Universidad Nacional
SAN LUIS GONZAGA



Reconocimiento-CompartirIgual 4.0 Internacional

Esta licencia permite a otras combinar, retocar, y crear a partir de su obra, incluso con fines comerciales, siempre y cuando den crédito y licencia a las nuevas creaciones bajo los mismos términos. Esta licencia suele ser comparada con las licencias copyleft de software libre y de código abierto. Todas las nuevas obras basadas en la suya portarán la misma licencia, así que cualesquiera obras derivadas permitirán también uso comercial.

http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y PETROQUÍMICA

UNIVERSIDAD NACIONAL SAN LUIS GONZAGA

EVALUACIÓN DE ORIGINALIDAD

CONSTANCIA

El que subscribe, deja constancia que se ha realizado el análisis con el software de verificación de similitud al documento cuyo título es:
"MODELAMIENTO DEL COMPORTAMIENTO DEL FLUJO EN UN TANQUE AGITADOR VERTICAL DE IMPULSOR PTB (PITCHET BLADE TURBINE) PARA SU VALIDACIÓN DESARROLLANDO CURVAS DE POTENCIA"

BACH. **HERNANDEZ ORMEÑO, JOSÉ JESÚS**

Autor de la Tesis del nivel de **PREGRADO** de la Facultad de **INGENIERÍA QUÍMICA Y PETROQUÍMICA**. El Resultado obtenido es 15% (PORCENTAJE DE SIMILITUD) por lo cual, se otorga el calificativo de: **APROBADO**, según Reglamento de Evaluación de la Originalidad.

Se adjunta al presente el reporte de evaluación con el software de verificación de originalidad.

Observaciones:

El porcentaje de similitud es menor del 20%, establecido como máximo por Reglamento de Evaluación de originalidad.

Ica,11 de junio de 2026

N° de Recibo:20174907

UNIVERSIDAD NACIONAL SAN LUIS GONZAGA
Dr. FERNANDO EDUARDO CANO LEGUA
DIRECTOR DE LA UNIDAD DE INVESTIGACIÓN
DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y PETROQUÍMICA

UNIVERSIDAD NACIONAL “SAN LUIS GONZAGA”
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y PETROQUÍMICA

“*Modelamiento del comportamiento del flujo en un tanque agitador vertical de impulsor PTB (Pitchet Blade Turbine) para su validación desarrollando curvas de potencia*”

LINEA DE INVESTIGACIÓN:
Ciencias naturales, ingeniería y tecnologías sostenibles

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO QUÍMICO

AUTOR: Bach. HERNANDEZ ORMEÑO, JOSÉ JESÚS

ASESOR: Dr. FERNANDO EDUARDO CANO LEGUA

Ica, Perú

2026

DEDICATORIA

A Dios por permitirme llegar a estos precisos momentos de nuestra vida, por darme la fortaleza, sabiduría e inteligencia y ahora lograr un peldaño más que es de gran felicidad y orgullo poder realizarlo. A mis padres, por su apoyo infinito en cada etapa de mi vida, que quienes, con mucho esfuerzo, lograron guiarme por el camino de la sabiduría y ahora ser quien soy gracias a ellos, hermanas por su apoyo condicional en toda la etapa de mi carrera.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por darme la fortaleza y gula durante todo el trayecto de mi carrera, por darme esa valentía de superar cada obstáculo que se presentaba.

A mi familia, por inculcarme valores y enseñarme que el rendirse no es de personas que quieren luchar y cumplir metas hacia un futuro.

A mis docentes, de mi casa de estudios por inculcarme todos los principios y valores, que me permitieron a través de sus enseñanzas ser un profesional.

A la Universidad Nacional "San Luis Gonzaga de Ica", por brindarme su casa de estudios que ahora es mi alma mater, mi profundo y sincero agradecimiento, al no dejarme solo en mi formación profesional.

A mi asesor, al Dr. Fernando Eduardo Cano Legua, por sus enseñanzas que fueron de enorme importancia en el proceso de este trabajo de investigación

Índice de Contenidos

	Pág.
Dedicatoria	**ii**
Agradecimientos	**iii**
Índice de Contenidos	**iv**
Índice de Tablas	**vi**
Índice de Figuras	**vii**
Resumen	**ix**
Abstract	**x**
I. INTRODUCCIÓN	**01**
II. ESTRATEGIA METODOLÓGICA	**04**
2.1. Medidas de velocidad de asentamiento	04
2.1.1. Homogeneidad en los tanques	04
2.2. Modelado CFD – ViscoJet	06
2.2.1. Modelo geométrico	06
2.2.2. Condiciones de contorno	09
2.2.3. Ajustes del solucionador	10
2.2.4. Configuración de partículas	12
2.2.5. Criterios de parada	13
2.2.6. Post-procesado	15
2.2.7. Malla	16
2.2.8. Análisis de sensibilidad de malla	18
2.3. Modelado CFD – Magnético	22
2.3.1. Modelo Geométrico	22
2.3.2. Condiciones frontera	24
2.3.3. Malla	26
2.3.4. Ajustes del Solver	27
2.3.5. Configuración de partículas	28
2.3.6. Criterios de parada	28
2.3.7. Post-procesado	28

III. RESULTADOS **30**

3.1. Estructura y simulación 30
3.1.1. Propiedades del fluido 30
3.1.2. Definición del modelo de turbulencia 31
3.1.3. Diseño CAD de geometrías e interacción con ANSYS CFX v. 14.0. 31
3.1.4. Generación de malla 34
3.1.5. Concordancia de parámetros de control de simulación. 37
3.1.6. Sumario de parámetros de simulación. 37

IV. DISCUSIÓN **39**

4.1. Desarrollo procedimental 39
4.2. Descripción general del procedimiento. 42
4.3. Muestra del Patrón de Flujo 50
4.4. Muestra del campo de velocidades 51
4.5. Influencia del tipo de impulsor. 55
4.6. Interacción entre fases agua y aire 57

V. CONCLUSIONES **58**

VI. RECOMENDACIONES **60**

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS **61**

Índice de Tablas

Tabla 1 Características de la velocidad de sedimentación 4
Tabla 2 Medidas del tanque de 12m^3 con el ViscoJet 8
Tabla 3 Condiciones de contorno del modelo ViscoJet 10
Tabla 4 Modelos generales para la configuración física. 11
Tabla 5 Configuración física del modelo ViscoJet 1WC LPT 13
Tabla 6 Configuración física del modelo DEM 1WC de ViscoJet 13
Tabla 7 Criterios de parada establecidos para las simulaciones 14
Tabla 8 Controles predeterminados del mallado. 16
Tabla 9 Refinamientos locales de la malla 16
Tabla 10 Mallas utilizadas en el análisis de ViscoJet 17
Tabla 11 Par y diferencia media con la malla fina. 21
Tabla 12 Condiciones de contorno del modelo magnético. 24
Tabla 13 Características de malla para la caja del tanque magnético. 26
Tabla 14 Física de las cajas de tanques magnéticos. 27
Tabla 15 Data importante del aire 30
Tabla 16 Data importante del agua 30
Tabla 17 Data importante del agua 31
Tabla 18 Sumario de parámetros de simulación 37
Tabla 19 Mecanismo determinado de la simulación. 39
Tabla 20 Determinación del Re° respecto al régimen transitorio-turbulento. 43
Tabla 21 Determinación del Re° para régimen laminar. 43
Tabla 22 Determinación del Np (modelo de turbulencia k-Epsilon) 44
Tabla 23 Determinación del Np (modelo de turbulencia k-Omega) 45
Tabla 24 Determinación del Np (modelo de turbulencia SST) 45
Tabla 25 Resultados modelo de turbulencia k-Épsilon. 45
Tabla 26 Resultados modelo de turbulencia k-omega 46
Tabla 27 Resultados para el modelo de turbulencia SST 46

Índice de Figuras

Fig. 1 Pruebas de homogeneidad. Procedimiento experimental. 6
Fig. 2 Geometría detallada del agitador ViscoJet (Vistas 1 y 2) 7
Fig. 3 Modelo del tanque de 12m^3 con el agitador ViscoJet 7
Fig. 4 Modelo utilizado con la interfaz que separa las dos regiones designadas 8
Fig. 5 Convergencia de par con los criterios de parada establecidos. 14
Fig. 6 Sondas para post-procesamiento 15
Fig. 7 Análisis de sensibilidad de mallas. Mallas usadas para el depósito ViscoJet. 18
Fig. 8 Análisis de sensibilidad de malla VJ. Magnitud de velocidad a lo largo de líneas horizontales. 19
Fig. 9 Transitorio de par para diferentes mallas. 20
Fig. 10 Modelo del tanque de 12m^3 con agitador magnético. 22
Fig. 11 Geometría detallada del impulsor magnético. 23
Fig. 12 Regiones definidas para el modelo de tanque magnético. 24
Fig. 13 Sistema de coordenadas para modelar el movimiento del dominio de Spinning. 25
Fig. 14 Mallas utilizadas en el análisis de tanques magnéticos. 26
Fig. 15 Sondas para post-procesamiento. Carcasas de tanques magnéticos. 29
Fig. 16 Geometría del impulsor 32
Fig. 17 Volumen de control del dominio del impulsor 32
Fig. 18 Volumen de control del fluido 33
Fig. 19 Dominio total. 34
Fig. 20 Área mallada dominio-impulsor. 35
Fig. 21 Superficie de palas (mallado por capas) dominio del impulsor. 35
Fig. 22 Mallado dominio tanque agitador 36
Fig. 23 Estadísticas del mallado (tanque agitador) 37
Fig. 24 Determinación del torque impulsor por simulador 44
Fig. 25 Curva de potencia: impulsores inclinados [15] 47
Fig. 26 Comparación modelo SST vs curva experimental Chemineer 48
Fig. 27 Comparación de la curva Np de los tres modelos vs curva experimental impulsores inclinados. Chemineer [15]. 49
Fig. 28 Vectores en plano de corte ZY. 50
Fig. 29 Líneas de corriente en el dominio del tanque agitador. 51
Fig. 30 Contorno de velocidades en plano de corte ZY. 51
Fig. 31 Contorno de velocidades en las secciones XZ 52

Fig. 32 a) Sección de contorno de velocidad a 60 mm. b) Sección de contorno de velocidad a 55 mm 53
Fig. 33 a) Sección de contorno de velocidad a 50 mm. b) Sección de contorno de velocidad a 45 mm 53
Fig. 34 a) Sección de contorno de velocidad a 40 mm. b) Sección de contorno de velocidad a 35 mm 53
Fig. 35 a) Sección de contorno de velocidad a 30 mm. b) Sección de contorno de velocidad a 25 mm. 53
Fig. 36 a) Sección de contorno de velocidad 23 mm b) Sección de contorno de velocidad 21 mm 54
Fig. 37 a) Sección de contorno de velocidad 20 mm b) Sección de contorno de velocidad 18 mm 54
Fig. 38 a) Sección de contorno de velocidad 15 mm b) Sección de contorno de velocidad 10 mm 54
Fig. 39 Sección de contorno de velocidad 5 mm 54
Fig. 40 Patrón flujo del tanque 56
Fig. 41 Influencia del tipo de impulsor. 56
Fig. 42 Fracción de volumen de aire. 57

RESUMEN

Esta tesis surge de la necesidad de contribuir al desarrollo y la optimización de nuevos diseños de fabricación para tanques agitados, con el objetivo de reducir el tiempo de operación, aumentar la eficiencia de la mezcla y disminuir los costos de fabricación.

En este trabajo, el lector encontrará una breve explicación de las generalizaciones técnicas de los tanques agitados, los números adimensionales utilizados en la mezcla, las ecuaciones matemáticas que rigen el comportamiento del fluido, las estadísticas de la malla y una descripción de los modelos básicos de turbulencia en dinámica de fluidos computacional (CFD).

Una parte importante de este proyecto se dedica a proponer un método para simular y demostrar el comportamiento del flujo dentro de un tanque agitado verticalmente con superficie libre. Para ello, se utilizó el software Ansys versión 14.0 (una herramienta de simulación CFD), considerando la interacción impulsor-deflector, flujo turbulento, fluido newtoniano, simulación bifásica, régimen estacionario y un impulsor PTB de cuatro palas (una turbina directa de 5° equipada con palas de soclinación directa).

Los resultados de la simulación, utilizando los modelos de turbulencia k-Épsilon, k-Omega o Transporte de Esfuerzo Cortante (SST) como variable principal, se compararon, basándose en la curva de potencia (Re vs. Np) para este tipo de impulsor, con los resultados experimentales proporcionados por Chemineer, el fabricante del agitador.

El modelo de turbulencia SST demostró ser el que mejor se ajustaba a este caso de estudio, mostrando un error inferior al 8 % en comparación con las curvas de potencia. Por lo tanto, podemos concluir que el presente trabajo propone un método válido para simular y demostrar el comportamiento del flujo en un tanque agitado verticalmente con impulsor PTB, superficie libre y régimen de estado estacionario, utilizando el software Ansys versión 14.0.

Palabras Clave: Modelamiento, tanque agitador, impulsor PTB

ABSTRACT

This thesis is motivated by the need to contribute to the development and optimization of new manufacturing designs for agitated tanks, with the aim of reducing operating time, increasing mixing efficiency, and reducing manufacturing costs.

The reader will find in this work a brief explanation of the technical generalizations of agitated tanks, dimensionless numbers used in mixing, the mathematical equations governing fluid behavior, mesh statistics, and a description of the basic turbulence models in CFDid Dymputanamics).

A large part of this project is devoted to proposing a method to simulate and demonstrate the flow behavior inside a vertically agitated tank with a free surface. For this purpose, Ansys version 14.0 software (a CFD simulation tool) was used, considering the impeller-deflector interaction, turbulent flow, Newtonian fluid, two-phase simulation, steady-state regime, and a four-bladed PTB impeller (a direct-5° turbine equipped with direct-soclin blades).

The simulation results, using the k-Epsilon, k-Omega, or Shear Stress Transport (SST) turbulence models as the main variable, were compared, based on the power curve (Re vs. Np) for this type of impeller, with the experimental results provided by Chemineer, the agitator manufacturer.

The SST turbulence model proved to be the best fit for this type of case study, showing an error of less than 8% compared to the power curves.

Therefore, we can conclude that the present work proposes a valid method to simulate and demonstrate the flow behavior occurring in a vertically agitated tank with PTB impeller, free surface, and steady-state regime using Ansys software version 14.0.

Keywords: Modeling, stirred tank, PTB impeller

I. INTRODUCCIÓN

El movimiento de fluidos es esencial para los procesos de mezcla necesarios en diversas industrias. Para remover líquidos se han desarrollado una variedad de agitadores. Cuando el fluido de trabajo es altamente viscoso, como una gran variedad de fluidos no newtonianos, se utilizan frecuentemente impulsores de baja velocidad pero de gran tamaño.

Las cintas helicoidales y los anclajes de puerta son de este tipo. Para fluidos de baja viscosidad se prefieren impulsores pequeños con varias palas de turbina porque pueden girar a altas velocidades para producir una gran turbulencia, lo que es útil para la mezcla de fluidos.

Entre los impulsores de palas de turbina, las turbinas de palas inclinadas y los aerogeneradores Rrushton son los más ampliamente empleados.

El flujo de fluido generado por la turbina de palas inclinadas se clasifica como tipo axial porque un único lazo que circula de arriba a abajo domina el campo de flujo. Para la turbina Rushton, un flujo que emerge en dirección radial desde la periferia de las palas separa el campo de flujo en dos bucles de circulación.

Sin embargo, los patrones de flujo pueden cambiar según la configuración del sistema de impulsor. Las mediciones de velocidad para un impulsor de pala con paso de 60° realizadas por Nouri y Whitelaw [1] revelaron que el patrón de flujo cambia del tipo axial al radial cuando el número de Reynolds es menor que un valor alrededor de 650.

Esta transición de flujo fue confirmada por las mediciones de potencia de Hockey y Nouri [2], en las que el número de potencia aumenta bruscamente a Re = 1200 a medida que se incrementa el número de Reynolds. Los sistemas de mezcla usados en ambos estudios eran geométricamente similares, pero el tamaño del primero era la mitad del segundo.

Esto implica proporcionalidad directa del número de Reynolds crítico al tamaño del sistema. El cambio del patrón de flujo de tipo axial a radial también se visualizó en números de Reynolds 490 ~ 500 en los experimentos de Schafer et al. [3].

Se observa que los números de Reynolds en los que ocurre la transición de flujo están en el régimen laminar, mientras que este tipo de impulsor suele operar en régimen turbulento.

El espacio libre entre el impulsor y el fondo del recipiente es otro parámetro que afecta a la estructura del flujo. Para una turbina de palas inclinadas con diámetro D = T/3, el

estudio experimental de Jaworski et al. [4] mostró que cuando la separación del fondo cambia de T/4 a T/2, la fuerza del bucle de circulación dominante disminuye y se forma un bucle de circulación secundario que gira en la dirección opuesta al principal en la región inferior.

Una observación similar fue reportada por Mao et al. [5] que con una turbina de palas inclinadas D = T/2 ubicada en una holgura C = T/2, se observa claramente un bucle secundario en la región inferior.

Sin embargo, cuando la holgura o el impulsor se reducen a T/3, solo prevalece un bucle de circulación. Resultados similares también se pueden ver en el trabajo realizado por Kresta y Wood [6].

Para un caso extremo con D = 3T/5 y C = T/2 en el estudio de Mao et al. [5], el flujo se descarga desde el paso de las palas en dirección casi radial y el bucle secundario ocupa casi toda la parte inferior del recipiente.

Yianneskis et al. [7] informaron que con un impulsor de turbina Rushton la inclinación del flujo del impulsor aumenta con la decreciente libertad. Rutherford et al. [8] investigaron el flujo en un recipiente agitado por dos impulsores Rushton.

Informaron que el patrón de flujo depende fuertemente de la altura libre hacia abajo del impulsor inferior, la separación entre los dos impulsores y la sumersión del impulsor superior por debajo de la parte superior.

Se identificaron tres patrones de flujo estables, denominados flujo paralelo, flujo de fusión y flujo divergente, según la elección de los tres parámetros. El flujo divergente se observó cuando la distancia libre se vuelve menor que 0,15T.

En este flujo, el flujo de descarga que emerge del impulsor inferior se dirige hacia la base del recipiente cuando se desplaza fuera del disco circular del impulsor de Rushton. Los patrones de flujo anteriores también se evidenciaron en los cálculos numéricos de Micale et al. [9] y Deshpande y Ranade [10].

La dirección del flujo del impulsor hacia el fondo del buque para C < 0,15T fue confirmada en los experimentos con un único impulsor de turbina Rushton por Montante et al. [11].

Sus mediciones demostraron que el ángulo de flujo del flujo es de aproximadamente 25° a 30° respecto a la horizontal para C = 0,2 T, lo que indica que el campo de flujo se vuelve parcialmente axial a esta altura libre. Una reducción adicional de la holgura conduce a la transición a un flujo totalmente axial.

Un estudio reciente realizado por Tsui et al. [12] utilizando un método numérico examinó sistemáticamente el efecto del ángulo de las palas sobre el flujo en un recipiente agitado por el impulsor de la turbina de palas inclinadas.

Se demostró que el patrón de flujo se transforma del tipo axial al tipo radial cuando el ángulo de la pala supera cierto valor. Para el impulsor con diámetro D = T/3, este ángulo crítico aumenta de 50° a 76° y 87° a medida que el espacio libre disminuye de C = T/2 a C = T/3 y T/4, respectivamente.

Cuando el diámetro del impulsor se amplía a D = T/2, los ángulos críticos correspondientes se reducen a 40° , 70° y 87°. El cambio del patrón de flujo a tipo radial provoca un aumento en la demanda de potencia, junto con una fuerte disminución en el caudal de bombeo y, por tanto, en la eficiencia del bombeo.

El impulsor de la turbina Rushton incluye un disco circular con varias palas planas montadas verticalmente alrededor de su periferia. Produce un flujo circulante fuerte a costa de un gran consumo energético. Para aliviar el alto requisito de potencia, las palas planas pueden instalarse de forma inclinada, es decir, sesgadas hacia el disco.

Como consecuencia, el flujo es complicado porque el disco intenta hacer que el flujo de descarga fluya en dirección radial, mientras que las palas inclinadas tienden a formar flujo axial. El efecto combinado de la pala afinada y el disco se convierte en la principal preocupación del presente estudio.

II. ESTRATEGIA METODOLÓGICA

2.1. Medidas de velocidad de asentamiento

Se realizan experimentos sencillos para medir la velocidad de hundimiento de las partículas. Las partículas utilizadas en los experimentos se denominan UBE PA6. Son partículas poliméricas con densidad ρ_s = 1140kg/m^3 y un diámetro medio de d = 2,6mm.

Se pueden realizar procedimientos complejos para medir con precisión la velocidad de sedimentación de partículas, como la holografía.

Sin embargo, en este caso, el procedimiento experimental es más sencillo y consiste en un cubo lleno de agua, un cronómetro y las partículas. Las características del experimento se describen en la Tabla 1.

Tabla 1 Características de la velocidad de sedimentación

Propiedades		**Valor**	**Unidades**
Líquido (agua)	Temperatura	20	° C
	Viscosidad	1	cP
Partículas			
	Densidad	1140	kg/m3
	Diámetro (promedio)	2.626	mm
Tanque			
	Altura de líquido	93	mm

Las partículas se liberan cuidadosamente sobre la superficie libre. Se mide el tiempo de hundimiento y la velocidad media de hundimiento puede calcularse utilizando la ecuación ampliamente conocida de distancia sobre el tiempo.

2.1.1. Homogeneidad en los tanques

Para evaluar la homogeneidad y la distribución de partículas en los tanques considerados, se realizan experimentos sobre ellos. Los tanques se llenan como en el uso normal y, tras un cierto tiempo, cuando el flujo se ha estabilizado, se introducen partículas por una abertura en el techo del tanque.

El tanque se llena de agua y las características de las partículas son las que se expresan en la Tabla 1. Una cámara filma durante mucho tiempo, y luego estos

vídeos pueden analizarse para obtener información importante sobre el movimiento de las partículas, la altura de la nube y la distribución general.

La homogeneidad se midió utilizando una metodología explicada en detalle en Lundström y Syrjä [13].

Para esta aplicación específica, una vez que las partículas se han mezclado durante 30 minutos, con una velocidad de rotación de 30 rpm, el depósito se vacía. El contenido del flujo de salida se muestrea con cubos cada 2 minutos durante media hora. Después, la muestra se realiza cada 20 minutos.

Los cubos se llenan durante aproximadamente 2,5 segundos. Para cada cubo, las partículas se colan y se obtiene el peso de las partículas y el líquido. Con ese método, se puede obtener la concentración de partículas para diferentes momentos del vaciado.

Esto se interpreta como una representación del volumen que se está emitiendo y se compara con los experimentos CFD.

El depósito se vacía de forma controlada, eligiendo la masa de salida. Esto es posible gracias a una válvula manipulada por el usuario.

La evolución del flujo másico está expuesta a 3,1 a, donde se puede observar que durante la primera media hora, el flujo másico es de alrededor de 0,83 kg/s, aumentando a 1,37 kg/s después.

Este flujo másico crea el vaciado descrito en la Figura 1b, donde se requiere un tiempo aproximado de 134 minutos para evacuar completamente todo el fluido.

En ambos gráficos presentados, se puede observar que la densidad de muestras es notablemente mayor en el primer intervalo que en el segundo.

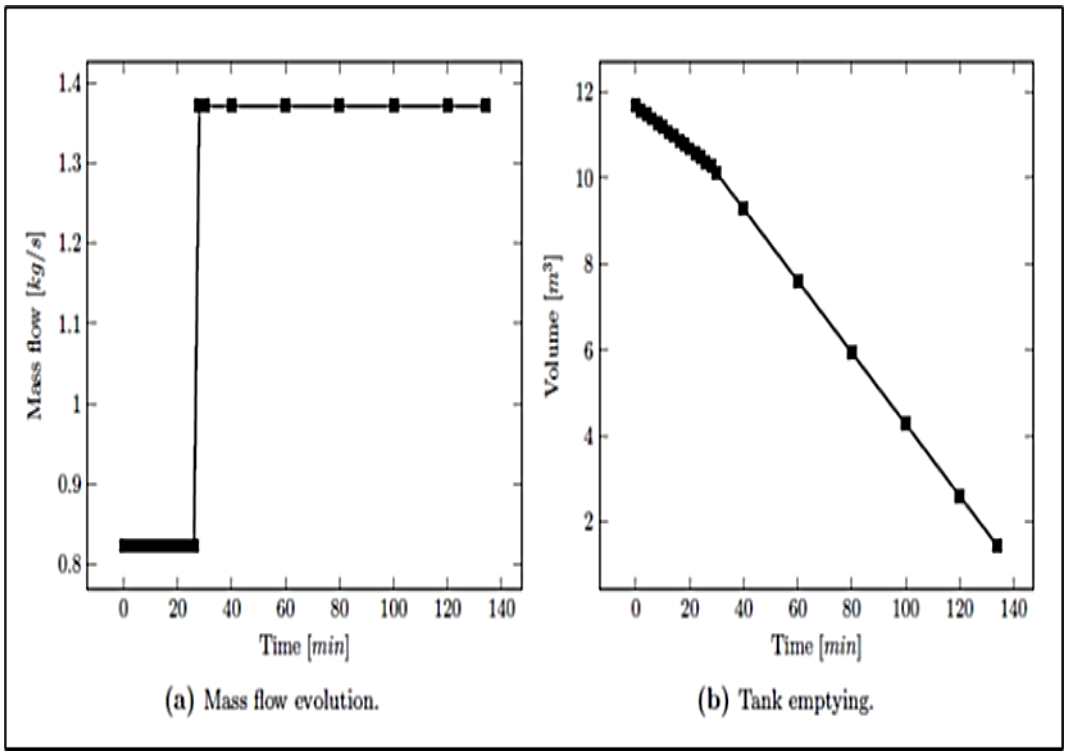


Fig. 1 Pruebas de homogeneidad. Procedimiento experimental.

2.2. Modelado CFD – ViscoJet

2.2.1. Modelo geométrico

Se crea un modelo 3D para representar la geometría del tanque. Las medidas de modelado pueden verse en la Figura 3, que da al tanque la aproximación esperada de 12m^3.

El impulsor tiene tres elementos cónicos de mezcla, que permiten que el flujo pase a través de ellos. Este agitador ha sido diseñado por la empresa VISCO JET® Agitation Systems [14].

Los tres conos están divididos a 120º entre sí, por lo que todo el espacio alrededor del eje está cubierto por igual. Además, los conos están ligeramente inclinados hacia abajo, lo que aumenta la capacidad de mezcla del agitador. El modelo 3D del impulsor representa con precisión el agitador ViscoJet real utilizado en los experimentos.

En la Figura 2 se muestran dos vistas detalladas del impulsor. El modelo ensamblado, con el eje y el tanque, se muestra en la Figura 3. El diámetro del impulsor, no representado, es de 900 mm.

El impulsor está situado a 146 mm del fondo del tanque. Las medidas más relevantes se resumen en la Tabla 2.

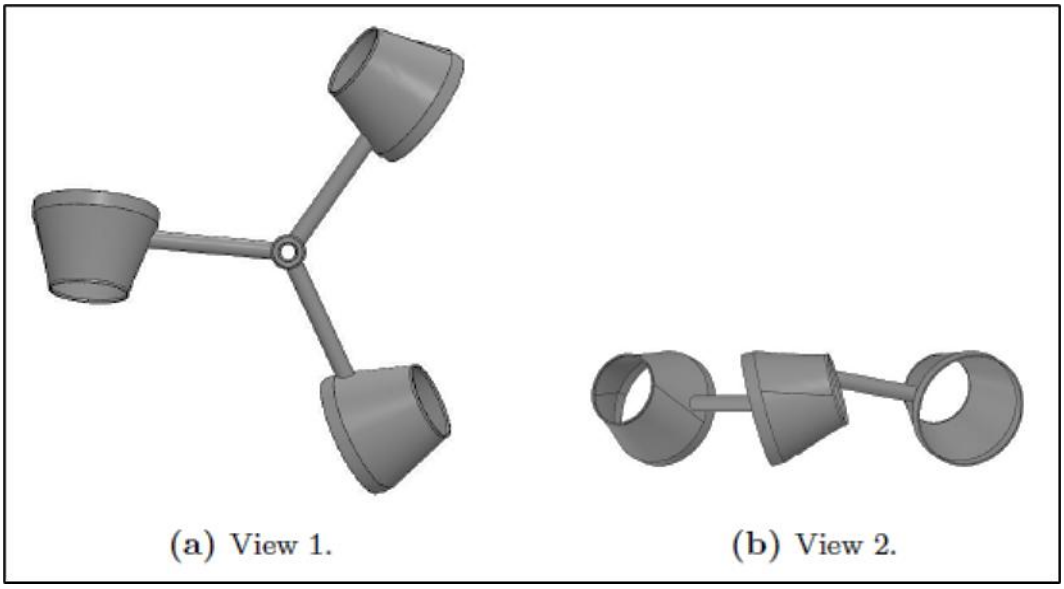


Fig. 2 Geometría detallada del agitador ViscoJet (Vistas 1 y 2)

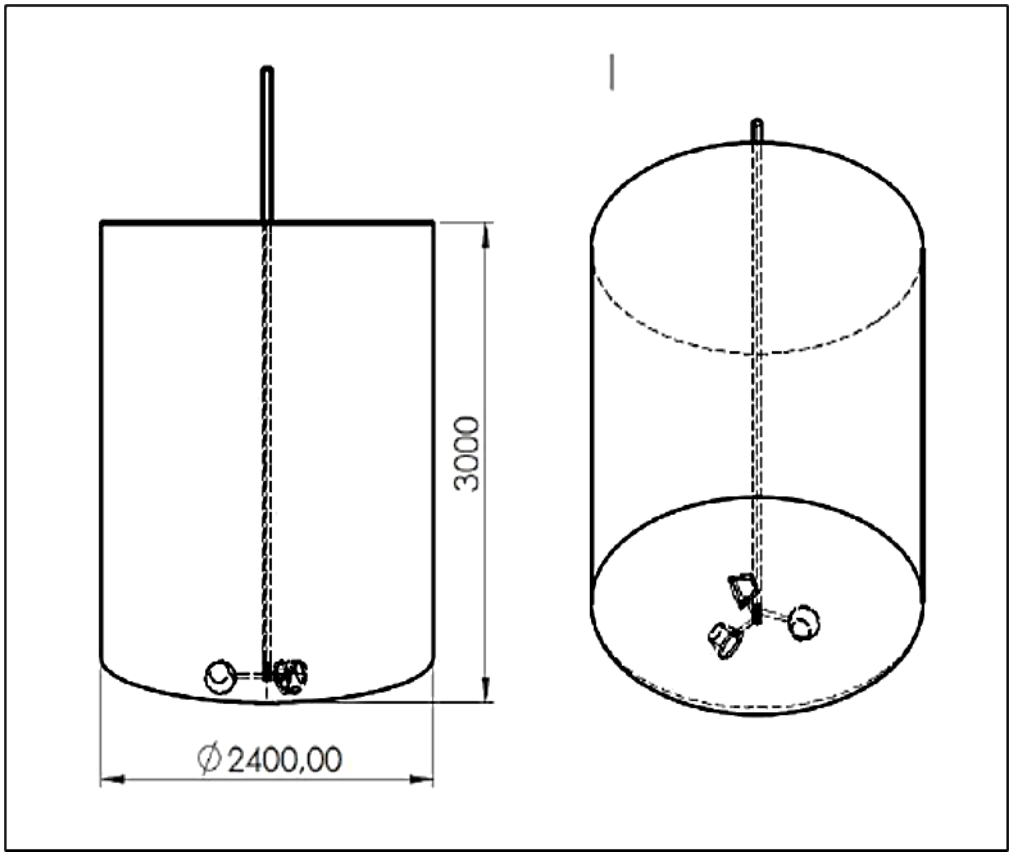


Fig. 3 Modelo del tanque de 12m^3 con el agitador ViscoJet

Tabla 2 Medidas del tanque de 12m^3 con el ViscoJet

Parámetro	Valor	Unidades
Diámetro del tanque (T)	2.4	m
Altura de Tanque (H)	3	m
Diámetro del impulsor (D)	900	mm
Holgura del impulsor (c)	146	mm

Como se mencionó anteriormente, para modelar rotaciones deben definirse dos regiones. Se crea una región de hilado cerca de los conos que los encierran y también de la proximidad más cercana.

La región estacionaria es el resto del volumen del fluido, separado de la región de giro con la interfaz. La Figura 4 muestra esta separación.



Fig. 4 Modelo utilizado con la interfaz que separa las dos regiones designadas

(*) La sección giratoria está marcada en amarillo.

2.2.2. Condiciones de contorno

La región giratoria (rotatoria) debe definir cómo interactúa el fluido con las paredes del agitador y las paredes inferiores del tanque. Dado que ambos son material sólido, el fluido no puede atravesarlo y, por tanto, debe definirse como pared.

Además, las partículas en contacto directo con la pared actúan según la ley de adhesión, que básicamente hace que estas partículas se adhieran a la pared.

Para tener en cuenta este efecto, se activa la condición de No Deslizamiento. Para calcular la rotación, el procedimiento varía según el enfoque utilizado. Cuando se utiliza MRF, debe aplicarse un Marco de Referencia Rotacional a toda la región.

Por otro lado, cuando SM es la metodología elegida, debe aplicarse un movimiento directo en forma de rotación a la malla. La rotación de este agitador se define como 30 rpm en sentido horario según el eje del eje.

Dado que esta rotación se aplica a todo el dominio de Spinning, la pared inferior incluida en esta región debe especificarse localmente para que no tenga rotación.

La región estacionaria contiene la superficie libre y el resto del pozo y las paredes que no están incluidas en la región de Spinning. Para las paredes, se aplica el mismo principio, por lo que se definen como muro, sin deslizamiento.

En la superficie libre existen interacciones con el aire. Para modelar correctamente este comportamiento, debe usarse VOF. Para reducir la complejidad computacional de esta frontera, la restricción se elige como Muro, Deslizamiento.

Esto no es más que una simplificación aproximada de la realidad que permite cierto movimiento de las fases deslizándose con la falsa pared superior.

Dado que la viscosidad del aire es baja, es más correcto modelar la pared con la condición de cizallamiento cero que con la de no deslizamiento. Sin embargo, hay que tener en cuenta que este tanque, a pesar de tener el agitador bastante bajo, no se desconcierta.

Como se pudo ver anteriormente, esto podría producir una altura inestable de la superficie libre al crear un vórtice de succión. Esta condición debe elegirse con precaución, ya que pueden derivar algunos errores de ella.

La región estacionaria incluye también el resto del eje que no se consideró en el dominio de hilado. Estas paredes tienen la condición de muro, sin deslizamiento, pero, además, deberían girar a 30 rpm en sentido horario. Dado que no se asigna

movimiento al dominio general, se le asigna una Rotación Relativa de la Pared con exactamente la tasa de rotación mencionada.

Finalmente, la interfaz está presente como la capa que conecta ambos dominios y se encarga de transferir cantidades entre las dos entidades.

Un resumen de todas las condiciones de contorno aplicadas puede verse en la Tabla 3.

Tabla 3 Condiciones de contorno del modelo ViscoJet

Límite de la región		**Condición límite**
Rotación		MRF: Marco de referencia móvil -30 rpm.
		SM: Movimiento. Velocidad de rotación constante: 30 rpm.
	Agitador	Pared. Antideslizante.
	Fondo	Pared. Antideslizante.
Estacionario		Marco de referencia del laboratorio (estacionario)
	Eje	Pared. Sin deslizamiento. Rotación relativa de la pared: -30 rpm.
	Parte superior	Pared. Deslizamiento.
	Paredes	Pared. Deslizamiento.

2.2.3. Ajustes del solucionador

Los continuos se crean utilizando los modelos mostrados en la Tabla 4. Con ellos, se define la física general que rige el comportamiento del sistema.

Tabla 4 Modelos generales para la configuración física.

Física		Modelo
Continua	Espacio	Tridimensional
	Fase	Líquido
	Régimen	Turbulento
	Densidad	Densidad constante (Agua ρl = 998 kg/m^3)
Modelos de turbulencia		Real keps, SST kw CC, LES
Solucionador de flujo		MRF: Flujo acoplado
		SM: Flujo segregado
Solucionador de tiempo		MRF: Estable
		SM: Implícito Inestable
		Real keps and SST-kw CC Timestep $\Delta t = 0.03s$
		LES timestep $\Delta t = 0.002s$
Modelos opcionales		Gravedad
		Multifase lagrangiano
		Modelo de Elementos Discretos (DEM) para simulaciones DEM
		Interacciones multifásicas (DEM) Contacto de Hertz-Mindlin

Se establecen tres modelos diferentes de turbulencia para este análisis del tanque. Como se puede ver, se realiza una sensibilidad del modelo con el objetivo de evaluar las diferentes predicciones que estos podrían ofrecer y, por tanto, la robustez de los resultados con la elección del modelo.

Los modelos elegidos fueron el realizable k − ε y SST k − ω, ambos con la corrección de curvatura activada. Además, el LES también se realiza para incluir un modelo más avanzado en el análisis.

Como solucionadores de flujo, la MRF se resuelve con flujo acoplado para obtener una solución inicial de los campos. Una vez convergidos, esta solución se utiliza como punto de partida para SM, que utiliza flujo segregado. Esta elección de modelos se basó en las recomendaciones de Star-CCM+.

En general, el solucionador acoplado mostró mayor estabilidad al ejecutar MRF, lo que permitió una convergencia más suave de los residuos, gracias a la resolución simultánea de las ecuaciones.

Por otro lado, el flujo segregado mostró buena convergencia al ejecutar SM, requiriendo al mismo tiempo menos esfuerzo computacional. En cuanto al paso temporal para simulaciones inestacionaria, se elige como ∆t = 0,03s, cuando se utilizan modelos turbulentos de RANS.

Este valor se obtiene en función de las frecuencias que se querían resolver. Dado que las frecuencias más altas no resultaron interesantes para el proyecto, el paso de tiempo se establece completamente en función de la velocidad de rotación del agitador y del muestreo deseado para resolver correctamente estas frecuencias.

En este caso específico, se deseaban 20 pasos de tiempo por cada pasada de pala. De este modo, las frecuencias más altas no se resuelven, y el problema de separación de escalas presente en URANS puede aparecer en menor medida.

Por otro lado, al ejecutar LES, la elección del paso temporal debe asegurar que el número de Courant-Friedrichs-Levi esté siempre por debajo de 1, para resolver correctamente las escalas pequeñas. El paso de tiempo en este caso se reduce a $\Delta t = 0{,}002$ tras un breve conjunto de intentos y monitorización CFL.

2.2.4. Configuración de partículas

Cuando se necesita simulación con partículas, se deben incluir nuevos modelos para predecir el comportamiento de la partícula. Para esta combinación agitador-tanque, se ejecutan los casos 1WC LPT y 1WC DEM. Esta decisión se ha tomado a partir de las conclusiones vistas en la tesis anterior [13], donde 2WC no parecía mejorar significativamente las predicciones.

En la Tabla 5 se enumeran los ajustes de partículas para las simulaciones 1WC-LPT. Las partículas utilizadas modelan las usadas en los experimentos y, por tanto, sus características se definen en la Tabla 1. Para los estudios de partículas, se inyectan un total de 70.000 partículas.

Dado que no se calculan colisiones de partículas en LPT, no hay más información necesaria relacionada con las interacciones de partículas. El conjunto de fuerzas activadas también se enumera en la Tabla 5. Con ellos, se resolverán las ecuaciones de movimiento de partículas.

El LPT se compara entonces con un segundo método, utilizando en este caso el MNE. El acoplamiento con la fase sigue siendo 1WC, sin entonces interacción en la dirección del fluido partícula. En la Tabla 6 se pueden ver los ajustes para este caso.

Tabla 5 Configuración física del modelo ViscoJet 1WC LPT

1WC LPT	
Modelo	**Valor/Tipo (si corresponde)**
Sólido multifásico lagrangiano	Partículas de material
Densidad constante	$\rho s = 1140\ kg/m^3$
Fuerza de arrastre	Schiller-Naumann
Fuerza de gradiente de presión	
Fuerza de elevación por cizallamiento	Sommerfeld
Fuerza de masa virtual	
Dispersión turbulenta	

Tabla 6 Configuración física del modelo DEM 1WC de ViscoJet

1WC DEM	
Modelo	**Valor/Tipo (si corresponde)**
Sólido multifásico lagrangiano	Partículas DEM
Densidad constante	$\rho s = 1140 kg/m^3$
Partículas esféricas	d = 2.626mm
Fuerza de arrastre	Schiller-Naumann
Par de arrastre	Sommerfield
Fuerza de gradiente de presión	
Fuerza de sustentación por cizallamiento	Sommerfield
Fuerza de sustentación por giro	Sommerfield
Fuerza de masa virtual	
Dispersión turbulenta	

2.2.5. Criterios de parada

Los criterios de parada controlan cómo se comporta la ejecución de la simulación. Monitorizar cómo convergen los residuos o diferentes parámetros de ingeniería como el par motor es lo que últimamente define si una solución es correcta. Los criterios de parada se establecen para cumplir esa tarea.

Para controlar la convergencia de la solución, se establecen los criterios expuestos en la Tabla 7.

Los residuos monitorizados son el error de continuidad y la Tasa Específica de Disipación (Sdr). Generalmente, los criterios son más flexibles para casos inestacionarios, por lo que se puede observar un aumento sutil en la tabla mencionada anteriormente.

Tabla 7 Criterios de parada establecidos para las simulaciones

Monitor	Tipo	Valor	Regla lógica
Continuidad	Mínimo	MRF: 1×10^{-5} SM: 5×10^{-5}	Y
Sdr	Mínimo	MRF: 1×10^{-3} SM: 5×10^{-3}	Y
Torque	Asintótica	1.00×10^{-3}	Y
Número máximo de iteraciones internas (casos inestables)	[-]	70	O

Además de los residuos, algunas variables de ingeniería deben ser monitorizadas para asegurar que los parámetros de interés también estén en un nivel de error correcto. En este caso, la variable de ingeniería a monitorizar es el par motor.

Estableciendo los criterios especificados en la Tabla 7, este parámetro se ve obligado a converger dentro de cada paso de tiempo. En la Figura 5 se puede ver cómo se logra la convergencia para cada conjunto de iteraciones.

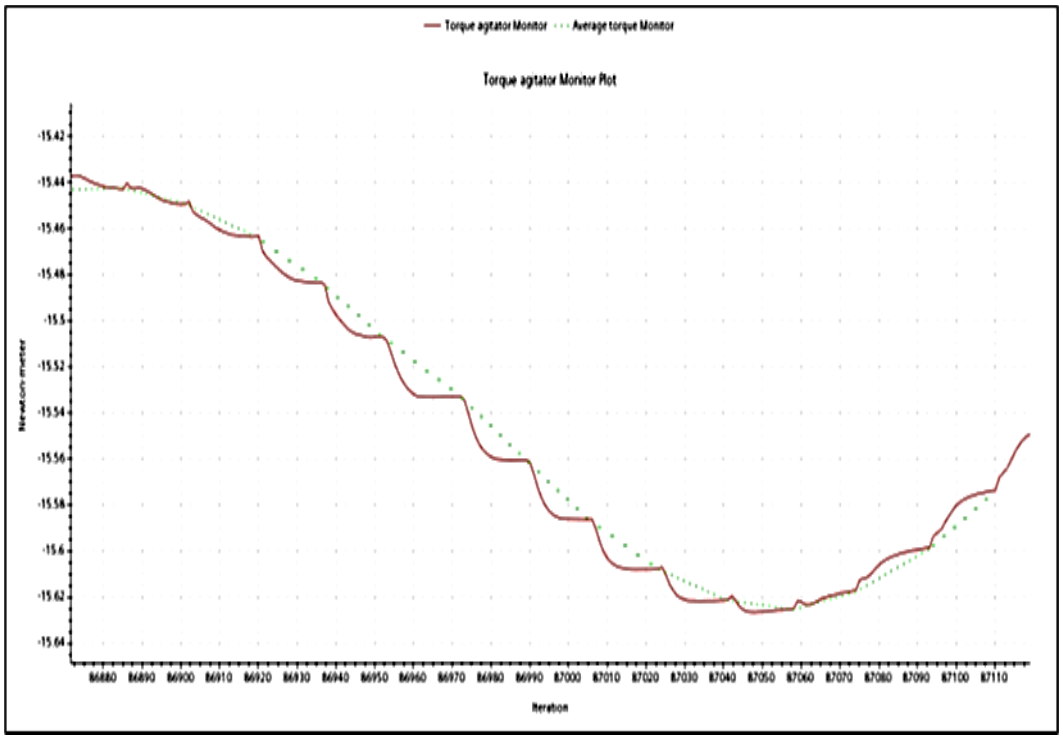


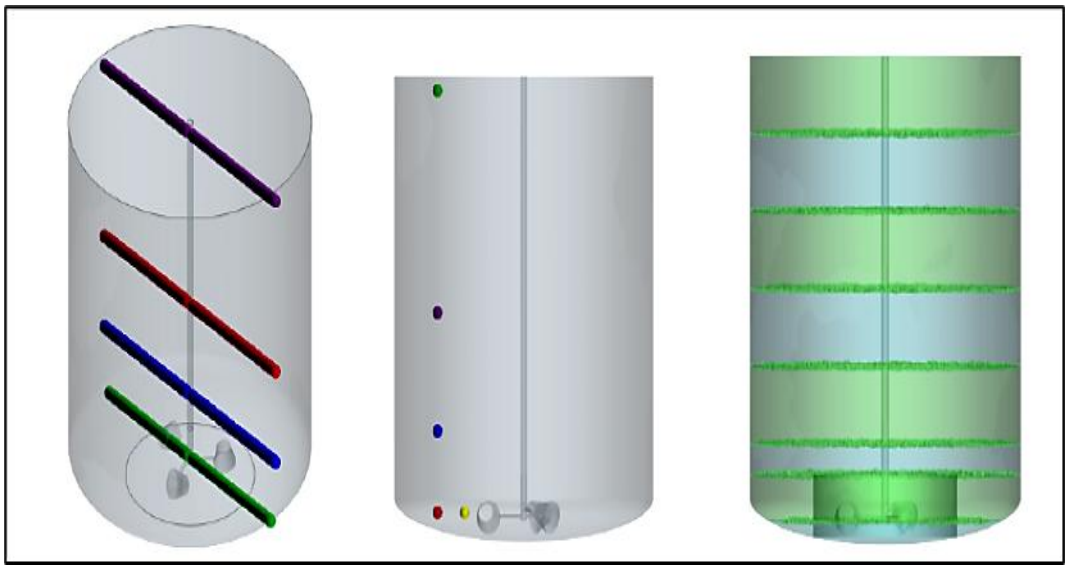
Fig. 5 Convergencia de par con los criterios de parada establecidos.

2.2.6. Post-procesado

Junto con el dominio, diferentes sondas se sitúan para post-procesar la información durante la ejecución de la simulación y después de su finalización. Estas sondas deben situarse estratégicamente para capturar correctamente los efectos y comportamientos deseados y no perder información importante.

El tanque equipado con el agitador ViscoJet es completamente simétrico y, por tanto, se espera un flujo axisimétrico. Debido a estas condiciones especiales, la cantidad total de sondas se reduce a unas pocas secciones y planos, pudiendo entender a partir de ellos el comportamiento de todo el dominio.

En la Figura 6 se representan diferentes líneas y puntos utilizados para monitorizar variables. Como se puede observar, tanto las líneas como los puntos están situados en el plano de la sección transversal, discretizando la altura del dominio. Con estas divisiones, se pueden rastrear los campos de flujo de interés.



(a) Líneas horizontales. Verde 0m. Azul 0:55m. Rojo 1:35m. Morado 2:8m. Origen a la altura del impulsor.

(b) Puntos. La altura de los puntos corresponde a las líneas.

(c) División de volúmenes de fluidos para análisis de partículas.

Fig. 6 Sondas para post-procesamiento

Al tratar con partículas, el análisis se basa en identificar cómo estos sólidos se dispersan a lo largo del dominio. Para entender cuán homogénea es la mezcla, se monitoriza la distribución de alturas de las partículas.

Para hacer esto correctamente, el dominio se divide en secciones donde se contarán las partículas y se compararán con el volumen del fluido. Esta división puede verse en la Figura 6c.

2.2.7. Malla

Para resolver la PDE4 vista ya, el modelo se discretiza en tiempo y espacio. En esta sección se analiza la malla que subdivide el dominio en elementos.

Para el tanque equipado con el ViscoJet, se realiza una sensibilidad de malla. Con ella, se inspecciona la independencia de los resultados con la malla. Se estudian cuatro mallas diferentes. La configuración general de estos está definida en las Tablas 8 y 9.

Tabla 8 Controles predeterminados del mallado.

Control predeterminado	Modo	Valor
Tamaño base	-	(Dependiente de caso) m
Tamaño de superficie objetivo	Relativo al tamaño base	100%
Tamaño mínimo de superficie	Relativo al tamaño base	10%
Número de capas prismáticas	[-]	5
Grosor total de la capa prismática	Relativo al tamaño base	17.86%
Tamaño máximo del Tet	Relativo al tamaño base	60%

Tabla 9 Refinamientos locales de la malla

Superficie	Refinamiento local	Modo	Valor
Agitador	Capas de prisma	[-]	5
	Tamaño de superficie objetivo	Relativo al tamaño base	10
Eje	Capas de prisma	[-]	5
	Tamaño de superficie objetivo	Relativo al tamaño base	10
Superficie libre	Capas de prisma	[-]	3
	Tamaño de superficie objetivo	Relativo al tamaño base	50
Interfaz	Capas de prisma	[-]	0
Paredes	Capas de prisma	[-]	2
	Tamaño de superficie objetivo	Relativo al tamaño base	50

Las cuatro mallas estudiadas comparten la misma configuración predeterminada debido a múltiples hallazgos de la tesis anterior en Tetra Pak. La malla es poliédrica, con capas prismáticas para resolver correctamente el flujo cerca de las paredes.

Como contexto general, se eligen cinco capas prismáticas para todo el dominio. El parámetro llamado Tamaño de Base definido en unidades de longitud es una dimensión característica que sirve como referencia.

La mayoría de los refinamientos y controles son relativos a este valor y, por tanto, al cambiar este Tamaño de Base, la malla se ve afectada paramétricamente.

Sin embargo, para aumentar la precisión del rendimiento global de la iteración, se incluyen diferentes refinamientos en el proceso de mallado. Cada superficie importante se refina según sus requisitos. El agitador y el eje, debido a su generación de turbulencia, se refinan para tener un tamaño de superficie objetivo menor.

Las capas prismáticas se mantienen en cinco. Al otro lado. Las proximidades de las paredes también se refinan, siendo el tamaño objetivo de la superficie del 50% del tamaño de base especificado.

También es notable que la interfaz esté configurada para eliminar las capas generales de prisma. Al ser un muro virtual, no hay capas prismáticas de interés cerca de ese límite.

Teniendo entonces cada refinamiento y control por defecto escalado con el tamaño de la base, las cuatro mallas mencionadas varían precisamente ese parámetro.

Los diferentes tamaños de base elegidos pueden verse en la Tabla 10 junto con el número total de celdas. Por otro lado, las diferentes mallas en una sección transversal del modelo se exponen en la Figura 7, donde es posible ver cómo aumentan significativamente las celdas.

Tabla 10 Mallas utilizadas en el análisis de ViscoJet

Malla	Nombre	Tamaño base	Número de celdas
1	Extrafino	0.033	7M
2	Fino	0.05	4M
3	Grueso	0.075	2M
4	Extra grueso	0.2	1.3M

El objetivo principal de este análisis de sensibilidad de malla es comprender el número mínimo de celdas que permitan un buen equilibrio entre el tiempo computacional y la precisión de los resultados.

Optimizar la malla es uno de los pasos clave al modelar debido a sus importantes beneficios en ahorro de tiempo y evitación de errores.

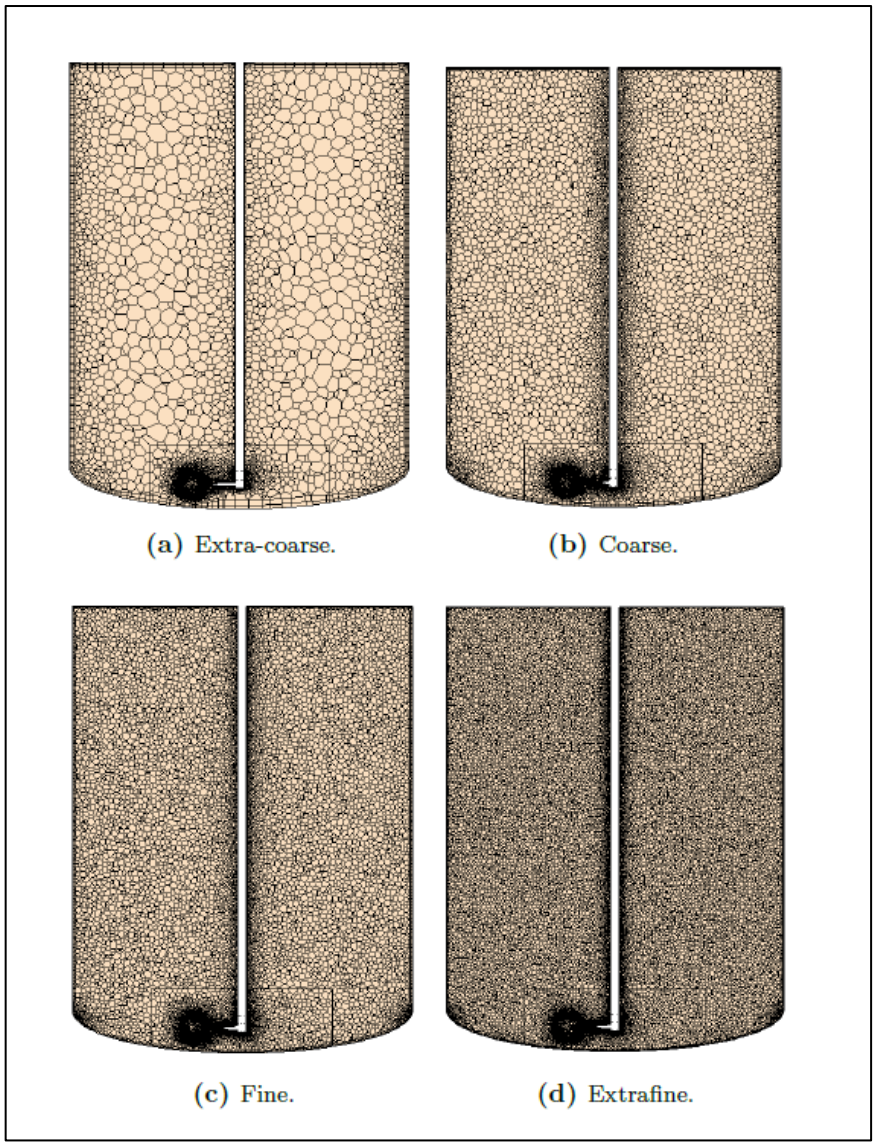


Fig. 7 Análisis de sensibilidad de mallas. Mallas usadas para el depósito ViscoJet.

2.2.8. Análisis de sensibilidad de malla

Se realiza un análisis de independencia de malla para seleccionar la mejor configuración de tamaño de base. La variación en el tamaño de la base cambia la densidad total de celdas en la malla.

Al variar esta densidad, se produce un cambio claro en la precisión de la resolución, ya que se pueden resolver diferentes escalas de longitud. Las mallas probadas se han presentado en la sección anterior, expuestas en la Tabla 10.

SST k − ω se utiliza como modelo de turbulencia. Como se explicó anteriormente, se obtiene una primera solución estable mediante el enfoque MRF usando la malla fina.

Esta solución se utiliza para inicializar los campos en cada malla presentada en la Figura 7. Por lo tanto, la solución inicial es siempre común para cada malla probada. La inestabilidad se mantiene hasta que se determina que el transitorio ha terminado y se alcanza la estabilidad predicha por SM.

Para determinar la independencia de la malla, se monitorizan y comparan los campos de velocidad y el par. Este conjunto de parámetros define correctamente la predicción de los campos de flujo y la física dentro del tanque.

Las velocidades de magnitud estable obtenidas se comparan en un conjunto diferente de líneas horizontales (presentadas en la Figura 6) para cada malla. Estos resultados se presentan en la Figura 8.

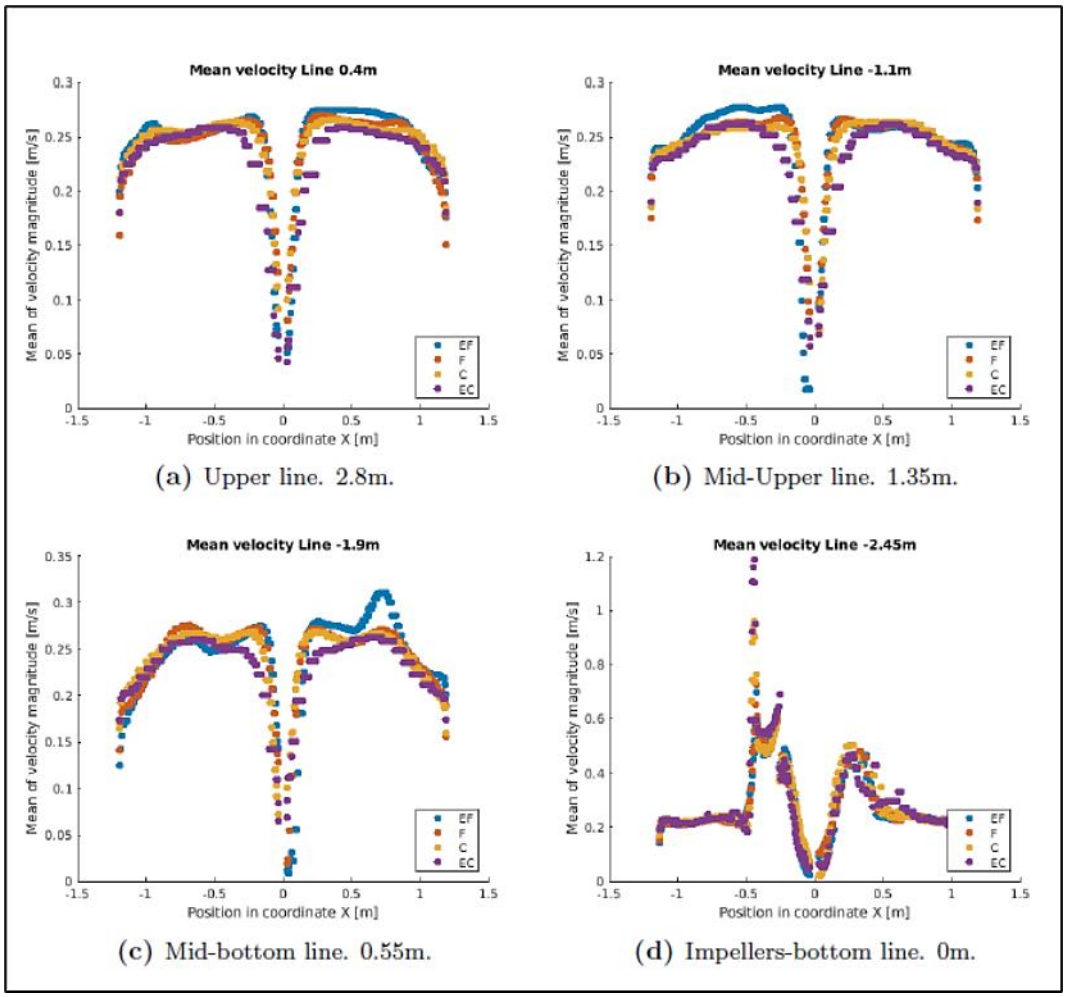


Fig. 8 Análisis de sensibilidad de malla VJ. Magnitud de velocidad a lo largo de líneas horizontales.

Por otro lado, también se comprueba la evolución del par durante el transitorio y su resultado, para cada malla, puede verse en la Figura 9.

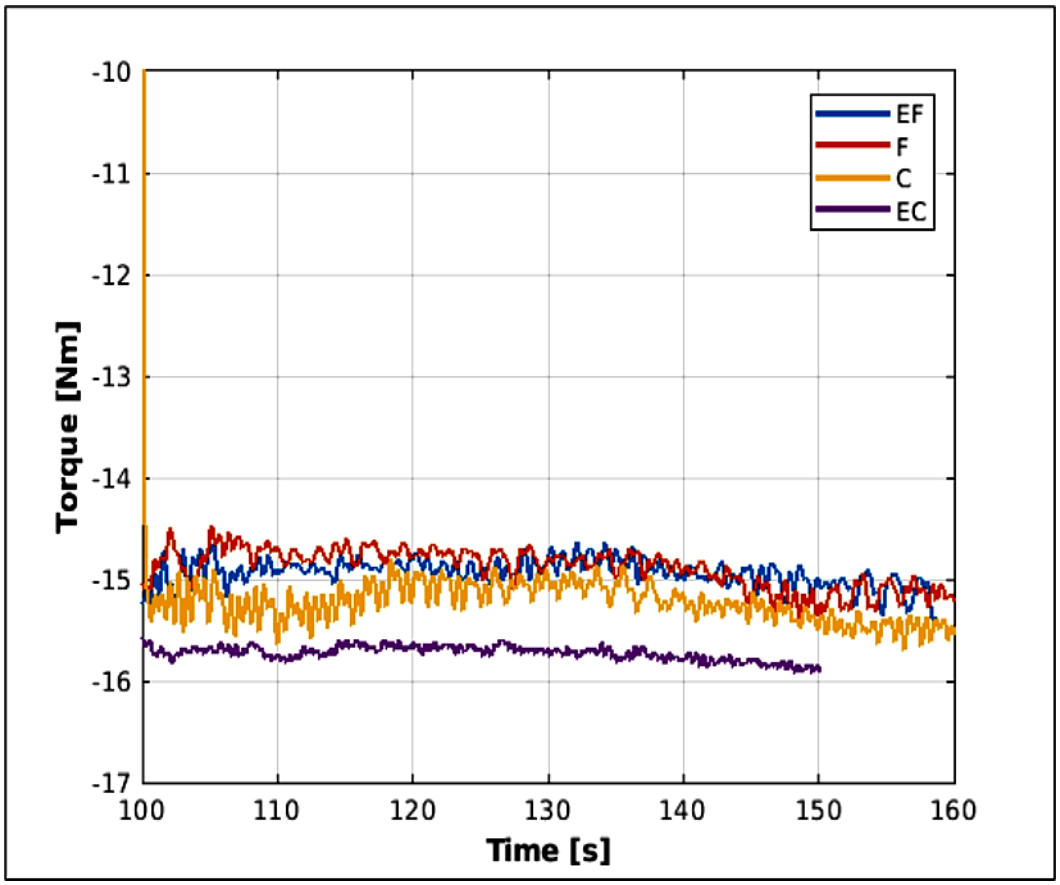


Fig. 9 Transitorio de par para diferentes mallas.

Las cifras de magnitud de velocidad presentes en la Figura 8 sugieren una dependencia relativa de la malla. Las velocidades de magnitud predichas a lo largo de las líneas coinciden sustancialmente bien, pero existen algunas diferencias.

El campo de flujo obtenido es ciertamente homogéneo, no existe una gran diferencia en los perfiles de velocidad ni en los valores absolutos de la velocidad para la parte superior del tanque. Así, las figuras superior izquierda y superior derecha se parecen.

El flujo se altera más en las partes bajas del tanque. Las velocidades se predicen ligeramente por encima de la malla Extrafina, en comparación con las Finas y Gruesas.

Por otro lado, la malla extra-gruesa muestra generalmente un menor gradiente de velocidad en el entorno del eje, así como una velocidad global más baja. La figura 8d muestra que el flujo está muy alterado debido al efecto cono del agitador.

Todas las mallas parecen predecir correctamente su efecto, ya que la coincidencia de las líneas es notable.

La evolución del par también muestra el correcto rendimiento de cada malla. La comparación de transitorios mostrada en la Figura 9 expone lo cerca que está el valor estable previsto entre las mallas probadas. En este caso, sin embargo, se puede observar una desviación considerable al usar el Extra-grueso.

Cabe mencionar que no se logran soluciones completamente estables, ya que el flujo parece presentar inestabilidad de baja frecuencia. Una media simple de la serie temporal de par se presenta en la Tabla 11, junto con la diferencia respecto a la malla fina.

Las mallas extra-finas y finas están relativamente cercanas, mientras que las gruesas y extra-gruesas se inclinan hacia la diferencia del 3%.

Tabla 11 Par y diferencia media con la malla fina.

Malla	Torque medio (Nm)	Diferencia (%)
EF	-14.94	1.1%
F	-15.10	0.0%
C	-15.57	3.1%
EC	-15.70	3.9%

Los resultados obtenidos muestran un rendimiento general bueno de cada malla. No se observan grandes variaciones en ninguno de los casos, lo que predice casi por igual los perfiles de velocidad y el par motor. Sin embargo, al elegir el más adecuado, deben discutirse diferentes valoraciones.

Los resultados de par grueso y extragrueso de la Tabla 11 sugieren que no son las mejores opciones. Fine y Extra-Fine, en cambio, están más cerca y, por tanto, son más interesantes de usar. Sin embargo, observando los perfiles de velocidad, no hay diferencias significativas en el rendimiento de las mallas gruesas y finas.

Por tanto, el cambio de par no cambia las predicciones del campo de forma significativa. La malla extra-gruesa muestra resultados más desviadores tanto en las Figuras 8 y 9.

Basándose en las discusiones anteriores, se utiliza la malla gruesa en las simulaciones. Esto, debido a sus buenas predicciones del campo de velocidad, a

pesar de la pequeña diferencia de par; y también la reducción del número de celdas.

2.3. Modelado CFD - Magnético

Junto con el ViscoJet, se utiliza otra combinación tanque-agitador para comparar metodologías y resultados generales. Este tanque presenta una topología completamente diferente.

El agitador está situado en la parte inferior con un desplazamiento. El tipo agitador es más pequeño y, por tanto, requiere una mayor velocidad de rotación.

2.3.1. Modelo Geométrico

El segundo tanque analizado tiene el mismo volumen total, 12 m^3. Sin embargo, la geometría del tanque es ligeramente diferente, como se muestra en la Figura 10.

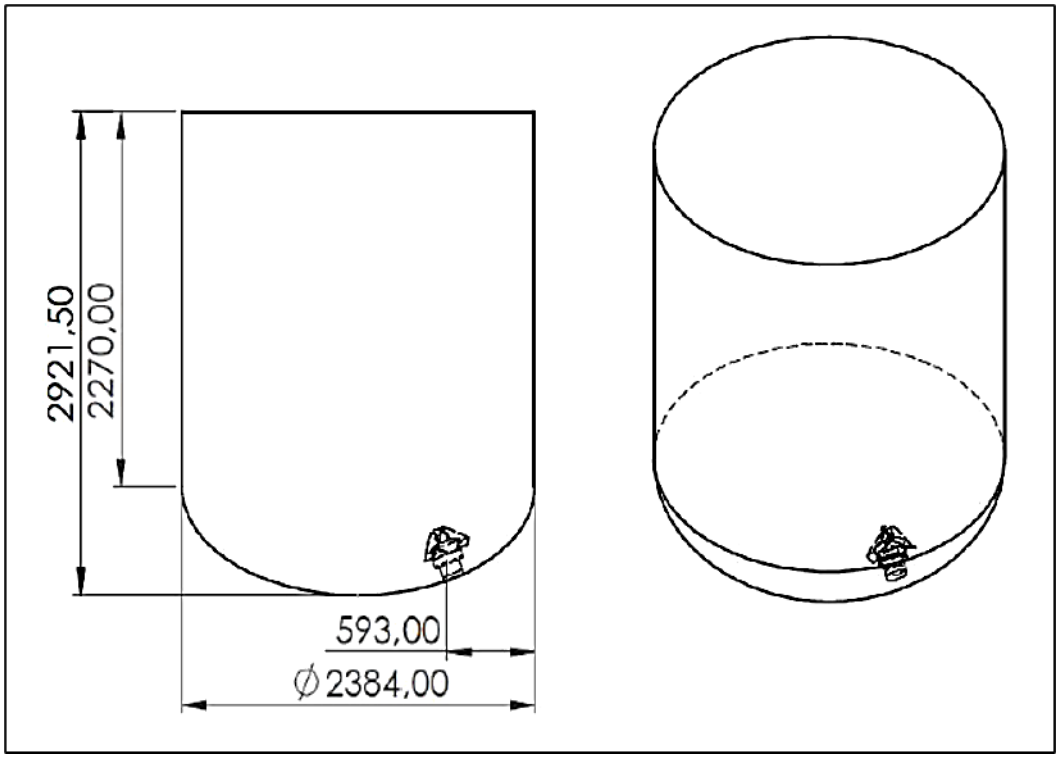


Fig. 10 Modelo del tanque de 12m^3 con agitador magnético.

Este tanque tiene una altura baja pero es más ancho, por lo que tiene una relación T/H más cuadrada. La parte inferior es más curva, con un radio menor elíptico mayor.

En este caso, el agitador está situado descentrado y inclinado con un cierto ángulo. La Figura 11 muestra la geometría del agitador magnético.

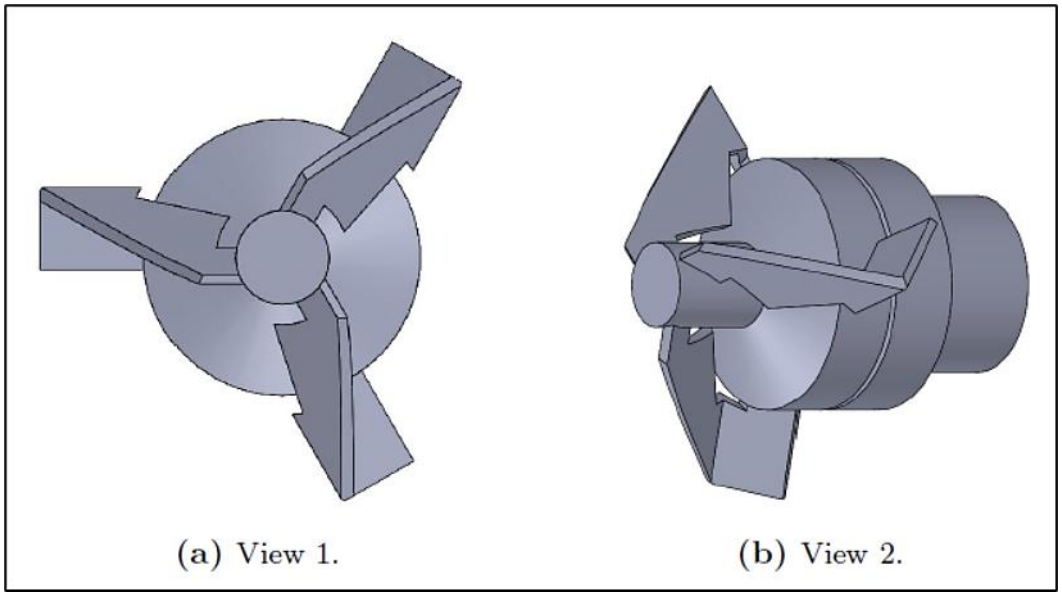


Fig. 11 Geometría detallada del impulsor magnético.

La Figura 10 muestra las magnitudes más importantes que definen la ubicación del tanque y del agitador. Para modelar los movimientos, se crean dos regiones. Una región giratoria modela la rotación creada por el impulsor y, por tanto, la geometría encierra el impulsor y su volumen de fluido más cercano.

Luego, una interfaz conecta la región giratoria con el resto del volumen, que está estacionario. En la Figura 12, se pueden ver ambas regiones.

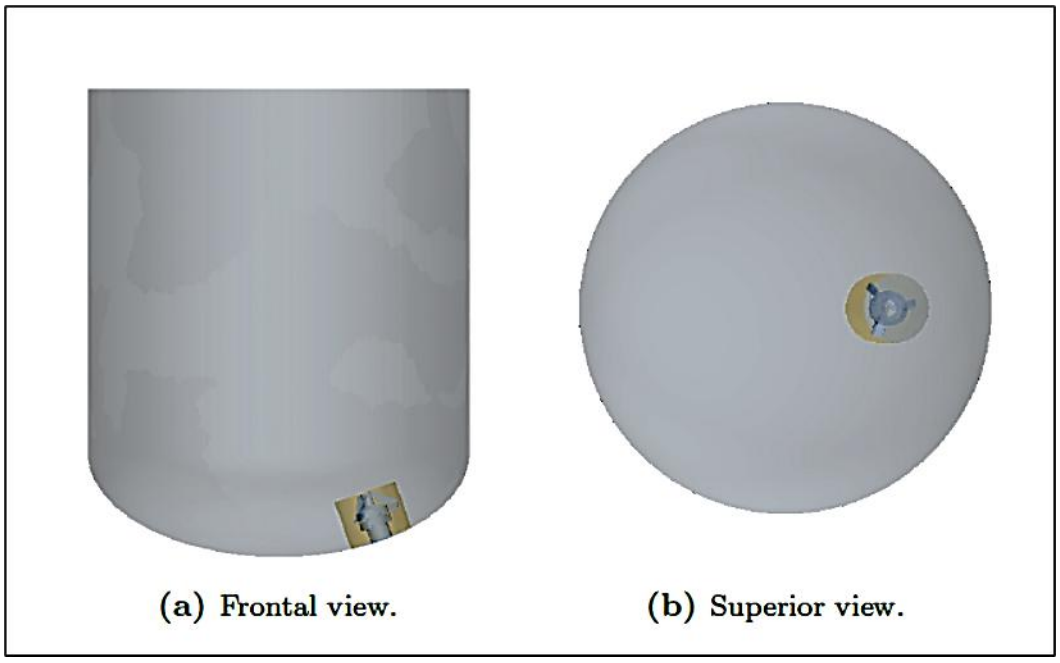


Fig. 12 Regiones definidas para el modelo de tanque magnético.

2.3.2. Condiciones frontera

Cada frontera de las regiones definidas requiere una restricción para que se resuelvan las ecuaciones. Estas condiciones definen la física del modelo. Dado que existen dos dominios, deben definirse diferentes restricciones para cada uno, según el número de límites que estén encerrados.

En la Tabla 12, se define cada frontera.

Tabla 12 Condiciones de contorno del modelo magnético.

Límite de la región		**Condición límite**
Rotación		MRF: Marco de referencia móvil -240 rpm.
		SM: Movimiento. Velocidad de rotación constante -240 rpm.
	Agitador	Pared. Antideslizante.
	Fondo	Pared. Antideslizante.
Estacionario		Marco de referencia del laboratorio (estacionario)
	Parte superior	Pared. Deslizamiento.
	Paredes	Pared. Antideslizante.

La región estacionaria incluye el límite de superficie libre y las paredes del tanque. Como se mencionó anteriormente, la pared normalmente se modela como pared, sin deslizamiento, según la ley de adhesión. La superficie libre del otro lado se aproxima como un muro, deslizamiento, por lo que el límite se simplifica y no se requieren modelos más complejos como el VFO.

Esta solución es una aproximación cercana y asume que la superficie libre es estable y no tiene movimientos importantes. Para la región de giro, se establece un Marco de Referencia Móvil que gira en sentido horario a 240 rpm para los estudios MRF. Para lograr el movimiento correcto del sistema, se crea otro Marco de Referencia ubicado como en la Figura 13.

Este sistema de referencia puede rotarse alrededor del eje Y para girar correctamente el dominio. Por otro lado, en los casos de SM se especifica un movimiento con la misma velocidad de rotación.

Dado que todo el dominio tiene un movimiento definido, la parte restante de la pared del tanque encerrada por la región giratoria tiene, aparte de la pared, condición de No Deslizamiento, un Marco de Referencia Local Estacionario, que impide su rotación. Finalmente, el agitador se considera un Muro, Sin Deslizamiento.

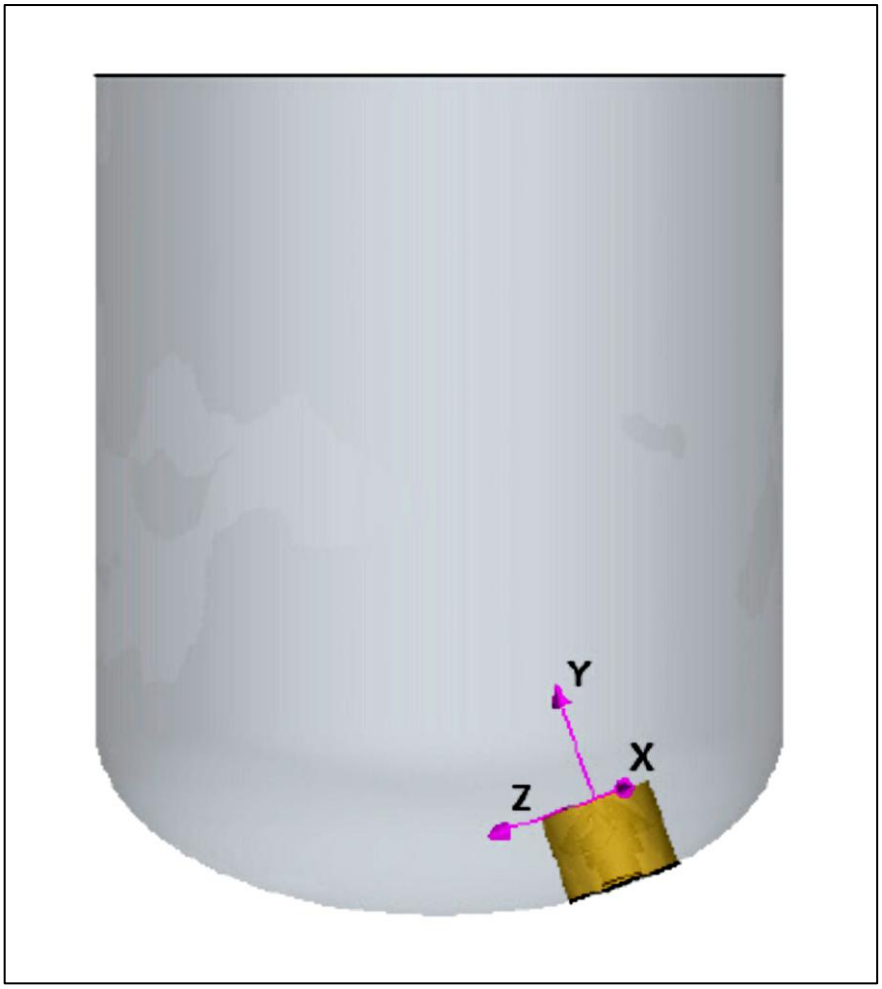


Fig. 13 Sistema de coordenadas para modelar el movimiento del dominio de Spinning.

2.3.3. Malla

El dominio se subdivide en elementos donde se resuelven las ecuaciones. Para el análisis de este tanque, se utilizan dos mallas, donde la diferencia principal es el tamaño de la base de las celdas y, por tanto, el número total de elementos. Esto se detalla en la Tabla 13.

Tabla 13 Características de malla para la caja del tanque magnético.

Malla	Nombre	Tamaño base [m]	Número de celdas
1	Fino	0.050	3.4M
2	Grueso	0.075	1.1M

El tipo de malla es poliédrico ya que suele ser más eficiente en términos de tiempo de convergencia y robustez. Las capas prismáticas están activas para resolver el flujo cercano a la pared.

El mallado se lleva con los ajustes mostrados en las Tablas 8 y 9. Estos ajustes se aplican al tanque ViscoJet y al tanque magnético.

Se utiliza una malla fina para calcular los campos de flujo. Por otro lado, para el análisis de partículas, para reducir el tiempo computacional, la malla se engrosa aumentando el tamaño de la base.

Ambas mallas pueden verse gráficamente en dos secciones transversales del tanque representadas en la Figura 14.

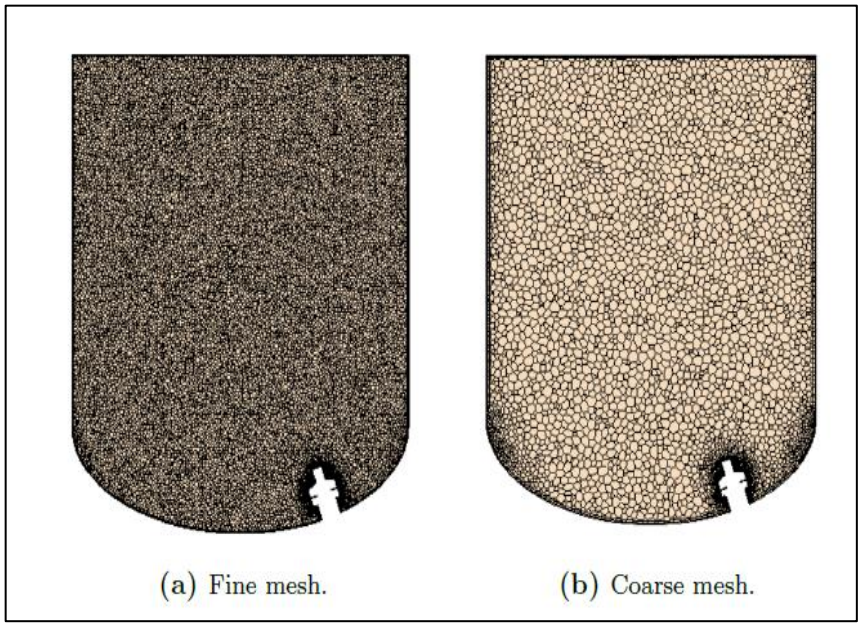


Fig. 14 Mallas utilizadas en el análisis de tanques magnéticos.

El tamaño de la base que escala paramétricamente los refinamientos y el tamaño de la celda se expone en la Tabla 13, donde también se muestra el número total de celdas.

2.3.4. Ajustes del Solver

El Solver activado para simular la física correcta se exponen en la Tabla 14. La mayoría de los modelos activados son comunes con la caja ViscoJet5, ya que el fluido y las partículas introducidas son los mismos.

Tabla 14 Física de las cajas de tanques magnéticos.

Física		**Modelo**
Continua	Espacio	Tridimensional
	Fase	Líquido
	Régimen	Turbulento
	Densidad	Densidad constante (Agua ρ_l = 998 kg/m^3)
Modelos de turbulencia		SST kw CC
Solucionador de flujo		MRF: Flujo acoplado
		SM: Flujo acoplado
Solucionador de tiempo		MRF: Estable
		SM: Implícito Inestable
		SST-kw CC Timestep $\Delta t = 0.04s$
Modelos opcionales		Gravedad
		Multifase lagrangiano
		Modelo de Elementos Discretos (DEM) para simulaciones DEM Interacciones multifásicas (DEM) Contacto de Hertz-Mindlin

Sin embargo, dado que el agitador gira a una velocidad de rotación mayor, el paso de tiempo para capturar la frecuencia de la pala tuvo que disminuirse. Al usar 20 muestras de cada pasada de pala, el paso de tiempo se establece en Δt = 0,004s. Además, el flujo segregado se comportó de forma errática en este caso, por lo que los casos de la SM se resuelven usando flujo acoplado.

Los hallazgos observados para el tanque ViscoJet, juntos que en la tesis anterior [13], ayudan a elegir el modelo turbulento. Así, el SST k − ω con corrección de curvatura es el modelo seleccionado.

La metodología seguida calcula una solución estable inicial para los campos usando MRF. Luego, se ejecuta un transitorio que cambia a SM para entender la inestabilidad del flujo, si existe.

Una vez conocidos e identificados los campos de flujo, se realizan simulaciones de partículas para ver el rendimiento de este agitador en la mezcla.

2.3.5. Configuración de partículas

El método seguido con las partículas para este tanque es completamente análogo al de ViscoJet. Por lo tanto, las características de las partículas pueden observarse en la Tabla 6 para las de MNE.

Se inyectan el mismo número de partículas, 70.000, en el tanque, para comparar con sinceridad las diferencias, ya que ambos tanques tienen aproximadamente el mismo volumen de fluido. Por tanto, en ese análisis se pueden usar fracciones masa/volumen.

2.3.6. Criterios de parada

Los criterios de parada seleccionados también pueden verse en la Tabla 7. El objetivo de este criterio es detener las iteraciones internas y globales cuando la solución converge.

Algunos controles de residuos se configuran para saber que las ecuaciones que gobernan se están resolviendo correctamente. Por otro lado, la convergencia de par también se comprueba en cada paso de tiempo.

2.3.7. Post-procesado

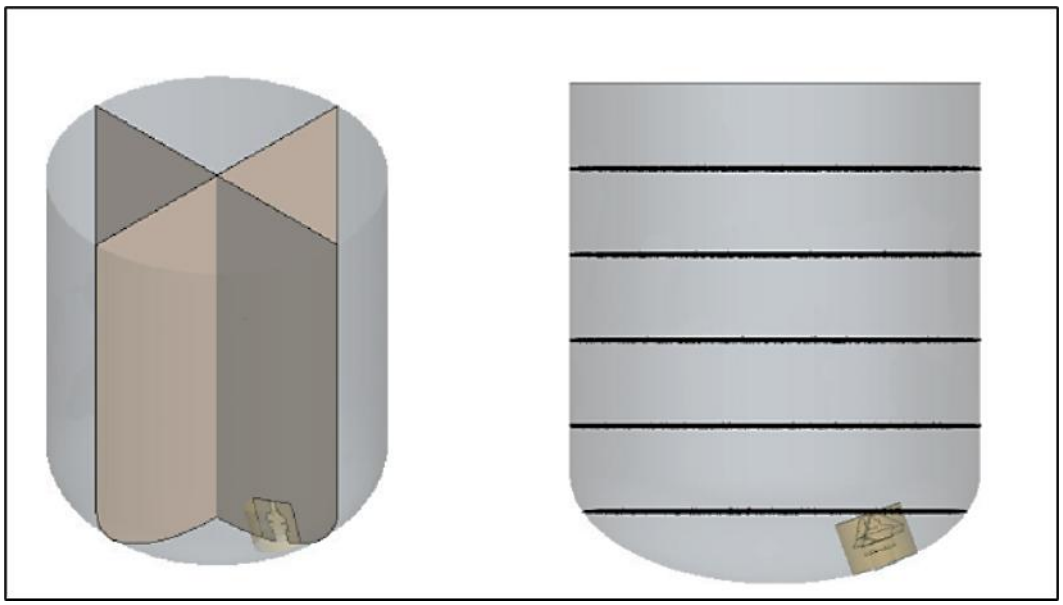
El post-procesado del tanque magnético se realiza de manera similar a lo que se puede ver en el ítem 2.2.6.

La parte más relevante para el análisis son los dos conjuntos de planos representados en la Figura 15.

En este caso, debido a la posición del agitador, no se espera que el flujo sea axisimétrico y, por tanto, se utiliza un conjunto de planos de 90°. Uno cruza la sección del impulsor.

Para realizar el análisis axial de partículas, se define un conjunto de volúmenes, discretizando en altura el tanque (Figura 3.15.).

Esto se utiliza para evaluar las partículas dentro de cada sección de volumen, comparadas con el número total de partículas inyectadas.



(a) Planos. Sección transversal y sección lateral. (b) Secciones de volumen.

Fig. 15 Sondas para post-procesamiento. Carcasas de tanques magnéticos.

III. RESULTADOS

3.1. Estructura y simulación

3.1.1. Propiedades del fluido

Dado que este problema consta de dos etapas, intervienen dos fluidos. El primero representa el entorno, denominado aire. El segundo es el fluido que se desplaza, que, para simplificar, es agua.

Otros fluidos, como la glicerina, también intervienen para generar la curva de potencia (Np vs. Re). Todos estos fluidos se presentaron en condiciones estándar. Las propiedades del fluido son importantes porque permiten determinar el número de Reynolds. Las tablas 15, 16 y 17 muestran las propiedades del fluido.

Tabla 15 Data importante 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 16 Data importante 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-05 [kg m^{-1} s^{-1}]
ESTADO DE REFERENCIA	
Presión de referencia	1 [atm]
Referencia de Temperatura	25 [C]

Tabla 17 Data importante del agua

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]

3.1.2. Definición del modelo de turbulencia

La elección del modelo de turbulencia en el estudio de la dinámica de fluidos es importante, ya que una decisión correcta permite predicciones más realistas y precisas. Dado que no existe un modelo de turbulencia específico para cada tipo de problema, este se modela utilizando los tres modelos de turbulencia mejor identificados en estudios previos y por ANSYS CFX v. 14.0: los modelos de turbulencia k-ε, k-ω y SST.

La selección del mejor modelo de turbulencia que describe los resultados más precisos se realiza mediante la construcción de una curva de potencia (Re vs Np) y su comparación con la curva experimental obtenida por Chemineer para impulsores PTB.

3.1.3. Diseño CAD de geometrías e interacción con ANSYS CFX v. 14.0.

La creación de un volumen de control de fluidos se puede realizar con cualquier software CAD, por ejemplo, SolidWorks, Autodesk Inventor, Solid Edge, AutoCAD 3D, SpaceClaim, entre otros.

En este ESTUDIO, para evitar errores en la generación de geometría, se modeló todo el dominio del tanque agitado utilizando Design Modeler (DM), un software CAD de ANSYS, especificando sus herramientas de corrección de precisión del generador y preparándolo para simulaciones de elementos finitos.

Dentro del dominio general del tanque se encuentran dos subdominios. El primero es el volumen del impulsor (Figura 17). El segundo es el volumen del tanque

(Figura 18). Para modelar el dominio del impulsor, se requiere su geometría (Figura 16). Luego, al crear una región envolvente cilíndrica y restar el volumen negativo de la geometría del impulsor, se obtiene el dominio del impulsor.

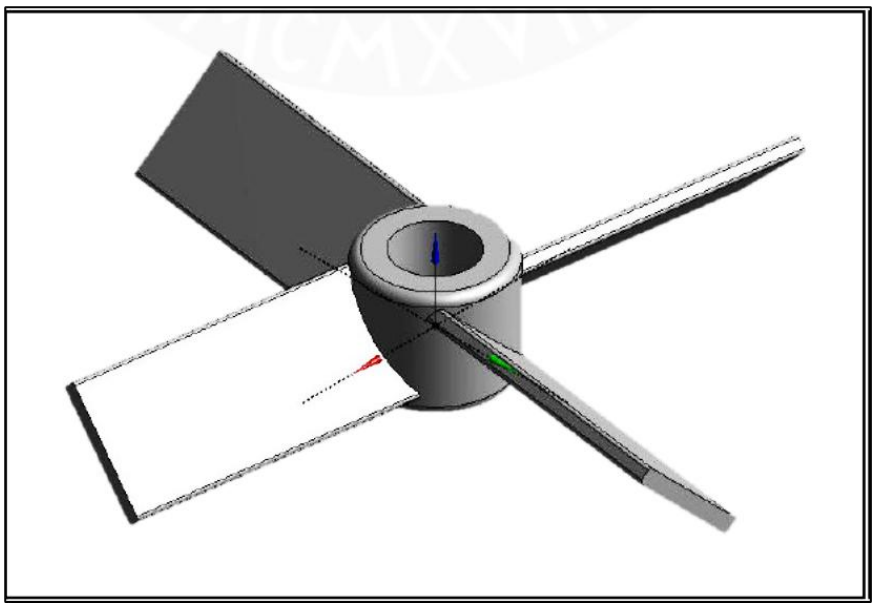


Fig. 16 Geometría del impulsor

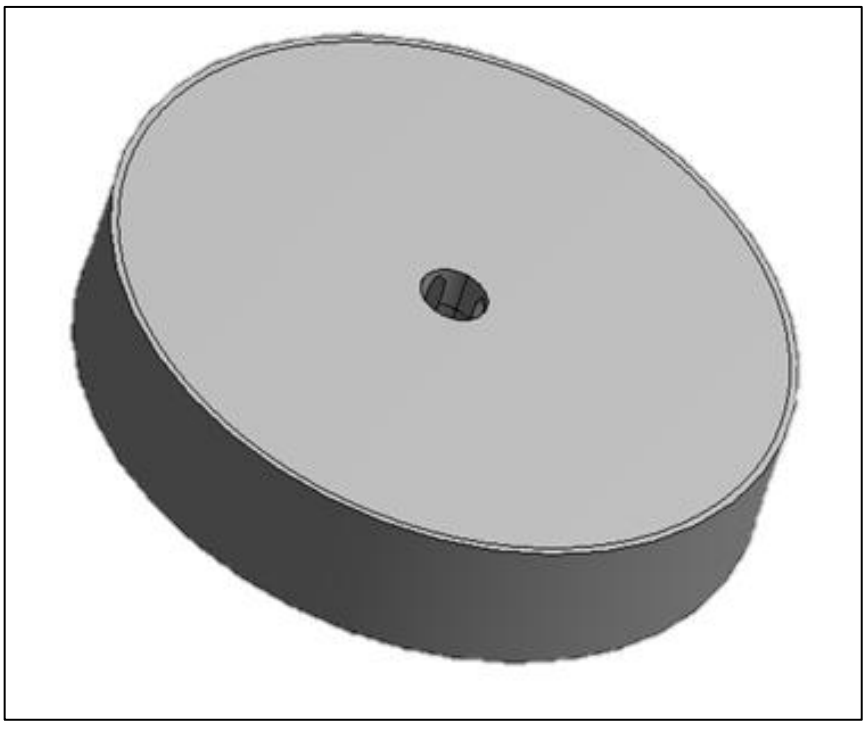


Fig. 17 Volumen de control del dominio del impulsor

Una vez obtenido el dominio del impulsor, el volumen negativo del tanque debe aparecer sobre él (Figura 18). Esto se hace para que los dominios del impulsor y del tanque tengan las mismas coordenadas de origen.

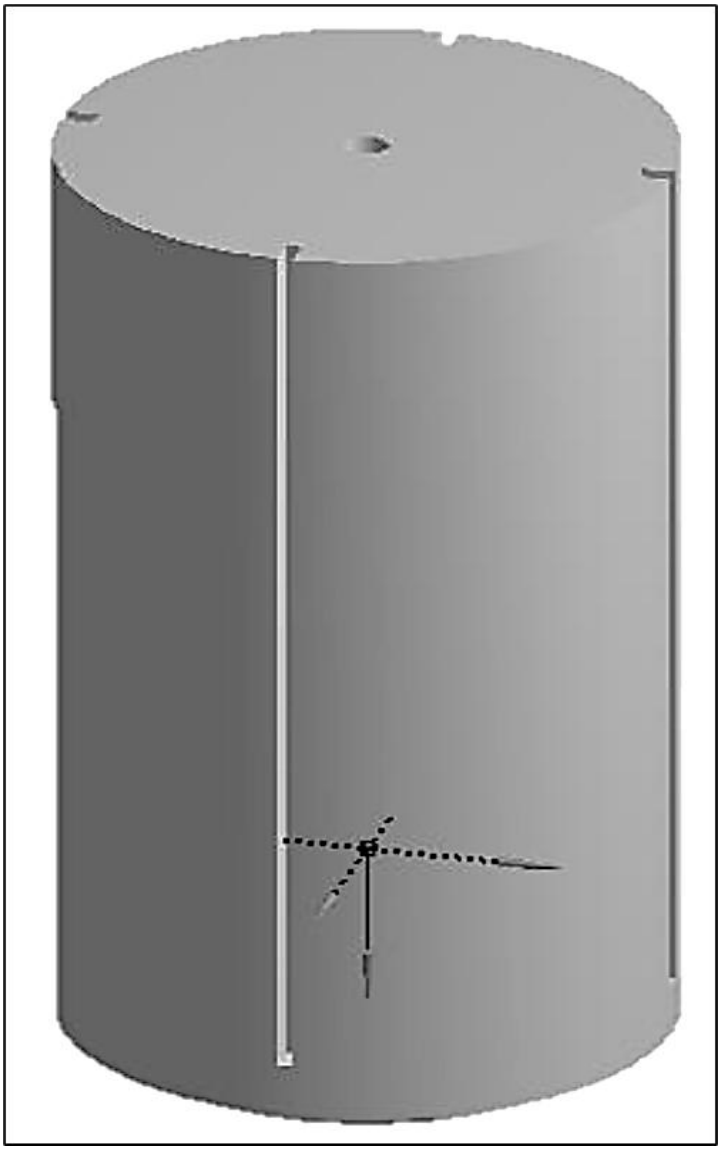


Fig. 18 Volumen de control del fluido

Se obtiene el modelo CAD final del volumen negativo del agitador. Este volumen consta de los dominios del impulsor y del tanque; la Figura 19 muestra los subdominios construidos (impulsor y tanque) y el dominio total del tanque del agitador.

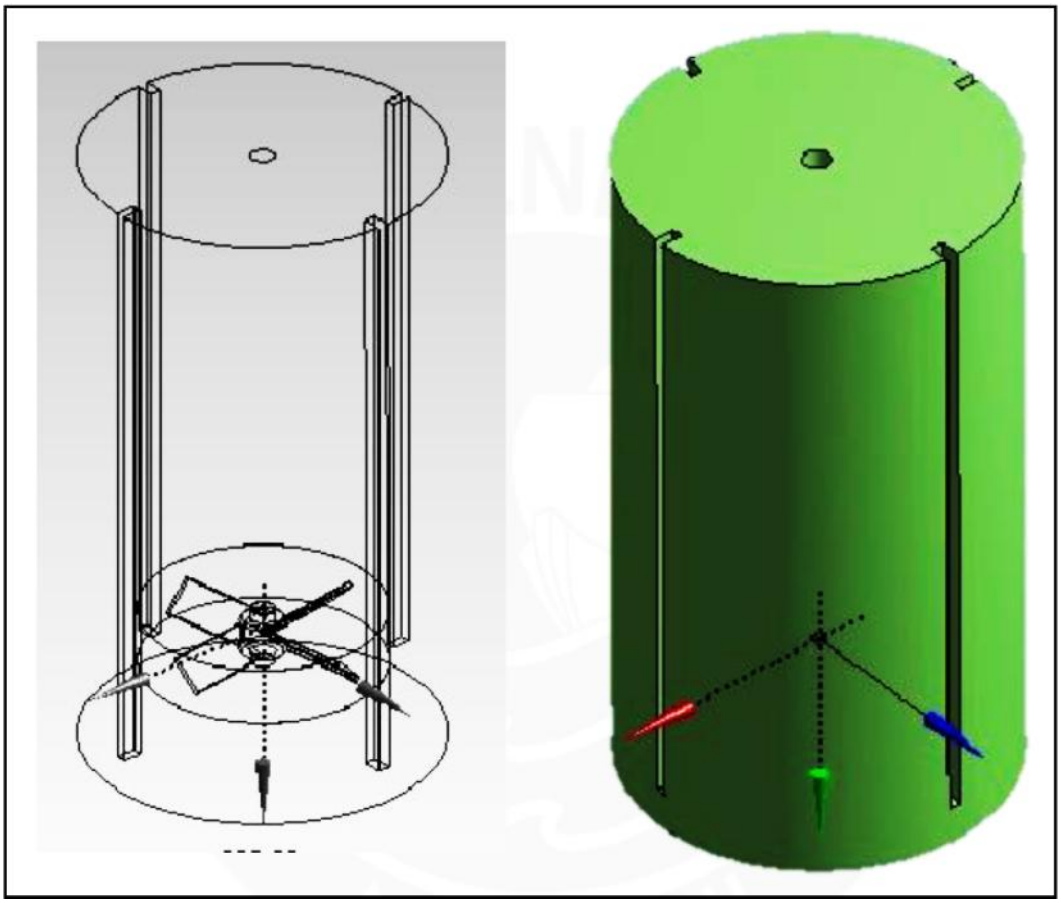


Fig. 19 Dominio total.

3.1.4. Generación de malla

En esta etapa de preprocesamiento, se genera la malla del agitador. Para optimizar el número de elementos en todo el dominio del agitador, las mallas del impulsor y del tanque se diseñan por separado, ya que el dominio del impulsor requiere una malla más densa que el del tanque para un mejor análisis en las zonas cercanas a las palas.

La malla del dominio del impulsor tiene una calidad media del 83 %, una relación de aspecto máxima de 3,4 y una oblicuidad y ortogonalidad máximas de 0,79. Según la documentación de ANSYS 14.0, esto indica una buena reproducción de la malla, por lo que podemos continuar con la malla del tanque.

A continuación, se muestra una imagen de la malla del dominio del impulsor.

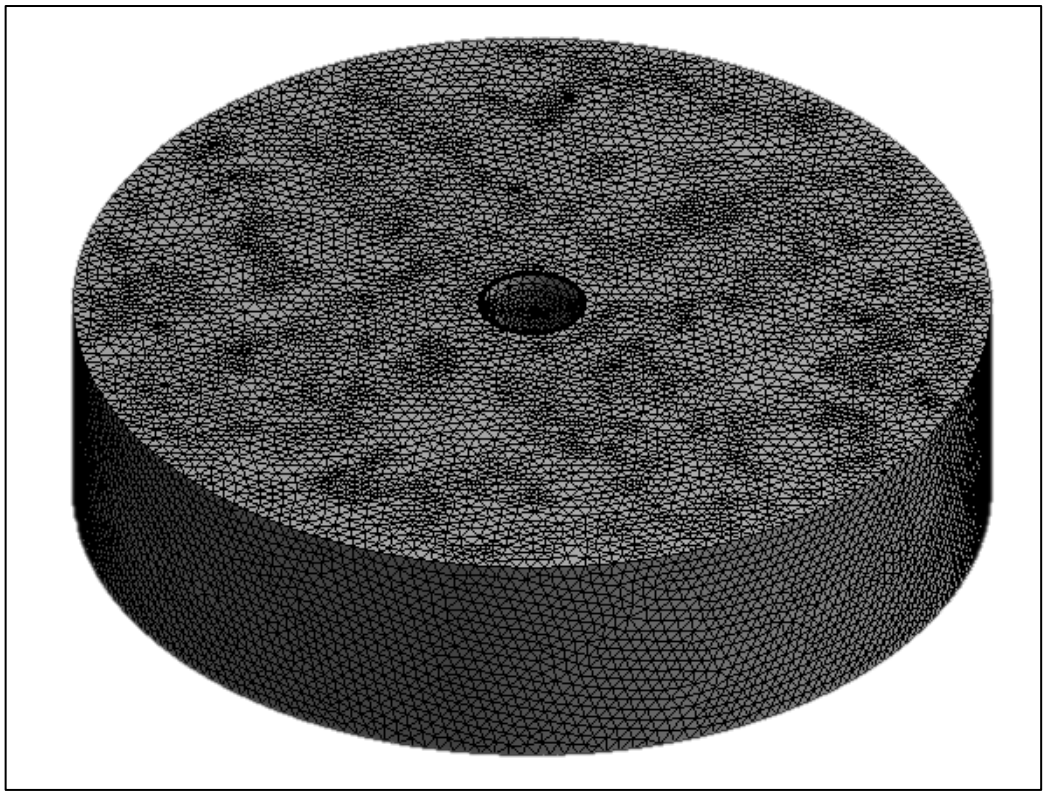


Fig. 20 Área mallada dominio-impulsor.

La figura 21 muestra una malla estratificada en la superficie del álabe. Este tipo de malla nos permite obtener un campo de velocidad más preciso en esta región.

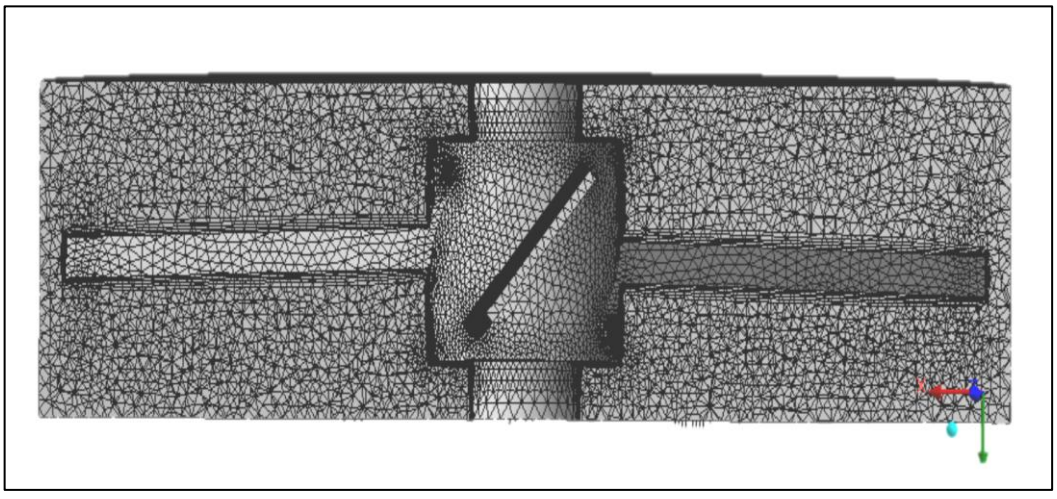


Fig. 21 Superficie de palas (mallado por capas) dominio del impulsor.

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

En este caso, se obtuvo una calidad de malla promedio del 80 %, una relación de aspecto promedio de 2,1, una asimetría promedio del 32 % y una ortogonalidad promedio de 0,85.

Según la documentación de ANSYS 14.0, estos valores indican que la generación de la malla es muy buena.

La figura 22 muestra la malla para el dominio del tanque agitador.

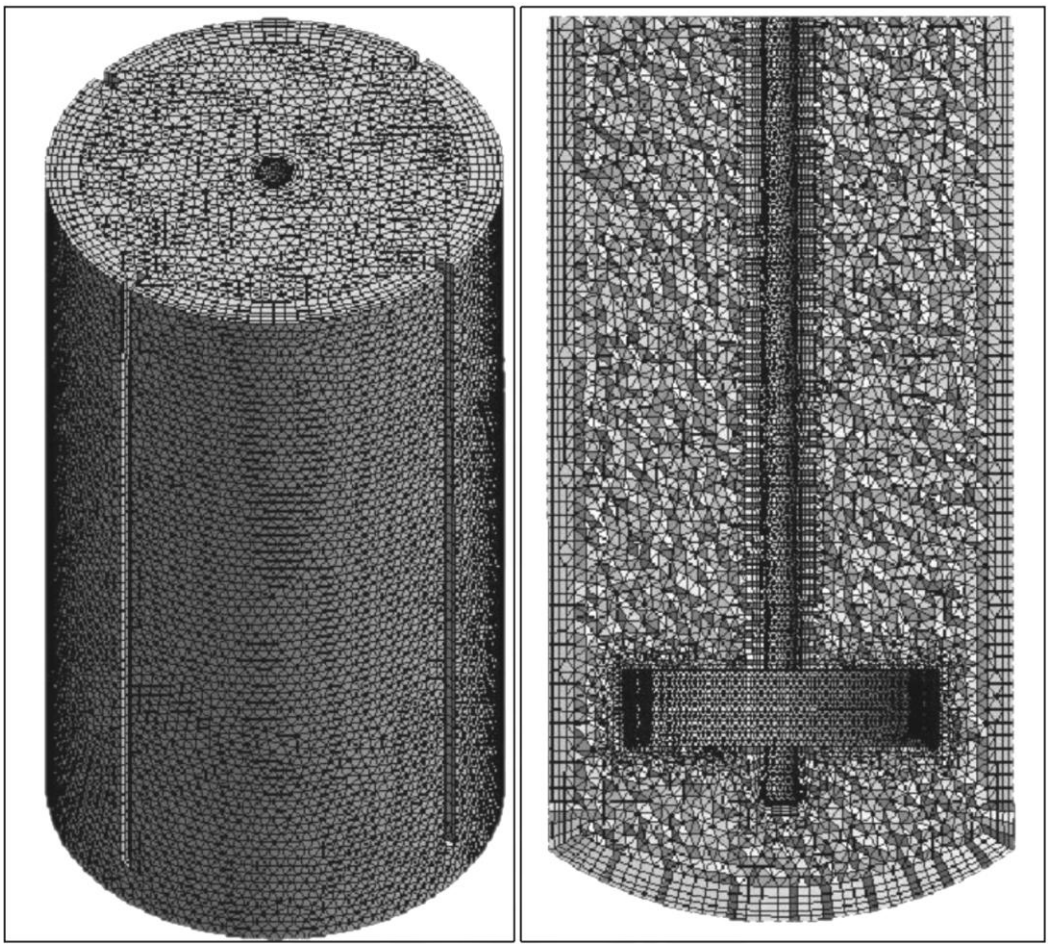


Fig. 22 Mallado dominio tanque agitador

Finalmente, se obtiene una malla que cubre todo el dominio utilizando elementos hexaédricos, tetraédricos y piramidales, con un total de 742.862 elementos. Además, las estadísticas de la malla muestran que, tanto para los dominios como para el dominio global, la relación de aspecto promedio, la asimetría promedio y

los índices de ortogonalidad promedio son buenos (OK), como se muestra en la tabla de estadísticas de la malla a continuación.

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

Fig. 23 Estadísticas del mallado (tanque agitador)

3.1.5. Concordancia de parámetros de control de simulación.

Los parámetros de control de simulación determinan el tipo de modelado, el alcance de la simulación y el grado de precisión de la estimación.

3.1.6. Sumario de parámetros de simulación.

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

Tabla 18 Sumario de parámetros de simulación

CARACTERISTICA	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
Coeficiente 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

IV. DISCUSIÓN

4.1. Desarrollo procedimental

El proceso se desarrolló mediante una tabla descriptiva que detalla la acción y/o explicación de cada paso realizado. La tabla también utiliza un código de colores para distinguir las fases principales de la simulación (Modelado del volumen de control, Generación de la malla, Establecimiento de los parámetros de control de la simulación, Resolución de la simulación y Visualización de los resultados).

La Tabla 19 que se muestra a continuación ilustra el método de simulación específico.

Tabla 19 Mecanismo determinado 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	- Se utiliza la herramienta "Enclosure" - Se genera un cilindro envolvente: -FD1, Cusion Radius 5mm -FD2, Cusion + 10mm -FD3, Cusion – 10mm
4	Generar el dominio del tanque	Se utilizan la herramientas: - Freeze, - Enclosure - Revolve
5	Generar mallado del dominio del impulsor	Se realiza a través del Ansys Mesh
6	Suprimir geometria del tanque	- Esto se realiza para mallar solo en dominio del impulsor - Utilizar Supress Body
7	Establecer "Named Selections" en el dominio del impulsor	Nombrar las siguientes superficies: - **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	- Utilizar "Face Sizing" - Se fija el tamaño de los elementos en las superficies de interés = 3.5mm - Se realiza sólo en las siguientes superficies: -Top_impulsor -Botton_impulsor -Lat_impulsor

9	Establecer parámetros de mallado general para el dominio del impulsor	Se establece: - 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 minino 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	- Se realiza para mallar solo en dominio del Tanque - Utilizar "Supress Body"
12	Establecer "Named Selections" en el dominio del tanque	Nombrar las siguientes Superficies: - **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	- Utilizar "Face Sizing" - Se fija el tamaño de los elementos en las superficies de interés = 3.5mm - Se realiza sólo en las siguientes superficies: -Inf_Tanque -Cil_Tanque -Sup_Tanque
14	Establecer parámetros de mallado general para el dominio del tanque	Se establece: - 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 minino 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"	- 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”	- Establecer como Modelo Multifásico: Modelo Homogéneo - Modelo de Superficie libre: Estándar - Modelo de Turbulencia: k-épsilon
18	Establecer en la pestaña ”Fluid Pair Models”	- 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”	- 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”	- Tipo de condición de borde : Wall - Localizar la superficie: "deflectores"
22	Condición de Borde “Eje_Tanque”	- Tipo de condición de borde: Wall - Localizar la superficie: "Eje" - Velocidad de rotación de la pared = 100rpm.
23	Condición de Borde “Álabes_Impulsor”	- 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”	- 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”	- 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”	- 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	Para definir el volumen inicial del fluido en el tanque agitador: - if(y>0.35[m],1,0)*If(y<0.169[m],1,0)*if(x<0. 179[m],1,0)*if(z<0.179[m],1,0)
29	Establecer parámetros de control para el solucionador (Solver Control/Basic Settings)	- 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 Cupling: 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. Descripción general del procedimiento.

Anteriormente se describió los diversos modelos de turbulencia disponibles en ANSYS CFX versión 14.0 para la simulación de flujo. Estos incluyen el modelo de turbulencia k-ε, el modelo de turbulencia k-omega y el modelo de transporte de esfuerzo cortante (SST).

El modelo inicial (k-ε) demostró ser numéricamente estable y robusto para simulaciones de propósito general, con buena capacidad predictiva. Sin embargo, a menudo no logra predecir el inicio y la extensión de la separación del flujo en condiciones de gradiente de presión deficiente.

El segundo modelo (k-ω), a diferencia del primero, está diseñado para proporcionar predicciones de alta precisión del inicio y la extensión de la separación del flujo bajo gradientes de presión.

Además, presenta la ventaja de manejar los cálculos cerca de la pared y a números de Reynolds más bajos, lo que resulta en mayor precisión y robustez. El tercer modelo (SST) combina las características del primero y el segundo, pero se recomienda para simulaciones de capa límite de alta precisión.

También se indica que esto se hizo para superar las deficiencias del segundo modelo. Sin embargo, para flujos de cizallamiento libre, el modelo SST es similar al modelo k-ε.

Como se mencionó anteriormente, cada modelo posee características particulares que lo hacen adecuado para ciertas aplicaciones, pero no existe un único modelo que sea óptimo para todos los casos.

Además, algunos modelos de turbulencia requieren un mallado especial para su correcto uso y precisión. Por lo tanto, se requiere un estudio preliminar para determinar el modelo de turbulencia adecuado para el flujo en un tanque agitado con impulsor vertical (PTB).

Metodología de investigación:

Primero, se simularon suficientes puntos de muestreo para generar la curva de potencia a lo largo de toda su longitud. Para ello, se generaron números de Reynolds en todo el rango $1 < Re < 10^5$ (desde flujo laminar hasta turbulento).

La fórmula y los parámetros para determinar el número de Reynolds son los siguientes:

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

N = Velocidad angular (rev/s)

D = Diámetro del impulsor del tanque agitador (m)

ρ = Densidad del fluido

μ = Viscosidad dinámica del fluido

El uso de agua como fluido de trabajo y la variación de la velocidad del impulsor de 22 a 540 rpm dieron como resultado números de Reynolds elevados (del orden de 10^5) (Tabla 20), similares a los de los regímenes transitorio y turbulento.

Tabla 20 Determinación del Re° respecto al régimen transitorio-turbulento.

Fluido	(m)	(kg/m³)	(kg/m.s)	(rev/min)	Re
Agua	0.1	998	8.91*10-4	22	4133.3
Agua	0.1	998	8.91*10-4	54	10145.4
Agua	0.1	998	8.91*10-4	540	101454.2

Si se deseara continuar trabajando con el fluido para obtener números de Reynolds dentro del régimen de flujo laminar, la velocidad del impulsor tendría que reducirse prácticamente a cero; por lo tanto, se decidió comenzar a trabajar con glicerina, ya que sus propiedades físicas (densidad y viscosidad) permiten obtener números de Reynolds dentro del régimen de flujo laminar a velocidades de operación normales, como se muestra en la Tabla 21.

Tabla 21 Determinación del Re° para régimen laminar.

Fluido	(m)	(kg/m3)	(kg/m.s)	(rev/min)	Re
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, si se encontraron suficientes puntos, basados en el número de Reynolds, para describir toda la curva de potencia a lo largo de su longitud desde flujo laminar hasta turbulento, estos puntos se simularon en función de la velocidad del impulsor (variación del número de Reynolds), el tipo de fluido (agua y glicerina) y el modelo k-ε, el modelo k-ω y modelo SST.

Los valores de torque se obtuvieron a través del simulador (Figura 4.1), que se utilizaron para calcular el número de potencia (Np).

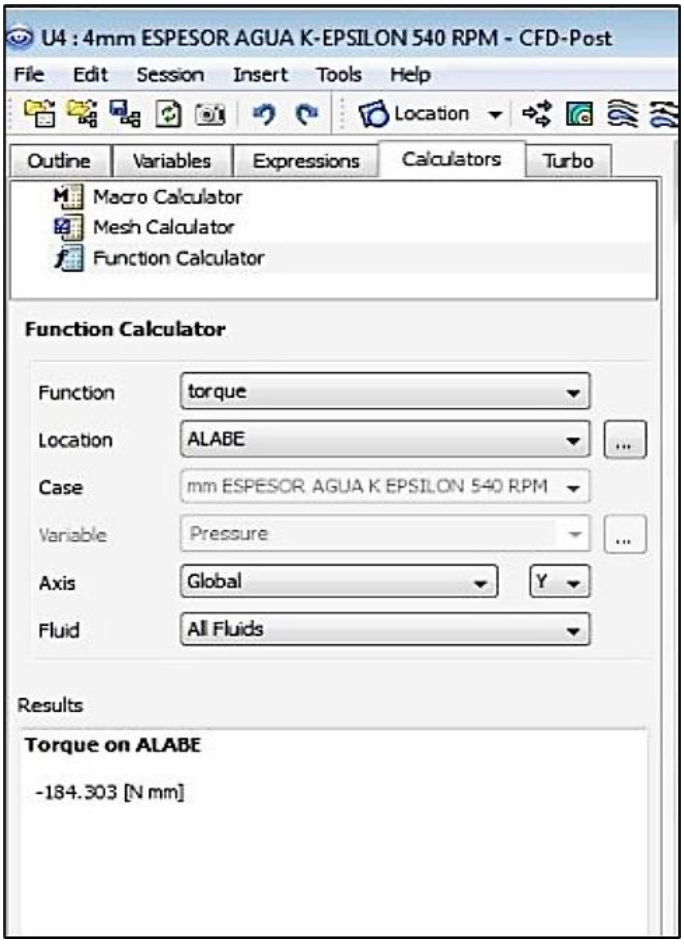


Fig. 24 Determinación del torque impulsor por simulador

Las tablas muestran los valores de velocidad, número de Reynolds, par y número de potencia para cada tipo de modelo de turbulencia.

Tabla 22 Determinación del Np (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 23 Determinación del Np (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 24 Determinación del Np (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

En tercer lugar, una vez hallados los valores de la curva de potencia (Re vs Np) para cada uno de los tres modelos de turbulencia, cada valor del número de potencia se comparó con los valores reales mostrados por la curva de potencia experimental desarrollada por la empresa Chemineer para impulsores de palas inclinadas (Figura 25).

El error relativo se define según las siguientes tablas:

Tabla 25 Resultados 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 26 Resultados 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 27 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 25 se muestra la comparación entre las tres curvas de potencia generadas y la curca de potencia experimental, debido a que la gráfica no muestra claramente cuál es la mejor curva se utilizan los resultados de las tablas 25, 26 y 27 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.

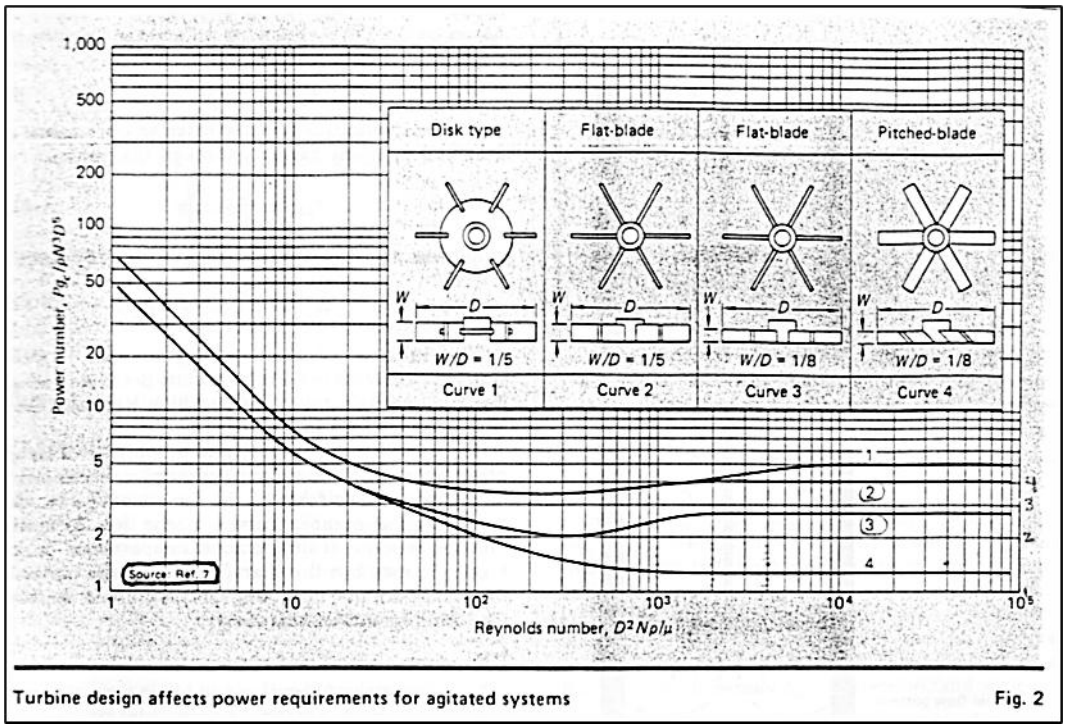


Fig. 25 Curva de potencia: impulsores inclinados *[15]*

Dados los resultados previos, al comparar la curva de potencia experimental con los resultados obtenidos mediante el modelo de turbulencia SST para los impulsores inclinados (Tabla 27 y Figura 26), se encontró un error inferior al 8 % en todos los puntos de simulación.

Esto indica que el proceso (preprocesamiento, procesamiento y postprocesamiento) y el modelo de turbulencia SST son válidos para simular el comportamiento del flujo bajo las condiciones establecidas.

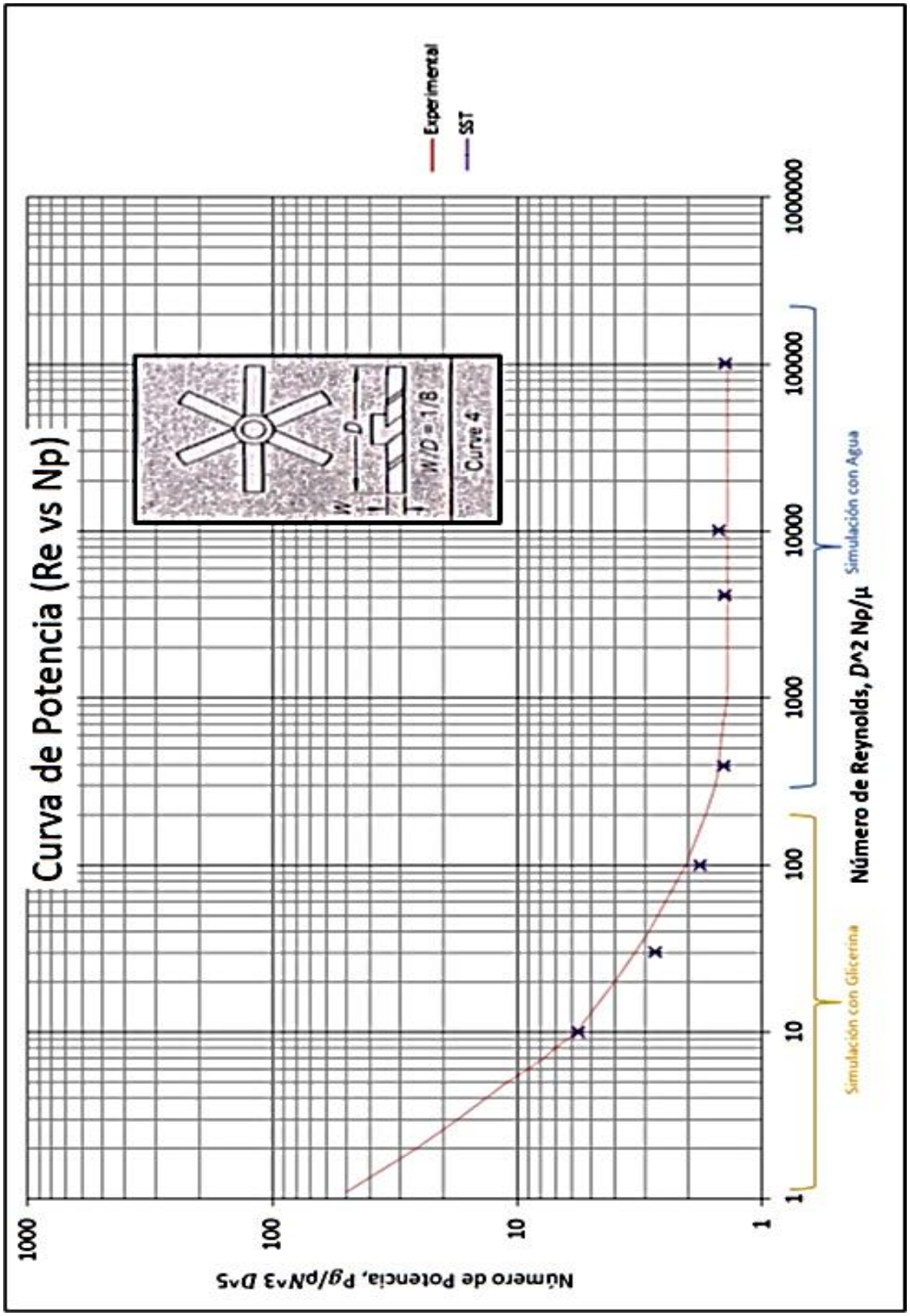


Fig. 26 Comparación modelo SST vs curva experimental Chemineer

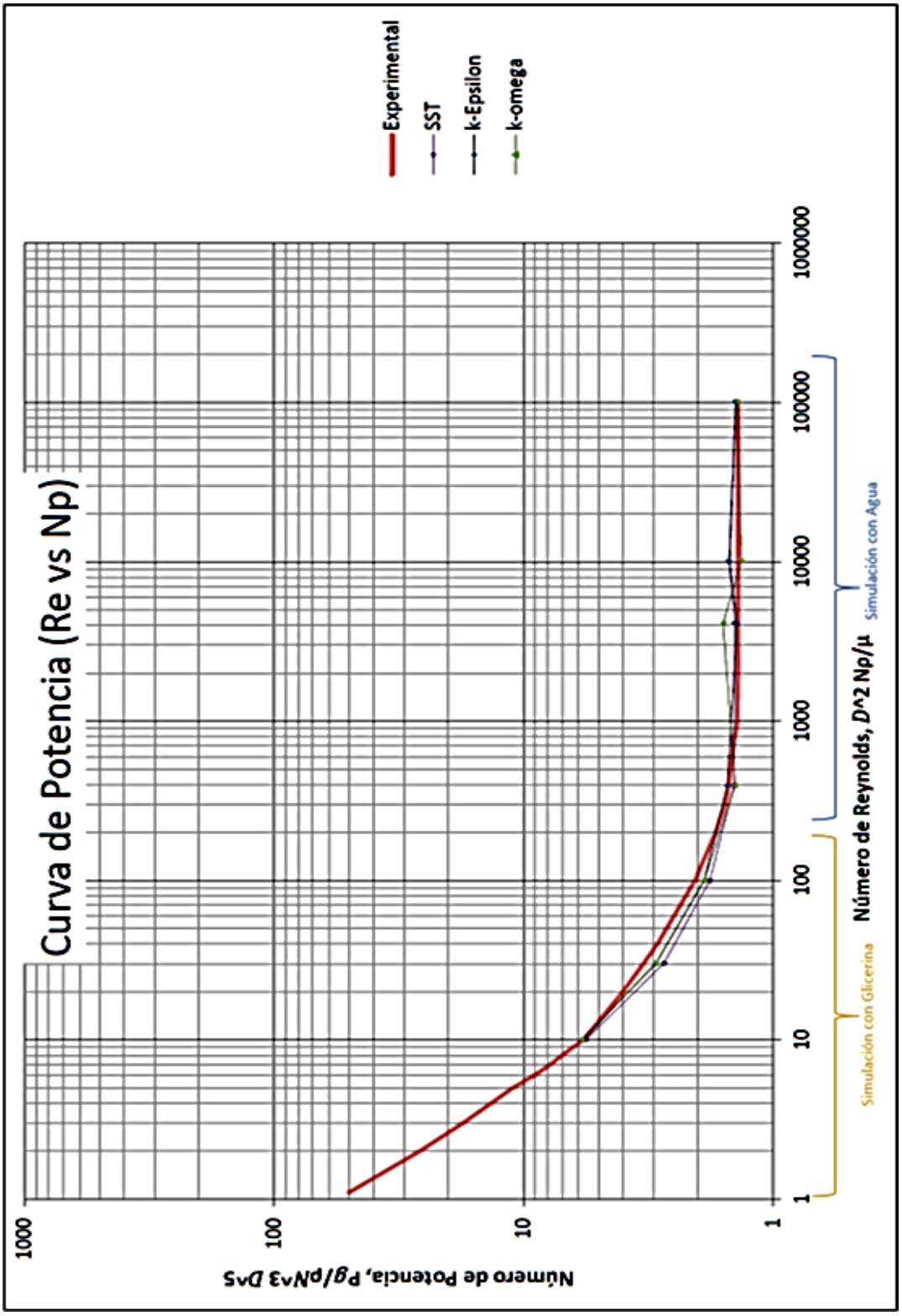


Fig. 27 Comparación de la curva Np de los tres modelos vs curva experimental impulsores inclinados. Chemineer *[15]*.

4.3. Muestra del Patrón de Flujo

Anteriormente se presentó el procedimiento para la simular el comportamiento del flujo en un tanque agitador vertical de impulsor PTB con superficie libre mediante ANSYS CFX v.14.0; posteriormente, también se realizó la selección del modelo de turbulencia y validación del procedimiento establecido.

En el siguiente ítem se muestran y discuten los resultados en relación a las principales características del comportamiento del flujo en el tanque agitador.

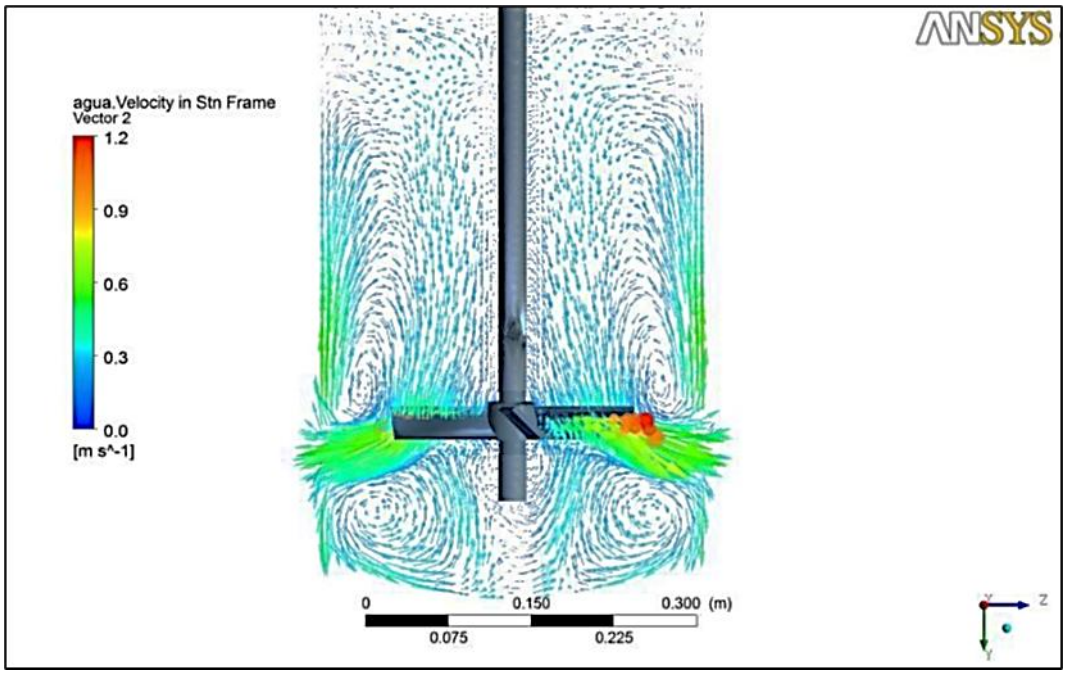


Fig. 28 Vectores en plano de corte ZY.

La figura 28 muestra el campo vectorial de velocidad en el plano ZY. Esto muestra cómo el flujo sale radialmente del impulsor hacia las paredes del tanque. Luego, una parte del flujo se dirige hacia la parte superior y la otra hacia la parte inferior del tanque.

Ambos flujos regresan al impulsor central para ser eliminados nuevamente. La descripción anterior nos ayuda a comprender el patrón de flujo, que describe su comportamiento.

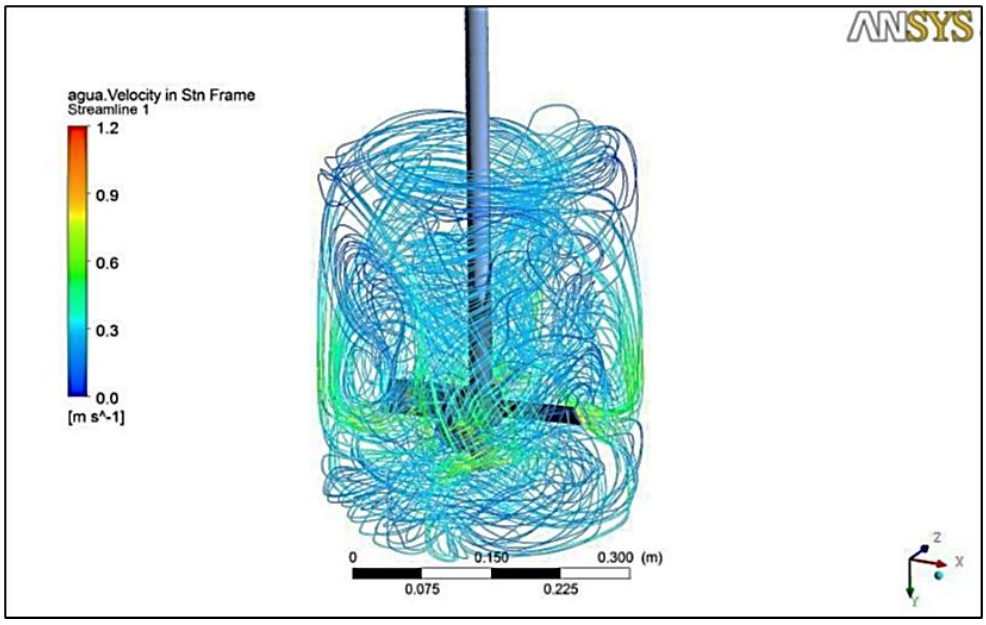


Fig. 29 Líneas de corriente en el dominio del tanque agitador.

La figura 29 muestra las líneas de corriente de velocidad en todo el dominio del tanque, ilustrando cómo el flujo se origina en el impulsor y se desplaza hacia la parte superior e inferior del tanque.

Además, se puede observar la formación de vórtices en la parte superior del tanque.

4.4. Muestra del campo de velocidades

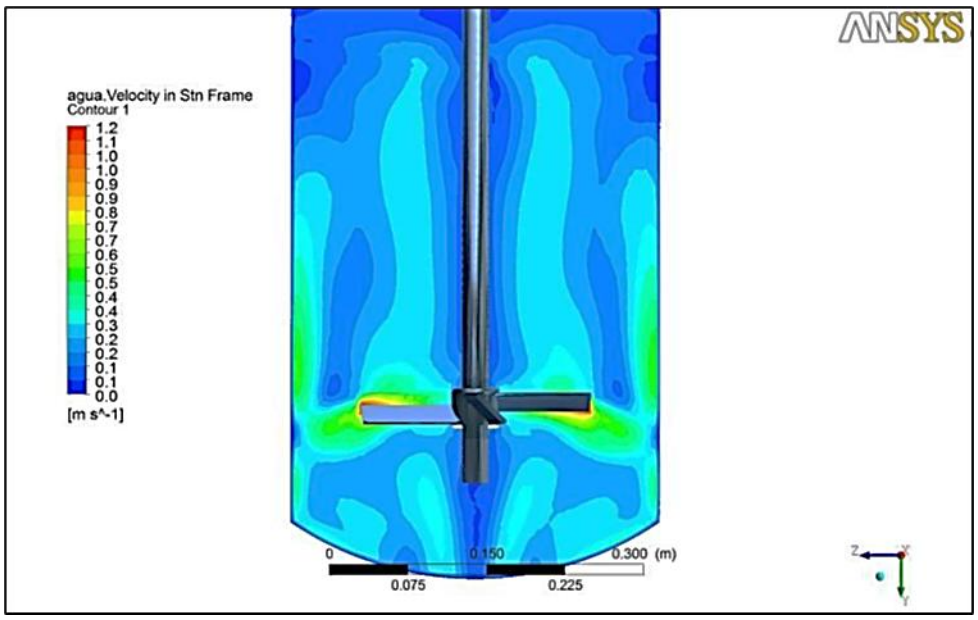


Fig. 30 Contorno de velocidades en plano de corte ZY.

La figura 30 muestra el contorno de velocidad en el plano de sección transversal ZY. Dentro de esta curva, se observan varias zonas de velocidad interesantes; por ejemplo, la zona de alta velocidad [0,5–1,2] m/s, ubicada alrededor del impulsor.

La zona de velocidad media [0,5–0,7] m/s, cerca de la pared del tanque y en la parte superior del impulsor, muestra claramente velocidades axiales, lo que indica que el flujo se dirige hacia la parte superior del tanque. La zona de estancamiento [0–0,2] m/s, ubicada debajo del impulsor, tiene velocidades bajas, por lo que hay poco movimiento del fluido.

Las zonas de baja velocidad [0–0,1] m/s, que consisten en cinco áreas resultantes de la formación de remolinos, también tienen velocidades bajas (mejor visualizadas con la ayuda de la figura 28), ubicadas en la parte superior, dos en la parte inferior y una alrededor del eje del impulsor.

Finalmente, hay una zona de interfaz en la atmósfera, una zona de baja velocidad. Continuando con el análisis de velocidad, a continuación, se muestran las curvas de velocidad para las secciones cortadas paralelamente al plano ZX.

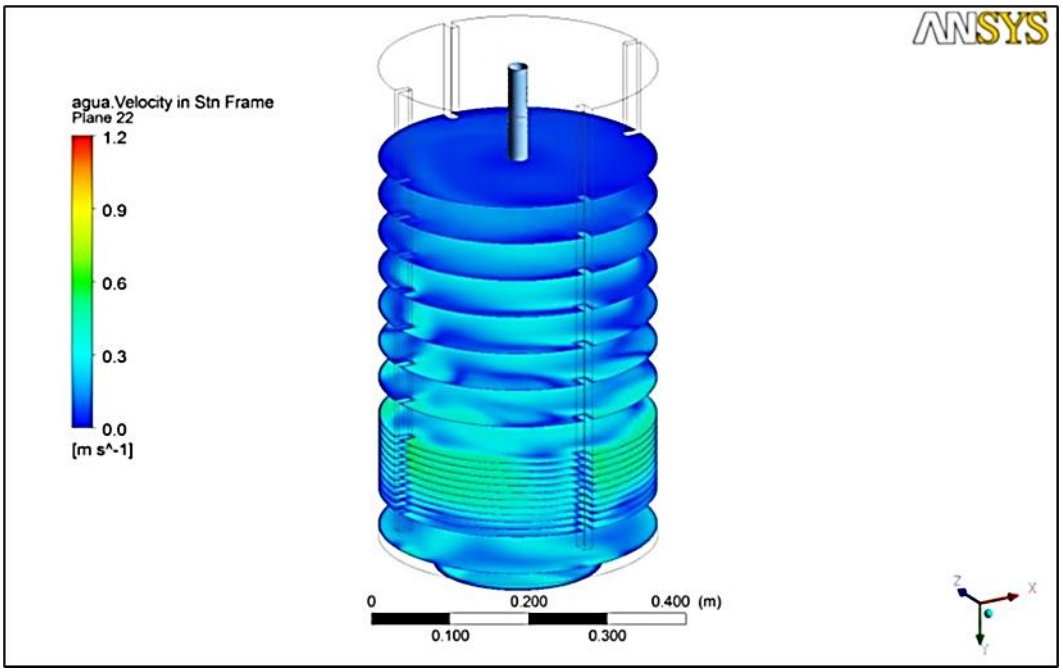


Fig. 31 Contorno de velocidades en las secciones XZ

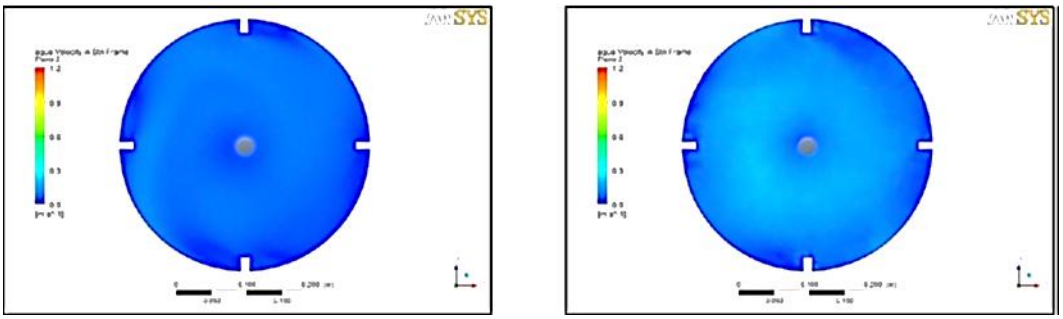


Fig. 32 a) Sección de contorno de velocidad a 60 mm. b) Sección de contorno de velocidad a 55 mm

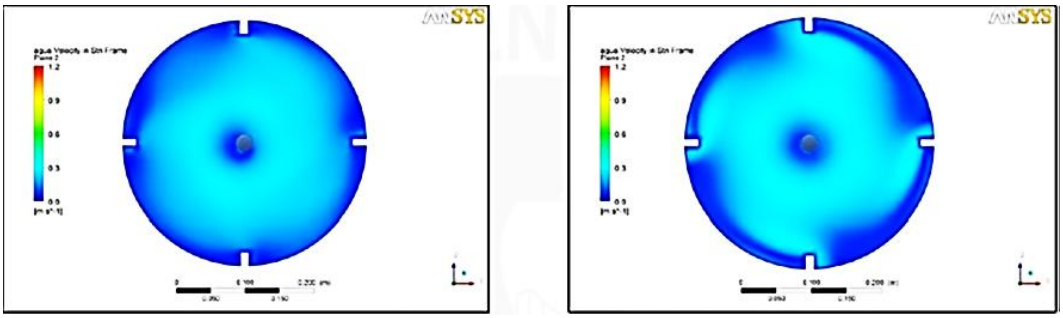


Fig. 33 a) Sección de contorno de velocidad a 50 mm. b) Sección de contorno de velocidad a 45 mm

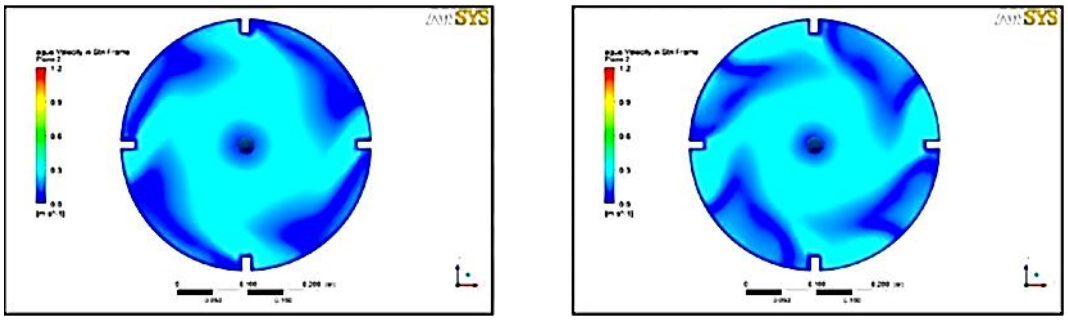


Fig. 34 a) Sección de contorno de velocidad a 40 mm. b) Sección de contorno de velocidad a 35 mm

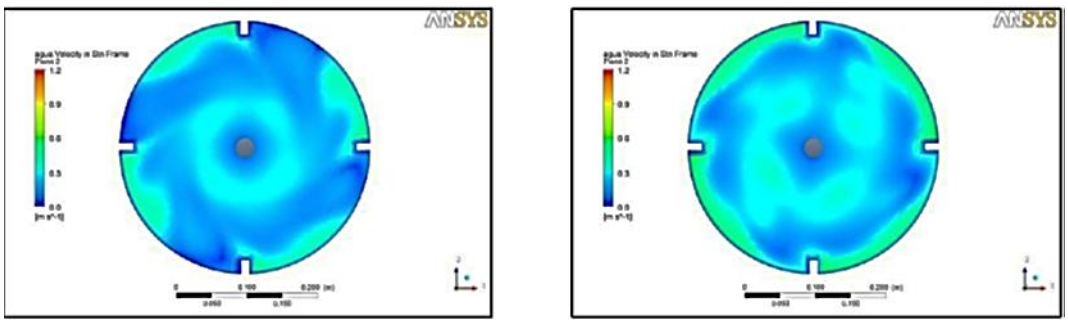


Fig. 35 a) Sección de contorno de velocidad a 30 mm. b) Sección de contorno de velocidad a 25 mm.

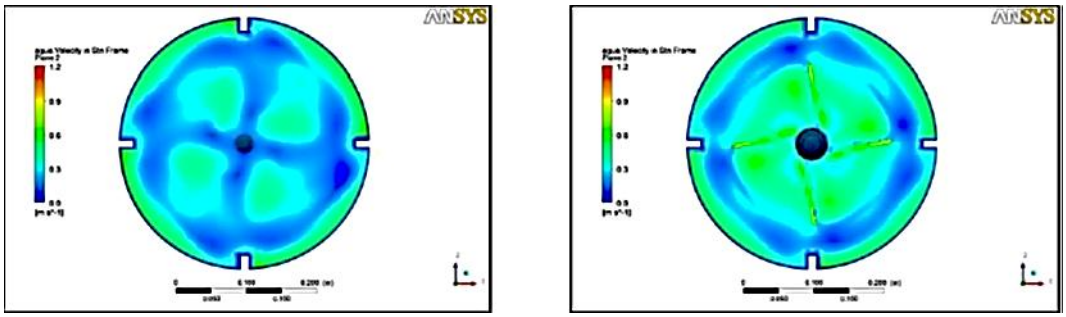


Fig. 36 a) Sección de contorno de velocidad 23 mm b) Sección de contorno de velocidad 21 mm

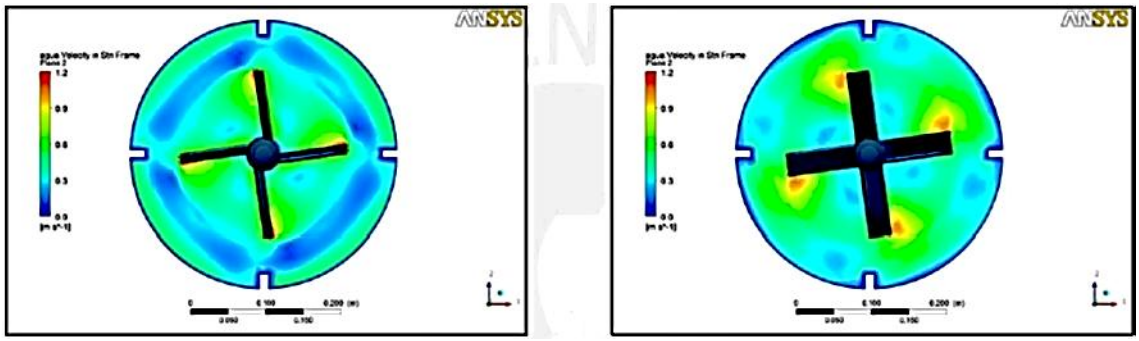


Fig. 37 a) Sección de contorno de velocidad 20 mm b) Sección de contorno de velocidad 18 mm

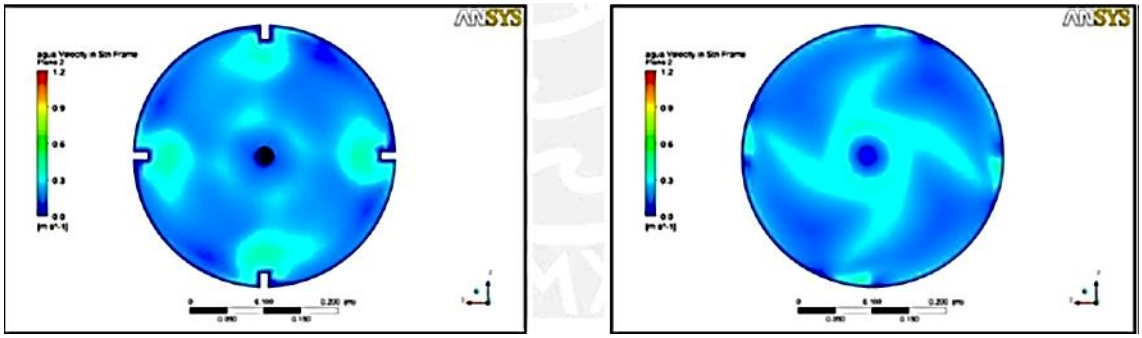


Fig. 38 a) Sección de contorno de velocidad 15 mm b) Sección de contorno de velocidad 10 mm

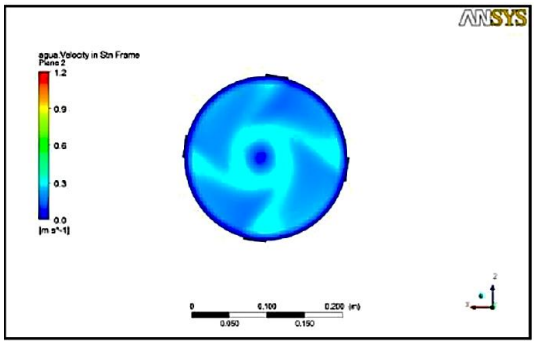


Fig. 39 Sección de contorno de velocidad 5 mm

La Figura 31 muestra las secciones transversales paralelas al plano XZ utilizadas para analizar los contornos de velocidad a diferentes alturas dentro del tanque agitado, tomando como referencia el fondo del recipiente. Se analizaron un total de 15 contornos de velocidad, en orden descendente, que se muestran desde la Figura 32 hasta la Figura 39.

Las Figuras 32a y 32b muestran velocidades bajas (0–0.1 m/s) debido a que, a esa altura del tanque, el flujo se encuentra cerca de la superficie del fluido con un caudal despreciable.

Las Figuras 33a, 33b, 34a y 34b muestran la formación de vórtices alrededor del eje del tanque. Además, la velocidad se encuentra en el rango de 0–0.35 m/s, con la velocidad máxima en el centro del tanque y cerca de los deflectores.

Las figuras 35a, 35b y 36a muestran velocidades elevadas [0,3-0,6] m/s, ubicadas en el borde y el centro del tanque.

Las figuras 36b, 37a y 37b muestran las velocidades máximas en todo el dominio de flujo [0,6-1,2] m/s, ubicadas alrededor del impulsor, a lo largo de los bordes de las palas.

Finalmente, las figuras 38a, 38b y 39 muestran el fondo del tanque, donde se confirma la inestabilidad del fluido.

4.5. Influencia del tipo de impulsor.

La influencia del tipo de impulsor en el patrón de flujo es importante, ya que ayuda a seleccionar el tipo de impulsor adecuado según el proceso de agitación deseado.

La Figura 40 compara el patrón de flujo generado por el impulsor PTB (compuesto por cuatro álabes rectos inclinados a 45°) con los patrones de flujo característicos (axial y radial) en tanques agitados, tal como se describe en la literatura.

Es bien sabido que los impulsores PTB, debido a la forma de sus álabes inclinados, producen una mezcla de flujo axial y radial. Este estudio confirma la influencia del tipo de impulsor en el patrón de flujo, como se muestra en la Figura 40.

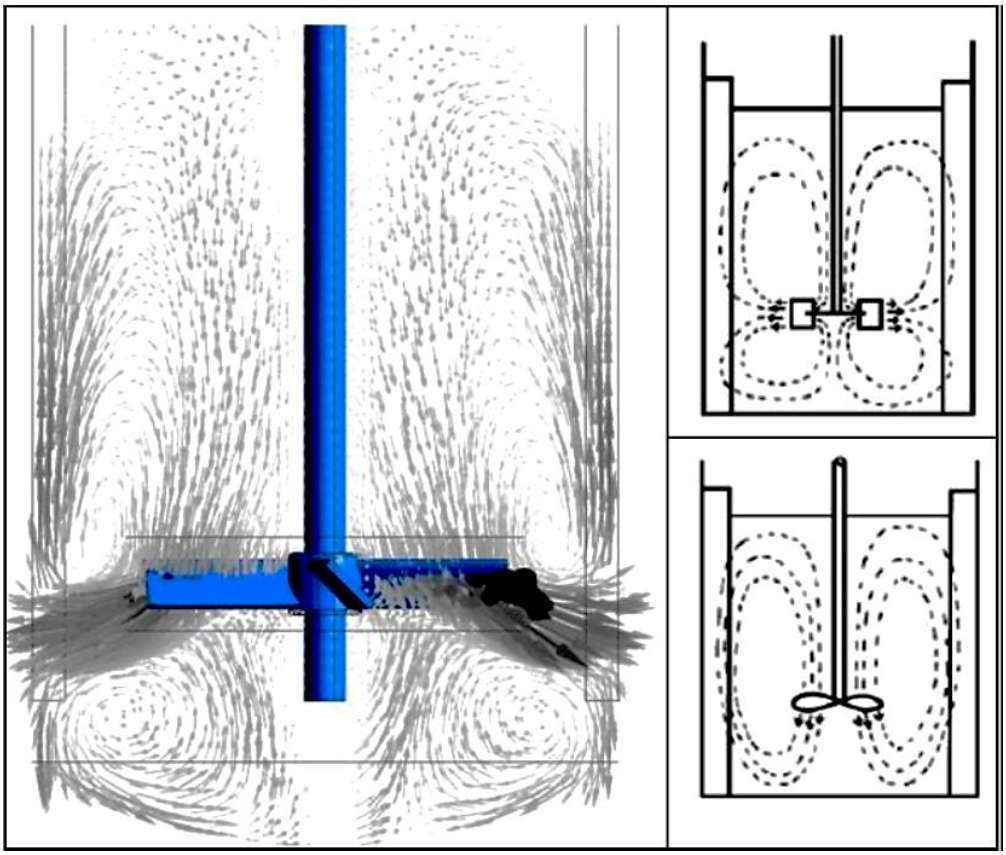


Fig. 40 Patrón flujo del tanque

Asimismo, se observa la influencia del tipo de impulsor en generar líneas de corriente de velocidad en el tanque.

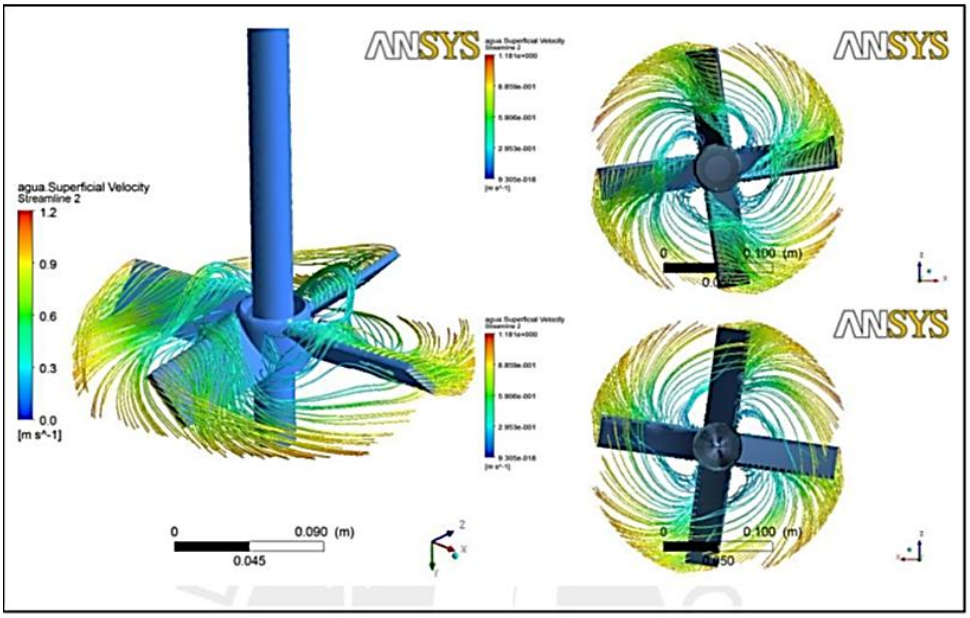


Fig. 41 Influencia del tipo de impulsor.

4.6. Interacción entre fases agua y aire

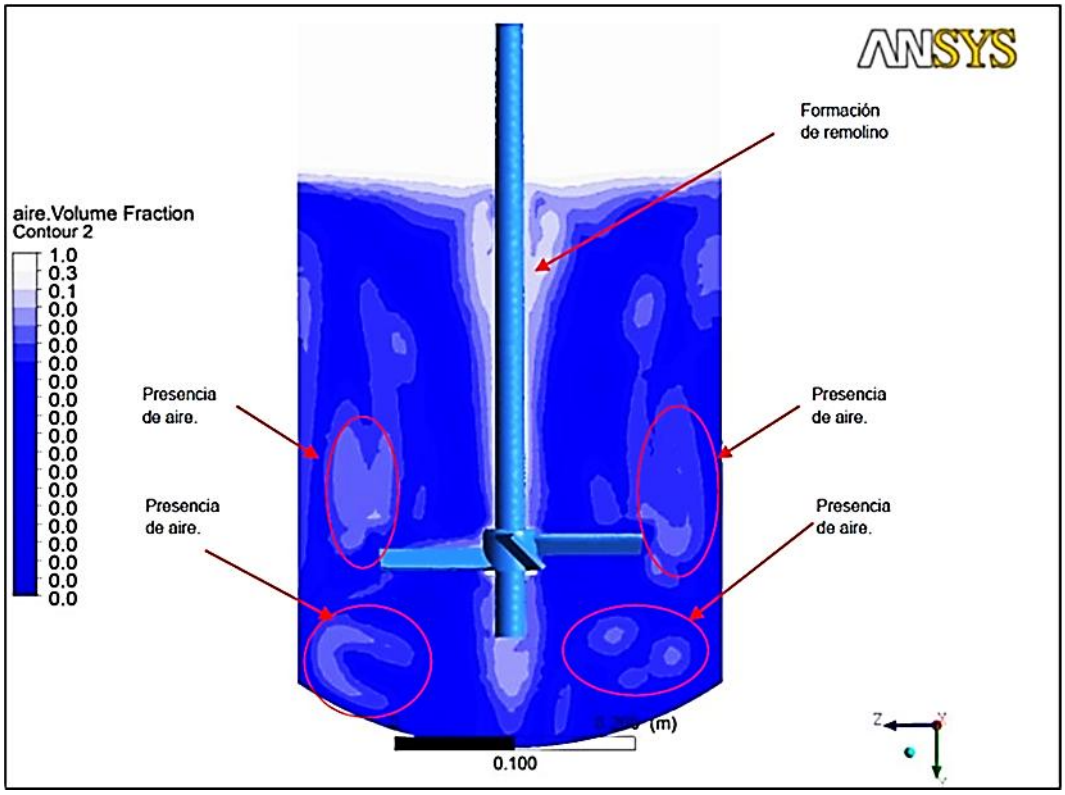


Fig. 42 Fracción de volumen de aire.

La figura 42 muestra la fracción de volumen de aire (escala logarítmica) en todo el tanque agitador. La mezcla de aire y agua, que forma un vórtice, se observa en la parte superior de la figura.

También hay aire presente aguas abajo del impulsor y en las regiones del vórtice. La relación de mezcla aire-agua, expresada como una fracción del volumen de aire, en toda el área se encuentra entre 0,1 y 0,3.

V. CONCLUSIONES

- ✓ Este trabajo propone un método válido para simular el flujo generado en un tanque agitado verticalmente con impulsor PTB y superficie libre en condiciones de estado estacionario, utilizando el software ANSYS CFX versión 14.0. Este procedimiento se validó comparando la curva de potencia (Re vs. Np) generada a partir de los resultados de la simulación con la curva experimental generada por Chemineer.

- ✓ Para la construcción de la curva de potencia (Re vs. Np), se utilizaron agua y glicerina como fluidos de trabajo para demostrar la continuidad de las curvas tanto en régimen laminar como turbulento. Esto confirma que los números adimensionales pueden describir con precisión el comportamiento del flujo, independientemente del tipo de fluido utilizado (Tabla 21, Tabla 22 y Figura 27).

- ✓ Al comparar los resultados obtenidos para los modelos de turbulencia k-ε, k-ω y SST con los resultados experimentales, se observó que el modelo de turbulencia k-Omega presentó el mayor error, mientras que el modelo k-Epsilon mostró un error menor que el k-Omega.

- ✓ Sin embargo, el modelo SST arrojó los mejores resultados en comparación con la curva de potencia experimental para los impulsores de álabes inclinados de Chemineer. Por lo tanto, el modelo de turbulencia de transporte de esfuerzo cortante (SST) se seleccionó como el más apropiado para este estudio.

- ✓ Al comparar los resultados obtenidos de la simulación con los valores de la curva de potencia experimental (tablas 25, 26, 27 y figura 25), se obtuvo un error relativo no superior al 8% en todos los puntos de simulación, lo que indica que el proceso introducido (y su procesamiento en todas las etapas de este trabajo, incluyendo el postprocesamiento) es válido para simular el comportamiento del flujo en tanques agitados bajo condiciones predeterminadas.

- ✓ Las líneas de corriente de velocidad (Figura 29) muestran cómo el flujo se inicia y diverge desde el impulsor hacia la parte superior e inferior del tanque antes de regresar. También se observó la formación de vórtices alrededor del eje del impulsor.

- ✓ El contorno de velocidad en la sección transversal ZY y en las secciones transversales paralelas al plano XZ (Figuras 30 y 31) muestra que las velocidades de flujo más altas se producen alrededor del impulsor, oscilando entre 0,5 y 1,2 m/s. La zona de estancamiento, con una velocidad de 0 a 0,2 m/s, se encuentra aguas abajo del impulsor. Finalmente, se observaron cinco zonas de velocidad muy baja (0 a 0,1 m/s) resultantes de la formación de vórtices.

- ✓ El patrón de flujo generado en la simulación es una combinación de los flujos axiales y radiales característicos, como se muestra en el campo vectorial de velocidad en la sección transversal ZY (Figura 28). Esto confirma la influencia del tipo de impulsor en el patrón de flujo (Figura 29), ya que es bien sabido que los impulsores PTB, debido a la forma de sus álabes inclinados, producen un flujo mixto axial y radial.
- ✓ Los resultados de la simulación mostraron la interacción entre las fases líquida (agua) y gaseosa (aire), lo cual se refleja en la formación de un vórtice alrededor del eje del impulsor (Figura 42). Además, se observa la presencia de aire aguas abajo del impulsor y en las regiones donde se ubican los vórtices. La relación de mezcla aire-agua, expresada como fracción volumétrica de aire, varía entre 0,1 y 0,3 en todo el dominio.

VI. RECOMENDACIONES

- Efectuar investigación sobre desempeño del flujo en impulsores diferentes al PTB.
- Llevar a cabo estudios de comportamiento del flujo variando el tipo, número o ancho de los deflectores.
- Simular el flujo con impulsores excéntricos horizontales descentrados colocados en un tanque agitado.
- Simular el flujo a través de sistemas de múltiples impulsores.
- Simular la velocidad de mezcla de dos o tres mezclas de fluidos diferentes.
- Optimizar el rango de mezcla definiendo las siguientes variables: ángulo del deflector, altura del impulsor, velocidad de rotación del impulsor, número de deflectores, diámetro y altura del tanque agitado, entre otras.
- Realizar estudios de patrones de flujo simplemente cambiando la forma de la pala del impulsor.
- Llevar a cabo estudios térmicos y de vibración en procesos de agitación y mezcla.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

[1] J. M. Nouri y J. H. Whitelaw, «Flow Characteristics of Stirred Reactors with Newtonian and Non-Newtonian Fluids,» *AIChE J.,* vol. 36, p. 627–629, 1990.

[2] R. M. Hockey y J. M. Nouri, «Turbulent Flow in a Baffled Vessel Stirred by a 60□ Pitched Blade Impeller,» *Chem. Eng. Sci.,* vol. 51, p. 4405–4421, 1996.

[3] M. Schafer y et al., «Trailing Vortices around a 45□ Pitched-Blade Impeller,» *AIChE J.,* vol. 44, p. 1233–1246, 1998.

[4] Z. Jaworski y et al., «An LDA Study of Turbulent Flow in a Baffled Vessel Agitated by a Pitched Blade Turbine,» *Trans. IChemE. A,,* vol. 69, p. 313–320, 1991.

[5] D.-M. Mao y et al., «The Mean Flow Field Generated by a Pitched Blade Turbine: Changes in the Circulation Pattern due to Impeller Geometry,» *Can. J. Chem. Eng.,* vol. 75, p. 307–316, 1997.

[6] S. M. Kresta y P. E. Wood, «The Mean Flow Field Produced by a 45□ Pitched Blade Turbine: Changes in the Circulation Pattern due to Off Bottom Clearance,» *Can. J. Chem. Eng.,* vol. 71, p. 42–53, 1993.

[7] M. Yianneskis y et al., «An Experimental Study of the Steady and Unsteady Flow Characteristics of Stirred Reactors,» *J. Fluid Mech.,* vol. 175, p. 537–555, 1987.

[8] K. Rutherford y et al., «Hydrodynamic Characteristics of Dual Rushton Impeller Stirred Vessels,» *AIChE J.,* vol. 42, p. 332–346, 1996.

[9] G. Micale y et al., «Prediction of Flow Fields in a Dual-Impeller Stirred Vessel,» *AIChE J.,* vol. 45, p. 445–464, 1999.

[10] V. R. Deshpande y V. V. Ranade, «Simulation of Flows in Stirred Vessels Agitated by Dual Rushton Impellers Using Computational Snapshot Approach,» *Chem. Eng. Comm.,* vol. 190, p. 236–253, 2003.

[11] G. Montante y et al., «An Experimental Study of Double-to-Single-Loop Transition in Stirred Vessels,» *Can. J. Chem. Eng.,* vol. 77, p. 649–659, 1999.

[12] Y.-Y. Tsui y et al., «Blade Angle Effect on the Flow in a Tank Agitated by the Pitched-Blade Turbine,» *ASME J. Fluids Eng.,* vol. 128, p. 774–782, 2006.

[13] O. Lundström y H. Syrjä, «Study of Particle Homogeneity in Mixing Tanks Using Exper-iments and CFD,» *eng. Student Paper,* 2021.

[14] VISCO JET, «VISCO JET®,» 2021. [En línea]. Available: https://www.viscojet.com/en/contact/.

[15] CHEMINEER, Liquid Agitation, New York: CHEMICAL ENGINEERING, 1985, pp. 10-11.