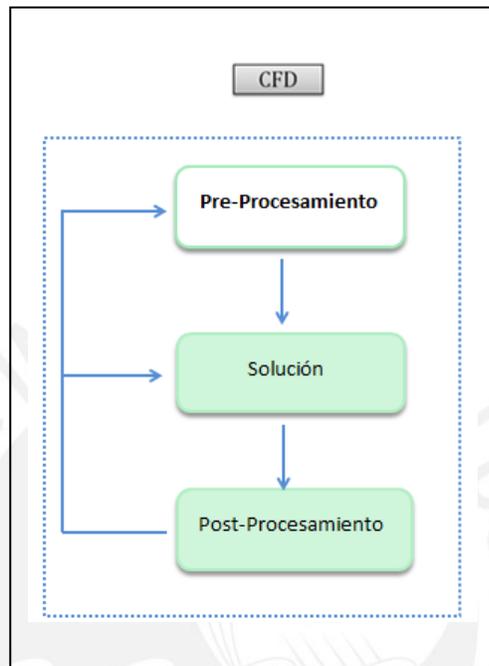


Figura 2.2. Etapa de Pre – Procesamiento en CFD¹⁴ .

En la etapa de pre-procesamiento existen tres principales tareas a realizar:

- a) *Creación de la Geometría o CAD*: Definición del dominio de interés en el solucionador para resolver las ecuaciones.
- b) *Generación de la malla*: División del dominio en partes pequeñas (Discretización).
- c) *Condiciones de frontera*: Aplicación de condiciones apropiadas en los límites del dominio.

¹⁴ LearnCAX 2012

“Introducción to CFD”. Consulta: 30 marzo 2012
<<http://blog.learn-cax.com/2012/04/introduction-to-cfd-part-ii-pre.html>>

2.2.1.1. Definición de Dominio

Se define el dominio de interés para suministrar información al software sobre la región donde se resolverán las ecuaciones de CFD.

Esta tarea es trivial para casos simples, como el flujo en tuberías o flujo sobre placa plana. Sin embargo, para casos muy complicados, como el flujo alrededor de un avión o un automóvil, esta tarea toma una cantidad de tiempo considerable [14].

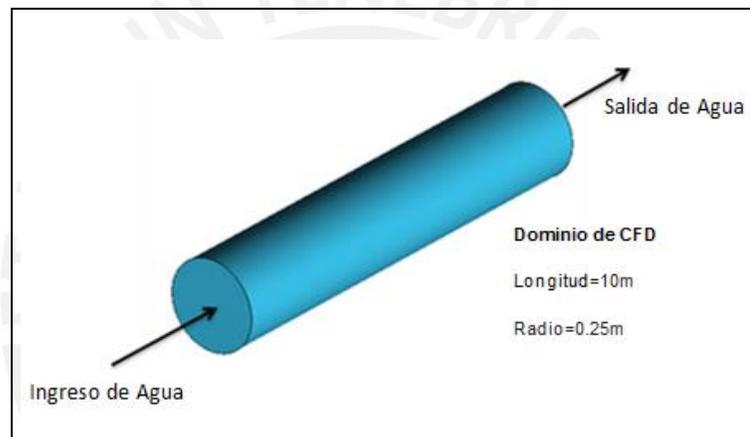


Figura 2.3. Dominio de la tubería en CFD¹⁴

2.2.1.2. Creación de la Malla

De manera sencilla, podemos definir la generación de una malla como: "El proceso de dividir el dominio físico en pequeños sub-dominios (llamados células ó elementos)". Por ejemplo se muestra el siguiente dominio:

Dominio seleccionado: Región entre las cuatro líneas rectas (Sección de paso del conducto).

Caso 1: Triangular y

Caso 2: Cuadrilátero (rectángulo)

¹⁴LearnCAX 2012

"Introducción to CFD". Consulta: 30 marzo 2012

<<http://blog.learncax.com/2012/04/introduction-to-cfd-part-ii-pre.html>>

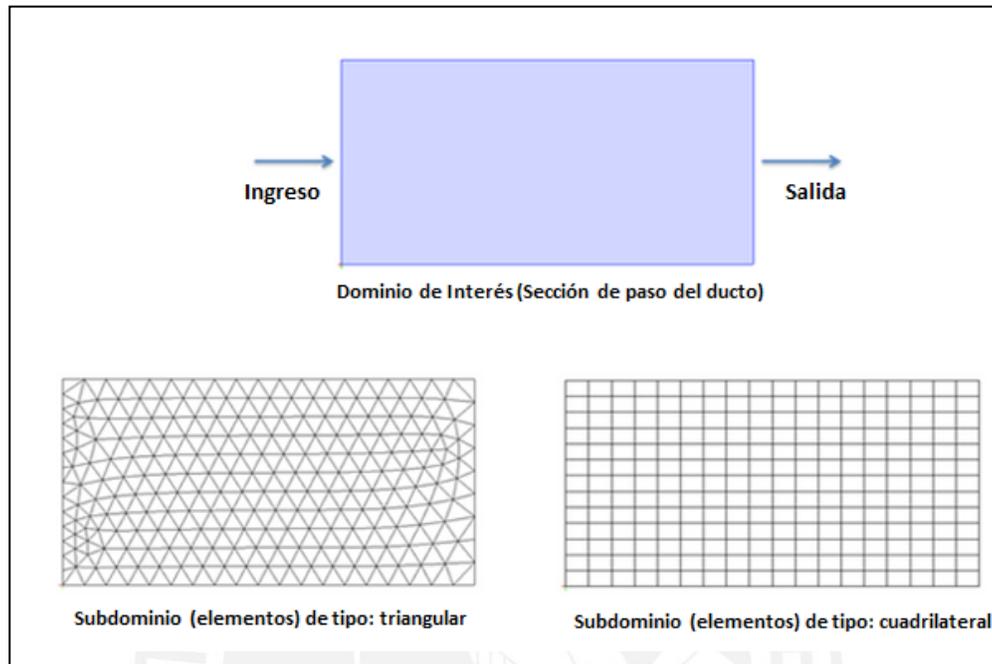


Figura 2.4. Tipos de mallado en la sección de paso ducto¹⁴.

A continuación se presentan los requerimientos más importantes en la creación del mallado:

- 1) Seleccionar el tipo de elemento (triangular, cuadrangular, tetraédrico, hexaédrico, etc.), debe ser completamente entendido por los solucionadores de ecuaciones.
- 2) Todos los elementos deben cubrir todo el dominio.
- 3) El mallado cerca de los límites del dominio (paredes) deben ser lo suficientemente pequeños para capturar los efectos de capa límite de velocidades en las paredes.
- 4) Todos los elementos deben estar conectados correctamente a sus elementos vecinos.
- 5) No deben haber elementos que se superpongan.
- 6) La distribución de elementos debe ser adecuado a las características geométricas (curvatura y proximidad) del dominio y poder capturar las principales características de flujo (la separación del flujo, etc.).

¹⁴LearnCAX 2012

"Introducción to CFD". Consulta: 30 marzo 2012

<<http://blog.learncax.com/2012/04/introduction-to-cfd-part-ii-pre.html>>

Existen varios métodos para dividir el dominio en pequeños elementos (Discretizar). A nivel general se clasifican en cuatro métodos:

- a) Método cartesiano.
- b) Método no estructurado.
- c) Método estructurado.
- d) Método híbrido.

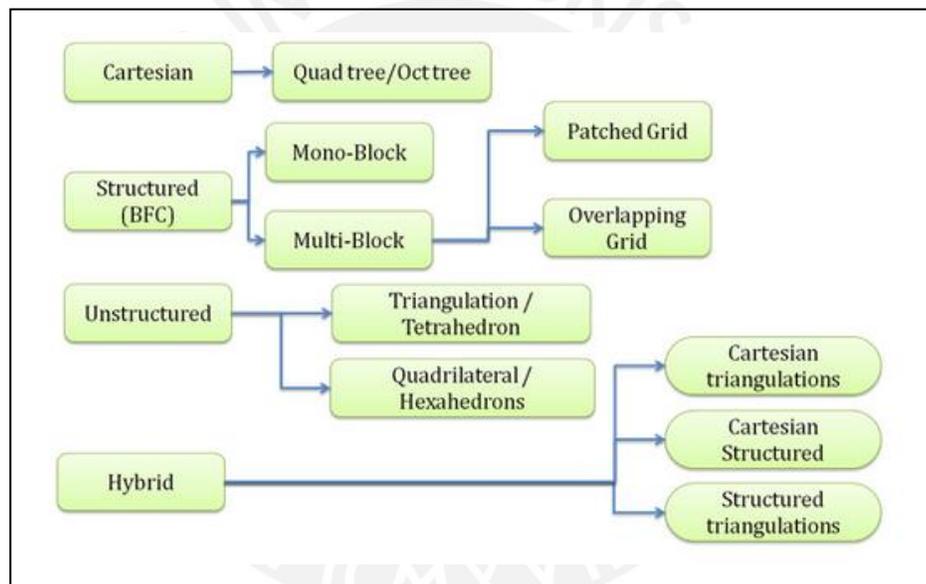


Figura 2.5. Métodos de mallado ¹⁴

Para resolver las ecuaciones, usamos métodos numéricos como el de volúmenes finitos o el método de Elementos Finitos. Todos estos métodos se van a resolver de la forma en que se rigen las ecuaciones. La idea general de estos métodos es **"En lugar de resolver las complicadas ecuaciones en un complicado dominio, se divide el dominio en pequeñas partes para poder resolver estas ecuaciones en cada elemento del dominio a la vez"**.

¹⁴LearnCAX 2012

"Introducción to CFD". Consulta: 30 marzo 2012

<<http://blog.learn-cax.com/2012/04/introduction-to-cfd-part-ii-pre.html>>

A medida que se va a resolver la forma de las ecuaciones que rigen, no podemos resolverlos en la geometría continua (geometría completa a la vez). Así que tenemos que dividir la geometría en pequeñas partes. Esta división de la geometría en pequeñas partes que se llama la generación de la red [14].

A la generación de la malla también se le conoce como:

- Discretización de la geometría
- Generación de la red.
- Generación del elemento.
- Descomposición del dominio.

2.2.1.3. Definición de las Condiciones de Contorno.

Los diferentes límites del volumen de control requieren diferentes condiciones de contorno. La aplicación de la herramienta de las condiciones de contorno en el pre-procesamiento se basa en poner etiquetas apropiadas (definir) en los límites específicos del dominio o volumen de control. Una buena definición de las condiciones de contorno en la etapa de pre-procesamiento nos asegura una etapa de solución y post- procesamiento muy eficaz. En general existen dos tipos de condiciones de borde que se asignan:

1. Condición de borde de superficie.
2. Condición de borde de dominio (región).

En el siguiente ejemplo, se tiene un caso de transferencia de calor a través del flujo en un cilindro de espesor no despreciable. Es necesario especificar los tipos de condiciones de contorno, así como el significado y el efecto de las condiciones de frontera:

- Inlet: Para especificar el flujo que ingresa a través de esa frontera.
- Outlet: Para especificar el flujo que sale a través de esa frontera.
- Common Wall: Para especificar la región de pared entre el fluido (Agua) y el sólido (Cobre).

- Copper (Cobre): Para especificar las propiedades del cobre y se puedan resolver las ecuaciones de energía.
- Water (Agua): Para especificar las propiedades del agua y se puedan resolver las ecuaciones de continuidad, momento y energía.
- Outer Wall: Para especificar el coeficiente convectivo de transferencia de calor y las temperaturas externas.

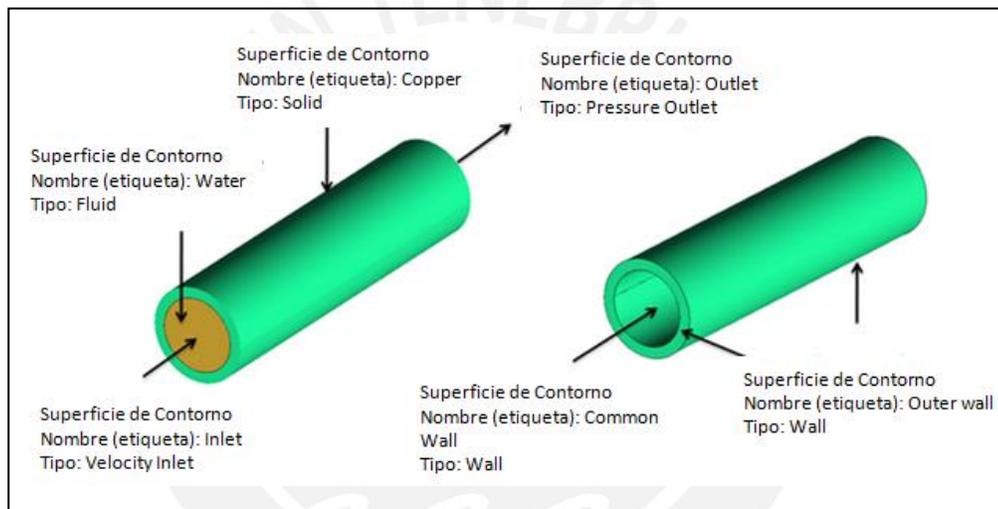


Figura 2.6. Ejemplo de condiciones de contorno¹⁴ .

¹⁴ LearnCAX 2012

“Introducción to CFD”. Consulta: 30 marzo 2012

<<http://blog.learncax.com/2012/04/introduction-to-cfd-part-ii-pre.html>>

2.2.2. Solución

El componente que resuelve los problemas de **CFD** se llama solucionador. En él se producen los resultados deseados de un proceso interactivo. Un problema de **CFD** se resuelve como sigue:

1. Las ecuaciones diferenciales parciales se integran sobre todos los volúmenes de control en la región de interés. Esto es equivalente a la aplicación de una ley de conservación de base (por ejemplo, para la masa o cantidad de movimiento) para cada volumen de control.
2. Estas ecuaciones integrales se convierten en un sistema de ecuaciones algebraicas mediante la generación de un conjunto de aproximaciones para los términos de las ecuaciones integrales.
3. Finalmente, las ecuaciones algebraicas se resuelven iterativamente.

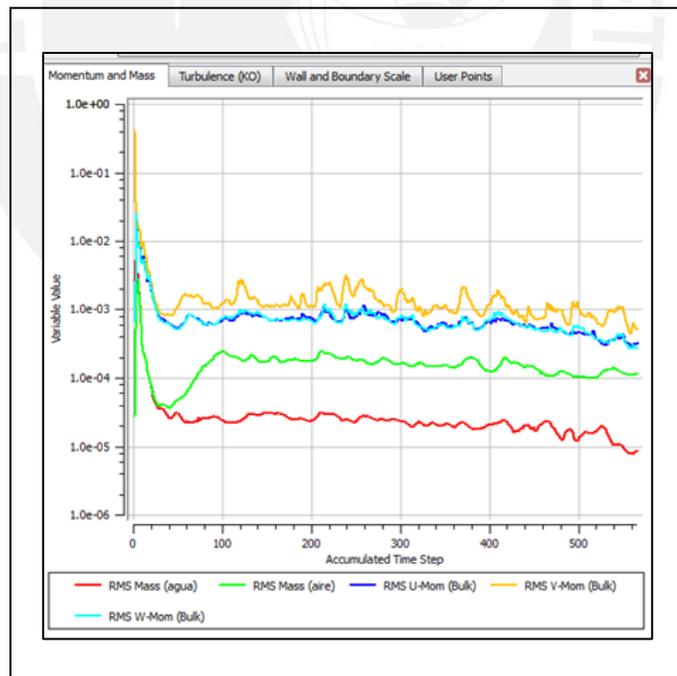


Figura 2.7. Curva de convergencia en Ansys CFX 14.0¹²

¹² Lecture: Solver settings. ANSYS CFX 14.0 INTRO

Es necesario un enfoque iterativo debido a la naturaleza no lineal de las ecuaciones y cuando la solución se aproxima a la solución exacta, se dice converger. Para cada iteración, un error, o residuo, se informa como una medida de la conservación general de las propiedades de flujo.

Encontrar la solución exacta depende de un número de factores, incluyendo el tamaño y forma de los volúmenes de control y el tamaño de los residuos finales. Los complejos procesos físicos, tales como la combustión y la turbulencia, a menudo se modela utilizando relaciones empíricas. Las aproximaciones inherentes a estos modelos también contribuyen a las diferencias entre la solución CFD y la real.

El proceso de solución no requiere la interacción del usuario y suele llevarse a cabo como un proceso por lotes. Finalmente, el solucionador genera un archivo de resultados para el post-procesamiento [14].

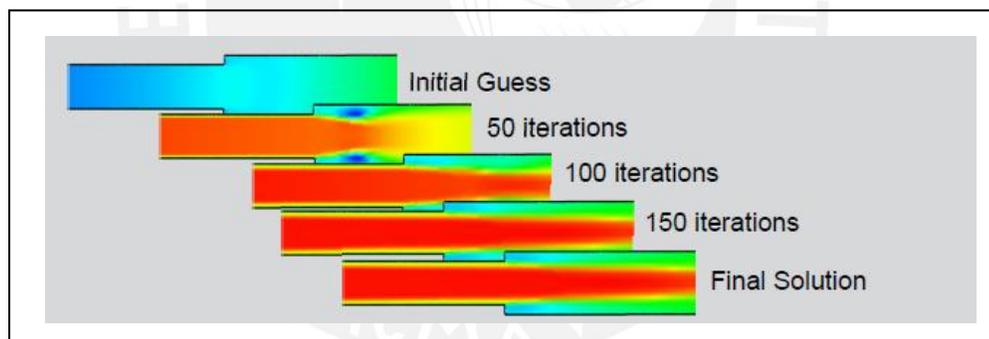


Figura 2.8. Diferencias en la solución, ante la cantidad de iteraciones¹² .

2.2.3. Visualización de resultados (CFD-Post)

El propósito del análisis de CFD es la obtención de información cuantitativa y/o cualitativa sobre el desempeño de flujo de fluido del sistema.

CFD-Post proporciona el estado de la técnica de procesamiento de gráficos interactivos, herramientas para el análisis y presentar resultados de simulación en CFD [14].

¹² Lecture: Solver settings. ANSYS CFX 14.0 INTRO

CFD-Post tiene las siguientes características:

- Una interfaz gráfica de usuario que incluye un panel del visor en el que se representa toda la producción gráfica del CFD-Post.
- Soporte para una variedad de objetos gráficos y geométricos para la creación de parcelas de post-procesamiento, visualización de la malla y para definir las ubicaciones para el cálculo cuantitativo.
- Variables escalares y vectoriales definidas por el usuario.
- Congelación de variables (para compararlos con otros archivos).
- Generación del reporte de resultados.
- Presenta en línea de comandos, archivo de sesión, o el estado del archivo de entrada.
- Variables definidas por el usuario.
- Generación de una variedad de objetos gráficos donde la visibilidad, la transparencia, el color y la visualización de línea/caras puede ser controlado.
- Sintaxis de energía para permitir que los archivos de sesión totalmente programables.

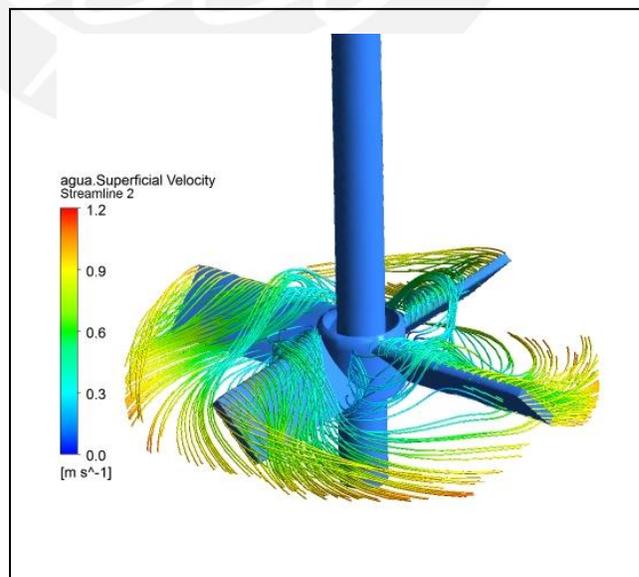


Figura 2.9. Visualización de resultados en CFD-Post Ansys 14.0

2.3. Discretización Numérica

Las soluciones analíticas de las ecuaciones de Navier-Stokes (ecuaciones en CFD) existen sólo para el más simple de los flujos en condiciones ideales; es por ello, que para obtener soluciones de flujos reales, una aproximación numérica debe ser sustituida por aproximaciones algebraicas que se pueden resolver mediante un método numérico.

2.3.1. Discretización de Ecuaciones

El programa computacional de simulación numérica ANSYS CFX versión 14.0 usa el método de los volúmenes finitos, que por primera vez implica discretizar el dominio espacial utilizando una malla. La malla se utiliza para la construcción de volúmenes finitos, que se utilizan para poder resolver las ecuaciones de conservación, tales como masa, momento y energía. La malla es tridimensional, pero para simplificar vamos a ilustrar este proceso en dos dimensiones.

La siguiente figura 2.10 muestra un ejemplo de una malla en dos dimensiones. Todas las variables de soluciones y propiedades de los fluidos se almacenan en los nodos (vértices de malla). Un volumen de control (el área sombreada) se construye alrededor de cada nodo de la malla utilizando el doble mediana (definida por las líneas que unen los centros de los bordes y los centros de los elementos que rodean el nodo).

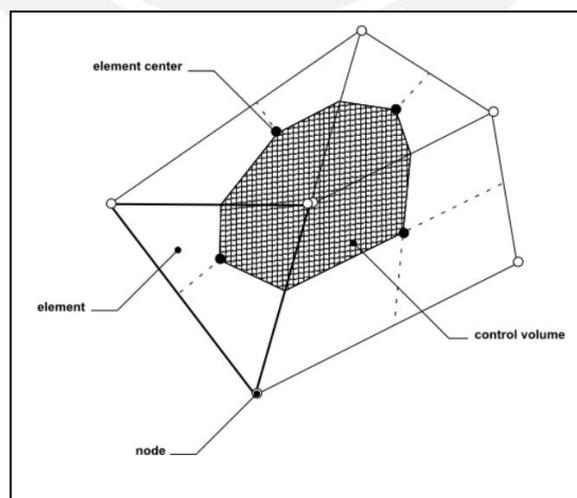


Figura 2.10. Definición del volumen de control¹²

¹² Ansys Inc. V140. Help. Theory.

Para ilustrar el método de los volúmenes finitos, tenga en cuenta las ecuaciones de conservación de masa (Ec.1), momento (Ec.2) y un escalar pasivo (Ec.3), expresados en coordenadas cartesianas:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j) = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho U_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j U_i) = - \frac{\partial}{\partial x_i} P + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu_{ijf} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right) \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \phi) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j \phi) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(r_{ijf} \left(\frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right) \right) + S_\phi \quad \dots\dots\dots (3)$$

Estas ecuaciones se integran en cada volumen de control y el teorema de divergencia de Gauss es aplicado para convertir integrales de volumen que involucran operadores de divergencia y gradientes en integrales de superficie. Si los volúmenes de control no se deforman con el tiempo, entonces las derivadas temporales se pueden mover fuera de las integrales de volumen y se convierten en las siguientes ecuaciones:

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho dV + \int_S U_j dn_j = 0$$

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho U_i dV + \int_S \rho U_j U_i dn_j = \int_S P dn_j + \int_S \mu_{ijf} \left[\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right] dn_j + \int_V S_{U_i} dV$$

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho \phi dV + \int_S \rho U_j \phi dn_j = \int_S r_{ijf} \left[\frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right] dn_j + \int_V S_\phi dV$$

Donde V y s indican respectivamente el volumen y las regiones superficiales de la integración, y dn_j son las componentes cartesianas diferenciales del vector normal con la superficie exterior. Las integrales de volumen representan los términos de origen o de acumulación y las integrales de superficie representan la suma de los flujos. Tenga en cuenta que los cambios en estas ecuaciones necesitan alguna generalización para dar cuenta de la deformación de la malla.

El siguiente paso en el algoritmo numérico es discretizar el volumen y las integrales de superficie. Para ilustrar este paso, tenga en cuenta un solo elemento como el que se muestra a continuación.

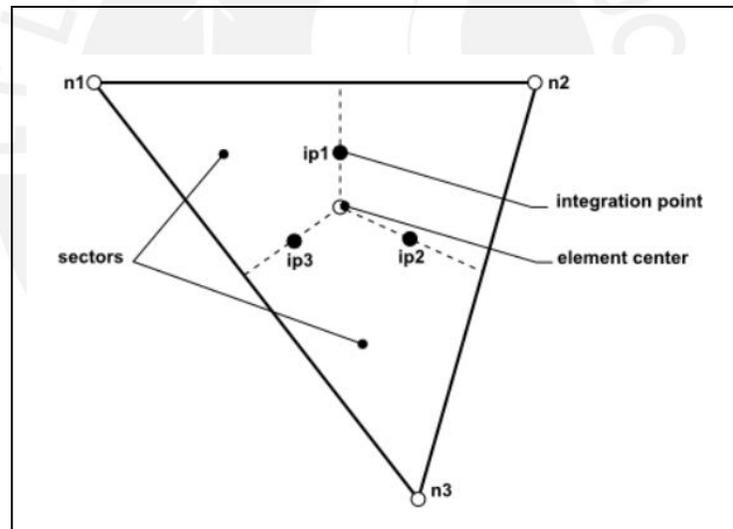


Figura 2.11. Elemento de la malla¹² .

2.4. Modelos de Turbulencia en el programa Ansys CFX v.14.0

El estado de turbulencia consta de fluctuaciones en el campo de flujo en el tiempo y espacio. Es un proceso complejo, principalmente debido a que es tridimensional, inestable y se compone de muchas escalas. Puede tener un efecto significativo en las características

¹² Lecture: Solver settings. ANSYS CFX 14.0 INTRO

del flujo. La turbulencia se produce cuando las fuerzas de inerciales en el líquido son mucho mayores a las fuerzas viscosas y se caracteriza por un alto número de **Reynolds**.

Para representar los efectos de la turbulencia a predecir, **CFD** se ha centrado en métodos que hacen uso de modelos de turbulencia. Modelos que han sido específicamente desarrollados para dar cuenta de los efectos de la turbulencia sin necesidad de recurrir a una malla excesivamente fina y una simulación numérica directa. La mayoría de los modelos de turbulencia son modelos de turbulencia estadísticos, como se describe a continuación. Las dos excepciones a este en programa ANSYS CFX versión 14.0 es el **Largeeddy Simulation** y el modelo **Detached Eddy Simulation**.

2.4.1. El Modelo Laminar

El flujo laminar se rige por las inestables ecuaciones de Navier-Stokes. Para establecer la opción del modelo laminar no se aplica un modelo de turbulencia a la simulación y sólo es apropiada si el flujo es laminar. Se aplica a bajos flujos de número de **Reynolds** (por ejemplo, para el flujo de la tubería de régimen de flujo laminar es $\sim Re < 1000$). La transferencia de energía en el fluido se consigue mediante la interacción molecular (difusión). En el caso de los flujos de alta velocidad, el trabajo de las tensiones de viscosidad también puede contribuir a la transferencia de energía. Siempre se comprueba en el archivo de salida que el máximo número de **Reynolds** está en el régimen de flujo laminar. Si configura una simulación con flujo laminar, pero el flujo real es turbulento, la convergencia es difícil y la simulación no se llega a la solución correcta.

2.4.2. El modelo de Ecuación Cero

El modelo de la Ecuación Cero implementado en **CFX** es fácil de implementar y utilizar, puede producir resultados aproximados muy rápidamente, y ofrece una buena conjetura inicial para simulaciones utilizando modelos de turbulencia más avanzadas. En **CFX** la viscosidad constante del remolino turbulento se calcula para el dominio de flujo completo. Si se especifica una viscosidad de remolino, este valor se utiliza en lugar del valor calculado por el solucionador y se obtiene un resultado más rápido.

2.4.3. El Modelo k-Épsilon ($k-\epsilon$)

Uno de los modelos más destacados es el modelo $k-\epsilon$ (k -épsilon), ha sido implementado en la mayoría de los códigos **CFD** de propósito general y es considerado como el modelo estándar de la industria. Se ha demostrado ser estable y robusto numéricamente y tiene un régimen bien establecido de capacidad de predicción. Para simulaciones de propósito general, ofrece un compromiso en términos de precisión y robustez.

En **CFX**, el modelo de turbulencia $k-\epsilon$ utiliza la función de pared escalable para mejorar la robustez y la precisión cuando la malla cercana a la pared es muy fina. Las funciones de pared escalables permiten una solución arbitrariamente fina cerca de las rejillas de pared, que es una mejora significativa sobre las funciones de pared estándar.

Mientras los modelos estándar de dos ecuaciones, tales como el modelo $k-\epsilon$, proporcionan buenas predicciones para muchos flujos de interés de ingeniería, hay aplicaciones para los que estos modelos no pueden ser adecuados, como:

- Flujos con separación de la capa límite.
- Flujos con los cambios repentinos en la velocidad de deformación media.
- Caudales en la rotación de los fluidos.
- Caudales sobre superficies curvas.

2.4.4. El Modelo RNG k-Épsilon

El modelo RNG k -épsilon es una alternativa al modelo estándar $k-\epsilon$. En general, se dispone de una poca mejora en comparación con el modelo estándar $k-\epsilon$.

2.4.5. El Modelo k-Omega y el Modelo SST

Uno de los principales problemas en el modelado de la turbulencia es la predicción exacta de la separación de flujo desde una superficie lisa. El modelo estándar de dos ecuaciones de turbulencia a menudo falla en predecir el inicio y la cantidad de separación de flujo en caso de malas condiciones del gradiente de presión. Este es un fenómeno importante en muchas aplicaciones técnicas, en particular para la aerodinámica de un avión. La comunidad

aerodinámica ha desarrollado un número de modelos de turbulencia avanzados para esta aplicación. En general, los modelos de turbulencia basados en la ecuación de predecir el inicio de la separación y la cantidad dividida. Esto es un problema, ya que este comportamiento le da una característica excesivamente optimista sobre el perfil aerodinámico. La predicción, no es conservadora de la ingeniería stand-punto. Los modelos desarrollados para resolver este problema han demostrado una predicción mucho más precisa de la separación en un número de casos de prueba y en aplicaciones industriales. La predicción de separación es importante en muchas aplicaciones técnicas, tanto para los flujos internos y externos.

En la actualidad, uno de los modelos de turbulencia más destacados en esta área es el $k - \omega$. Este modelo está basado en el modelo Shear-Stress-Transport (SST), fue diseñado para dar predicciones muy exactas de la aparición y la cantidad de separación de flujo bajo gradientes de presión adversos por la inclusión de los efectos de transporte en la formulación de la viscosidad de Foucault. Esto da como resultado una importante mejora en términos de predicciones separación del flujo. El rendimiento superior de este modelo se ha demostrado en un gran número de estudios de validación.

El modelo SST se recomienda para las simulaciones de alta precisión de capa límite. Para los flujos de cizallamiento libre, el modelo SST es idéntico al modelo $k - \epsilon$. **El modelo SST** fue desarrollado para superar las deficiencias de los modelos $k-\omega$ y BSL $k-\omega$. Por lo tanto, se recomienda utilizar el modelo de SST sobre estos modelos.

Una de las ventajas de la formulación $k-\omega$ es el tratamiento de los cálculos cercanos a la pared y con bajo número de **Reynolds** en el que es más preciso y más robusto.

2.5. Estadísticas del Mallado

Las estadísticas de malla resumen el dominio específico y global (es decir, la combinación de todos los dominios):

- Diagnóstico de la calidad de malla.
- El número total de nodos, elementos de contorno y las caras en la malla.
- Las fracciones de área de las interfaces de malla que estaban sin asignar.

En el diagnóstico de la calidad de malla se incluyen medidas de **ortogonalidad**, **expansión** y **relación de aspecto**. Para cada medida, hay rangos de valores que se consideran buenos, aceptables y pobres. Estos rangos son anotados con **OK**, **ok** y **“¡”** respectivamente, en el resumen de malla de diagnóstico. El mínimo correspondiente o valor máximo se presenta para cada medida, además de un resumen del porcentaje de la malla con valores en cada uno de los rangos de bueno, aceptable y pobre. Tenga en cuenta que estos porcentajes se han redondeado al valor entero más cercano. En la siguiente figura 2.12 se muestra un ejemplo de las estadísticas de mallado. La sección de estadística de malla tiene una apariencia similar a la siguiente:

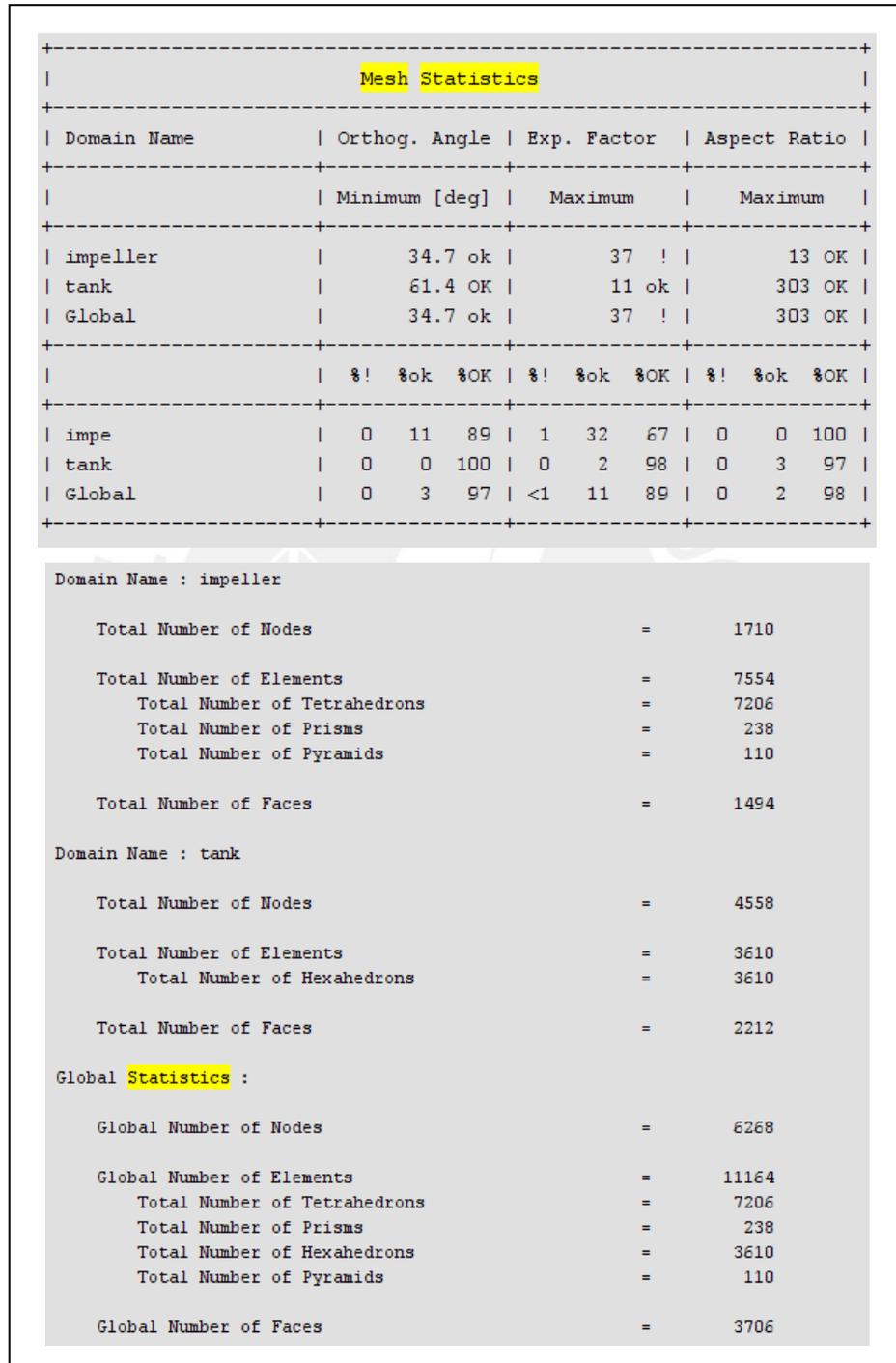


Figura 2.12. Estadísticas de Mallado en Ansys CFX v. 14.0.

Los umbrales de calidad que definen la malla, OK (bueno), ok (aceptable) y! (mala) de estado en la sección de estadísticas del mallado son los siguientes:

Maximum aspect ratio (double precision)	OK	<10000.0
	ok	10000.0 < 100000.0
	!	> 100000.0
Maximum aspect ratio (single precision)	OK	< 100.0
	ok	100.0 < 1000.0
	!	> 1000.0
Maximum mesh expansion factor	OK	< 5.0
	ok	5.0 < 20.0
	!	> 20.0
Minimum orthogonal angle	OK	> 50°
	ok	50° > 20°
	!	< 20°

Figura 2.13. Umbrales de calidad del mallado.¹²

¹² Ansys Inc. V140. Help. Theory.

CAPÍTULO 3

SIMULACIÓN BIFASICA MEDIANTE ANSYS CFX 14.0.

3.1. Recopilación de Antecedentes

Debido a la gran cantidad de investigaciones hechas con relación al tema, en su gran mayoría con otros softwares de simulación, es importante estudiar detenidamente estas publicaciones para lograr aprovechar de la mejor manera posible la experiencia acumulada sobre el tema.

En trabajos de este tipo, es de vital importancia recopilar antecedentes en las variadas fuentes y no realizar nuevamente el trabajo existente, ya que la idea es agregar nuevos contenidos útiles y no repetir lo que esta hecho. Para poder lograr esto, se realiza una investigación de cada metodología desarrollada por autores con el fin de definir una metodología antes de correr una simulación. Los artículos recopilados tienen que haber sido publicados con todas las verificaciones correspondientes.

Estas metodologías son aclaradas y explicadas de la manera más clara posible, para que alguien que sin ningún conocimiento las pueda entender.

3.2. Descripción del Problema

El fondo del presente trabajo de tesis consiste en proponer un procedimiento válido para simular y mostrar el comportamiento del flujo dentro de un tanque agitador vertical de impulsor PTB con superficie libre y en régimen estacionario mediante el software ANSYS CFX versión 14.0. A continuación se muestran las principales características del problema:

- El equipo de agitación y mezcla presenta la siguiente configuración:
 - Tanque cilíndrico de fondo redondeado
 - Cuatro deflectores colocados simétricamente contra la pared del tanque en intervalos de 90°
 - Impulsor con cuatro paletas rectas inclinadas 45° (PTB).
 - Las dimensiones del tanque se muestran en la siguiente tabla 3.1.

- El estudio fluido dinámico es bifásico (superficie libre), el cual se involucra agua y aire como fluidos de trabajo.
- El impulsor gira a una velocidad angular de 100 rpm en *régimen estacionario*.
- Se asume un proceso isotérmico a una temperatura de 25 °C y a presión atmosférica.

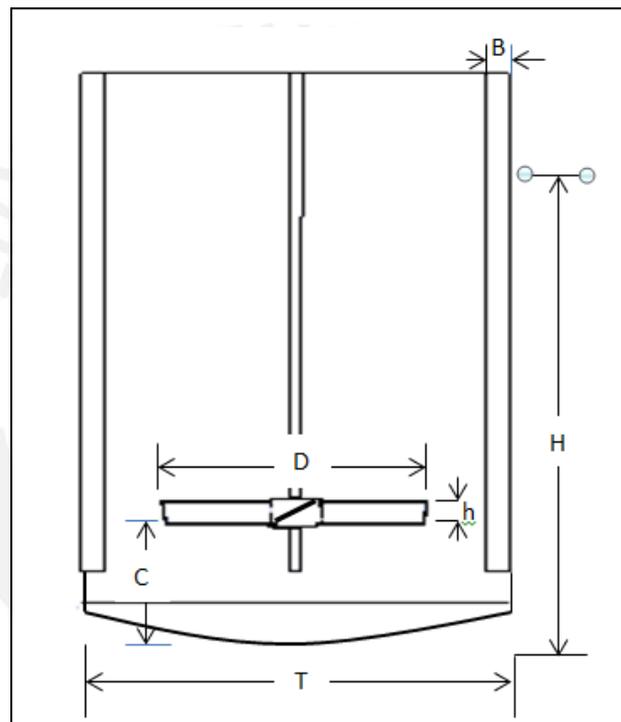


Figura 3.1. Esquema estándar del equipo

Tabla 3.1. Parámetros geométricos del tanque.

Parámetros Geométricos	Símbolo	Dimensión (mm)
Diámetro del tanque	T	354
Profundidad del líquido	H	550
Diámetro del impulsor	D	235
Altura de la pala	H	27
Anchura del baffle	B	22
Altura del agitador	C	200

3.3. Estructura de la Simulación

3.3.1. Propiedades del Fluido

Debido a que el presente problema es bifásico, se encuentra involucrados dos fluidos. El primer fluido representa al ambiente, el cual se define como **aire**. El segundo fluido es el que va a ser agitado, el cual por simplicidad es **agua**. También se involucran otros fluidos como la **glicerina** para poder construir la curva de potencia (N_p vs Re). Todos estos fluidos se presentan en condiciones estándar. Las propiedades de los fluidos son importantes pues permitirán determinar el número de Reynolds. Las tablas 3.1, 3.2 y 3.3 muestran las propiedades de los fluidos.

Tabla 3.2. Propiedades del aire

FLUIDO: AIRE	
Grupo de Material	Sustancia pura
Estado termodinámico	Gaseoso
PROPIEDADES	
Densidad	1.185 [kg m ⁻³]
Masa Molar	28.96 [kg kmol ⁻¹]
Viscosidad Dinámica	1.831E-05 [kg m ⁻¹ s ⁻¹]
ESTADO DE REFERENCIA	
Presión de referencia	1 [atm]
Referencia de Temperatura	25 [C]

Tabla 3.3. Propiedades del agua.

FLUIDO: AGUA	
Grupo de Material	Sustancia pura
Estado termodinámico	Líquido
PROPIEDADES	
Densidad	997.0 [kg m ⁻³]
Masa Molar	18.02 [kg kmol ⁻¹]
Viscosidad Dinámica	8.899E-4 [kg m ⁻¹ s ⁻¹]
ESTADO DE REFERENCIA	
Presión de referencia	1 [atm]
Referencia de Temperatura	25 [C]

Tabla 3.4. Propiedades de la glicerina.

FLUIDO: GLICERINA	
Grupo de Material	Sustancia pura
Estado termodinámico	Líquido
PROPIEDADES	
Densidad	1258.02 [kg m ⁻³]
Masa Molar	96 [kg kmol ⁻¹]
Viscosidad Dinámica	1.5 [kg m ⁻¹ s ⁻¹]
ESTADO DE REFERENCIA	
Presión de referencia	1 [atm]
Referencia de Temperatura	25 [C]

3.3.2. Definición del Modelo de Turbulencia

La elección del modelo de turbulencia en un estudio fluido dinámico es muy importante, pues una correcta decisión permitirá predecir resultados más reales y precisos.

Como no se tiene un modelo de turbulencia específico para cada tipo de problema. Se optará por modelar el problema con los tres modelos de turbulencia mejor reconocidos por estudios anteriores y por ANSYS CFX v. 14.0; estos son los modelos de turbulencia **k-ε**, **k-ω** y **SST**.

La selección del mejor modelo de turbulencia que describa resultados más precisos se realizará mediante la construcción de la curva de Potencia (**Re vs Np**) y su comparación con la curva experimental realizada por la empresa **Chemineer** para impulsores PTB.

3.3.3. Diseño CAD de Geometrías e Interacción con ANSYS CFX v. 14.0.

La creación del volumen de control del fluido se puede realizar en cualquier software CAD, por ejemplo, Solid Works, Autodesk Inventor, Solid Edge, AutoCAD 3D, SpaceClaim, etc. En este proyecto, para evitar desperfectos en la generación de la geometría, se realizó el modelamiento del todo el dominio del tanque agitador con el software de modelamiento **Desing Modeler (DM)**, generador CAD de ANSYS, el cual marca la diferencia por su precisión, herramientas de reparación y preparación para simulaciones por elementos finitos. En el dominio general del tanque se generarán dos sub dominios. El primero, es el volumen que encierra el impulsor (figura 3.3). El segundo, es el volumen que ocupa el resto del tanque (figura 3.4).

Para modelar el dominio del impulsor se necesita de la geometría del impulsor (figura 3.2) para posteriormente a través de la creación de una región de envolvente cilíndrica y la “substracción” del volumen negativo de la geometría del impulsor se obtenga el dominio del impulsor.

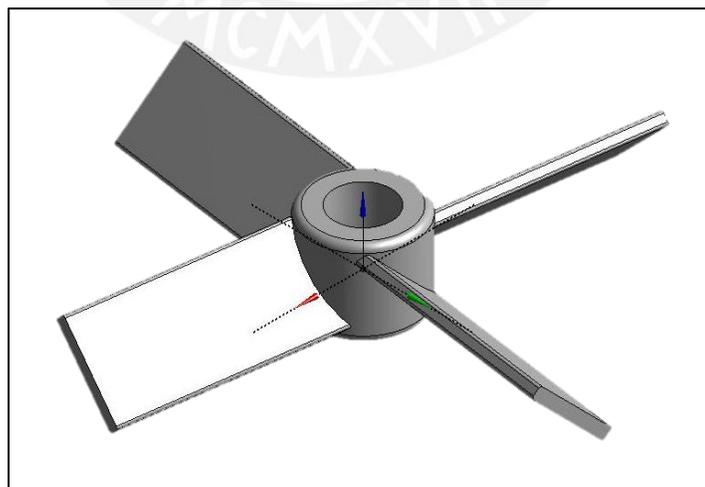


Figura 3.2. Geometría del impulsor del tanque agitador

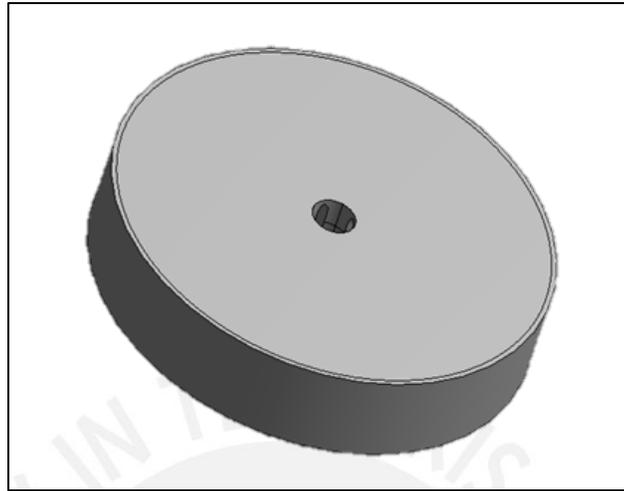


Figura 3.3. Volumen de control que encierra el impulsor o dominio del impulsor.

Una vez obtenido el dominio del impulsor, sobre este se debe generar el volumen negativo del tanque (figura 3.4), esto se hace para que el dominio del impulsor y del tanque presente el mismo origen de coordenadas.

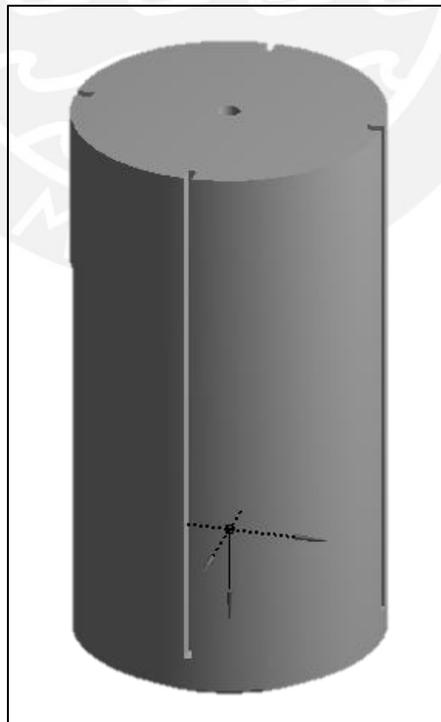


Figura 3.4. Volumen de control del fluido en el tanque agitador

Finalmente, se obtiene el modelo CAD final del volumen negativo del agitador. Este volumen está compuesto por el dominio del impulsor y tanque, en la siguiente figura 3.5 se muestra los sub dominios creados (impulsor y tanque) y el dominio total del tanque agitador.

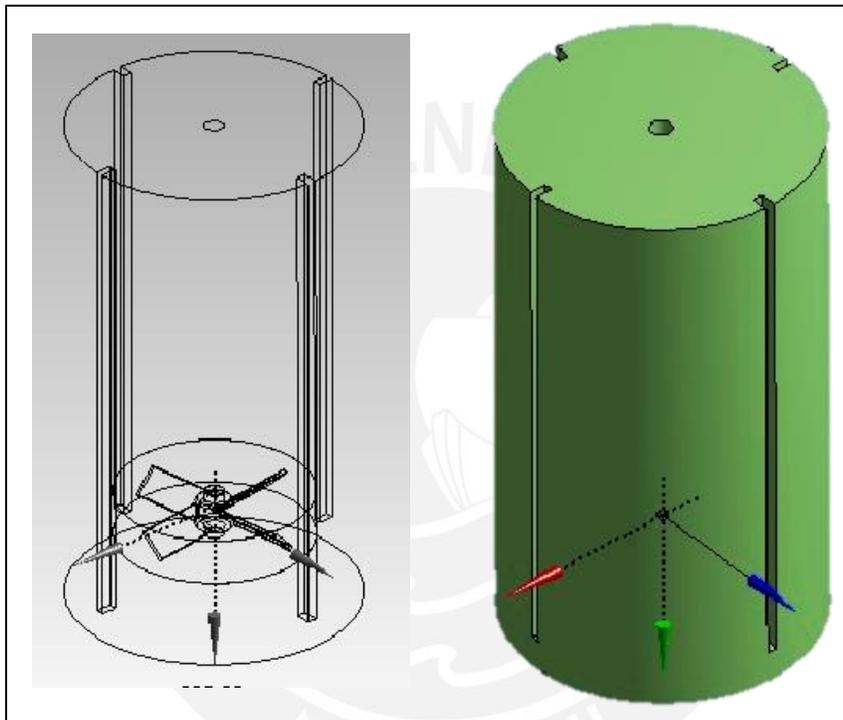


Figura 3.5. Dominio total del tanque agitador.

3.3.4. Generación del Mallado

En esta etapa del pre-procesamiento, se realizó la generación del mallado del agitador. A fin de optimizar el número de elementos en todo el universo del agitador, la generación del mallado del impulsor y tanque se realizaron por separado; debido a que el dominio del impulsor requiere una malla más densa que el dominio del tanque para realizar un mejor estudio en las zonas cercanas a los alabes.

En el mallado del dominio del impulsor se obtuvo una calidad de malla promedio del 83%, Relación de Aspecto máximo de 3.4, oblicuidad y una ortogonalidad máxima de 0.79. Esto según bibliografía de ANSYS 14.0 dice que la generación de la malla es buena y podemos proseguir con el mallado del tanque. A continuación se muestra la imagen de la superficie mallada del dominio del impulsor.



Figura 3.6. Superficie mallada del dominio del impulsor.

En la siguiente figura 3.7 se puede apreciar un mallado por capas en las superficies de los álabes. Este tipo de malla nos permite poder obtener una mejor precisión del campo de velocidades en esta región.

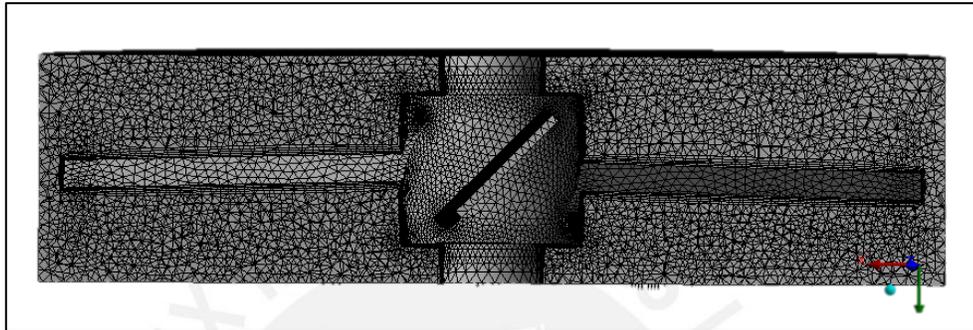


Figura 3.7. Mallado por capas en las superficies de los álabes del dominio del impulsor.

La creación de la malla del dominio del tanque se realizó de la misma manera que la del dominio del impulsor, con algunas diferencias, como un mayor tamaño y cantidad de elementos en el tanque.

Para este caso se obtuvo una calidad de malla promedio del 80%, Relación de Aspecto promedio de 2.1, oblicuidad promedio del 32% y una ortogonalidad promedio de 0.85. Esto según bibliografía proporcionada por ANSYS 14.0 son indicadores que dicen que la generación de la malla es muy buena.

A continuación la figura 3.8 muestra el mallado del dominio del tanque agitador.

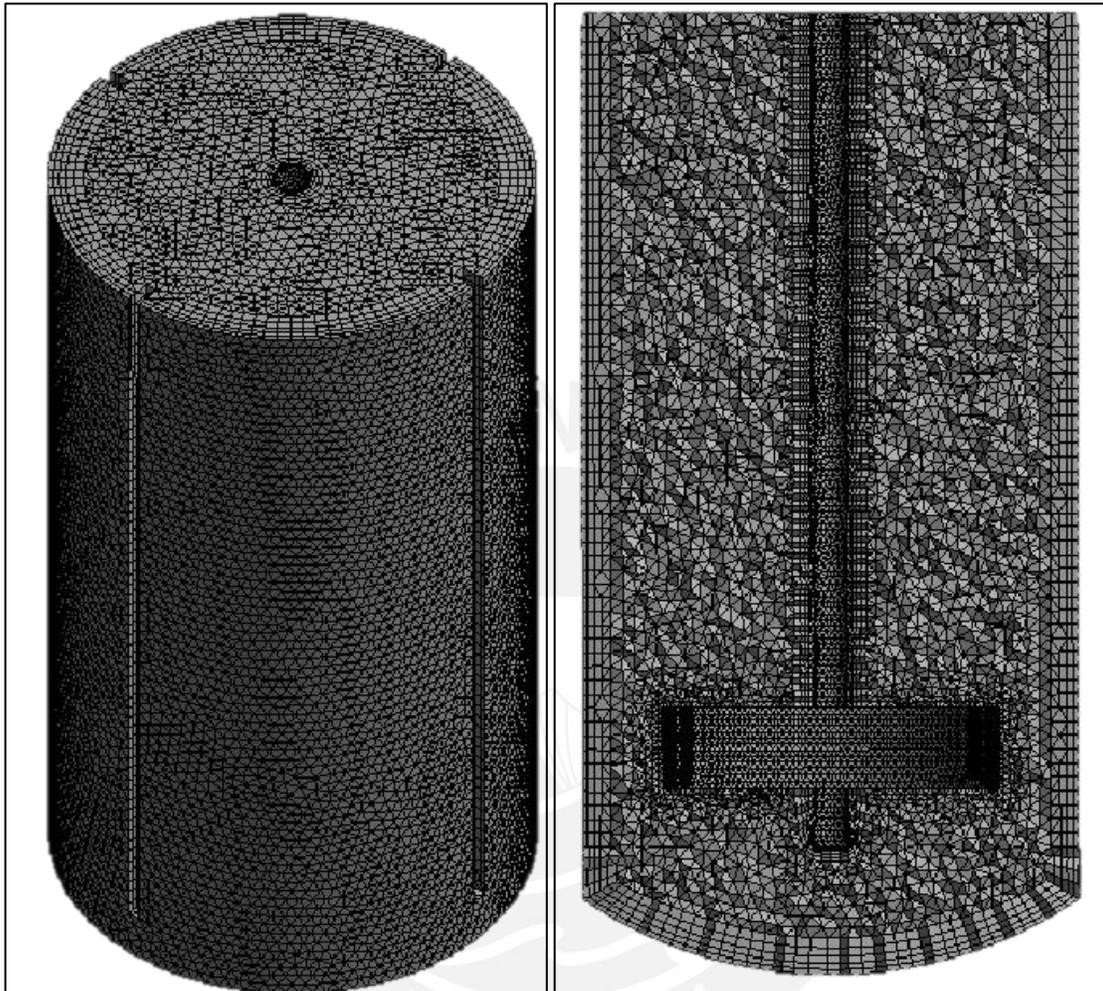


Figura 3.8. Mallado del dominio del tanque agitador

Al final se obtuvo un mallado en todo el dominio utilizando elementos **hexaédricos**, **tetraédricos** y **piramidales** en un total de **742862 elementos**. Además las estadísticas del mallado muestran que para ambos dominios y el dominio global los índices de *relación de aspecto promedio*, *oblicuidad promedio* y *ortogonalidad promedio* son buenos (ok) como lo muestra la figura de la tabla de estadísticas de mallado siguiente.

Mesh Statistics									
Domain Name	Orthog. Angle			Exp. Factor			Aspect Ratio		
	Minimum [deg]			Maximum			Maximum		
impeller	4.6	!	!	1941	!	!	96	OK	
tanque	41.0	ok	!	22	!	!	8	OK	
Global	4.6	!	!	1941	!	!	96	OK	
	%!	%ok	%OK	%!	%ok	%OK	%!	%ok	%OK
impeller	3	2	95	1	7	92	0	0	100
tanque	0	<1	100	<1	1	99	0	0	100
Global	<1	<1	100	<1	2	98	0	0	100

Figura 3.9. Estadísticas del mallado en el tanque agitador.

3.3.5. Ajuste de Parámetros de Control de Simulación.

Los parámetros de control de la simulación son los que determinan el **tipo de modelamiento, el alcance que tendrá la simulación y el grado de precisión del cálculo.** Los detalles de la configuración de estos parámetros de control en ANSYS CFX v. 14.0 se muestran en el procedimiento específico- Anexos.

3.3.6. Resumen de Parámetros que Definen la Simulación.

La tabla 3.5 enumera los principales parámetros que caracterizan la simulación computacional del tanque agitador vertical de impulsor PTB con superficie libre mediante el software Ansys CFX versión 14.0.

Tabla 3.5. Resumen de los parámetros que definen la simulación.

CARACTERÍSTICA	DESCRIPCIÓN
Tipo de Fluido	Agua: Incompresible, Continuo, Newtoniano
	Aire: Compresible, Continuo, Newtoniano
Tipo de Flujo	Turbulento
Tipo de Régimen	Estacionario
Modelo Multifásico	Homogéneo
Fuerza Gravitacional	Si
Tipo de Modelamiento de Turbulencia	k-ε, k-ω, SST
Velocidad (N)	22,54,71,215,540,711,2800 RPM
Proceso de Transferencia de Calor	Isotérmico (25°C)

Presión de Referencia	1 atm
Coefficiente de Tensión Superficial	0.072 N m ⁻¹
Condición de Paredes	Sin deslizamiento (Rugosidad 0.15mm)
Método de Resolución de Ecuaciones	Método de Volúmenes Finitos
Escala del Tiempo físico	1.5 s
Número de Elementos	742862
Método de Conexión de Malla	GGI
Tipo de Elementos	Hexaédricos, Piramidales y Tetraédricos



CAPITULO 4

DESARROLLO DE LA MÉTODOLÓGÍA Y VALIDACIÓN

Luego de haber realizado el desarrollo de la hipótesis del problema y la estructura de la simulación en el tercer capítulo; en el presente capítulo se desarrollará el procedimiento específico de la simulación y su respectiva validación. El procedimiento se desarrollará mediante una tabla descriptiva con los principales pasos involucrados en el desarrollo de la simulación; la validación se realizará en base a la comparación de la curva de potencia (Re vs Np) generada con la simulación y la curva de potencia experimental para impulsores PTB de cuatro álabes generada por la empresa CHEMINEER.

4.1. Desarrollo del Procedimiento

El desarrollo del procedimiento se realiza a través de una tabla descriptiva, en la cual se detalla la acción y/o explicación/descripción de cada paso del procedimiento realizado. Además la siguiente tabla muestra una clasificación de pasos por colores para diferenciar las principales etapas de la simulación (Modelamiento del volumen de control, Generación del mallado, Establecimiento de los parámetros de control de la simulación, Resolución de la simulación y Visualización de resultados). A continuación se muestra la tabla 4.1 donde se muestra el procedimiento específico de la simulación.

Tabla 4.1 Procedimiento específico de la simulación.

Paso	Acción	Descripción/Explicación
1	Iniciar Ansys WorkBench 14.0	Se inicia un nuevo proyecto
2	Modelar geometría del tipo de impulsor	Se realiza a través del CAD Desing Modeler (DM)
3	Generar el dominio del impulsor	<ul style="list-style-type: none"> - Se utiliza la herramienta “Enclosure” - Se genera un cilindro envolvente: <ul style="list-style-type: none"> -FD1, Cusion Radius 5mm -FD2, Cusion + 10mm -FD3, Cusion – 10mm

4	Generar el dominio del tanque	Se utilizan la herramientas: <ul style="list-style-type: none"> - Freeze, - Enclosure - Revolve
5	Generar mallado del dominio del impulsor	Se realiza a través del Ansys Mesh
6	Suprimir geometría del tanque	<ul style="list-style-type: none"> - Esto se realiza para mallar solo en dominio del impulsor - Utilizar Suppress Body
7	Establecer “Named Selections” en el dominio del impulsor	Nombrar las siguientes superficies: <ul style="list-style-type: none"> - Impulsor (superficie de los álabes) - Top_impulsor (superficie superior del dominio) - Botton_impulsor (superficie inferior del dominio) - Lat_impulsor (superficie lateral del dominio)
8	Establecer tamaño de los elementos en las superficies de interés	<ul style="list-style-type: none"> - Utilizar “Face Sizing” - Se fija el tamaño de los elementos en las superficies de interés = 3.5mm - Se realiza sólo en las siguientes superficies: <ul style="list-style-type: none"> -Top_impulsor -Botton_impulsor -Lat_impulsor
9	Establecer parámetros de mallado general para el dominio del impulsor	Se establece: <ul style="list-style-type: none"> - Física de Preferencia: CFD - Solucionador de Preferencia: CFX - Relevancia = 0 - Función de tamaño: Curvature - Relevancia de centro de mallado: Fina - Transición: Lenta - Angulo de curvatura normal = 10° - Tamaños mínimo de elemento 1mm - Máximo tamaño de cara de elemento 10mm - Máximo tamaño de elemento 20mm - Activar la opción Capa Limite - Máximo número de capas = 5 - Relación de crecimiento = 1.2
10	Generar mallado del dominio del Tanque	Se realiza a través de Ansys Mesh
11	Suprimir geometría del dominio del impulsor	<ul style="list-style-type: none"> - Se realiza para mallar solo en dominio del Tanque - Utilizar “Suppress Body”

12	Establecer “Named Selections” en el dominio del tanque	<p>Nombrar las siguientes Superficies:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Inf_Tanque (superficie inferior de la cavidad del tanque) - Cil_tanque (superficie lateral de la cavidad del tanque) - Sup_tanque (superficie superior de la cavidad del tanque) - Deflectores (superficie de los cuatro deflectores) - Eje (superficie cilíndrica del eje vertical) - Superficie (superficie que limita con la atmosfera)
13	Establecer Tamaño de elementos en las superficies de interés	<ul style="list-style-type: none"> - Utilizar “Face Sizing” - Se fija el tamaño de los elementos en las superficies de interés = 3.5mm - Se realiza sólo en las siguientes superficies: <ul style="list-style-type: none"> -Inf_Tanque -Cil_Tanque -Sup_Tanque
14	Establecer parámetros de mallado general para el dominio del tanque	<p>Se establece:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Física de Preferencia: CFD - Solucionador de Preferencia: CFX - Relevancia = 0 - Función de tamaño: Curvature - Relevancia de centro de mallado: Fina - Transición: Lenta - Angulo de curvatura normal = 10° - Tamaños mínimo de elemento 1mm - Máximo tamaño de cara de elemento 10mm - Máximo tamaño de elemento 20mm - Activar la opción Capa Limite solo para la superficie “Eje” - Máximo número de capas = 5 - Relación de crecimiento = 1.2
15	Establecer parámetros de control de simulación	ANSYS CFX 14.0 – Setup
16	Establecer en la pestaña “Basic Settings”	<ul style="list-style-type: none"> - Definir Fluidos: “Agua” y “Aire” - Tipo de fluidos: Fluido continuo - Presión de Referencia= 1 atm - Activar la opción Bouyant - Densidad de referencia= 1,185kg/m³ - Velocidad de rotación sólo para el dominio del impulsor= 100rpm

17	Establecer en la pestaña "Fluid Models"	<ul style="list-style-type: none"> - Establecer como Modelo Multifásico: Modelo Homogéneo - Modelo de Superficie libre: Estándar - Modelo de Turbulencia: k-épsilon
18	Establecer en la pestaña "Fluid Pair Models"	<ul style="list-style-type: none"> - Establecer coeficiente de tensión superficial= 0.072 N/m - Modelo de tensión superficial= Fuerza superficial continua. - Establecer fluido primario= "Agua" - Modelo de transferencia de interface: Superficie libre
19	Establecer Condiciones de Borde	
20	Condición de borde "Opening_ Tanque"	<ul style="list-style-type: none"> - Tipo de Condición de Borde: Opening - Localizar la superficie: "superficie_ Tanque" - Presión relativa a la superficie= 0 bar - Fracción de volumen = 1
21	Condición de Borde "Deflectores_ Tanque"	<ul style="list-style-type: none"> - Tipo de condición de borde : Wall - Localizar la superficie: "deflectores"
22	Condición de Borde "Eje_ Tanque"	<ul style="list-style-type: none"> - Tipo de condición de borde: Wall - Localizar la superficie: "Eje" - Velocidad de rotación de la pared = 100rpm.
23	Condición de Borde "Álabes_ Impulsor"	<ul style="list-style-type: none"> - Tipo de condición de borde: Wall - Localizar la superficie: "Impulsor"
24	Establecer Interfaces	Se establece conexión de los dominios" Impulsor-Tanque" en la superficie lateral, superior e inferior.
25	Interface "Superior"	<ul style="list-style-type: none"> - Se fija el tipo de interface como: Fluid Fluid - Se ubican las superficies: " superior_impulsor" y "superior_tanque" - Establecer "General Connection" - Establecer como cambio de marco: Frozen Rotor
26	Interface "Lateral"	<ul style="list-style-type: none"> - Se fija el tipo de interface como: Fluid Fluid - Se ubican las superficies: " Lateral_impulsor" y "Lateral_tanque" - Establecer "General Connection" - Establecer como cambio de marco: Frozen Rotor

27	Interface "Inferior"	<ul style="list-style-type: none"> - Se fija el tipo de interface como: Fluid Fluid - Se ubican las superficies: "Inferior_impulsor" y "Inferior_tanque" - Establecer "General Connection" - Establecer como cambio de marco: Frozen Rotor
28	Crear Expresión Matemática	<p>Para definir el volumen inicial del fluido en el tanque agitador:</p> <ul style="list-style-type: none"> - $\text{if}(y > 0.35[\text{m}], 1, 0) * \text{If}(y < 0.169[\text{m}], 1, 0) * \text{if}(x < 0.179[\text{m}], 1, 0) * \text{if}(z < 0.179[\text{m}], 1, 0)$
29	Establecer parámetros de control para el solucionador (Solver Control/Basic Settings)	<ul style="list-style-type: none"> - Máximo Numero de iteraciones= 1000 - Establecer como Physical Timescale= 2.5[s] - Residual Target= 10E-5
30	Establecer parámetros de control para el solucionador (Solver Control/Advanced Options)	Establecer Global Dynamic Model Control- Multiphase control- Volumen Fraccion Coupling: Coupled
31	Iniciar Etapa de solución	Se realizar a través de CFX-SOLVE
32	Esperar la convergencia	Detener a las 600 iteraciones aprox.
33	Visualizar Resultados	Iniciar CFX-Post

4.2. Validación del Procedimiento

En el capítulo 2 se explicaron los distintos modelos de turbulencia que posee el software ANSYS CFX versión 14.0 para simular el flujo. El Modelo de turbulencia k- Epsilon, el modelo de turbulencia k-omega y el modelo de turbulencia Shear Stress Transport. El primer modelo (k- ϵ) ha demostrado, para simulaciones de propósito general, ser estable y robusto numéricamente y tener un régimen de capacidad de predicción bien establecido, pero a menudo falla en predecir el inicio y la cantidad de separación de flujo en caso de malas condiciones de gradiente de presión. El segundo modelo (k- ω) a diferencia del primero ha sido diseñado para dar predicciones muy exactas del inicio y la cantidad de separación de flujo bajo gradientes de presión. Además este posee la ventaja de tratamiento de cálculos muy cercanos a la pared y con bajo número de Reynolds en el que es más preciso y robusto. El tercer modelo (SST) posee características tanto del primero como del segundo, pero se recomienda para simulaciones de alta precisión de capa límite. Además se dice que fue desarrollado para superar deficiencias del segundo modelo; sin embargo para flujos de libre cizallamiento, el modelo SST es idéntico al modelo k- ϵ .

Como se ha mencionado cada modelo tiene características particulares que lo hacen adecuado para algunas aplicaciones determinadas, pero no existe uno universalmente como el mejor para toda clase de casos. Además que algunos modelos de turbulencia necesitan mallado especial para su correcto uso y validez. Por todo esto, se hace necesario hacer un estudio previo para demostrar la correcta selección del modelo turbulencia en el flujo del tanque agitador vertical de impulsor PTB.

Procedimiento de la prueba:

Primero, se simularon puntos de muestreo, los suficientes, para generar la curva de potencia en toda su longitud, para esto se generaron números de Reynolds en todo el rango $1 < Re < 10^5$ (desde el régimen laminar al turbulento). La formula y parámetros para determinar el número de Reynolds es la siguiente:

$$Re = \frac{ND^2 \rho}{\mu}$$

N = Velocidad angular (rev/s)

D = Diámetro del impulsor del tanque agitador (m)

ρ = Densidad del fluido

μ = Viscosidad dinámica del fluido

Al utilizar **Agua** como fluido de trabajo y variar la velocidad del impulsor desde **22 a 540 rpm** se obtuvieron números de Reynolds muy elevados (orden 10^5) (tabla 4.2) pertenecientes al régimen transitorio y turbulento.

Tabla 4.2. Calculo del número de Reynolds perteneciente al régimen transitorio - turbulento

Fluido	D (m)	ρ (kg/m ³)	μ (kg/m.s)	N (rev/min)	Re
Agua	0.1	998	$8.91 \cdot 10^{-4}$	22	4133.3
Agua	0.1	998	$8.91 \cdot 10^{-4}$	54	10145.4
Agua	0.1	998	$8.91 \cdot 10^{-4}$	540	101454.2

Si se hubiese querido seguir trabajar con Agua para obtener números de Reynolds dentro del régimen laminar se tendría que disminuir la velocidad del impulsor a velocidades casi nulas; por ello se decidió empezar a trabajar con Glicerina, pues sus propiedades físicas (densidad y viscosidad) permiten obtener números de Reynolds dentro del régimen laminar a velocidades de trabajo normales como lo muestra la tabla 4.3.

Tabla 4.3. Calculo del número de Reynolds perteneciente al régimen laminar.

Fluido	D (m)	ρ	μ	N	Re
		(kg/m ³)	(kg/m.s)	(rev/min)	
Glicerina	0.1	1258	1.5	71	10.0
Glicerina	0.1	1258	1.5	215	30.2
Glicerina	0.1	1258	1.5	711	100.0
Glicerina	0.1	1258	1.5	2800	393.8

Segundo, una vez encontrado suficiente puntos, en base al número de Reynolds, para describir toda la curva de potencia en toda su longitud desde el régimen laminar hasta el régimen turbulento, se simularon estos puntos basados en la velocidad del impulsor (variación del número de Reynolds), el tipo de fluido (agua y glicerina) y se utilizaron tres modelos de turbulencia: **El modelo k- ϵ , el modelo k- ω y el modelo SST.**

A través del simulador se obtuvo valores de torque (figura 4.1), los cuales sirvieron para obtener el número de potencia (N_p).

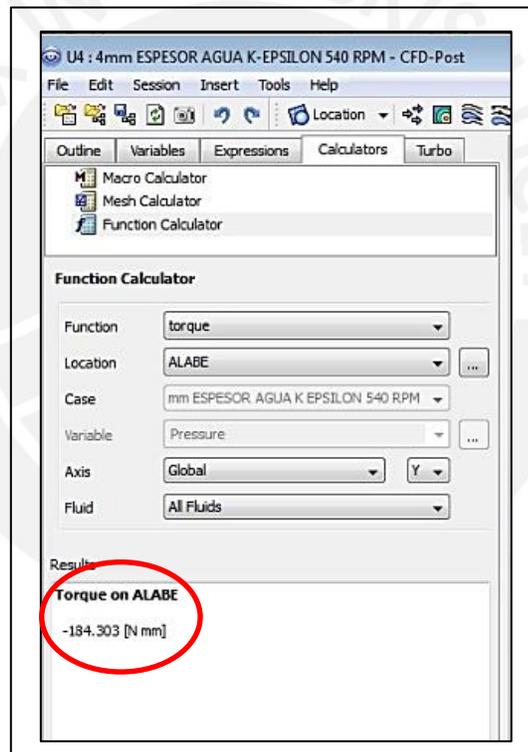


Figura 4.1. Cálculo del torque del impulsor a través del simulador

Las siguientes tablas muestran los valores velocidad, número de Reynolds, torque y número de Potencia para cada tipo de modelo de turbulencia

Tabla 4.4. Calculo del número de potencia para el modelo de turbulencia k-Epsilon

Modelo de Turbulencia	Fluido	Velocidad (RPM)	Re	Torque (N.m)	$N_p = \frac{T\omega}{\rho N^3 D^5}$
Laminar	Glicerina	71	10	0.0442	5.80
Laminar	Glicerina	215	30	0.1343	2.94
Laminar	Glicerina	711	100	0.65	1.88
k-Épsilon	Glicerina	2800	400	7.2	1.63
k-Épsilon	Agua	22	4100	0.000301	1.38
k-Épsilon	Agua	54	10100	0.0019469	1.49
k-Épsilon	Agua	540	101000	0.184507	1.41

Tabla 4.5. Calculo del número de potencia para el modelo de turbulencia k-Omega

Modelo de Turbulencia	Fluido	Velocidad (RPM)	Re	Torque (N.m)	$N_p = \frac{T\omega}{\rho N^3 D^5}$
Laminar	Glicerina	71	10	0.0442	5.80
Laminar	Glicerina	215	30	0.1343	2.94
Laminar	Glicerina	711	100	0.65	1.88
k-omega	Glicerina	2800	400	6.28	1.42
k-omega	Agua	22	4100	0.000342	1.58
k-omega	Agua	54	10100	0.0017456	1.34
k-omega	Agua	540	101000	0.18132	1.39

Tabla 4.6. Calculo del número de potencia para el modelo de turbulencia SST

Modelo de Turbulencia	Fluido	Velocidad (RPM)	Re	Torque (N.m)	$N_p = \frac{T\omega}{\rho N^3 D^5}$
Laminar	Glicerina	71	10	0.0442	5.80
Laminar	Glicerina	215	30	0.1343	2.94
Laminar	Glicerina	711	100	0.65	1.88
SST	Glicerina	2800	400	6.343	1.43
SST	Agua	22	4100	0.00030415	1.40
SST	Agua	54	10100	0.192632	1.47
SST	Agua	540	101000	0.184335	1.41

Tercero, una vez encontrados los valores de la curva de potencia (**Re vs Np**) para cada uno de los tres modelos de turbulencia se realizó la comparación de cada uno de los valores del número de potencia con los valores reales mostrados por la curva de potencia experimental generada por la empresa **Chemineer** para impulsores **de álabes inclinados** (figura 4.2) y se determino el error relativo como se muestra en las siguientes tablas:

Tabla 4.7. Resultados para el modelo de turbulencia k-Épsilon.

Modelo	Fluido	Re	Np	% Error
Laminar	Glicerina	10	5.80	1.6%
Laminar	Glicerina	30	2.94	13%
Laminar	Glicerina	100	1.88	14%
k-Épsilon	Glicerina	400	1.63	8.6%
k-Épsilon	Agua	4100	1.38	2.9%
k-Épsilon	Agua	10100	1.49	11.2%
k-Épsilon	Agua	101000	1.41	5.2%

Tabla 4.8. Resultados para el modelo de turbulencia k-omega

Modelo	Fluido	Re	Np	% Error
Laminar	Glicerina	10	5.80	1.6%
Laminar	Glicerina	30	2.94	13%
Laminar	Glicerina	100	1.88	14%
k-omega	Glicerina	400	1.42	5.3%
k-omega	Agua	4100	1.58	11.2%
k-omega	Agua	10100	1.34	23.9%
k-omega	Agua	101000	1.38	28.1%

Tabla 4.9. Resultados para el modelo de turbulencia SST

Modelo	Fluido	Re	Np	% Error
Laminar	Glicerina	10	5.80	1.6%
Laminar	Glicerina	30	2.94	13%
Laminar	Glicerina	100	1.88	14%
SST	Glicerina	400	1.43	4.6%
SST	Agua	4100	1.42	5.9%
SST	Agua	10100	1.45	8.2%
SST	Agua	101000	1.41	5.2%

En la figura 4.3 se muestra la comparación entre las tres curvas de potencia generadas y la curva de potencia experimental, debido a que la gráfica no muestra claramente cual es la mejor curva se utilizan los resultados de las tablas 4.7, 4.8 y 4.9 donde se muestra que el modelo de turbulencia *k-Omega* es el que presenta mayor error de los tres. El modelo *k-Épsilon* presenta un menor error que el *k-Omega*; sin embargo, el **modelo de turbulencia SST** arrojo resultados muy buenos comparados con la curva de potencia para impulsores de alabes inclinados Chemineer (figura 4.2); **es por ello, que seleccionamos al modelo de turbulencia SST como el más adecuado para este estudio.**

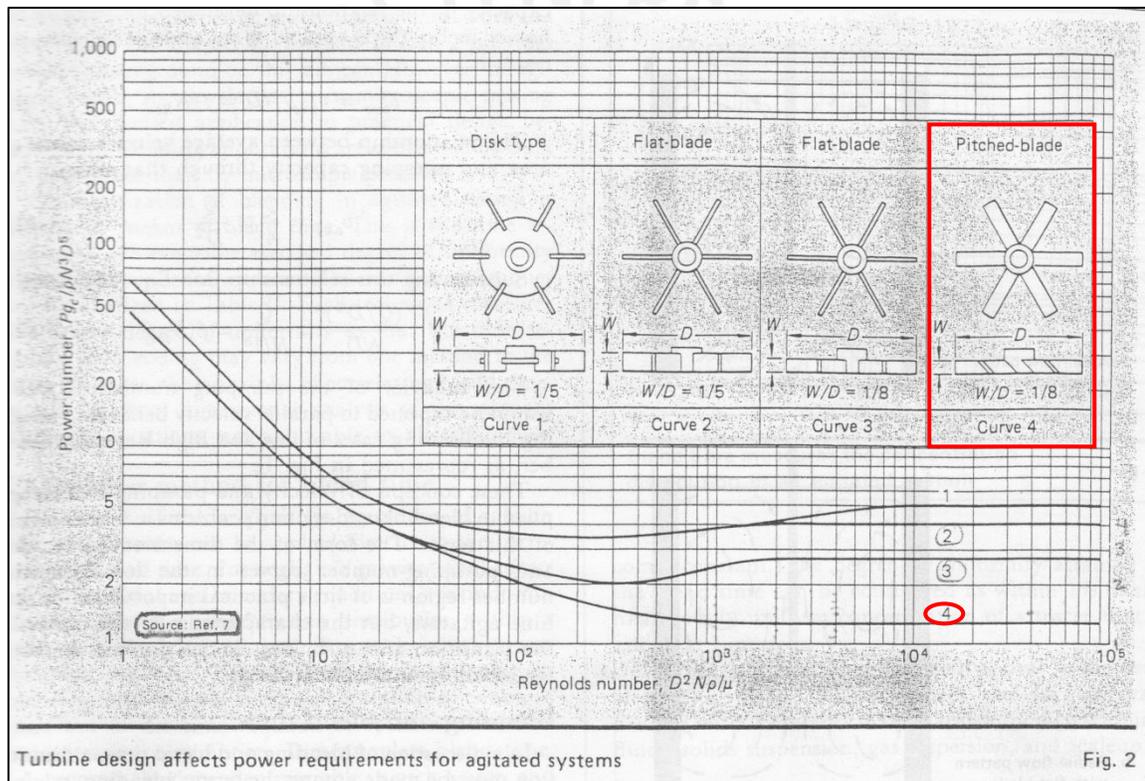


Figura 4.2. Curva de potencia para impulsores inclinados Chemineer¹³

Considerando los resultados anteriores, al comparar la curva de potencia experimental con los resultados obtenidos con modelo de turbulencia SST para impulsores inclinados (tabla

¹³CHEMINEER (1985) "Liquid Agitation". CHEMICAL ENGINEERING. New York. pp 10-11.

4.9 y figura 4.4), *se encontró un error menor al 8% en todos los puntos de simulación.* Esto nos indica que el *procedimiento* (pre procesamiento, procesamiento y post procesamiento) y el *modelo de turbulencia SST* son válidos para simular el comportamiento de un flujo para la condiciones establecidas.



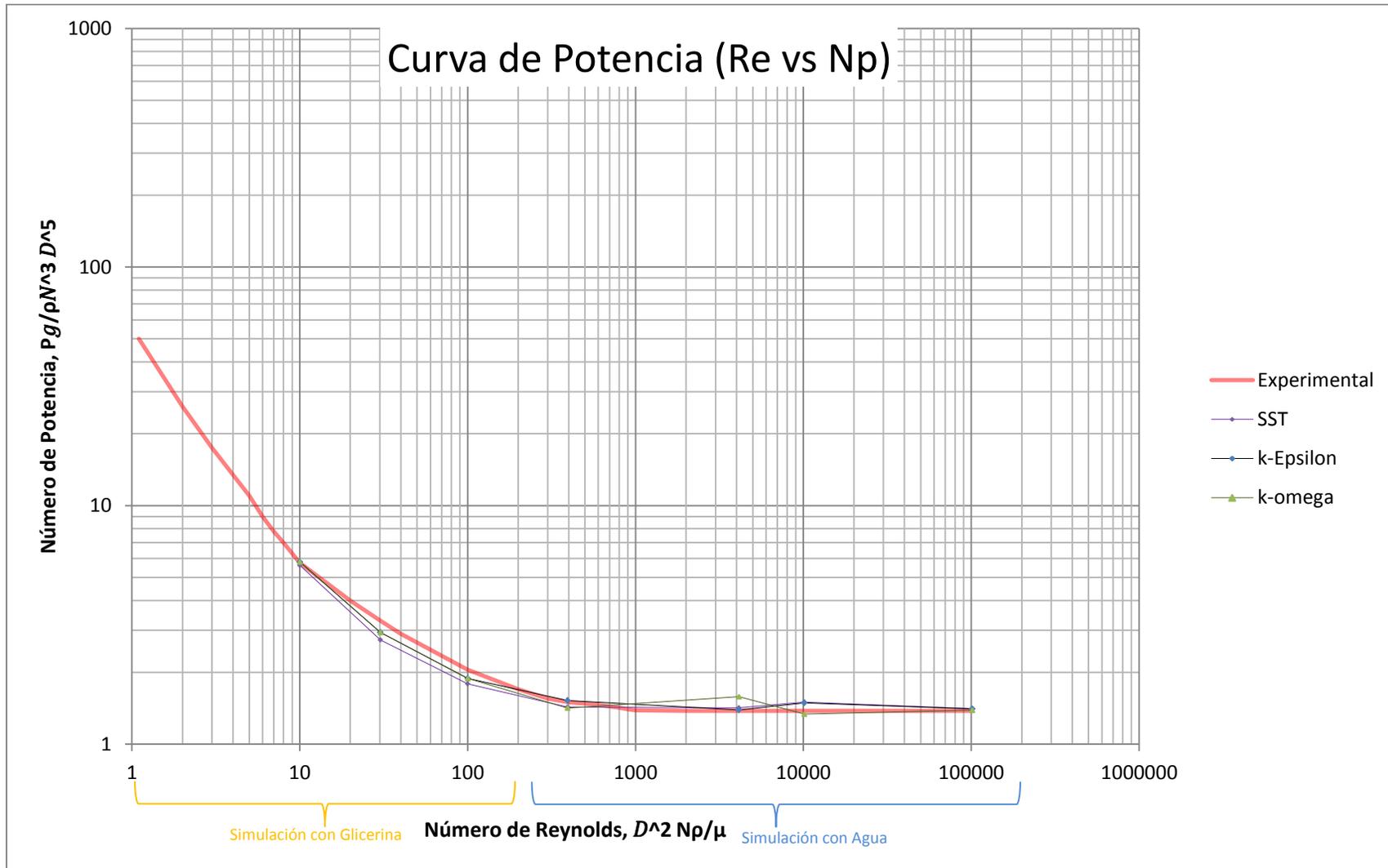


Figura 4.3. Comparación de las curvas de potencia de los tres modelos de turbulencia con la curva experimental para impulsores inclinados Chemineer.

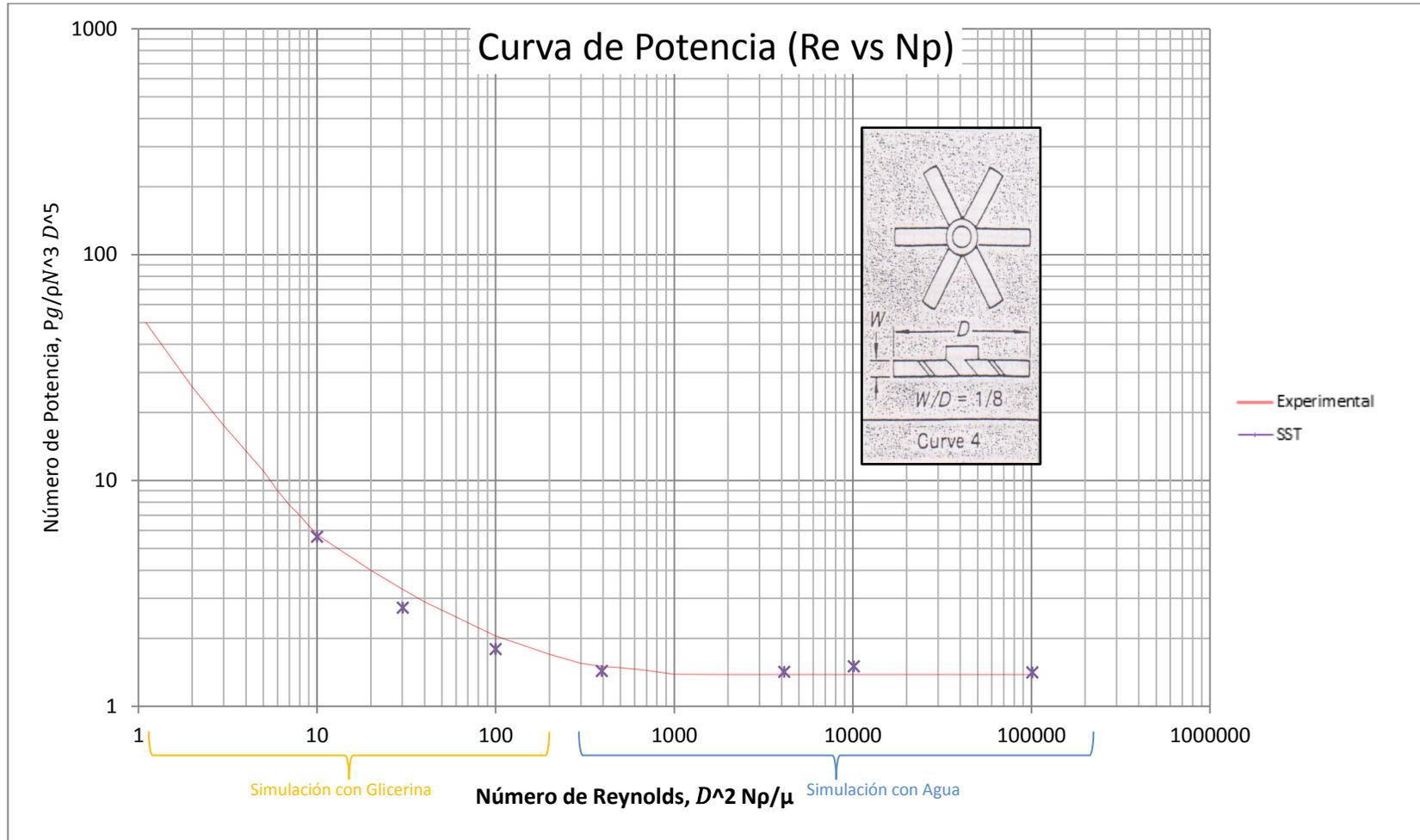


Figura 4.4. Comparación del modelo de turbulencia SST con la curva experimental para impulsores inclinados Chemineer.

CAPITULO 5

ANÁLISIS DEL FLUJO

En el capítulo 3 se presentó el procedimiento para la simulación del comportamiento del flujo en un tanque agitador vertical de impulsor PTB con superficie libre mediante ANSYS CFX v.14.0; posteriormente, en el capítulo 4 se realizó la selección del modelo de turbulencia y validación del procedimiento establecido. En el siguiente capítulo se muestran los resultados en relación a las principales características del comportamiento del flujo en el tanque agitador.

5.1. Muestra del Patrón de Flujo

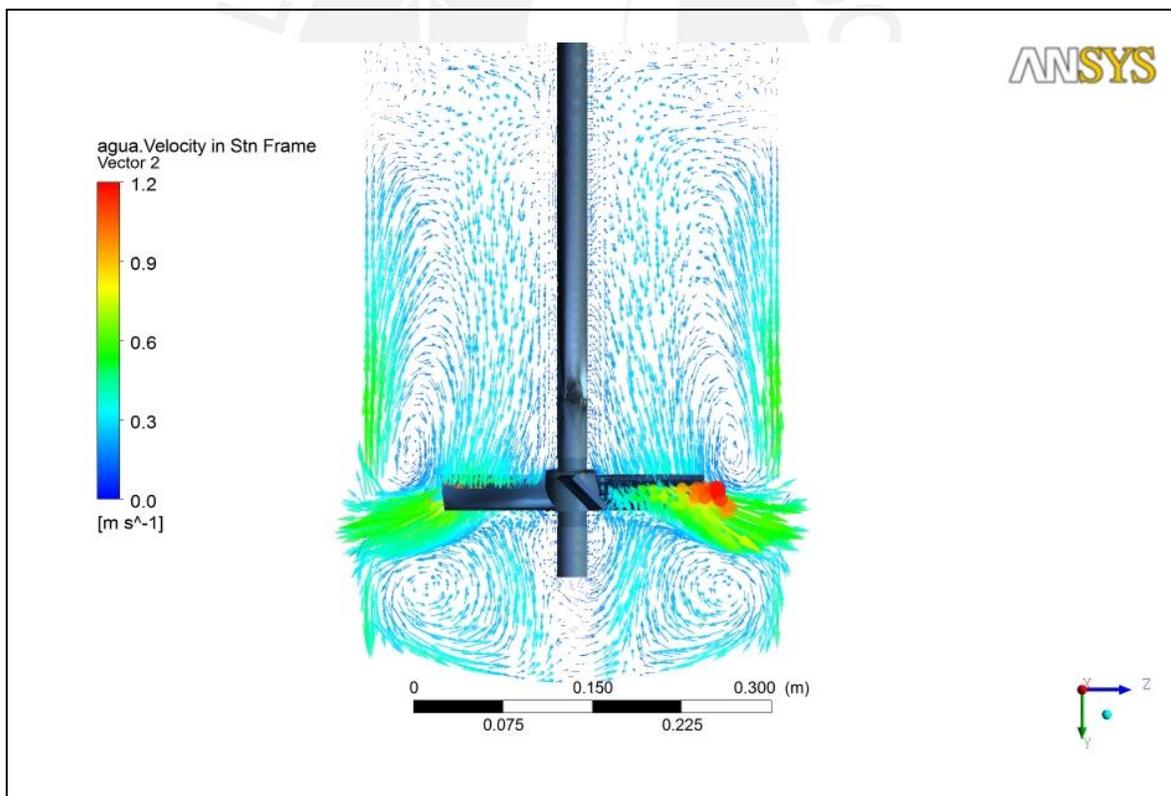


Figura 5.1. Vectores de velocidad en el plano de corte ZY.

La figura 5.1 muestra el campo de vectores de velocidad en el plano de corte ZY, en él se observa como el flujo es expulsado radialmente desde el impulsor hacia las paredes del tanque, luego una parte del flujo se direcciona axialmente hacia la parte superior y la otra, hacia el inferior del tanque. Ambos flujos retornan hacia el centro del impulsor para que nuevamente sean expulsados.

Lo descrito líneas arriba nos ayuda a comprender el **patrón de flujo**; el cual describe el comportamiento del flujo.

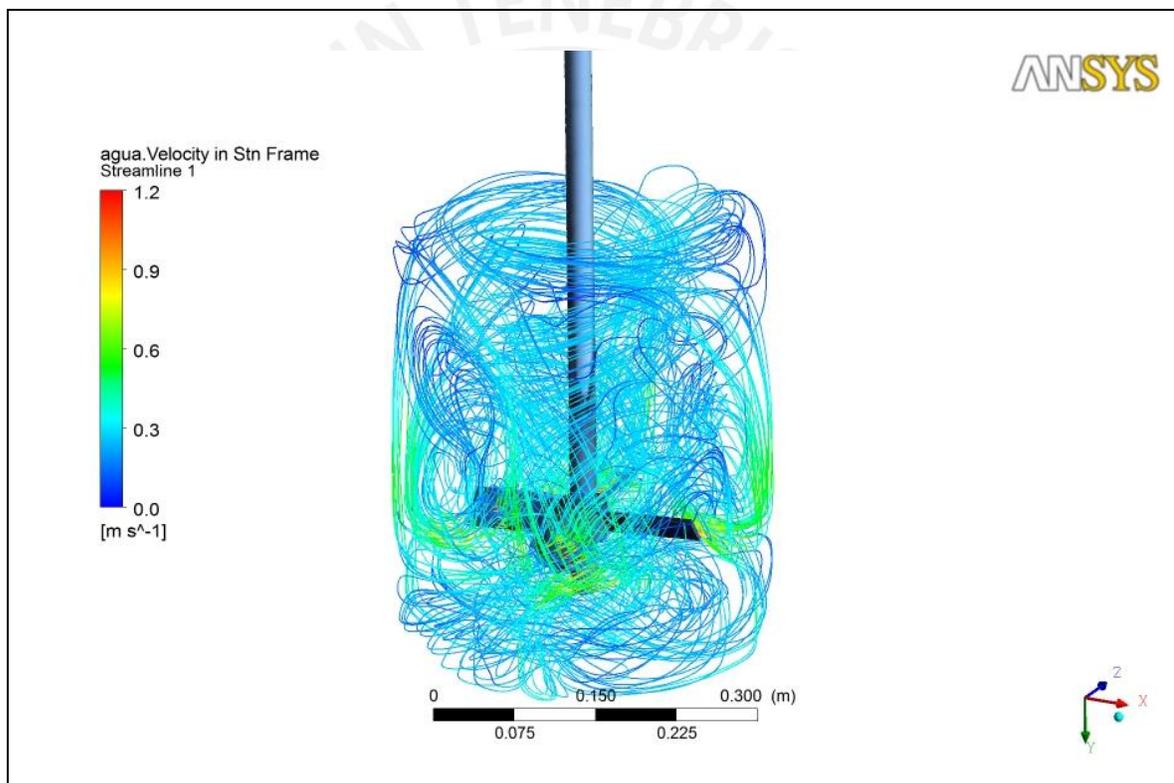


Figura 5.2. Líneas de corriente de velocidad en todo el dominio del tanque agitador.

La figura 5.2 muestra las **líneas de corriente de velocidad** en todo el dominio del tanque, en él se observa como el flujo parte desde el impulsor hacia la parte superior e inferior del tanque. Además se puede observar la formación de remolino en la parte superior del tanque.

5.2. Muestra del campo de velocidades

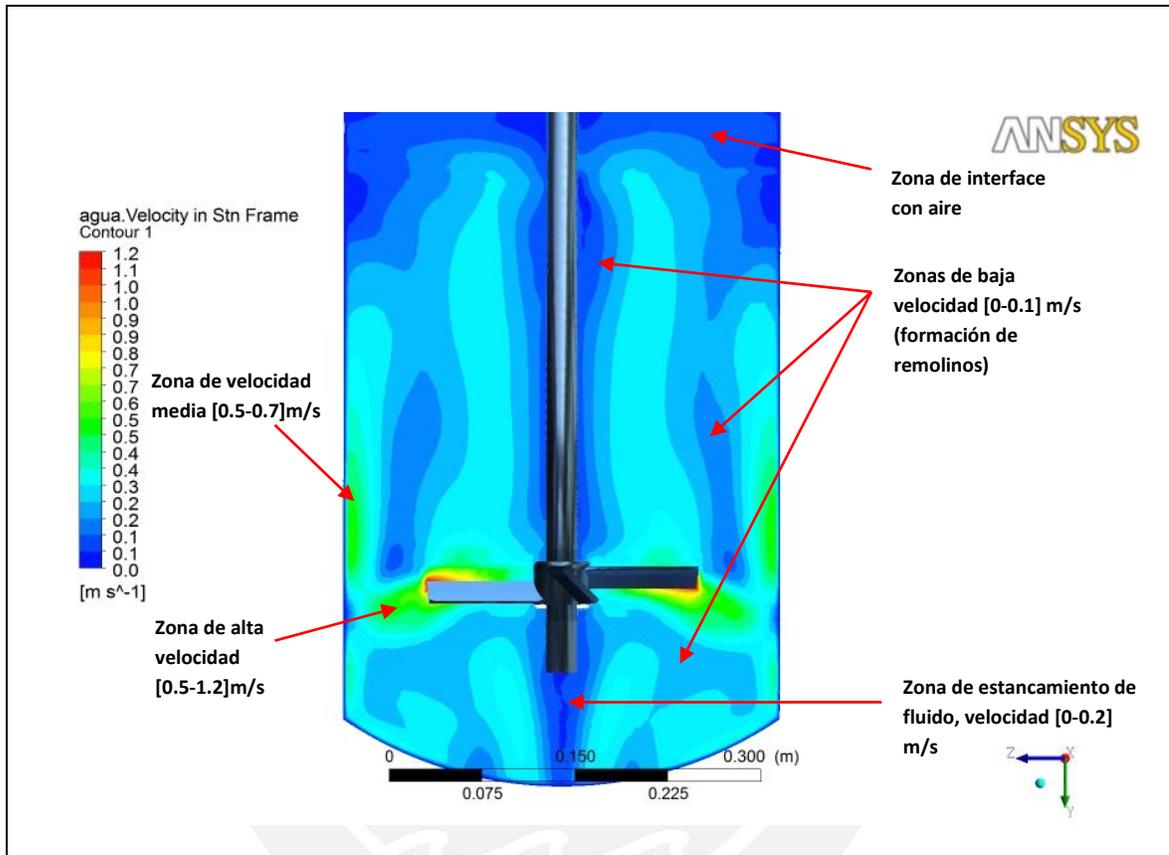


Figura 5.3. Contorno de velocidades en el plano de corte ZY.

La **figura 5.3** muestra el **contorno de velocidades en el plano de corte ZY**, en él se observan zonas de velocidad de gran interés; por ejemplo, la zona de alta velocidad [0.5-1.2] m/s, localizada en los alrededores del impulsor. La zona de velocidad media [0.5-0.7] m/s, localizada cerca de las paredes del tanque y por encima del impulsor, claramente las velocidades son axiales e indican que el flujo se dirige hacia la parte superior del tanque. La zona de estancamiento [0-0.2] m/s, localizada debajo del impulsor, esta zona presenta muy bajas velocidades lo que hace que el fluido tenga poco movimiento. Las zonas de baja velocidad [0-0.1] m/s, cinco zonas producto de la formación de remolinos presentan bajas velocidades (se puede visualizar mejor con la ayuda de la figura 5.1), localizadas dos en la

parte superior, dos en la parte inferior y uno alrededor del eje del impulsor. Finalmente tenemos la zona de interface con la atmosfera, zona de bajas velocidades.

Siguiendo con el análisis de velocidades, a continuación se muestra el contorno de velocidades para secciones de corte paralelas al plano ZX.

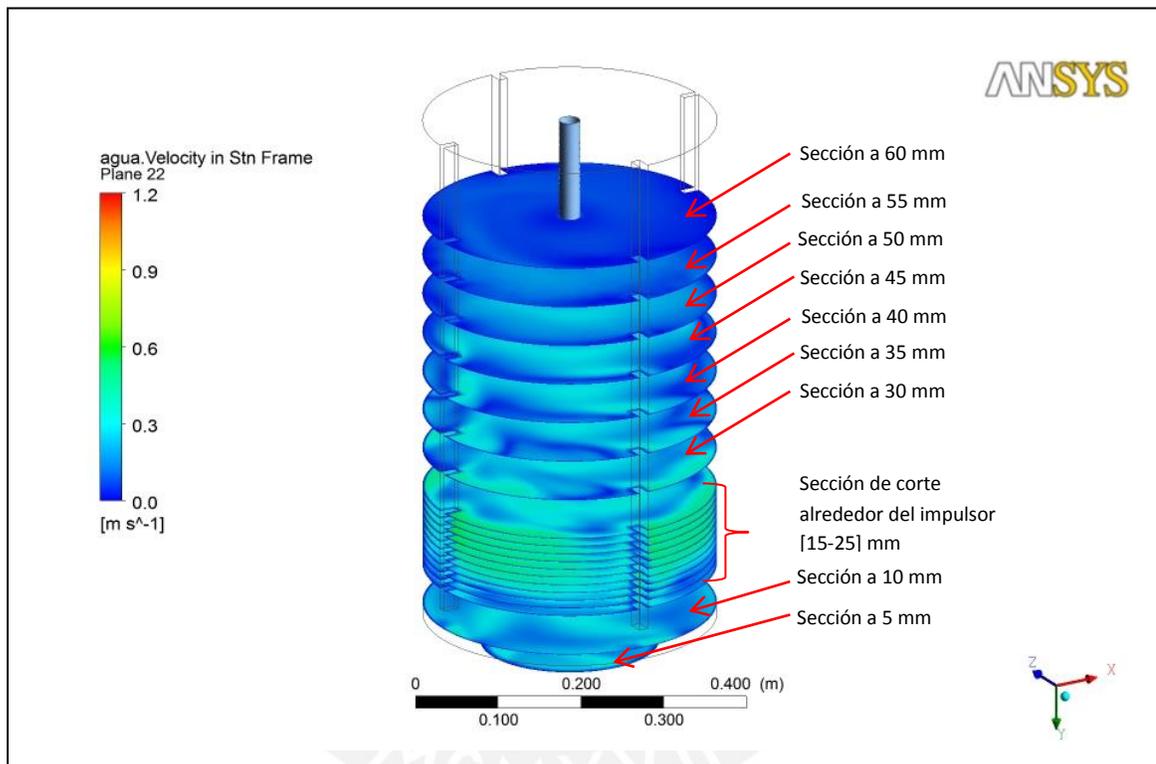


Figura 5.4. Contorno de velocidades en las secciones XZ

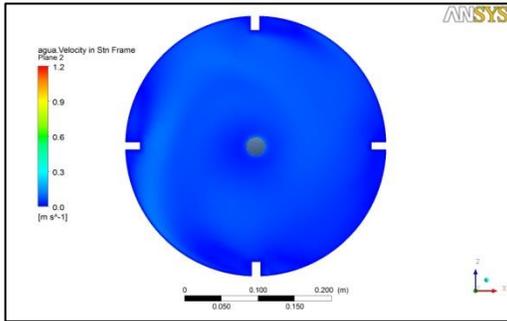


Figura. 5.5. Sección de contorno de velocidad a 60 mm.

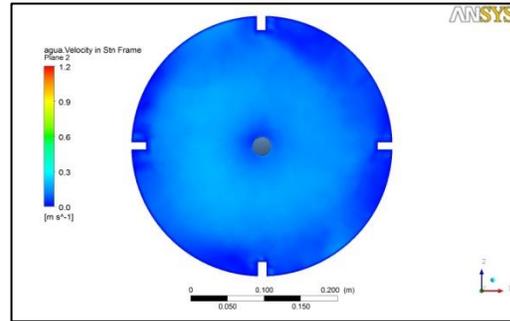


Figura. 5.6. Sección de contorno de velocidad a 55 mm

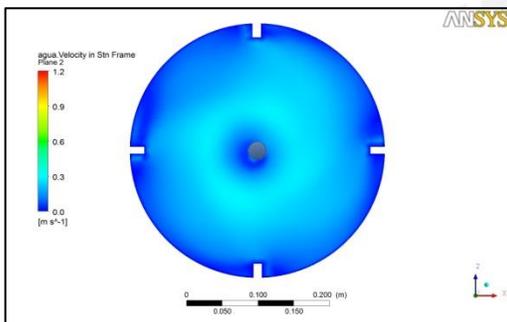


Figura. 5.7. Sección de contorno de velocidad a 50 mm

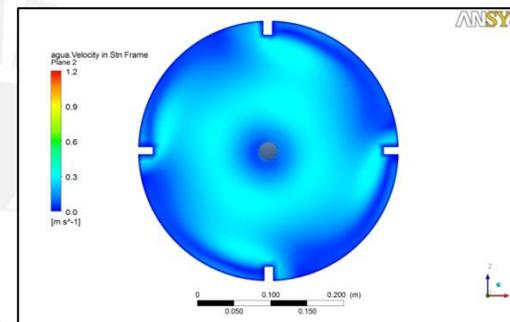


Figura. 5.8. Sección de contorno de velocidad a 45 mm

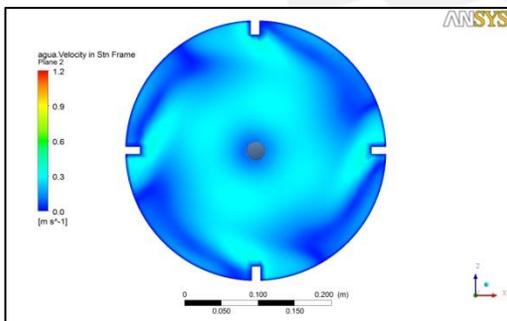


Figura. 5.9. Sección de contorno de velocidad a 40 mm.

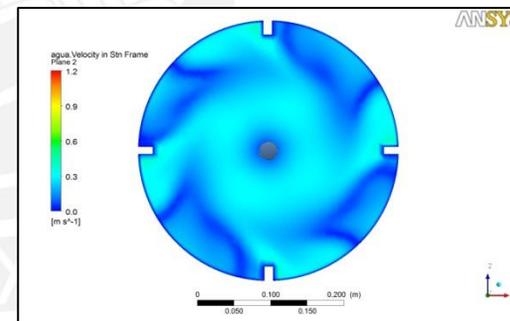


Figura. 5.10. Sección de contorno de velocidad a 35 mm

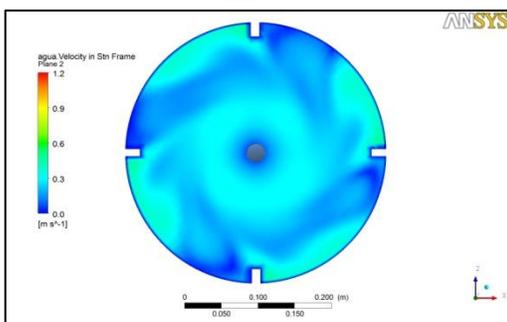


Figura. 5.11. Sección de contorno de velocidad a 30 mm.

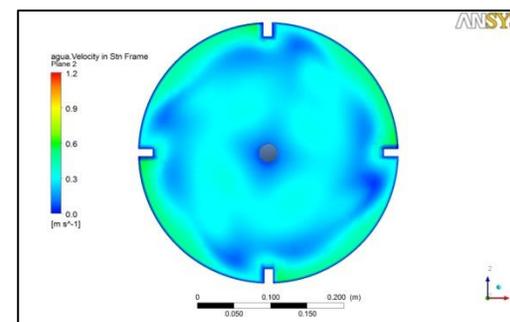


Figura. 5.12. Sección de contorno de velocidad a 25 mm.

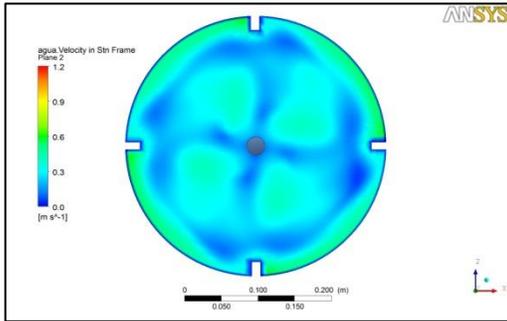


Figura. 5.13. Sección de contorno de velocidad a 23 mm.

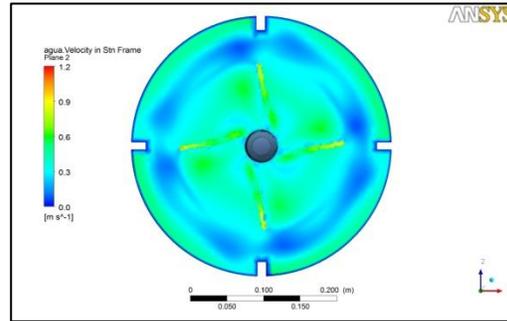


Figura. 5.14. Sección de contorno de velocidad a 21 mm

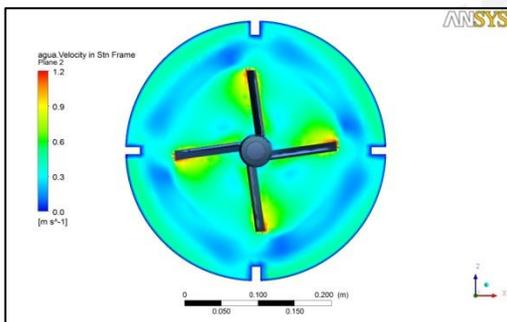


Figura. 5.15. Sección de contorno de velocidad a 20 mm

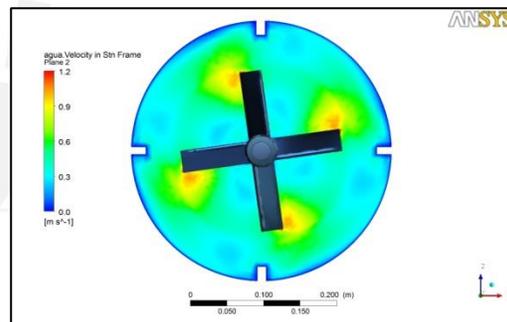


Figura. 5.16. Sección de contorno de velocidad a 18 mm

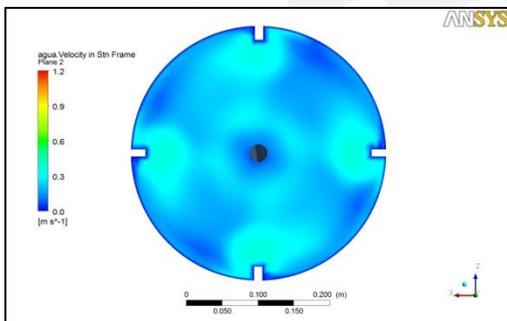


Figura. 5.17. Sección de contorno de velocidad a 15 mm

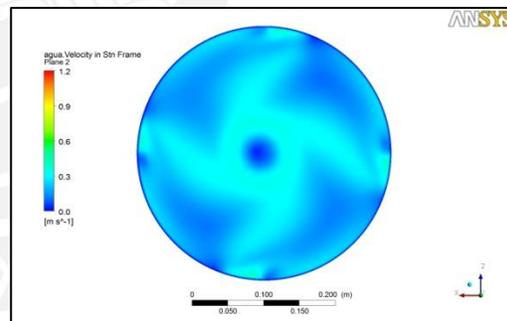


Figura. 5.18. Sección de contorno de velocidad a 10 mm

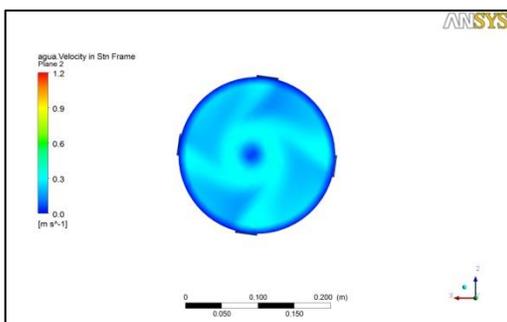


Figura. 5.19. Sección de contorno de velocidad a 5 mm.

En la figura 5.4 se muestran las **secciones de corte paralelas al plano XZ** para analizar el **contorno de velocidades** a distintas alturas del dominio del tanque agitador y tomando como referencia el fondo del recipiente. En total se analizaron 15 contornos de velocidades, en orden descendente, los cuales se muestran desde la figura 5.5 hasta la figura 5.19.

Las figuras 5.5 y 5.6 muestran bajas velocidades [0-0.1] m/s, debido a que a esa altura del tanque el flujo se encuentra cerca a la superficie del fluido donde se presenta poca agitación. Las figuras 5.7, 5.8, 5.9 y 5.10 muestran la formación de un remolino alrededor del eje del tanque. Además las velocidades se encuentran en el rango de [0-0.35] m/s, las más altas en el centro del tanque y cercanas a los deflectores. Las figuras 5.11, 5.12 y 5.13 se muestran altas velocidades [0.3-0.6] m/s, localizadas en la parte lateral y central del tanque. Las figuras 5.14, 5.15 y 5.16 se muestran las **más elevadas velocidades de todo el dominio [0.6-1.2] m/s, localizadas alrededor del impulsor, en el borde de los álabes**. Finalmente las figura 5.17, 5.18 y 5.19 muestran la parte inferior del tanque, en la cual se corrobora el estancamiento del fluido.

5.3. Muestra de la influencia del tipo de impulsor.

La influencia del tipo de impulsor en el patrón de flujo es de mucha importancia, pues ayuda a seleccionar el tipo impulsor según el proceso de agitación que se desea. En la **figura 5.20** se compara el patrón de flujo generado por el impulsor PTB (conformado por cuatro álabes rectos inclinados 45°) con los patrones de flujo característicos (axial y radial) en tanques agitadores, disponibles en la literatura.

Se sabe que los impulsores PTB por la forma de sus álabes inclinados producen una mezcla de flujo axial y radial. **En este estudio queda corroborada la influencia del tipo de impulsor en el patrón de flujo** al visualizar la figura 5.20.

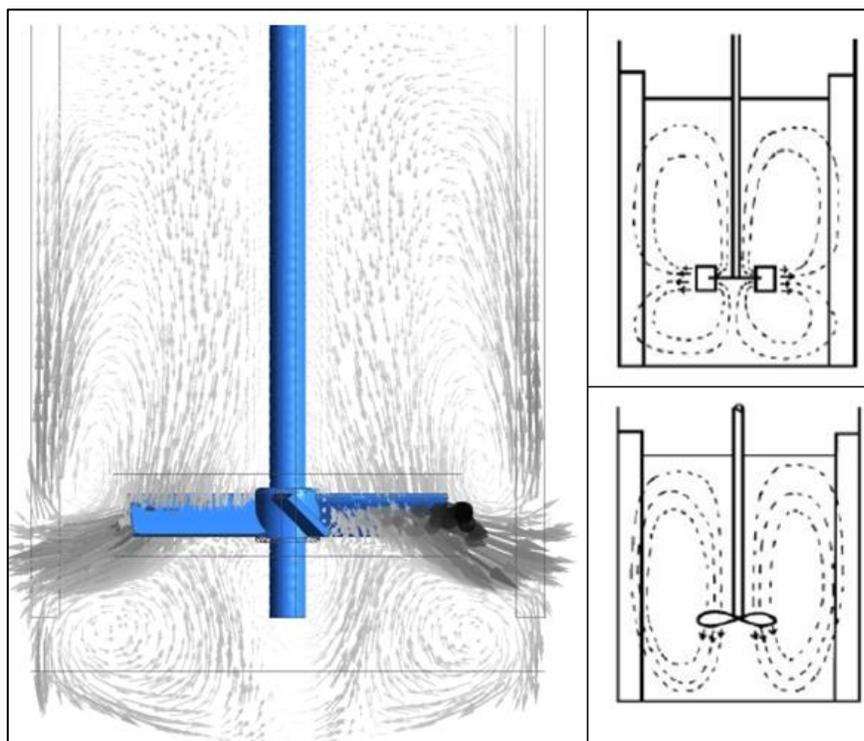


Figura 5.20. Patrón de flujo del tanque agitador.

Además se muestra la influencia directa del tipo de impulsor en la generación de líneas de corrientes de velocidad en el tanque agitador.

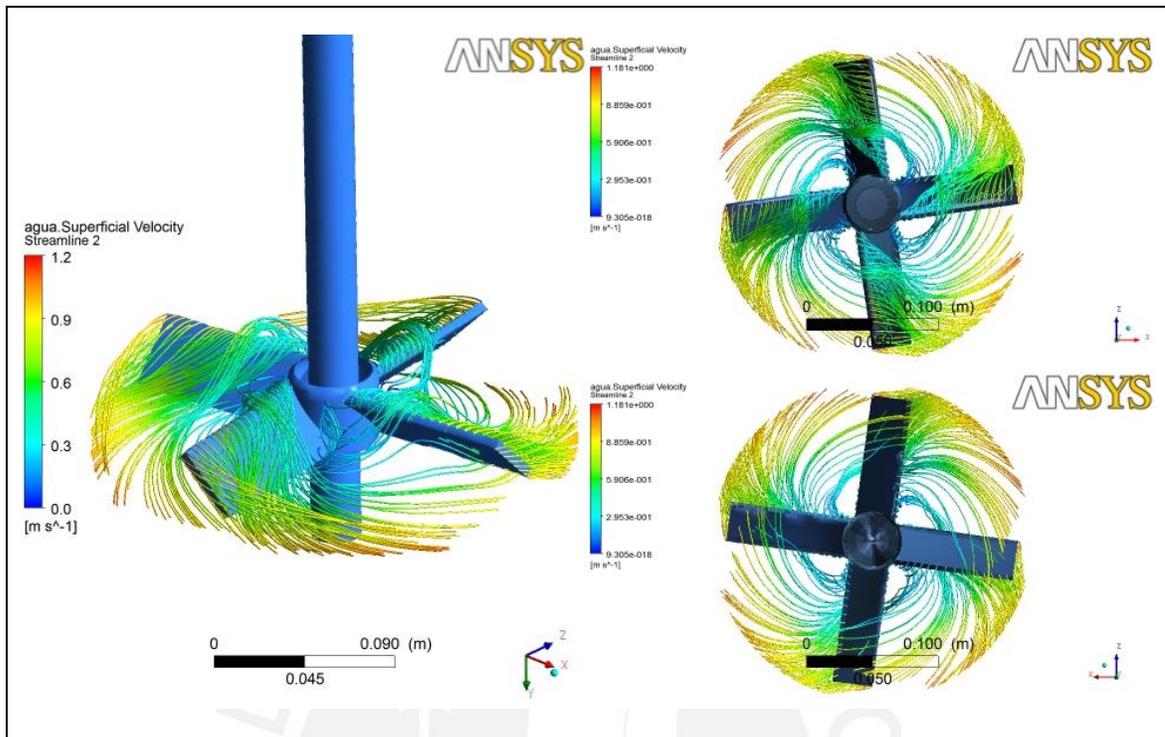


Figura 5.21. Influencia del tipo de impulsor en las líneas de corriente de velocidad.

5.4. Muestra de la interacción entre las fases del sistema (agua y aire)

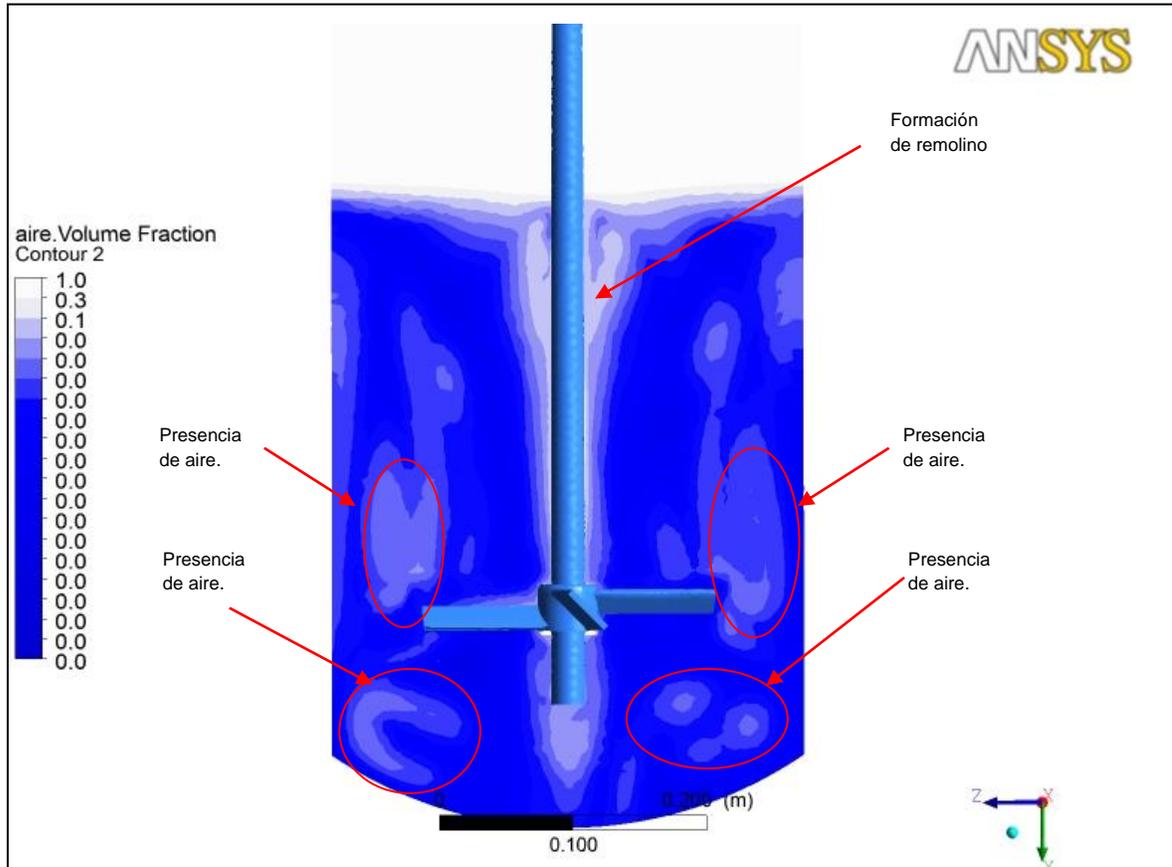


Figura 5.22. Fracción de volumen de aire en el tanque agitador.

La figura 5.22 muestra la fracción de volumen de aire (escala logarítmica) en todo el dominio del tanque agitador. En la parte superior de la figura se observa la mezcla del aire con el agua, formando un remolino. También existe presencia de aire en la parte inferior del impulsor y en las regiones donde hay presencia de vórtices. El grado de mezcla entre aire y agua, expresado en fracción de volumen de aire, en todo el dominio es de 0.1 y 0.3.

CONCLUSIONES

En el presente trabajo de tesis se propuso un procedimiento para simular y mostrar el comportamiento del flujo en un tanque agitador vertical de impulsor PTB con superficie libre y régimen estacionario mediante el software **ANSYS CFX v. 14.0**. En base a esto se concluye lo siguiente:

- El presente trabajo nos propone un procedimiento válido para simular el flujo que se produce en un tanque agitador vertical de impulsor PTB con superficie libre y en régimen estacionario mediante el software **ANSYS CFX versión.14.0**, el cual fue validado mediante la comparación de la curva de potencia (**Re vs Np**) generada con la ayuda de los resultados de la simulación y la curva experimental generada por la empresa Chemineer.
- Al generar la curva de potencia (**Re vs Np**) se utilizaron **agua y glicerina** como fluidos de trabajo para trazar la continuidad de la curva tanto en régimen laminar como turbulento. Esto logró corroborar que los números adimensionales logran describir el comportamiento del flujo independientemente del tipo de fluido que se utilice (tabla 4.2, tabla 4.3 y figura 4.3).
- Al comparar los resultados obtenidos para los modelos de turbulencia k- ϵ , k- ω y SST con los resultados experimentales, se obtuvo que el modelo de turbulencia k-Omega presenta el mayor error y el modelo k-Épsilon presenta un menor error que el k-Omega; sin embargo, el modelo SST es el que arrojó los mejores resultados comparados con la curva de potencia experimental para impulsores de alabes inclinados Chemineer; es por ello, que se eligió al modelo de turbulencia ***Shear Stress Transport (SST)*** como el más adecuado para este estudio.
- Al comparar los resultados obtenidos en la simulación con los valores de la curva de potencia experimental (tabla 4.7, tabla 4.8, tabla 4.9 y figura 4.2), se obtuvo un **error relativo no mayor al 8%** en todos los puntos de simulación, lo cual indica que el **procedimiento establecido** en este trabajo, en todas sus etapas (pre procesamiento, procesamiento y post procesamiento), es válido para simular el

comportamiento de un flujo en tanques agitadores para las condiciones pre-establecidas.

- **Las líneas de corriente de velocidad** (figura 5.2) muestran como el flujo se inicia y divide desde el impulsor hacia la parte superior e inferior del tanque para luego retornar. Además se observa la formación de un remolino alrededor del eje del impulsor.

Se observa el **contorno de velocidades** en el plano de corte ZY y planos de corte paralelos al plano XZ (figuras 5.3 y 5.4) que las velocidades más altas del flujo se presentan alrededor del impulsor en un rango de 0.5-1.2 m/s. También se presenta una zona de estancamiento con velocidades de 0-0.2 m/s localizada debajo del impulsor; por último, se observan cinco zonas de muy baja velocidad [0-0.1] m/s producto de la formación de remolinos.

- **El patrón de flujo** generado en la simulación viene dado por una combinación de los flujos característicos axial y radial, como se puede visualizar el campo de vectores de velocidad en el plano de corte ZY (figura 5.1). **Esto corrobora la influencia del tipo de impulsor en el patrón de flujo** (figura 5.2), ya que se sabe que los impulsores PTB por la forma de los álabes inclinados producen una mezcla de flujo axial y radial.
- Los resultados de la simulación mostraron la **interacción entre la fase líquida (agua) y gaseosa (aire)**, en la cual se aprecia con la formación de un remolino alrededor del eje impulsor (figura 5.22). Además se visualiza que existe presencia de aire en la parte inferior del impulsor y en las regiones donde hay presencia de vórtices. El grado de mezcla entre aire y agua, expresado en fracción de volumen de aire, en todo el dominio varía ente 0.1 y 0.3.

RECOMENDACIONES

El presente trabajo de tesis nos otorga un preámbulo muy importante para la realización de temas futuros de investigación o temas relacionados. Para futuras experiencias se recomienda estudiar y simular sistemas bajo las siguientes modificaciones:

- Realizar estudios del comportamiento del flujo con impulsores distintos al PTB.
- Realizar estudios del comportamiento del flujo variando el tipo de deflector, la cantidad o el ancho de estos.
- Simulación con impulsores excéntricos no centrados y horizontales puestos en el tanque agitador.
- Simulación con sistemas de múltiples impulsores (multi-impulsor).
- Simular el grado de mezcla entre distintos fluidos miscibles (dos o tres).
- Optimizar el grado de mezcla, definiendo como variable de estudio el ángulo de los álabes de los deflectores, altura del impulsor, velocidad de rotación del impulsor, cantidad de deflectores, diámetro y altura del tanque agitador, etc.
- Realizar estudios del patrón de flujo variando únicamente la forma de los álabes del impulsor.
- Realizar estudios térmicos y de vibraciones en procesos de agitación y mezcla.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] **McCABE Warren L,**
1996 Operaciones Unitarias en Ingeniería Química.
- [2] **Pacontrol 2010** “Mixing and Agitation” Consulta: 20 enero 2012
<http://www.pacontrol.com/processinformationbook/Mixing%20and%20Agitation%2093851_10.pdf>
- [3] **LOPEZ, Javier**
2009 *Simulación de una turbina radial mediante CFD FLUENT: caso de una turbina Rushton.* Tesis para obtener el título de Ingeniero Mecánico.
- [4] **MELUR, Ramasubramanian.**
2008 *A computational Fluid Dynamics Modeling and Experimental Study of the Mixing Process for the Dispersion of the Synthetic Fibers in Wet-Lay Forming.* North Carolina State University, Raleigh, North Carolina, USA.
- [5] **MARTINEZ NELIS, Felix Marcos**
2010 *Estudio Numérico de la Fluido dinámica de un Estanque de Agitación Utilizando el Método de las Mallas Deslizantes.* Memoria Para Optar al Título de Ingeniero Civil Mecánico. Santiago de Chile: Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.
- [6] **Slideshare** “Agitación y disolución”. Slideshare. Consulta: 18 de febrero 2012
<<http://www.slideshare.net/guest6d731e/agitacion-1735401>>
- [7] **GARCIA CORTES, JÁUREGUI HAZA**
2006 "Hidrodinámica en Tanques Agitados con Turbinas de Disco con Paletas Planas". Revista de Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia. Medellín, 2006, número 38, pp 97-113.

- [8] **Slideshare** “Agitación”. Slideshare. Consulta: 18 de febrero 2012
<<http://www.slideshare.net/guest6d731e/agitacion-1735401>>
- [9] **MARION, Alliet-Gaubert**
"CFD analysis of industrial multi-staged stirred vessel"
- [10] **SHAILENDRA KUMAR, Pandey**
2010 *CFD simulation of Hydrodynamics of Three Phase Fluidized Bed.*
Tesis para optar el grado Ingeniero Químico. Orissa India: Instituto
Nacional de Tecnología Departamento de Ingeniería Química.
- [11] **VESELINOV, Hristo**
2009 "CFD Simulations of Single and Two-Phase Mixing Processes in
Stirred Tank Reactors"
- [12] **ANSYS,** “ANSYS 14.0 Help”. © 2010 SAS IP.
- [13] **CHEMINEER**
1985 “Liquid Agitation”. CHEMICAL ENGINEERING. New York.
Pp 10-11.
- [14] **LearnCAX 2012** “Introducción to CFD”. Consulta: 30 marzo 2012
<<http://blog.learn-cax.com/2012/04/introduction-to-cfd-part-ii-pre.html>>
- [15] **Edward L. Paul, Victor A. Atiemo-Obeng**
2004 “Handbook of Industrial Mixing”. A John Wiley Sons, Inc.,
publication.
- [16] **Guardo, Alfredo**
2008 “Simulación de una turbina radial mediante CFD FLUENT”. Tesis
para optar el título de Ingeniero Mecánico. Barcelona: Escola
Tècnica Superior d'Enginyers Industrials de Barcelona (ETSEIB).