

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



Evaluación mediante Dinámica de Fluidos Computacional de impulsores
hydrofoil mejorados para agitadores utilizados en la suspensión de sólidos en
la industria minera

Tesis para optar el Título de Ingeniero Mecánico

AUTOR

SEGOVIA CHAFALOTE MARIO LEOPOLDO

ASESORES:

DR. QUINO MARTÍN VALVERDE GUZMÁN

MG. RENATTO MARCELLO YUPA VILLANUEVA

Lima, junio del 2022



© 2022 Segovia Chafalote Mario Leopoldo.

(**) Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos a través de cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.

RESUMEN

En el presente documento de tesis se evalúa el desempeño de un impulsor *hydrofoil* y versiones mejoradas para operar en un tanque agitador con una pulpa formada por agua y sulfato de cobre, mediante la dinámica de fluidos computacional.

En primer lugar, el impulsor original es un impulsor *hydrofoil* que cuenta con una sección rectangular en sus álabes y ángulo de paso constante en toda la longitud de sus 3 álabes. En segundo lugar, las propuestas de mejora se caracterizan principalmente en que sus álabes cuentan con una sección de perfil aerodinámico NACA 4412 y torsión e inclinación en toda su longitud.

Para la evaluación de los impulsores se empleó la dinámica de fluidos computacional mediante el software Ansys Fluent e indicadores de desempeño como torque requerido, flujo másico axial generado, número de potencia, patrón de flujo, entre otros.

En cuanto a las condiciones de trabajo, la primera implica el estudio de los impulsores en una mezcla homogénea en régimen estacionario. Mientras en la segunda se evalúan bajo la condición inicial donde la fase líquida del agua y la fase sólida se encuentran separadas aproximando la aplicación de sólidos en suspensión en régimen transitorio. A partir de ello se selecciona la propuesta de mejora con mejor desempeño en operación en mezcla homogénea y finalmente esta es comparada con el impulsor original con el fin de determinar qué modelo logra un estado de suspensión completa bajo el mismo consumo de potencia.

Finalmente, luego de analizar al impulsor original, se obtiene como principal resultado la formación de vórtices debajo del cubo y álabes, ello tiene como consecuencia una baja generación de flujo másico axial y se observa que el patrón de flujo obtenido no es completamente axial. Por otro lado, como resultados de la evaluación de los impulsores mejorados propuestos (G1, G3 y G6), se obtiene una notable reducción en la formación de vórtices debajo del impulsor, un incremento en el flujo másico generado y una mejora en el patrón de flujo axial durante la operación. En cuanto a la evaluación en suspensión de sólidos, se obtiene que con la propuesta de mejora G6 se logra un nivel de suspensión de partículas con una mejor distribución en el tanque en menor tiempo de operación bajo el mismo consumo de potencia.



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA

TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

TÍTULO : EVALUACIÓN MEDIANTE DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL DE IMPULSORES HYDROFOIL MEJORADOS PARA AGITADORES UTILIZADOS EN LA SUSPENSIÓN DE SÓLIDOS EN LA INDUSTRIA MINERA

ÁREA : Diseño

PROPUESTO POR : Dr. Quino Martín Valverde Guzmán

ASESOR : Dr. Quino Martín Valverde Guzmán
: Mg. Renatto Marcello Yupa Villanueva

TESISTA : Mario Leopoldo Segovia Chafalote

CÓDIGO : 20131100

FECHA : 14/08/2020

DESCRIPCIÓN Y OBJETIVOS:

Los procesos de mezcla y agitación son de uso muy extendido y de gran importancia en la industria nacional. Estos tienen aplicaciones en el sector químico, farmacéutico, alimentario, petrolero y minero, siendo este último uno de los pilares de la economía peruana. Dentro de la industria minera, la principal aplicación de estos procesos es la suspensión de sólidos dentro de tanques agitadores. Estos equipos tienen como principal componente al impulsor, el cual cumple la función de transferir energía y forzar al fluido a moverse dentro del tanque.

El objetivo de la presente tesis es evaluar el desempeño de un impulsor hydrofoil y de versiones mejoradas para operar en un tanque agitador con una pulpa formada por agua y sulfato de cobre, mediante la dinámica de fluidos computacional. Metodológicamente, se debe realizar un análisis preliminar simulando la operación de los impulsores modelando la pulpa como un fluido homogéneo y posteriormente se debe realizar una evaluación más realística representando la pulpa mediante un modelo multifásico de líquido con partículas sólidas en suspensión.

Finalmente, la evaluación entre los impulsores se debe realizar mediante indicadores de desempeño de operación como potencia requerida, flujo másico axial, distribución de velocidades, concentración de sólidos en la mezcla, entre otros. A partir de estos indicadores se debe seleccionar al impulsor con mejor rendimiento.



**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**

TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

**EVALUACIÓN MEDIANTE DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL DE
IMPULSORES HYDROFOIL MEJORADOS PARA AGITADORES UTILIZADOS
EN LA SUSPENSIÓN DE SÓLIDOS EN LA INDUSTRIA MINERA**

Introducción

1. Estado del arte
2. Análisis de impulsor original en mezcla homogénea
3. Análisis de impulsores mejorados en mezcla homogénea
4. Evaluación de impulsor original y versión mejorada en suspensión de sólidos

Conclusiones

Bibliografía

Dr. Quino Martín Valverde Guzmán

Asesor

Mg. Renatto Marcello Yupa Villanueva

Co-Asesor



DEDICATORIA

A mi madre, Nancy

A mi padre, Abdias

A mis hermanas, Kelly y Gabriela

AGRADECIMIENTOS

Un especial agradecimiento a mi asesor Quino Valverde Guzmán y a Renatto Yupa Villanueva, Alex Pachas Napa, Jose Chambergo Venegas y Miguel Ormeño Valeriano, quienes me brindaron apoyo constante durante diferentes etapas del desarrollo de esta tesis.



Índice general

Lista de figuras	VII
Lista de tablas	XIII
Lista de símbolos	XIV
Introducción	1
1. ESTADO DEL ARTE	3
1.1. Proceso de agitación	4
1.2. Tanques agitadores	4
1.2.1. Componentes	5
1.2.2. Geometría	6
1.2.3. Regímenes de trabajo	7
1.2.4. Aplicaciones en la industria: Suspensión de sólidos	8
1.3. Impulsores	10
1.3.1. Clasificación	10
1.3.2. Indicadores del desempeño	12
1.4. CFD aplicado a tanques agitadores	15
1.5. Dinámica de fluidos	16
1.5.1. Ecuaciones fundamentales	17
1.5.2. Flujo externo	17
1.6. Método de volúmenes finitos	19
1.6.1. Definición	19
1.6.2. Discretización espacial	19
1.6.3. Discretización temporal	21
1.7. Aspectos de modelamiento	21
1.7.1. Discretización del dominio	22
1.7.2. Costo computacional de solución	23
1.7.3. Modelos de turbulencia	23
1.7.4. Modelos de flujo multifásico	25

1.7.5.	Interacción de fases	27
2.	ANÁLISIS DE IMPULSOR ORIGINAL EN MEZCLA HOMOGÉNEA	30
2.1.	Modelo geométrico de impulsor <i>hydrofoil</i> original	31
2.2.	Independencia de malla	32
2.2.1.	Datos de entrada	32
2.2.2.	Discretización del dominio	33
2.2.3.	Resultados de independencia de malla	36
2.3.	Modelo geométrico de tanque agitador	36
2.4.	Análisis de impulsor original en mezcla homogénea	37
2.4.1.	Datos de entrada	37
2.4.2.	Discretización y modelos matemáticos	38
2.4.3.	Validación de modelos matemáticos	40
3.	ANÁLISIS DE IMPULSORES MEJORADOS EN MEZCLA HOMOGÉNEA	46
3.1.	Propuesta de mejora con cambio de sección	47
3.1.1.	Análisis de impulsor G1 en mezcla homogénea	49
3.2.	Propuestas de mejora con variación de ángulo de paso e inclinación de álabes	58
3.2.1.	Propuesta de mejora: Impulsor G6	59
3.2.2.	Propuesta de mejora: Impulsor G3	61
3.3.	Evaluación de propuestas de impulsores G3 y G6	62
3.4.	Análisis de impulsor G6 en mezcla homogénea	64
4.	EVALUACIÓN DE IMPULSOR ORIGINAL Y VERSIÓN MEJORA-	
	DA EN SUSPENSIÓN DE SÓLIDOS	77
4.1.	Descripción de la condición de operación	78
4.2.	Modelos matemáticos para la suspensión de sólidos	79
4.3.	Evaluación de impulsores en suspensión de sólidos	79
	Conclusiones	97
	Bibliografía	97

Índice de figuras

1.1. Tanque agitador convencional con deflectores.	5
1.2. Geometría estándar de tanque agitador con deflectores.	7
1.3. Impulsores para régimen laminar.	7
1.4. Estados de suspensión de partículas.	9
1.5. Flujo radial en tanque agitador con deflectores.	11
1.6. Flujo axial en tanque agitador con deflectores.	11
1.7. Impulsor <i>hydrofoil</i>	12
1.8. Número de potencia versus número de Reynolds.	13
1.9. Número de caudal versus número de Reynolds.	14
1.10. Dominio rotativo y estacionario.	16
1.11. Desprendimiento de capa límite.	18
1.12. Ángulo de paso en perfil aerodinámico.	19
1.13. Volumen de control en 1 dimensión	20
1.14. Tipos de malla.	22
2.1. Impulsor <i>hydrofoil</i> original.	31
2.2. Secciones de álabe del impulsor original.	31
2.3. Inclinação de álabes de impulsor original.	32
2.4. Secciones de álabe de impulsor original.	32
2.5. Dominio rotativo-Impulsor original y dominio estático.	33
2.6. Malla de impulsor original con $y = 0.25\text{ mm}$ y 6 capas.	35
2.7. Variación de $y + prom$ con respecto al número de capas.	36
2.8. Tanque agitador modelado en <i>software</i> Inventor.	37
2.9. Subdominio rotativo de tanque agitador con impulsor original.	37
2.10. Subdominio estacionario de tanque agitador con impulsor original.	38
2.11. Mallado de la interface de subdominios.	39
2.12. Detalle de malla de impulsor original.	39
2.13. Torque numérico en función de la velocidad de giro de impulsor.	41
2.14. Flujo másico numérico en función de la velocidad de giro de impulsor.	41
2.15. N_p vs. Re	41

2.16. N_q vs. Re	42
2.17. Vórtices formados debajo del impulsor original.	42
2.18. Líneas de corriente: Impulsor original.	43
2.19. Detalle de líneas de corriente en parte inferior de impulsor original.	43
2.20. Detalles de vectores de velocidad debajo de impulsor original.	43
2.21. Eje longitudinal a 102 mm del eje del impulsor.	44
2.22. Componente tangencial en función de la altura nominal del tanque.	44
2.23. Componente radial en función de la altura nominal del tanque.	44
2.24. Componente axial en función de la altura nominal del tanque.	45
2.25. Energía cinética turbulenta-Impulsor Original.	45
3.1. Cambio de sección de impulsor original.	47
3.2. Ángulo de paso de álabe impulsor G1.	47
3.3. Inclinação de álabes de impulsor G1.	48
3.4. Secciones de álabe con perfil aerodinámico.	48
3.5. Modelo de impulsor G1.	48
3.6. Variación de $y + prom$ con respecto al número de capas.	49
3.7. Mallado en la interfase: G1.	50
3.8. Detalle de malla de impulsor G1.	50
3.9. Torque en función de la velocidad de giro de impulsor.	51
3.10. Flujo másico en función de la velocidad de giro de impulsor.	51
3.11. N_p vs. Re	52
3.12. N_q vs. Re	52
3.13. Flujo másico generado en función de la potencia consumida.	53
3.14. $\frac{N_q}{N_p}$ vs. Re	53
3.15. Líneas de corriente de impulsores G1 y original.	54
3.16. Detalle de líneas de corriente en sección de impulsor.	54
3.17. Detalle de líneas de corriente debajo de impulsor.	54
3.18. Vectores de velocidad de impulsores G1 y original.	55
3.19. Detalle de vectores de velocidad en sección de impulsor.	55
3.20. Detalle de vectores de velocidad debajo de impulsor.	56
3.21. Componente radial en función de la altura nominal del tanque.	56
3.22. Componente axial en función de la altura nominal del tanque.	57

3.23. Componente tangencial en función de la altura nominal del tanque.	57
3.24. Energía cinética turbulenta.	58
3.25. Energía cinética turbulenta debajo de impulsor.	58
3.26. Variación de ángulos de paso de álabes impulsor <i>hydrofoil</i>	59
3.27. Secciones de álabe del impulsor G6	60
3.28. Inclinação de álabe de impulsor G6	60
3.29. Secciones del álabe del impulsor G6.	60
3.30. Secciones de álabe de impulsor G3	61
3.31. Secciones del álabe del impulsor G3.	61
3.32. Inclinação de álabe de impulsor G3	62
3.33. Vórtices formados debajo de los impulsores.	62
3.34. Vórtices formados debajo de los impulsores.	63
3.35. Torque en función de la velocidad de giro de impulsor.	64
3.36. Variación de $y + prom$ con respecto al número de capas.	64
3.37. Mallado en la interfase: G6	65
3.38. Detalle de malla de impulsor G6.	65
3.39. Torque en función de la velocidad de giro de impulsor.	66
3.40. N_p vs. Re	67
3.41. Flujo másico en función de la velocidad de giro de impulsor.	67
3.42. N_q vs. Re	68
3.43. Flujo másico generado en función de la potencia consumida.	68
3.44. Líneas de corriente de impulsores G6 y original	69
3.45. Detalle de líneas de corriente en sección de impulsor.	69
3.46. Detalle de líneas de corriente debajo de impulsor	70
3.47. Vectores de velocidad de impulsores G6 y original.	70
3.48. Detalle de vectores de velocidad en sección de impulsor.	70
3.49. Detalle de vectores de velocidad debajo de impulsor.	71
3.50. Componente radial en función de la altura nominal del tanque.	71
3.51. Componente axial en función de la altura nominal del tanque.	71
3.52. Componente tangencial en función de la altura nominal del tanque.	72
3.53. Componente radial en función de la altura nominal del tanque.	72
3.54. Componente tangencial en función de la altura nominal del tanque.	73

3.55. Componente axial en función de la altura nominal del tanque.	73
3.56. Componente radial en función de la altura nominal del tanque.	74
3.57. Componente tangencial en función de la altura nominal del tanque. . . .	74
3.58. Componente axial en función de la altura nominal del tanque	75
3.59. Energía cinética turbulenta.	75
3.60. Energía cinética turbulenta debajo de impulsores.	76
4.1. Estado inicial de proceso de agitación con partículas.	78
4.2. Detalle de malla de impulsor original.	79
4.3. Detalle de malla de impulsor G6.	79
4.4. Potencia en función de la velocidad de giro de impulsor.	80
4.5. Nivel de altura desde base de tanque.	81
4.6. Variación de fracción volumétrica promedio-Impulsor original.	81
4.7. Variación de fracción volumétrica promedio-G6.	82
4.8. Variación de fracción volumétrica promedio-45 % de altura de tanque. . .	82
4.9. Variación de fracción volumétrica promedio-55 % de altura de tanque. . .	83
4.10. Variación de fracción volumétrica promedio-65 % de altura de tanque. . .	83
4.11. Variación de fracción volumétrica promedio-75 % de altura de tanque. . .	84
4.12. Variación de fracción volumétrica promedio-85 % de altura de tanque. . .	84
4.13. Fracción volumétrica de sólidos: 10 seg	85
4.14. Fracción volumétrica de sólidos: 20 seg.	85
4.15. Fracción volumétrica de sólidos: 30 seg.	86
4.16. Fracción volumétrica de sólidos: 40 seg.	86
4.17. Variación de la fracción volumétrica promedio.	87
4.18. Distancia de muestreo paralelo al eje del impulsor.	87
4.19. Variación de la fracción volumétrica a 102 mm y 204 mm.	88
4.20. Variación de la fracción volumétrica debajo del impulsor.	89
4.21. Fracción volumétrica en plano transversal a una altura del 5 % desde la base del tanque agitador.	90
4.22. Variación de fracción volumétrica de sólidos en coordenada radial al 5 % de altura del tanque.	90
4.23. Fracción volumétrica en plano transversal a una altura del 21 % desde la base del tanque agitador.	91

4.24. Variación de fracción volumétrica de sólidos en coordenada radial al 21 % de altura del tanque.	91
4.25. Fracción volumétrica en plano transversal a una altura del 85 % desde la base del tanque agitador.	92
4.26. Variación de fracción volumétrica de sólidos en coordenada radial al 85 % de altura del tanque.	92
4.27. Dispersión de la energía cinética turbulenta	93
4.28. Dispersión de la energía cinética turbulenta debajo de impulsores a una altura del 5 % desde la base del tanque	93



Índice de tablas

1.1. Dimensiones de parámetros en función del diámetro de tanque	6
1.2. Factores que influyen en la suspensión de sólidos	10
1.3. Interacción de fases en modelo euleriano.	29
2.1. Características de impulsor original.	30
2.2. Densidad de la mezcla y viscosidad dinámica utilizadas para el cálculo de $y+$	34
2.3. Resultados de cálculo de espesor de primera capa.	34
2.4. Parámetros variables en la etapa de simulación	35
2.5. Medidas de tanque agitador	37
2.6. Propiedades de las fases de la mezcla.	38
2.7. Características del mallado.	39
2.8. Resultados numéricos de impulsor original.	40
2.9. Comparación numérica y experimental de torque y N_p	40
3.1. Características de impulsor G1.	49
3.2. Características del mallado: G1.	49
3.3. Comparación numérica de impulsor G1.	51
3.4. Características de impulsor G6.	59
3.5. Características de impulsor G3.	61
3.6. Resultados numéricos de impulsor G3 y G6.	63
3.7. Características del mallado: G6.	66
3.8. Resultados numéricos de impulsor G6.	66
4.1. Propiedades de las fases	78
4.2. Características de impulsores evaluados.	94
4.3. Desempeño de impulsores evaluados.	95

Lista de símbolos

α_k	Fracción volumétrica	[—]
α_l	Fracción volumétrica de fase líquida	[—]
α_p	Fracción volumétrica de fase secundaria	[—]
α_s	Fracción volumétrica de fase sólida	[—]
τ_p	Tiempo de respuesta de partículas	[s]
τ_w	Tensión de cizallamiento de pared	[Pa]
θ	Ángulo de ataque	[°]
C_c	Distancia de sección desde el eje de rotación	[mm]
C_f	coeficiente de fricción	[—]
St	Número de Stokes	[—]
t_s	Tiempo de respuesta del sistema	[s]
U_{fr}	Velocidad de fricción cerca de pared	[m · s ⁻¹]
v_f	Velocidad de flujo externo	[m · s ⁻¹]
y	Espesor de primera capa	[m]
y^+	Distancia adimensional hacia pared	[—]
$\bar{\tau}$	Tensor de esfuerzos	[Pa]
μ	Viscosidad dinámica	[kg · m ⁻¹ · s ⁻¹]
μ_f	Viscosidad dinámica de fluido	[kg · m ⁻¹ · s ⁻¹]
ρ_f	Densidad del fluido	[kg · m ⁻³]
ρ_m	Densidad de mezcla	[kg · m ⁻³]
ρ_{pt}	Densidad de partícula	[kg · m ⁻³]

\vec{v}	Vector de velocidad general	$[m \cdot s^{-1}]$
$\vec{v}_{dr,p}$	Velocidad de deriva de la fase secundaria	$[m \cdot s^{-1}]$
\vec{v}_{pq}	Velocidad relativa de la fase secundaria	$[m \cdot s^{-1}]$
\vec{F}	Fuerzas externas	$[N]$
\vec{g}	Aceleración de la gravedad	$[m \cdot s^{-2}]$
A	Sección transversal	$[m^2]$
B	Ancho de deflectores	$[mm]$
C	Holgura	$[mm]$
C_d	Coefficiente de arrastre	$[-]$
C_l	Coefficiente de sustentación	$[-]$
D	Diámetro de impulsor	$[mm]$
d_{pt}	Diámetro de partícula	$[mm]$
D_S	Diámetro de eje	$[mm]$
F_{drag}	Fuerza de arrastre	$[N]$
F_{lift}	Fuerza de sustentación	$[N]$
F_{td}	Fuerza de dispersión turbulenta	$[N]$
F_{vm}	Fuerza de masa virtual	$[N]$
F_{wl}	Fuerza lubricación de pared	$[N]$
K_{sl}	Coefficiente de intercambio fluido-sólido	$[-]$
L_s	Longitud característica	$[m]$
M_a	Flujo másico	$[kg \cdot s^{-1}]$
N	Velocidad de giro de impulsor	$[min^{-1}]$
N_p	Número de potencia	$[-]$

Nq	Número de caudal	$[-]$
P	Potencia	$[W]$
R_{pq}	Fuerza de interacción entre fases	$[N]$
Re	Número de Reynolds	$[-]$
Re_s	Número de Reynolds relativo a fase sólida	$[-]$
T	Diámetro de tanque	$[mm]$
V_s	Velocidad característica	$[m \cdot s^{-1}]$



Introducción

Entre los los procesos industriales más comunes podemos encontrar a los procesos de agitación y mezcla, los cuales son de gran importancia en la industria peruana, ya que tiene aplicaciones en la industria química, petrolera, alimenticia y minera, siendo esta última uno de los pilares de la economía.

Los procesos de agitación consisten en la transferencia de energía mediante un sistema motriz, hacia un fluido, mezcla de fluidos o mezcla de fluido con sólidos. Los agitadores constan de diferentes componentes como un tanque contenedor, un impulsor y en algunos casos deflectores. Entre los componentes mencionados, el que tiene el rol más relevante es el impulsor, ya que cumple la función de forzar al fluido a moverse dentro del tanque. Debido a ello, el estudio de los impulsores ha ganado interés e importancia en la actualidad, ya que el estudio a profundidad de este trae consigo muchos beneficios, como la mejora del rendimiento y reducción de costos de fabricación.

Para estudiar el proceso de agitación existen herramientas que permiten entender mejor el funcionamiento y realizar mejoras a los agitadores. Durante cierto tiempo las técnicas experimentales fueron la principal herramienta y demostraban ser muy eficaces hasta ciertos puntos; por ello, durante los años se han desarrollado nuevas alternativas. Debido a los límites que presentan las técnicas experimentales, actualmente las herramientas computacionales están ganando fama y se vienen desarrollando numerosos métodos de solución que ayudan a comprender mejor el comportamiento de los fluidos y se pueden utilizar de forma complementaria de los métodos experimentales. Una de estas herramientas es el CFD (Computational Fluid Dynamics), el cual se basa en métodos numéricos y es considerada como una herramienta muy útil para el estudio de fenómenos en tanques agitadores. Esta nueva herramienta ha llamado la atención de muchos autores y estos la consideran como un método complementario de gran ayuda y lo utilizan para sus investigaciones.

El presente trabajo tiene como objetivo se evaluar y comparar el funcionamiento de un impulsor *hydrofoil* frente a tres propuestas de mejora en una mezcla de agua con sulfato de cobre, mediante la dinámica de fluidos computacional, bajo dos condiciones de trabajo. Estas propuestas de mejora se caracterizan principalmente en que sus álabes cuentan con una sección de perfil aerodinámico NACA 4412 y torsión e inclinación en

toda su longitud. Estos cambios permiten obtener un mejor desempeño en operación. En cuanto a la metodología, se realizó un estudio preliminar de los impulsores en un modelo de mezcla homogénea y luego en la aplicación de sólidos en suspensión, cuya condición inicial cuenta con la fase líquida del agua y la fase sólida separadas.



CAPÍTULO 1

ESTADO DEL ARTE

El presente capítulo tiene como finalidad desarrollar los principales términos de los procesos de mezcla y agitación y los fundamentos teóricos de la dinámica de fluidos computacional.

Por un lado, se inicia por la definición de los procesos de agitación y mezcla, para luego indicar sus aplicaciones dentro de la industria centrándose en la aplicación de suspensión de sólidos. Así mismo, se toma énfasis en el desarrollo de tanques agitadores, señalando sus componentes principales, entre ellos, los impulsores e indicando parámetros que los caracterizan. Finalmente, se presentan herramientas que han servido para el estudio de tanques agitadores como los métodos experimentales y herramientas computacionales como el CFD.

Por otro lado, también se presentan los fundamentos teóricos de la dinámica de fluidos, comenzando por la presentación de las ecuaciones fundamentales de la dinámica de fluidos y abordando el tema flujo externo. Para culminar, se desarrolla el tema de la dinámica de fluidos computacional, presentando los modelos matemáticos que son utilizados para solución de las ecuaciones fundamentales que gobiernan el movimiento de los fluidos en suspensión de sólidos en tanques agitadores.

1.1 Proceso de agitación

Actualmente, los procesos de agitación y mezcla son muy utilizados dentro de la industria minera y parte del éxito dentro de esta industria depende mucho de una correcta y eficaz aplicación de estos procesos.

El término de agitación se define por la transferencia de energía mediante un elemento motriz hacia una parte del fluido, mezcla de fluidos o fluido con sólidos dentro de un tipo de recipiente. Por otro lado, se delimita como una operación de mezcla a la distribución al azar de dos fases inicialmente que se encontraban separadas y alcanza una la homogeneidad deseada [McCabe et al., 1993]. Con ello, es posible diferenciar los procesos de mezcla y agitación, debido a que el proceso de mezcla requiere más de una fase, mientras que el de agitación no, ya que se puede agitar una sola sustancia y se estaría cumpliendo con el concepto del proceso.

Una vez definido el proceso de agitación, lo siguiente a tratar son sus principales aplicaciones dentro de los distintos campos en la industria y los diferentes equipos que se utilizan, los cuales se presentan a continuación, [McCabe et al., 1993] :

Aplicaciones

- Suspensión de partículas sólidas
- Mezclado de líquidos miscibles
- Dispersión de gases en líquidos
- Dispersión de líquidos no miscibles

Equipos

- Tanques agitadores
- Mezcladores de chorro
- Mezcladores estáticos en línea
- Mezcladores dinámicos en línea

1.2 Tanques agitadores

El presente trabajo está enfocado en el estudio de tanques agitadores. Con este equipo se pueden realizar la mayoría de las aplicaciones de los procesos de agitación, como mezcla de líquidos, suspensión de sólidos, dispersión de gases en líquidos, entre otros.

Dentro de la industria, estos equipos son usados en el sector minero, principalmente en la aplicación de suspensión de sólidos, debido a que esta operación permite homogenizar y acondicionar la mezcla de mineral molido con agua o solución acuosa, también conocida como pulpa y así reducir tiempos de flotación. Por otro lado, también son usados dentro del tratamiento de relaves, principalmente en planta de filtración, siendo unos de los equipos principales, ya que son fuente de homogenización del relave previo al proceso de filtración.

1.2.1 Componentes

Un tanque agitador consta principalmente de un recipiente cilíndrico ubicado de forma vertical con un conjunto de elementos que cumplen la función de agitar a las fases dentro del tanque. Además, en algunas aplicaciones se utilizan placas verticales, también llamadas deflectores, dentro de los tanques, los cuales son utilizados comúnmente en operaciones donde se trabaja en régimen turbulento [Paul et al., 2004].

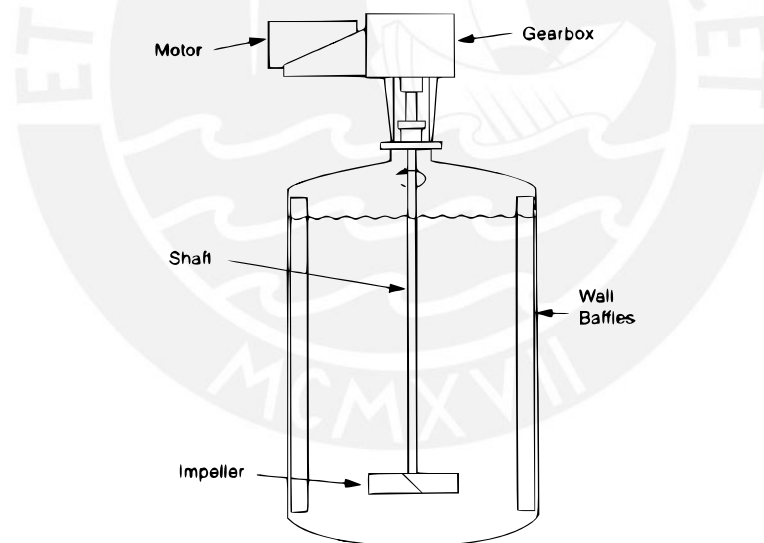


Figura 1.1: Tanque agitador convencional con deflectores.

Fuente: Tomado de [Paul et al., 2004].

Recipiente:

Este elemento cumple la función de contener a los fluidos y sólidos con los que se trabaja. Entre sus características más relevantes se encuentra el tipo de fondo. Se puede encontrar tanques con fondo toriesférico, cónico y plano. En el presente trabajo se utilizará un tanque con tipo de fondo plano.

Deflectores:

Son utilizados en casos donde el régimen turbulento o transitorio dentro del recipiente es requerido, ya que favorece la calidad de mezcla que se obtiene en los procesos [McCabe et al., 1993]. En cuanto a la cantidad de deflectores que un tanque requiere, se recomienda que sea un número par, comúnmente entre 2 o 4 deflectores por tanque, ya que si bien son elementos que favorecen al proceso de agitación y mezcla, traen consigo un incremento en el consumo de potencia [Nienow et al., 1997]. Por otro lado, su uso es muy recomendado en la suspensión de sólidos, ya que evita la acumulación de partículas sólidas en las paredes y en el fondo del tanque [McCabe et al., 1993].

Impulsor :

Elemento principal encargado del proceso de agitación dentro del tanque. Tiene la función de transferir energía al fluido o mezcla de fluidos y sólidos. La cantidad de álabes presentes en el impulsor puede ser entre 2 a 12; sin embargo, si la cantidad de álabes es 2 o excede de 6, el impulsor sería mecánicamente inestable o presentaría dificultades de instalación correspondientemente [Paul et al., 2004].

1.2.2 Geometría

Según lo mencionado en la sección 1.2.1, existen diferentes disposiciones de los componentes que se puede encontrar en un tanque agitador, ya que las dimensiones de cada componente puede variar; por ello, existen parámetros que están relacionados entre sí, dando como resultado proporciones entre sus dimensiones, ver figura 1.2 y tabla 1.1.

Tabla 1.1: Dimensiones de parámetros en función del diámetro de tanque

Elemento	Parámetro geométrico	Símbolo	Proporciones típicas
Tanque	Altura de líquido	H	1
Deflectores	Ancho	B	1/10 - 1/12
Impulsor	Diámetro	D	1/4 - 1/2
	Holgura	C	1/6 - 1/2

Fuente: Elaboración propia.

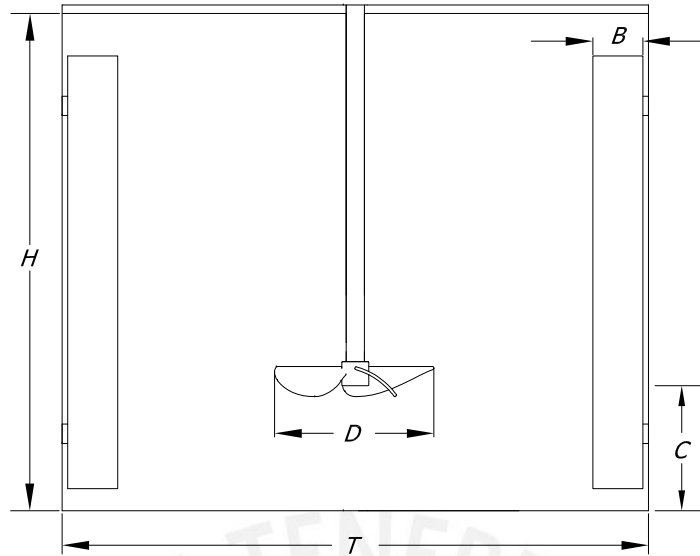


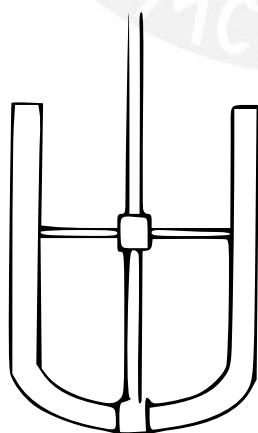
Figura 1.2: Geometría estándar de tanque agitador con deflectores.

Fuente: Elaboración propia.

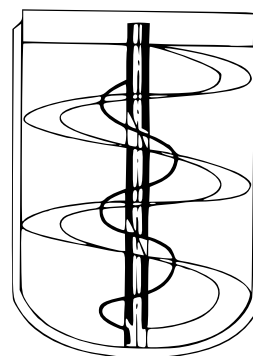
1.2.3 Regímenes de trabajo

Régimen laminar

Se trabaja bajo régimen laminar cuando la viscosidad del fluido en el proceso es elevada. Bajo este régimen, la calidad de la mezcla es pobre, ya que durante el proceso de agitación se presentan problemas de aglomeración. Para evitar ello, se utilizan impulsores de cinta helicoidal o impulsores de ancla que también son llamados impulsores de paso cerrado.



(a) Impulsor de ancla



(b) Impulsor de cinta helicoidal

Figura 1.3: Impulsores para régimen laminar.

Fuente: Tomado de [Nienow et al., 1997].

Régimen turbulento

Para fluidos con viscosidad menor que $10 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ es recomendado trabajar en régimen turbulento. Bajo este régimen se producen estructuras turbulentas, también llamadas remolinos, durante la circulación del fluido, favoreciendo el proceso de mezcla y agitación. Por un lado, las estructuras turbulentas cuentan con un rol muy importante durante el proceso de agitación, ya que la mayor parte de la energía que el impulsor entrega al fluido se transfiere inicialmente hacia estructuras turbulentas de gran escala, luego se cede hacia las estructuras de menor escala y finalmente se disipa a través de la viscosidad [Lane, 2017].

Por otro lado, la difusión de las estructuras turbulentas favorece a la velocidad con la que se forma la mezcla, siendo mayor comparada con la velocidad de formación de mezcla bajo régimen laminar; por ello, si la aplicación de los tanques agitadores es la suspensión de sólidos, el régimen adecuado de trabajo es el turbulento [Nienow et al., 1997].

Finalmente, un proceso de agitación en tanque agitador en régimen turbulento, presenta un consumo energético menor y el eje del impulsor está sometido a menor torque si se compara con una operación en régimen laminar, [Nienow et al., 1997].

1.2.4 Aplicaciones en la industria: Suspensión de sólidos

Los tanques agitadores, según lo presentado en la sección 1.1, se caracterizan por cubrir un gran rango de las aplicaciones de los procesos de agitación y mezcla. Dentro de ese rango, la suspensión de sólidos es una de las principales aplicaciones y viene siendo muy estudiada durante las últimas décadas.

La operación de suspensión de sólidos tiene como fin elevar partículas sólidas en un medio continuo, formando así una mezcla homogénea dentro del equipo en el que se lleva a cabo. Además se caracteriza por requerir el aporte de energía mediante un sistema de agitación; por ello, en su mayoría se llevan a cabo en tanques agitadores donde el impulsor es el encargado de transferir la energía hacia el fluido, creando un flujo de régimen turbulento de tal forma que mediante la combinación de las fuerzas generadas sobre las partículas, estas alcancen un estado de suspensión dentro del tanque.

El estado de suspensión en el que se encuentran las partículas se puede clasificar bajo 3 niveles según [Nienow et al., 1997]:

- Suspensión parcial

Estado caracterizado principalmente por la presencia de partículas en movimiento en la base del recipiente.

- Suspensión completa

Estado en el que ninguna partícula se encuentra en contacto con la base del tanque. En este estado se encuentra la condición de *just suspension*, donde se encuentra la velocidad mínima de agitación para lograr el estado de suspensión completa.

- Suspensión uniforme

Estado de suspensión donde la concentración de partículas es uniforme en todo el tanque. Cualquier incremento de velocidad de agitación no causará ningún efecto a la suspensión.

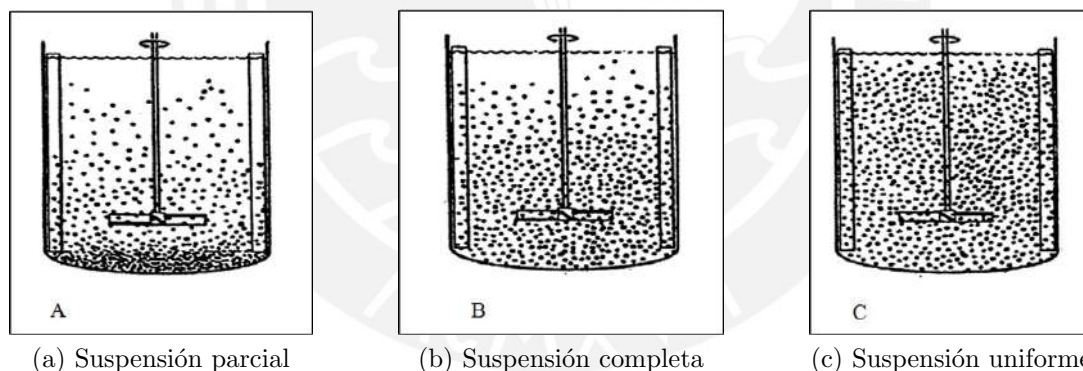


Figura 1.4: Estados de suspensión de partículas.

Fuente: Tomado de [Nienow et al., 1997].

Lograr el estado de suspensión uniforme, como se puede apreciar en la tabla 1.2, dependerá de factores como los parámetros geométricos del tanque agitador, propiedades de las fases y condiciones de operación. Por ejemplo, cuando se emplean partículas cuya densidad es aproximadamente igual a la densidad de la fase líquida, la operación es considerada de una sola fase. Caso contrario, la fuerza de arrastre debe ser suficiente para evitar que las partículas, por la acción de la gravedad, se dirijan hacia la base del tanque y así no lograr el estado de suspensión deseado [Paul et al., 2004].

Tabla 1.2: Factores que influyen en la suspensión de sólidos

Propiedades de las fases	Condiciones de operación	Parámetros geométricos
Densidad de líquido	Concentración de sólidos	Modelo de impulsor
Viscosidad del líquido	Velocidad de operación	Diámetro de impulsor
Densidad del sólido	-	Número de deflectores
Tamaño de partícula	-	Holgura

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, si bien se tiene como fin lograr un estado de suspensión uniforme, este se debe lograr en un bajo tiempo de formación de mezcla y bajo torque de operación. Estos 2 puntos son muy importantes, debido a que con el segundo caso se logra un menor consumo energético y con el primero se evita retrasos en los procesos que se ejecutan luego de los procesos de agitación.

Dicho lo anterior, para alcanzar el objetivo de obtener una mezcla homogénea, también se deben evitar ciertos problemas que puedan ocurrir durante el proceso de agitación. Uno de ellos es la acumulación de partículas en las paredes del tanque e inicie la sedimentación hacia el fondo. Por ello, se recomienda el uso de deflectores e impulsores de flujo axial, ya que el tipo de flujo que generan barre la base del tanque, eleva las partículas y de esta forma se logra evitar la acumulación de partículas en la base.

1.3 Impulsores

Elemento principal de los tanques agitadores, cuya función es forzar a las fases dentro del recipiente a moverse. Actualmente existe una gran variedad de ellos; por eso, son clasificados, según el tipo de flujo que generan y se compara su funcionamiento mediante algunos parámetros característicos.

1.3.1 Clasificación

Impulsores de flujo radial

Los impulsores de flujo radial se caracterizan por producir alta velocidad rotacional, la cual es tangencial a la trayectoria circular que describe el impulsor generando así dos modelos distintos de circulación del fluido tal y como se aprecia en la figura 1.5.

Como campo de aplicación de impulsores de flujo radial está principalmente la dispersión

de gases en líquidos; sin embargo, también se puede utilizar en suspensión de sólidos, pero con la desventaja de que la demanda energética es elevada.

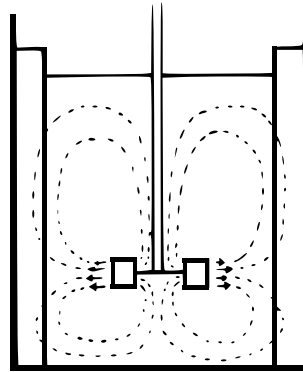


Figura 1.5: Flujo radial en tanque agitado con deflectores.

Fuente: Tomado de [Nienow et al., 1997].

Impulsores de flujo axial

Los impulsores de flujo axial producen una elevada velocidad axial o longitudinal que actúa en dirección paralela al eje, lo cual le permite generar un modelo de circulación del fluido paralelo al eje de giro como se aprecia en la figura 1.6. Sin embargo, para obtener este tipo de flujo es necesario trabajar en régimen turbulento, ya que para regímenes laminares el flujo axial se transforma en flujo radial [Vladimir, 2013].

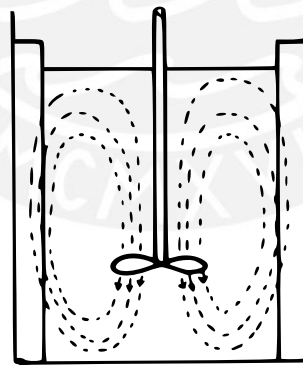


Figura 1.6: Flujo axial en tanque agitado con deflectores.

Fuente: Tomado de [Paul et al., 2004].

Entre sus campos de aplicaciones está la mezcla, extracción y suspensión de sólidos, teniendo un mejor desempeño que los impulsores de flujo radial en esta última aplicación, ya que producen un menor consumo energético.

Actualmente, se viene desarrollando y mejorando varios tipos de impulsores de flujo axial, entre ellos están los impulsores *hydrofoil*. Estos fueron desarrollados para aplicaciones donde el flujo axial sea requerido. Una de estas aplicaciones es la suspensión de sólidos, en la cual el desempeño de los *hydrofoil* es muy bueno en comparación con otros impulsores.

Este tipo de impulsores se caracterizan principalmente por la torsión que presentan sus álabes, como se aprecia en la figura 1.7. Esta característica trae consigo muchos beneficios, entre los cuales se encuentra la generación un elevado gradiente de presión entre la parte superior e inferior del impulsor, consiguiendo así un incremento en la fuerza de sustentación y mejora en la suspensión de partículas [Spogis, 2002].



Figura 1.7: Impulsor *hydrofoil*.

Fuente: Tomado de [Jirout and Rieger, 2011].

Asímismo, otra ventaja es el bajo consumo de energía comparado con otros impulsores del mismo tipo, además durante su funcionamiento produce mayor flujo másico por unidad de potencia consumida.

1.3.2 Indicadores del desempeño

■ Número de Reynolds

El número de Reynolds es la relación entre las fuerzas de inercia y las fuerzas viscosas y es utilizado para caracterizar el tipo de flujo de un fluido. Por un lado, a bajas velocidades de flujo, las fuerzas viscosas son dominantes frente a las fuerzas de inercia, ello es considerado régimen laminar, bajo número de Reynolds. Por otro lado, a elevadas velocidades de flujo, las fuerzas que dominan son las de inercia y;

por ello, el régimen es turbulento [Massey and Ward-Smith, 1998], como se muestra en la ecuación 1.1:

$$Re = \frac{N \cdot D \cdot \rho}{\mu}, \quad (1.1)$$

donde N es velocidad de rotación, D es diámetro del impulsor, ρ es densidad del fluido y μ es viscosidad dinámica.

■ Número de potencia

El número de potencia es de suma importancia en el estudio de agitadores, ya que brinda una idea de la potencia consumida en el proceso de agitación. Su valor depende del tipo de agitador y del número de Reynolds; por ello, para caracterizar a agitadores existe la curva de Np vs Re , ver ecuación 1.2

$$Np = \frac{P}{\rho \cdot N^3 \cdot D^5}, \quad (1.2)$$

donde P es potencia requerida, N es velocidad de rotación, ρ es la densidad del fluido y D es diámetro del impulsor.

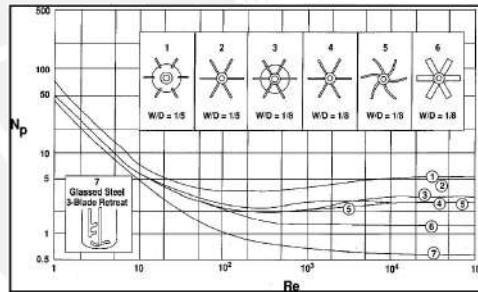


Figura 1.8: Número de potencia versus número de Reynolds.

Fuente: Tomado de [Paul et al., 2004].

■ Número de caudal

Representa la capacidad de bombeo que tienen los impulsores y está relacionado directamente con el caudal que genera el impulsor. Principalmente depende del tipo de impulsor y del número de álabes que este tiene. Este número adimensional también está relacionado con el número de Reynolds y la curva a partir de ello también sirve para caracterizar a los agitadores, ver ecuación 1.3

$$Nq = \frac{Q}{N \cdot D^3}, \quad (1.3)$$

donde Q es caudal, N es velocidad de rotación y D es diámetro del impulsor.

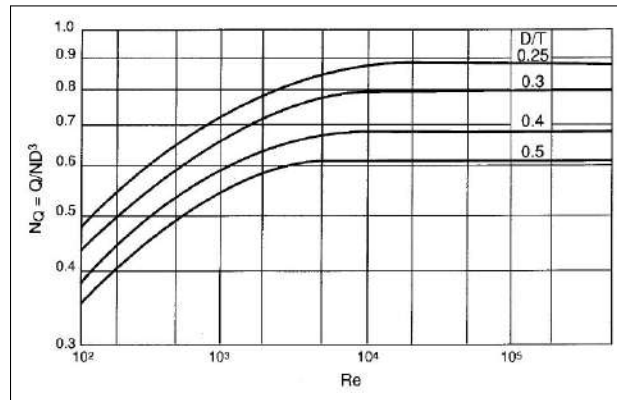


Figura 1.9: Número de caudal versus número de Reynolds.

Fuente: Tomado de [Paul et al., 2004].

■ Número de Stokes

Relaciona el tiempo de respuesta de las partículas τ_p con el tiempo de respuesta del sistema estudiado t_s . Para números de Stokes mayores que la unidad, el tiempo de respuesta de las partículas es mayor y estas no se ven influenciadas por el fluido. El valor de este número determinará el modelo de flujo multifásico a utilizar en la etapa de simulación, ver ecuación 1.4.

$$St = \frac{\tau_p}{t_s} \quad (1.4)$$

■ Energía cinética turbulenta

La energía cinética turbulenta es uno de los parámetros principales para el análisis de sólidos en suspensión, debido a que la dispersión de esta se encuentra relacionada con la formación y calidad de una mezcla [Kumaresan and Joshi, 2006]. Por otro lado, la dispersión de la energía cinética depende principalmente del diseño, diámetro y ubicación del impulsor dentro del tanque agitador, [Jirout and Rieger, 2011].

- **Distribución de vectores de velocidad**

Mediante este indicador es posible determinar las zonas donde el fluido presenta mayor velocidad. Ello mediante una figura de las componentes vectoriales de la velocidad del fluido versus la altura del tanque. De esta manera es posible realizar una comparación entre impulsores, determinando las zonas donde existe mayor velocidad para los casos que se evalúan.

- **Dispersión de partículas sólidas**

Debido a que la finalidad es evaluar los impulsores en la aplicación de sólidos en suspensión, mediante este indicador es posible determinar el nivel de suspensión de partículas dentro del tanque agitador, ya sea utilizando la fracción volumétrica o la concentración de sólidos.

1.4 CFD aplicado a tanques agitadores

Para estudiar el proceso de agitación, existen herramientas que ayudan a entender mejor su funcionamiento y realizar mejoras a los agitadores. Durante cierto tiempo las técnicas experimentales fueron la principal herramienta de los investigadores y demostraban ser muy eficaces; sin embargo, no siempre eran las más adecuadas al momento de medir cantidades que requieren mucha precisión.

Debido a estas limitaciones, actualmente las herramientas computacionales como el CFD (por las siglas en inglés de *Computational Fluid Dynamics*) han ganado fama y son consideradas como muy útiles para el estudio de fenómenos en tanques agitadores, ya que ayudan a comprender mejor el comportamiento de los fluidos y se utilizan de forma complementaria con métodos experimentales.

En el estudio de tanques agitadores, la aplicación de CFD ha sido de gran ayuda, puesto que permite predecir el desarrollo del flujo y estudiar el comportamiento de agitadores mediante el modelo MRF (por las siglas en inglés de *Multiple Reference Frame*). Este modelo es tiene aplicaciones en turbomáquinas y es utilizado para el estudio de tanques agitadores, pues permite definir un dominio rotativo en el cual se encuentra el impulsor y otro estacionario que representa al resto del tanque [Chamberg et al., 2017].

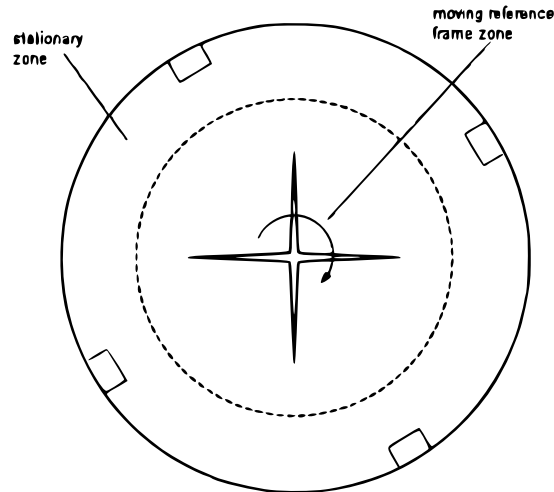


Figura 1.10: Dominio rotativo y estacionario.

Fuente: Tomado de [Fluent, 2016].

1.5 Dinámica de fluidos

Se define un fluido como una sustancia cuya estructura molecular se caracteriza por no presentar resistencia al aplicarle esfuerzos cortantes externos; en otras palabras, no importa cuál sea la magnitud de la fuerza que se aplica sobre un fluido, mientras se encuentre presente, el fluido permanecerá en movimiento [White, 2004].

Por otra parte, si bien el comportamiento de los fluidos es similar bajo la acción de fuerzas externas, la principal diferencia entre ellos yace en sus propiedades. Por ejemplo, las propiedades más relevantes para el estudio de fluidos en movimiento son la densidad y la viscosidad dinámica. Esta última se define como el rozamiento interno de un fluido y si es constante para diferentes tasas de cizallamiento se denomina al fluido como fluido newtoniano [Nienow et al., 1997]. Sin embargo, existen modelos que permiten representar el comportamiento de fluidos no-newtonianos y este es el caso del modelo de Bingham.

El modelo de Bingham estudia el flujo de mezcla de partículas sólidas con un fluido líquido, también llamado pulpa. Los fluidos que obedecen a este modelo se denominan fluidos plásticos de Bingham y exhiben un comportamiento lineal de esfuerzo cortante y velocidad de corte después de alcanzar un umbral inicial de esfuerzo cortante.

1.5.1 Ecuaciones fundamentales

El movimiento de los fluidos está descrito por 3 ecuaciones fundamentales de la mecánica de fluidos, también conocidas como las ecuaciones de Navier-Stokes. Este es un conjunto de ecuaciones en derivadas parciales no lineales que mediante su resolución, permiten conocer el campo de velocidad y presión de un fluido en una región del espacio. Entre ellas se encuentra a la ecuación de continuidad o conservación de masa, conservación de cantidad de movimiento y conservación de energía.

Debido a la complejidad de resolución de las ecuaciones de Navier-Stokes, actualmente no existe solución analítica para ellas; debido a ello, se recurre a herramientas computacionales como el CFD para obtener una solución aproximada, [Wendt, 1996].

Ecuación de continuidad:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0, \quad (1.5)$$

donde ρ es densidad, t es tiempo y \vec{v} es la velocidad del fluido.

Conservación de cantidad de movimiento:

$$\frac{\partial (\rho \vec{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \rho \vec{g} + \nabla (\mu \nabla \vec{v}), \quad (1.6)$$

donde ρ es densidad, t es tiempo, \vec{v} es la velocidad del fluido, g es aceleración de la gravedad y μ es viscosidad del fluido.

1.5.2 Flujo externo

Se define como un caso de flujo externo cuando un cuerpo en movimiento se encuentra inmerso en un fluido. El flujo que encierra al cuerpo se divide en dos regiones, una de ellas se denomina región viscosa o capa límite y se presenta cerca de la superficie del cuerpo.

La capa límite inicia cerca del borde de ataque del cuerpo y en ella se presentan efectos viscosos de corte, no deslizamiento y existe un gradiente de velocidades, como se aprecia en la figura 1.11, que inicia desde cero y acaba cuando alcanza el valor de velocidad del

flujo exterior.

El espesor de la capa límite varía dependiendo del gradiente de presiones; sin embargo, hay un punto donde existe un gradiente de presión adverso que produce el desprendimiento de la capa provocando la disipación de energía.

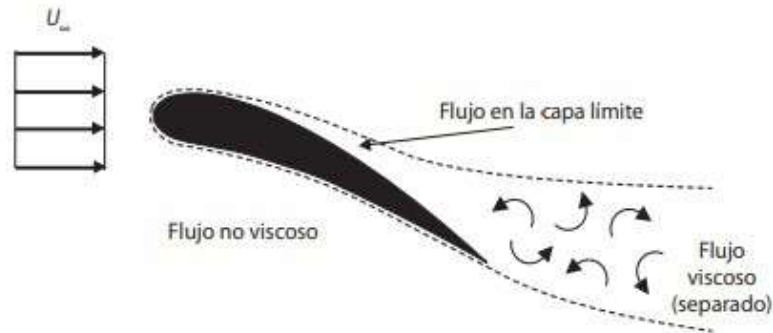


Figura 1.11: Desprendimiento de capa límite.

Fuente: Tomado de [Fernández, 2012].

Por otro lado, un cuerpo inmerso en flujo externo está sometido a la acción de fuerzas externas generadas por el flujo, ecuación 1.7 y 1.8. La magnitud de estas fuerzas depende de la geometría y velocidad del cuerpo sobre el que actúan y propiedades del fluido.

Fuerza de arrastre (F_d) : Actúa en dirección contraria al movimiento del cuerpo.

$$F_d = \frac{1}{2} \cdot C_d \cdot \rho_f \cdot A \cdot v_f^2, \quad (1.7)$$

donde C_d es coeficiente de arrastre, ρ_f es densidad del fluido, A es área del objeto frente al fluido y v_f es velocidad del fluido externo.

Fuerza de sustentación (F_l) : Actúa en dirección perpendicular a la dirección del flujo.

$$F_l = \frac{1}{2} \cdot C_l \cdot \rho_f \cdot A \cdot v_f^2, \quad (1.8)$$

donde C_l es coeficiente de sustentación, ρ_f es densidad del fluido, A es área del objeto frente al fluido y v_f es velocidad del fluido externo.

La forma de la sección del cuerpo, en su mayoría perfiles aerodinámicos, determinará la magnitud de las fuerza de sustentación y arrastre, los cuales dependen del ángulo formado entre la cuerda del perfil y la dirección del flujo, también llamado ángulo de ataque. Asimismo, el ángulo formado entre la cuerda del perfil y el plano de rotación es

llamado ángulo de paso y mediante su variación es importante en el caso de suspensión de sólidos, [Spogis, 2007].

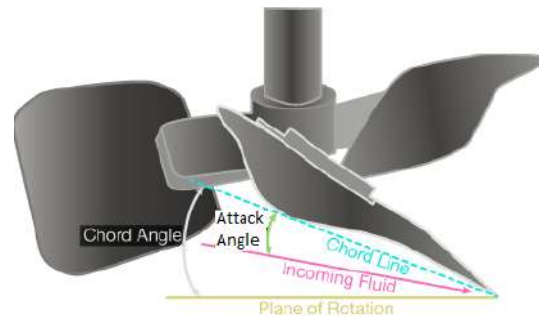


Figura 1.12: Ángulo de paso en perfil aerodinámico.

Fuente: Tomado de [Benz, 2018].

1.6 Método de volúmenes finitos

1.6.1 Definición

El método de volúmenes finitos desarrolla una metodología numérica a partir de la cual reemplaza una solución analítica en derivadas parciales. Este método discretiza el dominio en un número finito de celdas (o volúmenes de control). Por tanto, el método se basa en valores discretos que están promediados en la celda. Respecto a la forma en que se asocian los volúmenes de control (celdas) a los puntos del mallado, existen dos posibilidades según [Fernández, 2012]:

Esquema basado en celdas:

Las variables se almacenan en los centros de las celdas y las líneas de las mallas definen los volúmenes finitos. Las variables de flujo son valores promediados sobre cada celda.

Esquema basado en nodos:

Las variables se almacenan en los vértices de la malla. Por ello, las incógnitas están almacenadas en los vértices de las celdas.

1.6.2 Discretización espacial

En esta sección se detallan los esquemas utilizados para el desarrollo de esta tesis, para mayor detalle de los esquemas existentes consultar [Fernández, 2012].

Esquema Upwind:

Para casos donde domina la convección, se puede suponer que el valor en la cara de la celda es idéntico al valor aguas arriba, el proceso se denomina diferenciación upwind de primer orden. Por otro lado, una modificación de este esquema hace uso de una expansión en serie de Taylor para describir los gradientes upwind, esta versión se denomina diferenciación upwind de segundo orden, la cual ofrece una mayor precisión que el método upwind primer orden; sin embargo, requiere más esfuerzo computacional [Fernández, 2012].

$$\phi_{f,SOU} = \phi + \nabla\phi \cdot \vec{r}, \quad (1.9)$$

donde ϕ y $\nabla\phi$ son los valores centrales de las celdas y el gradiente en la celda superior y \vec{r} es el vector de desplazamiento desde el centroide de la celda superior al centroide de la cara de la celda principal.

QUICK:

Finalmente, para resolver el problema de las limitaciones de los esquemas de primer y segundo orden upwind, se han desarrollado otras formulaciones que, basadas en las características del upwinding, han ampliado el orden de truncamiento para incrementar la precisión en la solución. Entre estas formulaciones se encuentra el esquema QUICK (por las siglas en inglés de *Quadratic Upwind Interpolation for Convective Kinetics*) [Fernández, 2012].

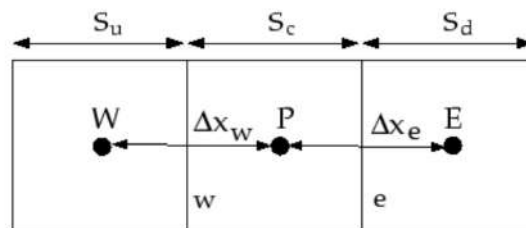


Figura 1.13: Volumen de control en 1 dimensión

Fuente: Tomado de [Fluent, 2016].

$$\phi_e = \theta \left(\frac{S_d}{S_c + S_d} \phi_P + \frac{S_c}{S_c + S_d} \phi_E \right) + (1 - \theta) \left(\frac{S_u + 2S_c}{S_u + S_c} \phi_P - \frac{S_c}{S_u + S_c} \phi_W \right), \quad (1.10)$$

donde ϕ y $\nabla\phi$ son los valores centrales de las celdas y el gradiente en la celda W, P y E.

1.6.3 Discretización temporal

De forma general se puede establecer que los flujos se pueden interpolar en función del instante en que son evaluados. Entre los esquemas de interpolación tenemos los siguientes según [Fernández, 2012]:

$$\int_{\delta t} \vec{J} \cdot \vec{A} dt = (fJ^n + (1-f)J^{n-1})A\Delta t, \quad (1.11)$$

Esquema explícito:

Para $f=0$, los flujos y términos fuente son evaluados mediante los valores al inicio del intervalo; es decir, los valores del paso temporal anterior.

Esquema implícito:

Para $f=1$, los flujos y términos fuente son evaluados mediante el mismo instante en que se pretenden conocer las variables.

1.7 Aspectos de modelamiento

De acuerdo con la sección 1.5.1, las ecuaciones que gobiernan el movimiento de los fluidos son demasiado complejas y actualmente no hay una solución analítica. Por ello, surgen los métodos numéricos mediante los cuales es posible obtener soluciones aproximadas.

Mediante el uso de modelos matemáticos se busca aproximar el comportamiento del fluido y así conseguir un conjunto de soluciones aproximadas; por ello, se debe seleccionar el modelo matemático adecuado dependiendo de la aplicación; por ejemplo, flujo incompresible, no viscoso, turbulento, entre otros.

Asimismo, se debe seleccionar un método de discretización adecuado, cuyo objetivo es aproximar las ecuaciones diferenciales por un sistema algebraico de ecuaciones para un conjunto de variables discretizadas; es decir, con ubicaciones discretas en el espacio y tiempo. Resolver este conjunto de ecuaciones requiere un elevado número de cálculos repetitivos; por ello, es necesario del uso de ordenadores para su solución. Entre los métodos

más empleados está el método de diferencias finitas, elementos finitos y volúmenes finitos.

1.7.1 Discretización del dominio

La discretización del dominio consiste en cambiar el dominio continuo del problema con un dominio discreto, en el cual las variables utilizadas, como presión y velocidad están definidas únicamente en puntos que configuran la malla y no en todos los puntos del espacio, ello se define como una discretización espacial [Fernández, 2012].

Entre las formas de dividir el dominio está la malla estructurada, malla estructurada por bloques y mallas no estructuradas, siendo estas últimas utilizadas para geometrías muy complejas, mientras que la primera es el tipo de malla más simple que se puede obtener.

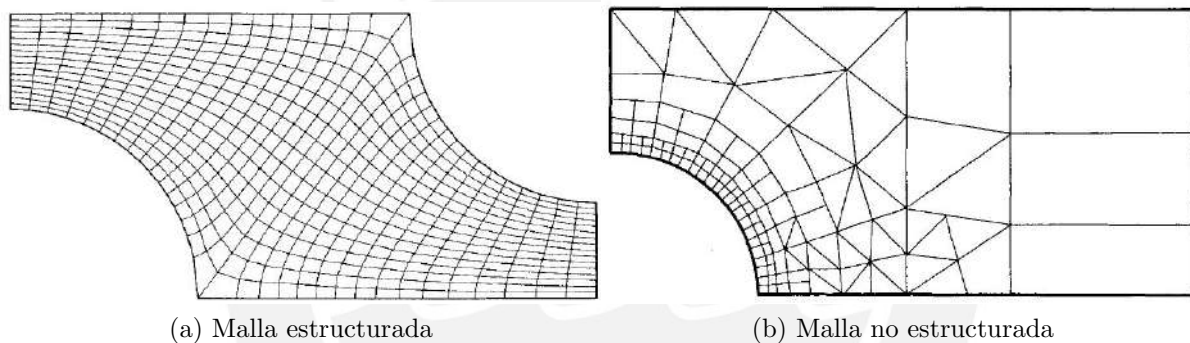


Figura 1.14: Tipos de malla.

Fuente: Tomado de [Ferziger and Peric, 2012].

A su vez, también existen parámetros que evalúan las características de los elementos que conforman la malla y sirven para verificar la calidad de la malla obtenida. Entre estos parámetros está el *aspect ratio*, el cual es la relación entre la distancia máxima entre el centroide del elemento y el centroide de una cara y la distancia mínima entre los nodos de la celda. Otro parámetro es el *skewness* y es uno de los principales parámetros, ya que determina que tan cerca de la geometría ideal (elementos compuestos por polígonos equiangulares) se encuentran los elementos. El rango de los posibles valores del *skewness* es entre cero y uno, donde los elementos con valores cercanos de cero son de buena calidad y caso contrario ocurre con aquellos con valores cercanos de uno. Finalmente, está el *orthogonal quality*, cuyo rango de valores también está entre cero y uno y a diferencia del *skewness* los elementos con buena calidad cuentan con valores cercanos de uno.

1.7.2 Costo computacional de solución

El tiempo de solución depende del número de cálculos repetitivos que se realice y la cantidad de elementos que se obtenga luego de discretizar el volumen de estudio; en otras palabras, el tiempo de simulación dependerá del tipo de malla y del número de elementos con el que se esté trabajando. Por ello, se busca una solución que sea independiente de la malla, donde el resultado obtenido no se vea afectado si se trabaja con una malla fina.

A su vez, la solución iterativa es requerida por la presencia de términos no lineales presentes en las ecuaciones de conservación, ver ecuación 1.6; por ello, se debe linealizar las ecuaciones en torno a un valor estimado e iniciar el proceso iterativo hasta encontrar un valor que se encuentre en un nivel de tolerancia fijado, también llamado residuo. Si los valores de las variables en los subdominios tienen a valores fijos mientras se lleva a cabo la solución, se dice que la solución converge y el método numérico es estable [Fernández, 2012].

El presente trabajo está dirigido a la evaluación de mejora de impulsores *hydrofoil* para tanques agitadores con aplicación en suspensión de sólidos mediante CFD y según la sección 1.2.3, el régimen de trabajo adecuado para la suspensión de sólidos es el régimen turbulento. Por ello, para iniciar el estudio de los nuevos diseños propuestos, primero se seleccionarán los modelos matemáticos adecuados que puedan aproximar el comportamiento del fluido de trabajo.

1.7.3 Modelos de turbulencia

La turbulencia se define como un estado irregular o fluctuante del movimiento de un fluido y es originada por inestabilidades en el flujo laminar. Debido a las irregularidades presentes, se crean estructuras turbulentas, también llamadas vórtices.

Los vórtices se pueden encontrar en diferentes escalas. Por un lado, los de mayor tamaño son los que interactúan con el flujo principal y extraen energía de este. Por otro lado, existen vórtices de pequeña escala, también llamadas escalas de Kolmogorov, las cuales son el punto final del proceso de disipación de energía. En 1922, se introdujo por primera vez el término de cascada de energía para describir el proceso de transferencia de

energía. Este proceso inicia cuando el flujo principal deforma a los vórtices de mayor escala mientras les transfiere energía, luego estos vórtices se van dividiendo en estructuras más pequeñas a las cuales ceden energía, este proceso de división se lleva a cabo hasta llegar a escalas disipativas, en las cuales la energía cinética contenida por ellos se transforma en calor por disipación viscosa [Fernández, 2012].

Para el estudio de flujos turbulentos es necesario el uso de modelos de aproximación, como es el caso de los modelos RANS. Estos utilizan un promediado temporal, también llamado promediado de Reynolds, en las variables de flujos estacionarios, el cual las descompone como la suma de un valor medio y en una parte fluctuante, [Fernández, 2012]:

$$u(\vec{x}, t) = \bar{u}(\vec{x}) + u'(\vec{x}, t), \quad (1.12)$$

$$\bar{u}(\vec{x}) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \cdot \int_0^T u(\vec{x}, t) dt, \quad (1.13)$$

donde \bar{u} es el promedio y $u'(\vec{x}, t)$ el componente fluctuante de la velocidad del fluido.

Cuando se realiza el promediado temporal a las ecuaciones de conservación, se obtiene la expresión 1.14

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \nabla(\bar{u}_i \bar{u}_j) = -\frac{1}{\rho} \nabla \bar{p} + \nabla(\mu \nabla \bar{u}_i) - \frac{1}{\rho} \nabla(\overline{\rho u'_i u'_j}), \quad (1.14)$$

donde aparece un término adicional, ecuación 1.15, llamado tensión de Reynolds, el cual proporciona nuevas incógnitas al problema, lo que significa que será necesario modelarlas para la solución del problema.

$$\tau_{ij} = -\overline{\rho u'_i u'_j} \quad (1.15)$$

El modelo κ - ϵ , una alternativa para modelar el tensor de Reynolds, introduce dos variables adicionales que son la energía cinética turbulenta (κ) y la disipación turbulenta (ϵ), además añade una ecuación de transporte para cada una de ellas. Este modelo se basa en la hipótesis de Boussinesq, que sustituye el efecto de las tensiones adicionales de Reynolds por una viscosidad turbulenta isotrópica, ecuación 1.16 [Fluent, 2016].

$$\tau_{ij} = -\overline{\rho u_i' u_j'} \approx \mu_t \left(\frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{v}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho \kappa \delta_{ij} \quad (1.16)$$

, donde κ es la energía cinética turbulenta, ρ es densidad y μ_t es viscosidad turbulenta. El modelo κ - ϵ se caracteriza por su robustez, economía y razonable precisión, lo cual lo convierte en el método más adecuado para simular flujos industriales. Existen variaciones de este modelo, una de ellas es el κ - ϵ Realizable. Este último satisface ciertas restricciones matemáticas que la tensión de Reynolds presenta en flujos turbulentos, además predice con mayor precisión la velocidad de propagación de chorros y, también presenta un rendimiento superior para flujo que involucran rotación, como es el caso de los tanques agitadores.

Finalmente, dentro del estudio de agitadores está el análisis de la capa límite cerca de las paredes, debido a que en ellas se forman vórtices de pequeña escala y el número de elementos que se necesitará para captar sus efectos serán muy altos; por ello, se deberá modelar la capa límite por completo.

El modelo de tratamiento mejorado de pared EWT (por las siglas en inglés de *Enhanced Wall Treatment*) introduce el término $y+$, el cual es un indicador de cuán gruesa o fina es la malla en una zona. El modelo EWT restringe el valor de $y+$ aproximadamente a la unidad; es decir, se deberá tener una malla fina en la zona que se esté estudiando.

1.7.4 Modelos de flujo multifásico

En el estudio de sólidos en suspensión mediante CFD se trabaja con flujo multifásico, ya que se considera una fase líquida como fase primaria y otra sólida como fase secundaria.

La cantidad de fase secundaria presente es de mucha importancia, ya que si la fracción volumétrica es menor que 0.1, las interacciones entre partículas se obvian, [Fernández, 2012].

Modelo VOF

Este modelo es empleado cuando las fases de trabajo son 2 o más fluidos inmiscibles; sin embargo, solo resuelve un conjunto de ecuaciones de momento y rastrea la fracción volumétrica de cada uno de los fluidos en los elementos de la malla [Fluent, 2016]. Este

modelo se caracteriza por el cálculo de interfases que delimitan las fases internas del dominio, pues este modelo se basa en la no interpenetrabilidad de las fases, mediante el cual no permite celdas vacías que no estén ocupadas por alguna fase.

Modelo Mixture

El modelo Mixture resuelve las ecuaciones de continuidad (1.17) y momento (1.18) para la mezcla de las fases y una ecuación extra para la fracción volumétrica para las fases secundarias(1.19) considerando las fases como interpenetrantes. Además, se caracteriza por sus aplicaciones en casos donde el número de Stokes sea menor que la unidad, flujos con arrastre y suspensión de partículas donde la fracción volumétrica de la fase secundaria es medianamente alta [Fluent, 2016].

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m) = 0, \quad (1.17)$$

donde ρ_m es densidad promedio de la mezcla y \vec{v}_m es velocidad de masa promedio.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho_m \vec{v}_m) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m \vec{v}_m) = & -\nabla p + \rho_m \vec{g} + \nabla \cdot [\mu_m (\nabla \vec{v}_m + \vec{v}_m^T)] + \vec{F} \\ & - \nabla \cdot \left(\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \vec{v}_{dr,p} \vec{v}_{dr,p} \right), \end{aligned} \quad (1.18)$$

donde ρ_m es densidad promedio de la mezcla, \vec{v}_m es velocidad de masa promedio, \vec{g} es aceleración de la gravedad, μ_m es viscosidad de masa promedio, $\vec{v}_{dr,p}$ es velocidad de deriva de la fase secundaria y α_k es la fracción volumétrica de la fase k .

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_p \rho_p) + \nabla \cdot (\alpha_p \rho_p \vec{v}_m) = -\nabla \cdot (\alpha_p \rho_p \vec{v}_{dr,p}) + \sum_{q=1}^n (m_{qp} - m_{pq}), \quad (1.19)$$

donde α_p es fracción volumétrica de la fase secundaria, ρ_p es densidad de la fase secundaria, \vec{v}_m es velocidad de la mezcla y $\vec{v}_{dr,p}$ es velocidad de deriva de fase secundaria.

Tanto en la ecuación 1.18 como en la 1.19, el término de velocidad de deriva se encuentra presente. Esta velocidad es relacionada con la velocidad relativa entre las fases y si no es considerada en la solución del problema, el modelo Mixture pasa a ser un modelo homogéneo.

$$\vec{v}_{dr,p} = \vec{v}_p - \vec{v}_m \quad (1.20)$$

$$\vec{v}_{pq} = \vec{v}_p - \vec{v}_q \quad (1.21)$$

$$\vec{v}_{dr,p} = \vec{v}_{pq} - \sum_{k=1}^n c_k \vec{v}_{kq}, \quad (1.22)$$

donde $\vec{v}_{dr,p}$ es velocidad de deriva de la fase secundaria, \vec{v}_{pq} es velocidad de la fase secundaria relativa a la velocidad de la fase primaria, c_k es fracción másica de la fase k .

Modelo Euleriano

El modelo euleriano es el modelo de flujo multifásico más complejo, ya que resuelve las ecuaciones de conservación para cada fase presente en el dominio, permitiendo el acoplamiento entre fases a partir del intercambio de información en las interfases. Sin embargo, el campo de presiones es único para todas las fases. Asimismo es considerado el modelo más sofisticado para modelar fases interpenetradas, pues emplea un tratamiento euleriano para cada fase centrado en los volúmenes de control, [Fernández, 2012].

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) = \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) + S_q, \quad (1.23)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q \vec{v}_q) = & -\alpha_q \nabla p + \nabla \cdot \bar{\tau}_q + \alpha_q \rho_q \vec{g} + \sum_{p=1}^n (\vec{R}_{pq} \\ & + \dot{m}_{pq} \vec{v}_{pq} - \dot{m}_{qp} \vec{v}_{qp}) + (\vec{F} + \vec{F}_{lift,q} + \vec{F}_{wl,q} + \vec{F}_{vm,q} + \vec{F}_{td,q}) \end{aligned} \quad (1.24)$$

A diferencia del modelo Mixture, la ecuación de momento 1.24 del modelo Euleriano considera los efectos de la fuerza de sustentación($\vec{F}_{lift,q}$), masa virtual($\vec{F}_{vm,q}$), lubricación de pared($\vec{F}_{wl,q}$), interacción entre fases(\vec{R}_{pq}) y dispersión turbulenta($\vec{F}_{td,q}$) [Fluent, 2016].

1.7.5 Interacción de fases

En caso de trabajar con más de una fase, es necesario modelar la interacción entre ellas; por ejemplo, en fluidos con sólidos, se debe tomar en cuenta la interacción entre sólidos y la interacción entre sólido-fluido. Por ello, cada modelo de flujo multifásico permite modelar las interacciones entre fases; sin embargo, no todos consideran los mismos efectos.

Las interacciones que se deben considerar y que permiten aproximar mejor el comportamiento de las fases en el estudio de sólidos en suspensión son la fuerza de arrastre, tensión superficial y la dispersión turbulenta [Gohel et al., 2012].

Fuerza de arrastre

La fuerza de arrastre entre fases es uno de los factores más cruciales que afectan a la suspensión de sólidos y uno de los modelos más empleados en la actualidad para modelar la interacción entre sólidos es la formulación de Gidaspow [Tamburini et al., 2014].

La formulación de Gidaspow se basa en los modelos de arrastre de Wen-Yu y la ecuación de Ergun (1.25) para calcular el coeficiente de intercambio fluido-sólido. Esta última (1.25) se utiliza en casos de alta concentración de partículas, donde el arrastre está relacionado con la caída de presión.

$$K_{sl} = 150 \cdot \frac{\alpha_s \cdot (1 - \alpha_l) \cdot \mu_l}{\alpha_l \cdot d_{pt}^2} + 1.75 \cdot \frac{\rho_l \alpha_s |\vec{v}_{pt} - \vec{v}_l|}{d_{pt}}, \quad (1.25)$$

donde α_s es fracción volumétrica de la fase sólida, α_l es fracción volumétrica de fase líquida, d_{pt} es el diámetro de partículas de la fase sólida, μ_l es viscosidad de la fase líquida, ρ_l es densidad de la fase líquida, \vec{v}_l es velocidad de la fase líquida y \vec{v}_{pt} es velocidad de partículas de fase sólida.

Por otro lado, los modelos Wen-Yu están más enfocados hacia casos donde las fuerzas viscosas dominan el comportamiento del flujo, [Fluent, 2016].

$$K_{sl} = \frac{3}{4} \cdot C_d \frac{\alpha_s \alpha_l \rho_l |\vec{v}_{pt} - \vec{v}_l|}{d_{pt}} \cdot \alpha_l^{-2.65}, \quad (1.26)$$

$$C_d = \frac{24}{\alpha_l \cdot Re_s} [1 + 0.15 \cdot (\alpha_l \cdot Re_s)^{0.687}], \quad (1.27)$$

donde α_s es fracción volumétrica de la fase sólida, α_l es fracción volumétrica de fase líquida, d_{pt} es el diámetro de partículas de la fase sólida, μ_f es viscosidad de la fase líquida, ρ_f es densidad de la fase líquida, \vec{v}_l es velocidad de la fase líquida, \vec{v}_{pt} es velocidad de partículas de fase sólida, Re_s es número de Reynolds relativo.

Dispersión turbulenta

Tomar en cuenta los efectos de la dispersión turbulenta es de suma importancia, ya que modela la interacción entre estructuras turbulentas y partículas, generando así una mayor predicción y aproximación de la suspensión de sólidos [Gohel et al., 2012].

Una de las formulaciones que permite modelar los efectos de la dispersión turbulenta en

fluidos con partículas sólidas es el modelo de Simonin.

$$\vec{F}_{td,q} = K_{pq} \frac{D_{t,pq}}{0.75} \left(\frac{\nabla \alpha_p}{\alpha_p} - \frac{\nabla \alpha_q}{\alpha_q} \right) \quad (1.28)$$

Finalmente, en la tabla 1.3 se presenta un resumen de las aplicaciones de los diferentes modelos de flujo multifásico e interacción de fase. La información descrita en esta tabla fue generada a partir de un análisis de sensibilidad durante el desarrollo de esta tesis.

Tabla 1.3: Interacción de fases en modelo euleriano.

Modelo de flujo multifásico	Fases	Interacción entre fases
VOF	-Mezcla homogénea -Aire	-Tensión superficial
Mixture	-Agua -Aire -Partículas sólidas	-Tensión superficial -Fuerza de arrastre
Euleriano	-Agua -Aire -Partículas sólidas	-Tensión superficial -Fuerza de arrastre -Dispersión turbulenta

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO 2

ANÁLISIS DE IMPULSOR ORIGINAL EN MEZCLA HOMOGÉNEA

En el segundo capítulo, se presenta y se analiza el modelo del impulsor *hydrofoil* original que se comparará frente a las propuestas de mejora. Inicialmente, se presentan sus principales características, como el ángulo de paso y secciones de sus álabes, junto con el modelo geométrico, ver tabla resumen 2.1. Asimismo, se realiza un análisis de independencia de malla de este impulsor mediante CFD.

Por otro lado, también se presentan las características, componentes y modelo geométrico del tanque agitador que fue utilizado para la etapa de simulaciones. Este modelo fue evaluado mediante CFD en una mezcla homogénea de agua con sulfato de cobre, reduciendo el costo y tiempo computacional de simulación. Como resultado de esta evaluación se obtuvieron indicadores de desempeño, como torque, número de potencia, número de caudal y distribución de velocidades que sirvieron como punto de comparación con las 2 propuestas de mejora.

Tabla 2.1: Características de impulsor original.

Impulsor	Sección de álabes	Ángulo de paso	Ángulo de inclinación	Cantidad de álabes	Tipo de impulsor
Original	Rectangular rolada	Constante	90°	3	Hydrofoil

Fuente: Elaboración propia.

2.1 Modelo geométrico de impulsor *hydrofoil* original

El impulsor *hydrofoil* original que servirá como punto de comparación es presentado en la figura 2.1 y está diseñado para aplicaciones de suspensión de sólidos. En cuanto a sus características geométricas, está compuesto por 3 álabes con una separación de 120° y tiene un diámetro de 190 mm .

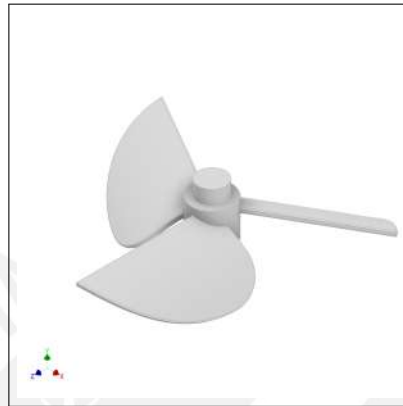


Figura 2.1: Impulsor *hydrofoil* original.

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 2.2 y 2.4, se presentan las secciones de los álabes a diferentes distancias desde el centro del impulsor (Cc). Con ello se comprueba que tanto el espesor como el ángulo de paso de los álabes de este impulsor son de magnitud constante en toda su longitud; sin embargo, caso contrario ocurre con la sección de estos, ya que es variable.

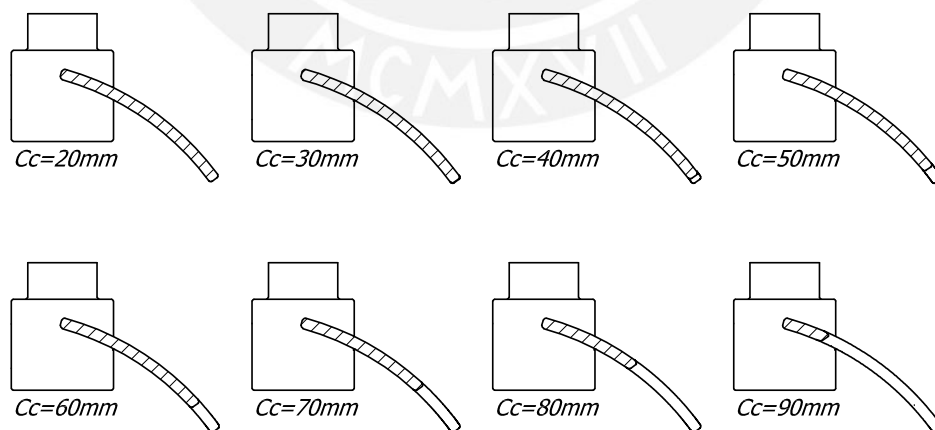


Figura 2.2: Secciones de álabes del impulsor original.

Fuente: Elaboración propia.

Otra característica de los álabes del impulsor original es la inclinación que presentan, ya que estos forman un ángulo de 90° con el eje de rotación de impulsor.

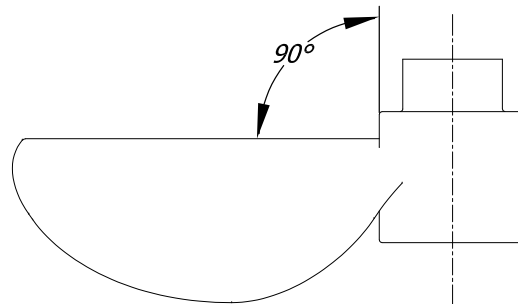


Figura 2.3: Inclinación de álabes de impulsor original.

Fuente: Elaboración propia.

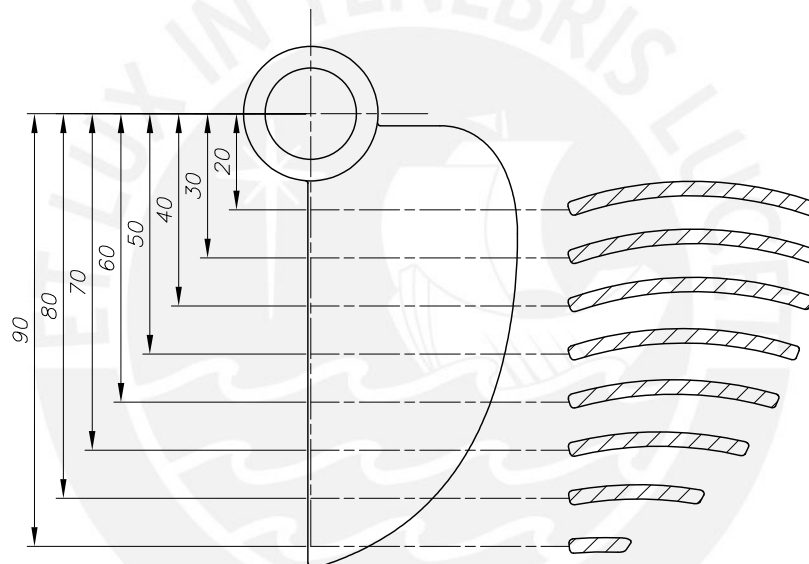


Figura 2.4: Secciones de álabe de impulsor original.

Fuente: Elaboración propia.

2.2 Independencia de malla

2.2.1 Datos de entrada

Para esta etapa inicial se evaluó únicamente el impulsor original. El dominio de estudio se encuentra dividido en un subdominio rotativo, donde se encuentra el impulsor, y un dominio estático ubicado en la parte inferior del dominio rotativo. Esta simplificación permitió una evaluación preliminar al impulsor original con una reducción en el costo computacional.

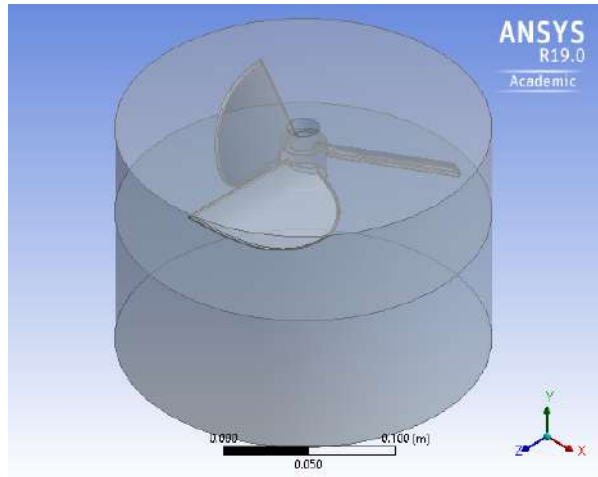


Figura 2.5: Dominio rotativo-Impulsor original y dominio estático.

Fuente: Elaboración propia.

2.2.2 Discretización del dominio

Según lo mencionado en la sección 1.7, es necesario modelar los efectos de la capa límite cerca de las paredes de los álabes del impulsor. Para ello el módulo de mallado de Ansys permite aproximar a la capa límite mediante un número de capas finitas en los álabes; sin embargo, la cantidad exacta de estas capas es indefinido; por ello, se realizó un análisis de independencia de malla en la capa límite.

En primer lugar se calculó el espesor de una primera capa, la cual está en función del $y+$ que se desea tener en las proximidades de las paredes de los álabes.

$$y+ = \frac{U_{fr} \cdot y}{\nu} \quad (2.1)$$

De acuerdo con la ecuación 2.1, se debe definir un valor de $y+$ para así obtener el valor del espesor de la primera capa. Además, por lo mencionado en la sección 1.7.3, utilizar el modelo EWT (por las siglas en inglés de *Enhanced Wall Treatment*) requiere tener valores de $y+$ próximos a una unidad en la zona estudiada. Por ello, para calcular un aproximado valor de espesor de la primera capa se utilizó un valor de $y+$ igual a 1 y los datos para su cálculo se presentan en la tabla 2.2. La densidad de mezcla y la viscosidad dinámica forman parte de los datos de entrada para el desarrollo de esta tesis, los cuales corresponden a mediciones experimentales realizadas por una empresa especializada en tanques agitadores; no obstante, por motivos de confidencialidad no se muestran los

ensayos experimentales en el presente trabajo de investigación.

Tabla 2.2: Densidad de la mezcla y viscosidad dinámica utilizadas para el cálculo de y^+

Parámetro	Magnitud	Unidades
Densidad de mezcla	1 623.3	$\text{Kg}\cdot\text{m}^{-3}$
Viscosidad dinámica	0.079	$\text{Pa}\cdot\text{S}$

Fuente: Elaboración propia.

En primer lugar, se calculó el valor del coeficiente de fricción de pared, el cual está definido por la expresión 2.2, ver [Fluent, 2016].

$$C_f = 0.058 \cdot Re^{-0.2} \quad (2.2)$$

El paso siguiente fue hallar el valor de la velocidad de fricción cerca de la pared mediante las siguientes ecuaciones, ver [Fluent, 2016].

$$U_{fr} = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho_m}} \quad (2.3)$$

$$\tau_w = \frac{1}{2} \cdot C_f \cdot \rho_m \cdot v_f^2 \quad (2.4)$$

Finalmente, se calculó el valor aproximado del espesor de la primera capa, despejando y de la ecuación 2.1, ver [Fluent, 2016]

$$y = \frac{\nu \cdot y^+}{U_{fr}} \quad (2.5)$$

Tabla 2.3: Resultados de cálculo de espesor de primera capa.

Parámetro	Valor	Unidades
N	450	min^{-1}
Re	5 563	-
C_f	0.0103	-
τ_w	168.14	Pa
U_{fr}	0.321	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
y	0.15	mm

Fuente: Elaboración propia.

El valor inicial de la primera capa fue de 0.15 mm , a partir de ese valor se simuló el

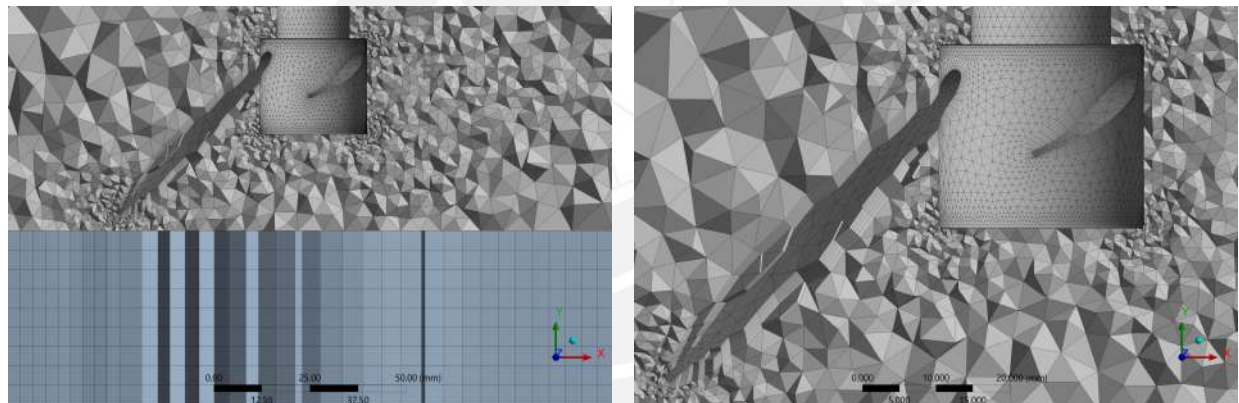
impulsor variando el número de capas y el espesor inicial, realizando un total de 24 simulaciones para evaluar todos los casos planteados a continuación.

Tabla 2.4: Parámetros variables en la etapa de simulación

<i>Número de capas</i>	<i>Espesor de primera capa (mm)</i>
6	0.025
8	0.05
10	0.1
12	0.15
	0.2
	0.25

Fuente: Elaboración propia

En la etapa de discretización se tomaron en cuenta los parámetros de calidad de malla como *skewness*, *aspect ratio* y *orthogonal quality*, asegurando así que la simulación no falle por elementos de la malla y entregue resultados confiables.



(a) Mallado de dominios

(b) Detalle de dominio rotativo

Figura 2.6: Malla de impulsor original con $y = 0.25 \text{ mm}$ y 6 capas.

Fuente: Elaboración propia.

Tal como se aprecia en la figura 2.6, el mallado cerca del impulsor es muy fino y está compuesto en su totalidad por elementos tetraédricos. Esto es debido al bajo espesor de la primera capa y a la geometría compleja que tiene el impulsor. Asimismo, se observa que en el dominio estacionario los elementos que predominan son hexaedros, debido a su geometría simple.

También se procuró que los elementos en la interfase de los dominios sean aproximadamente del mismo tamaño para asegurar una buena precisión de los resultados.

2.2.3 Resultados de independencia de malla

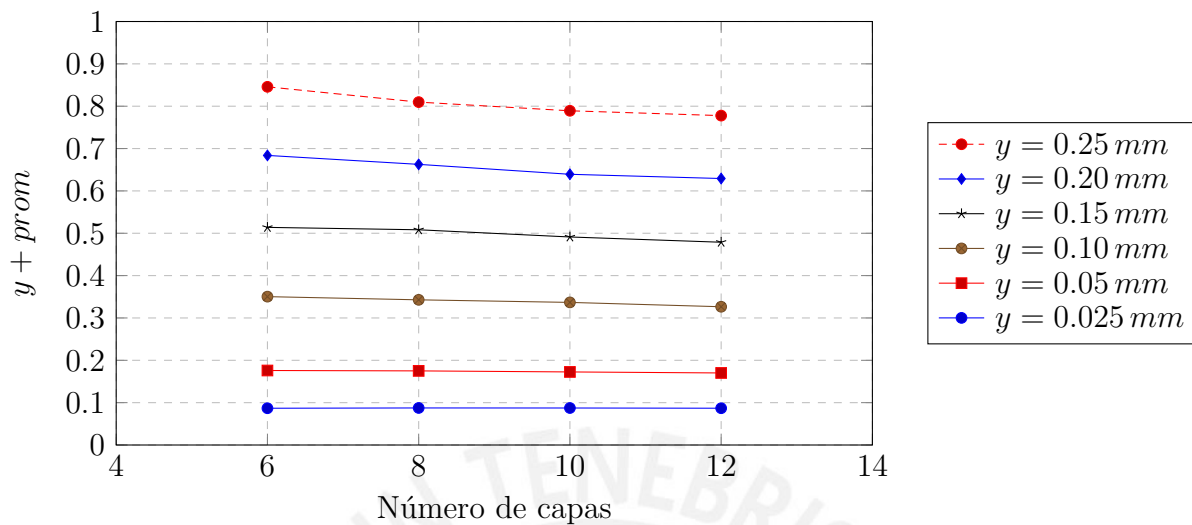


Figura 2.7: Variación de $y + prom$ con respecto al número de capas.

Fuente: Elaboración propia.

De este análisis se obtiene como resultado que para un espesor de primera capa igual a 0.025 mm , el $y + prom$ es independiente de la cantidad de capas que se utilizan para modelar los efectos la capa límite.

Este resultado se utilizó para realizar un mallado más fino para simular el impulsor original en mezcla homogénea y de esta forma obtener resultados más aproximados a los experimentales.

2.3 Modelo geométrico de tanque agitador

En la figura 2.8 se presenta el modelo completo del tanque agitador junto con todos sus componentes con el que se realizaron simulaciones mediante CFD.

El modelo del tanque agitador está compuesto por un recipiente cilíndrico abierto hacia el ambiente y con fondo plano. También cuenta con cuatro deflectores ubicados cada 90° y un eje vertical que está conectado al impulsor con sentido de rotación horario y está ubicado en el centro del tanque con 130 mm de holgura.

En la tabla 2.5 se presentan las dimensiones principales del tanque agitador, como la holgura a que se ubica el impulsor.

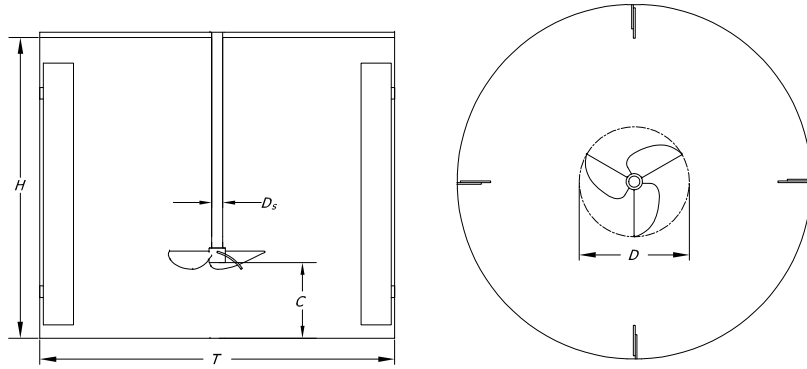


Figura 2.8: Tanque agitador modelado en *software* Inventor.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2.5: Medidas de tanque agitador

Parámetro	Magnitud	Unidades
T	610	mm
H	517	mm
C	130	mm
D	190	mm
D_s	19	mm

Fuente: Elaboración propia

2.4 Análisis de impulsor original en mezcla homogénea

2.4.1 Datos de entrada

Para esta etapa se utilizó el modelo del tanque agitador completo. El dominio se encuentra dividido en un subdominio rotativo donde se encuentra el impulsor y otro subdominio estacionario que representa al volumen restante dentro del tanque. De esta manera fue posible el uso del modelo MRF.

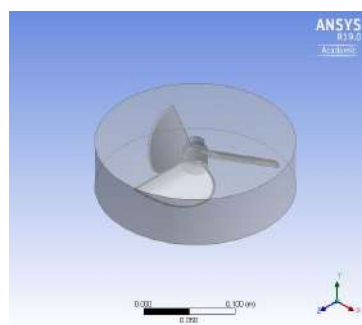


Figura 2.9: Subdominio rotativo de tanque agitador con impulsor original.

Fuente: Elaboración propia.

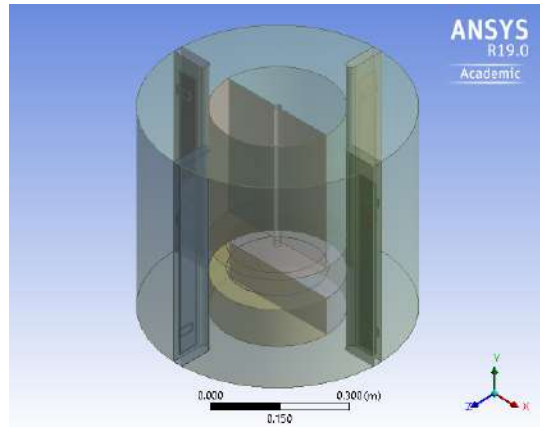


Figura 2.10: Subdominio estacionario de tanque agitador con impulsor original.

Fuente: Elaboración propia.

Se analizó el funcionamiento del impulsor original dentro de una mezcla homogénea compuesta por agua y sulfato de cobre, aproximando así el estado de suspensión uniforme visto en la subsección 1.2.4, fluido no newtoniano cuyo comportamiento se representa mediante el modelo de Bingham.

De esta forma, se estudió el funcionamiento del impulsor original bajo una mezcla que se encuentra homogenizada, sin entrar aún en el tema de suspensión de sólidos. Ello permitió una simplificación de modelos y una reducción del costo computacional.

Las propiedades de la mezcla y las fases que la componen se encuentran en la tabla 2.6.

Tabla 2.6: Propiedades de las fases de la mezcla.

	Parámetro	Magnitud	Unidades
Fase líquida	Densidad de líquido	1 000	$\text{Kg}\cdot\text{m}^{-3}$
	Viscosidad dinámica	0.0011	Pa.s
Fase sólida	Densidad de sólido	2 700	$\text{Kg}\cdot\text{m}^{-3}$
	Diámetro de partícula	74	$\mu\cdot\text{m}$

Fuente: Elaboración propia.

2.4.2 Discretización y modelos matemáticos

Con respecto los subdominios, el estacionario encierra en su mayoría a la mezcla homogénea y por la parte superior está sometido a presión atmosférica. A su vez, el subdominio rotativo gira con una velocidad angular igual a la del impulsor en el rango de 200 rpm a 700 rpm .

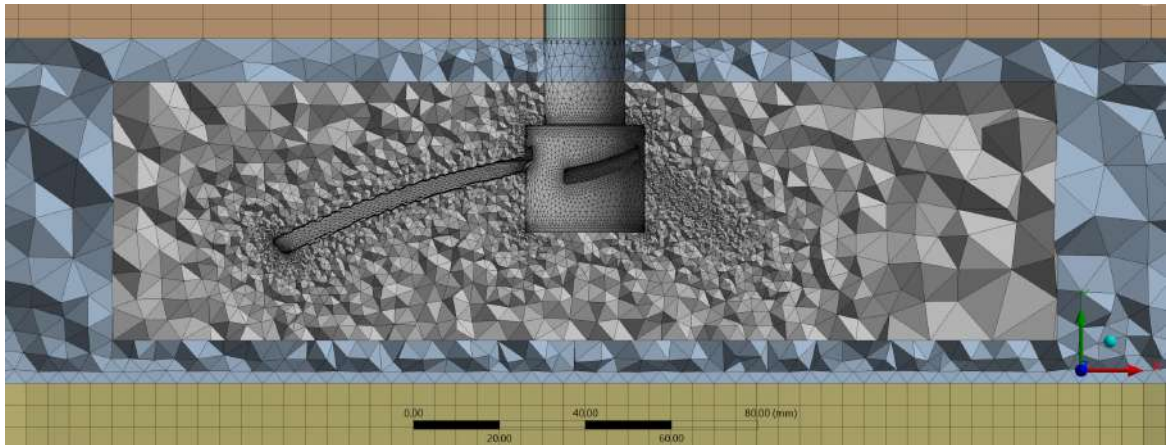


Figura 2.11: Mallado de la interface de subdominios.

Fuente: Elaboración propia.

En la etapa de discretización se procuró que los elementos en la interfase cuenten con el mismo tamaño y así asegurar que los resultados sean confiables. Además, se utilizaron los resultados del análisis de independencia de malla, utilizando un espesor de primera capa igual a 0.025 mm .

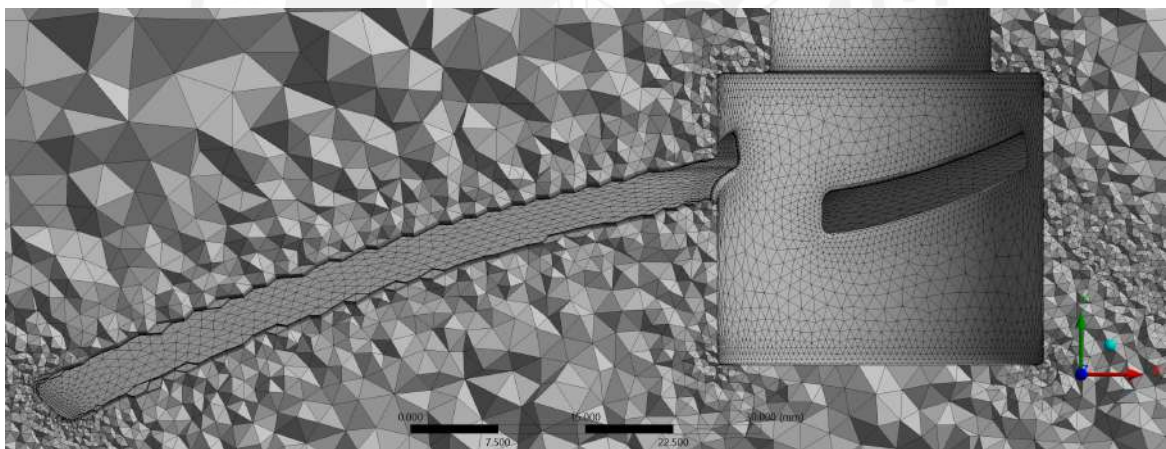


Figura 2.12: Detalle de malla de impulsor original.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2.7: Características del mallado.

Impulsor	Fluido	Cantidad de elementos	Aspect ratio	Skewness	Orthogonal Quality
Original	Mezcla Homogénea	4 255 035	81.778	0.22144	0.78361

Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a los modelos matemáticos utilizados para las simulaciones, en primer lugar, mediante el modelo VOF (por las siglas en inglés de *Volume of Fluid*) se aproximó el comportamiento de flujo multifásico y para la aproximación de los fenómenos de turbulencia se empleó el modelo κ - ϵ Realizable junto con un tratamiento mejorado en las paredes del impulsor mediante el modelo EWT. El esquema numérico utilizado fue el acoplado, mientras que las ecuaciones de interpolación para las ecuaciones de momento y turbulencia fueron las de segundo orden *Upwind*. Finalmente, el modelo del tanque agitador fue simulado para un rango de velocidad angular de 200 a 700 *rpm*.

2.4.3 Validación de modelos matemáticos

La validación de los resultados obtenidos mediante simulación numérica se llevó a cabo mediante la comparación de estos con datos experimentales de [Chamberg et al., 2017].

Tabla 2.8: Resultados numéricos de impulsor original.

N [min^{-1}]	Re [-]	T [$N \cdot m$]	P [W]	N_p [-]	M_a [kg/s]	N_q [-]
200	2 472	0.24	5.03	0.33	15.49	0.42
300	3 708	0.50	15.71	0.31	24.13	0.43
400	4 945	0.85	35.60	0.29	33.57	0.45
500	6 181	1.29	67.54	0.29	43.20	0.46
600	7 417	1.84	115.61	0.28	52.76	0.47
700	8 654	2.47	181.06	0.28	61.97	0.47

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2.9: Comparación numérica y experimental de torque y N_p .

N [min^{-1}]	T simulación [$N \cdot m$]	T experimental [$N \cdot m$]	Re	N_p simulación	N_p experimental
200	0.24	0.27	2 472	0.33	0.38
300	0.50	0.62	3 708	0.31	0.38
400	0.85	1.11	4 945	0.29	0.39
500	1.29	1.70	6 181	0.29	0.38
600	1.84	2.41	7 417	0.28	0.37
700	2.47	3.15	8 654	0.28	0.36

Fuente: Elaboración propia.

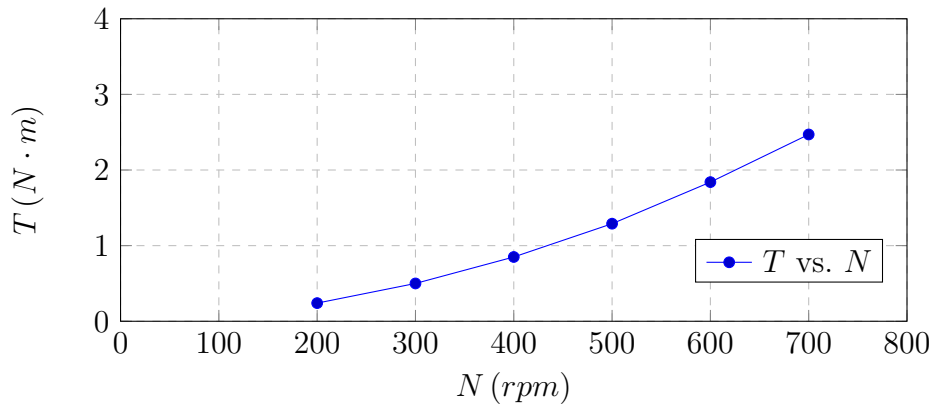


Figura 2.13: Torque numérico en función de la velocidad de giro de impulsor.

Fuente: Elaboración propia.

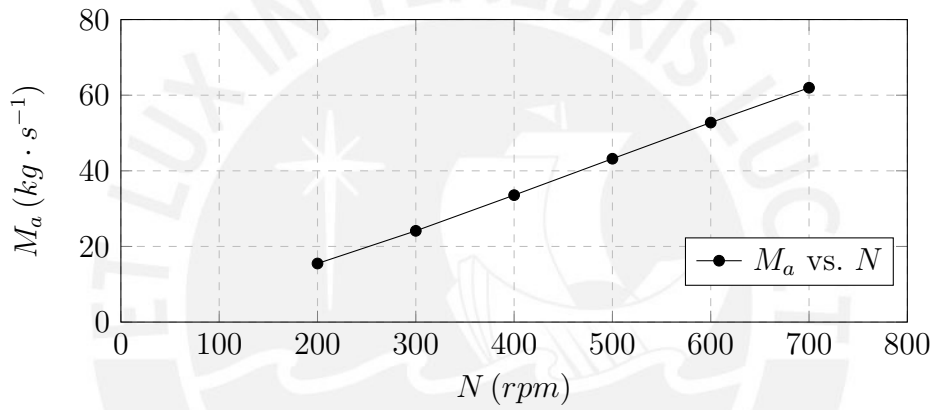


Figura 2.14: Flujo másico numérico en función de la velocidad de giro de impulsor.

Fuente: Elaboración propia.

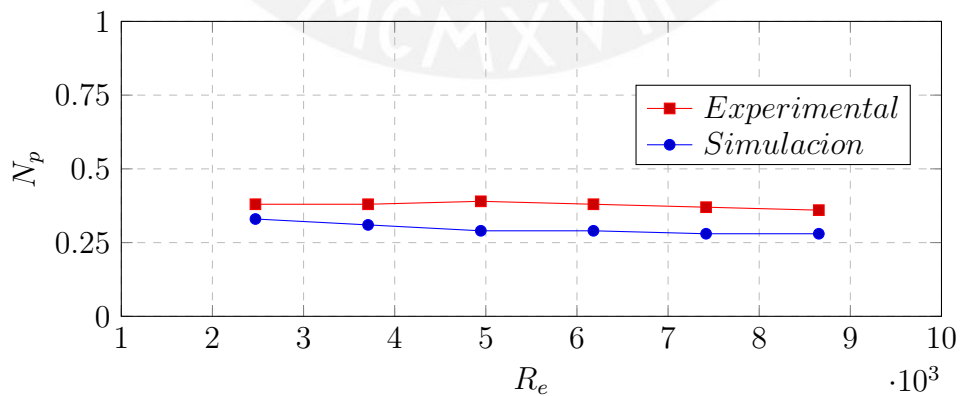


Figura 2.15: N_p vs. R_e .

Fuente: Elaboración propia.

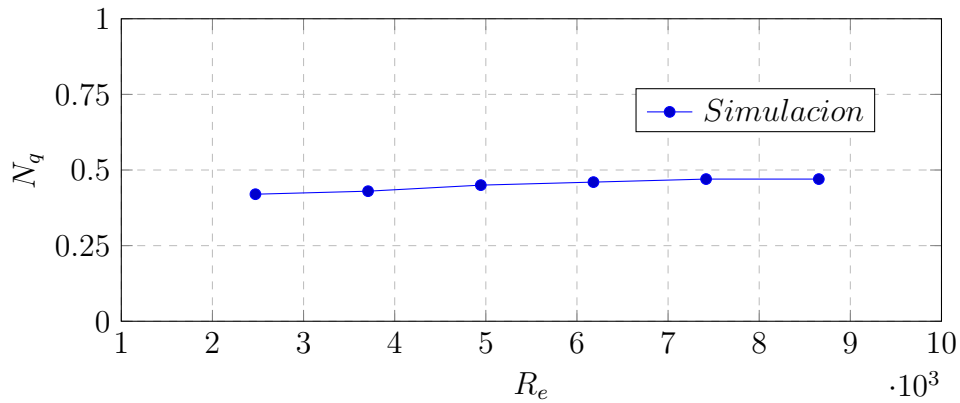
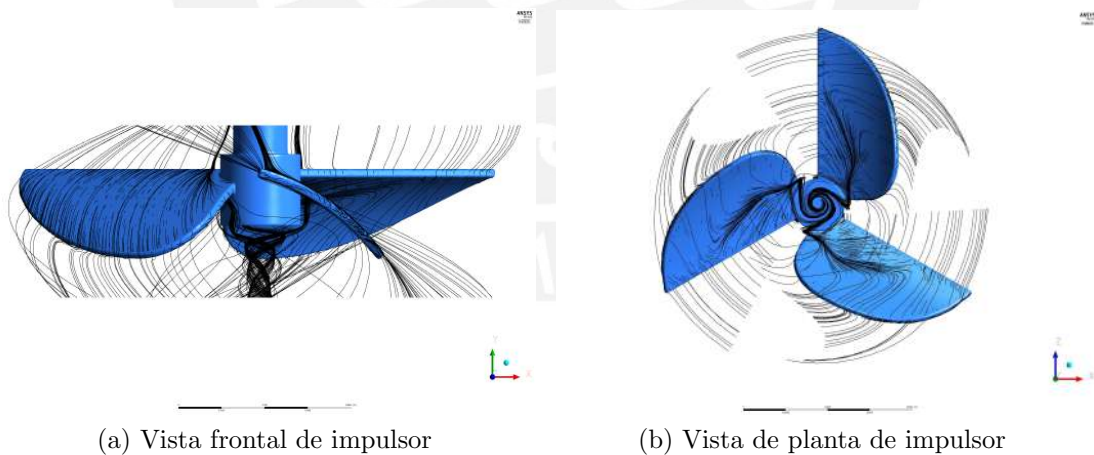


Figura 2.16: N_q vs. R_e .

Fuente: Elaboración propia.

Patrón de flujo

Cuando se analizan las líneas de corriente cerca de los álabes del impulsor, se observa que debajo de estos se forman vórtices. Si bien se trabaja con mezcla homogénea, estos remolinos formados afectan al caso de sólidos en suspensión, ya que evita la distribución de las partículas en el tanque. Además, debido a ello, se observa una reducción en la magnitud de los vectores de velocidad debajo del impulsor en la figura 2.19.



(a) Vista frontal de impulsor

(b) Vista de planta de impulsor

Figura 2.17: Vórtices formados debajo del impulsor original.

Fuente: Elaboración propia.

En las siguientes figuras se aprecia la formación de vórtices debajo del impulsor y que el patrón de flujo producido no es completamente axial, ver figuras 2.18, 2.19 y 2.20.

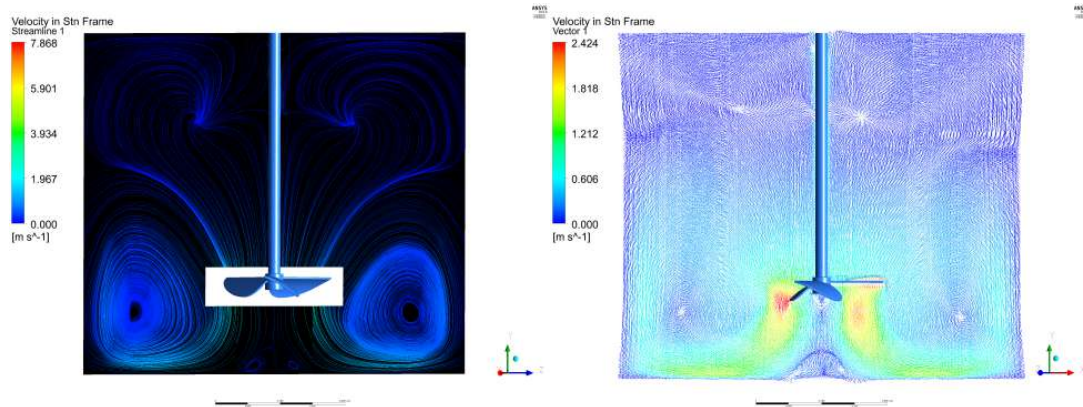


Figura 2.18: Líneas de corriente: Impulsor original.

Fuente: Elaboración propia.

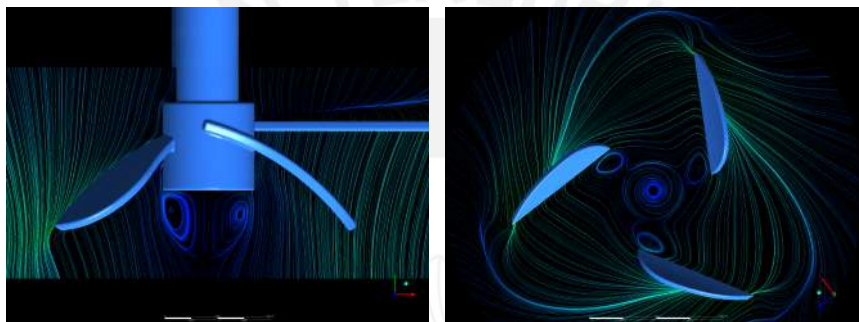


Figura 2.19: Detalle de líneas de corriente en parte inferior de impulsor original.

Fuente: Elaboración propia.

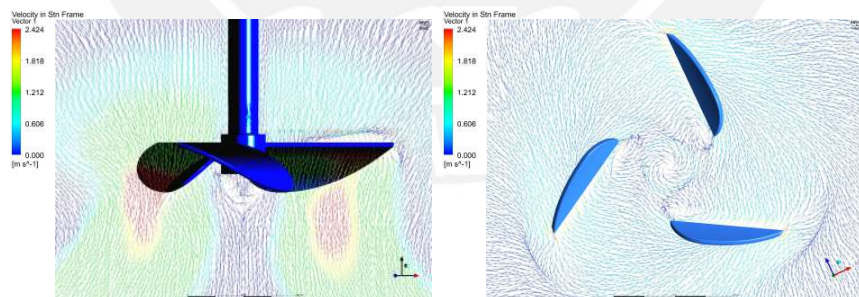


Figura 2.20: Detalles de vectores de velocidad debajo de impulsor original.

Fuente: Elaboración propia.

Distribución de vectores de velocidad

Mediante este indicador se analizó a una distancia de 102 *mm* del centro del tanque, la cual es aproximadamente la tercera parte del radio de este. En esta parte se exporta la componente radial, tangencial y axial de la velocidad del fluido que atraviesa la línea indicada y estos se grafican en función de la altura nominal del tanque.

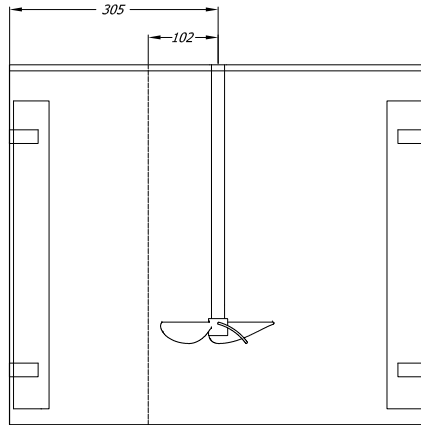


Figura 2.21: Eje longitudinal a 102 mm del eje del impulsor.

Fuente: Elaboración propia.

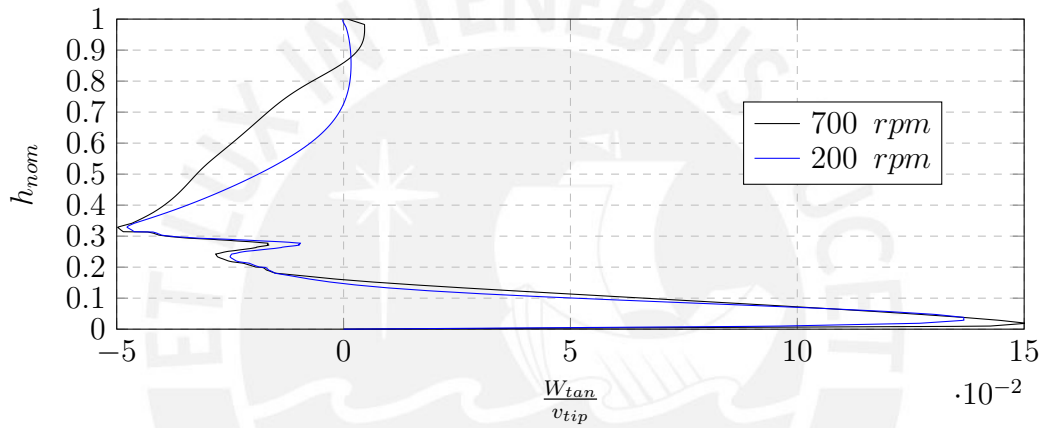


Figura 2.22: Componente tangencial en función de la altura nominal del tanque.

Fuente: Elaboración propia.

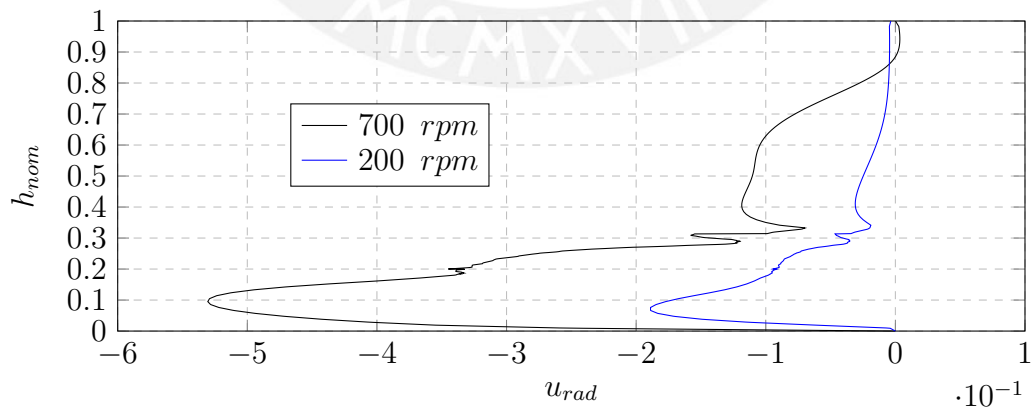


Figura 2.23: Componente radial en función de la altura nominal del tanque.

Fuente: Elaboración propia.

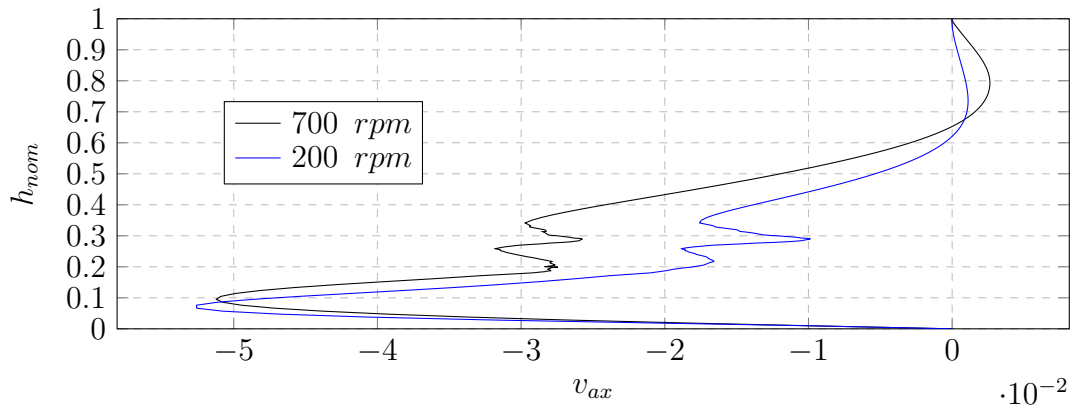


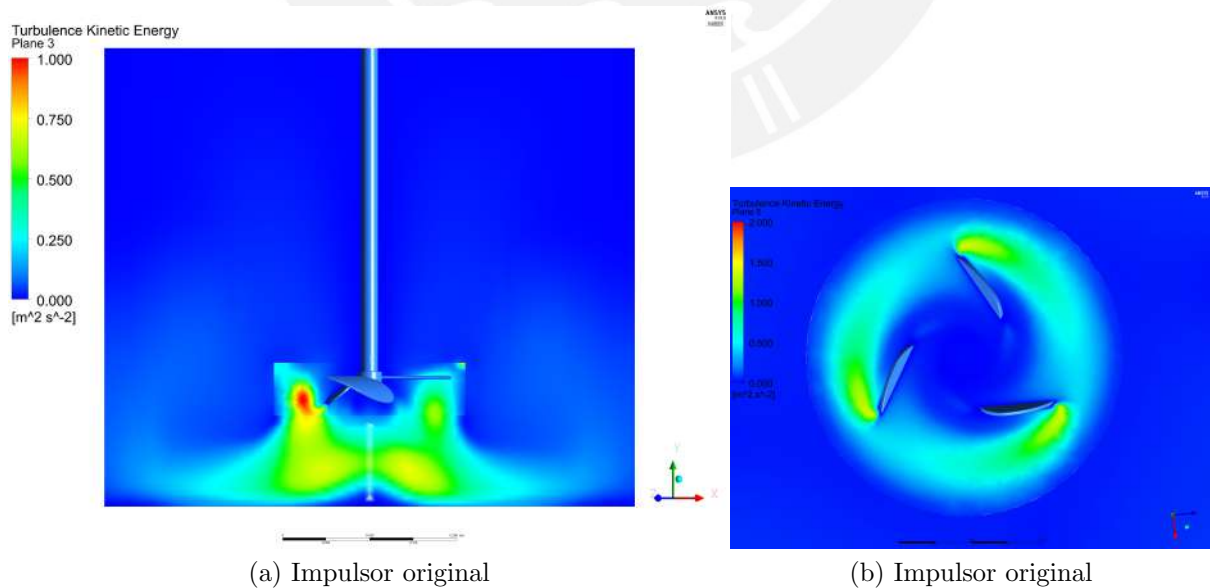
Figura 2.24: Componente axial en función de la altura nominal del tanque.

Fuente: Elaboración propia.

Estas curvas servirán como punto de comparación para los demás diseños, ya que permiten evaluar el efecto que tiene la geometría de los álabes en el movimiento del fluido.

Energía cinética turbulenta

Finalmente, como último indicador de desempeño se tiene a la dispersión de la energía cinética turbulenta, la cual es utilizada para evaluar la calidad de mezcla formada dentro del tanque. Si bien se trabaja con mezcla homogénea, este indicador permitió realizar comparaciones frente a las propuestas de mejora, ya que este guarda relación con la geometría de los álabes del impulsor.



(a) Impulsor original

(b) Impulsor original

Figura 2.25: Energía cinética turbulenta-Impulsor Original.

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO 3

ANÁLISIS DE IMPULSORES MEJORADOS EN MEZCLA HOMOGENEA

Luego de analizar el comportamiento del impulsor *hydrofoil* original en mezcla homogénea en el capítulo 2, dentro de este capítulo se presenta cómo afecta el cambio de la geometría de sus álabes mediante perfiles aerodinámicos en las dos propuestas de mejora.

Inicialmente se presenta la propuesta de mejora G1, la cual cuenta con una variación en la sección de los álabes del impulsor original; de esta forma, se pudo analizar los efectos que trae consigo el uso de perfiles aerodinámicos manteniendo la geometría original del impulsor original.

Finalmente se presenta las propuestas de mejora G3 y G6. Las características que presentan estas propuestas de mejora consisten en la variación del ángulo de paso del impulsor, generando así una torsión en toda su longitud. Estas dos propuestas de impulsores fueron evaluadas de forma preliminar y se seleccionó la más adecuada mediante indicadores de desempeño, como el número de potencia (N_p), número de caudal (N_q), entre otros.

3.1 Propuesta de mejora con cambio de sección

En el capítulo anterior se analizó el comportamiento del impulsor original, el cual tiene entre sus principales características 3 álabes de sección y ángulo de paso constantes. Teniendo ello como base, la primera propuesta de mejora que se analizó es un impulsor que, ha diferencia del original, cuenta con la inclusión del perfil aerodinámico *NACA 4412* en la geometría de sus álabes. En la figura 3.1 se presenta el cambio de sección en los álabes y ?? sus características.

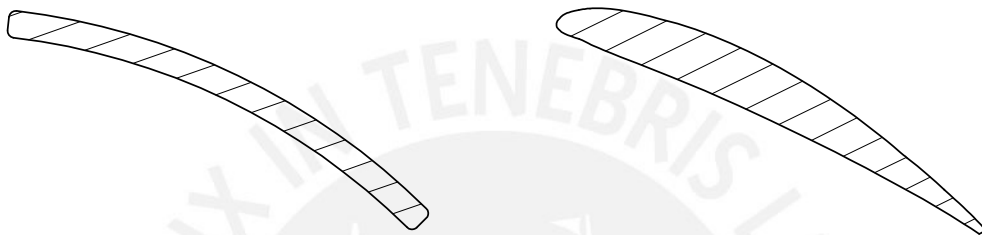


Figura 3.1: Cambio de sección de impulsor original.

Fuente: Elaboración propia.

Este cambio de sección es la única diferencia con el impulsor original, ya que se mantuvo el mismo ángulo de paso de los álabes del impulsor original, como se puede apreciar en la figura 3.2, donde se presentan secciones de un alabe a diferentes distancias desde el centro del impulsor.

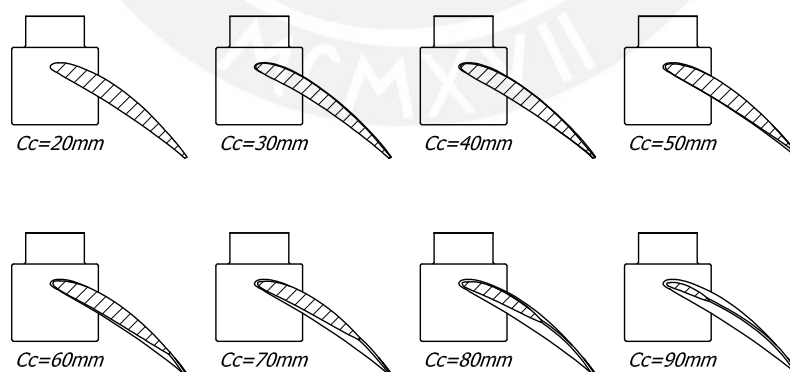


Figura 3.2: Ángulo de paso de álabes impulsor G1.

Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, la inclinación de los 3 álabes se mantuvo en 90° con respecto al eje de rotación del impulsor, tal como se presenta en la figura 3.3. En cuanto al diámetro de la propuesta de mejora, esta mantiene el mismo diámetro de 190 mm .

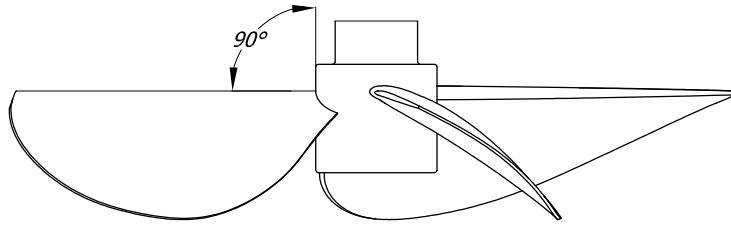


Figura 3.3: Inclinación de álabes de impulsor G1.

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 3.4 se presentan secciones a diferentes distancias del centro del impulsor de uno de los álabes del nuevo impulsor. De esta forma se aprecia que el cambio de sección por un perfil aerodinámico es a lo largo de todo el álabe.

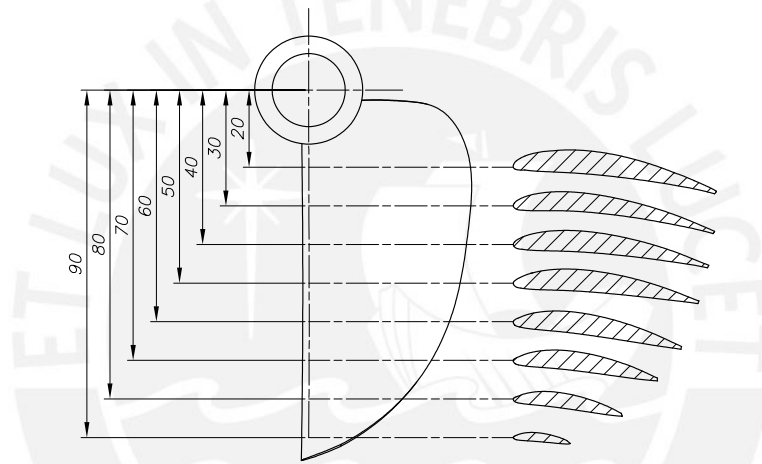


Figura 3.4: Secciones de álabe con perfil aerodinámico.

Fuente: Elaboración propia.

El modelo final generado de la primera propuesta de mejora con cambio de sección se presenta en la figura 3.5. Este propuesta de mejora será denominada como impulsor G1.

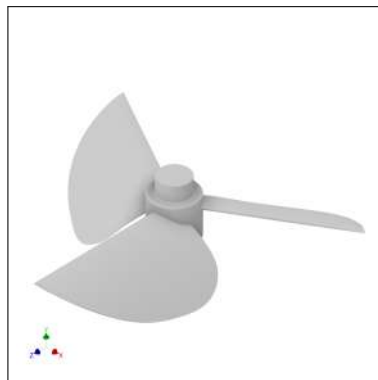


Figura 3.5: Modelo de impulsor G1.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.1: Características de impulsor G1.

Impulsor	Sección de álabes	Ángulo de paso	Ángulo de inclinación	Cantidad de álabes	Tipo de impulsor
G1	Perfil NACA 4412	Constante	90°	3	Hydrofoil

Fuente: Elaboración propia.

3.1.1 Análisis de impulsor G1 en mezcla homogénea

Para analizar los efectos que causa la inclusión del perfil *NACA* 44112 se simuló el impulsor G1 en mezcla homogénea. Para ello, se realizó un análisis de independencia de malla cerca de las paredes del impulsor, obteniendo el siguiente resultado.

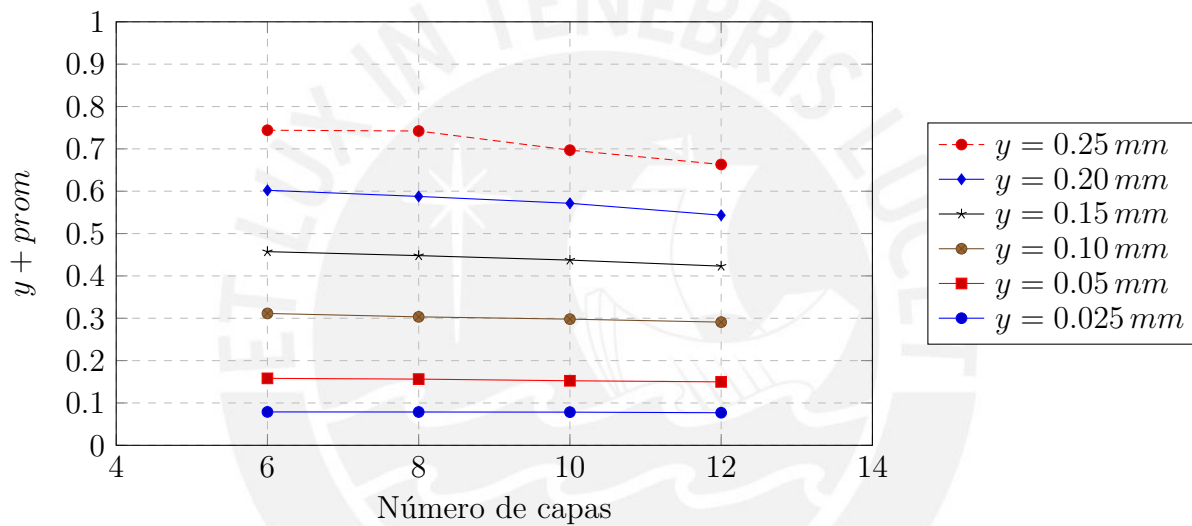


Figura 3.6: Variación de $y + prom$ con respecto al número de capas.

Fuente: Elaboración propia.

Como resultado del análisis de independencia de malla se obtuvo que para un espesor de 0.025 mm el valor del $y + prom$ es independiente del número de capas con el que se trabaja. En base a ello simuló el impulsor G1 con el modelo del tanque completo.

Tabla 3.2: Características del mallado: G1.

Impulsor	Fluido	Cantidad de elementos	Aspect ratio	Skewness	Orthogonal Quality
G1	Mezcla Homogénea	4 422 371	161.94	0.26055	0.74557

Fuente: Elaboración propia.

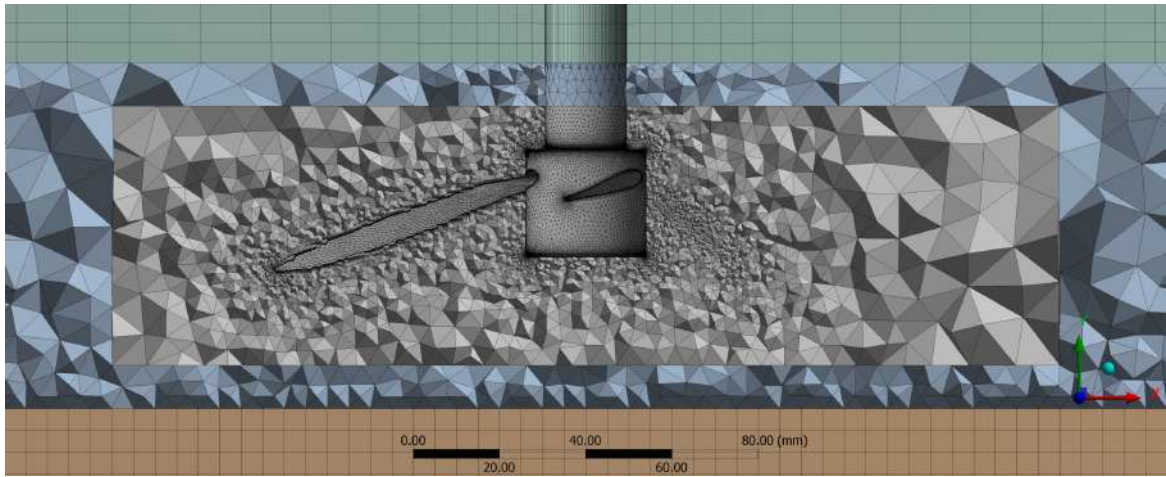


Figura 3.7: Mallado en la interfase: G1.

Fuente: Elaboración propia.

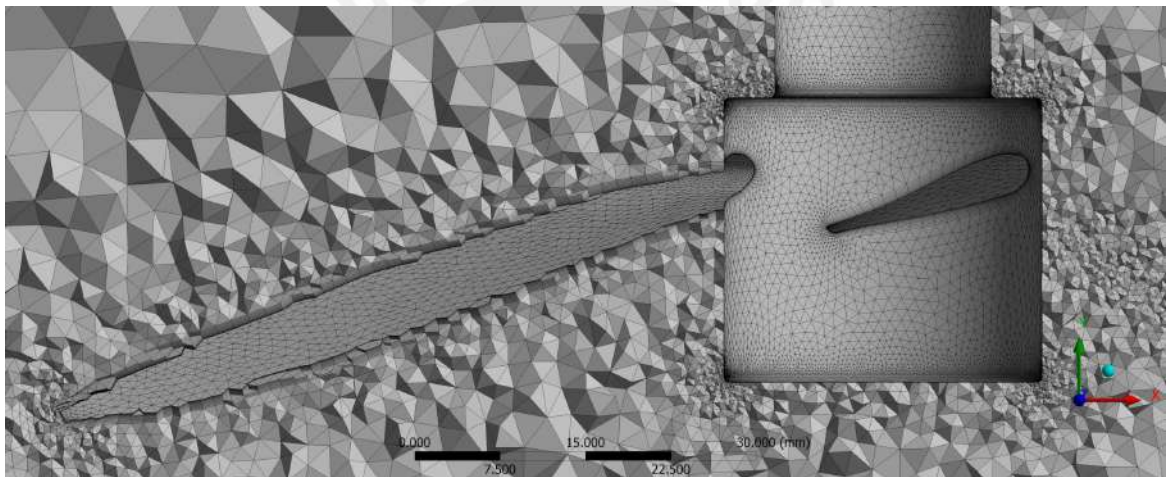


Figura 3.8: Detalle de malla de impulsor G1.

Fuente: Elaboración propia.

Los modelos matemáticos que se utilizaron para analizar al impulsor G1 fueron los mismos empleados en la sección 2.4.2, ya que estos al ser validados con el impulsor original, nos permite tener la certeza de que al emplearlos con otros modelos geométricos se obtendrán resultados confiables que serán puntos de comparación entre impulsores.

En la tabla 3.3 se presentan los resultados que se obtuvieron del impulsor G1. En primer lugar se puede apreciar que para el rango de velocidades simuladas, a pesar de haber cambiado la sección del impulsor original por el perfil aerodinámico *NACA 4412*, el torque requerido por el impulsor G1 es igual en magnitud al torque requerido por el impulsor original.

Tabla 3.3: Comparación numérica de impulsor G1.

N [min^{-1}]	Original					G1				
	T [$\text{N} \cdot \text{m}$]	P [W]	Np [-]	M_a [kg/s]	Nq [-]	T [$\text{N} \cdot \text{m}$]	P [W]	Np [-]	M_a [kg/s]	Nq [-]
200	0.24	5.03	0.33	15.49	0.42	0.24	5.03	0.33	15.96	0.47
300	0.50	15.71	0.31	24.13	0.43	0.50	15.71	0.31	25.32	0.45
400	0.85	35.60	0.29	33.57	0.45	0.85	35.60	0.29	35.50	0.48
500	1.29	67.54	0.29	43.20	0.46	1.28	67.02	0.28	45.86	0.49
600	1.84	115.61	0.28	52.76	0.47	1.82	114.35	0.28	56.10	0.50
700	2.47	181.06	0.28	61.97	0.47	2.44	178.86	0.28	65.70	0.50

Fuente: Elaboración propia.

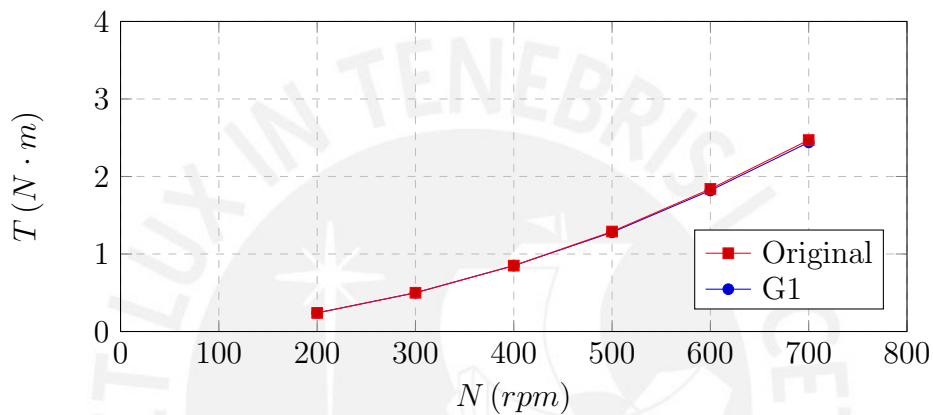


Figura 3.9: Torque en función de la velocidad de giro de impulsor.

Fuente: Elaboración propia.

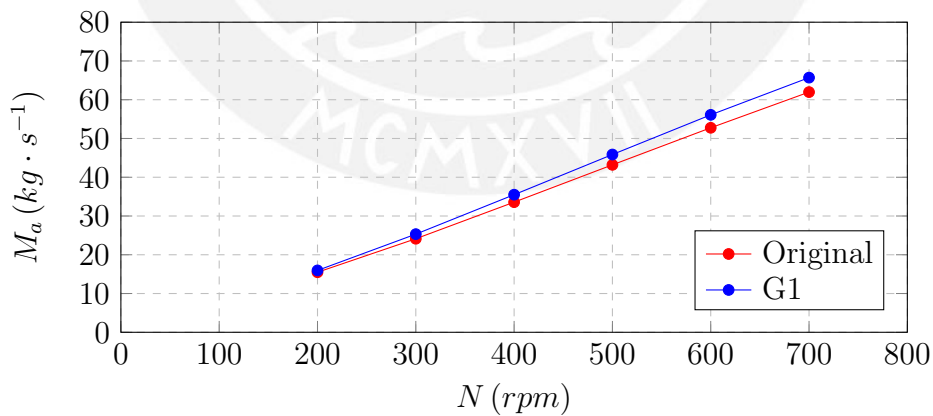


Figura 3.10: Flujo másico en función de la velocidad de giro de impulsor.

Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, en cuanto al flujo másico axial que el impulsor proporciona, este cambio de sección generó un incremento aproximado del 6% a una velocidad de 700 rpm; no

obstante, este incremento se va reduciendo conforme la velocidad de trabajo disminuye, ya que para una velocidad de 200 rpm el flujo másico que entrega el impulsor G1 es mayor en un 3% . De esta forma, durante la operación del impulsor G1, este proporcionará un mayor flujo másico axial con una baja potencia requerida para lograr ello, ver figura 3.10.

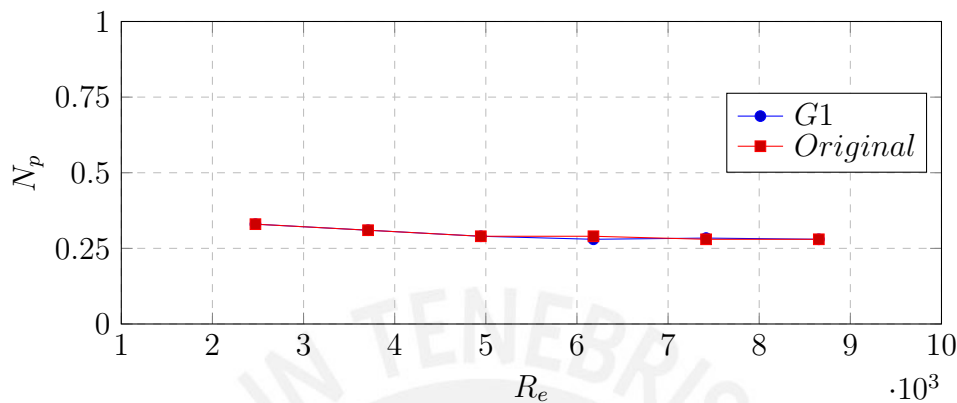


Figura 3.11: N_p vs. R_e .

Fuente: Elaboración propia.

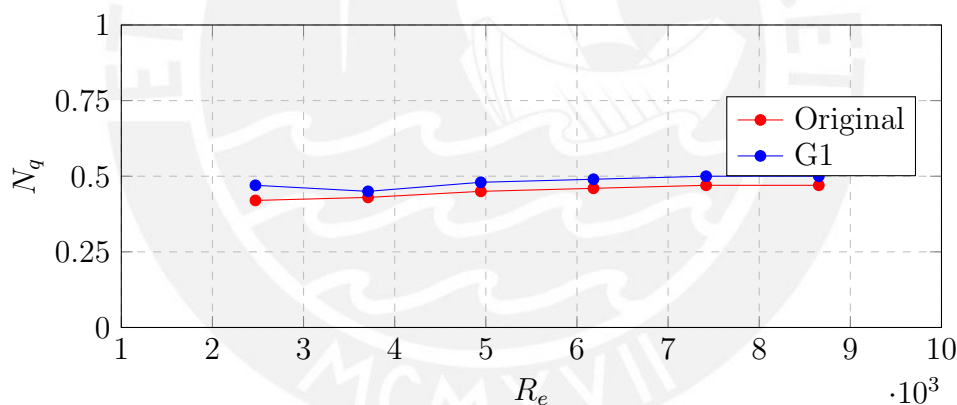


Figura 3.12: N_q vs. R_e .

Fuente: Elaboración propia.

El incremento en el flujo másico producido por el impulsor G1, evaluado en una mezcla homogénea, se obtiene sin ningún cambio en la potencia requerida en comparación con el impulsor original, ver figuras 3.12 y 3.11. Ello se presenta en la siguiente figura de potencia requerida versus flujo másico entregado, donde se observa que para una potencia entregada a ambos impulsores, el impulsor G1 produce mayor flujo másico axial.

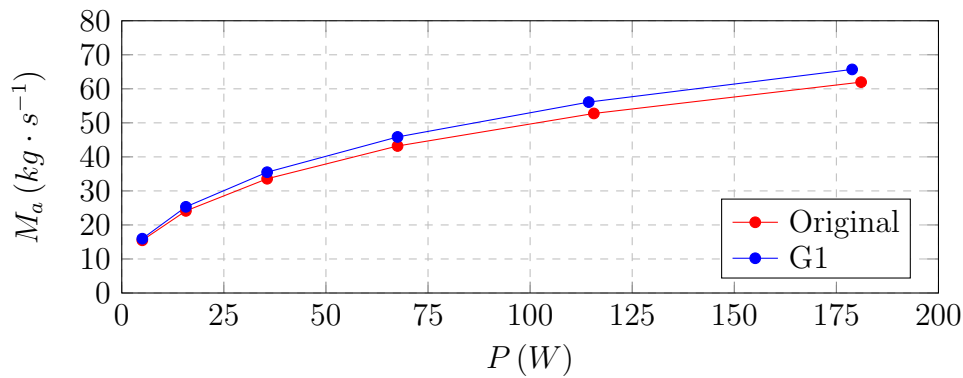


Figura 3.13: Flujo másico generado en función de la potencia consumida.

Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a los indicadores de desempeño como el número de potencia y número de caudal de ambos impulsores, estos se relacionan de tal forma que se representa el flujo másico axial producido por unidad de potencia entregada, ver figura 3.14.

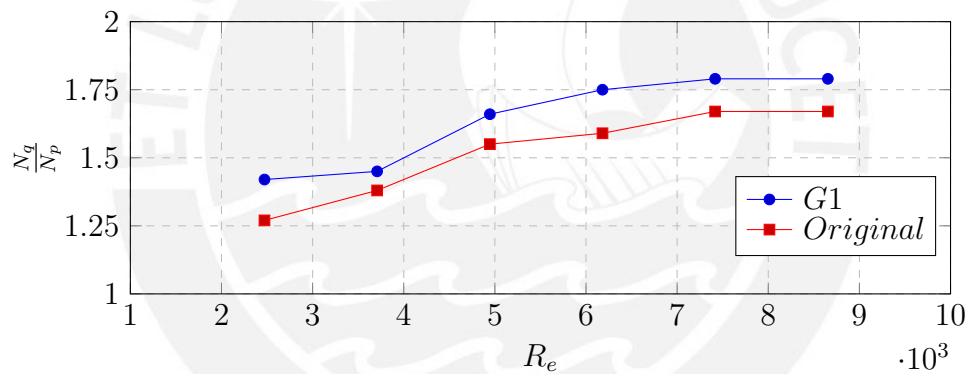


Figura 3.14: $\frac{N_q}{N_p}$ vs. R_e .

Fuente: Elaboración propia.

Patrón de flujo

Por otro lado, se realiza una comparación de las líneas de corriente producidas por cada impulsor. En los resultados de las figuras 3.15, 3.16 y 3.17 se aprecia una reducción en la formación de vórtices debajo del impulsor G1. Sin embargo, si bien hay cierta reducción en la formación de vórtices debajo de los álabes, el patrón de flujo que produce el impulsor G1 es el mismo patrón del impulsor original, ver figura 3.15.

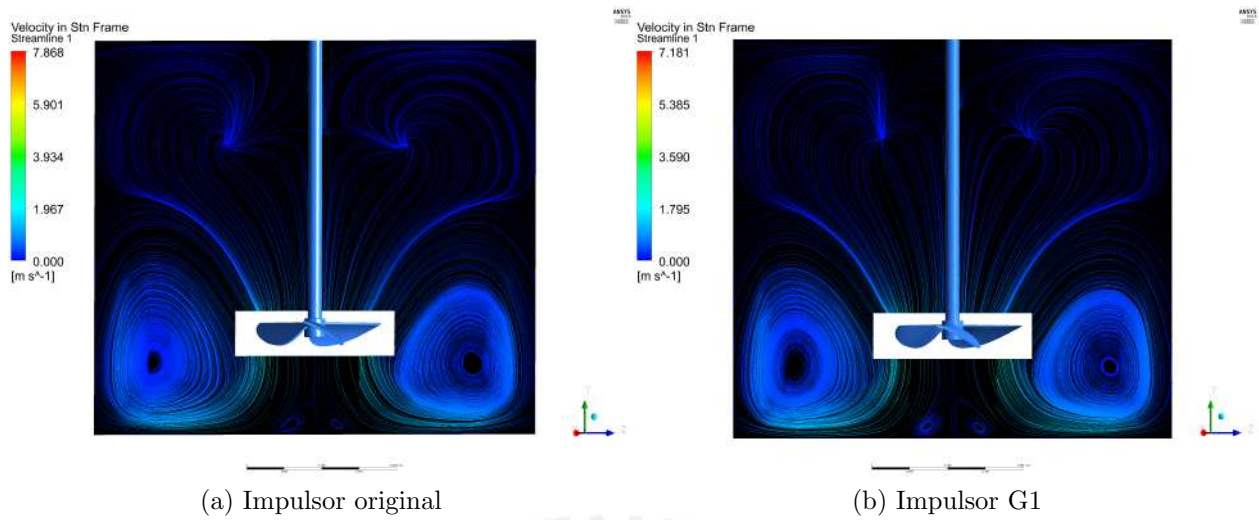


Figura 3.15: Líneas de corriente de impulsores G1 y original.

Fuente: Elaboración propia.

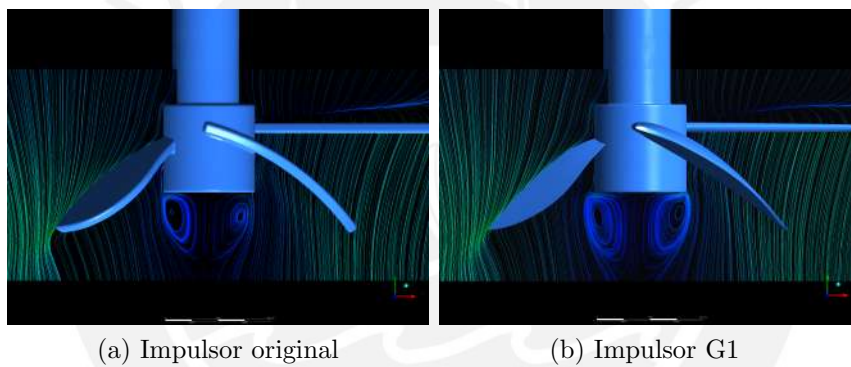


Figura 3.16: Detalle de líneas de corriente en sección de impulsor.

Fuente: Elaboración propia.

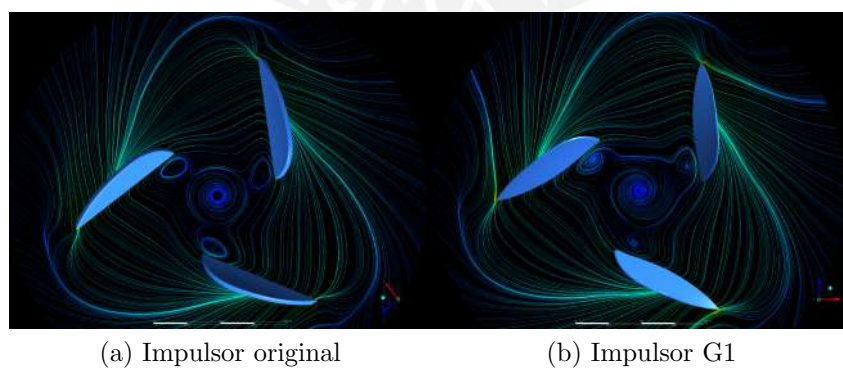


Figura 3.17: Detalle de líneas de corriente debajo de impulsor.

Fuente: Elaboración propia.

Vectores de velocidad

Por otro lado, se realiza una comparación de los vectores de velocidad en un plano de corte longitudinal del tanque, ver figura 3.18. En ella, se verifica que se mantiene el patrón de las líneas de corriente.

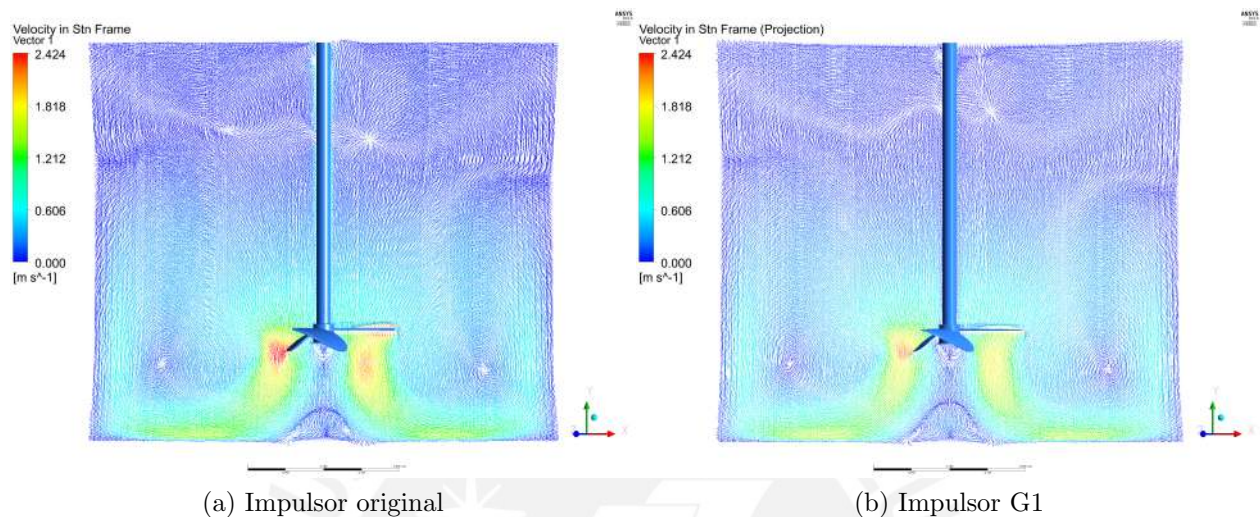


Figura 3.18: Vectores de velocidad de impulsores G1 y original.

Fuente: Elaboración propia.

Debido a que el impulsor G1 produce mayor flujo másico, es de esperar que la magnitud de los vectores de velocidad en la parte inferior sean mayores; sin embargo, ello no se aprecia muy bien en la figura 3.19. Por ello, a continuación se realiza una comparación con mayor detalle de cada una de las componentes del vector de velocidad

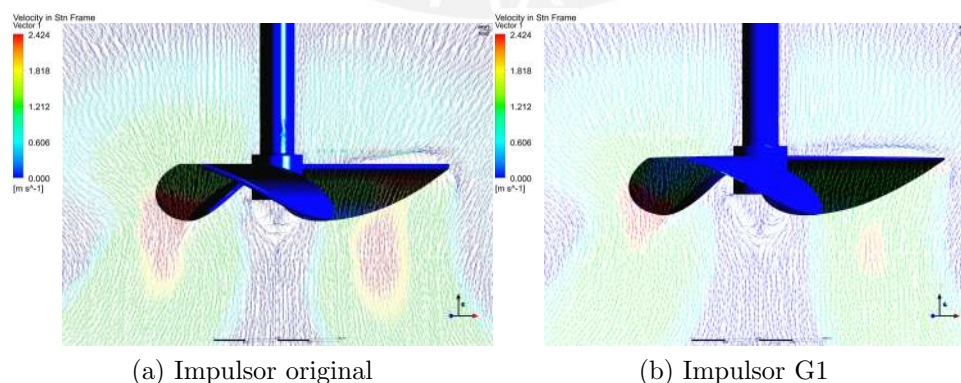


Figura 3.19: Detalle de vectores de velocidad en sección de impulsor.

Fuente: Elaboración propia.

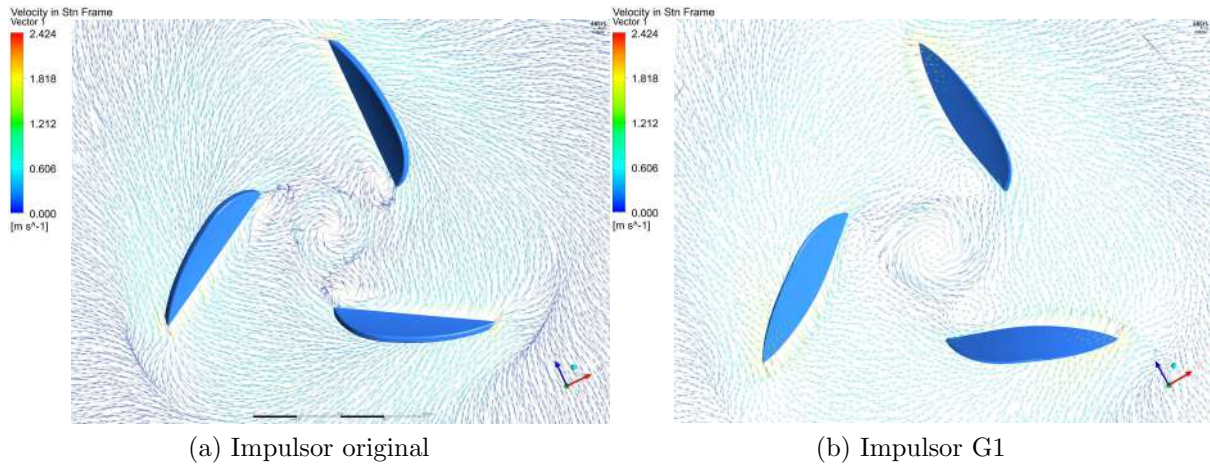


Figura 3.20: Detalle de vectores de velocidad debajo de impulsor.

Fuente: Elaboración propia.

Distribución de vectores de velocidad

Para el indicador de distribución de vectores de velocidad se realizan comparaciones de las componentes radial, tangencial y axial. Como el consumo de potencia dentro del rango de velocidades de 200 *rpm* a 700 *rpm* es el mismo para ambos impulsores, las figuras son comparativas para cualquier velocidad dentro de este rango, ver figura 3.21.

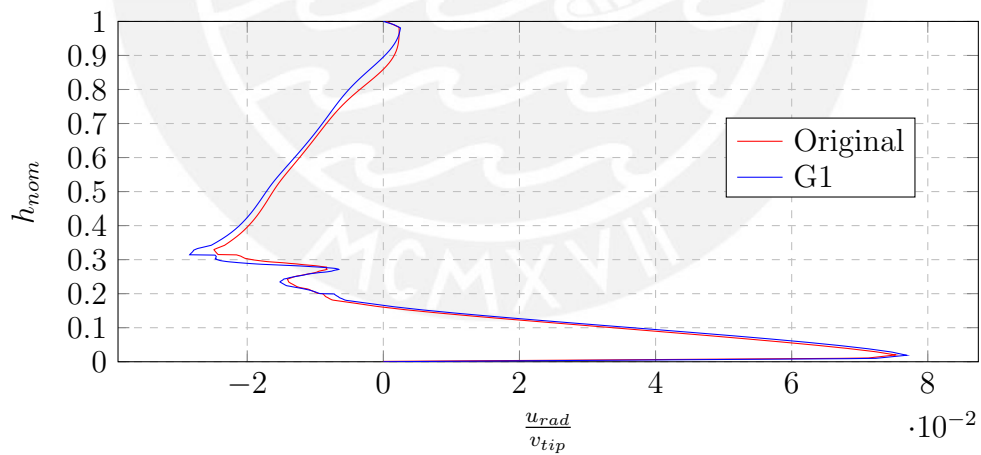


Figura 3.21: Componente radial en función de la altura nominal del tanque.

Fuente: Elaboración propia.

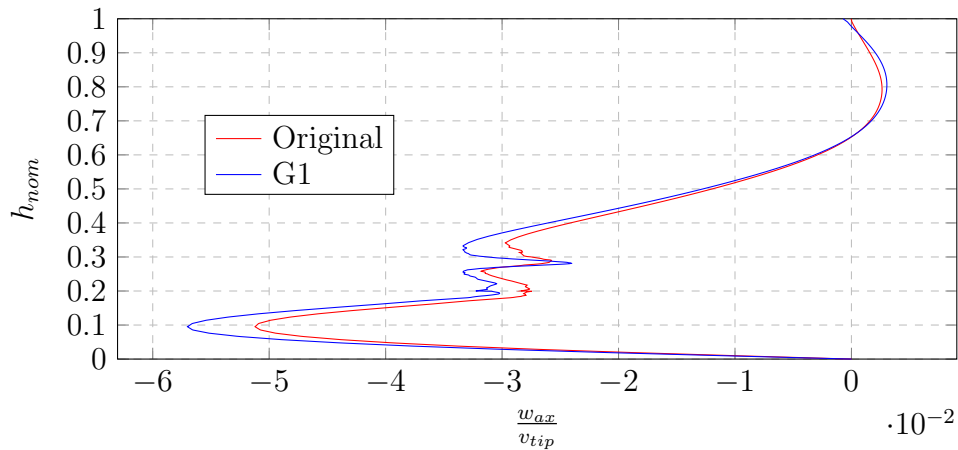


Figura 3.22: Componente axial en función de la altura nominal del tanque.
Fuente: Elaboración propia.

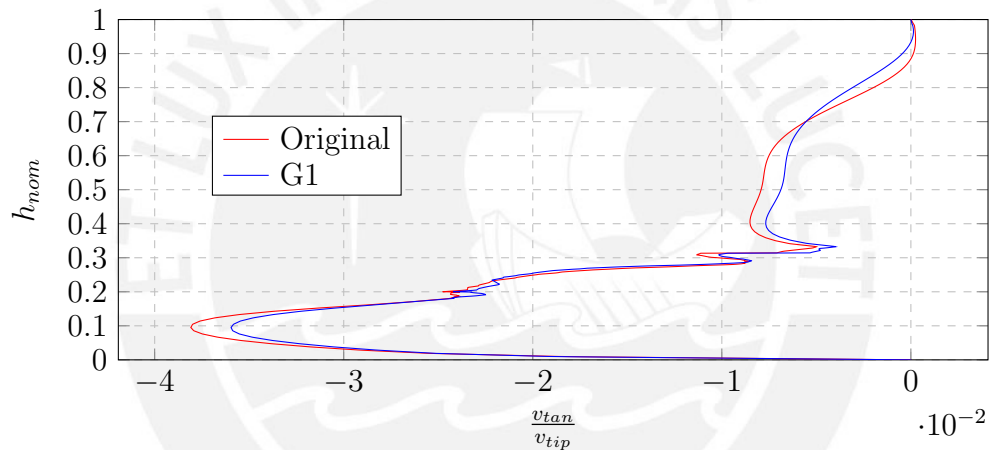


Figura 3.23: Componente tangencial en función de la altura nominal del tanque.
Fuente: Elaboración propia.

Energía cinética turbulenta

Finalmente, en la figura 3.24 se presenta la dispersión de la energía cinética turbulenta donde se aprecia una mejora en ella por parte del impulsor G1, ya que tiene un mayor alcance en la parte central e inferior del tanque.

Además se presenta un plano de corte a una distancia de 0.025 mm de la base del impulsor donde se observa que en las puntas de los álabes del impulsor G1 la magnitud de la energía cinética turbulenta es mayor.

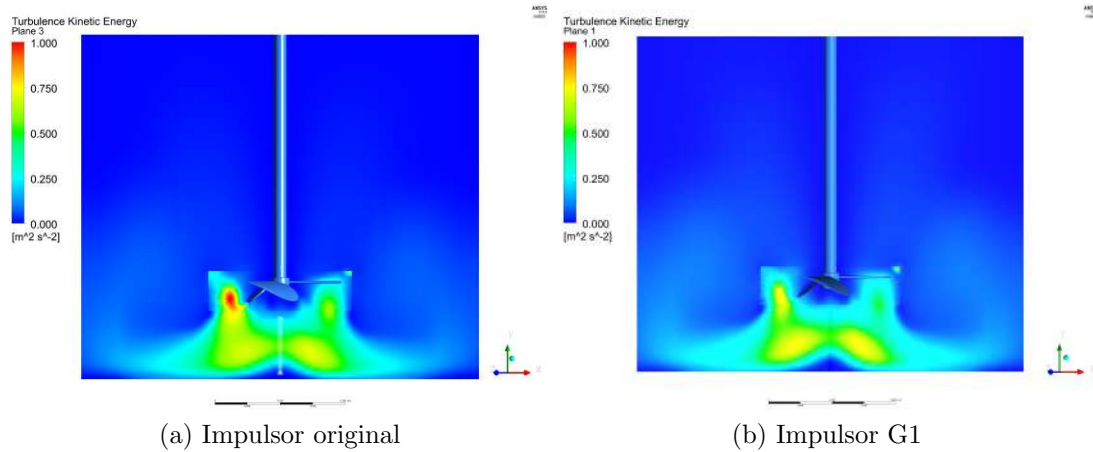


Figura 3.24: Energía cinética turbulenta.

Fuente: Elaboración propia.

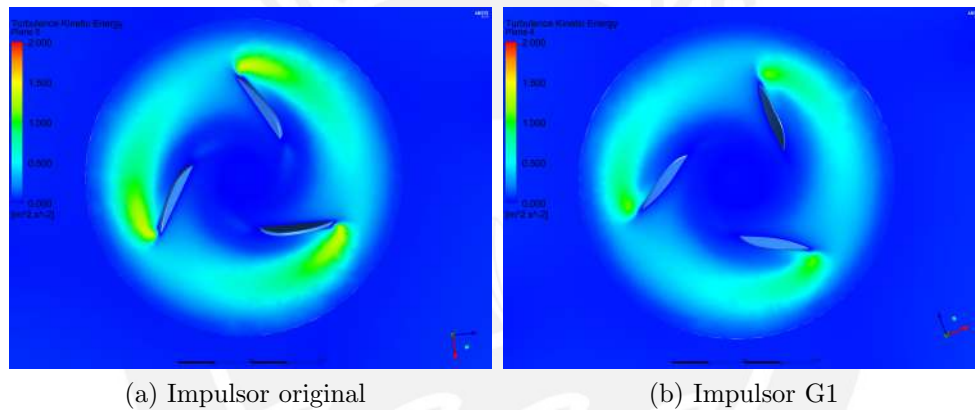


Figura 3.25: Energía cinética turbulenta debajo de impulsor.

Fuente: Elaboración propia.

3.2 Propuestas de mejora con variación de ángulo de paso e inclinación de álabes

Uno de los problemas encontrados en los impulsores G1 y original es la formación de vórtices debajo del cubo, ello trae como consecuencia la reducción de la magnitud de los vectores de velocidad e impide una correcta dispersión de la energía cinética turbulenta.

Autores como Kumaresan y Joshi afirman que una forma de reducir los vórtices formados debajo del impulsor y mejorar el flujo axial generado es mediante un diseño adecuado de la forma de los álabes [Kumaresan and Joshi, 2006]. Según Fentiman y colegas, ello es posible mediante un cambio en los ángulos de paso de las secciones de los álabes [Fentiman et al., 1998].

Asímismo, los autores Jirout y Rieger indican que los álabes de los impulsores *hydrofoil* deben tener una variación del ángulo de paso en toda su longitud; es decir, generar una torsión de estos. El rango de ángulos de paso para la torsión de los álabes debe ser entre 45° cerca del cubo y 22° en la punta álabes [Jirout and Rieger, 2011].

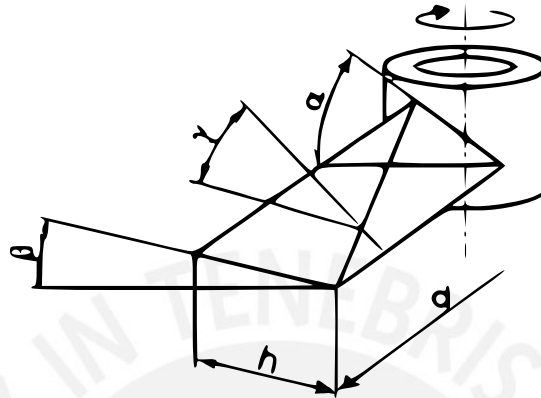


Figura 3.26: Variación de ángulos de paso de álabes impulsor *hydrofoil*.
Fuente: Tomado de [Jirout and Rieger, 2011].

Mediante la información presentada líneas arriba, se procedió a evaluar las 2 nuevas geometrías de impulsores, las cuales tienen como fin reducir la vorticidad formada debajo de estos y mejorar los indicadores de desempeño como número de potencia, número de caudal, y dispersión de energía cinética turbulenta.

3.2.1 Propuesta de mejora: Impulsor G6

En primer lugar se presenta al impulsor G6, el cual además del cambio de sección en los álabes que presenta el impulsor G1, su diseño tiene en cuenta las recomendaciones del autor Fentiman y colegas, variando el ángulo de paso de los álabes del impulsor G1 en el rango de 50° en la base del álabes y 32° en la punta, ver figura 3.2.

Asímismo, la inclinación de los álabes se varió en 15° con respecto a la horizontal ver figura 3.28 y el diámetro del impulsor se mantuvo en 190 mm .

Tabla 3.4: Características de impulsor G6.

Impulsor	Sección de álabes	Ángulo de paso	Ángulo de inclinación	Cantidad de álabes	Tipo de impulsor
G6	Perfil NACA 4412	Variable	105°	3	Hydrofoil

Fuente: Elaboración propia.

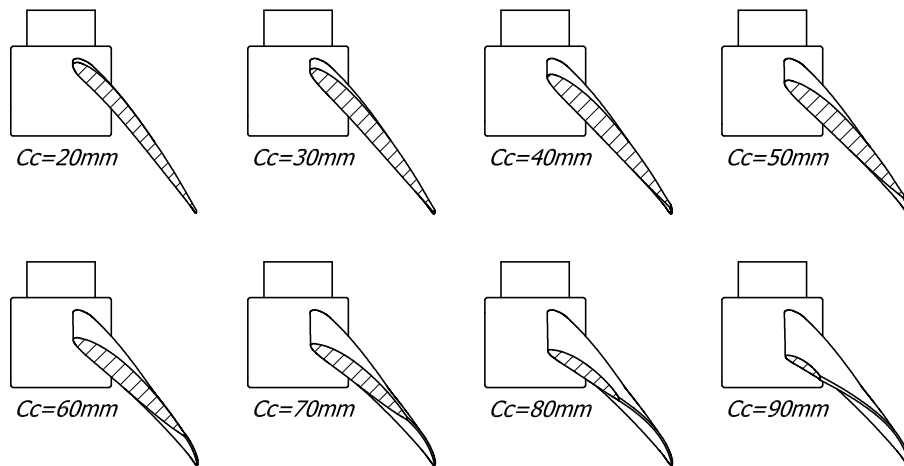


Figura 3.27: Secciones de álabe del impulsor G6

Fuente: Elaboración propia

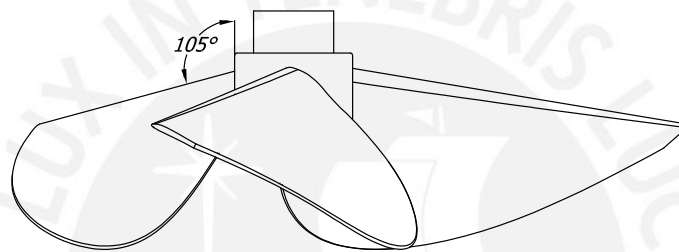


Figura 3.28: Inclinación de álabe de impulsor G6

Fuente: Elaboración propia

En la figura 3.29 se presentan secciones a diferentes distancias del centro del impulsor de uno de los álabes del nuevo impulsor. De esta forma se aprecia se mantiene el cambio de sección por un perfil aerodinámico que se realizó en el impulsor G1 a lo largo de todo el álabe.

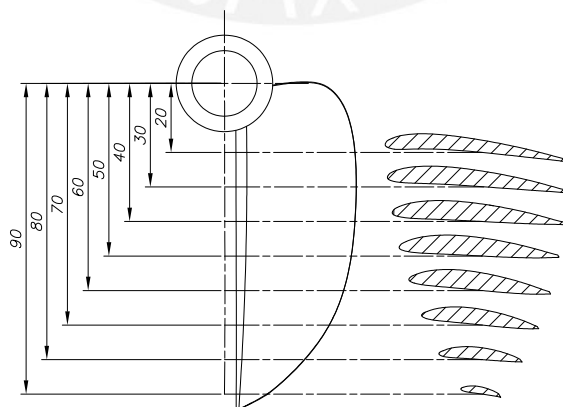


Figura 3.29: Secciones del álabe del impulsor G6.

Fuente: Elaboración propia.

3.2.2 Propuesta de mejora: Impulsor G3

Por otro lado, se presenta un último diseño de impulsor como propuesta de mejora, el cual mantiene las mismas características del impulsor G6; sin embargo, presenta una diferente variación en los ángulos de paso de sus álabes. En la base del álabe se considera un ángulo de 63° y en la punta un ángulo de 33° .

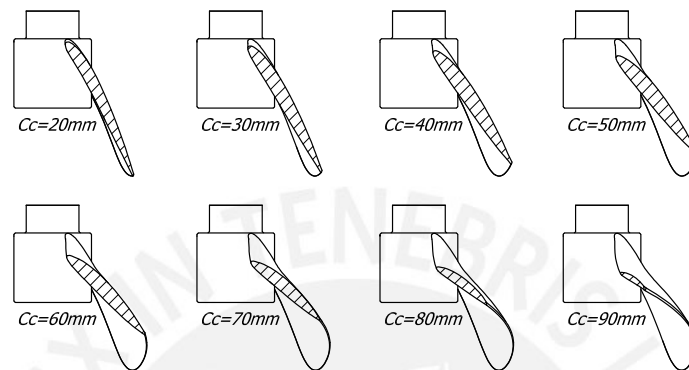


Figura 3.30: Secciones de álabe de impulsor G3

Fuente: Elaboración propia

La inclinación de los álabes se cambió a 15° con respecto a la horizontal, ver figura 3.32. Asimismo, se mantiene el diámetro del impulsor en 190 mm .

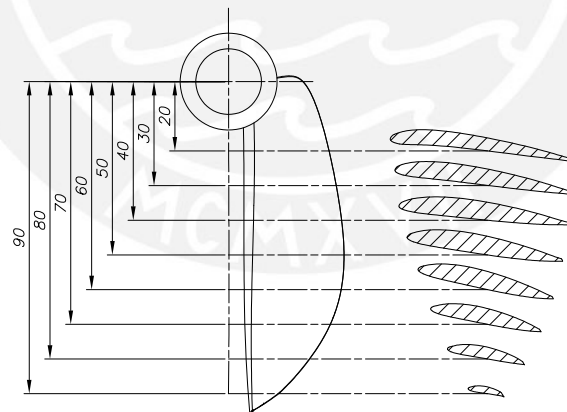


Figura 3.31: Secciones del álabe del impulsor G3.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.5: Características de impulsor G3.

Impulsor	Sección de álabes	Ángulo de paso	Ángulo de inclinación	Cantidad de álabes	Tipo de impulsor
G3	Perfil NACA 4412	Variable	105°	3	Hydrofoil

Fuente: Elaboración propia.

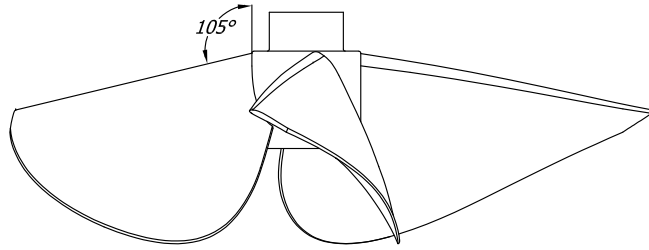


Figura 3.32: Inclinación de álabe de impulsor G3

Fuente: Elaboración propia

3.3 Evaluación de propuestas de impulsores G3 y G6

A partir de una evaluación preliminar realizada a los impulsores G3 y G6 en mezcla homogénea, se obtienen los resultados que se presentan en la tabla 3.6 y en las siguientes imágenes.

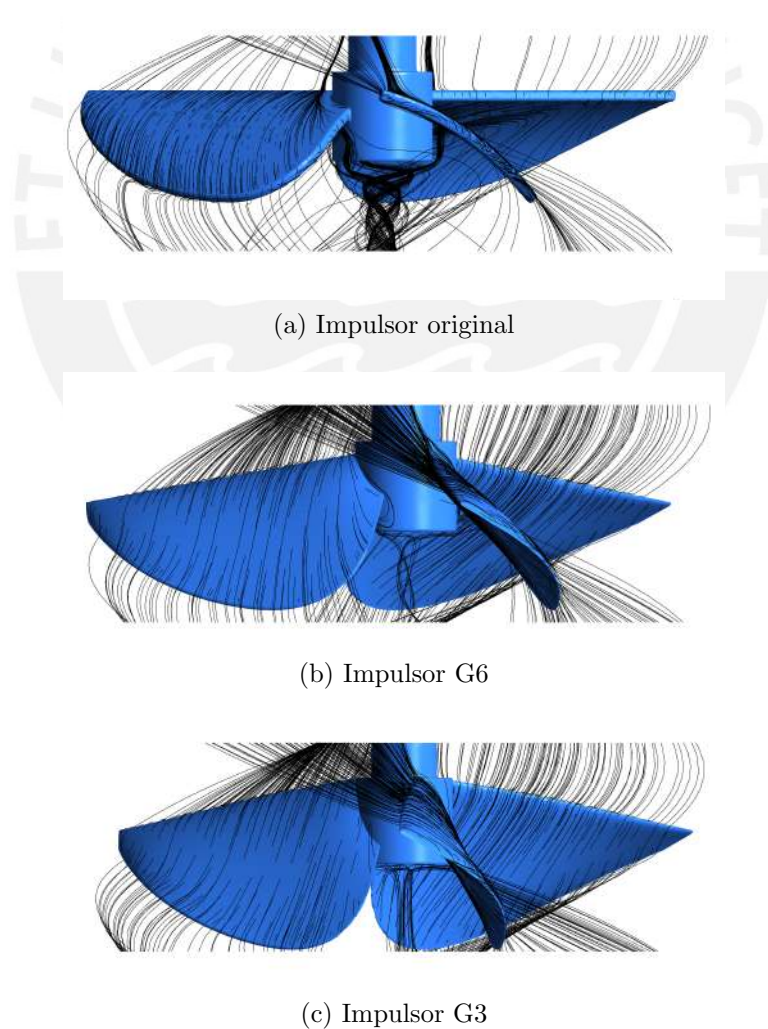


Figura 3.33: Vórtices formados debajo de los impulsores.

Fuente: Elaboración propia.

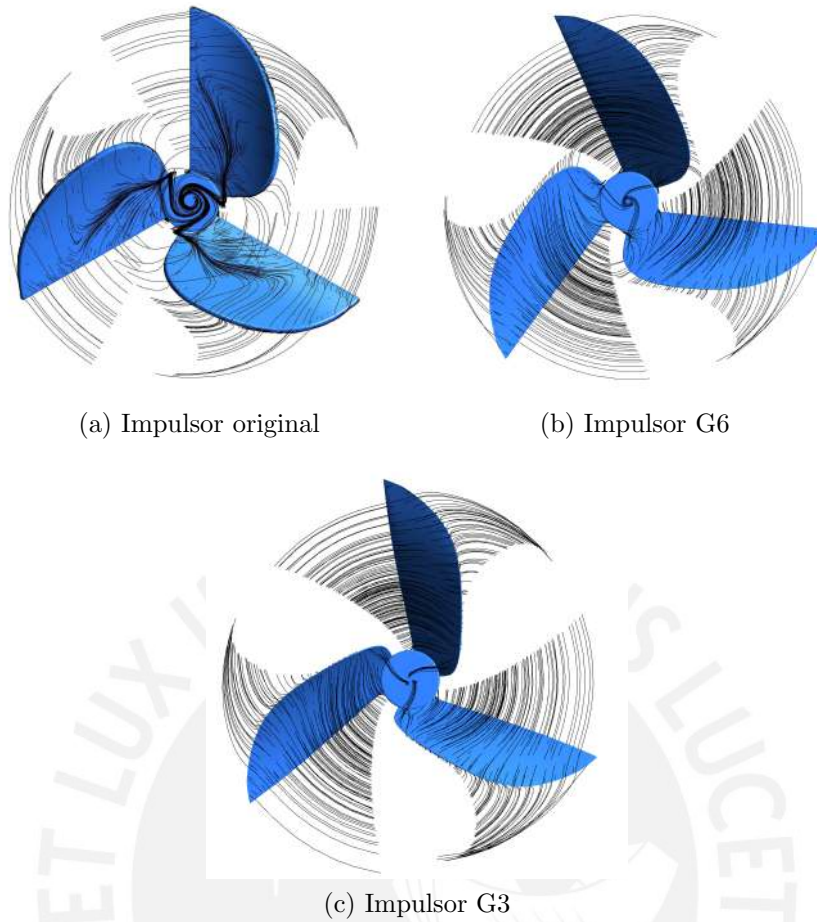


Figura 3.34: Vórtices formados debajo de los impulsores.

Fuente: Elaboración propia.

De la evaluación preliminar se obtiene que tanto el impulsor G3 y G6 presentan una reducción significativa de la formación de los vórtices debajo de ellos, comprobando así que la torsión de álabes dentro del rango recomendado permite la reducción de vorticidad. Como consecuencia de ello, ambos producen mayor flujo másico axial que el impulsor original y G1. Sin embargo, a pesar de la reducción de vórtices y el incremento de flujo másico, el torque requerido para la operación se incrementa para ambos impulsores.

Tabla 3.6: Resultados numéricos de impulsor G3 y G6.

N [min^{-1}]	G3					G6				
	T [$N.m$]	P [W]	N_p [-]	Ma [kg/s]	N_q [-]	T [$N.m$]	P [W]	N_p [-]	Ma [kg/s]	N_q [-]
450	1.82	85.77	0.5	68.05	0.81	1.46	68.80	0.40	45.61	0.54
700	4.31	315.94	0.49	108.09	0.83	3.54	259.50	0.40	69.86	0.53

Fuente: Elaboración propia.

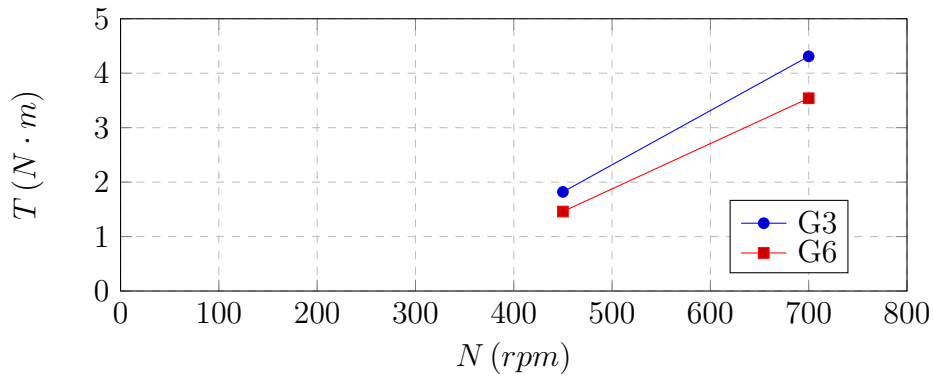


Figura 3.35: Torque en función de la velocidad de giro de impulsor.

Fuente: Elaboración propia.

Debido a que ambos impulsores presentan un incremento en el torque requerido durante la operación, se selecciona la opción que consume menor potencia entre las dos, siendo el impulsor G6 el elegido para ser analizado con mayor detalle en la siguiente sección.

3.4 Análisis de impulsor G6 en mezcla homogénea

Para evaluar el comportamiento del impulsor G6, primero se realizó un análisis de independencia de malla de $y+$ en sus álabes. El resultado fue que para un espesor de primera capa de 0.025 mm , el valor del $y + prom$ es independiente de la cantidad de capas con la que se trabaje.

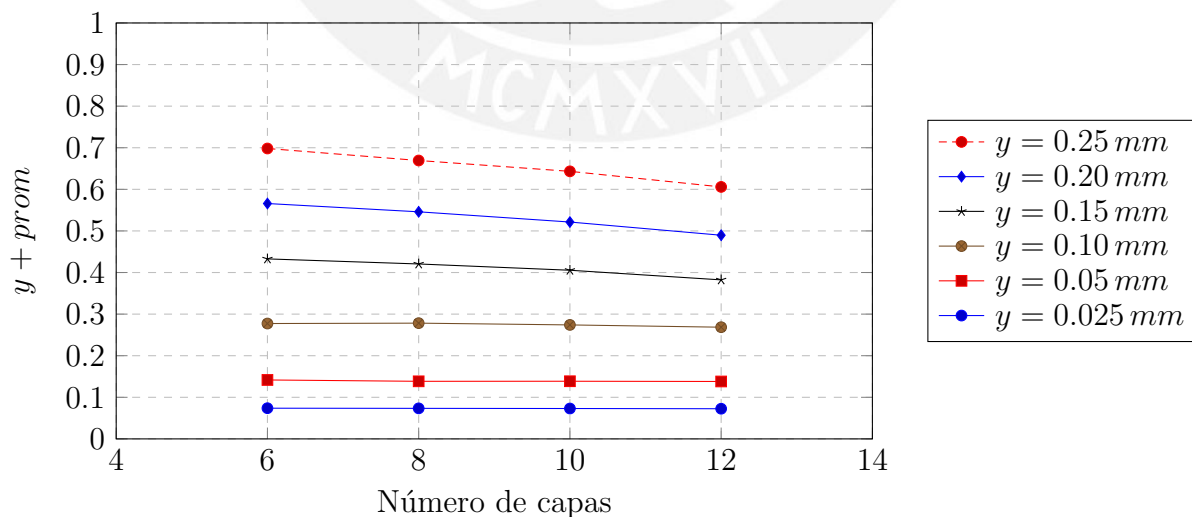


Figura 3.36: Variación de $y + prom$ con respecto al número de capas.

Fuente: Elaboración propia.

A partir de este resultado, se realizó un mallado fino de todo el modelo del tanque agitador para ser simulado en mezcla homogénea y procurando que los elementos en la interfase de los dominios tengan el mismo tamaño y se encuentren dentro de los parámetros permisibles de calidad.

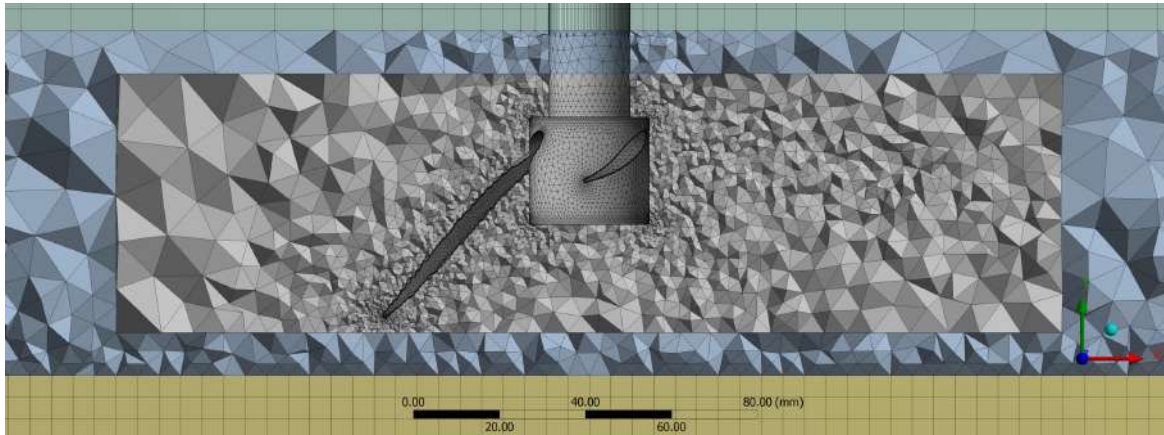


Figura 3.37: Mallado en la interfase: G6

Fuente: Elaboración propia

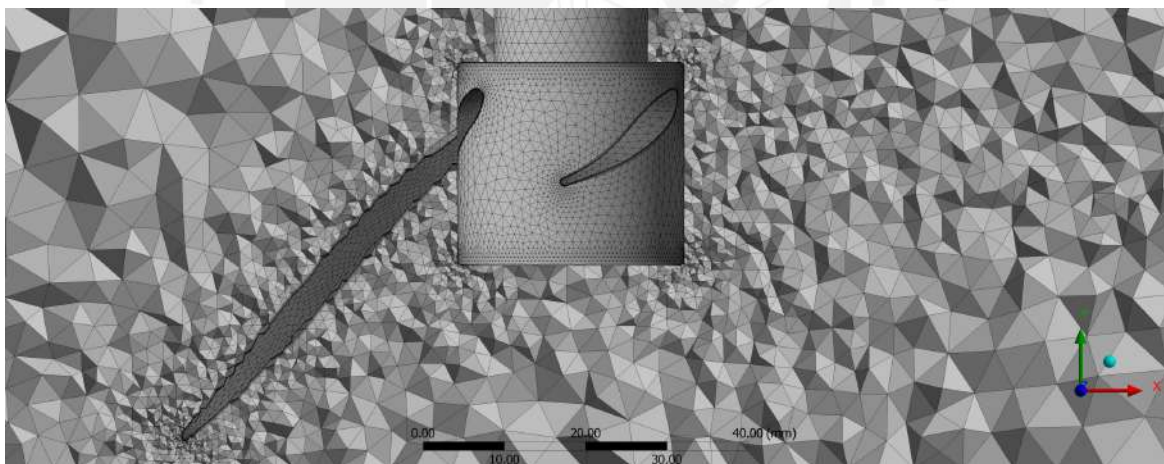


Figura 3.38: Detalle de malla de impulsor G6.

Fuente: Elaboración propia.

El mallado cerca de los álabes del impulsor es muy fino, debido a la complejidad de su geometría al bajo espesor de la primera capa que aproxima a la capa límite formada en los álabes durante el funcionamiento.

Tabla 3.7: Características del mallado: G6.

Impulsor	Fluido	Cantidad de elementos	Aspect ratio	Skewness	Orthogonal Quality
G6	Mezcla Homogénea	3 003 446	125.23	0.025714	0.74985

Fuente: Elaboración propia.

Para las simulaciones se utilizaron los modelos matemáticos empleados con el impulsor original y G1. De ello, los resultados de las simulaciones se encuentran en la tabla 3.8, donde se presentan los indicadores de desempeño como el número de potencia, número de caudal y potencia consumida.

Tabla 3.8: Resultados numéricos de impulsor G6.

N [min^{-1}]	Original					G6				
	T [$N \cdot m$]	P [W]	Np [-]	M_a [kg/s]	Nq [-]	T [$N \cdot m$]	P [W]	Np [-]	M_a [kg/s]	Nq [-]
200	0.24	5.03	0.33	15.49	0.42	0.31	6.49	0.43	17.23	0.46
300	0.50	15.71	0.31	24.13	0.43	0.67	21.05	0.41	27.62	0.49
400	0.85	35.60	0.29	33.57	0.45	1.15	48.17	0.40	38.65	0.52
500	1.29	67.54	0.29	43.20	0.46	1.75	91.63	0.39	49.84	0.54
600	1.84	115.61	0.28	52.76	0.47	2.48	155.82	0.38	60.10	0.54
700	2.47	181.06	0.28	61.97	0.47	3.35	245.57	0.38	70.11	0.54

Fuente: Elaboración propia.

De estos resultados, como se puede apreciar en la siguiente figura, el impulsor G6 para una velocidad de rotación dentro del rango de 200 rpm a 700 rpm requiere un torque de operación mayor al requerido por el impulsor original.

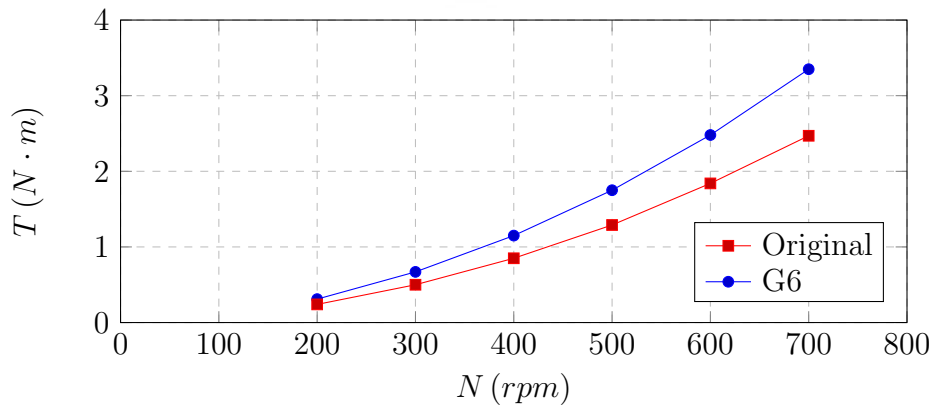


Figura 3.39: Torque en función de la velocidad de giro de impulsor.

Fuente: Elaboración propia.

De igual manera ocurre con el número de potencia, ya que cuando este se grafica en función del número de Reynolds, se obtiene como resultado un mayor número de potencia para el impulsor G6, debido a que el N_p depende directamente del torque requerido por cada impulsor.

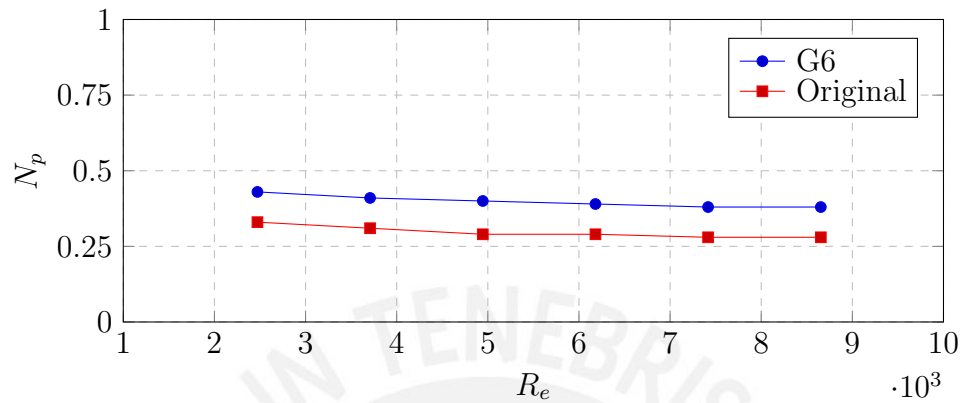


Figura 3.40: N_p vs. R_e .

Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, si bien existe un aumento del torque requerido por el impulsor G6, existe el beneficio de que el flujo másico axial generado por el impulsor aumenta en el rango de 200 *rpm* a 700 *rpm*. Este incremento tiene la misma tendencia que presentaba el impulsor G1; es decir, a bajas revoluciones de trabajo, el valor del flujo másico producido por el nuevo diseño es parecido al producido por el impulsor original.

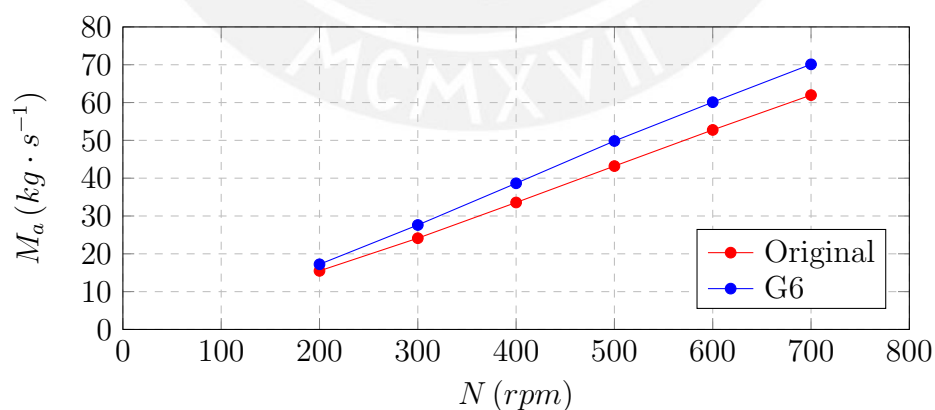


Figura 3.41: Flujo másico en función de la velocidad de giro de impulsor.

Fuente: Elaboración propia.

De igual forma como ocurrió con el número de potencia, el número de caudal del impulsor G6 es mayor al N_q del impulsor original en el rango de velocidad de trabajo.

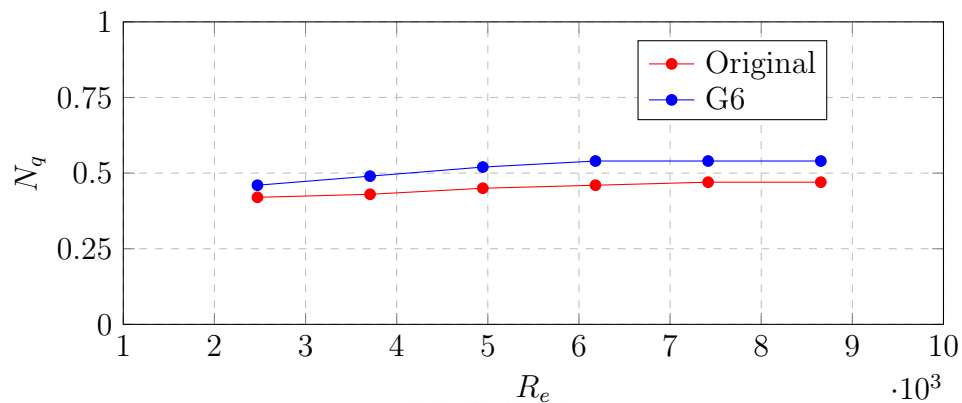


Figura 3.42: N_q vs. R_e .

Fuente: Elaboración propia.

Debido a que existe incremento tanto en el torque y flujo másico axial del impulsor G6, no es posible realizar una buena comparación con el impulsor original. Por ello, es que se relaciona la potencia consumida y la cantidad de flujo másico axial generado por el impulsor G6, obteniendo como resultado la cantidad que flujo másico axial que entrega el impulsor por unidad de potencia entregada al impulsor. Cabe añadir que este procedimiento también fue realizado con los resultados de simulación del impulsor original y como resultado de ello se obtuvo que el impulsor G6 para un consumo de potencia igual al del impulsor original, produce un mayor flujo másico axial.

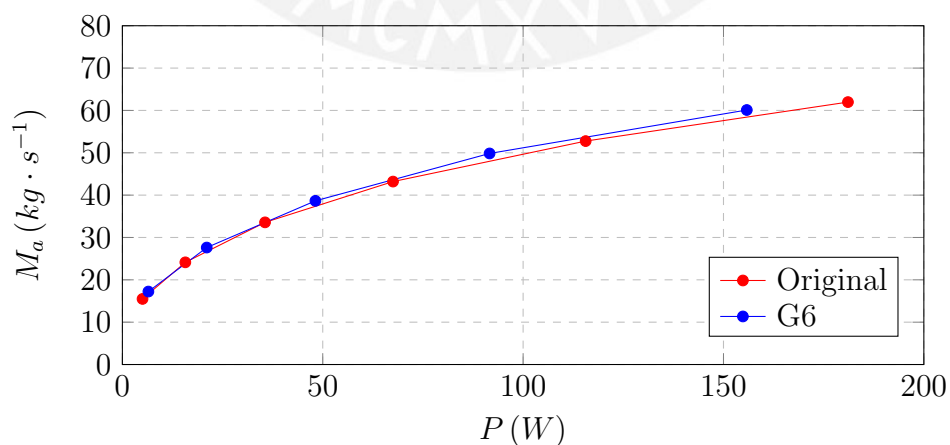


Figura 3.43: Flujo másico generado en función de la potencia consumida.

Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, para el caso de velocidad de rotación de 700 rpm del impulsor original, este presenta un torque requerido de $2.47 \text{ N} \cdot \text{m}$, produce un flujo másico axial de $61.97 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ y un consumo de potencia de 181.06 W . En cuanto al impulsor G6, este también requiere un torque de operación de $2.47 \text{ N} \cdot \text{m}$; sin embargo, ello ocurre cuando trabaja a 600 rpm y logra un consumo de potencia de 155.82 W , lo cual representa un ahorro del 14% con respecto al impulsor original.

Patrón de flujo

En las imágenes que se presentan a continuación, se aprecia una notable mejora en el flujo que produce el impulsor G6, ya que como se presenta en la figura 3.44 y 3.47 las líneas de corriente llegan hasta la superficie superior del fluido y, de igual forma, la magnitud de vectores de velocidad es mayor en esta zona, caso que no ocurre con el impulsor original.

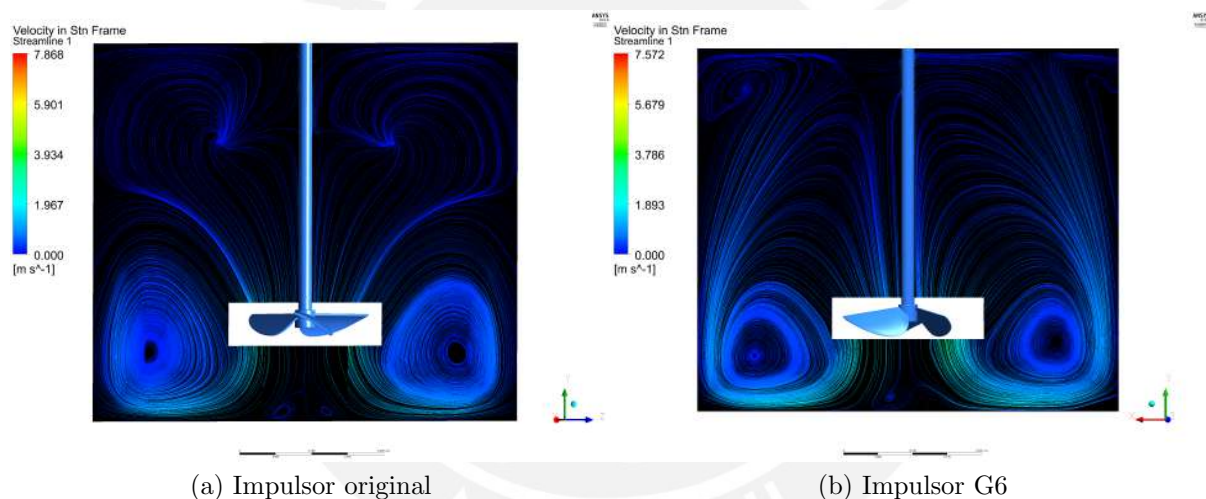


Figura 3.44: Líneas de corriente de impulsores G6 y original

Fuente: Elaboración propia

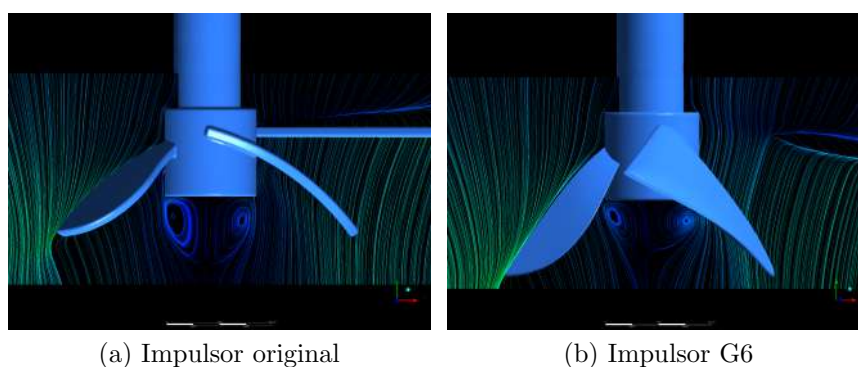
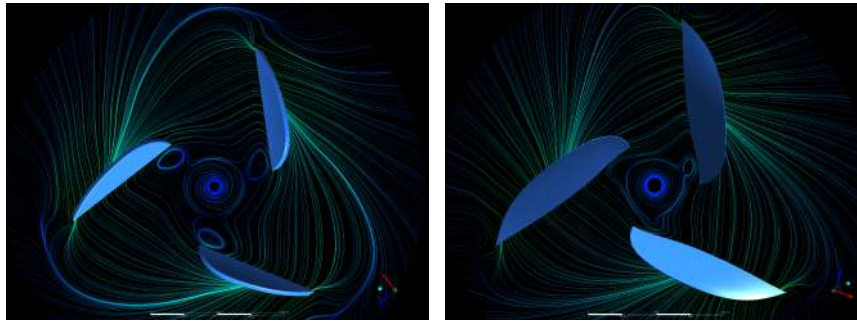


Figura 3.45: Detalle de líneas de corriente en sección de impulsor.

Fuente: Elaboración propia.



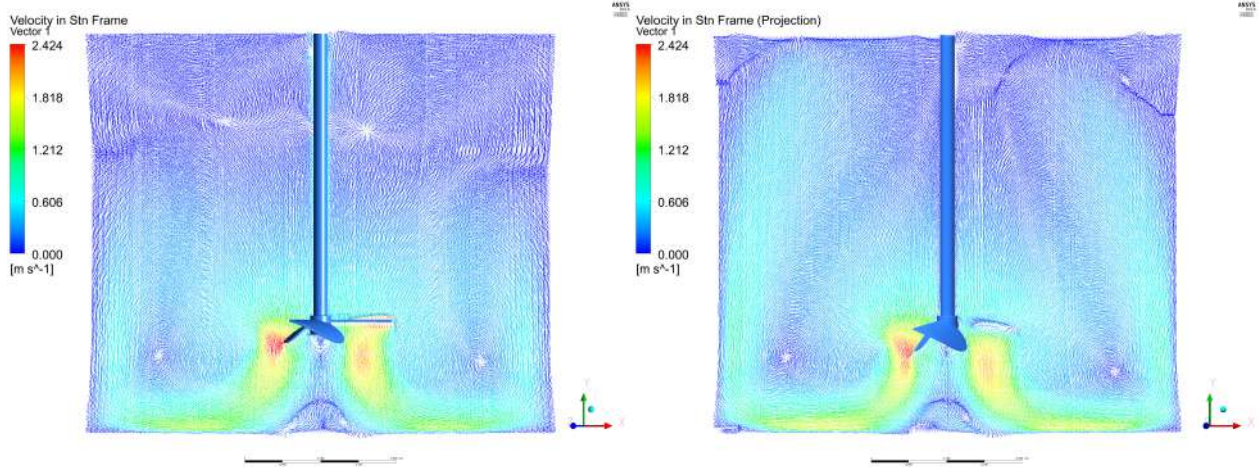
(a) Impulsor original

(b) Impulsor G6

Figura 3.46: Detalle de líneas de corriente debajo de impulsor

Fuente: Elaboración propia

Distribución de vectores de velocidad

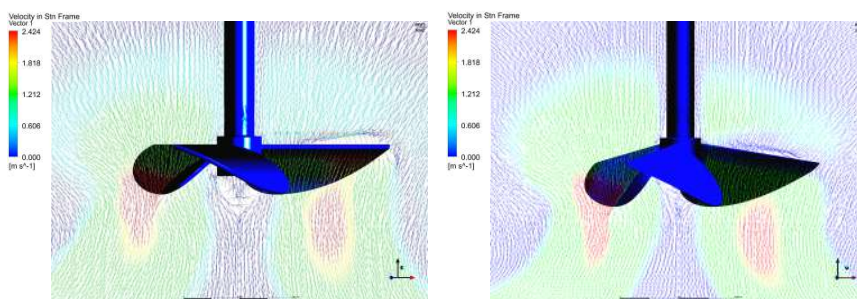


(a) Impulsor original

(b) Impulsor G6

Figura 3.47: Vectores de velocidad de impulsores G6 y original.

Fuente: Elaboración propia.



(a) Impulsor original

(b) Impulsor G6

Figura 3.48: Detalle de vectores de velocidad en sección de impulsor.

Fuente: Elaboración propia.

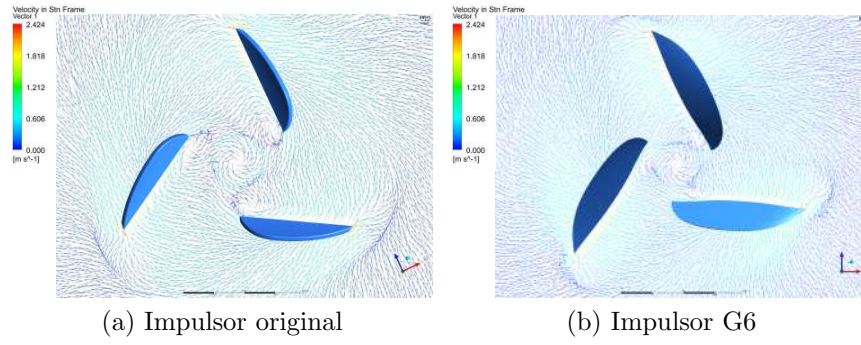


Figura 3.49: Detalle de vectores de velocidad debajo de impulsor.

Fuente: Elaboración propia.

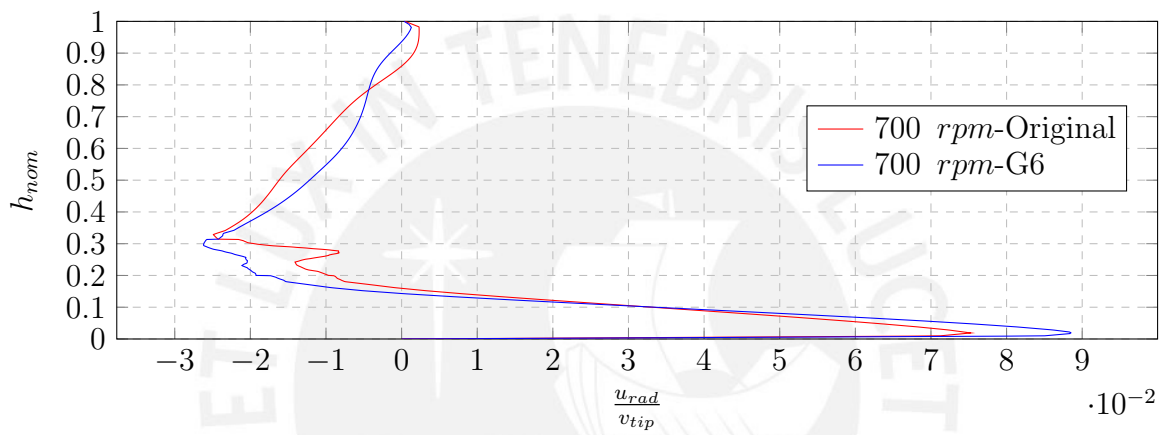


Figura 3.50: Componente radial en función de la altura nominal del tanque.

Fuente: Elaboración propia.

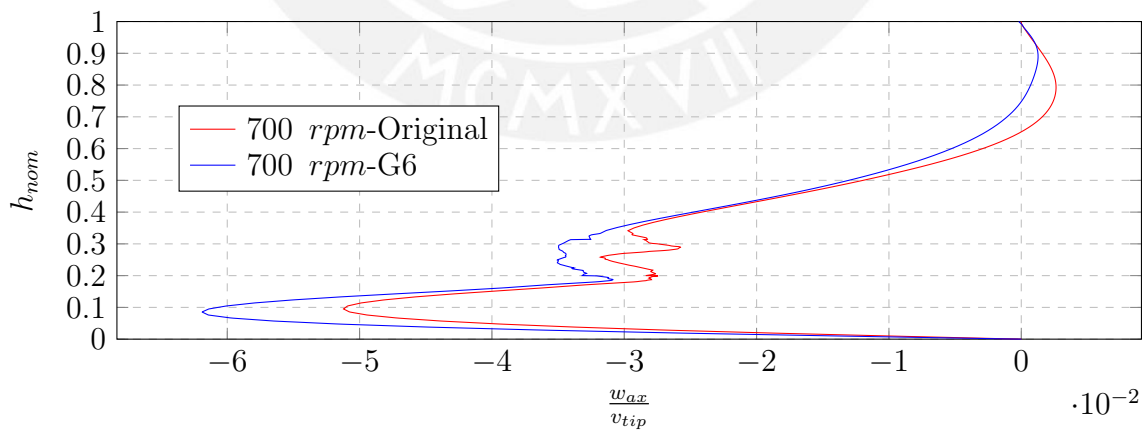


Figura 3.51: Componente axial en función de la altura nominal del tanque.

Fuente: Elaboración propia.

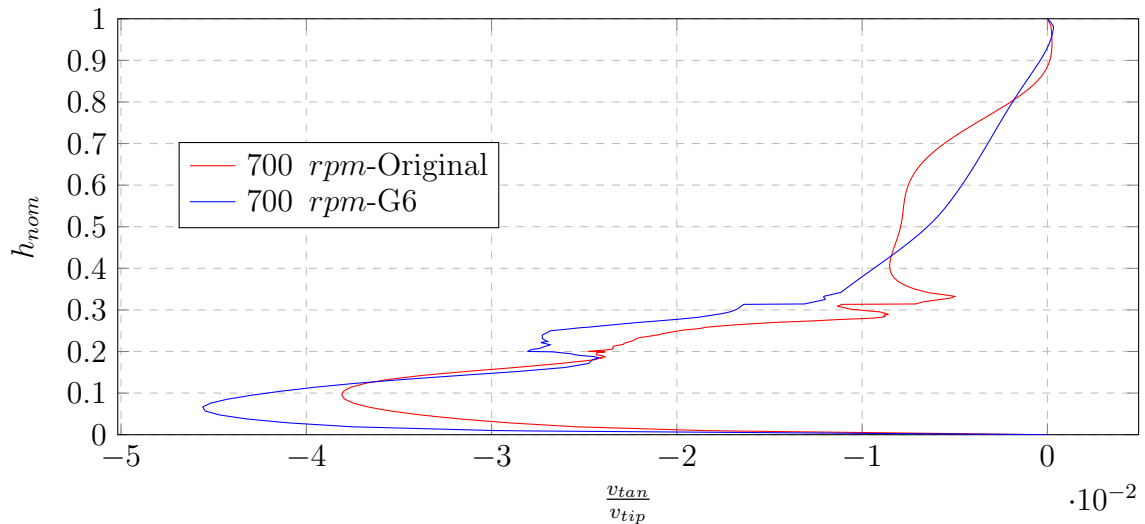


Figura 3.52: Componente tangencial en función de la altura nominal del tanque.

Fuente: Elaboración propia.

En segundo lugar, se realiza la comparación para el caso donde el consumo de potencia por parte del impulsor G6 es menor. Para este análisis se obtuvo la misma tendencia en el mismo resultado; es decir, la distribución de vectores de velocidad del impulsor G6 es mejor comparándola con el impulsor original, ya que para las 3 componentes, la magnitud de estas es mayor en la zona baja y media del tanque, lo cual es beneficioso para el caso de sólidos en suspensión.

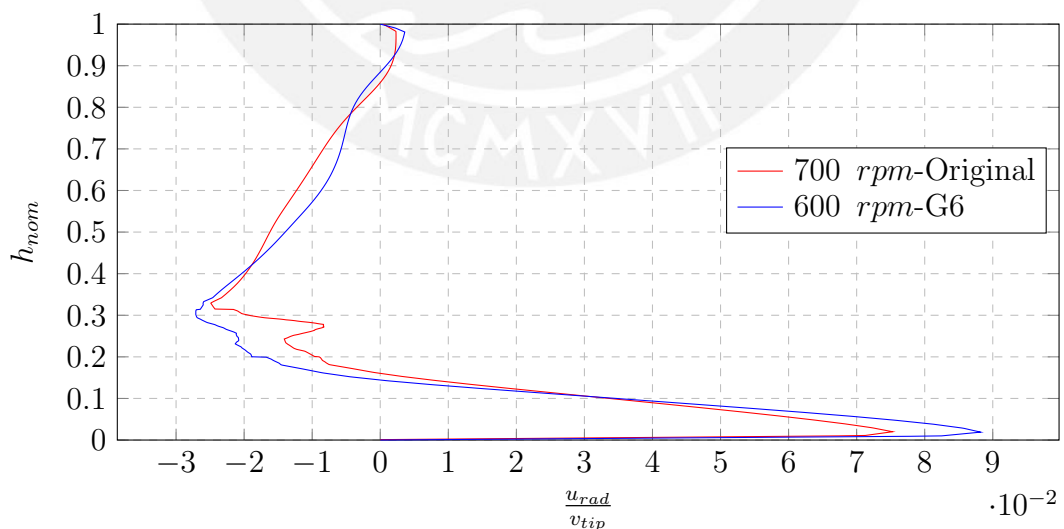


Figura 3.53: Componente radial en función de la altura nominal del tanque.

Fuente: Elaboración propia.

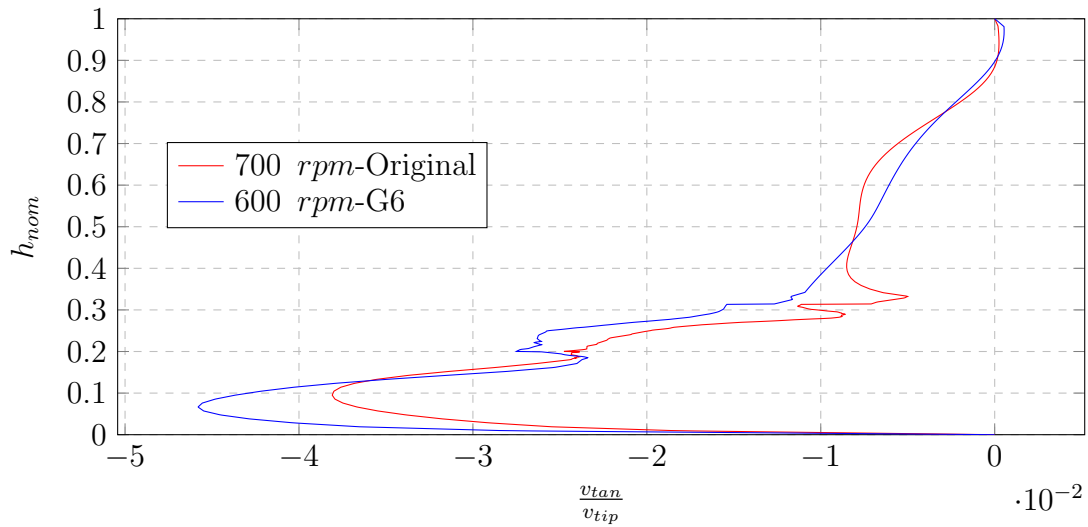


Figura 3.54: Componente tangencial en función de la altura nominal del tanque.
Fuente: Elaboración propia.

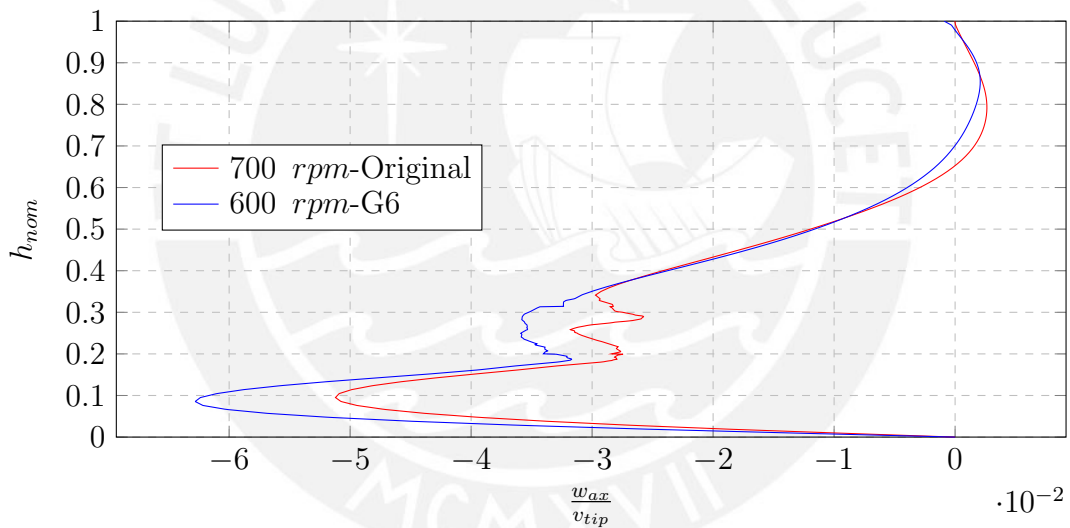


Figura 3.55: Componente axial en función de la altura nominal del tanque.
Fuente: Elaboración propia.

El último caso que se compara es aquel donde el consumo de potencia de ambos impulsores es el mismo. Ello se da cuando ambos trabajan a una velocidad de rotación de 200 *rpm*. En este caso, de igual manera que en los anteriores, se aprecia una mejor distribución de vectores de velocidad en el tanque agitador por parte del impulsor G6.

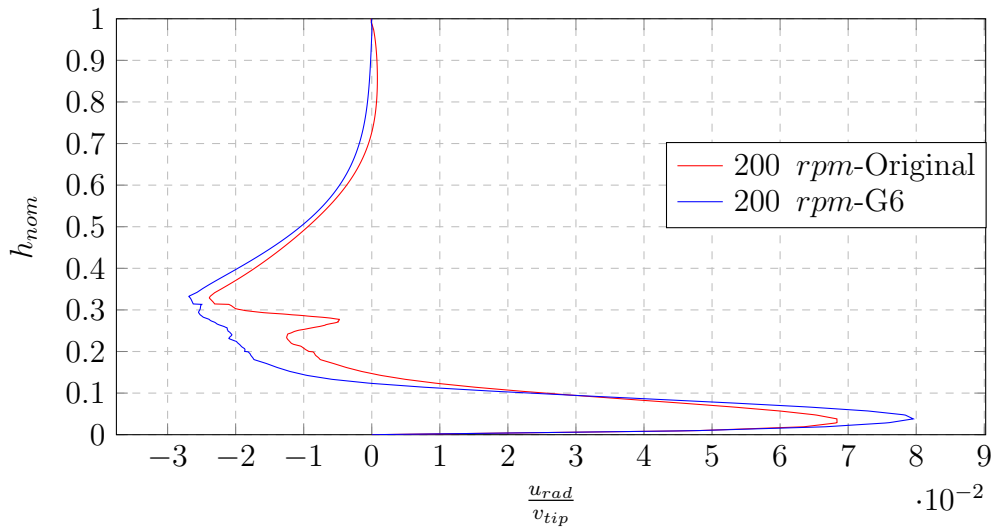


Figura 3.56: Componente radial en función de la altura nominal del tanque.
Fuente: Elaboración propia.

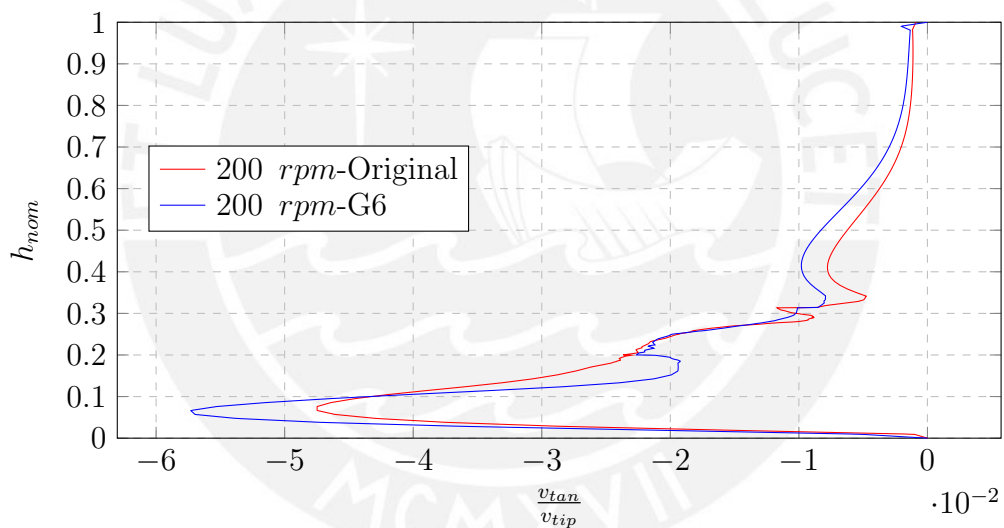


Figura 3.57: Componente tangencial en función de la altura nominal del tanque.
Fuente: Elaboración propia.

Como se ha presentado, el impulsor G6 tiene un mejor desempeño, ya que la magnitud de las componentes de los vectores es mayor tanto en la base como en la zona central del tanque agitador. Si bien se trabaja en mezcla homogénea, este resultado indica que cuando se trabaje con sólidos en suspensión, al tener mayor magnitud de vectores de velocidad en la zona inferior y central por parte del impulsor G6, la suspensión producida será mejor.

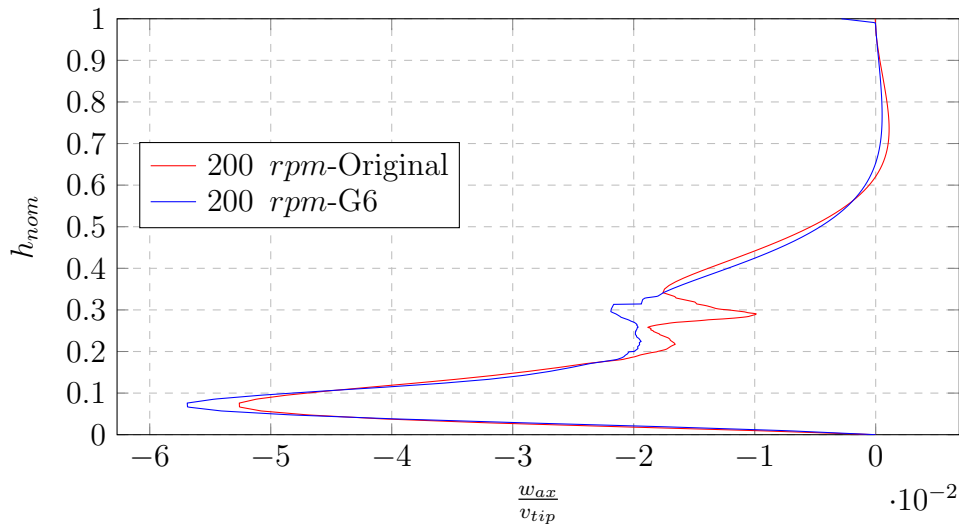


Figura 3.58: Componente axial en función de la altura nominal del tanque
 Fuente: Elaboración propia

Energía cinética turbulenta

Finalmente, como último indicador de desempeño, se compara la dispersión de la energía cinética turbulenta dentro del tanque agitador. Para ello, en la figura 3.59 se compara el valor de la energía cinética turbulenta desde la base hasta el tope superior del tanque, donde se aprecia que para el impulsor G6, la magnitud de energía en la parte inferior del tanque es superior al impulsor original. Además, cerca de la punta del álabe la energía cinética es mayor en una zona con rango superior.

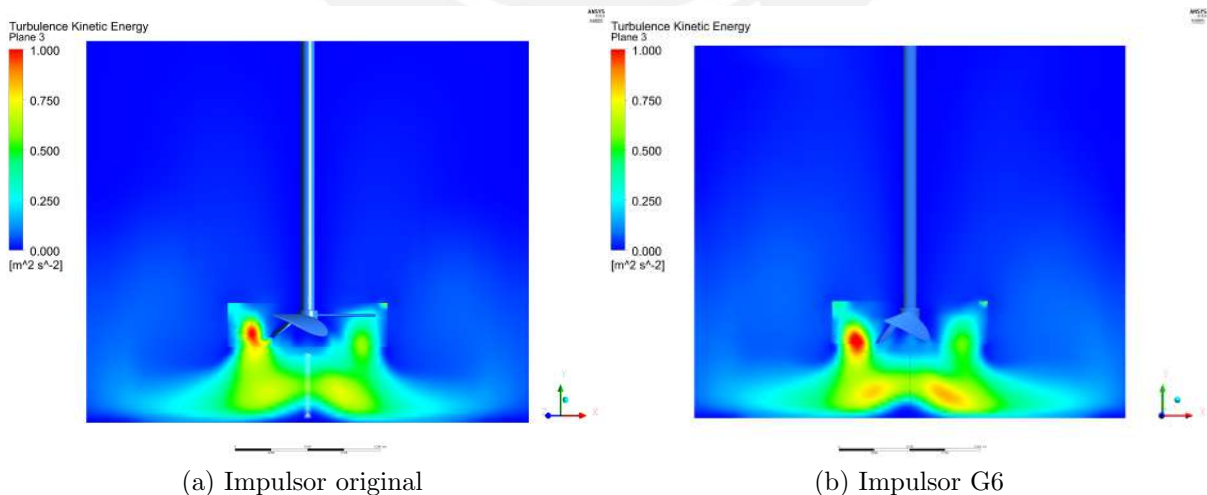
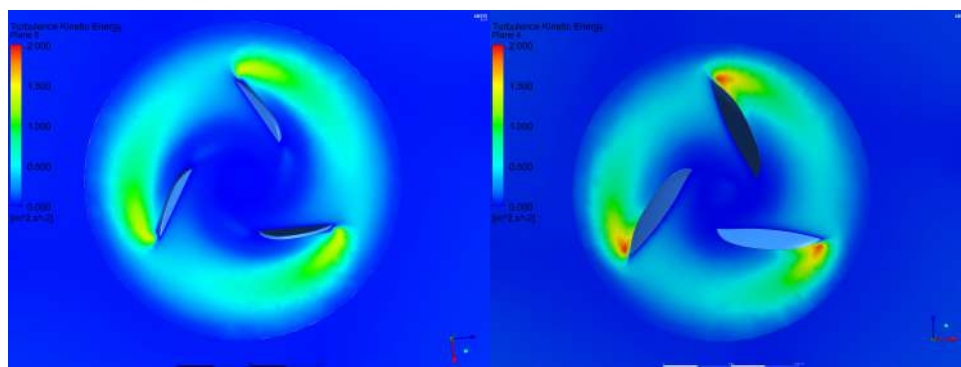


Figura 3.59: Energía cinética turbulenta.

Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, se presenta un plano de corte en la parte inferior de los impulsores en la figura 3.60, donde se presenta la energía cinética turbulenta en las puntas de los álabes de ambos impulsores. De igual manera como ocurrió en la figura 3.59, la energía es mayor en las puntas de los álabes del impulsor G6.

Todo ello, si bien los resultados son en una aplicación con mezcla homogénea, implica que para una operación en partículas en suspensión, el impulsor G6 tendrá mejores resultados en comparación con el impulsor original.



(a) Impulsor original

(b) Impulsor G6

Figura 3.60: Energía cinética turbulenta debajo de impulsores.

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO 4

EVALUACIÓN DE IMPULSOR ORIGINAL Y VERSIÓN MEJORADA EN SUSPENSIÓN DE SÓLIDOS

Luego de haber analizado las modificaciones a los álabes del impulsor original y evaluado las propuestas de mejora G3 y G6 frente al impulsor original, al final del capítulo 3 se obtuvieron resultados en los que el impulsor G6 tenía mejor desempeño que el impulsor original bajo la operación en mezcla homogénea.

En complemento a ello, en el presente y último capítulo se desarrolla la evaluación y comparación del impulsor G6 y original bajo la condición de sólidos en suspensión. En esta evaluación las partículas sólidas se encontrarán inicialmente en la parte inferior del tanque y durante el proceso de agitación y mezcla serán suspendidas hasta lograr un estado de suspensión completo. Por ello, fue necesario emplear modelos de flujo multifásico y de turbulencia que permitan predecir de forma aproximada la suspensión de las partículas dentro del tanque.

Finalmente, para llevar a cabo la comparación entre ambos impulsores, se utilizaron indicadores de desempeño como el nivel de suspensión de partículas en el tanque agitador y la dispersión de la energía cinética turbulenta durante la operación.

4.1 Descripción de la condición de operación

En este capítulo ya no se trabaja con una mezcla homogénea, sino con las fases que la componen, como agua y sulfato de cobre. Con este cambio se evaluará el nivel de suspensión de sólidos y potencia requerida por cada impulsor. Las propiedades de las fases dentro del tanque se presentan en la tabla 4.1.

Tabla 4.1: Propiedades de las fases

	Parámetro	Magnitud	Unidades
Fase líquida	Densidad de líquido	1000	$\text{Kg}\cdot\text{m}^{-3}$
	Viscosidad dinámica	0.0011	Pa.s
Fase sólida	Densidad de sólido	2700	$\text{Kg}\cdot\text{m}^{-3}$
	Diámetro de partícula	74	$\mu\cdot\text{m}$

Fuente: Elaboración propia

En la figura 4.1 se presenta la condición inicial de operación del proceso de agitación que se desarrollará dentro del tanque. Para esta condición se mantiene el tanque agitador expuesto al ambiente por la parte superior y, a diferencia de trabajar con mezcla homogénea, se tienen sólidos sedimentados en la parte inferior del tanque con una concentración de masa de 61%. Asimismo, se cuenta con un nivel de agua hasta la altura de 517 mm. Bajo esta condición de operación fue posible analizar los estados de suspensión de partículas presentados en el capítulo 1, sección 1.2.4

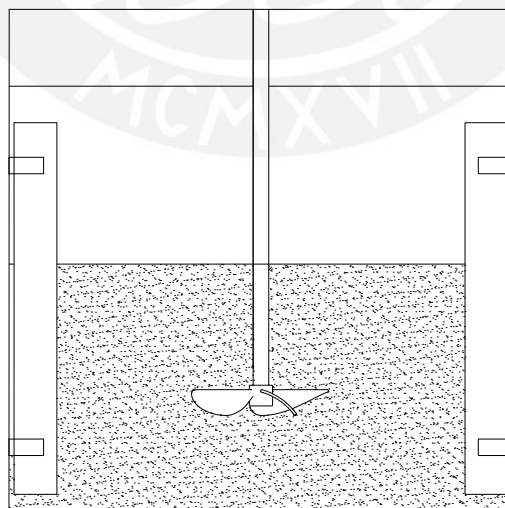


Figura 4.1: Estado inicial de proceso de agitación con partículas.

Fuente: Elaboración propia.

4.2 Modelos matemáticos para la suspensión de sólidos

En cuanto a la etapa de simulación, se utilizó el modelo de flujo multifásico Euleriano, ya que modela dispersión de energía cinética turbulenta entre estructuras turbulentas y partículas sólidas, prediciendo de manera más eficaz el comportamiento de las partículas durante la operación del impulsor.

Por otra parte, el modelo de turbulencia que se utilizó fue el $\kappa\text{-}\omega$ SST. Mientras que para el esquema numérico se empleó el acoplado, junto con ecuaciones de interpolación Quick para las ecuaciones de momento y de segundo orden *Upwind* para las ecuaciones de turbulencia.

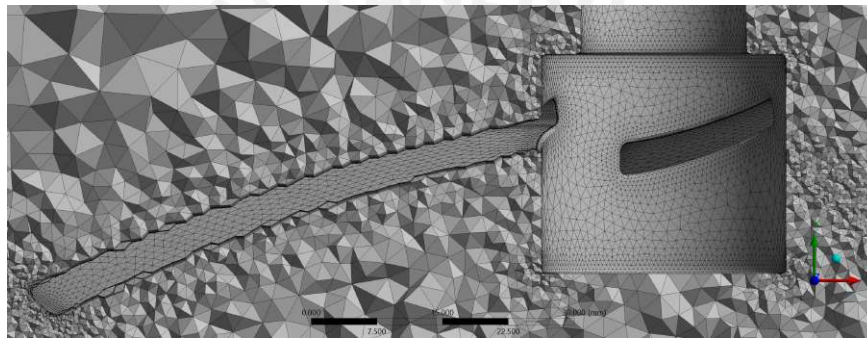


Figura 4.2: Detalle de malla de impulsor original.

Fuente: Elaboración propia.

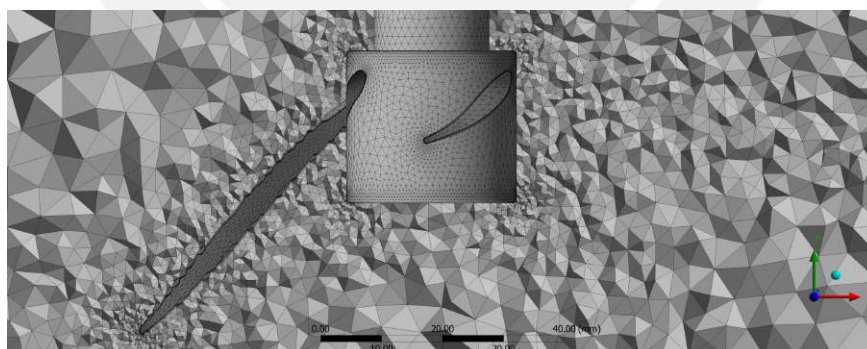


Figura 4.3: Detalle de malla de impulsor G6.

Fuente: Elaboración propia.

4.3 Evaluación de impulsores en suspensión de sólidos

Uno de los indicadores de desempeño para realizar una correcta comparación de impulsores en el presente capítulo es el nivel de suspensión de partículas y la potencia requerida.

Siguiendo con la metodología de comparación empleada en el capítulo anterior, en este capítulo se comparan el impulsor original y el impulsor G6 bajo la condición de igual consumo de potencia. Cabe mencionar que si bien la condición inicial de operación implica tener partículas en la parte inferior del tanque, el objetivo del proceso de mezcla y agitación es formar un nivel de suspensión completo entre la fase líquida y fase sólida.

De los resultados obtenidos en el capítulo 3, se obtiene que el impulsor original tiene un consumo de 67.54 W operando a una velocidad de rotación de 500 rpm . A partir de ello y los resultados de la tabla 3.8, se calcula a qué velocidad de operación el impulsor G6 consume la misma potencia, obteniendo como resultado una velocidad de 450 rpm . Ello último también se presenta en la siguiente figura de velocidad de operación versus potencia consumida.

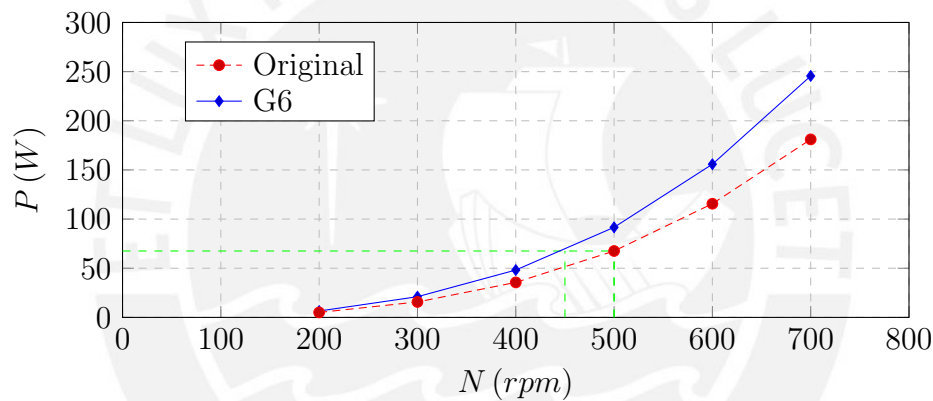


Figura 4.4: Potencia en función de la velocidad de giro de impulsor.

Fuente: Elaboración propia.

A partir del mallado definido y los modelos seleccionados en la sección 4.2, así como las velocidades de rotación seleccionadas en esta sección, se realizaron las simulaciones en estado transitorio, logrando de esta manera determinar qué impulsor suspende partículas sólidas más rápido y logra aproximar una mezcla homogénea en menor tiempo. Ambos casos se determinan mediante el análisis de la distribución de partículas en el tiempo.

Los resultados que se presentan a continuación representan el proceso de mezcla y agitación durante 40 segundos de operación de ambos impulsores. Para tener un mayor detalle de la distribución de sólidos durante el proceso, se postprocesaron los resultados cada 1 segundo y se exportaron curvas de fracción volumétrica a diferentes alturas desde la base del tanque, ver figura 4.5.

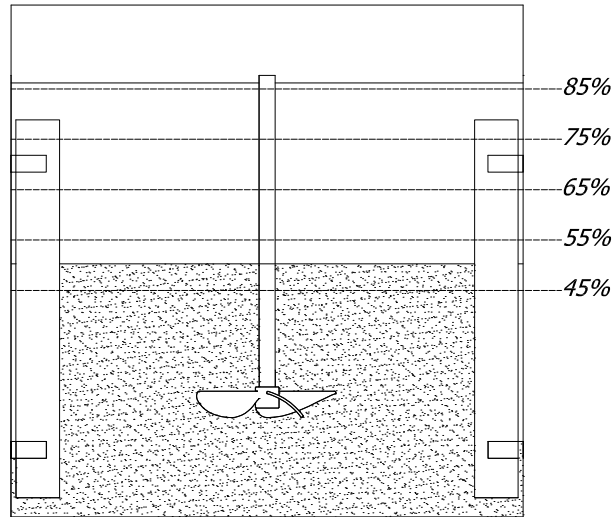


Figura 4.5: Nivel de altura desde base de tanque.

Fuente: Elaboración propia.

A continuación se grafica la variación de la fracción volumétrica promedio de sólidos desde el segundo 0 hasta el 40 en los niveles de altura indicados en la figura 4.5. A partir de estas figuras, obtenemos que para el tiempo de 25 segundos transcurridos, el impulsor G6 ha logrado suspender sólidos y formar una mezcla de 0.4 de fracción volumétrica de sólidos a una altura del 75 % del tanque agitador, mientras que el impulsor original logra este estado aún en el segundo 35.

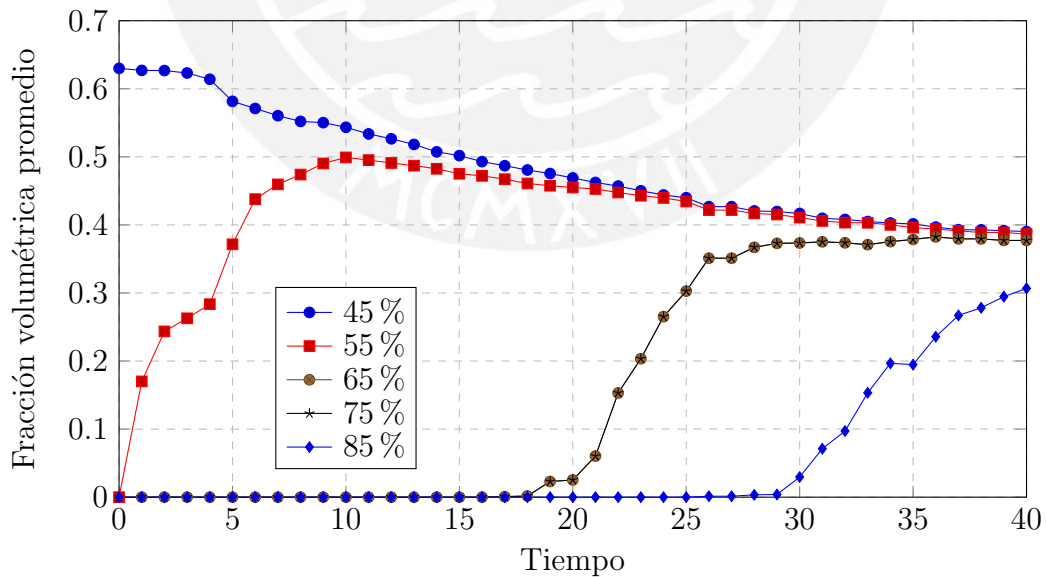


Figura 4.6: Variación de fracción volumétrica promedio-Impulsor original.

Fuente: Elaboración propia.

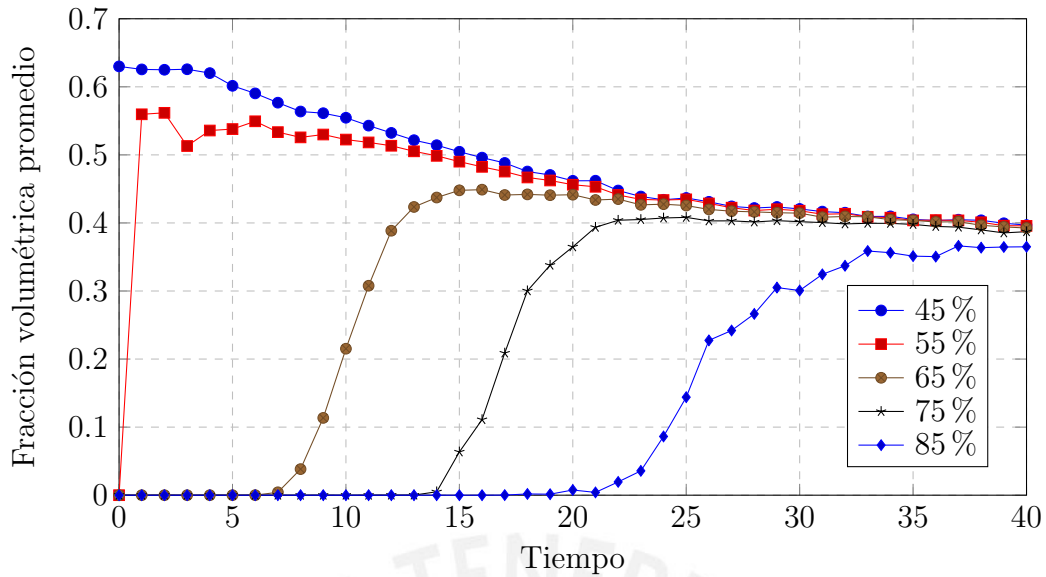


Figura 4.7: Variación de fracción volumétrica promedio-G6.

Fuente: Elaboración propia.

Para tener un mayor detalle de la distribución de sólidos dentro del tanque agitador, se evalúa de forma independiente la variación de fracción volumétrica de los sólidos. En primer lugar, podemos observar que para una altura del 45 % del tanque agitador, donde en el segundo 0 se tiene 0.63 de fracción volumétrica de sólidos, se tiene la misma tendencia de disminución de la fracción volumétrica de sólidos para la operación con ambos impulsores.

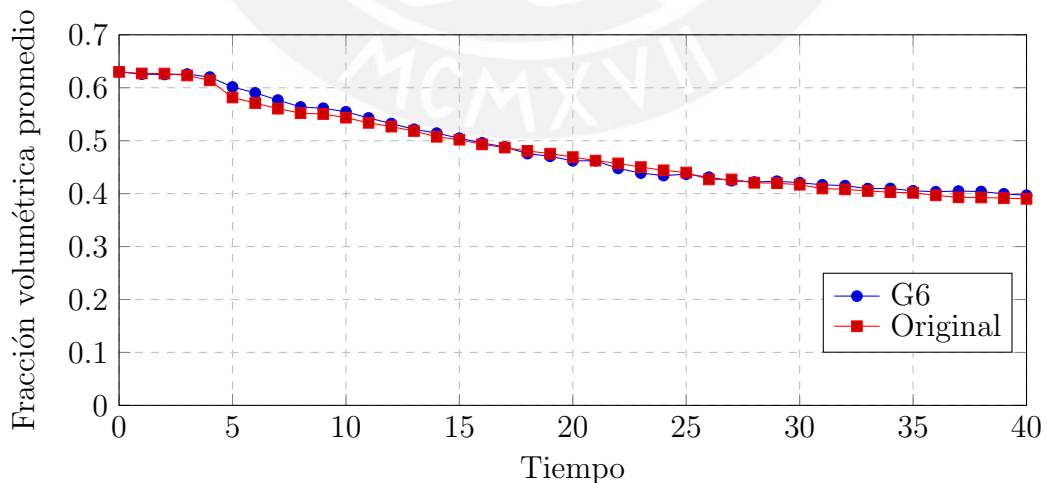


Figura 4.8: Variación de fracción volumétrica promedio-45 % de altura de tanque.

Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, para una altura del 55 % del tanque agitador, ya se comienza a ver la diferencia entre la operación de los impulsores, debido a que para el segundo 5, el impulsor G6 logra suspender y obtener una fracción volumétrica de sólidos de 0.54, mientras que para este mismo tiempo, el impulsor original solo ha logrado un 0.37 de fracción volumétrica.

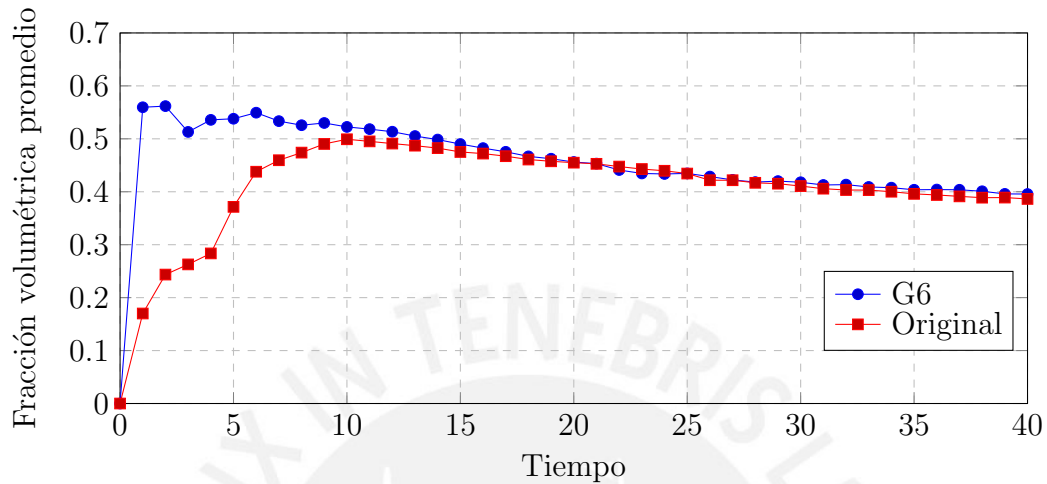


Figura 4.9: Variación de fracción volumétrica promedio-55 % de altura de tanque.

Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a una altura del 65 %, se tiene una mayor diferencia, pues para el impulsor G6 se tiene una fracción volumétrica mayor a 0.2 a partir del segundo 10, mientras que esto se logra con el impulsor original a partir del segundo 24.

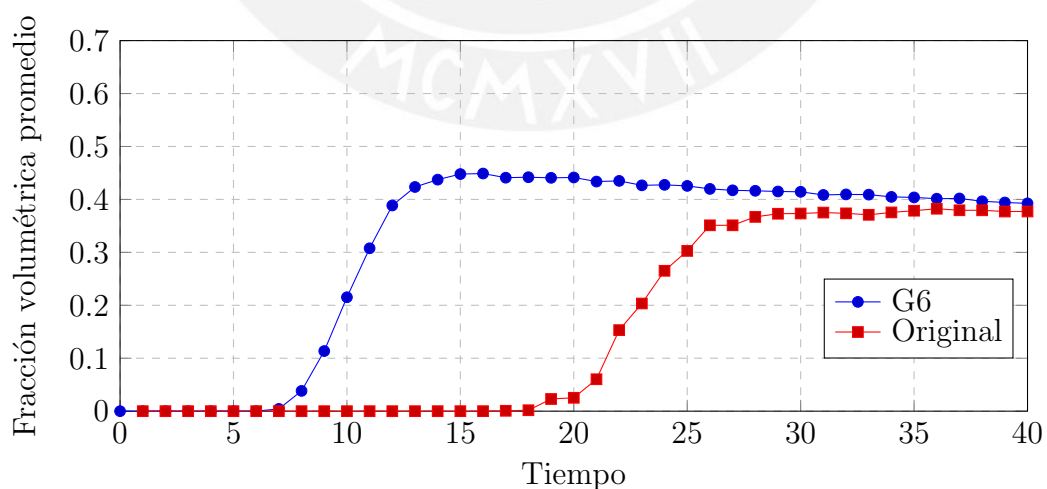


Figura 4.10: Variación de fracción volumétrica promedio-65 % de altura de tanque.

Fuente: Elaboración propia.

Para la altura del 75 % la diferencia en el nivel de suspensión se mantiene, pues se tiene que a partir del segundo 17 la fracción volumétrica es mayor a 0.2 con el impulsor G6, lo cual recién se logra con el impulsor original en el segundo 23.

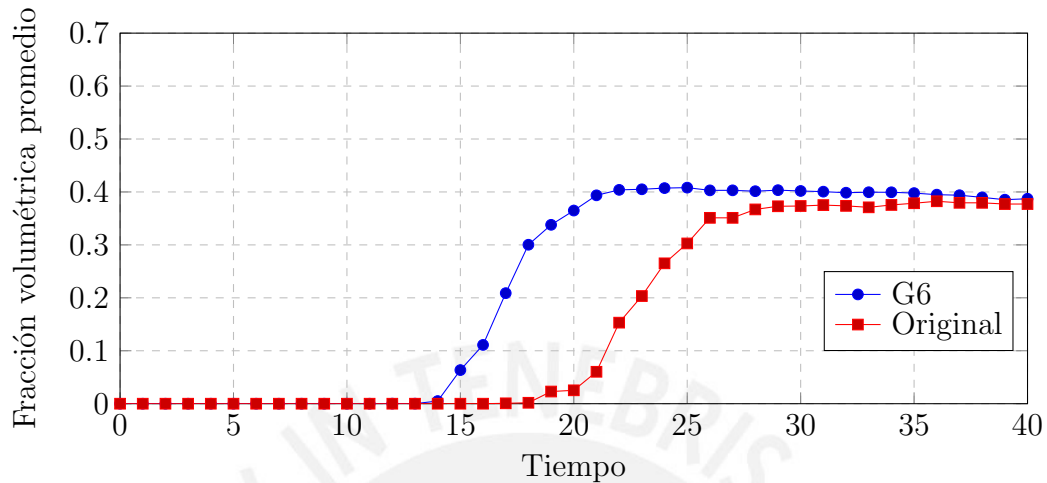


Figura 4.11: Variación de fracción volumétrica promedio-75 % de altura de tanque.
Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, para la altura del 85 %, la cual es la superficie límite entre el agua y el aire, se tiene una fracción volumétrica mayor a 0.3 a partir del segundo 30 durante la operación de impulsor G6, mientras que para la operación del impulsor original se logra recién en el segundo 40.

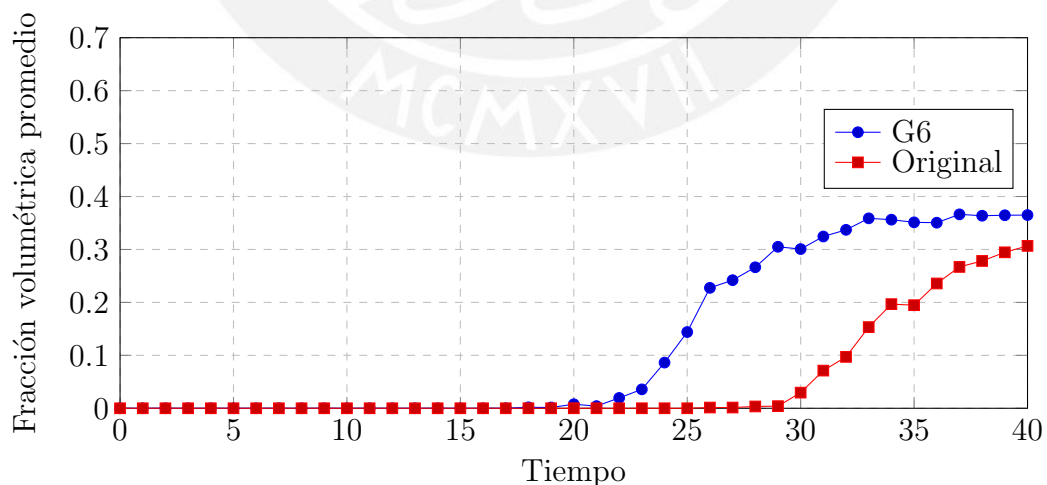


Figura 4.12: Variación de fracción volumétrica promedio-85 % de altura de tanque.
Fuente: Elaboración propia.

Continuando con la evaluación de los impulsores, en las siguientes imágenes se presenta un análisis del plano longitudinal en los tanques agitadores en los segundos 10, 20, 30 y 40 de operación para ambos impulsores y la fracción volumétrica de partículas promedio en todo el tanque. Para los cuatro tiempos de comparación, se aprecia que el impulsor G6 logra un mayor nivel de suspensión, pues presenta sólidos en niveles mayores a los del impulsor original.

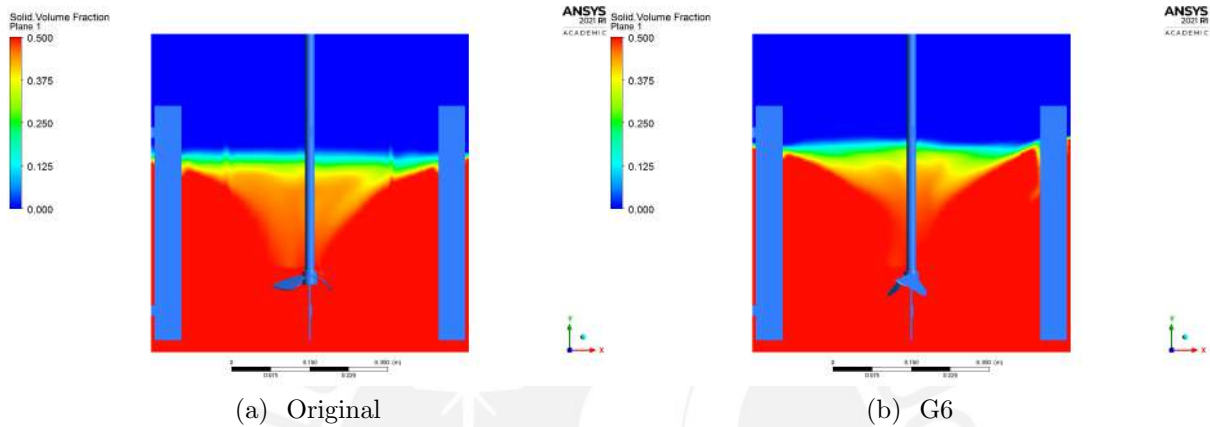


Figura 4.13: Fracción volumétrica de sólidos: 10 seg

Fuente: Elaboración propia

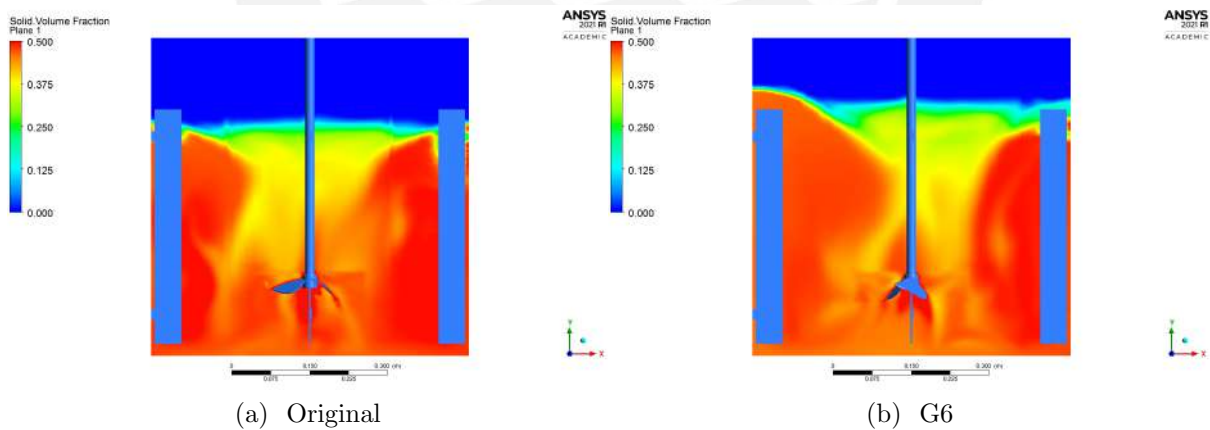


Figura 4.14: Fracción volumétrica de sólidos: 20 seg.

Fuente: Elaboración propia.

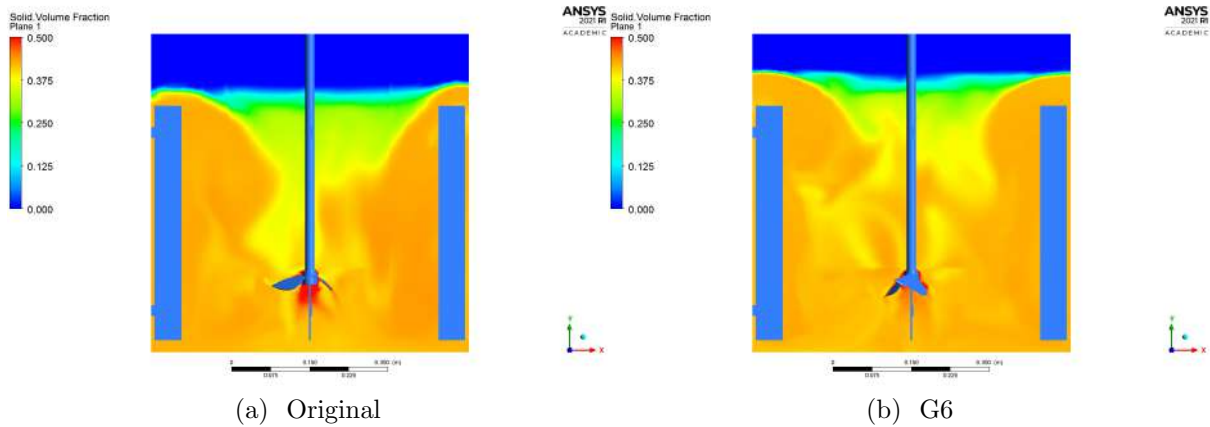


Figura 4.15: Fracción volumétrica de sólidos: 30 seg.

Fuente: Elaboración propia.

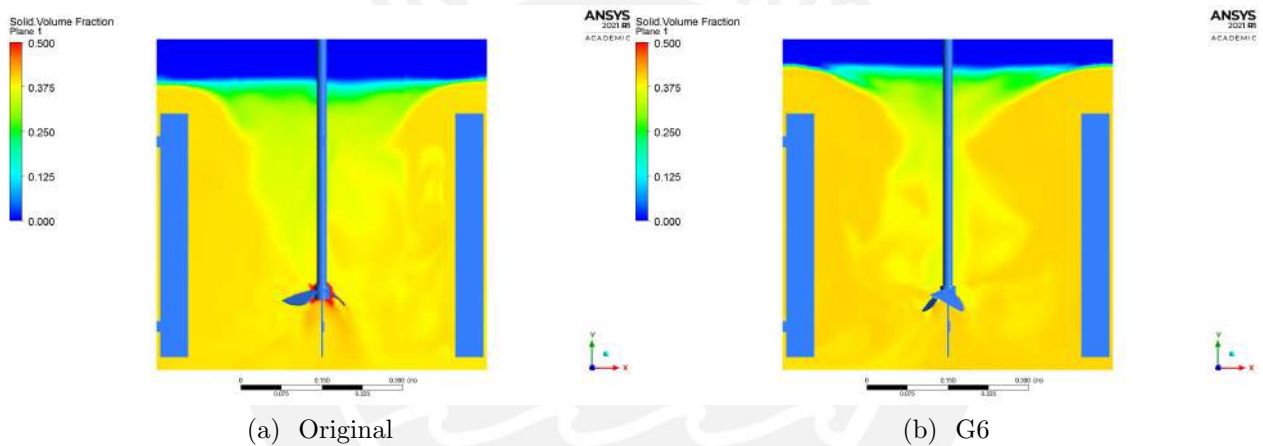


Figura 4.16: Fracción volumétrica de sólidos: 40 seg.

Fuente: Elaboración propia.

Asimismo, para corroborar el mejor nivel de suspensión de sólidos que logra el impulsor G6, en los siguientes figuras se presenta la variación de la fracción volumétrica promedio en el tanque para los cuatro tiempos de operación de las figuras 4.13, 4.14, 4.15 y 4.16. Cabe mencionar que en el eje de las ordenadas, el valor de 1 representa la cara superior del tanque agitador, mientras que el valor 0 representa la base del tanque agitador.

En la figura 4.17, se verifica el mayor nivel de suspensión que logra el impulsor G6 durante los 40 segundos de operación, asimismo se aprecia el efecto del giro de los impulsores a la altura del 25 % del tanque, donde no se tiene una mezcla homogénea. Del mismo modo, se exportaron los valores de fracción volumétrica a una distancia de 102 mm y 204 mm del eje del impulsor, ver figura 4.18 y 4.19.

Para las figuras 4.17, 4.19 y 4.20 la línea punteada en naranja representa el nivel donde se ubica el impulsor y la línea punteada verde representa la fracción volumétrica objetivo.

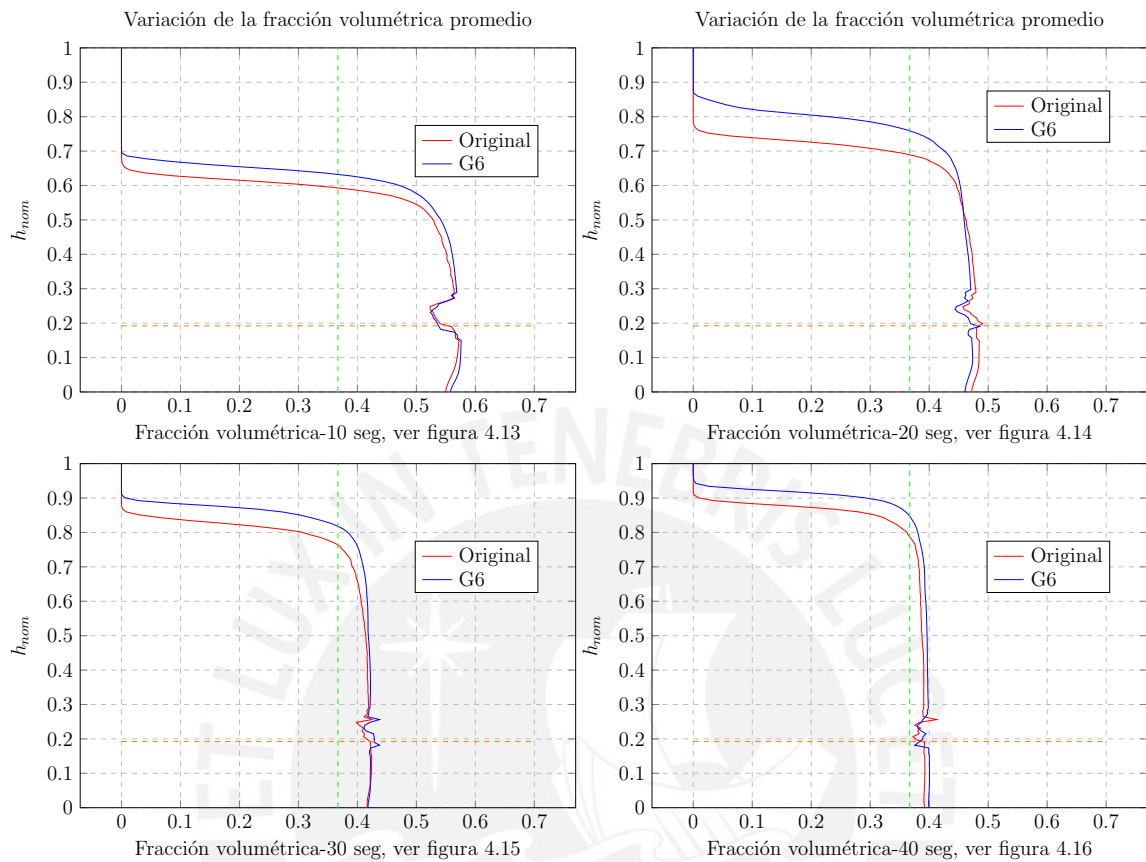


Figura 4.17: Variación de la fracción volumétrica promedio.

Fuente: Elaboración propia.

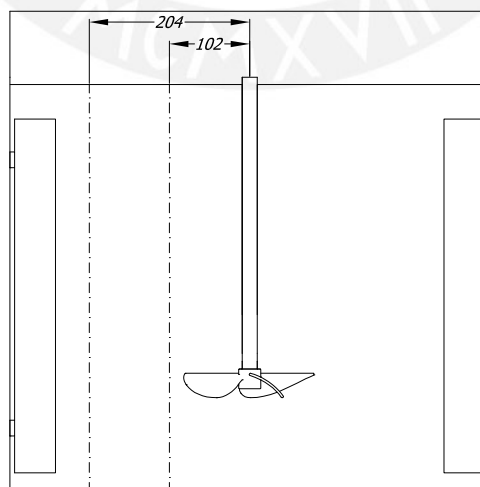


Figura 4.18: Distancia de muestreo paralelo al eje del impulsor.

Fuente: Elaboración propia.

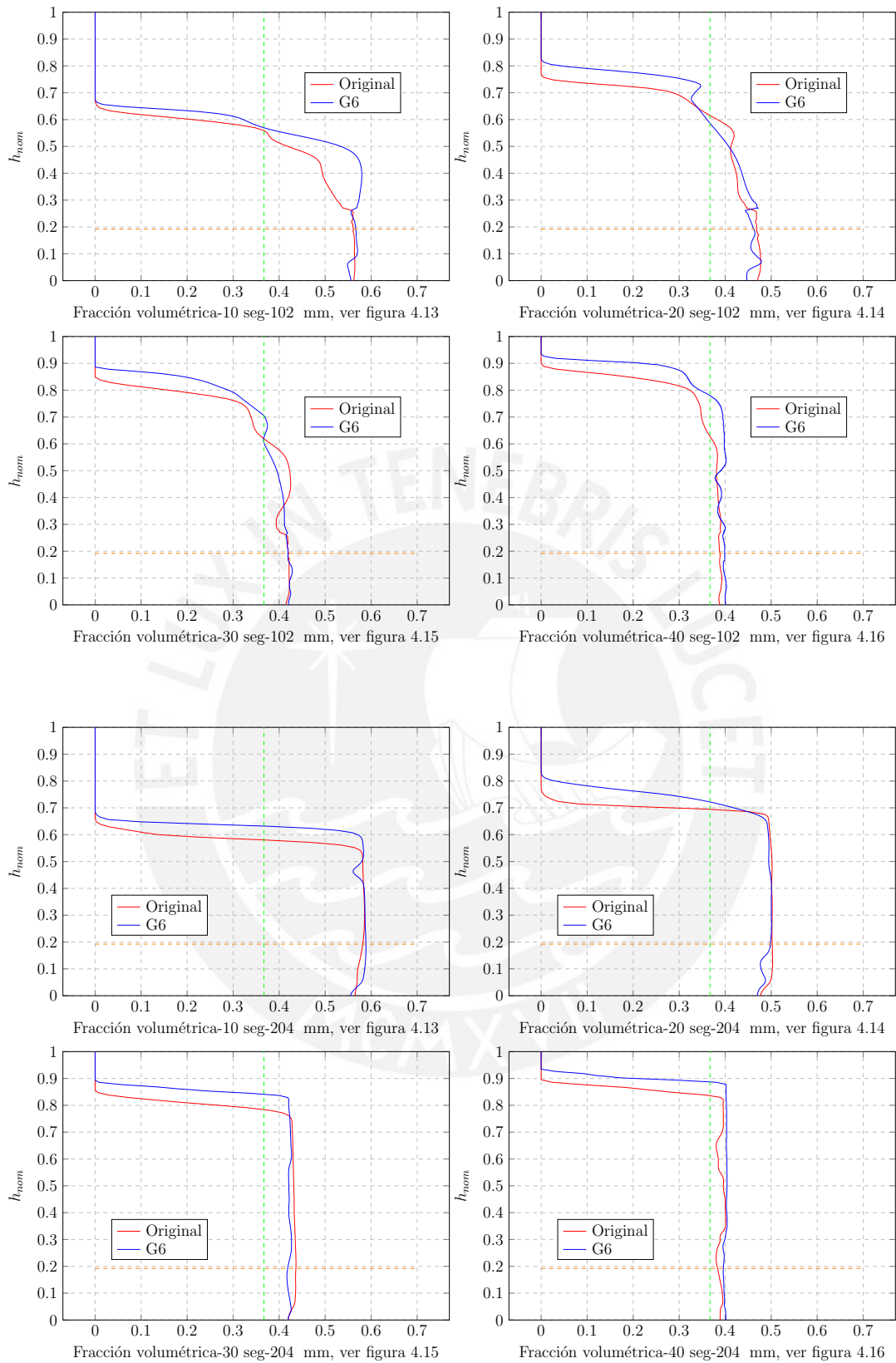


Figura 4.19: Variación de la fracción volumétrica a 102 mm y 204 mm.

Fuente: Elaboración propia.

A continuación se presenta la variación de la fracción volumétrica desde la base de los impulsores hasta base del tanque agitador en 4 tiempos específicos: 10 segundos, 20 segundos, 30 segundos y 40 segundos. Cabe mencionar que en el eje de las ordenadas el máximo valor 1 representa a la base del impulsor, mientras que el valor 0 representa la base del tanque agitador.

De las figuras se observa que durante los primeros 10 segundos se tiene una mezcla homogénea con fracción volumétrica de 0.54 por debajo de ambos impulsores; sin embargo, a partir de los 20 segundos se nota mayor presencia de sólidos bajo el impulsor original, lo cual se debe a los vórtices que se presentaron en la sección 2.4.3.

Por otro lado, la presencia de sólidos es más homogénea debajo del impulsor G6, debido a que cuenta con una reducción en la formación de vórtices en la parte inferior del cubo. Como resultado, se da un incremento en magnitud de los vectores de velocidad y logra mover mayor cantidad de sólidos. Finalmente, conforme van aumentando el tiempo de operación, se llega a apreciar que ambos impulsores logran homogeneizar la mezcla debajo de ellos.

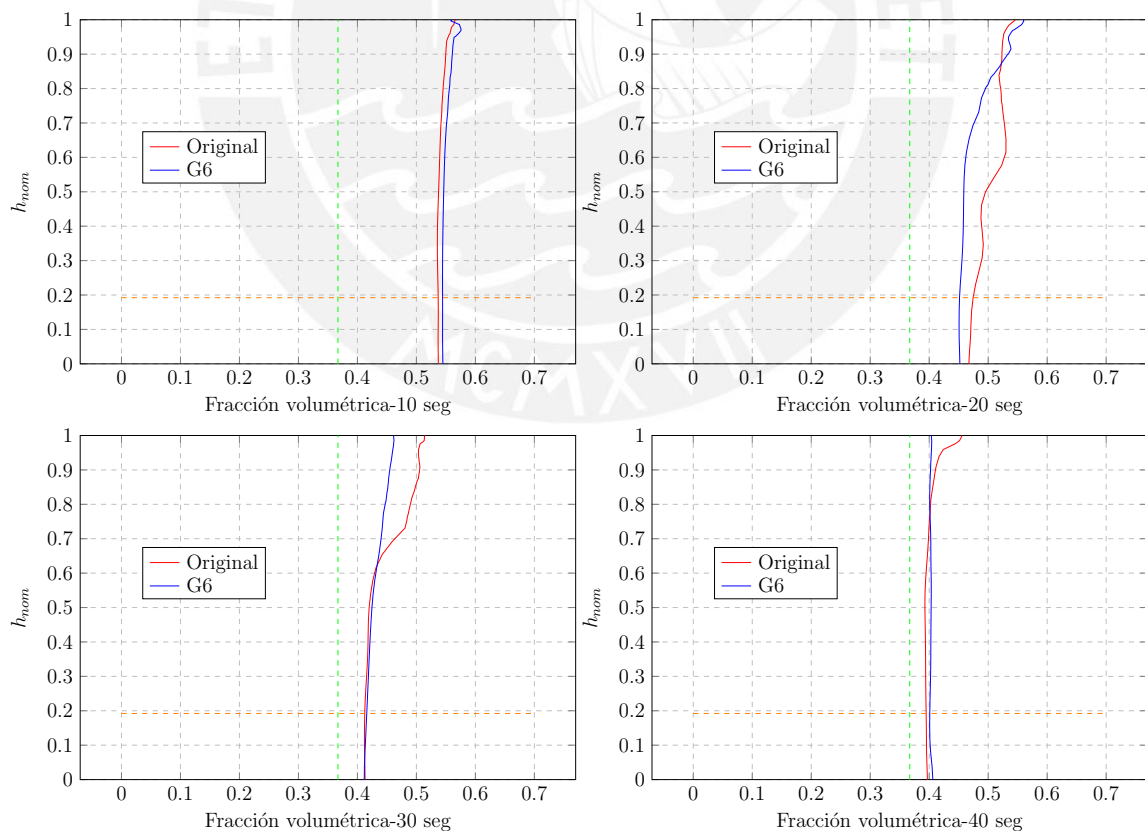


Figura 4.20: Variación de la fracción volumétrica debajo del impulsor.

Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, para tener una mejor idea de cómo varían los sólidos de forma radial dentro del tanque, a continuación se presentan curvas de variación de fracción volumétrica de sólidos en las alturas de 5 %, 21 % y 85 %.

Para la altura del 5 %, la cual es cercana de la base del tanque agitador, se tiene que para la operación de ambos impulsores durante el segundo 40 la fracción volumétrica es constante y tiene un valor de 0.4 para el impulsor original y 0.39 para el impulsor G6.

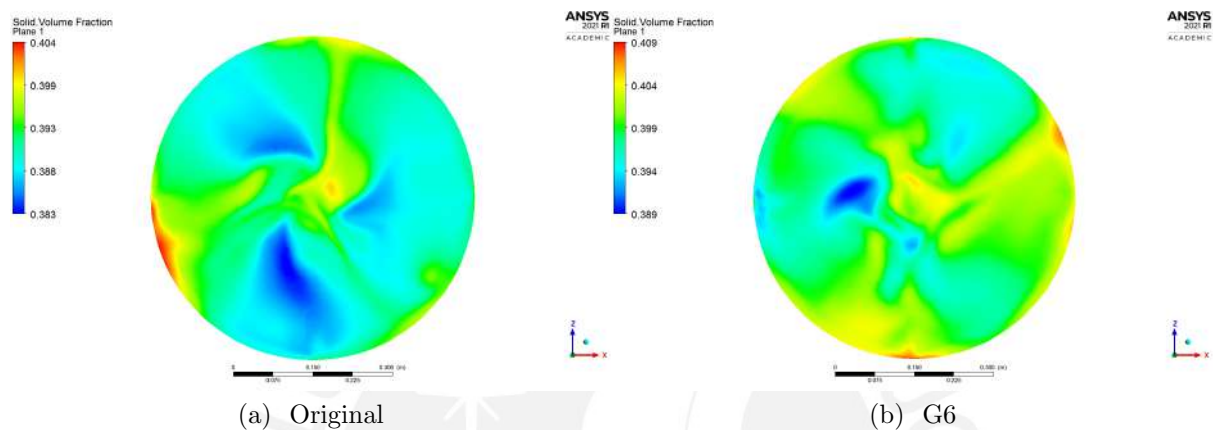


Figura 4.21: Fracción volumétrica en plano transversal a una altura del 5 % desde la base del tanque agitador.

Fuente: Elaboración propia.

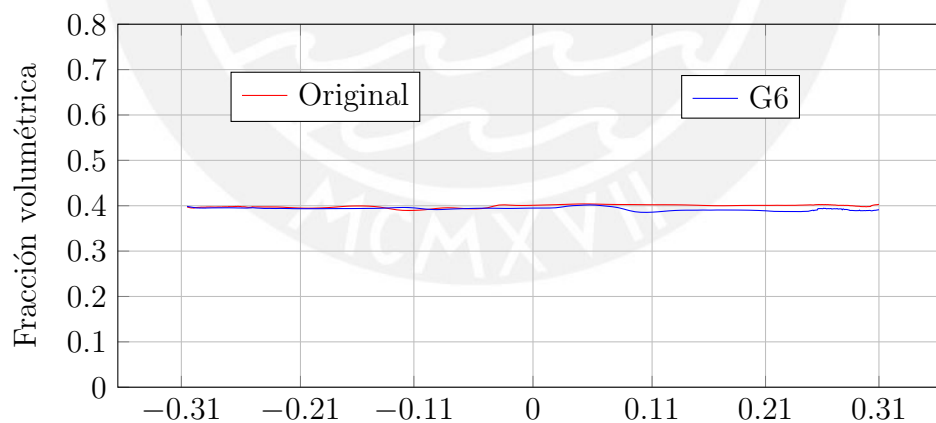


Figura 4.22: Variación de fracción volumétrica de sólidos en coordenada radial al 5 % de altura del tanque.

Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, para la altura del 21 %, la cual es la parte baja de la base del impulsor, se confirma la mayor presencia de sólidos debajo del impulsor original. Esto debido a la formación de vórtices, lo cual genera una recirculación de sólidos en esa zona.

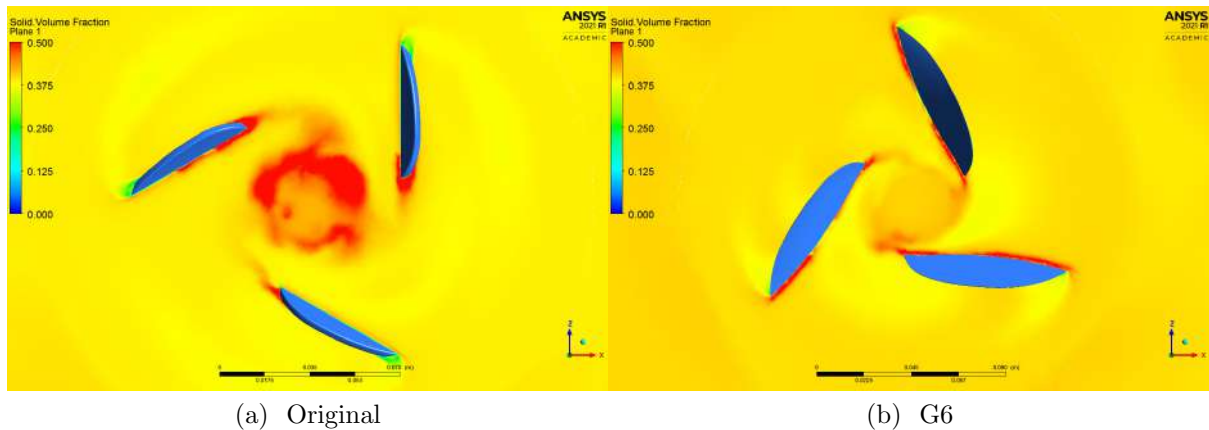


Figura 4.23: Fracción volumétrica en plano transversal a una altura del 21 % desde la base del tanque agitador.

Fuente: Elaboración propia.

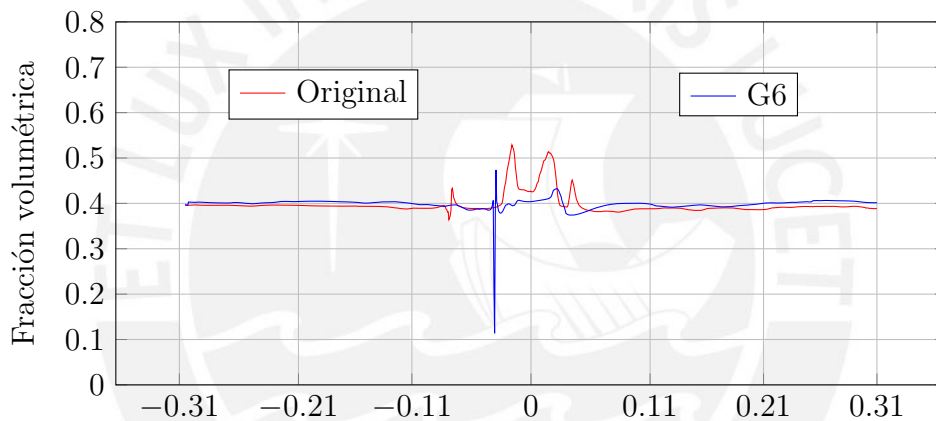


Figura 4.24: Variación de fracción volumétrica de sólidos en coordenada radial al 21 % de altura del tanque.

Fuente: Elaboración propia.

De igual manera, para una altura del 85 %, se verifica que la mezcla formada por el impulsor original es baja en contenido de sólidos, pues solo en los bordes del tanque llega a alcanzar 0.4 de fracción volumétrica de sólidos y en la zona central tiene un promedio de 0.2. Caso contrario ocurre con el impulsor G6, el cual tiene un promedio de 0.354 de fracción volumétrica de sólidos a esta altura.

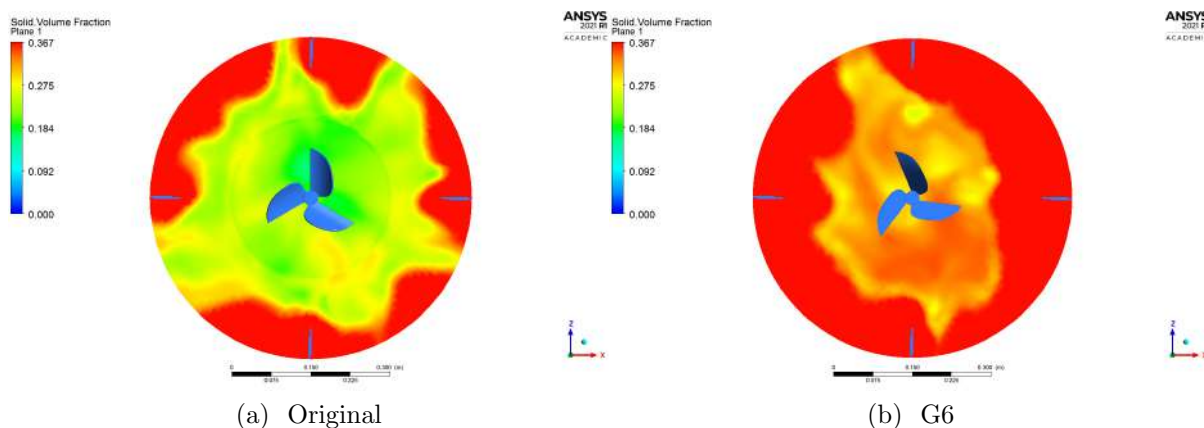


Figura 4.25: Fracción volumétrica en plano transversal a una altura del 85 % desde la base del tanque agitador.

Fuente: Elaboración propia.

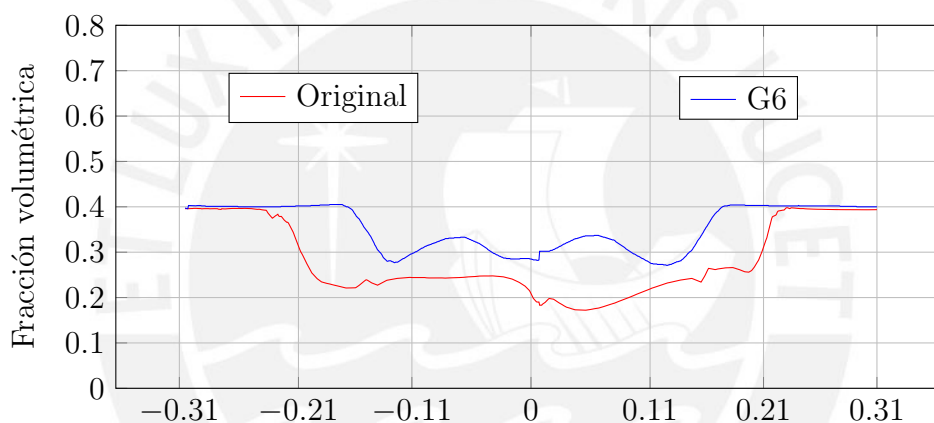


Figura 4.26: Variación de fracción volumétrica de sólidos en coordenada radial al 85 % de altura del tanque.

Fuente: Elaboración propia.

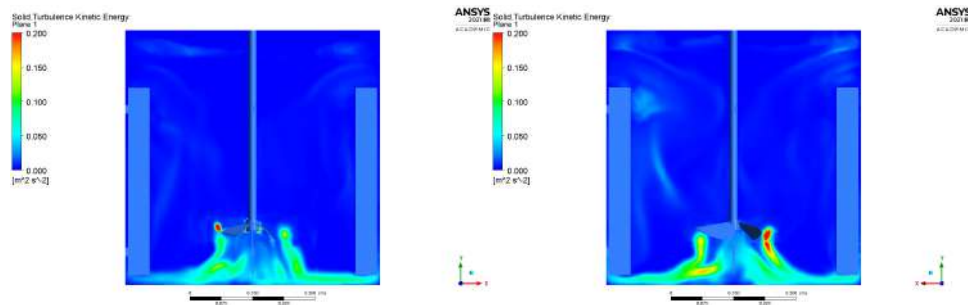
Finalmente, como último indicador de desempeño para el caso de suspensión de sólidos, se evalúa la dispersión de energía cinética turbulenta, siendo esta un indicador de calidad de mezcla que se forma dentro del tanque.

En la figura 4.28 se muestra una sección a una altura que coincide con la base del impulsor. En ella se obtiene los valores de la energía cinética turbulenta para ambos impulsores, siendo la mayor diferencia en las puntas de los álabes y en la base de cada impulsor.

Por un lado, se aprecian los efectos negativos de la formación de vórtices debajo del impulsor original, ya que la magnitud de la energía en esos puntos es menor en un mayor área en comparación con el impulsor G6; como consecuencia de ello, es que se produce la

acumulación de sólidos debajo del impulsor original, ver figuras de variación de fracción volumétrica debajo de impulsores presentado líneas arriba.

Por otro lado, en la puntas de los álabes del impulsor G6 se cuenta con mayor energía cinética turbulenta, lo cual se justifica con el incremento en la magnitud de los vectores de velocidad durante la operación.

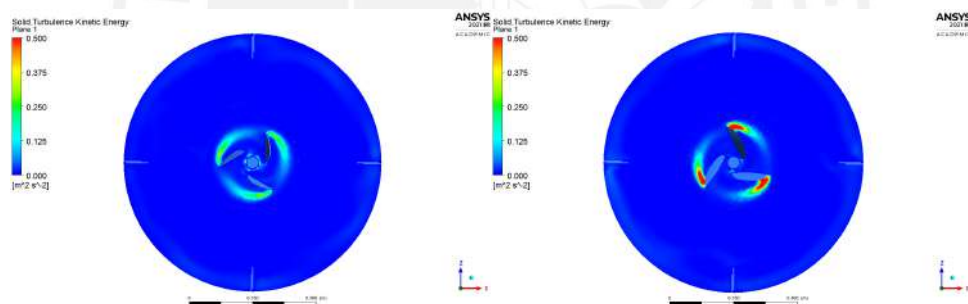


(a) Original

(b) G6

Figura 4.27: Dispersión de la energía cinética turbulenta

Fuente: Elaboración propia



(a) Original

(b) G6

Figura 4.28: Dispersión de la energía cinética turbulenta debajo de impulsores a una altura del 5% desde la base del tanque

Fuente: Elaboración propia.

Conclusiones

Mediante el presente documento de tesis se ha evaluado el funcionamiento de un impulsor *hydrofoil* original y tres propuestas de mejora (G1, G3 y G6) en una mezcla de agua y sulfato de cobre mediante la dinámica de fluidos computacional. El detalle de las características y principales diferencias entre los impulsores se presenta en la tabla 4.2.

Tabla 4.2: Características de impulsores evaluados.

Impulsor	Sección de álabes	Ángulo de paso	Ángulo de inclinación	Cantidad de álabes	Tipo de impulsor
Original	Rectangular rolada	Constante	90°	3	Hydrofoil
G1	Perfil NACA 4412	Constante	90°	3	Hydrofoil
G3	Perfil NACA 4412	Variable	105°	3	Hydrofoil
G6	Perfil NACA 4412	Variable	105°	3	Hydrofoil

Fuente: Elaboración propia.

Para la evaluación, se empleó el software Ansys Fluent e indicadores de desempeño como la potencia consumida, dispersión de partículas y el flujo másico axial, entre otros. De forma preliminar se evaluaron a los impulsores en un modelo de mezcla homogénea de las fases de trabajo, mientras que luego se evaluaron para el caso de sólidos en suspensión. Como parte de la evaluación en mezcla homogénea, se utilizaron indicadores de desempeño como el número de potencia, número de caudal, líneas de corriente, distribución de vectores de velocidad y dispersión de energía cinética turbulenta. Como principal resultado de esta evaluación preliminar, se identificó una formación de vórtices debajo del cubo y álabes del impulsor original, cuya consecuencia es el bajo flujo axial generado y la pérdida del patrón de flujo en comparación con las propuestas de mejora. Por otro lado, para la propuesta de mejora G6, se obtuvo que esta logra generar mayor cantidad de flujo axial con un menor consumo de potencia, asimismo tiene una mayor dispersión de energía cinética turbulenta junto con mayor magnitud de vectores de velocidad en la parte inferior del tanque.

Finalmente, en cuanto al caso de suspensión de sólidos, se evaluaron los impulsores original y G6, este último tuvo mejor desempeño que las otras propuestas de mejora en mezcla homogénea. Para esta evaluación se utilizó la distribución de partículas y la dispersión de energía cinética turbulenta dentro del tanque agitador como indicador de desempeño.

Los resultados obtenidos indican que la propuesta de mejora G6 logra una mejor distribución de sólidos dentro del tanque en 19 segundos de operación, logrando así un mejor desempeño para esta aplicación. Asimismo se identifica la formación de vórtices debajo del impulsor original que genera mayor acumulación de sólidos debajo del cubo y produciendo una mezcla no uniforme dentro del tanque. Teniendo en cuenta estos resultados se determina que la propuesta de mejora G6 tiene mejor desempeño frente al impulsor original tanto en mezcla homogénea como en el caso de suspensión de sólidos, ver tabla resumen 4.3.

Tabla 4.3: Desempeño de impulsores evaluados.

Impulsor	Velocidad de operación (rpm)	Potencia requerida (W)	Tiempo requerido para homogenizar mezcla (seg)
Original	500	67.54	33
G6	450	67.54	mayor de 40

Fuente: Elaboración propia.

1. El cambio de la sección constante del álabe del impulsor original por el perfil aerodinámico NACA 4412 incrementa el flujo másico axial generado por el nuevo impulsor G1 en un 6.02 %, debido al aumento en la fuerza de sustentación durante la operación, ver tabla 3.3. Asimismo, cabe mencionar que el incremento del flujo másico axial se origina sin requerimiento de potencia adicional apreciable.
2. Si bien con el cambio de sección por el perfil aerodinámico NACA 4412 se obtiene un incremento en flujo másico sin requerir mayor potencia por parte del impulsor G1, aún se mantiene el problema de la formación de vórtices debajo del impulsor y presenta un patrón de flujo que no es completamente axial, ver figura 3.15. Asimismo, estos problemas seguirán presente, puesto que el impulsor G1 cuenta con ángulo de paso constante en sus álabes, tal como indican autores como Fentiman en [Fentiman et al., 1998] y Jirout [Jirout and Rieger, 2011].
3. Mediante la torsión e inclinación de los álabes que presentan las propuestas de mejora G6 y G3 se obtiene como principal resultado, en la operación en mezcla homogénea, la reducción de vórtices debajo del impulsor. Como consecuencia de ello, en comparación con los resultados del impulsor original, se da un incremento máximo del flujo másico axial hasta 69.86 kg/s para el impulsor G6 (este incremento

representa 13.14 %) y 108.09 kg/s para el impulsor G3 (este incremento representa 74 %); sin embargo, también incrementa el torque requerido hasta 3.54 $N \cdot m$ para el impulsor G6 (este incremento representa 35.62 %) y 4.31 $N \cdot m$ para el impulsor G3 (este incremento representa 74.49 %), ver tabla 3.6.

4. La formación de vórtices debajo del impulsor original durante la operación en mezcla homogénea afecta directamente al patrón de flujo axial formado. Al reducir la formación de estos vórtices, mediante la modificación de los álabes del impulsor, se obtiene una mejora en el patrón de flujo axial, logrando un modelo de circulación del fluido paralelo al eje de giro, tal como se aprecia en la figura 3.44 donde se compara con el impulsor G6.
5. La diferencia en la torsión de los álabes entre los impulsores G6 y G3 yace en que este último presenta un ángulo de paso cerca del cubo mayor en 10° , mientras que el ángulo de paso en la punta del álabe se mantiene igual para ambos casos. De ello último se obtiene que tanto el flujo másico axial como el torque requerido por la operación para el impulsor G3 es 108.09 kg/s y 4.31 $N \cdot m$, mientras que para el impulsor G6 es 69.86 kg/s y 3.54 $N \cdot m$, ver tabla 3.6.
6. Si bien el impulsor G6 tiene mayor flujo másico y potencia requerida para una misma velocidad de operación del impulsor original, ver tabla 3.8, a igualdad de potencia consumida, el impulsor G6 ofrece mayor flujo másico. ver figura 3.43.
7. En la evaluación de los impulsores original y G6 en el caso de sólidos en suspensión se obtiene que debajo del impulsor original existe acumulación de sólidos, ver figura 4.20. Esto es debido a la recirculación de sólidos originada por los vórtices que se forman debajo de este impulsor. En cambio durante la operación del impulsor G6 esta zona se encuentra libre de acumulación de sólidos.
8. El impulsor G6 logra un mayor nivel de suspensión de sólidos que el impulsor original desde los 5 segundos de operación a distintas alturas evaluadas en el capítulo 4, ver figuras 4.6 y 4.7. Esto ocurre debido a la mayor dispersión de la energía cinética turbulenta que genera el impulsor G6; además el desempeño del impulsor original se ve afectado por la formación de vórtices y recirculación de sólidos en la parte inferior del cubo.

9. La evaluación de los impulsores original y G6 en mezcla homogénea simplifica el costo computacional de la simulación, porque permite determinar el desempeño de ambos impulsores de forma preliminar. Sin embargo, mediante la evaluación en suspensión de sólidos se obtiene con mejor detalle el desempeño superior del impulsor G6 con respecto al impulsor original, porque se verifica el mejor nivel de suspensión que logra el impulsor G6 en menor tiempo de operación.
10. En el capítulo 4 se evalúan los impulsores original y G6 en el caso de suspensión de sólidos, donde la fracción volumétrica de homogeneidad completa es de 0.367. Mediante esta evaluación se comprueba que el impulsor G6 tiene un mejor desempeño que el impulsor original en el caso de suspensión de sólidos, puesto que en 19 segundos de operación logra tener una mezcla de 0.36 de fracción volumétrica promedio de sólidos a una altura del 75% del tanque, mientras que el impulsor original logra este estado en los 26 segundos de operación. Asimismo, evaluando el porcentaje de sólidos en el máximo nivel de altura de agua dentro del tanque, para 40 segundos de operación el impulsor G6 logra tener mayor homogeneidad en la mezcla formada al 0.36 de fracción volumétrica promedio de sólidos, mientras que el impulsor original solo presenta 0.30 de fracción volumétrica sólidos a esta altura.

Bibliografía

- [Benz, 2018] Benz, G. T. (2018). Consider hydrofoil impellers for laminar-flow mixing. *Chemical Engineering Progress*, 114(5):30–35.
- [Chambergo et al., 2017] Chambergo, J. C., Valverde, Q., Pachas, A. A., and Yépez, H. (2017). Estudio del comportamiento fluido-dinámico de un agitador a escala reducida mediante simulación numérica. *Información tecnológica*, 28(3):37–46.
- [Fentiman et al., 1998] Fentiman, N., Hill, N. S., Lee, K., Paul, G., and Yianneskis, M. (1998). A novel profiled blade impeller for homogenization of miscible liquids in stirred vessels. *Chemical Engineering Research and Design*, 76(7):835–842.
- [Fernández, 2012] Fernández, J. M. (2012). *Técnicas numéricas en ingeniería de fluidos: Introducción a la dinámica de fluidos computacional (CFD) por el método de volúmenes finitos*. Reverté.
- [Ferziger and Peric, 2012] Ferziger, J. H. and Peric, M. (2012). *Computational methods for fluid dynamics*. Springer Science & Business Media.
- [Fluent, 2016] Fluent, A. (2016). 12.0 theory guide. *Ansys Inc*, 5(5).
- [Gohel et al., 2012] Gohel, S., Joshi, S., Azhar, M., Horner, M., and Padron, G. (2012). Cfd modeling of solid suspension in a stirred tank: Effect of drag models and turbulent dispersion on cloud height. *International Journal of Chemical Engineering*, 2012.
- [Jirout and Rieger, 2011] Jirout, T. and Rieger, F. (2011). Impeller design for mixing of suspensions. *Chemical Engineering Research and Design*, 89(7):1144–1151.
- [Kumaresan and Joshi, 2006] Kumaresan, T. and Joshi, J. B. (2006). Effect of impeller design on the flow pattern and mixing in stirred tanks. *Chemical Engineering Journal*, 115(3):173–193.
- [Lane, 2017] Lane, G. L. (2017). Improving the accuracy of cfd predictions of turbulence in a tank stirred by a hydrofoil impeller. *Chemical Engineering Science*, 169:188–211.

- [Massey and Ward-Smith, 1998] Massey, B. S. and Ward-Smith, J. (1998). *Mechanics of fluids*, volume 1. Crc Press.
- [McCabe et al., 1993] McCabe, W. L., Smith, J. C., and Harriott, P. (1993). *Unit operations of chemical engineering*, volume 5. McGraw-Hill New York.
- [Nienow et al., 1997] Nienow, A. W., Edwards, M., and Harnby, N. (1997). *Mixing in the process industries*. Butterworth-Heinemann.
- [Paul et al., 2004] Paul, E. L., Atiemo-Obeng, V. A., and Kresta, S. M. (2004). *Handbook of industrial mixing: science and practice*. John Wiley & Sons.
- [Spogis, 2002] Spogis, N. (2002). *Metodologia para determinação de curvas de potência e fluxos característicos para impelidores axiais, radiais e tangenciais utilizando a fluidodinâmica computacional*. Tesis de maestría, Facultad de Ingeniería Química. Universidad Estatal de Campinas.
- [Spogis, 2007] Spogis, N. (2007). *Desenvolvimento de um impelidor de alta eficiência através da dinâmica dos fluidos computacional e otimização multi-objetivo*. Tesis de doctorado, Facultad de Ingeniería Química. Universidad Estatal de Campinas.
- [Tamburini et al., 2014] Tamburini, A., Cipollina, A., Micale, G., Brucato, A., and Ciofalo, M. (2014). Influence of drag and turbulence modelling on cfd predictions of solid liquid suspensions in stirred vessels. *Chemical Engineering Research and Design*, 92(6):1045–1063.
- [Tatterson, 1991] Tatterson, G. B. (1991). *Fluid mixing and gas dispersion in agitated tanks*. McGraw-Hill Companies.
- [Vladimir, 2013] Vladimir, C. U. (2013). *Diseño y cálculo de un agitador de fluidos*. Tesis de licenciatura en ingeniería mecánica, Facultad de ingeniería. Universidad del BÍO-BÍO.
- [Wendt, 1996] Wendt, J. F. (1996). *Computational fluid dynamics : an introduction*. Berlin:Springer-Verlag.
- [White, 2004] White, F. (2004). *Mecánica de fluidos*. McGraw-Hill/Interamericana de España, S. A. U.