

**ANÁLISIS DE LAS TASAS DE EROSION EN BOMBAS ELECTROSUMERGIBLES
UTILIZANDO DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL**

JULIAN ANDRES MARTINEZ SAAH

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA**

2023

ANÁLISIS DE LAS TASAS DE EROSIÓN EN BOMBAS ELECTROSUMERGIBLES
UTILIZANDO DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL 2

Análisis de las tasas de erosión en bombas electrosumergibles utilizando dinámica de fluidos
computacional

Julián Andres Martínez Saah

Trabajo de grado en la modalidad de investigación para optar al título de Ingeniero de Petróleos

Director

Germán González Silva, Ph.D.

Codirector

Natalia Prieto Jiménez, Ph.D.

Universidad industrial de Santander
Facultad de ingenierías fisicoquímicas
Escuela de ingeniería de petróleos
Bucaramanga

2023

Agradecimientos

Primero quisiera agradecer a mi familia; papá, mamá y hermanos que con su abundante amor me proporcionan la fuerza para seguir adelante a pesar de los inconvenientes.

Quisiera agradecer al profesor Germán Gonzáles por su guía y seguimiento a lo largo del desarrollo de este proyecto, resaltando la importancia de un trabajo bien hecho.

También agradecer a la Ingeniera Natalia Jiménez por su ayuda en la parte técnica del manejo del software y sus consejos que me permitieron consolidar y finalizar este proyecto.

Quisiera agradecer a toda la facultad de Ingeniería de Petróleos de la UIS y su magnífico claustro de profesores, catedráticos y académicos que a lo largo de los años despertaron en mí el gusto por la ingeniería de petróleo y las ciencias afines.

Por último y no menos importante, quisiera agradecer a todos mis amigos y compañeros que a pesar de las diferencias cada uno aportó en cierta forma a mi desarrollo profesional.

Gracias a la Universidad Industrial de Santander por convertirme en la persona que soy actualmente.

Resumen

Título: Análisis de las tasas de erosión en bombas electrosumergibles utilizando Dinámica de Fluidos Computacional.*

Autor: Julián Andres Martínez Saah**

Palabras clave: Tasas de erosión, CFD, ESP, MRF, DPM

Descripción:

La bomba electrosumergible es uno de los mecanismos de extracción de petróleo más utilizados y también uno de los más propensos a daños estructurales dadas las condiciones extremas donde normalmente se encuentran, una de las fallas más comunes es la erosión que presenta en sus componentes internos por el flujo de partículas sólidas. La dinámica de fluidos computacional (CFD) se puede aplicar a este tipo de problemas para determinar las zonas principales de erosión e identificar una posible solución. Debido a la alta demanda de gas a nivel global la producción de este recurso es inminente razón por la cual se simuló una bomba multifásica helico-axial (Poseidon) empleando el esquema de solución Euler-Lagrange (DPM), el método del rotor estático (MRF) y una ecuación de erosión representativa de la literatura en ANSYS FLUENT bajo el régimen estacionario. En los resultados se observa que a pesar de ser una solución estacionaria a un problema transiente la metodología empleada logra captar gran parte de los patrones de erosión, se analizan diferentes escenarios donde se varían los parámetros de flujo locales como: densidad de partícula, densidad de fluido transportador, distribución de tamaño de arena y velocidad de rotación del impulsor. Los principales parámetros que afectaron la magnitud de la erosión fueron: la distribución de partículas, la concentración de sólidos y la densidad del fluido transportador.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de ingeniería de petróleos. PhD. Germán González Silva, PhD. Natalia Prieto Jiménez

Abstract

Title: Analysis of erosion rates in electrosubmersible pumps using Computational Fluid Dynamics.*

Author: Julián Andres Martínez Saah**

Key words: Erosion rates, CFD, ESP, MRF, DPM

Description:

The electro submersible pump is one of the most used oil extraction mechanisms and one of the most prone to structural damage given the extreme conditions where they are usually found, one of the most common failures is the erosion of its internal components due to the flow of solid particles. Computational fluid dynamics can be applied to this type of problem to figure out the main erosion zones and find a plausible solution. Due to the high demand of gas at a global level, the production of this resource is imminent. For this reason, a multiphase helico-axial pump (Poseidon type) was studied using the Euler-Lagrange solution scheme (DPM), the static rotor method (MRF) and a representative erosion equation from the literature in ANSYS FLUENT under the stationary regime. The results show that despite being a stationary solution to a transient problem, the method used manages to capture a large part of the erosion patterns. Different scenarios are analyzed where local flow parameters such as particle density, carrier fluid density, sand size distribution and impeller rotational speed are varied. The main parameters that affected the magnitude of erosion were particle distribution, solids concentration and carrier fluid density.

* Bachelor Thesis

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de ingeniería de Petróleos. PhD. Germán González Silva, PhD. Natalia Prieto Jiménez

Contenido

1 Estado del arte en modelos de erosión	23
2 Bombas electrosumergibles	35
2.1 Sistema de producción	36
2.2 Características de las bombas	38
2.3 Clasificación y aplicación de bombas electrosumergibles.....	41
3 Bombeo Multifásico: Una oportunidad para la producción offshore	42
4 Problemas más comunes en las bombas electrosumergibles	44
5 Modelado de flujo	48
6 Dinámica de Fluidos Computacional.....	51
6.1 Derivada Material	54
6.2 Ecuación de continuidad.....	55
6.3 Ecuación de momento.....	56
7 Modelado de Turbulencia	61
7.1 Cierre de Turbulencia	62
7.1.1 Modelo $k - \epsilon$	64
8 Modelado en Turbomáquinas	64
8.1 Método de Rotor Estático	65
8.2 Malla Deslizante	67
9 Método Numérico	68
9.1 Método de Volúmenes Finitos.....	69
10 Estudios en análisis de erosión en bombas electrosumergibles.....	70
11 Metodología.....	78

ANÁLISIS DE LAS TASAS DE EROSIÓN EN BOMBAS ELECTROSUMERGIBLES

UTILIZANDO DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL 7

11.1 Diseño de Geometría.....	79
11.2 Enmallado	80
11.3 Configuración inicial y análisis de Sensibilidad de Enmallado.....	81
12 Resultados	88
12.1 Efecto de la densidad del fluido transportador	94
12.2 Efecto de la concentración de arena.....	96
12.3 Efecto de distribución de tamaño de arena	98
12.4 Efecto de la velocidad de rotación	101
12.5 Efecto de la densidad de la arena.....	104
13 Conclusiones	106
14 Recomendaciones para futuros trabajos.....	108
15 Bibliografía	110

Lista de Figuras

Figura 1. Diagrama esquemático de los principales parámetros que afectan a la erosión por suspensiones .(El-Emam et al., 2022).....	23
Figura 2 Esquema idealizado de un grano de arena golpeando la superficie, inicialmente el vector de velocidad se encuentra en el centro de gravedad a un ángulo (α) con la superficie. Modificado (Finnie, 1960).....	26
Figura 3 Predicciones de remoción de volumen versus ángulo para un grano de arena sobre 3 superficies. Modificado (Finnie, 1960).....	26
Figura 4 Tendencias de los mecanismos de erosión en función del ángulo de impacto. (Lyczkowski y Bouillard, 2002)	27
Figura 5 Balance de la energía cinética de una partícula antes y después del impacto. (Hutchings, 1981)	28
Figura 6 Esquema del aparato para ensayos de erosión. (Ahlert, 1994).....	29
Figura 7 El concepto de erosión derivado de la deformación frágil/plástica repetida y la acción de corte. (Oka et al., 2005)	30
Figura 8 Tasas de erosión normalizada a velocidades de impacto de 100 y 130m/s para cinco materiales metálicos y su dureza de Vickers (Hv). (Oka et al., 1997).....	31
Figura 9 Montaje experimental para investigar la erosión en bombas electrosumergibles. (Pirouzpanah et al., 2019)	32
Figura 10 Balance de pozos activos en Colombia – mayo 2022. (Campetrol, 2023).....	35
Figura 11 Distribución de Sistemas de Levantamiento Artificial – mayo 2022. (Campetrol, 2023)	35
Figura 12 Instalación convencional de una unidad ESP. (Takacs, 2009).....	36

Figura 13 Componentes principales de una bomba electrosumergible. (Takacs, 2009) 36

Figura 14 Nomenclatura de las partes de un impulsor, también aplican para el difusor. (Takacs, 2009) 38

Figura 15 Etapa de una bomba electrosumergible y el canal de flujo primario. (Takacs, 2009) . 38

Figura 16 Componentes de velocidad para un rotor generalizado. (Stepanoff, 1957) 38

Figura 17 Derivación de la curva de desempeño H-Q. (Takacs, 2009)..... 41

Figura 18 Representación esquemática de las curvas de desempeño o características de una bomba. (Takacs, 2009)..... 41

Figura 19 Eficiencia versus velocidad específica y tipo de bomba. (Stepanoff, 1957) 42

Figura 20 Prototipo P300, celda helico-axial de compresión. (Gié et al., 1992) 43

Figura 21 Estructuras de flujo Gas-Líquido en los canales de un impulsor y rotor. a) Flujo burbujeante, b) Flujo aglomerado burbujeante, c) Bolsillos de gas, d) Flujo anular. (Ali et al., 2021) 45

Figura 22 Difusor (derecha) e Impulsor (izquierda) mostrando signos de acumulación de arena y erosión de los álabes. (Bonilla y Chen, 2019) 47

Figura 23 Impulsor nuevo (izquierda) e impulsor erosionado (derecha). (Bonilla y Chen, 2019)47

Figura 24 Tipos de flujo multifásico. (Oro, 2012)..... 48

Figura 25 (a) Flujo subsónico $u < a$, (b) Flujo sónico $u = a$, (c) Flujo Super sónico $u \gg a$. Cada uno con su respectiva ecuación que describe las perturbaciones. (Chung, 2002) 51

Figura 26 Modelo de elemento infinitesimal de flujo moviéndose en un campo de flujo. (Anderson, 1995) 55

Figura 27 Volumen de control en movimiento empleado para la interpretación de $\nabla \cdot \mathbf{V}$. (Anderson, 1995) 56

Figura 28 Balance de fuerzas en la dirección x sobre el elemento de fluido infinitesimalmente pequeño. (Anderson, 1995).....	57
Figura 29 Traza de velocidad en flujo turbulento.(Oro, 2012).....	61
Figura 30 Modelo del campo de flujo en el espacio anular entre la carcasa externa y la punta del alabe de una turbina. Figura Científica de ResearchGate, recuperado de: https://www.researchgate.net/figure/Model-of-tip-clearance-flow-field_fig4_237543275 [30 Ago, 2023]	62
Figura 31 Clasificación de los modelos de turbulencia. (Oro, 2012)	63
Figura 32 Geometría de una bomba radial con un impulsor. (Fluent, 2009).....	65
Figura 33 Marco de referencia rotatorio y estacionario, se emplea para adjuntar el componente rotacional a la ecuación de momento. (Fluent, 2009).....	65
Figura 34 Interacción Axial del Rotor-Estator, ilustrando el concepto del Plano de Mezcla. (Fluent, 2009)	66
Figura 35 Interacción Axial Rotor-Estator ilustrando el concepto de malla deslizante. (Fluent, 2009)	67
Figura 36 Representación de un volumen finito bidimensional. (González Silva, 2012)	69
Figura 37 Tipos de enmallado. (Chung, 2002)	70
Figura 38 Visualización de red, autores co-citados 20 veces.	70
Figura 39 Contornos de las tasas de erosión para la carcasa (<i>shroud</i>) del difusor e impulsor para (a) 27 μ m y (b) 60 μ m de diámetro de partícula. (Hadjiyannis et al., 2009)	71
Figura 40 Recirculación a la salida de la lengüeta del impulsor para partículas con diámetros de 100 y 500 μ m. (Pagalthivarthi et al., 2011)	72

Figura 41 Trayectoria de partícula afectada por (izquierda) malla fina y (derecha) malla gruesa.
 73

Figura 42 Reflexión de partículas en la pared ilustrando el modelo de rebote convencional (rojo)
 y rebote a radio de partícula (azul). 73

Figura 43 Variación de los factores que afectan a la tasa de erosión versus la distancia a la pared
 del difusor con un caudal de bombeo de 25 KBPD. (Marsis y Russell, 2013)..... 73

Figura 44 Tasa de erosión en la carcasa del difusor para 25 KBPD usando DPM ERC-2008.
 (Marsis y Russell, 2013) 74

Figura 45 Tasa de erosión en la carcasa del difusor para 25 KBPD usando Euler ERC-2008.
 (Marsis y Russell, 2013) 74

Figura 46 Energía cinética de turbulencia para la 1ra etapa en a) $span = 0.1$ b) $span = 0.5$, y la
 segunda etapa c) $span = 0.1$ d) $span = 0.5$ 75

Figura 47 Comparación de las tasas de erosión computadas y las locaciones erosionadas en los
 álabes de impulsor de la 1ra y 2da etapa..... 75

Figura 48 Análisis de error de tasa de erosión promedio ponderada por área. (Zhu, Zhu, et al.,
 2019) 76

Figura 49 Comparación de las tasa de erosión promedio ponderadas por área con diferentes
 modelos de turbulencia en. (Zhu, Zhang, et al., 2019) 77

Figura 50 Vista esquemática de las locaciones axiales en la 1ra etapa. (Chen, 2017) 78

Figura 51 Metodología CFD. (González Silva, 2012) 78

Figura 52 Impulsor (a), Difusor (b) y Sección transversal de etapa (c). (Gudigopuram, 2016)... 79

Figura 53 Perfil de los hidro álabes del impulsor. 79

Figura 54 Dominio Computacional. 80

ANÁLISIS DE LAS TASAS DE EROSIÓN EN BOMBAS ELECTROSUMERGIBLES UTILIZANDO DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL	12
Figura 55 Nomenclatura de álabes empleada	80
Figura 56 Malla inicial del impulsor, 338K celdas.....	81
Figura 57 Malla inicial del difusor, 225K celdas.....	81
Figura 58 Condiciones de frontera.....	82
Figura 59 Variación de presión dinámica según la malla.	84
Figura 60 Planos de monitoreo para la presión dinámica (verde).	84
Figura 61 Histograma de calidad ortogonal inversa del impulsor en la malla 5 (443K celdas)..	85
Figura 62 Histograma de calidad ortogonal inversa del difusor en la malla 5 (324K celdas).....	85
Figura 63 Distribución de presiones de una etapa con span de 0.98.	86
Figura 64 Distribución de presiones del segundo impulsor con span de 0.98. (Chen, 2017).....	86
Figura 65 Líneas de flujo de velocidad, 25KBPD @3600RPM con span de 0.1.	87
Figura 66 Líneas de flujo de velocidad, 25KBPD @3600 RPM con span de 0.1 en la 1ra etapa. (Gudigopuram, 2016).....	87
Figura 67 Tasas de erosión en mm/s utilizando el modelo de Chen.....	90
Figura 68 Velocidad en in/s, trayectoria de partículas y tasas de erosión.	90
Figura 69 Diferencia de distancias sobre la superficie entre el impulsor nuevo y desgastado mediante escáner 3D. (Chen, 2017).....	91
Figura 70 Prueba de remoción de pintura. Comparación de difusores, antes de prueba (izquierda) y después (derecha). (Chen, 2017).....	91
Figura 71 Validación de resultados, simulación de flujo con arrastre de partículas versus ensayos experimentales. (Chen, 2017).....	92
Figura 72 Tasas de erosión en mm/s en el difusor de la primera etapa e impulsor de la segunda. (Chen, 2017)	92

Figura 73 Erosión, concentración de partícula y velocidad de partícula promediados a lo largo del eje Y..... 93

Figura 74 Perfil de distancias paralelas al eje Y en pulgadas 93

Figura 75 Concentración de partículas distribuidas a lo largo del span para $Y = 0.8$ 94

Figura 76 Tasas de erosión en mm/s para el Queroseno (izquierda) y GasOil (derecha)..... 94

Figura 77 Tasas de erosión promediadas a lo largo del eje Y para el caso 12.1..... 95

Figura 78 Velocidad de partículas a lo largo del eje Y para el caso 12.1..... 95

Figura 79 Concentración de partículas a lo largo del eje Y para el caso 12.1..... 95

Figura 80 Tasas de erosión en mm/s para una concentración de 0.05 kg/s (izquierda) y 0.399 kg/s (derecha). 96

Figura 81 Velocidad de partículas a lo largo del eje Y para el caso 12.2..... 97

Figura 82 Concentración de partículas a lo largo del eje Y para el caso 12.2..... 97

Figura 83 Tasas de erosión en mm/s para el caso 12.2..... 97

Figura 84 Tasas de erosión en mm/s para granos de arena finos (izquierda) y granos gruesos (derecha). 98

Figura 85 Tasas de erosión en mm/s a lo largo del eje Y en el caso 12.3 99

Figura 86 Velocidad de partículas a lo largo del eje Y para el caso 12.3..... 100

Figura 87 Concentración de partículas a lo largo del eje Y para el caso 12.3..... 100

Figura 88 Distribución de diámetros de partícula a lo largo del eje Y para el caso 12.3. 100

Figura 89 Densidad de partícula ponderada en flujo másico a lo largo del eje Y para el caso 12.3. 101

Figura 90 Tasas de erosión en mm/s para 4000 RPM (izquierda) y 3200RPM (derecha). 101

Figura 91 Tasas de erosión en mm/s a lo largo del eje Y para el caso 12.4. 102

Figura 92 Velocidad de partículas a lo largo del eje Y para el caso 12.4. 102

Figura 93 Concentración de partículas a lo largo del eje Y para el caso 12.4. 102

Figura 94 Contornos de presión total para 4000 RPM (izquierda) 3600 RPM (centro) y 3200 RPM (derecha) en un vano igual a 0.5. 103

Figura 95 Tasas de erosión en mm/s para 3000 kg/m³ (izquierda) y 2050 kg/m³ (derecha). 104

Figura 96 Tasas de erosión en mm/s a lo largo del eje Y para el caso 12.5 104

Figura 97 Velocidad de partículas a lo largo del eje Y para el caso 12.5. 105

Figura 98 Concentración de partículas a lo largo del eje Y para el caso 12.5. 105

Lista de Tablas

Tabla 1 Resumen de modelos de erosión.....	32
Tabla 2 Tecnologías actuales para el bombeo de mezclas tipo gas-líquido y características importantes.....	46
Tabla 3 Clasificación y características de modelos multifase.	49
Tabla 4 Valores de las variables para la ecuación 50.	68
Tabla 5 Condiciones de frontera para simulaciones de una fase.	82
Tabla 6 Métodos y controles de solución.	83
Tabla 7 Resultados de sensibilidad.....	83
Tabla 8 Condiciones de frontera para la simulación de dos fases.	89

Nomenclatura

Símbolo	Nombre	Símbolo	Nombre
ϵ_{VP}	Volumen de material removido	ϵ_{VT}	Tasa total de erosión volumétrica
κ	Cociente del componente de fuerza vertical sobre horizontal	ϵ_{VD}	Volumen de material removido por deformación frágil
P	Tensión de fluencia plástica	$\epsilon_{VC-1,2}$	Volumen de material removido por mecanismo de corte
m	Masa de partícula	M	Masa total de partículas
V	Velocidad de partícula	K_1, C	Constantes empíricas
α	Ángulo de impacto	δ	Factor de deformación frágil; energía para remover unidad volumétrica de material
ψ	Relación de profundidad de contacto sobre profundidad de corte	X	Factor de corte; energía para rayar unidad volumétrica de material
α_{p0}	Ángulo de impacto donde el componente horizontal se vuelve 0 al dejar la superficie	K	Componente de velocidad normal a la superficie debajo del cual la erosión es 0
V_r	Componente residual paralelo de la velocidad de las partículas en pequeños ángulos.	ϵ	Tasa de erosión; masa removida/masa impactante
$\widehat{\epsilon}_{1,2}$	Tasas de erosión primaria y secundaria calculadas sobre una velocidad de referencia (V_{ref})	V_0	Umbral de velocidad debajo el cual los impactos son elásticos
d_0	Diámetro de partícula debajo el cual no hay erosión	$F_{d,v}$	Factor de fragmentación, igual a 1 si todas las partículas se fragmentan
ρ_t	Densidad de superficie	Ω_c	Criterio de deformación crítica
H_t	Dureza de superficie	\hat{A}, n	Constantes empíricas
$f(\theta)$	Función de ángulo de impacto	BH	Dureza de Brinell

V_L	Velocidad de impacto de partícula	F_s	Factor de angulosidad de partícula
S_{dot}	Tasa de producción de arena	AF_p	Parámetro de penetración
F_p	Factor de penetración	D	Diámetro hidráulico
P_{dot}	Tasa de penetración	E_{90}	Relación entre el daño por erosión en ángulos arbitrarios, y el que se produce en ángulo normal
Hv	Dureza de Vickers	$n_{1,2} k_2$	Constantes determinadas por la dureza del material y otras propiedades de partícula
K, k_1, k_3	Constantes determinadas por las propiedades de la partícula	V', d'_p	Constantes experimentales
a, b	Constantes de la relajación de esfuerzo.	V_p	Velocidad de partícula
α_s	Fracción volumétrica de arena	V_s	Velocidad de arena en capa límite
V_{s0}	Velocidad de arena de referencia	k_w	Energía cinética de turbulencia
k_{w0}	Energía cinética de turbulencia de referencia	EF	Factor de erosión
A, B	Coefficientes de regresión	ER	Tasa de erosión.
d_p	Diámetro de partícula	ρ	Densidad de fluido
ω	Velocidad de rotación	u, v, w	Componentes de velocidad en los ejes $i-j-k$
μ	Viscosidad de molecular del fluido	ER_b	Erosión base
Γ	Coefficiente de transporte	S	Término fuente
h	Entalpía	k	Conductividad térmica del fluido
C_p	Capacidad calorífica.	U	Magnitud de la velocidad de un flujo uniforme

Lista de abreviaciones

CFD	Dinámica de Fluidos Computacional
ESP	Bomba electrosumergible
DPM	Modelo de Fase Discreta
RANS	Ecuaciones de Navier Stokes promediadas en Reynolds
VOF	Volumen de Fluido
E/CRC	Centro de investigación en corrosión y erosión
MRF	Marco de referencia múltiple

Introducción

La bomba electrosumergible es uno de principales (junto con el bombeo mecánico) métodos de levantamiento artificial en Colombia, con aproximadamente 50% de participación en todos los pozos activos que se emplean a lo largo del territorio (Campetrol, 2023). Sin embargo, uno de los mayores problemas que se encuentran a menudo es la degradación y fallo total de bomba por la acción de las partículas de arena que desgastan la superficie del equipo y vuelven inviable las operaciones de producción por su alto mantenimiento y reemplazo (Delgado et al., 2022) por tal razón las operadoras generalmente emplean métodos de control de sólidos como empaquetamiento con grava o tuberías ahuecadas (filtros) que a largo plazo restringen la producción y afectan las ganancias. Para resolver este problema se vuelve necesario dirigirse al núcleo de la bomba electrosumergible, el impulsor y los parámetros operacionales que afectan su rendimiento bajo regímenes multifásicos, es decir las tasas de erosión.

Así, cuanto más exactas sean las predicciones de la tasa de erosión en la bomba electrosumergible mejor será el entendimiento del desempeño de esta a largo plazo y se podrán tomar medidas verdaderamente remediativas que mitiguen sus efectos. Para ello la Dinámica de Fluidos Computacional tiene un papel importante al ser relativamente rápida de aplicar y capaz de dar resultados tan precisos como sea necesario, sin necesidad de invertir grandes cantidades de dinero en instalaciones experimentales, y que al final tiene el potencial de proporcionar información valiosa que mejore el criterio de selección de las *ESP's* extendiendo su vida útil en el campo.

Planteamiento del Problema

La dinámica de fluidos computacional (*CFD*, por sus siglas en inglés, *Computational Fluid Dynamics*) es una técnica de gran utilidad para estudiar el comportamiento de los fluidos y fenómenos que ocurren a través de las bombas electrosumergibles (Pirouzpanah, 2019). Uno de esos comportamientos tiene que ver con el transporte de partículas sólidas suspendidas en un fluido y la erosión que está asociada a este tipo de flujo (Benavides y Ramírez, 2019). En este último aspecto, se hace necesario validar los resultados de la simulación con los patrones de erosión que se identifican en la literatura para así hacer los ajustes y mejoras pertinentes.

Objetivo General

Analizar el comportamiento de las tasas de erosión presente en las bombas electrosumergibles mediante dinámica de fluidos computacional.

Objetivos específicos

- Describir las características de las bombas electrosumergibles; sus ventajas y limitaciones, mediante análisis bibliográfico.
- Definir las ecuaciones matemáticas que rigen el flujo de fluidos y su tratamiento numérico, condiciones iniciales, condiciones de frontera y el modelo de erosión para el análisis fluido-dinámico en las bombas electrosumergibles.
- Seleccionar una geometría y enmallado representativo, que facilite la interpretación y validación de los resultados.
- Simular en un software comercial el comportamiento dinámico del fluido con arrastre de arena a través de una bomba electrosumergible, con el modelo de erosión más apropiado.

Justificación

Las bombas electrosumergibles son usadas ampliamente en el territorio colombiano debido a su alta versatilidad. Son principalmente empleadas en la industria del petróleo debido a su alta eficiencia y uso en pozos desviados y horizontales (Takacs, 2017); sin embargo, estas se ven sometidas al ambiente abrasivo y a condiciones extremas que suponen los yacimientos de petróleo (Pirouzpanah, 2019).

Por esta razón, tienden a requerir mantenimiento continuo o, en el peor de los casos, un reemplazo total. En ese sentido, el análisis de las tasas de erosión utilizando dinámica de fluidos computacional se vuelve un aspecto crítico para evaluar el rendimiento de la operación y extender la vida útil de las bombas electrosumergibles, con el fin de mantener un margen económico estable durante la producción.

1 Estado del arte en modelos de erosión

Generalmente la erosión puede definirse como la deformación u remoción de material de una superficie dura por mecanismos mecánicos o químicos, determinar la contribución de cada posible mecanismo es complejo y sus efectos simultáneos determinan la tasa de erosión final (El-Emam et al., 2022).

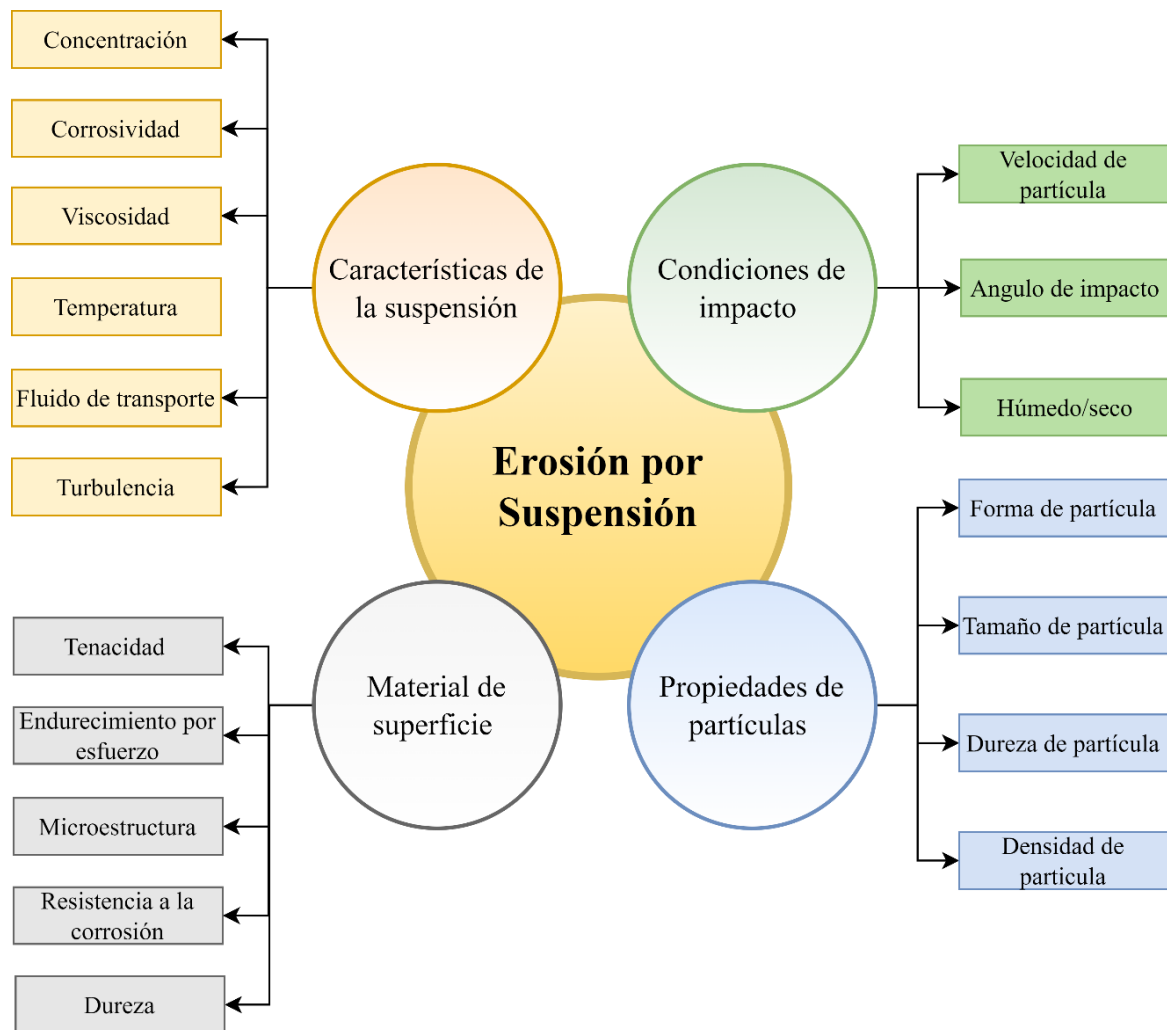


Figura 1. Diagrama esquemático de los principales parámetros que afectan a la erosión por suspensiones. (El-Emam et al., 2022)

En turbomáquinas la erosión mecánica se ocasiona por dos mecanismos: cavitación y por choque de partículas. Según la concentración de partículas en el fluido se diferencian flujos densos

y flujos disueltos o suspensiones, cada uno posee distintas aplicaciones y se manejan diferentes métodos numéricos y esquemas de solución.

Según Lyczkowski y Bouillard (2002), en la literatura se diferencian tres grandes grupos que engloban los modelos de erosión:

- a) **Modelos de erosión de una partícula:** Son aquellos donde se busca representar una partícula individual y sus efectos sobre una superficie plana, las interacciones partícula-partícula son insignificantes, por lo tanto, el proceso de erosión se puede ver como la remoción de material debido a la acumulación de impactos individuales, que se pueden dar de tres formas: Dúctil, Frágil o ambas.
- b) **Modelo de fase densa:** Diseñados para el modelado de lechos fluidizados, donde la carga de partículas es tan grande que las interacciones partícula-partícula deben simularse, además de existir otros fenómenos físicos como las “cadenas de fuerza” (Brennen, 2005). En estos modelos el material de la pared se remueve ya sea de manera dúctil, frágil o fallas de fatiga de bajo ciclo.
- c) **Modelos de disipación de potencia y energía:** Son aquellos que se basan en la transferencia de energía de las partículas en una mezcla de dos fases hacia la superficie. Todos a excepción de este último mencionado son naturalmente algebraicos.

Una de las investigaciones más completas con respecto a los modelos de erosión fue la realizada por Meng y Ludema en 1995 donde recopilaron 185 ecuaciones de erosión y seleccionaron 28 para un estudio especial, señalando los defectos de las investigaciones y su falta de rigidez en consolidar un modelo de erosión universal. Al igual que Humphrey (1990) donde planteó las bases para la investigación de los fenómenos de erosión en diferentes aplicaciones,

resaltando la necesidad de acoplar los modelos de erosión con la dinámica de fluidos computacional y otras consideraciones de vital importancia como:

- a) Interacción entre partículas.
- b) Interacciones partícula-superficie:
 - i. Coeficiente de restitución.
 - ii. Fragmentación de partículas.
- c) Los efectos de la turbulencia.
- d) Modelado en fase discreta (Lagrangiano).
- e) Modelado en fase continua (Euleriano).
- f) Turbomáquinas:
 - i. Capa Límite y Flujo Secundario
 - ii. Falta de datos experimentales

Con las consideraciones anteriormente mencionadas, se procede a describir algunos de los modelos de erosión más relevantes del grupo 1.

Finnie (1960) fue un pionero en esta área al desarrollar los primeros modelos de erosión basados en la deformación dúctil de los materiales (especialmente metales) y proponer los primeros pasos para estudiar los fundamentos de la erosión asociada a las partículas abrasivas en geometrías simples.

Uno de sus aportes más significativos fue el modelo dúctil de corte, donde las partículas actúan como un torno que deforma de manera plástica la superficie, el volumen desplazado es

igual al volumen removido, y el ancho de contacto (x_t) y longitud (l) son mayores que la profundidad de corte (y_t).

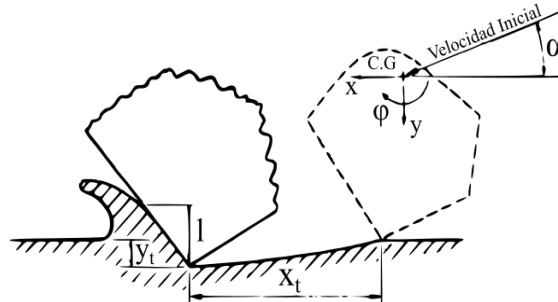


Figura 2 Esquema idealizado de un grano de arena golpeando la superficie, inicialmente el vector de velocidad se encuentra en el centro de gravedad a un ángulo (α) con la superficie. Modificado (Finnie, 1960)

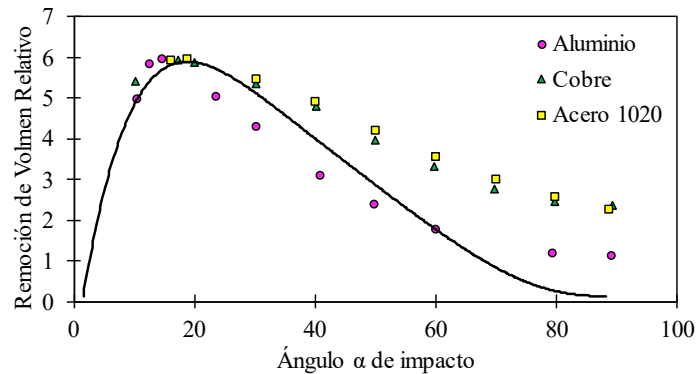


Figura 3 Predicciones de remoción de volumen versus ángulo para un grano de arena sobre 3 superficies. Modificado (Finnie, 1960)

Bitter (1963) basado en las observaciones de Finnie, resalto dos tipos de desgaste u erosión, uno causado por deformación repetitiva durante las colisiones (daño cíclico por fatiga) resultando en el desprendimiento de material o también llamado deformación frágil, y el otro causado por el efecto de corte que ejercen las partículas disueltas en el fluido o deformación dúctil. Luego, asumiendo partículas esféricas la erosión resultante en la superficie es la suma ambos mecanismos.

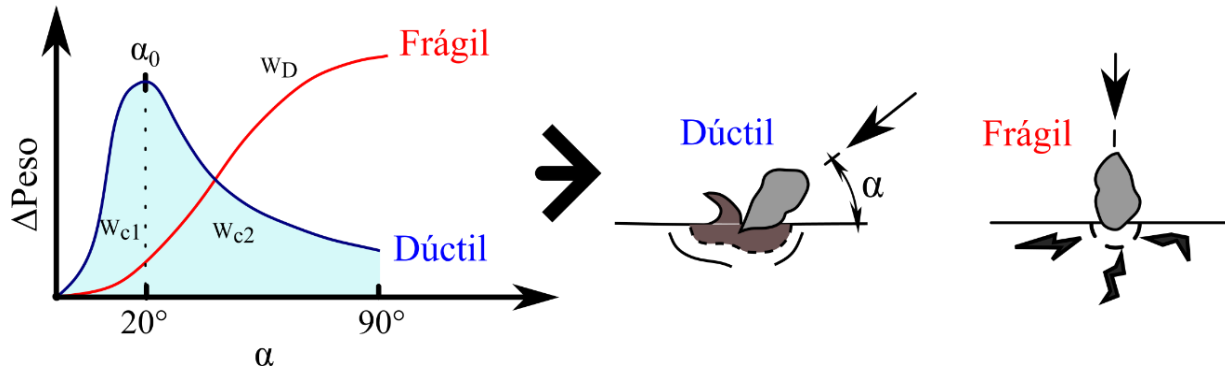


Figura 4 Tendencias de los mecanismos de erosión en función del ángulo de impacto. (Lyczkowski y Bouillard, 2002)

Neilson y Gilchrist (1968) destacaron los resultados de los estudios de Finnie y Bitter, y debido a la complejidad de la ecuación de Bitter se sumaron a la tarea de simplificar su modelo de erosión dúctil manteniendo intacto su modelo de erosión frágil, algo que lograron al introducir un componente paralelo a la superficie de la velocidad residual de la partícula para ángulos de impacto pequeños (V_r).

Tilly (1973) basado en evidencia fotográfica de los impactos de granos de cuarzo frente al acero H46 describió la erosión dúctil como un proceso donde contribuyen dos mecanismos. Una etapa primaria asociada a la transferencia neta de energía cinética necesaria para deformar de manera dúctil la superficie. Y una etapa secundaria que se produce únicamente cuando las partículas se quiebran en el impacto y los fragmentos rebotan o impactan radialmente la zona, en esta etapa los ángulos de impacto cercanos a 90° tienen mayor efecto sobre la erosión final, sin embargo, se mostró que partículas con diámetro menor a $30\mu\text{m}$ y con velocidades de hasta 1.000ft/s el proceso es completamente primario.

Para corroborar la información con respecto a la erosión en ángulos de incidencia cercanos a 90° Hutchings (1981) realizó pruebas de impacto directo sobre una aleación de aluminio

endurecido con partículas de vidrio de diferentes diámetros (212 μm -600 μm) y también con partículas de acero para determinar el efecto de la densidad. Y diseñó una ecuación de erosión basada en un balance de energía cinética entre la partícula y la pared, ignorando efectos elásticos (Figura 5). Concluyó que los exponentes de velocidad de partícula necesarios para este tipo de experimentos deben ser mayor a 3, un valor que difiere de los reportados en la literatura de 2,3 y 2,4, también mediante análisis microscópico agrega que el mecanismo de erosión principal en todos los casos estudiados fue la formación de discos biconvexos.

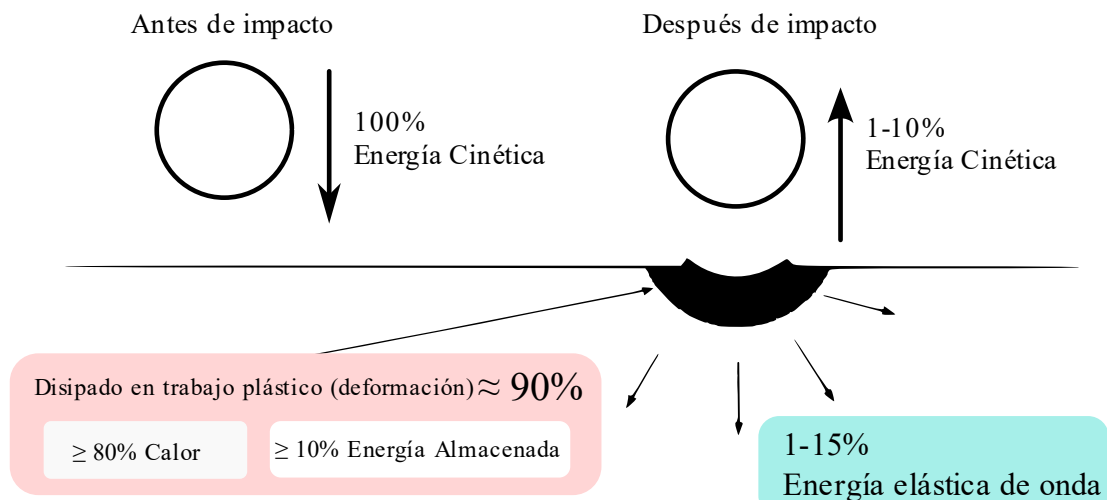


Figura 5 Balance de la energía cinética de una partícula antes y después del impacto. (Hutchings, 1981)

La investigación de Ahlert (1994) fue parte de un proyecto llevado a cabo por el Centro de Investigación de Erosión/Corrosión (*E/CRC*, por sus siglas en inglés) de la Universidad de Tulsa, en el cual se buscaba predecir la erosión en diferentes geometrías de la industria petrolera. En este, se realizaron pruebas de impacto directo (Figura 6) sobre una superficie plana de acero 1018 con dos fluidos transportadores; agua y aire, dos tamaños de arena (155 μm y 60 μm), tres velocidades (70ft/s, 100ft/s, 159ft/s) a diferentes ángulos de impacto.

Con los datos experimentales se concluye que los impactos con mayor velocidad siempre causaran una mayor erosión independientemente del ángulo de incidencia o fluido transportador, efecto similar sucede con las partículas pequeñas y de mayor angulosidad. Estos resultados permitieron mejorar la ecuación de erosión del E/CRC añadiendo los efectos del ángulo de impacto y el estado de la superficie de impacto: mojado o seco.

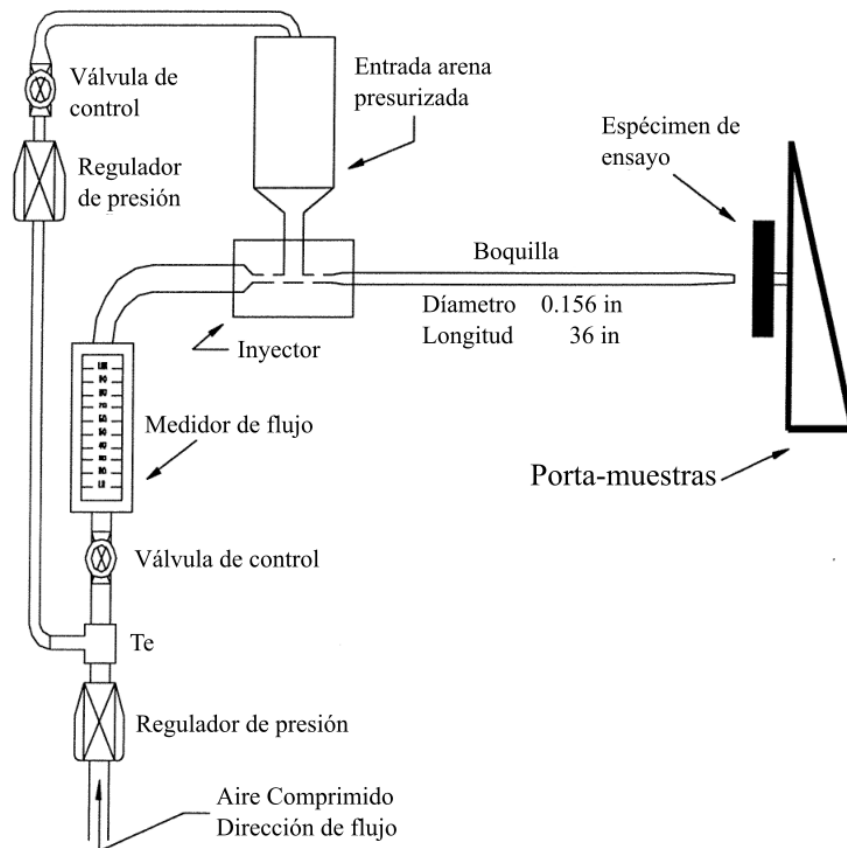


Figura 6 Esquema del aparato para ensayos de erosión. (Ahlert, 1994)

McLaury (1993) diseñó un modelo de erosión siguiendo la metodología propuesta por la API RP 14E acoplándola con un programa de modelado de flujo 2D y geometrías con simetría axial (*microCompact*) que contiene un paquete invariante con el esquema numérico de solución convencional y un paquete adaptable que consiste en subrutinas de FORTRAN diseñadas por el

usuario, con estas subrutinas construye un Modelo de Rastreo de Partículas basado en un enfoque Lagrangiano que le permite obtener la localización y velocidad de los impactos. Aplicado sobre diferentes geometrías de la industria de los hidrocarburos como: codos, tes y estranguladores para diferentes tamaños de partícula y tipos de superficie. La metodología propuesta fue comparada frente 3 bases de datos experimentales obteniendo resultados relativamente buenos a pesar de estar no estar completa.

Oka y colaboradores (1997) mediante diferentes pruebas experimentales con partículas y materiales de diferentes densidades y dureza. Formularon una ecuación semi-teórica/semi-empírica donde afirman que es posible predecir la erosión en todos los ángulos de impacto al conocer el cociente de la erosión en ángulos arbitrarios sobre la erosión en un plano normal a la superficie (E_{90}) multiplicado por un factor que representa la dependencia del ángulo de máxima erosión ($g(\alpha)$), como se ilustra en la figura 7. Concluyen que la velocidad de impacto y el tamaño de las partículas son parámetros independientes del ángulo de máxima erosión, este ángulo se verá afectado principalmente por las propiedades mecánicas del material de impacto como: la dureza inicial y el cociente de relajación de los esfuerzos (Figura 8).

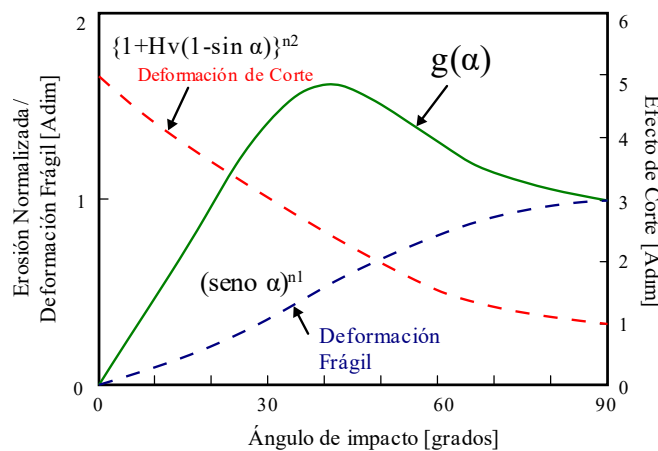


Figura 7 El concepto de erosión derivado de la deformación frágil/plástica repetida y la acción de corte. (Oka et al., 2005)

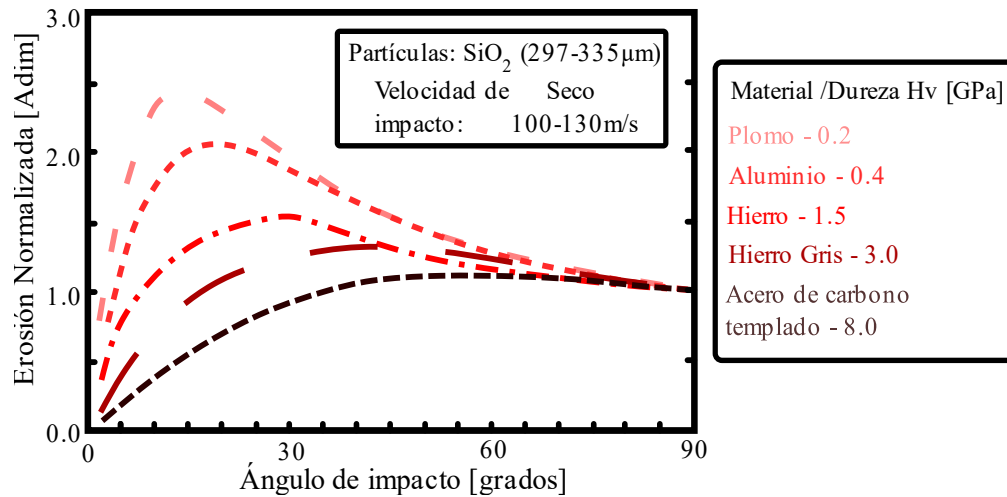


Figura 8 Tasas de erosión normalizada a velocidades de impacto de 100 y 130m/s para cinco materiales metálicos y su dureza de Vickers (Hv). (Oka et al., 1997)

Zhang y colaboradores (2007) en vista de la falta de estudios asociados a flujos líquido-sólido diseñaron dos montajes experimentales que les permitían medir la velocidad de partículas de arena en su mayoría con un diámetro de 150 μm sobre superficies planas y codos utilizando velocimetría por Laser Doppler (*LDV*, por sus siglas en inglés). Con este método se logró validar el grado de similitud entre las simulaciones y los experimentos, lo cual permitió hacer comparaciones entre la ecuación de erosión de Oka y la de Zhang (ecuación de Ahlert modificada). Los autores concluyeron que ambas ecuaciones predicen la erosión en un amplio rango de velocidades, ángulos y tamaños.

Pirouzpanah y colaboradores (2019) formularon una nueva ecuación empírica para predecir la erosión en los canales de flujo principales de una bomba electrosumergible en términos de la energía cinética de turbulencia, concentración local de sólidos y la velocidad relativa de los sólidos en la capa límite. En consecuencia, las partículas que impacten y remuevan material de la superficie deben poseer una cantidad adecuada de energía cinética de turbulencia para remover

material. Los resultados fueron validados cualitativamente con experimentos realizados en una bomba de flujo mixto y una bomba de flujo mixto con alabes divididos, en la siguiente figura se observa el montaje para este tipo de experimentos.

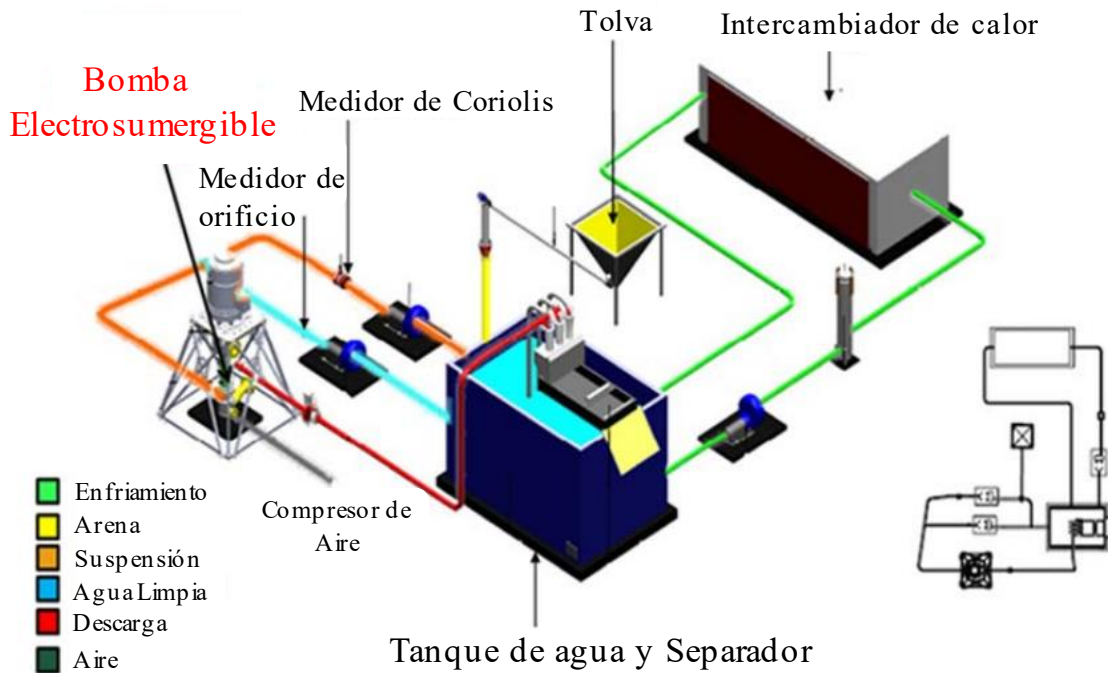


Figura 9 Montaje experimental para investigar la erosión en bombas electrosumergibles. (Pirouzpanah et al., 2019)

A continuación, se presenta un resumen de las ecuaciones de erosión producto de las investigaciones anteriormente descritas:

Tabla 1 Resumen de modelos de erosión

Autor(es)	Modelo de Erosión
(Finnie, 1960)	$\epsilon_{VP} = \frac{mV^2}{P\psi\kappa} \left(\sin(2\alpha) - \frac{6}{\kappa} \sin^2 \alpha \right) ; \tan \alpha \leq \frac{\kappa}{6} \quad 1.a$
	$\epsilon_{VP} = \frac{mV^2}{P\psi\kappa} \frac{\kappa \cos^2 \alpha}{6} ; \tan \alpha \geq \frac{\kappa}{6} \quad 1.b$

$$\epsilon_{VT} = \epsilon_{VD} + \epsilon_{VC} \quad 2$$

$$\epsilon_{VD} = 0,5 \frac{M(V \sin \alpha - K)^2}{\delta} \quad 2.a$$

(Bitter, 1963)

$$\epsilon_{VC1} = \frac{2M(V \sin \alpha - K)^2}{(V \sin \alpha)^{1/2}} \left(V \cos \alpha - \frac{C(V \sin \alpha - K)^2}{(V \sin \alpha)^{1/2}} X \right); \alpha \geq \alpha_{p0} \quad 2.b1$$

$$\epsilon_{VC2} = \frac{0,5M[V^2 \cos^2 \alpha - K_1(V \sin \alpha - K)^{3/2}]}{X}; \alpha \leq \alpha_{p0} \quad 2b.2$$

(Neilson y
Gilchrist,
1968)

$$\epsilon_{VC1} = \frac{0,5MV^2 \cos^2 \alpha}{X} + \frac{0,5M(V \sin \alpha - K)^2}{\delta}; \alpha > \alpha_{p0} \quad 3.a$$

$$\epsilon_{VC2} = \frac{0,5M(V^2 \cos^2 \alpha - V_r^2)}{X} + \frac{0,5M(V \sin \alpha - K)^2}{\delta}; \alpha < \alpha_{p0} \quad 3.b$$

(Tilly, 1973)

$$\epsilon = \hat{\epsilon}_1 \left(\frac{V}{V_{ref}} \right) \left[1 - \left(\frac{d_0}{d} \right)^{3/2} \frac{V_0}{V} \right]^2 + \hat{\epsilon}_2 \left(\frac{V}{V_{ref}} \right)^2 F_{d,v} \quad 4$$

$$\hat{\epsilon}_2 = \hat{\epsilon} - \hat{\epsilon}_1 \quad 4.a$$

$$F_{d,v} = \frac{W_0 - W}{W_0} \quad 4.b$$

(Hutchings,
1981)

$$\epsilon = 0,033 \frac{\alpha \rho_t P^{1/2} V^3}{\Omega_c^2 H_t^{3/2}} \quad 5$$

(Ahlert,
1994)

$$ER = \hat{A} V^n f(\theta) B H^{-0,59} \quad 6$$

$$f(\theta) = (a\theta^2 + b\theta)|_0^{15^\circ} + (X \cos^2(\theta) \sin(\theta) + Y \sin^2(\theta) + Z)|_{15^\circ}^{90^\circ} \quad 6.a$$

Superficie	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>X</i>	<i>Y</i>	<i>Z</i>	\hat{A} [ft/s]
Mojado	-3,34e-8	1,79e-8	1,239e-9	-1,192e-9	2,167e-9	1559
Seco	-3,84e-8	2,27e-8	3,147e-9	3,609e-10	2,532e-9	1559

	$ER_b = A_1 V_L^{1.73} BH^{-0.59}$ ó $ER_b = A_2 V_L^{1.73}$	7										
(McLaury, 1993)	$ER_{dot} = S_{dot} \times F_s \times ER_b$	7.a										
	$AF_p = F_p (D_o/D)^2 \rightarrow P_{dot} = AF_p \times ER_{dot}$	7.b										
	$E(\alpha) = g(\alpha) E_{90}$	8										
(Oka et al., 1997; Oka y Yoshida, 2005)	$g(\alpha) = (\sin \alpha)^{n1} (1 + Hv(1 - \sin \alpha))^{n2}$	8.a										
	$E_{90} = K(aHv)^{k1b} \left(\frac{V_L}{V'}\right)^{k2} \left(\frac{d_p}{d_p'}\right)^{k3}$	8.b										
	$ER = C(BH)^{-0.59} F_s V_p^n F(\theta)$	9										
(Zhang et al., 2007)	$F(\theta) = \sum_{i=1}^5 A_i \left(\frac{\theta\pi}{180}\right)^i$	9.a										
	<table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th>A_1</th> <th>A_2</th> <th>A_3</th> <th>A_4</th> <th>A_5</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>5,4</td> <td>-10,11</td> <td>10,93</td> <td>-6,33</td> <td>1,42</td> </tr> </tbody> </table>	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	5,4	-10,11	10,93	-6,33	1,42	
A_1	A_2	A_3	A_4	A_5								
5,4	-10,11	10,93	-6,33	1,42								
(Pirouzpanah et al., 2019)	$EF = (\alpha_s)^{0.08} \left(\frac{V_s}{V_{s0}}\right)^{0.07} \left(\frac{k_w}{k_{w0}}\right)^{1.25}$	10										
	$ER = A \cdot EF^2 + B \cdot EF$	10.a										

2 Bombas electrosumergibles

El ciclo de vida natural de un pozo llega a su fin de dos formas: a) cuando las presiones de fondo fluyente caen por debajo de las pérdidas de presión en la tubería o b) las pérdidas de presión en la tubería superan la presión del fondo, independientemente al caso, se debe emplear un método de levantamiento artificial. Si el objetivo es continuar produciendo, uno de los más utilizados y exitosos es el bombeo por bomba electrosumergible o *ESP* (por sus siglas en inglés), que en Colombia según datos de Campetrol a corte de mayo de 2022 existen 8475 pozos activos y de esos pozos activos el 97% está bajo algún mecanismo de levantamiento artificial, como se observa en la figura 11 aproximadamente el 50% de esos pozos producen bajo el mecanismo de bombeo electrosumergible o *ESP*.

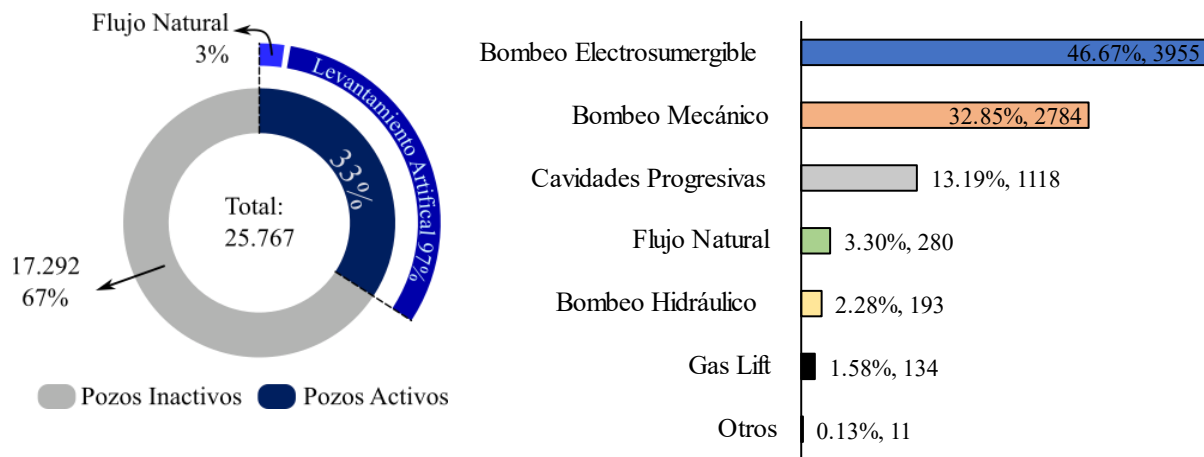


Figura 10 Balance de pozos activos en Colombia – mayo 2022. (Campetrol, 2022. (Campetrol, 2023)
 Figura 11 Distribución de Sistemas de Levantamiento Artificial – mayo 2023)

Según Hirschfeldt y Bertomeu (2014) las bombas electrosumergibles no son como los demás métodos de levantamiento artificial que su creación no se le atribuye a nadie en algún tiempo determinado, este mecanismo fue inventado por el ruso Armais Arutunoff en la década de

1910, un año después empezaría la compañía “*Russian Electrical Dynamo of Arutunoff*” (REDA, por sus siglas) que hasta la fecha es una marca conocida globalmente.

Actualmente las principales aplicaciones incluyen: operaciones de inyección de agua, producción de líquidos, operaciones offshore y cualquier otro caso donde exista electricidad y grandes volúmenes para ser producidos o transportados (Takacs, 2009).

2.1 Sistema de producción

El sistema convencional o clásico se ilustra en la figura 12. La unidad ESP se baja con la tubería de producción y se sumerge en el fluido donde la energía es transmitida por un cable conductor que viaja por fuera de la tubería.

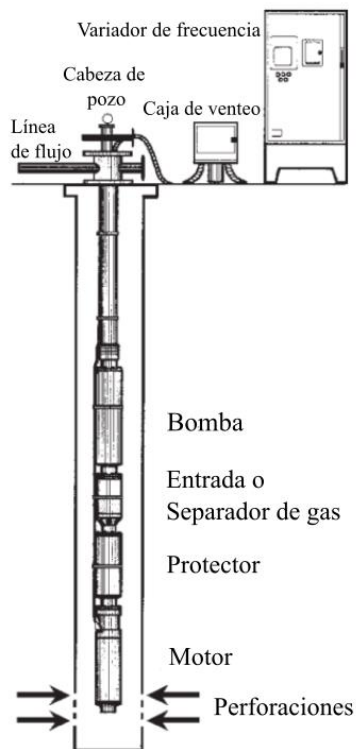


Figura 12 Instalación convencional de una unidad ESP. (Takacs, 2009)

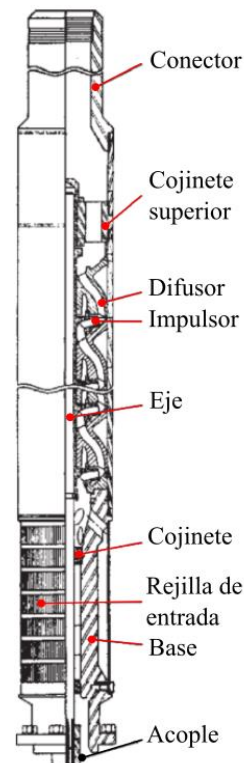


Figura 13 Componentes principales de una bomba electrosumergible. (Takacs, 2009)

El componente principal de la unidad *ESP* es la bomba electrosumergible y para comprender el diseño y análisis del sistema es necesario conocer sus componentes, en la figura 13 se ilustran las partes dentro una *ESP* con una bomba de flujo mixto.

Como se puede observar en la figura 13, el eje de la bomba está conectado al separador de gas o al protector mediante un acoplamiento mecánico este es accionado por el motor eléctrico que lo hace girar y le transfiere la energía a la bomba electrosumergible donde la velocidad fluido se incrementa para ser parcialmente convertida en presión y así los fluidos son succionados por la rejilla de entrada atravesando el interior de la unidad hasta la superficie, los casquillos o cojinetes radiales están distribuidos a lo largo de la unidad y proveen de apoyo a altas velocidades de rotación, también se pueden agregar cojinetes axiales que amortiguan las fuerzas verticales de la bomba sin embargo la mayoría de estas fuerzas son absorbidas por el protector (Takacs, 2009).

El núcleo de una *ESP* se compone de una serie de etapas consecutivas que le otorgan la capacidad de generar altos gradientes de presión y levantar altos volúmenes de flujo, cada etapa está compuesta de un impulsor y un difusor. El impulsor o rotor que está acoplado al eje y apoyado por los cojinetes, posee una serie de alabes (hidroalas) distribuidas radialmente que al girar obliga al líquido a un movimiento rotatorio incrementando su energía cinética, a la salida del rotor lo recibe el difusor o estator y este reduce su velocidad transformando la energía cinética en presión. Sobre este diseño se pueden agregar otros componentes opcionales que reducen la eficiencia de la bomba, pero aumentan su vida útil, como se observa en la figura 14 (Stepanoff, 1957; Takacs, 2009).

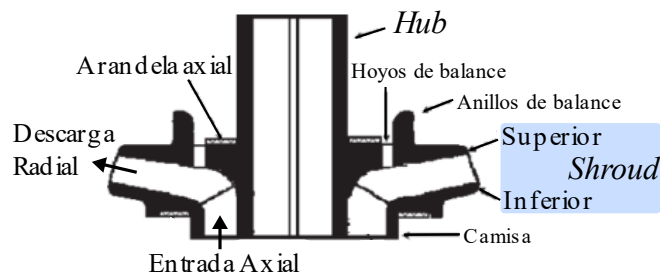


Figura 14 Nomenclatura de las partes de un impulsor, también aplican para el difusor. (Takacs, 2009)

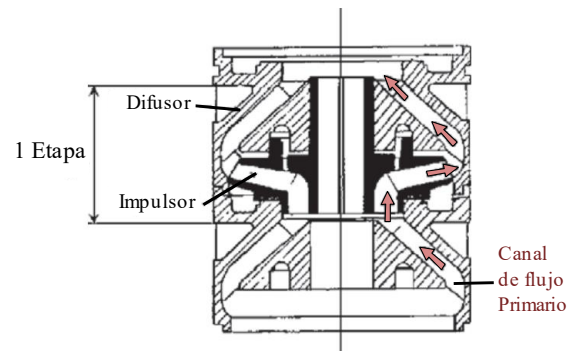


Figura 15 Etapa de una bomba electrosumergible y el canal de flujo primario. (Takacs, 2009)

2.2 Características de las bombas

Las conversiones de energía dentro de una bomba electrosumergible están gobernadas por la ecuación general de turbina de Euler que está basada en la ecuación de conservación de la energía entre dos puntos en un fluido fluyendo. Estas establecen que el cambio en contenido de energía en de un fluido es igual al trabajo hecho en el fluido. El fluido dentro de una bomba puede tener tres formas de energía: Potencial, cinética y de presión (Takacs, 2009).

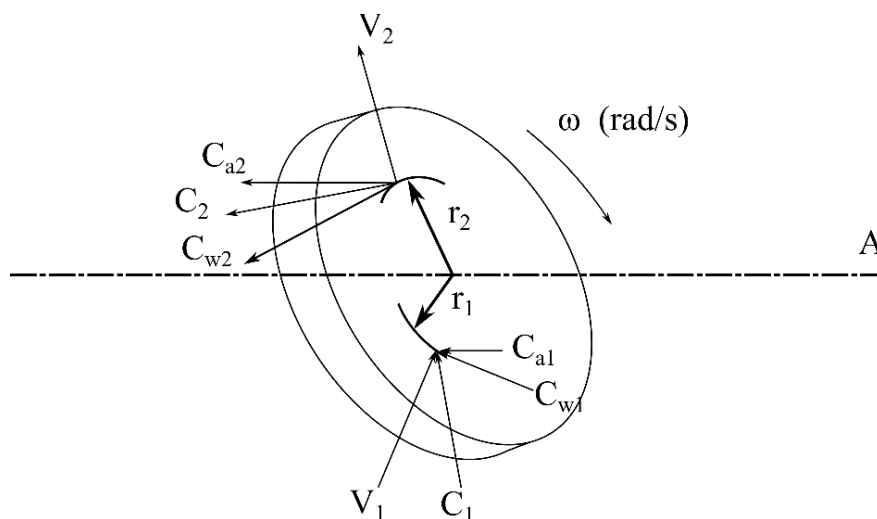


Figura 16 Componentes de velocidad para un rotor generalizado. (Stepanoff, 1957)

En la figura 16 se tienen los componentes que forman la base para la ecuación general de turbina de Euler, donde los subíndices 1 y 2 representan la entrada y salida de material/fluido

respectivamente, también; V_i = velocidad; r_i = radio; C_{ai} = componente de velocidad axial paralelo al eje de rotación A ; C_{wi} = componente de velocidad tangencial en la dirección normal al radio y C_{ri} = componente de velocidad radial en dirección normal al eje de rotación A . Debido a que C_{wi} incluye el término rotacional el momento se puede expresar como:

$$\Delta I = C_{w1}r_1 - C_{w2}r_2 \quad 11$$

Bajo la segunda ley de Newton, condiciones de flujo estacionarias y con un flujo másico unitario (m), el torque (τ) sería igual a:

$$\tau = m(C_{w1}r_1 - C_{w2}r_2) \quad 12$$

Luego el trabajo hecho por el fluido es igual al producto de el torque y la velocidad angular (ω), pero $U = \omega r$, aquí U representa la velocidad del rotor, por lo tanto:

$$W = C_{w1}U_1 - C_{w2}U_2 \quad 13$$

Finalmente, el trabajo (W) es la energía transferida por unidad de masa y la ecuación 13 se conoce como la ecuación de Turbina de Euler, que utilizando triángulos de velocidad se pueden extender los términos para generalizar su uso en turbomáquinas de geometría arbitraria.

Según Stepanoff (1957) algunas características básicas de las bombas que hay que tener en cuenta son:

- a) **Capacidad:** Es el volumen de líquido a bombear y generalmente se mide en galones por minuto, cuando se hace referencia a producción de petróleo se asocia con barriles por día.
 - i. La altura a la cual se puede llevar un líquido se llama “cabeza” (*head*) y se mide en pies, este parámetro no depende de la gravedad específica del fluido siempre y cuando la densidad del fluido a bombear sea menor que la del agua.

- b) **Cabeza total dinámica:** El método para determinar la cabeza total dinámica de una bomba varía según el diseño, cabe anotar que cuando una bomba se emplea para generar presión este parámetro se puede expresar como pies de fluido o libra por pulgada cuadrada. En la industria de los hidrocarburos se suele usar la siguiente formula.

$$H = \frac{2.31 \cdot p}{\gamma_l} \quad 14$$

Donde: p = presión [psi]; γ_l = gravedad específica del líquido producido.

- c) **Eficiencia:** El grado de perfección hidráulica y mecánica de una bomba se juzga por su eficiencia, se define como la relación entre la energía de salida de la bomba y la energía de entrada aplicada al eje de la bomba. Este último término se conoce como el “*Brake Horsepower*” y se determina de manera experimental.

$$Eficiencia = \frac{Q\gamma H}{550 \times bhp} \quad 15$$

Donde: Q = capacidad [ft³/s], γ = gravedad específica del fluido y bhp = Brake Horsepower

- d) **Curvas de desempeño:** Es la variación de cabeza versus capacidad a una velocidad de rotación constante (en revoluciones por minuto) formando una curva característica, también existen curvas características para la eficiencia y el *brake horsepower*. Asumiendo una eficiencia constante para cada punto se pueden derivar unas relaciones entre estos parámetros conocidas las Leyes de Afinidad.

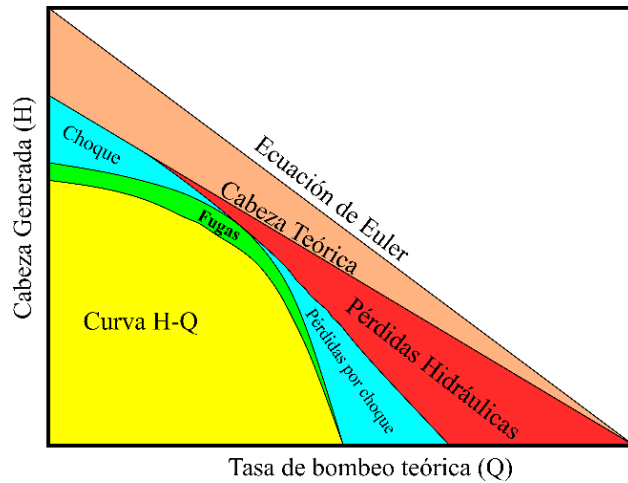


Figura 17 Derivación de la curva de desempeño H-Q.

(Takacs, 2009)

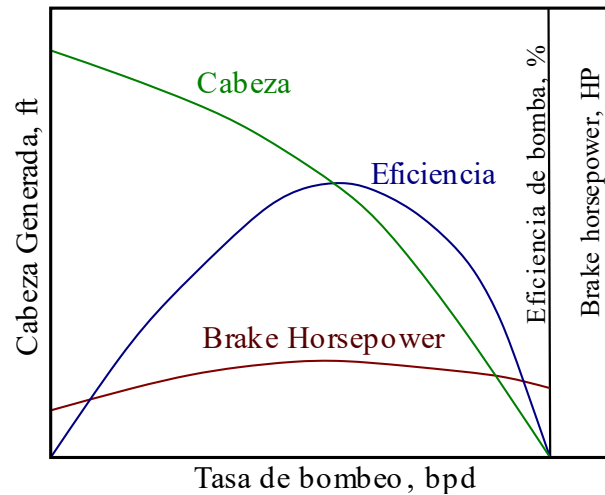


Figura 18 Representación esquemática de las curvas

de desempeño o características de una bomba.

(Takacs, 2009)

En la figura 17 se ilustran las pérdidas de energía por choque, teórica y de fugas que sufre el fluido dentro de una bomba electrosumergible que resultan en la forma de la curva característica de H-Q.

2.3 Clasificación y aplicación de bombas electrosumergibles.

Las bombas utilizadas en la industria de los hidrocarburos se pueden clasificar en dos grupos según Takacs (2009): a) bombas de desplazamiento positivo; como el bombeo por cavidades progresivas o BCP y b) bombas rotodinámicas o centrifugas; que son las implementadas dentro la unidad ESP.

La gran variedad de bombas centrifugas construidas para un amplio rango de aplicaciones puede reducirse a unos pocos tipos hidráulicos fundamentales, la diferencia en los detalles de diseño viene dictada sobre todo por la aplicación y los requisitos mecánicos. A continuación, se presentan los diferentes tipos de bombas centrifugas según su velocidad específica, capacidad y cabeza generada.

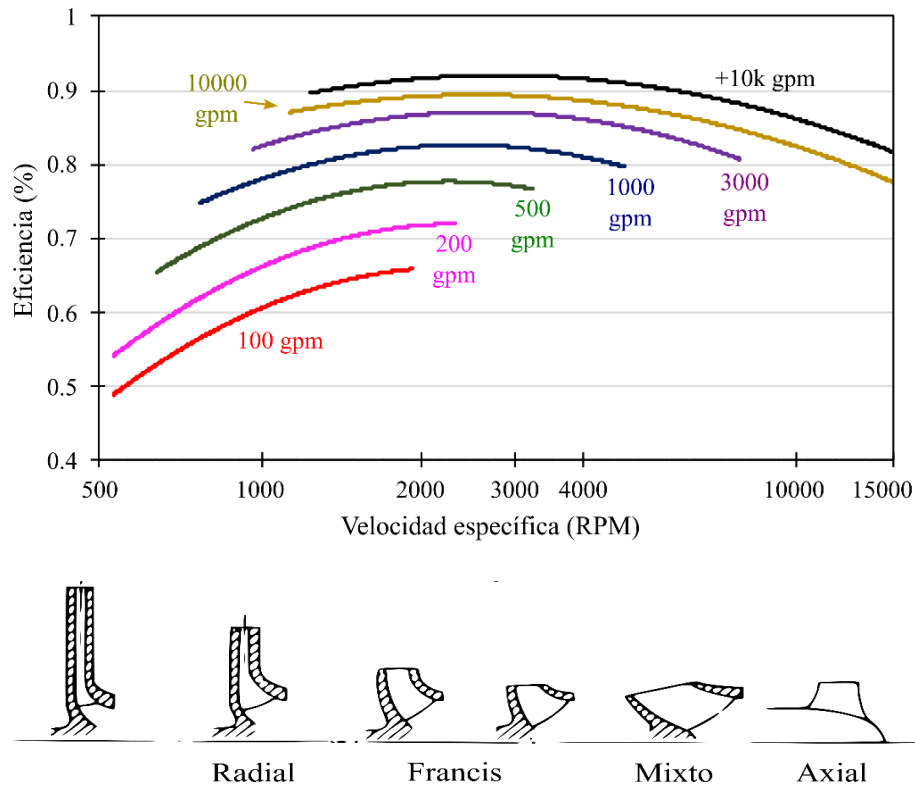


Figura 19 Eficiencia versus velocidad específica y tipo de bomba. (Stepanoff, 1957)

3 Bombeo Multifásico: Una oportunidad para la producción offshore

En 1850 debido a la creciente demanda de transporte de crudo en las plataformas offshore del mar del Norte, fue necesario diseñar una bomba que fuese capaz de (Gié et al., 1992):

- Manejar en *Offshore* u *Onshore* un diferencial de presión entre 20-50 bares.
- Altos volúmenes de crudo para subsanar el límite económico, inicialmente 40KBPD.
- Colocada en condiciones de flujo de cabeza de pozo, sin ningún tipo de separación la bomba debe ser capaz de transportar agua, petróleo y gas.

- Debido a los altos volúmenes de gas (95%) en flujo estable, no se puede asegurar que no se alcance el máximo porcentaje durante las operaciones de encendido y apagado, por ello la bomba debe aceptar baches de gas o gas puro.
- Los componentes de la bomba deben ser capaces de resistir los parámetros convencionales que acompañan a los afluentes: temperaturas de 130°C, Sal, H₂S, CO₂ y arena.

En 1978 Total, StatOil y el IFP (Instituto Francés del Petróleo) decidieron iniciar el proyecto Poseidon, fundado por la Unión Europea y que resulto en un prototipo llamado P300 diseñado para manejar volúmenes de 250 m³/h de gas y petróleo (aproximadamente 37KBPD), con fracciones volumétricas de gas de hasta 91% y accionado por un motor eléctrico de 500kW (Falcimaigne et al., 2002). Lo que les permitió transportar crudo entre las facilidades con distancias entre los 15 y 20km para así reducir los costos de desarrollo en *offshore*.

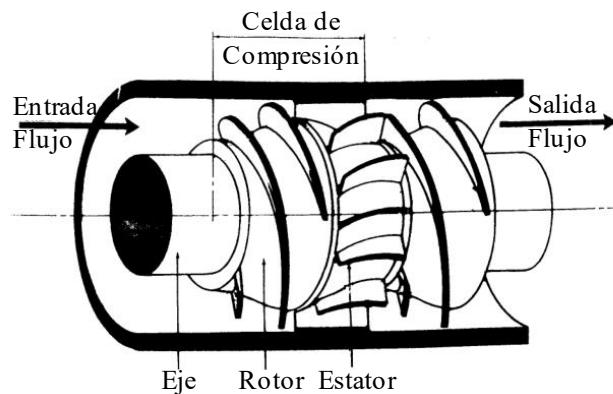


Figura 20 Prototipo P300, celda helico-axial de compresión. (Gié et al., 1992)

La tecnología desarrollada por el proyecto Poseidon se conoce como bomba multifásica helico-axial y en la figura 20 se observa que se compone de un rotor y estator con un diseño híbrido que combina las características de las bombas centrífugas y los compresores multietapa.

El número de etapas depende de la cabeza necesaria, pero pueden llegar hasta 15 para operaciones de transporte o *Boosting* (Falcimaigne et al., 2002). En vista de la muy baja cabeza producida por el impulsor de este tipo de bomba, el arrastre o pérdidas por fricción cobran mayor importancia que en las bombas de flujo mixto o radial. Por esa razón un alto grado de aerodinamismo y pulido en los alabes del impulsor es requerido para alcanzar la mayor eficiencia (Stepanoff, 1957). Para satisfacer esos requerimientos el perfil de los alabes toma la forma de las aeroalas, de forma que estas fueron probadas muchas veces y evitan la separación de fases y facilitan el transporte de gas.

4 Problemas más comunes en las bombas electrosumergibles

Durante la larga historia de las aplicaciones de las bombas electrosumergibles, diferentes soluciones como la anterior han surgido, sin embargo, existen dos problemas que reducen la vida útil de la unidad ESP y aumentan los costos de mantenimiento independientemente del tipo de bomba: La producción de arena y las altas RGA (relación gas-aceite), especial cuidado será puesto en la primera, sin quitarle relevancia a la segunda. Según afirman Chira y colaboradores (2017).

... la presencia de gas disuelto en la columna de fluido no es necesariamente un problema negativo, el gas reduce el gradiente de densidad del fluido (densidad de la mezcla) en la tubería de producción lo que reduce la carga sobre la bomba con un efecto similar al Gas Lift, es decir, que la bomba requerirá menor presión de descarga cuanto más gas contenga. Cuando se manejan bombas electrosumergibles con altos RGA's el verdadero desafío es mover el gas desde el anular hacia la tubería de producción sin ningún efecto adverso.

En la siguiente figura se ilustran los diferentes patrones de flujo que se desarrollan en una bomba radial según aumenta la concentración de gas.

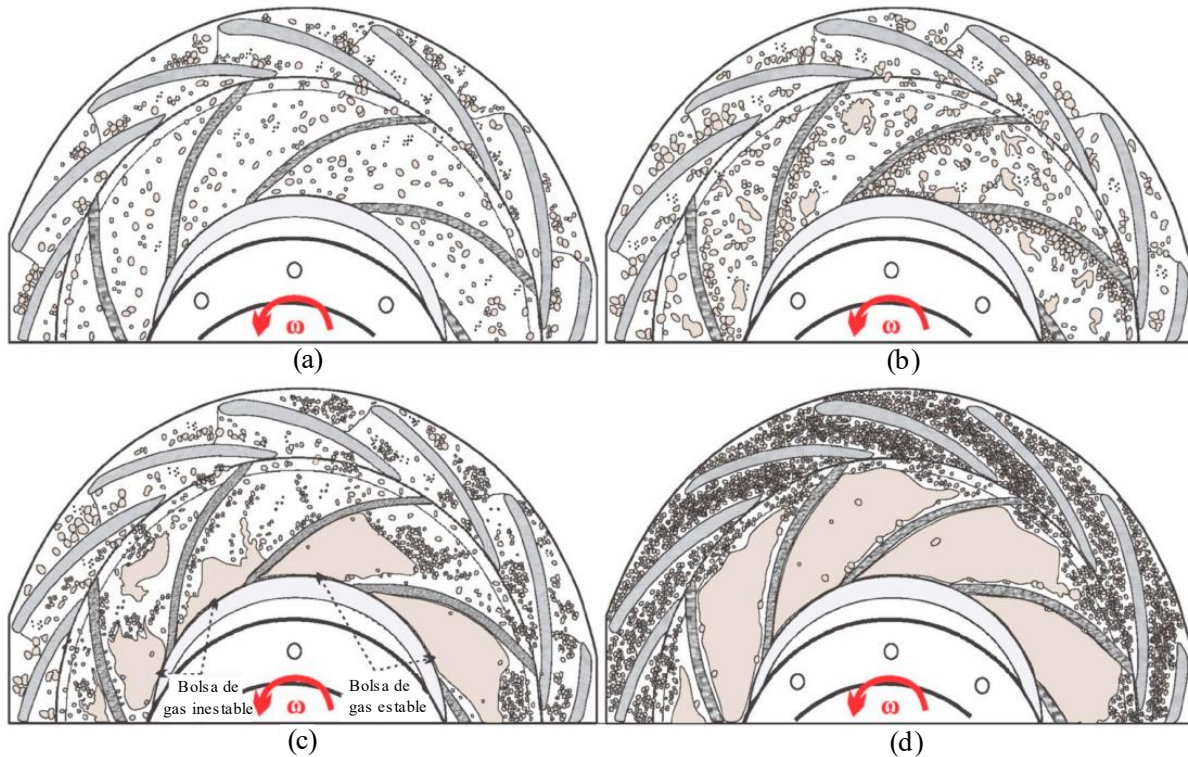


Figura 21 Estructuras de flujo Gas-Líquido en los canales de un impulsor y rotor. a) Flujo burbujeante, b) Flujo aglomerado burbujeante, c) Bolsillos de gas, d) Flujo anular. (Ali et al., 2021)

Dicho proceso resulta en un fenómeno conocido como *Gas Locking*; donde los canales de flujo se llenan de gas reduciendo la eficiencia de la bomba al operar sin líquidos, aumenta su temperatura, se reduce la capacidad de lubricación y se pierde producción en superficie (Chira et al., 2017). Afortunadamente en el mercado existen muchas soluciones para este tipo de problemas como son los separadores de gas rotatorios o su contraparte más eficiente y de mayor escala, los Manipuladores de Gas (*Gas Handlers*).

Los manipuladores de gas son un dispositivo especial conectado aguas arriba de la bomba electrosumergible que le permiten incrementar su tolerancia al gas libre (Takacs, 2009), estos

dispositivos son “pequeñas” bombas electrosumergibles en serie que proveen una mezcla homogénea de gas y líquido con tamaños de burbuja pequeños (Figura 22.a) a la bomba principal alterando la distribución de presiones y disminuyendo la aparición de bolsas de gas en el anular de la bomba (Figura 22.d) mitigando el *Gas Locking*.

Tabla 2 Tecnologías actuales para el bombeo de mezclas tipo gas-líquido y características importantes.

Tipo de bomba	Mecanismo de bombeo	Máxima Fracción Vol. Gas	Máxima Capacidad (Gas-Líquido)	Máx. Presión	Máx. Temperatura
Helico-Axial (Poseidon)	Centrífuga	75%	9.000 B/D	-	450°F
Multi-Hoja (Baker Hughes - MVP)	Centrífuga	70%	18.000 B/D	-	410°F
Doble Tornillo (CAN-K)	Desplazamiento Positivo	98%	-	~3.500 psi	662°F

Nota. Adaptado de Ali et al., (2021)

Los fluidos producidos durante las operaciones convencionales de producción muy a menudo contienen partículas sólidas y el efecto abrasivo que estas tienen sobre la unidad ESP pueden causar daños en la integridad del sistema.

Según afirman Delgado y colaboradores (2022)

... el control de sólidos es uno de los aspectos más importantes de la evaluación, si un proyecto es viable o no estará definido por las opciones de control de sólidos en el mercado, especialmente en pozos con altas tasas de producción donde el ESP es uno de los métodos más utilizados.



Figura 22 Difusor (derecha) e Impulsor (izquierda) mostrando signos de acumulación de arena y erosión de los álabes. (Bonilla y Chen, 2019)

La producción de arena es un problema difícil de evitar, por eso muy a menudo el equipo de control de sólidos aplica filtros o completamientos con grava que se usan para mitigar el problema, aun así, estos incrementan el riesgo de taponamiento y agregan restricciones de flujo, por consiguiente, las ganancias de producción dependerán de la fiabilidad (cuantificada en “Tiempo promedio entre Fallas” o *MTBF*, por sus siglas en inglés) y la vida útil estimada de la bomba. El desempeño de una unidad ESP bajo condiciones de erosión requiere obligatoriamente de la cuantificación de las tasas de erosión. (Bonilla y Chen, 2019)



Figura 23 Impulsor nuevo (izquierda) e impulsor erosionado (derecha). (Bonilla y Chen, 2019)

Entonces mientras más se logre comprender el comportamiento de las tasas de erosión dentro de una bomba electrosumergible, mejor intuición se tendrá con respecto al desempeño de esta en el futuro.

5 Modelado de flujo

Como se ha visto en los apartados anteriores los flujos industriales están compuestos macroscópicamente por una compleja mezcla de fases, en este tipo de flujos la fase primaria debe ser continua y la principal del flujo. El resto de las fases, ya estén de forma dispersa, interpenetradas en la primaria, o de forma continua definiendo una interfaz de separación, se denominan fases secundarias (Brennen, 2005).

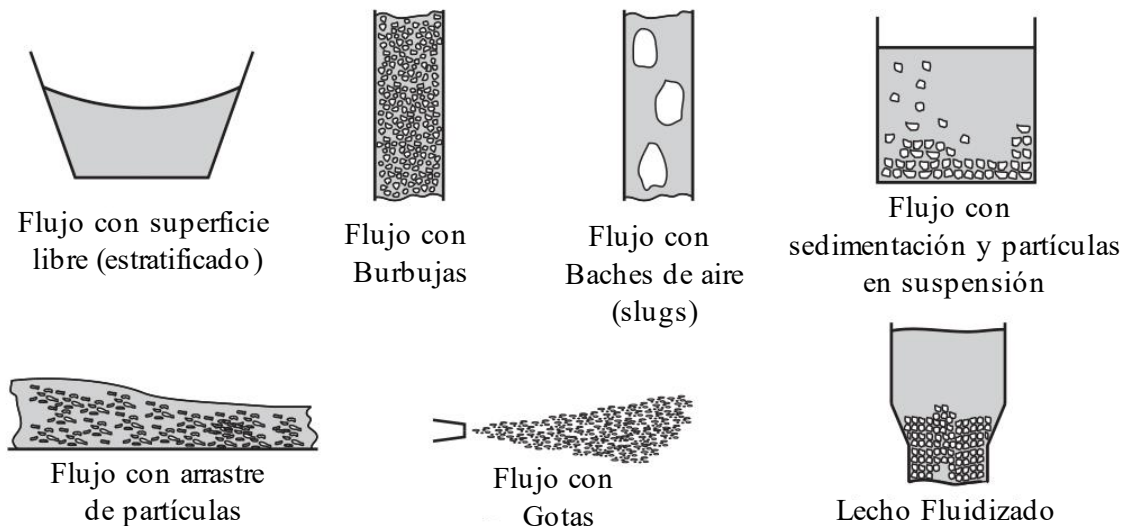


Figura 24 Tipos de flujo multifásico. (Oro, 2012)

Al no existir un modelo lo suficiente preciso para modelar los efectos de flujo que ocurren en los ejemplos de la figura anterior, con los años se han desarrollado 4 modelos fundamentales para el estudio numérico de flujos multifásicos.

- a. Modelo de fase Discreta (*DPM – Euler Lagrange*)
- b. Modelo Euleriano (*Euler*)
- c. Modelo de Mezcla (*Mixture*)
- d. Modelo de Volumen de Fluido (*VOF*)

Cada uno de ellos es apropiado para distintas situaciones, la siguiente tabla establece rangos de utilización.

Tabla 3 Clasificación y características de modelos multifase.

Características generales	Fases Inter penetradas			Fases inmiscibles
	DPM	Euleriano	De mezcla	VOF
Régimen de Flujo	Flujos con burbujas, con gotas o partículas en suspensión	Flujos con burbujas, con gotas, partículas en suspensión, lechos fluidizados y flujo con arrastre de partículas	Flujos con burbujas, con gotas y flujo con arrastre de partículas	Flujos estratificados, con superficie libre y flujos con bolsas de aire
Densidad de partículas	Baja a moderada	Baja a alta	Baja a moderada	Alta a baja
Fracción de volumen (fase discontinua)	Diluida (<10%)	Diluida a Densa	Diluida a moderadamente densa	Diluida a densa
Cierre Turbulento	Débil a fuerte acoplamiento entre fases	Débil a fuerte acoplamiento entre fases	Débil acoplamiento entre fases	Débil a moderado acoplamiento entre fases
Número de Stokes	Aplicable para cualquier número	Aplicable para cualquier número	Solo si $Stk \ll 1$	Aplicable para cualquier número
Ejemplos de utilización	Ciclones, Esprays,	Flujos con mucha carga de	Hidrociclones, reactores de	<i>Sloshing</i> , <i>Film boiling</i> , llenado

aerosoles, separación partículas	de con arrastre de solidos	partícula, flujos columna, suspensiones solidas	de moldes, rotura de gotas
--	----------------------------------	--	----------------------------------

Nota. Adaptado de Oro (2012)

Según la literatura (McLaury, 1993; Pagalthivarthi et al., 2011; Zhu et al., 2018a) el modelo de fase discreta es una de las mejores técnicas para analizar los flujos con arrastre de partículas o suspensiones en un dominio computacional y determinar la erosión en diferentes materiales o geometrías.

En este modelo se resuelven las ecuaciones de transporte para la fase continua junto con la simulación de una fase secundaria discreta desde un punto de vista Lagrangiano, esto quiere decir que la fase secundaria se implementa como un numero finito y muy grande de partículas esféricas (Oro, 2012). La ecuación que describe el movimiento de una partícula en un fluido para la dirección x es:

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + \frac{g_x(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_x \quad 16$$

Donde F_x es el termino de aceleración adicional (fuerza/unidad de masa) que incluye las fuerzas por buoyancia y por efectos rotacionales, g_x es el componente x de la gravedad y $F_D(u - u_p)$ es el arrastre/fricción por unidad de masa y es igual a:

$$F_D = \frac{18\mu C_D Re}{\rho_p d_p^2} \frac{1}{24} \quad 17$$

Aquí, u es la velocidad de la fase del fluido; u_p es la velocidad de partícula, μ es la viscosidad molecular del fluido, ρ es la densidad del fluido, ρ_p es la densidad de la partícula, d_p es el diámetro de partícula y Re es el número de Reynolds relativo que se define como:

$$Re \equiv \frac{\rho d_p |u_p - u|}{\mu} \quad 18$$

Finalmente, atendiendo el número de Stokes este posee aplicabilidad cuando el problema multifásico analiza fases dispersas y establece una razón entre el tiempo de relajación de partícula (τ_p) y la escala temporal de flujo (τ_c), es decir:

$$Stk = \frac{\tau_p}{\tau_c} \approx \frac{U \rho_p d_p^2}{L 18\mu} \quad 19$$

Con esto, si $Stk \ll 1$ las partículas seguirán las líneas de corriente de la fase primaria, mientras que $Stk > 1$ las partículas son capaces de moverse de forma independiente sin importar el comportamiento del flujo primario.

6 Dinámica de Fluidos Computacional

Las ecuaciones diferenciales parciales (EDP) en general, o las ecuaciones que gobiernan la dinámica de fluidos en particular se pueden clasificar en tres categorías: elípticas, parabólicas e hiperbólicas. Las aplicaciones físicas de cada una de estas se pueden ilustrar con la velocidad de flujo relativa (u) con respecto a la del sonido (a), es decir, el número de Mach (Ma).

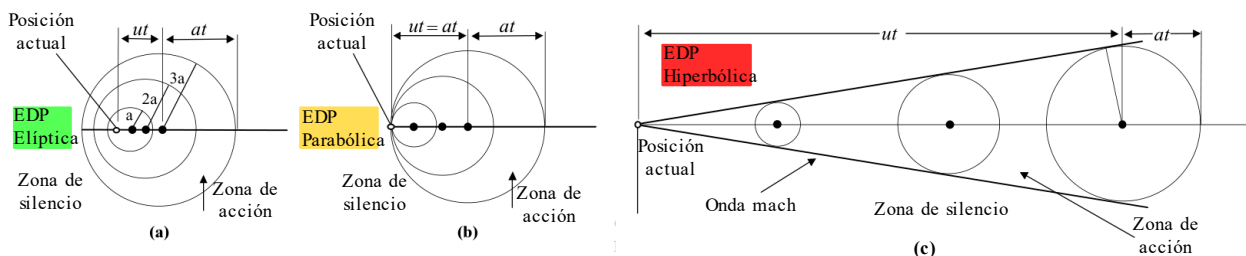


Figura 25 (a) Flujo subsónico $u < a$, (b) Flujo sónico $u = a$, (c) Flujo Super sónico $u \gg a$. Cada uno con su respectiva ecuación que describe las perturbaciones. (Chung, 2002)

La mayoría de las ecuaciones en la dinámica de fluidos son Ecuaciones Diferenciales Parciales (EDP) de Segundo Orden que siguen la forma de la siguiente ecuación en dos dimensiones.

$$A \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + B \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} + C \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + D \frac{\partial u}{\partial x} + E \frac{\partial u}{\partial y} + Fu + G = 0 \quad 20$$

Donde A, B, C, D, E, F y G son constantes o funciones de variables dependientes o independientes. Aquí, para asegurar la continuidad de u se hace, $u_x \equiv \partial u / \partial x$ e $u_y \equiv \partial u / \partial y$, derivando a ambos lados y aplicando regla de la cadena se obtiene:

$$du_x = \frac{\partial u_x}{\partial y} dy = \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} dy \quad 21$$

$$du_y = \frac{\partial u_y}{\partial x} dx = \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} dx \quad 22$$

Con este modelado u forma una superficie de solución por encima o por debajo del plano $x - y$ y la pendiente dy/dx representa la superficie de solución (conocida como curva característica).

Las ecuaciones (20, 21, 22) se pueden combinar para formar una ecuación matricial.

$$\begin{bmatrix} A & B & C \\ dx & dy & 0 \\ 0 & dx & dy \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{xx} \\ u_{xy} \\ u_{yy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H \\ du_x \\ du_y \end{bmatrix} \quad 23$$

Donde,

$$H = - \left(D \frac{\partial u}{\partial x} + E \frac{\partial u}{\partial y} + Fu + G \right) \quad 24$$

Y según Chung (2002), debido a que pueden existir discontinuidades en las segundas derivadas de la variable dependiente a lo largo de la superficie de solución u , estas derivadas son

indeterminadas. Esto sucede cuando el determinante de la matriz coeficientes en la ecuación matricial 23 es igual a 0.

$$\begin{vmatrix} A & B & C \\ dx & dy & 0 \\ 0 & dx & dy \end{vmatrix} = 0 \quad 25$$

Aplicando el determinante se obtiene.

$$A \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 - B \left(\frac{dy}{dx} \right) + C = 0 \quad 26$$

Resolviendo esta ecuación cuadrática se obtiene la ecuación de las características para cada tipo de flujo en el espacio físico o dominio computacional.

$$\frac{dy}{dx} = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad 27$$

Y según el valor del determinante en la ecuación 27 las curvas características podrán ser reales o imaginarias. Si las curvas características resultantes son reales, las perturbaciones (en un espacio físico, ejemplificado en la figura 25) se propagan sobre una región finita. Por ende, las EDP de segundo orden se clasifican de la siguiente manera:

- a) Elíptica si $B^2 - 4AC < 0$
- b) Parabólica si $B^2 - 4AC = 0$
- c) Hiperbólica si $B^2 - 4AC > 0$

Las ecuaciones de conservación de la dinámica de fluidos computacional; continuidad, momento y energía, están matemáticamente formuladas bajo los criterios anteriormente expuestos, cada una de esas configuraciones está asociada a un método de solución y preprocesamiento diferente.

Luego, en función de las condiciones de contorno que cierran el dominio computacional y fijen el valor de las variables en las zonas extremas, tanto en tiempo como en espacio, se pueden distinguir dos tipos de comportamiento:

- a) **Los problemas de equilibrio, o Estacionarios:** Aquellos casos de un flujo estacionario cuya solución no varía en el tiempo, también conocidos como problemas de contorno donde generalmente se pueden modelar usando una EDP elíptica, por ejemplo: La ecuación de Laplace o Ley de Fourier.
- b) **Los problemas transitorios:** Son todo lo contrario a los problemas de equilibrio, su solución depende del tiempo y evoluciona con él, también llamados problemas de condición inicial por el hecho de que es necesario definir el estado en $t = 0$. Las EDP parabólicas e hiperbólicas modelan estos flujos, por ejemplo: La ecuación de Onda.

6.1 Derivada Material

La derivada material (de Lagrange, de partícula, entre otros) es un concepto útil que ayuda a simplificar cálculos, y se basa en el principio de conservación la de masa de una partícula infinitesimalmente pequeña que fluye a través de un campo vectorial (ver figura 26). Físicamente es igual a la tasa de cambio instantánea de una propiedad ϕ más la derivada convectiva, que es la tasa de cambio de una propiedad ϕ debido al movimiento del elemento de fluido de una posición a la otra donde las propiedades son espacialmente diferentes. (Anderson, 1995)

$$\frac{D\phi}{Dt} \equiv \frac{\partial\phi}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla)\phi \equiv \frac{\partial\phi}{\partial t} + u \frac{\partial\phi}{\partial x} + v \frac{\partial\phi}{\partial y} + w \frac{\partial\phi}{\partial z} \quad 28$$

Donde, D/D_t es la derivada material, $\frac{\partial}{\partial t}$ es la derivada local o instantánea y $(\vec{V} \cdot \nabla)$ es la derivada convectiva.

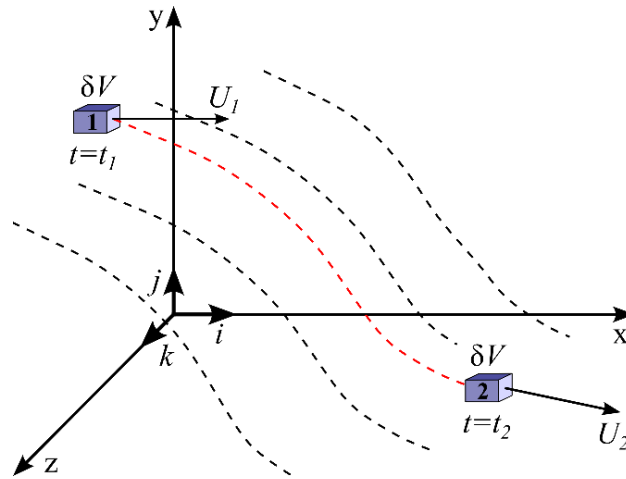


Figura 26 Modelo de elemento infinitesimal de flujo moviéndose en un campo de flujo. (Anderson, 1995)

6.2 Ecuación de continuidad

Primero se considera un volumen de control fijo sobre el cual la masa se asume constante e igual a δm , el volumen de este elemento estará dado δV (figura 26) entonces:

$$\delta m = \rho \delta V \tag{29}$$

Ya que la masa se conserva podemos decir que su derivada material es igual a cero.

$$\frac{D(\delta m)}{Dt} = 0 \tag{30}$$

Combinando las ecuaciones 29 y 30 se obtiene:

$$\frac{D(\rho \delta V)}{Dt} = \delta V \frac{D\rho}{Dt} + \rho \frac{D(\delta V)}{Dt} = 0 \tag{31}$$

Que entonces será igual.

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \left(\frac{1}{\delta V} \frac{D(\delta V)}{Dt} \right) \tag{32}$$

El siguiente paso requiere conocer la forma diferencial de la derivada convectiva, que se obtiene al integrar el flujo sobre un volumen de control (ver figura 27):

$$\nabla \cdot \vec{V} = \frac{1}{\delta V} \frac{D(\delta V)}{Dt} \quad 33$$

Se reemplaza el termino convectivo:

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad 34$$

La ecuación 34 se conoce la Ecuación de Continuidad en forma No Conservativa, que por simplicidad al momento de su discretización se emplea la forma Conservativa (Ecuación 35):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad 35$$

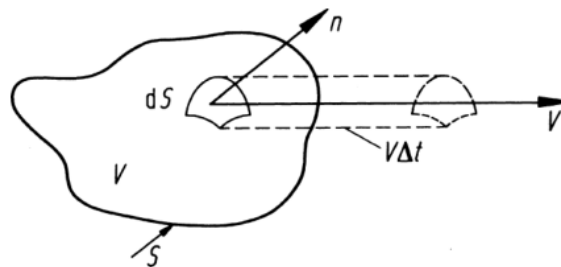


Figura 27 Volumen de control en movimiento empleado para la interpretación de $\nabla \cdot \vec{V}$. (Anderson, 1995)

6.3 Ecuación de momento

Para derivar la ecuación de momento se emplea de nuevo el modelo de flujo de la figura 26 y la segunda Ley de Newton cuyo balance de fuerzas resultante se muestra a continuación.

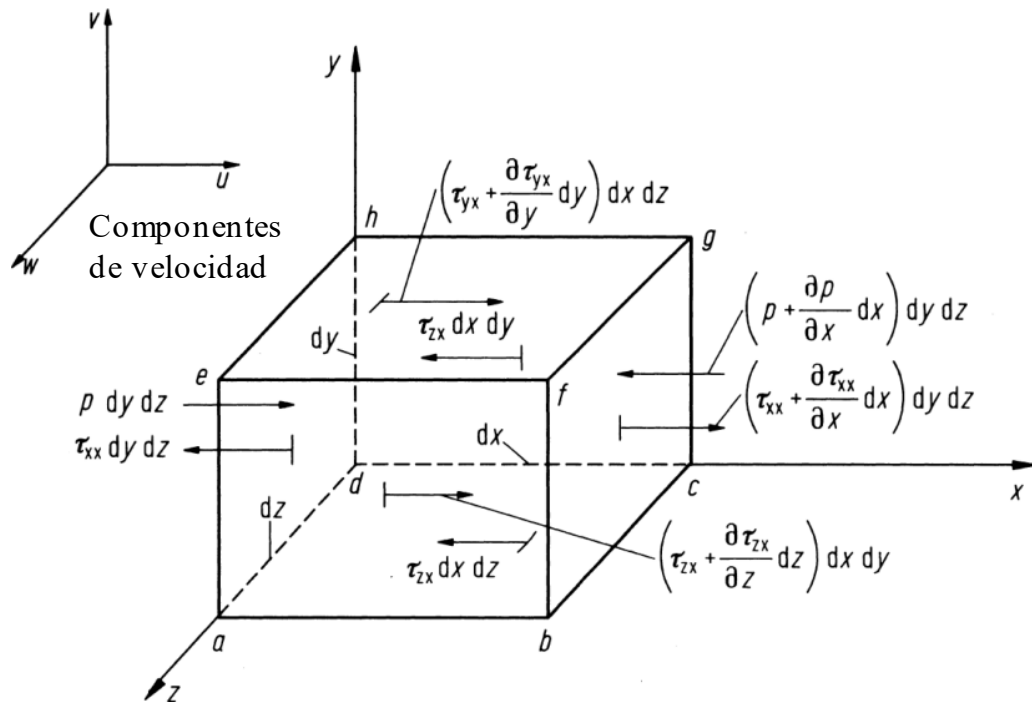


Figura 28 Balance de fuerzas en la dirección x sobre el elemento de fluido infinitesimalmente pequeño. (Anderson, 1995)

Por simplicidad se manejarán únicamente los balances en la dirección x ya que al ser una relación de escalares se puede expandir de igual forma en cada dimensión. Aplicando sobre el elemento la segunda ley de Newton:

$$F_x = ma_x \quad 36$$

Donde F_x y a_x son los componentes escalares x de la fuerza y aceleración respectivamente.

Para poder continuar es necesario especificar dos definiciones:

- a) **Fuerzas de cuerpo:** Aplican sobre el volumen total del elemento, por ejemplo, la gravedad y campos electromagnéticos.
- b) **Fuerzas de superficie:** Aplican directamente sobre la superficie del elemento, como la distribución de presiones que ejerce el fluido circundante y las distribuciones de esfuerzos tangenciales y normales producto de la fricción o empuje.

Ahora usando \vec{f} como la fuerza que actúa por unidad de masa en el elemento y su volumen (dx, dy, dz) se tiene:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Fuerzas de cuerpo} \\ \text{en la dirección } x \end{array} \right\} = \rho f_x (dxdydz) \quad 37$$

Los esfuerzos normales y tangenciales en el elemento están relacionados con la tasa de cambio de la deformación del elemento en el tiempo. Para denotar las fuerzas tangenciales se usará τ_{ij} que representa un esfuerzo en la dirección j sobre un plano perpendicular al eje i y los normales se representan como τ_{ii} . Como el elemento de la figura 28 está estático, las fuerzas se repelen entre sí y se construye la siguiente ecuación.

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Fuerzas de superficie} \\ \text{en la dirección } x \end{array} \right\} = \begin{aligned} & \left[p - \left(p + \frac{\partial p}{\partial x} dx \right) \right] \\ & + \left[\left(\tau_{xx} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} dx \right) - \tau_{xx} \right] dydz \\ & + \left[\left(\tau_{yx} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} dy \right) - \tau_{yx} \right] dx dz \\ & + \left[\left(\tau_{zx} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} dz \right) - \tau_{zx} \right] dx dy \end{aligned} \quad 38$$

La fuerza total en la dirección x sería, F_x , y es la suma de las ecuaciones en 38 y 37 que luego de añadir y cancelar términos se obtiene:

$$F_x = \left(-\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right) dxdydz + \rho f_x dxdydz \quad 39$$

La masa de nuestro elemento es constante por ello en el lado derecho de la ecuación 36:

$$m = \rho(dxdydz) \quad 40$$

Y teniendo en cuenta que la aceleración es la tasa de cambio de la velocidad u a lo largo del eje x , se puede expresar en términos de la derivada material.

$$a_x = \frac{Du}{Dt} \quad 41$$

Finalmente, agrupando 39, 40 y 41 se obtiene:

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho f_x \quad 42. a$$

La ecuación 42.a es el componente x de la Ecuación de Conservación de Momento No Conservativa para un flujo viscoso. Para el componente y y z se tiene, respectivamente:

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \rho f_y \quad 42. b$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + \rho f_z \quad 42. c$$

Después, extendiendo a la forma Conservativa:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u \vec{V}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho f_x \quad 43. a$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v \vec{V}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \rho f_y \quad 43. b$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho w \vec{V}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + \rho f_z \quad 43. c$$

Según Anderson (1995) los esfuerzos tangenciales en un fluido son proporcionales a la tasa de cambio de la deformación, es decir Fluidos Newtonianos, en ellos τ no es proporcional a los gradientes como se especifica en la figura 28, ya que una gran cantidad de flujos industriales son Newtonianos, Stokes en 1845 dedujo los términos:

$$\begin{aligned}
\tau_{xx} &= \lambda \nabla \cdot \vec{V} + 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} & \tau_{xy} &= \tau_{yx} = \mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \\
\tau_{yy} &= \lambda \nabla \cdot \vec{V} + 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} & \tau_{xz} &= \tau_{zx} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \\
\tau_{zz} &= \lambda \nabla \cdot \vec{V} + 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} & \tau_{zy} &= \tau_{yz} = \mu \left(\frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial y} \right)
\end{aligned} \tag{44}$$

Donde: μ , viscosidad molecular y λ , coeficiente de viscosidad neto, aquí Stokes propuso que:

$$\lambda = -\frac{2}{3}\mu$$

Reemplazando las ecuaciones de 44 en la ecuación 43 se obtienen las ecuaciones finales de conservación de Momento en forma Conservativa para x, y, z respectivamente.

$$\begin{aligned}
&\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial z} \\
&= -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \nabla \cdot \vec{V} + 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] + \rho f_x
\end{aligned} \tag{45.a}$$

$$\begin{aligned}
&\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v^2)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial z} \\
&= -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \nabla \cdot \vec{V} + 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right] + \rho f_y
\end{aligned} \tag{45.b}$$

$$\begin{aligned}
&\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w^2)}{\partial z} \\
&= -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \nabla \cdot \vec{V} + 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] + \rho f_z
\end{aligned} \tag{45.c}$$

Las ecuaciones en 45 y 35 son conocidas como las Ecuaciones de Navier-Stokes para flujo viscoso compresible en honor al Francés Henri Navier y al Inglés Gabriel Stokes que las descubrieron en la primera mitad del siglo XIX.

La ecuación energía de igual forma se puede derivar a partir del modelo de elemento de flujo infinitesimal junto con la primera Ley de la Termodinámica lo que daría su forma no conservativa, sin embargo, para la presente investigación no es relevante y omitirla simplifica en gran medida el proceso de cómputo.

7 Modelado de Turbulencia

Una de las definiciones más apropiadas es la de Wilcox (2006), define la turbulencia como:

El movimiento turbulento de un fluido es una condición irregular de flujo en la que las distintas cantidades muestran una variación aleatoria con las coordenadas temporales y espaciales, de modo que se pueden discernir valores promedio estadísticamente distintos.

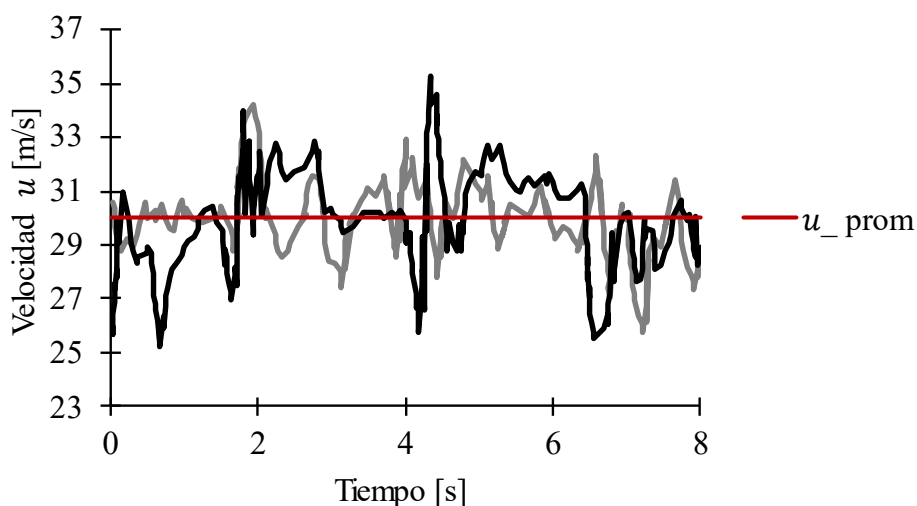


Figura 29 Traza de velocidad en flujo turbulento.(Oro, 2012)

El movimiento es irregular en el sentido de que se puede describir estadísticamente según las leyes de probabilidad que a pesar de ser sensibles a las condiciones iniciales los promedios estadísticos no lo son.

Para completar esta definición se debe introducir el concepto de las escalas de turbulencia, que promediadas en tiempo y espacio representan las frecuencias y longitudes de onda de cada fluctuación. Para poder visualizarlas es necesario hablar de vórtices, que son pequeños movimientos rotatorios locales cuya dimensión característica es la escala de turbulencia local, con unidades de longitud (Wilcox, 2006). Otra característica importante de la turbulencia es que es un fenómeno disipativo, por lo tanto, la energía asociada a las fluctuaciones o vórtices más grandes se disipa y transfiere a vórtices más pequeños similar a una cascada. En la siguiente figura se ilustra la turbulencia asociada al canal de flujo que existe en el anular de un rotor y su carcasa externa.

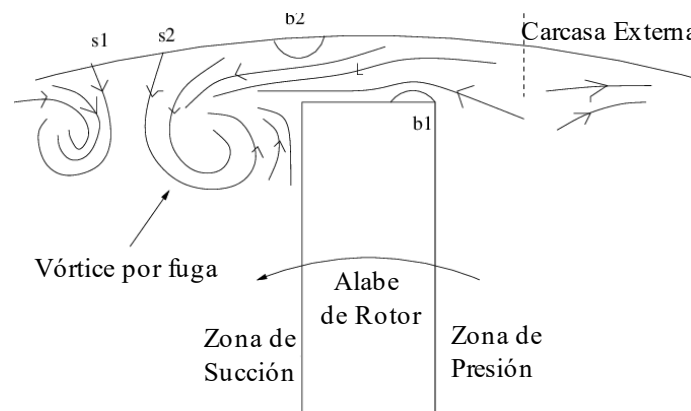


Figura 30 Modelo del campo de flujo en el espacio anular entre la carcasa externa y la punta del alabe de una turbina. Figura Científica de ResearchGate, recuperado de: https://www.researchgate.net/figure/Model-of-tip-clearance-flow-field_fig4_237543275 [30 Ago, 2023]

7.1 Cierre de Turbulencia

Dada la naturaleza estadística de la turbulencia, si el objetivo es modelarla o calcular su magnitud es necesario introducir nuevos términos en las ecuaciones de Navier-Stokes lo que supone un nuevo sistema de ecuaciones en cual existen más incógnitas estadísticas que relaciones

que “cierren” el problema, es decir, que tenga solución y se describa su comportamiento. Finalmente, tenemos un problema que solo se puede resolver mediante aproximaciones y simplificaciones, en la literatura se distinguen tres métodos distintos (Oro, 2012):

- a) **Simulación Numérica Directa (DNS):** Busca resolver todas las escalas de turbulencia (desde las más pequeñas a las más grandes) mediante una malla muy fina, algo que no es practico para una gran cantidad de flujos industriales.
- b) **Simulación de Vórtices Grandes (LES):** Requiere menos densidad de malla que el método 1 y permite resolver entre el 50%-80% de toda la energía cinética turbulenta.
- c) **Ecuaciones de Navier-Stokes promediadas por Reynolds (RANS):** Donde se modelan las escalas empleando modelos algebraicos de turbulencia.

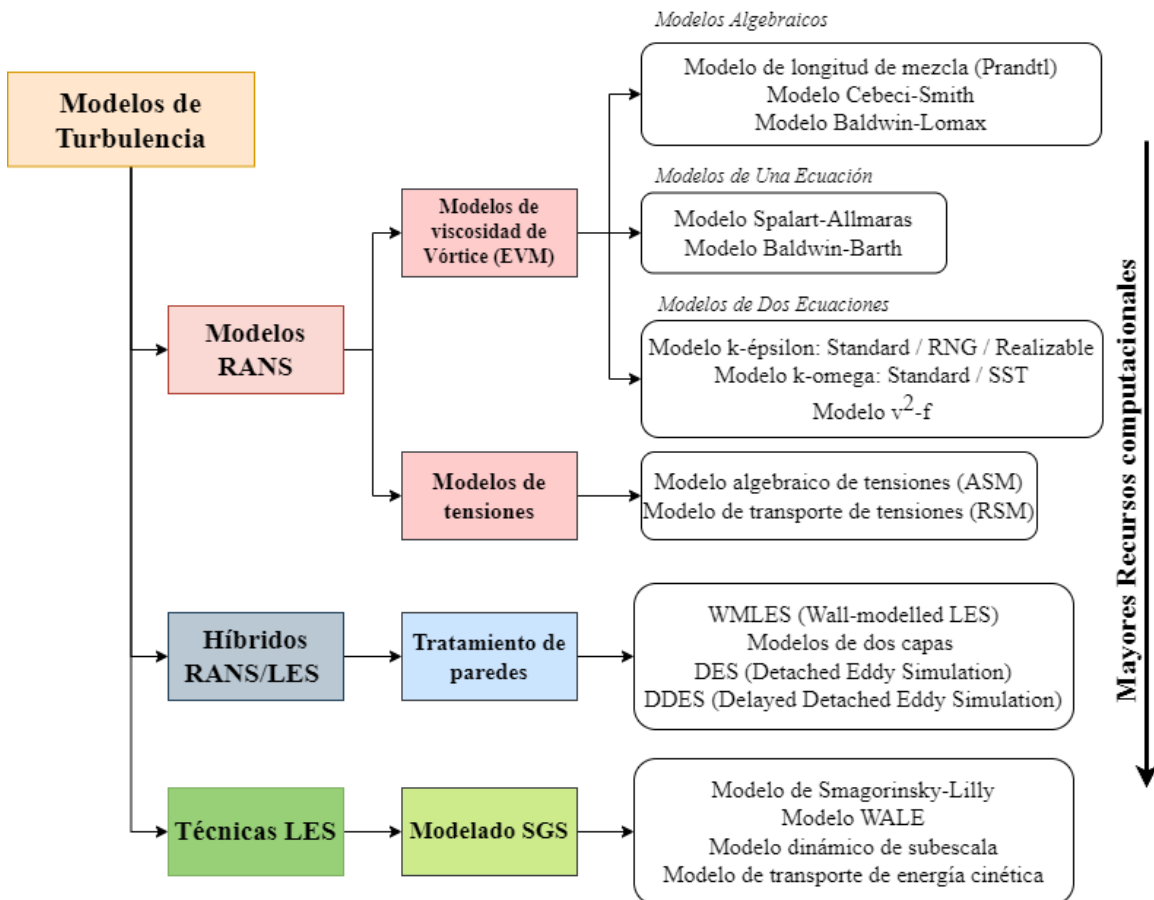


Figura 31 Clasificación de los modelos de turbulencia. (Oro, 2012)

Según Zhang y colaboradores (2019) el modelo de dos ecuaciones $k - \epsilon$ es uno de los más usados para determinar la turbulencia asociada a las aplicaciones en bombas electrosumergibles ya que permite obtener la solución de las velocidades relacionadas a la turbulencia (o tensiones de Reynolds) y de las escalas de longitud de forma independiente con razonable precisión.

7.1.1 Modelo $k - \epsilon$.

Este modelo semi-empírico está basado en la ecuación de momento para la energía cinética de turbulencia (k) y la tasa de disipación (ϵ). Durante su derivación, se asume que el flujo es completamente turbulento y que los efectos de la viscosidad molecular son despreciables. La viscosidad de turbulencia (μ_t) que resulta se computa combinando k y ϵ así:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad 46$$

Donde, C_μ es una constante.

8 Modelado en Turbomáquinas

En las turbomáquinas la existencia de alabes muy cercanos entre si condiciona la aparición de fenómenos no estacionarios cuya interacción es vital si se quiere tener una solución de alta fidelidad. Generalmente existen dos métodos para este tipo de problemas: el método del rotor estático y la malla deslizante.

8.1 Método de Rotor Estático

También conocido como el modelo de Marco de Referencia Múltiple (*MRF*) es el más simple de ambos. Una simulación estacionaria en la cual a cada celda individual se le asigna diferentes valores de velocidad rotacional o traslacional. El flujo en cada celda se resuelve usando las ecuaciones de conservación en un marco de referencia giratorio.

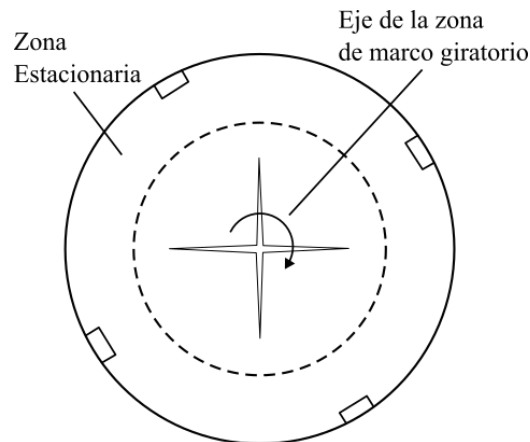


Figura 32 Geometría de una bomba radial con un impulsor. (Fluent, 2009)

El dominio computacional para este tipo de problemas se define con respecto al marco giratorio de manera que un punto arbitrario en el dominio está ubicado mediante un vector de posición \vec{r} desde el origen del marco giratorio (ver figura 33).

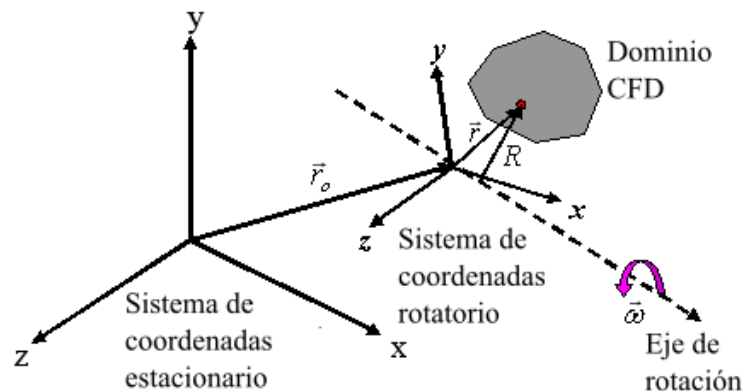


Figura 33 Marco de referencia rotatorio y estacionario, se emplea para adjuntar el componente rotacional a la ecuación de momento. (Fluent, 2009)

El eje de rotación se define por un vector unitario (\hat{a}) así:

$$\vec{\omega} = \omega \hat{a} \quad 47$$

Luego las velocidades del fluido se pueden transformar desde el marco de referencia estacionario al rotatorio usando la siguiente relación:

$$\vec{v}_r = \vec{v} - \vec{u}_r \quad 48$$

Donde:

$$\vec{u}_r = \vec{\omega} \times \vec{r} \quad 49$$

Aquí, \vec{v}_r es la velocidad relativa (vista desde el marco rotatorio), \vec{v} es la velocidad absoluta (vista desde el marco estacionario) y \vec{u}_r es la velocidad ejercida por las fuerzas centrípetas (torbellino).

Cuando las ecuaciones de conservación se resuelven en este marco, la aceleración del fluido se aumenta por los términos adicionales que aparecen en las ecuaciones de momento. Y como se plantea según las ecuaciones 48 y 49 existen dos formas de especificar las velocidades: relativas o absolutas.

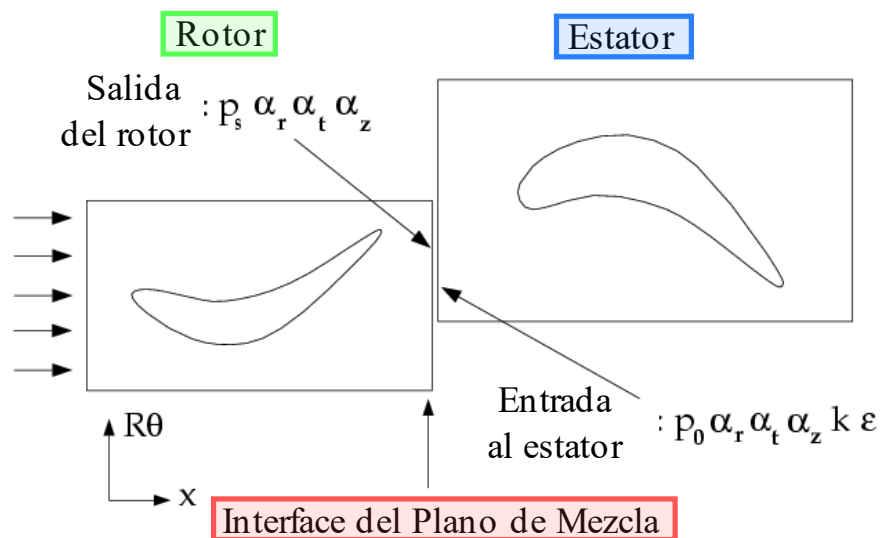


Figura 34 Interacción Axial del Rotor-Estator, ilustrando el concepto del Plano de Mezcla. (Fluent, 2009)

Como se puede ver en la figura 34 debe existir un tratamiento para la transferencia de datos entre ambos dominios y un método que ayuda a unificarlos es el concepto del Plano de Mezcla, donde cada zona de flujo se resuelve como un problema estacionario. Datos de aguas arriba pasan a aguas abajo mediante perfiles que son creados en la interfaz de ambas caras, este mezclado remueve efectos de flujo no estacionario como: ondas, estelas y flujo cruzado.

8.2 Malla Deslizante

Cuando una solución precisa en el tiempo es requerida para la interacción rotor-estator, se debe emplear una malla deslizante, este es el método más preciso para simular flujos con marcos de referencia móvil, pero también el más exigente desde el punto de vista computacional.

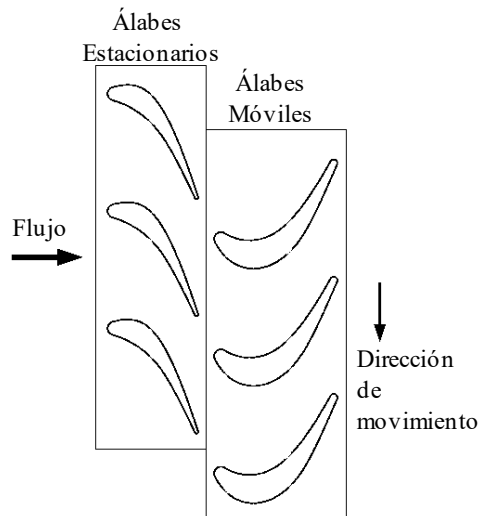


Figura 35 Interacción Axial Rotor-Estator ilustrando el concepto de malla deslizante. (Fluent, 2009)

La interfaz y sus caras asociadas pueden tener cualquier forma con tal que las dos fronteras estén basadas en la misma geometría. Este método permite simular el giro relativo de las mallas fijas y móviles, generalmente el movimiento de los contornos (interfaces) viene prefijado por la

velocidad de rotación lo cual implica una serie de posiciones relativas entre los álabes y el resto de los contornos.

El modelo de malla deformable es otro grupo que se puede usar para modelar flujos donde la forma del dominio está cambiando debido al movimiento de las fronteras, por ejemplo, en una bomba reciprocante. En estos casos existen tres formas para actualizar la deformación del enmallado (Oro, 2012).

- a) Métodos de Suavizado (*Smoothing*).
- b) Capas dinámicas (*Dynamic Layering*).
- c) Método de Remallado Local (*Local Remeshing*).

9 Método Numérico

Las ecuaciones de conservación de masa y momento, por lo general se comprimen de la siguiente forma cuando es necesario discretizarlas:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\vec{v}\phi) = \nabla \cdot (\Gamma\nabla\phi) + S \quad 50$$

Tabla 4 Valores de las variables para la ecuación 50.

Variable/Coeficiente	Masa (ecuación 35)	Momento (ecuación 45)	Energía
ϕ	1	(u, v, w)	h
Γ	0	(μ, μ, μ)	k/C_p
S	0	$\left(\frac{-\partial p}{\partial x} + S_x \frac{-\partial p}{\partial y} + S_y \frac{-\partial p}{\partial z} + S_z\right)$	S_h

Nota. Adaptado de Oro (2012)

Ahora de izquierda a derecha en la ecuación 50 se tiene:

- a) **Término temporal:** Representa la variación local de la variable ϕ en el interior del volumen de control.
- b) **Término de flujo convectivo:** Representa el transporte de la variable ϕ de un punto a otro del dominio por medio de la velocidad de flujo.
- c) **Términos de flujo difusivo:** Corresponde con algunos de los fenómenos de transporte que ocurren a nivel molecular, por ejemplo, la Ley de Newton para la difusión de momento por efecto viscoso.
- d) **Término fuente:** Para incluir las fuentes de generación o destrucción de la variable ϕ .

9.1 Método de Volúmenes Finitos.

Las ecuaciones de transporte son integradas en cada volumen computacional usando el teorema de Divergencia de Green-Gauss a lo largo de un intervalo determinado de tiempo. Posteriormente los valores de las variables son obtenidos por el uso de técnicas apropiadas de linealización e interpolación, aquí el comportamiento de los métodos numéricos depende de la discretización del término fuente (González Silva, 2012). Como ejemplo de discretización y linealización considérese el siguiente volumen finito bidimensional.

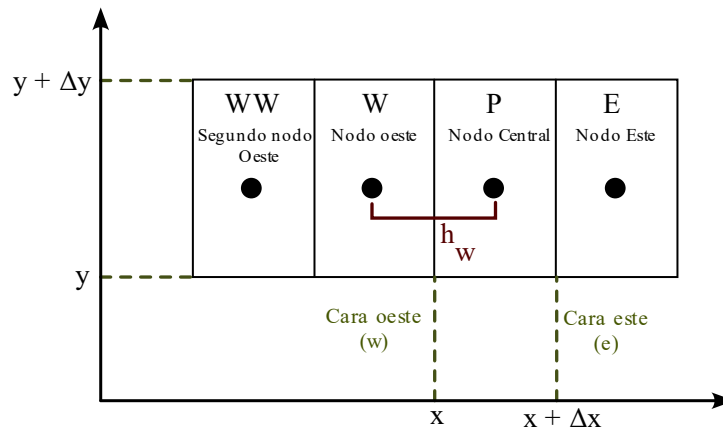


Figura 36 Representación de un volumen finito bidimensional. (González Silva, 2012)

La razón por la cual el método de volúmenes finitos es el más empleado para desarrollar códigos *CFD* reside en su generalidad, su simplicidad conceptual y su facilidad para ser implementado en cualquier tipo de enmallado, ya sea estructurado o no estructurado.

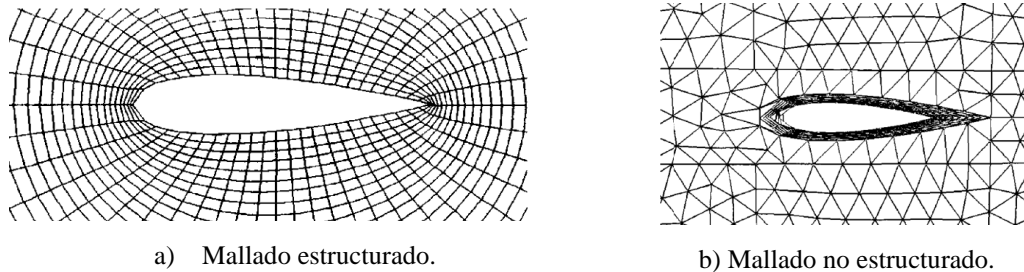


Figura 37 Tipos de enmallado. (Chung, 2002)

10 Estudios en análisis de erosión en bombas electrosumergibles

Se realizó un análisis bibliométrico con SCOPUS para determinar los autores más relevantes usando las palabras clave: “*Erosion*”, “*Pump*”, “*CFD*” dentro de “*Title-Abstract-Keywords*”. La base de datos de 125 artículos fue revisada para extender la literatura a artículos relevantes por fuera de esta. En la siguiente figura se muestra el análisis de la base datos hecho por medio de VOSviewer.

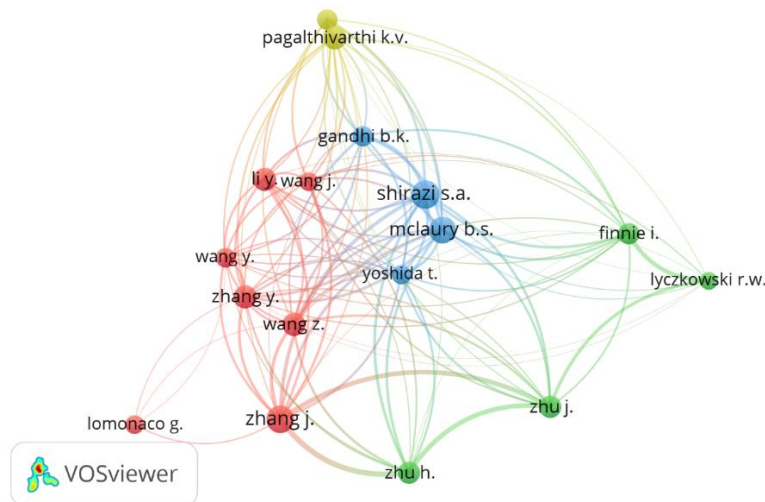


Figura 38 Visualización de red, autores co-citados 20 veces.

En la figura anterior se denotan 4 clústeres distintos mostrando los autores co-citados 20 veces, que a lo largo de esta investigación son citados ocasionalmente, según Chen (2017), la erosión en bombas electrosumergibles es muy diferente a la de los lechos fluidizados, superficies planas, codos o cualquier otra geometría simple, razón por la cual el *CFD* resulta útil para cuantificar sus efectos.

Charalambous y colaboradores (2009) junto a Hadjiyannis y colaboradores (2009) realizaron pruebas experimentales de impacto directo e inclinado junto con simulaciones numéricas con el enfoque multifásico Euler-Lagrange (DPM) para determinar la resistencia a la erosión de cuatro recubrimientos especiales con el objetivo de facilitar la elección de uno de ellos para el desarrollo de las bombas electrosumergibles de flujo mixto. Afirman que para el modelo $k - \epsilon$ el uso de mallas no ortogonales produce valores erróneos de k y ϵ , también optaron por el acoplado de fases en un sentido. Sus resultados afirman que al reducir la velocidad de flujo las partículas más pequeñas son responsables por la mayor parte de la erosión. También se evidencia que la mayoría de los impactos en ambas regiones se dan entre 15° - 25° , esto se complementa con el hecho de los impactos inclinados tienen menores tasas de penetración, pero altos volúmenes de remoción.

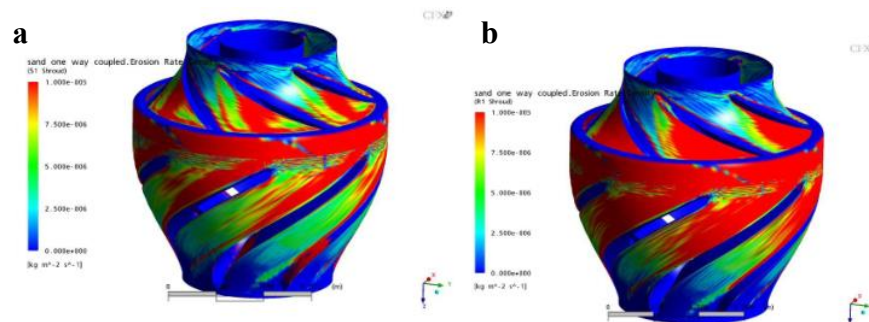


Figura 39 Contornos de las tasas de erosión para la carcasa (*shroud*) del difusor e impulsor para (a) $27\mu\text{m}$ y (b) $60\mu\text{m}$ de diámetro de partícula. (Hadjiyannis et al., 2009)

Pagalthivarthi y colaboradores (2011) calcularon las trayectorias de partícula suspendidas en agua y su distribución a lo largo de la voluta de una bomba radial en un dominio computacional de dos dimensiones cuyos resultados fueron validados con otras simulaciones numéricas. A pesar de ser una bomba radial, posee consideraciones que aplican para una amplia gama de bombas centrifugas (incluidas la ESP) por ejemplo, los autores afirman que al aumentar la velocidad de rotación e incrementar los caudales por encima del BEP (punto de mejor eficiencia) la concentración de partículas y su velocidad de impacto aumenta. Concluyeron que cambios en la geometría como: ángulo de la lengua descarga, el diámetro de descarga, diámetro de impulsor son cambios que afectan el parámetro de impacto ($C_s V_s^2$) distribuyendo uniformemente la erosión. La fórmula que se empleó para calcular esta última fue:

$$W_{sp} = \phi(\alpha)\rho_p C_s V_s^2, \quad m = 3 \quad 51$$

Donde: W_{sp} = erosión en superficie de la voluta, $\phi(\alpha)$ = incluye los efectos de las propiedades de los materiales y los ángulos de impacto, ρ_p = densidad de sólidos, C_s = concentración de partícula, V_s = magnitud de velocidad de partícula.

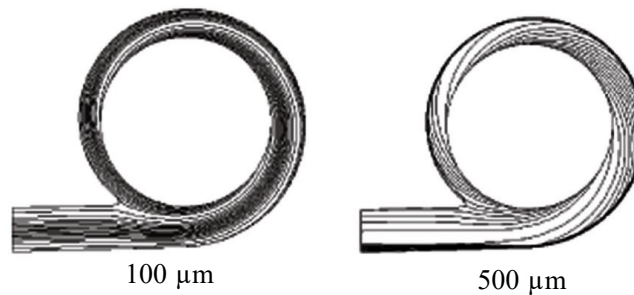


Figura 40 Recirculación a la salida de la lengüeta del impulsor para partículas con diámetros de 100 y 500 μm .
 (Pagalthivarthi et al., 2011)

Marsis y Russell (2013) investigaron los dos enfoques que hay en CFD para el modelado de la erosión en una bomba electrosumergible de flujo mixto; DPM y Euleriano-Granular. Afirman que existen dos modificaciones al método convencional de este tipo de análisis que afectan significativamente los resultados, esos son el perfil de velocidad en las capas límite y su efecto en la predicción de la erosión y la inclusión del fenómeno de “rebote” al diámetro de las partículas y no su centroide.

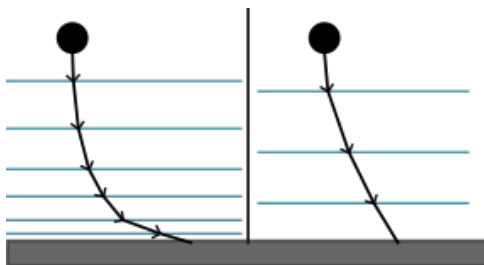


Figura 41 Trayectoria de partícula afectada por (izquierda) malla fina y (derecha) malla gruesa.

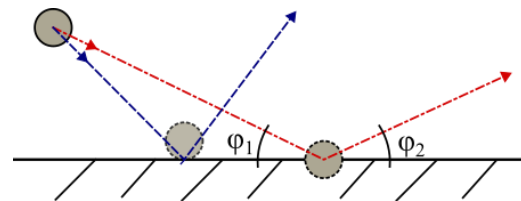


Figura 42 Reflexión de partículas en la pared ilustrando el modelo de rebote convencional (rojo) y rebote a radio de partícula (azul).

Otro aporte significativo de los autores fue ajustar la ecuación del E/CRC para cuantificar la erosión en ángulos de impacto cercanos a 0, esto se hace con el objetivo evitar subestimar la erosión en flujos paralelos.

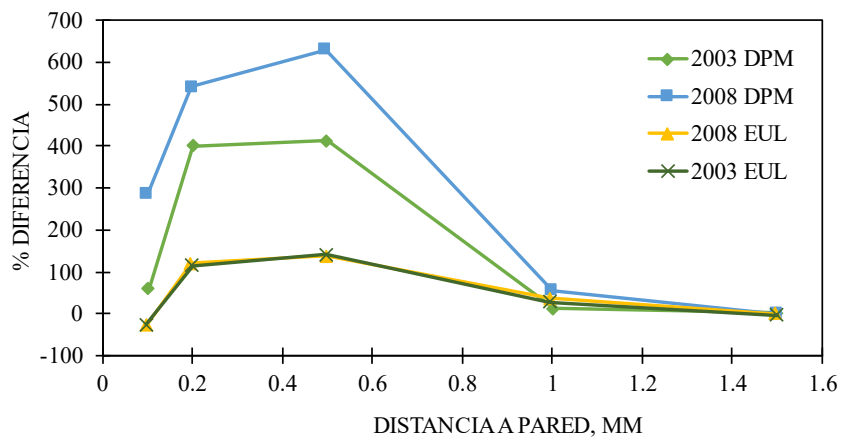


Figura 43 Variación de los factores que afectan a la tasa de erosión versus la distancia a la pared del difusor con un caudal de bombeo de 25 KBPD. (Marsis y Russell, 2013)

La figura 43 ilustra los efectos que tiene la distancia de la primera celda en la capa límite sobre la magnitud de la erosión para un esquema de solución Euler-Granular y Euler Lagrange, denotando la importancia de una malla fina que capture los fenómenos de flujo.

Los autores concluyen que el enfoque Euler-Euler (Granular) presenta resultados más precisos y homogéneos con respecto a la distribución de arena.

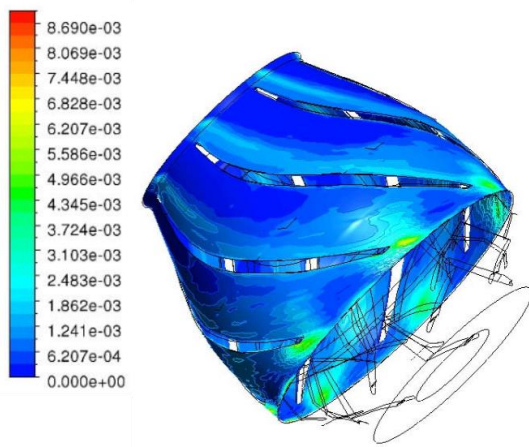


Figura 44 Tasa de erosión en la carcasa del difusor para 25 KBPD usando DPM ERC-2008. (Marsis y Russell, 2013)

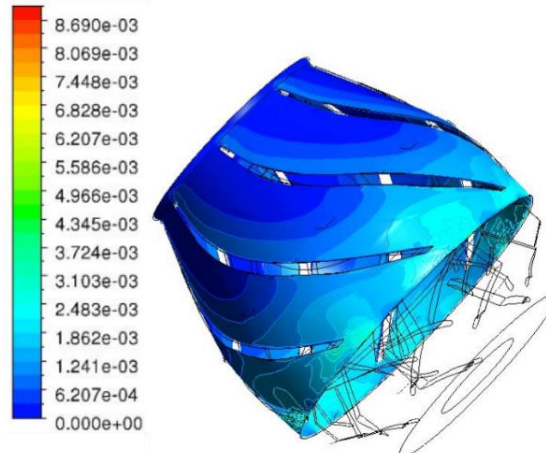


Figura 45 Tasa de erosión en la carcasa del difusor para 25 KBPD usando Euler ERC-2008. (Marsis y Russell, 2013)

Pirouzpanah y colaboradores (2019) realizaron ensayos erosivos sobre un montaje experimental (figura 9) con una bomba electrosumergible de flujo mixto con 3 etapas lo que les permitió calcular la cabeza de presión y pesar el contenido de material removido. También formularon una nueva ecuación para determinar la erosión según la energía cinética de turbulencia, parámetro que resulto ser clave en la predicción y validación de los resultados.

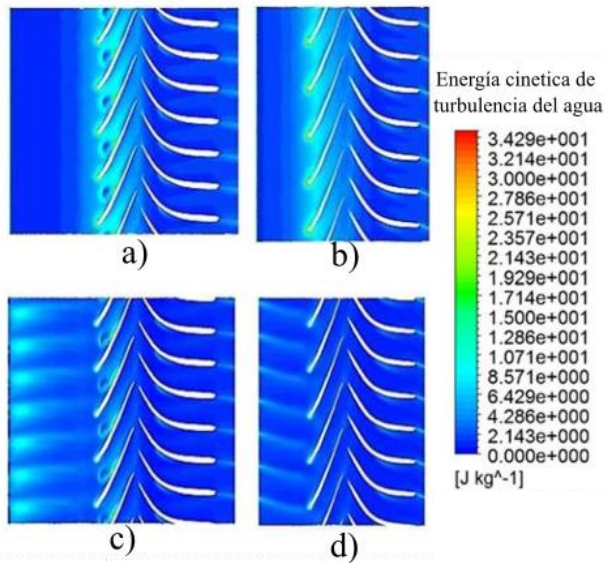


Figura 46 Energía cinética de turbulencia para la 1ra etapa a) $span = 0.1$ b) $span = 0.5$, y la segunda etapa c) $span = 0.1$ d) $span = 0.5$

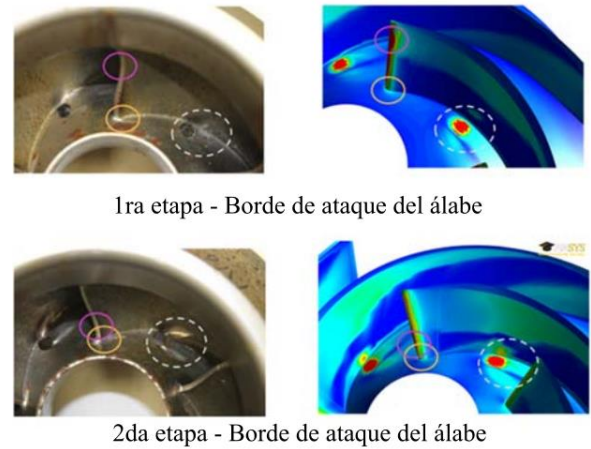


Figura 47 Comparación de las tasas de erosión computadas y las locaciones erosionadas en los álabe de impulsor de la 1ra y 2da etapa.

En la figura 46, el *span* o vano es la distancia desde el buje o casco interno de la bomba a la carcasa o camisa externa en un rango porcentual que va desde 0 a 1.

Zhu y colaboradores (2019) realizaron un estudio de gran envergadura donde comparan resultados experimentales frente a simulaciones CFD usando 3 bombas electrosumergibles y 6 modelos de erosión (Zhu et al., 2018b), para seleccionar el modelo con mejor ajuste y al mismo tiempo proporcionar una metodología completa para el análisis de la erosión en *ESP*'s. Afirman que la erosión de tres cuerpos (dos paredes y una partícula) es el mecanismo de erosión con mayor magnitud sobre la remoción de material en las bombas electrosumergibles, especialmente en las zonas de flujo secundario como; agujeros de balance, anulares, cojinetes y sellos. Además del tipo de flujo (asociado al número de Reynolds) geometría y condiciones de frontera, únicamente la

densidad de partícula y el diámetro pueden afectar la distribución de arena, las demás propiedades de los materiales afectan directamente la magnitud de la erosión.

Concluyen que debido a la rotación del impulsor los ángulos de impacto pueden ser menores a 20° , agregan que variar el diámetro de las partículas tiende a causar un efecto complejo que resulta en fluctuaciones inesperadas de la erosión en diferentes zonas del dominio. Luego de cuantificar el peso removido por cada sección se calibran los modelos de erosión y el modelo de Oka con un error promedio del 39% y junto el de Zhang exhiben los mejores ajustes de predicción en las tres bombas.

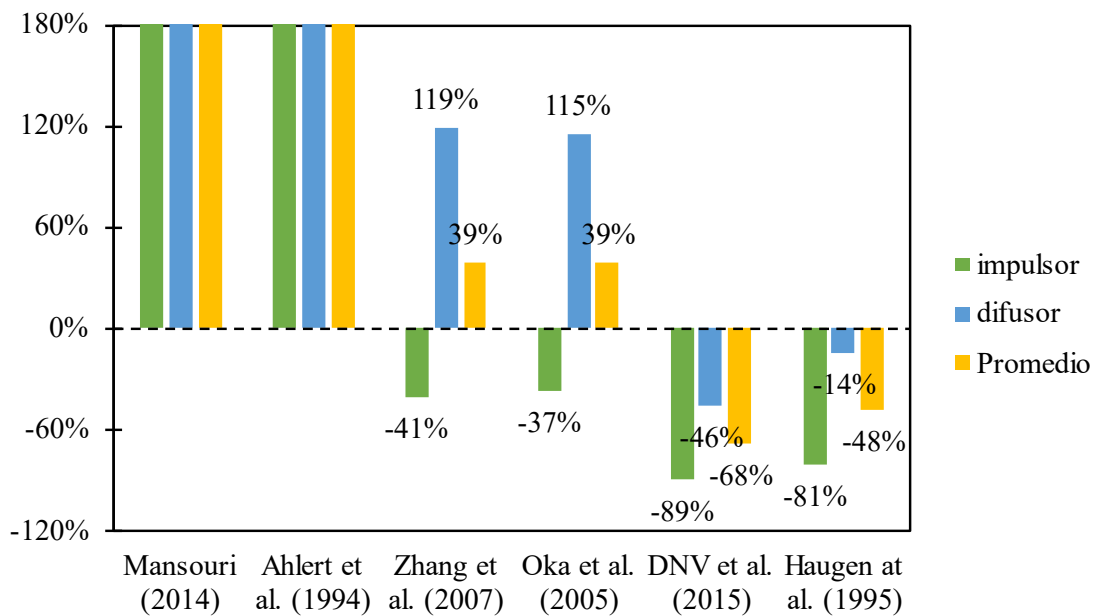


Figura 48 Análisis de error de tasa de erosión promedio ponderada por área. (Zhu, Zhu, et al., 2019)

En las unidades *ESP* se manejan altas velocidades de rotación y dominios de flujo complejos, por ello Zhang y colaboradores (2019) describieron los efectos de 6 modelos de turbulencia e investigaron los efectos de cuatro modelos de rebote en una bomba electrosumergible

de flujo mixto de tres etapas en ANSYS Fluent y su modulo para DPM, la validación se realiza empleando las curvas de desempeño y en los resultados se observa que no hay diferencia significativa en los modelos $k - \epsilon$. Al comparar con mediciones del peso de material removido concluyen que la erosión calculada por el modelo $k - \omega$ es la mas cercana a los resultados obtenidos.

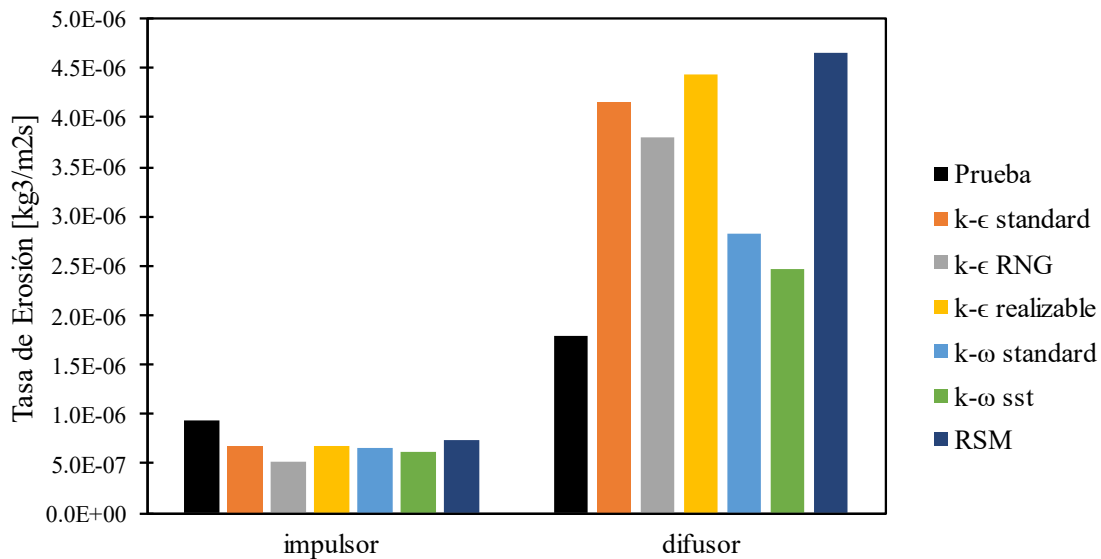


Figura 49 Comparación de las tasa de erosión promedio ponderadas por área con diferentes modelos de turbulencia en. (Zhu, Zhang, et al., 2019)

Además, debido a que en promedio el ángulo de impacto es de 5° el modelo de rebote se puede ignorar, ya que el ángulo de incidencia y reflexión son prácticamente iguales.

Chen (2017) investigó la erosión en una bomba Helico-axial tipo Poseidon con un montaje experimental que le permitió monitorear el desempeño bajo tres fases: agua, gas y arena. Durante 200 horas de prueba adquirió diferentes curvas de desempeño a diferentes fracciones volumétricas de gas, y mediante un escáner 3D obtiene la geometría de la bomba antes y después de la prueba.

Finalmente calibra la ecuación genérica de erosión a los parámetros del experimento y lo aplica sobre la simulación obteniendo resultados similares.

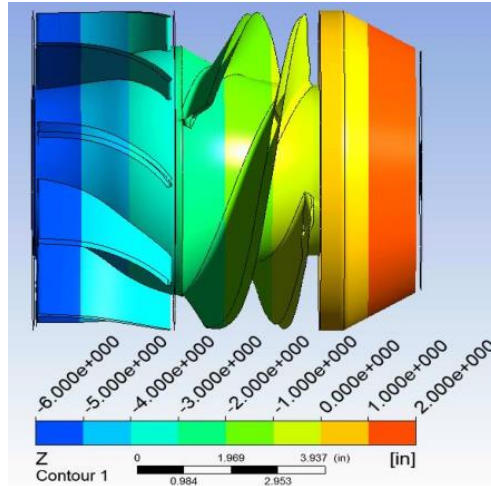


Figura 50 Vista esquemática de las locaciones axiales en la 1ra etapa. (Chen, 2017)

11 Metodología

La metodología empleada para resolver problemas de dinámica de fluidos computacional se representa mediante el siguiente esquema.

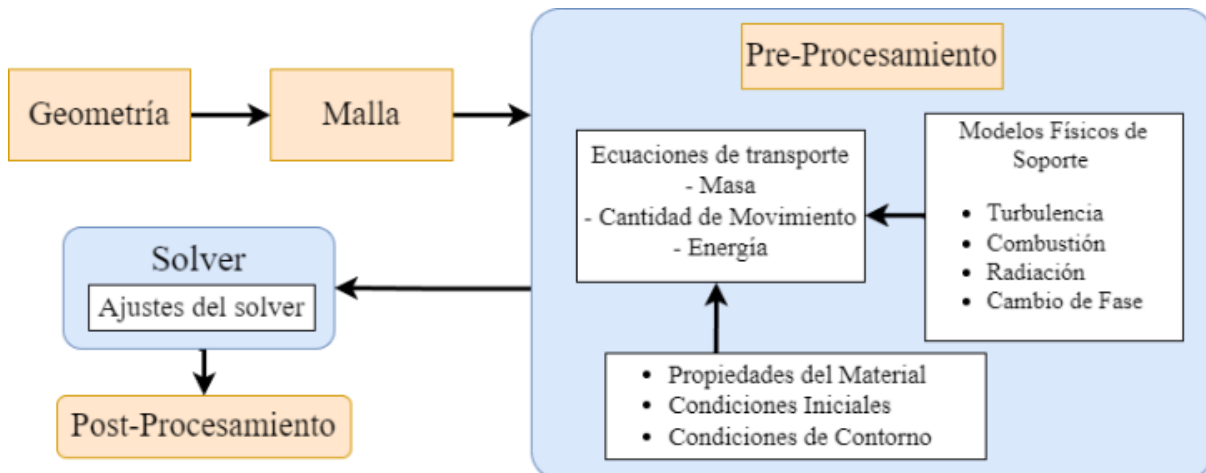


Figura 51 Metodología CFD. (González Silva, 2012)

11.1 Diseño de Geometría

Como se mencionó en el apartado 3 se diseñará una bomba electrosumergible helico axial tipo Poseidon, más específicamente, el diseño se basó en la *MGH (Multiphase Gas Handling System)* desarrollada por SLB.

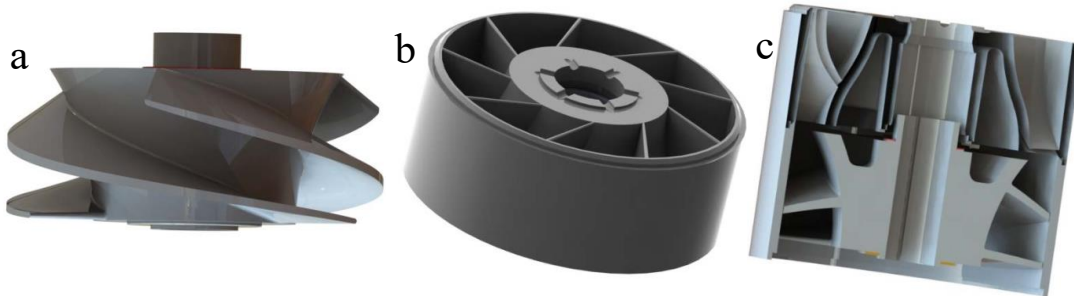


Figura 52 Impulsor (a), Difusor (b) y Sección transversal de etapa (c). (Gudigopuram, 2016)

Se empezó por diseñar un perfil para las hidroalas del impulsor similar al que se observa en Chen (2017) y Gudigopuram (2016). Para esto con la ayuda de una base de datos se generaron los perfiles que posteriormente se importan en AutoCAD.

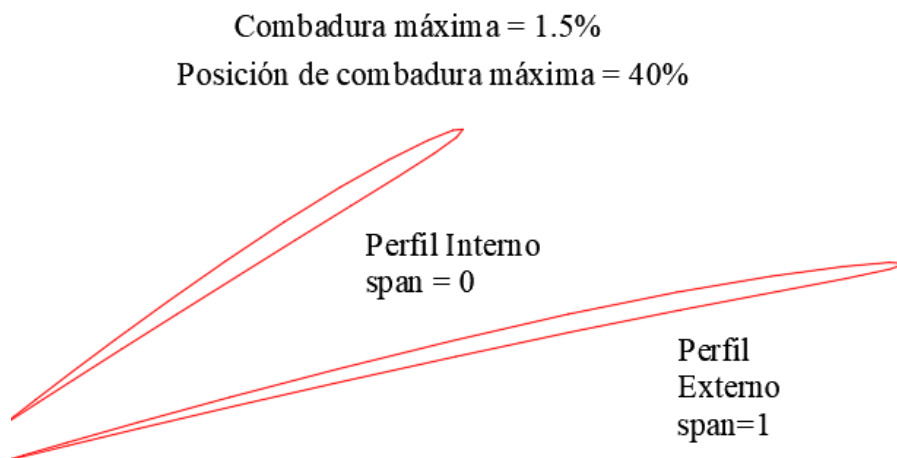


Figura 53 Perfil de los hidro álabes del impulsor.

Con los perfiles de la bomba y las dimensiones de la figura 50 se finaliza la geometría en INVENTOR, que al ser un problema de flujo interno se extrae el dominio computacional.

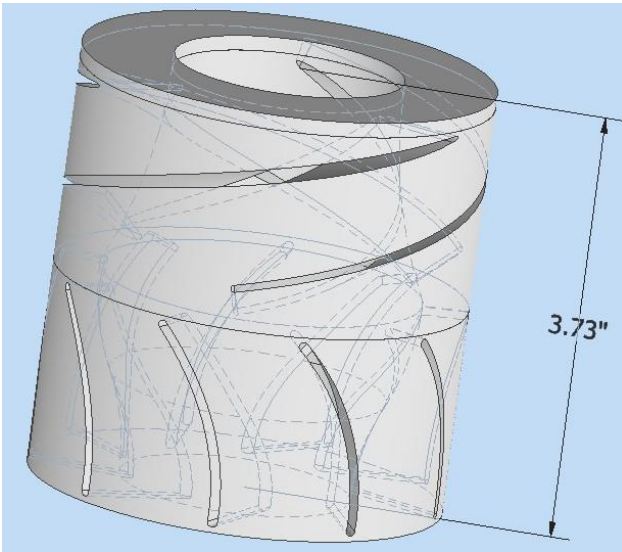


Figura 54 Dominio Computacional.

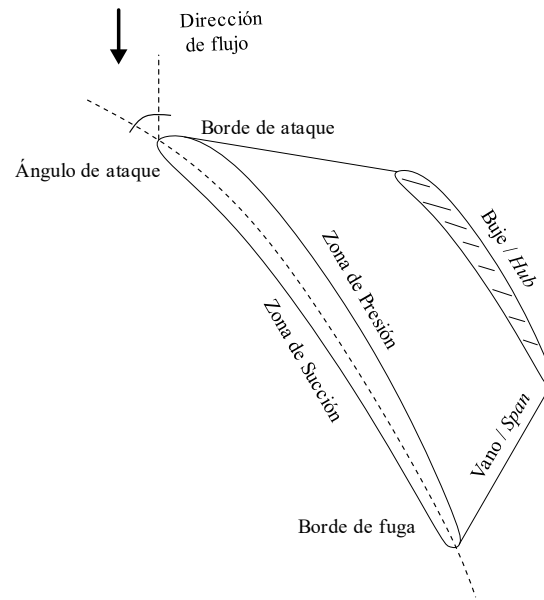


Figura 55 Nomenclatura de álabes empleada

Nótese que la geometría de la figura 54 difiere con el modelo de referencia y esto se hizo para simplificar el proceso de cómputo, en la realidad hay un espacio anular entre los hidro álabes del impulsor y la carcasa de 0.02 pulgadas (Gudigopuram, 2016), la bomba también posee agujeros de balance que en el caso de incluirlos aumentarían considerablemente el tiempo de cálculo y dificultarían la convergencia. En este caso el enfoque recae en los canales de flujo primarios que es donde se genera la mayor parte de la presión (Chen, 2017).

11.2 Enmallado

El impulsor y difusor fueron enmallados independientemente usando la metodología “*Watertight Geometry Workflow*” que permite hacer mallas no estructuradas de alta calidad y de manera rápida. Ya que el impulsor es una de las partes más importantes y su deterioro significa aproximadamente un 12% menos de generación de presión según datos experimentales (Chen, 2017), el tamaño de celda en comparación con el difusor será más pequeño y con esto se busca una mayor precisión en la simulación de los procesos erosivos.

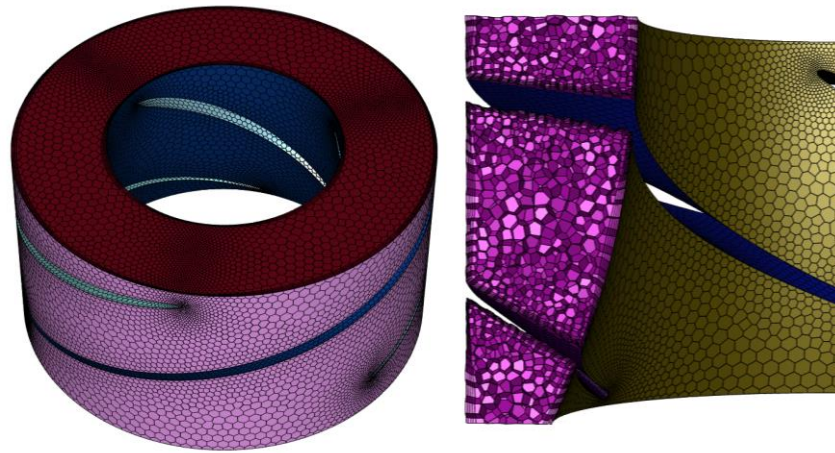


Figura 56 Malla inicial del impulsor, 338K celdas.

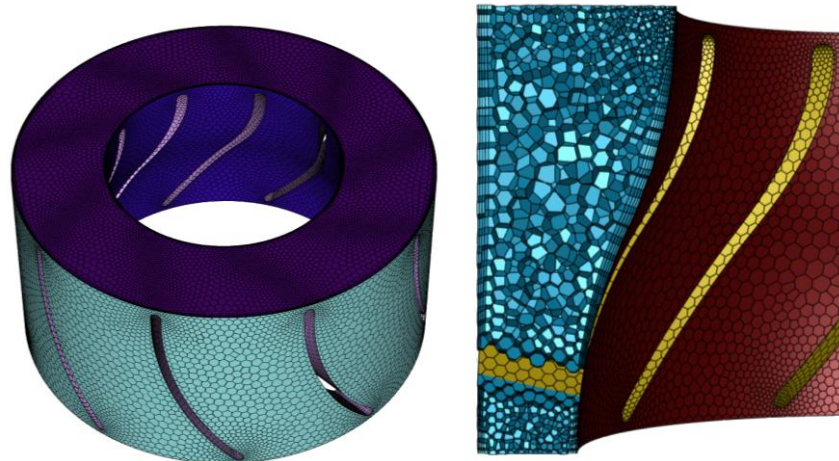


Figura 57 Malla inicial del difusor, 225K celdas.

11.3 Configuración inicial y análisis de Sensibilidad de Enmallado

Las primeras simulaciones fueron realizadas con datos de Chen (2017), se empleará el esquema de solución estacionario basado en presión y marcos de referencia múltiple con planos de mezcla para el tratamiento de la interfaz, al tener dimensiones menores a 1ft los efectos

gravitatorios son insignificantes, todas las formulaciones de velocidad son absolutas y las condiciones de frontera y modelos se muestran a continuación:

Tabla 5 Condiciones de frontera para simulaciones de una fase.

Condiciones de frontera y modelos de inicialización para simulaciones de 1 fase	
Fluido	Agua – Líquido
Entrada de Flujo Másico	122.179 lbm/s (equivalente a 880gpm)
Salida de Presión	65 psi
Velocidad de Rotación	3600 RPM
Modelo de Turbulencia	$k - \epsilon$ estándar, constantes predeterminadas
Funciones de Pared	Estándar
Plano de Mezcla	Radial – Promediado en Masa – Subrelajación = 0.75
Temperatura	Proceso Isotérmico
Inicialización	Híbrida

A continuación, se ilustran las condiciones de frontera en el dominio computacional de la figura 55 donde los vectores azules representan las entradas y los rojos las salidas.

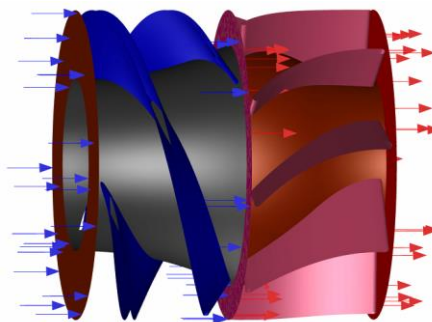


Figura 58 Condiciones de frontera.

Al ser una simulación estacionaria de alta turbulencia los factores de subrelajación y métodos de solución cumplen un papel importante sobre la convergencia del problema y la rapidez con que avanzan las iteraciones, en la siguiente tabla se muestra la configuración empleada:

Tabla 6 Métodos y controles de solución.

Métodos y controles de solución	
Esquema de acoplamiento Velocidad- Presión	<i>Coupled</i>
Gradiente	<i>Least Squares Cell Based</i>
Discretización de presión	<i>Second Order</i>
Discretización de momento	<i>Second Order Upwind</i>
Discretización de energía cinética de turbulencia	<i>Second Order Upwind</i>
Discretización de tasa de disipación	<i>First Order Upwind</i>
Factores de subrelajación	Presión - 0.2, Momento – 0.4, Energía cinética de turbulencia, disipación y viscosidad – 0.6
Numero de iteraciones	200
<i>Time Scale Factor</i>	1

Los residuales se calculan de manera local con un criterio de convergencia absoluto de $1e-05$, con esta configuración la simulación converge en 100 iteraciones o menos dados los criterios de monitoreo adecuados.

Al ser un problema de contorno/equilibrio la única forma de refinar la solución es variando el tamaño de celda, los resultados del análisis de sensibilidad de malla se muestran a continuación.

Tabla 7 Resultados de sensibilidad

Malla #	Número de Celdas	Diferencia de presión dinámica, ponderado en masa. [psi]	Diferencia de presión dinámica, ponderado en área. [psi]
1	441296	71,88	31,25
2	476102	85,47	37,85

3	600947	91,12	37,45
4	700841	83,70	34,68
5	768209	84,14	36,33
6	839626	88,04	36,83

Con los resultados de la tabla 6 se extraen las curvas de sensibilidad para un promediado en superficie según el flujo masico y el área promedio.

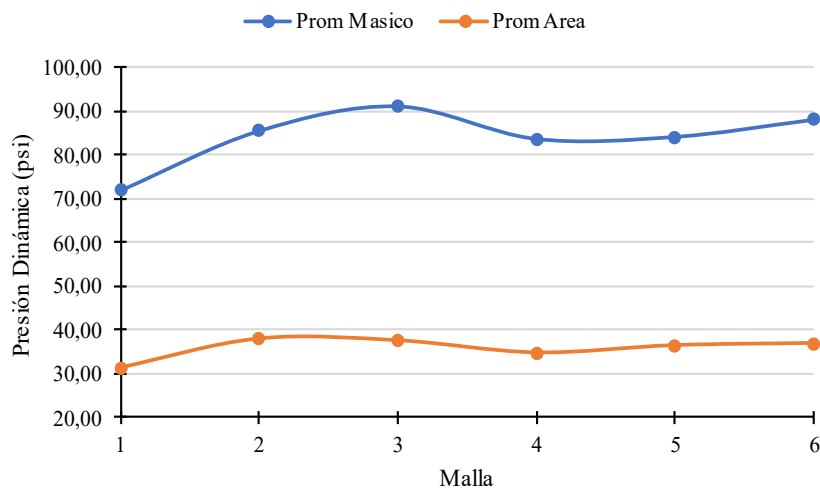


Figura 59 Variación de presión dinámica según la malla.

La presión dinámica es la cantidad de energía cinética por unidad de volumen, es decir, corresponde a la presión que se genera por el efecto de la rotación del impulsor y su diferencia se calcula con dos planos cuyas dimensiones son iguales, ver figura 60.

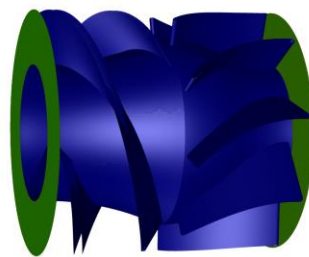


Figura 60 Planos de monitoreo para la presión dinámica (verde).

La selección de una malla es un proceso donde se deben balancear dos factores: Precisión y Recurso Computacional, aquí el criterio de selección debe enmarcar a los objetivos de la simulación, por ello y según los datos de la tabla 6 y figura 59 se selecciona la malla 5.

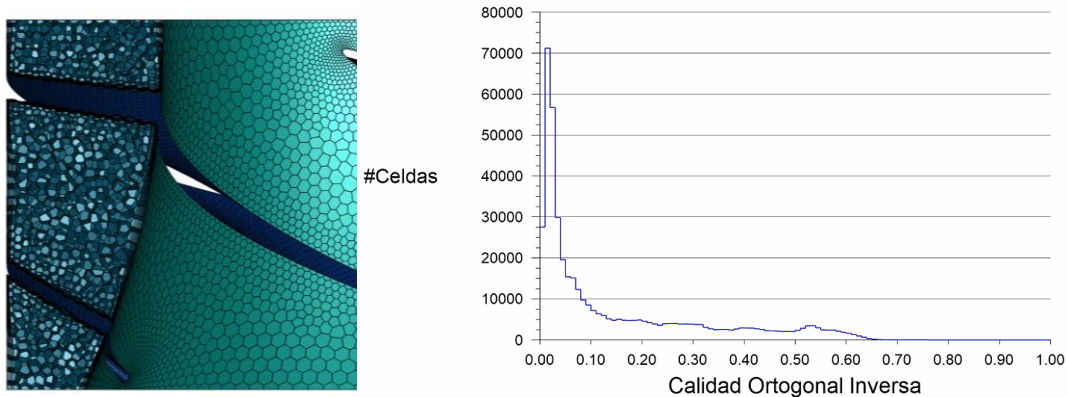


Figura 61 Histograma de calidad ortogonal inversa del impulsor en la malla 5 (443K celdas).

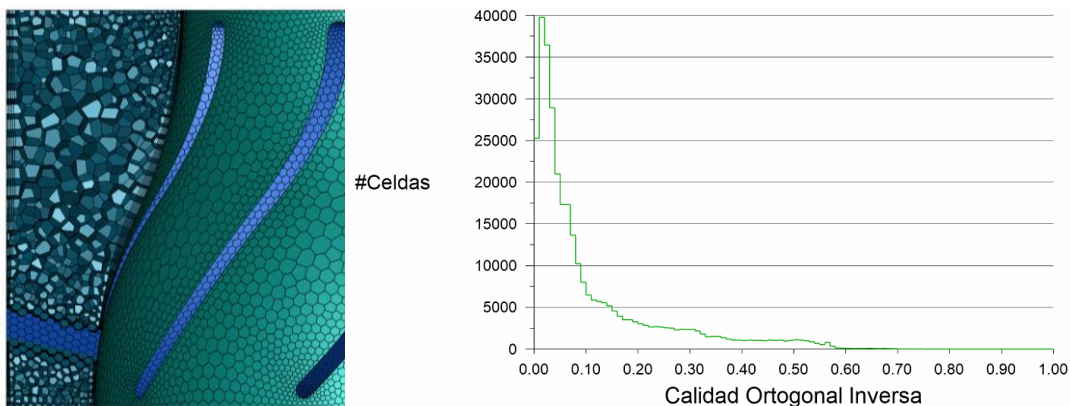


Figura 62 Histograma de calidad ortogonal inversa del difusor en la malla 5 (324K celdas).

Con respecto a las dos figuras anteriores la calidad ortogonal inversa es un parámetro de calidad que mientras más cercano este a cero menos asimétricas y más ortogonales serán las celdas.

Al ser una simulación estacionaria la interacción rotor-estator se pierde y gran parte de los fenómenos transitorios que le dan las características intrínsecas a la bomba en cuestión no se simulan, es decir, se obtiene una simulación simple con canales de flujo primarios al no incluir el

anular y gradientes promediados según avanzan las iteraciones. Esto no le quita relevancia al método del rotor estático ya que según Hadjiyannis y colaboradores (2009) si el objetivo es cuantificar la erosión, se pueden conseguir resultados que “en bruto” igualan las ventajas de emplear una malla deslizante.

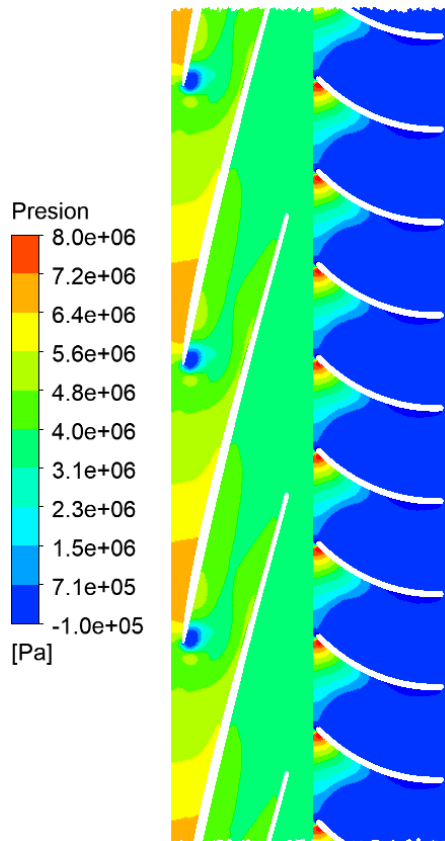


Figura 63 Distribución de presiones de una etapa con span de 0.98.

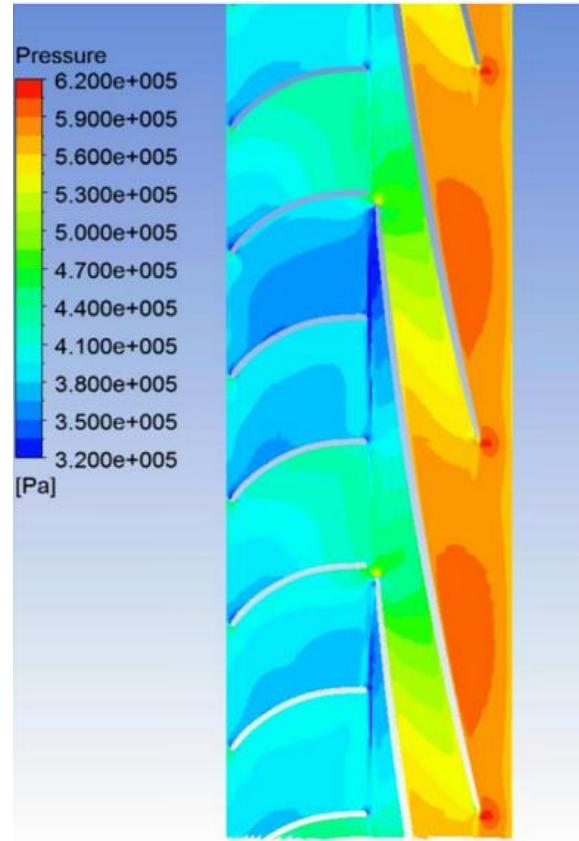


Figura 64 Distribución de presiones del segundo impulsor con span de 0.98. (Chen, 2017)

Cabe aclarar que en la figura 64 se simula con malla deslizante la conexión que existe entre la salida o difusor de una etapa y la entrada impulsor que la recibe, a pesar de esto los componentes cumplen la misma función, ambas simulaciones manejan los mismos valores de frontera, por lo que en promedio podemos asumir que los resultados son similares. Con respecto a los resultados de la figura 63, anteriormente se había mencionado que se optó por no incluir el anular (*clearance*)

entre las hidro alas del impulsor y su carcasa, evidentemente al fluir un “*build-up*” de presión se genera en el impulsor a causa de la reducción del área de circulación. Esto sumado a la naturaleza del método del rotor estático que interpreta los fenómenos de separación de flujo no uniformes (zona azul oscuro del difusor e impulsor en figura 63) como vacíos de presión negativa que son necesarios para cumplir con las condiciones de frontera.

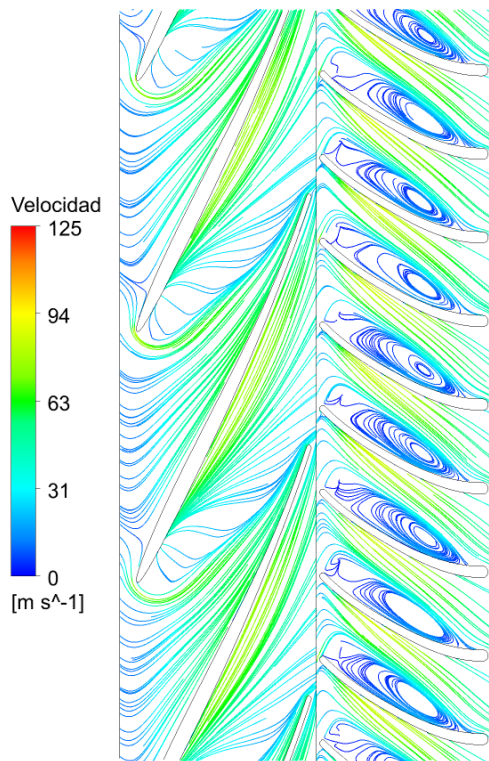


Figura 65 Líneas de flujo de velocidad, 25KBPD @3600RPM con span de 0.1.

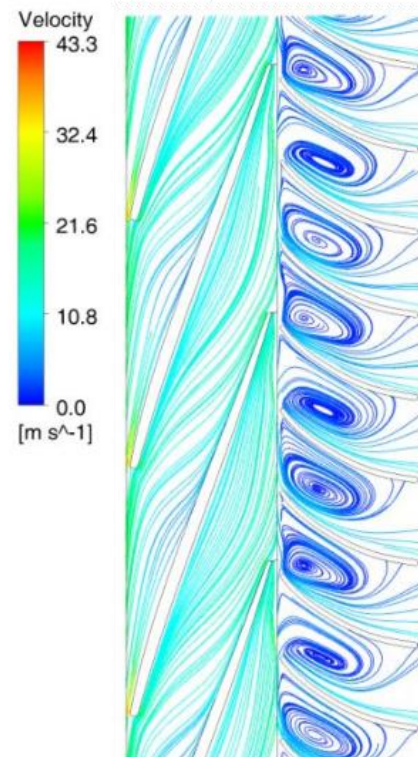


Figura 66 Líneas de flujo de velocidad, 25KBPD @3600 RPM con span de 0.1 en la 1ra etapa. (Gudigopuram, 2016)

La figura 66 fue una simulación hecha por Gudigopuram (2016) en la cual analiza el desempeño de una bomba helico axial en tres etapas a diferentes capacidades usando un esquema de solución transiente con malla deslizante y aproximadamente 4.5 millones de celdas, en el resultado de la figura 65 se vuelven a evidenciar los efectos del método del rotor estático que al no

modelar la vorticidad en la entrada del difusor se abre un canal de flujo donde la velocidad alcanza un valor de 82 m/s, la diferencia de magnitud de velocidad y su patrón de flujo se debe a dos factores:

- a) **El perfil de las hidroalas (span = 0,1):** con un ángulo de ataque ligeramente más pequeño en la entrada del impulsor de la figura 65 y no lo suficientemente cóncavas.
- b) **El anular de 0,02 pulgadas:** Que al ser colocado redistribuye la presión a lo largo del canal de flujo secundario y elimina los vórtices que se observan debajo del borde de ataque en la figura 63 (punto azul), reduciéndose el arrastre entre los álabes del impulsor que afecta las líneas de flujo de velocidad haciendo que se acumulen sobre la zona de succión y presión.

12 Resultados

En la literatura (McLaury, 1993; Pirouzpanah et al., 2019; Zhu, Zhu, et al., 2019) se identifican cuatro etapas en el modelamiento del proceso erosivo en diferentes geometrías: a) Generación de malla b) Simulación de flujo c) Cálculo de trayectorias; empleando la ecuación 16 y d) Cálculo de tasas de erosión. Esta última etapa corresponde con la aplicación de alguno de los diferentes modelos de erosión en la tabla 1. Lyczkowski y Bouillard (2002) afirman que Tabakoff coincidió en que existen tres diferentes enfoques fundamentales para su cálculo, el primero incluye hacer suposiciones del proceso erosivo e incorporar parámetros que confirmen la teoría (Enfoque empírico), en el segundo se diseñan ecuaciones que integran las fuerzas dinámicas entre la partícula y la superficie al igual que las condiciones de impacto (Enfoque teórico) y el último constituye suponer que no existe correlación entre las propiedades del material que justifiquen la erosión y por ello se diseña un parámetro de resistencia a la erosión hipotético.

Oka y Yoshida (2005) demostraron que la erosión está asociada con la dureza inicial del material y algunas las características de deformación plástica o fragilidad del material, como la tasa de relajación de esfuerzos. Por lo tanto, existen únicamente dos enfoques para el diseño de los modelos de erosión: Empírico y Teórico, a causa de esto se explica que existan discrepancias en los resultados según el tipo de montaje experimental o geometría pues las condiciones de prueba son diferentes para cada estudio, por ende, se deben calibrar las constantes y seleccionar el modelo que se ajuste mejor a los datos experimentales. En la siguiente tabla se muestra la configuración empleada para la simulación de dos fases basada en datos de Chen (2017).

Tabla 8 Condiciones de frontera para la simulación de dos fases.

Condiciones de frontera para la simulación de dos fases	
Flujo Masico Agua	122,179 lbm/s – equivale a 20KBPD
Flujo Masico Partículas	0,2932 lbm/s – 0.133 kg/s
Salida de Presión	80 psi
Velocidad de rotación	3.600 RPM
Diámetro de arena	0,0159 in
Densidad de arena	2.650 kg/m ³ – 165,434 lbm/ft ³
Condición para la entrada/salida	<i>Escape</i>
Condición de paredes	<i>Reflect</i>

Las configuraciones de solución no fueron modificadas. El modelo de erosión empleado fue el propuesto por Chen (2017) donde calibró las constantes del modelo genérico de erosión, que es similar al que plantea McLaury (1993) pero este utiliza una función de ángulo de impacto arbitraria. Las constantes fueron determinadas usando el método de mínimos cuadrados sobre diferentes tiempos de cálculo.

$$E_R = 4.992 \times 10^{-9} \dot{m} V_{sand}^{1.714} f(\alpha) \quad 52$$

Donde $f(\alpha)$ es la función de ángulo de impacto de la ecuación 9.a.

La ecuación 52 está en unidades de mm/s y asume que la pérdida de material es directamente proporcional al tiempo, en la siguiente figura se muestran los resultados base de las tasas de erosión para una bomba helico axial empleando el modelo erosivo de Chen.

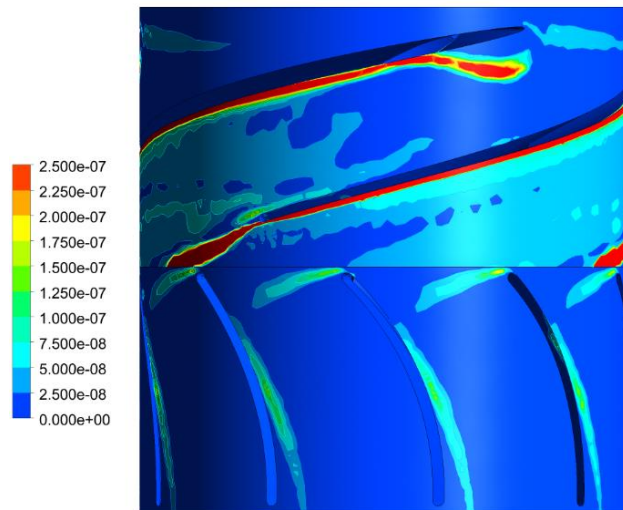


Figura 67 Tasas de erosión en mm/s utilizando el modelo de Chen

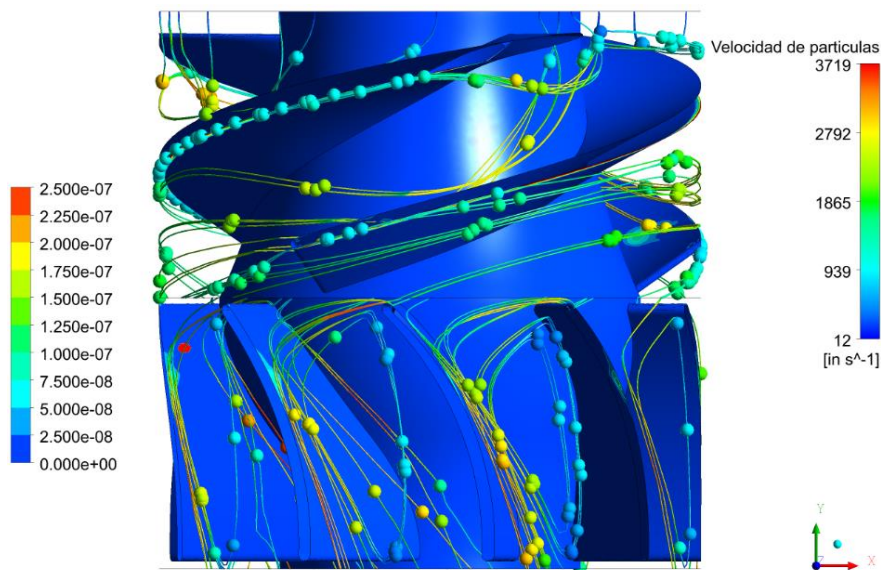


Figura 68 Velocidad en in/s, trayectoria de partículas y tasas de erosión.

Los resultados de la figura 67 y 68 no suponen sorpresa puesto que a lo largo del preprocesamiento se han llevado a cabo suposiciones que permiten generar un caso base estable y ligeramente predecible, independientemente de los resultados. Como se observa en la figura 65 y 68 el perfil del impulsor conduce a las partículas adyacentes por muy por debajo de la zona de succión estas impactan en zona de presión de la hidro ala y por fuerza centrífuga se acumulan debajo del perfil cercano a la carcasa (vano igual a 0.98), los espacios “confinados” dentro de los canales de flujo primario promueven la circulación de partículas de arena en toda su extensión areal, por esta razón la erosión en el *shroud* (carcasa) es superior que en el resto de la bomba.

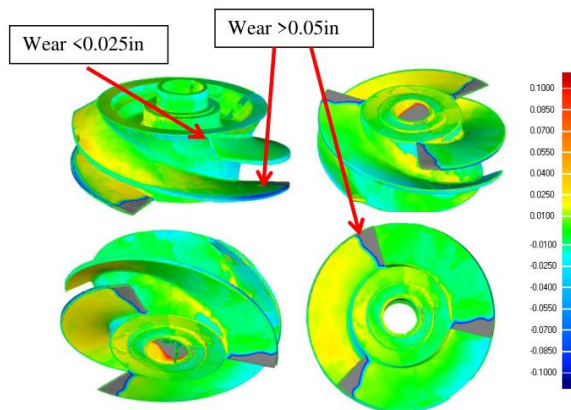


Figura 69 Diferencia de distancias sobre la superficie entre el impulsor nuevo y desgastado mediante escáner 3D. (Chen, 2017)



Figura 70 Prueba de remoción de pintura. Comparación de difusores, antes de prueba (izquierda) y después (derecha). (Chen, 2017)

Según la figura 69 el borde de ataque y salida son los componentes con mayor desgaste, el desgaste en el perfil externo del alabe está asociado al deterioro por la circulación de flujo secundario que aumenta el espacio anular, reduciendo la eficiencia de la bomba.

Como los gradientes de velocidad son muy grandes en la entrada del difusor, no se genera por completo la zona de recirculación y se crea un canal de flujo de alta velocidad propenso a erosionarse el efecto final es similar a los resultados de la figura 71.



Figura 71 Validación de resultados, simulación de flujo con arrastre de partículas versus ensayos experimentales. (Chen, 2017)

Es necesario aclarar que el modelo de erosión de Chen fue basado en simulaciones trifásicas (agua, gas y partículas) donde las partículas de arena tienden a fluir dentro de la fase acuosa y la fase gaseosa crea “vacíos” como los que se ven en la figura 22.d, por esta razón es posible que se subestime la erosión en diferentes secciones.

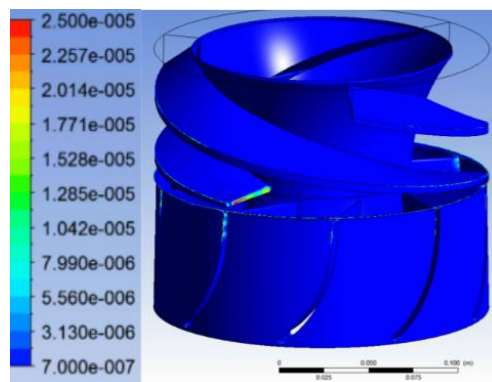


Figura 72 Tasas de erosión en mm/s en el difusor de la primera etapa e impulsor de la segunda. (Chen, 2017)

A continuación, se ilustran diferentes parámetros normalizados al valor máximo respectivo de cada caso por cada punto paralelo al eje principal de rotación:

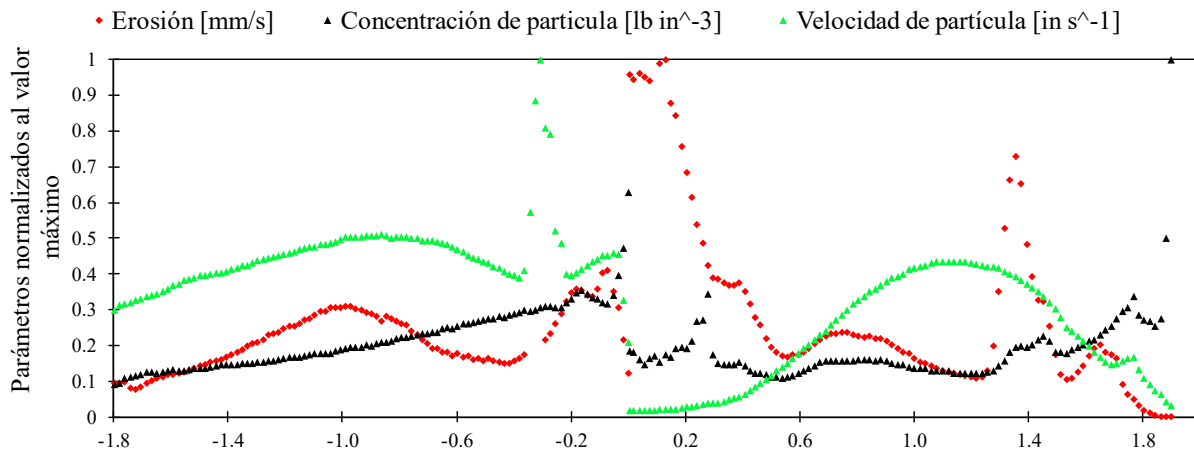


Figura 73 Erosión, concentración de partícula y velocidad de partícula promediados a lo largo del eje Y.

La siguiente figura ilustra la distancia entre las secciones perpendiculares al eje Y que se usaron para presentar los resultados.

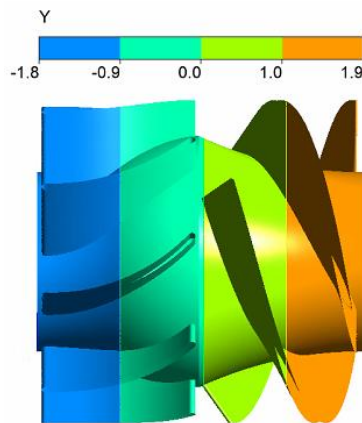


Figura 74 Perfil de distancias paralelas al eje Y en pulgadas

La zona de impulsor experimenta comportamientos erráticos en gran medida causados por el perfil del álabe, su ángulo de ataque, el borde de fuga, la ligera inclinación de los álbes y sus efectos evidentes en el contorno de presión de la figura 63 que conllevan a la mayoría de las partículas a “agruparse” e impactar en la entrada y salida del impulsor, pero sobre todo en el *shroud* en ambas secciones del dominio.

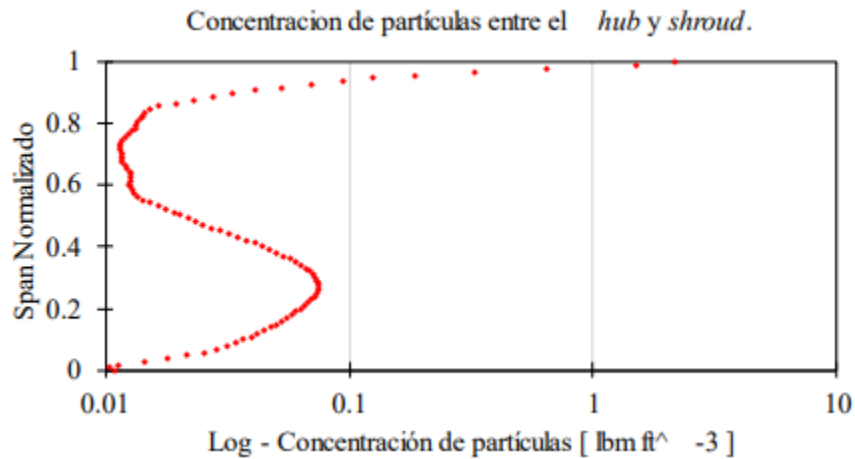


Figura 75 Concentración de partículas distribuidas a lo largo del span para $Y = 0.8$.

El difusor tiene un comportamiento más similar al ideal, el punto de mayor erosión es la locación donde las partículas impactan con más velocidad. El resto del dominio son zonas donde las partículas dada su densidad siguen las líneas de flujo, especialmente en la zona de recirculación (figura 71 y 68).

12.1 Efecto de la densidad del fluido transportador

En la siguiente configuración se emplearán dos fluidos extraídos de una base de datos:

Queroseno Liquido (C12H23)	$\rho = 48.69 \text{ lbm/ft}^3$	$\mu = 2.4 \text{ cp}$
GasOil Liquido (C16H29)	$\rho = 51.81 \text{ lbm/ft}^3$	$\mu = 3.32 \text{ cp}$

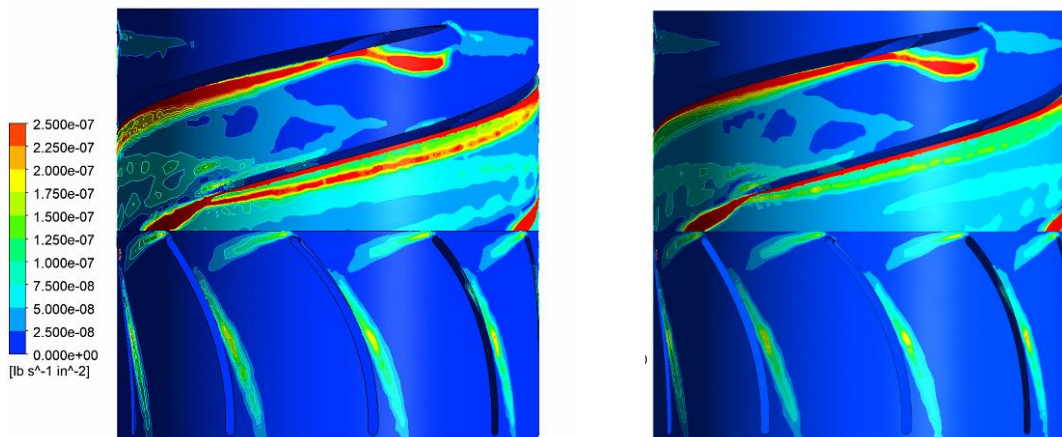


Figura 76 Tasas de erosión en mm/s para el Queroseno (izquierda) y GasOil (derecha).

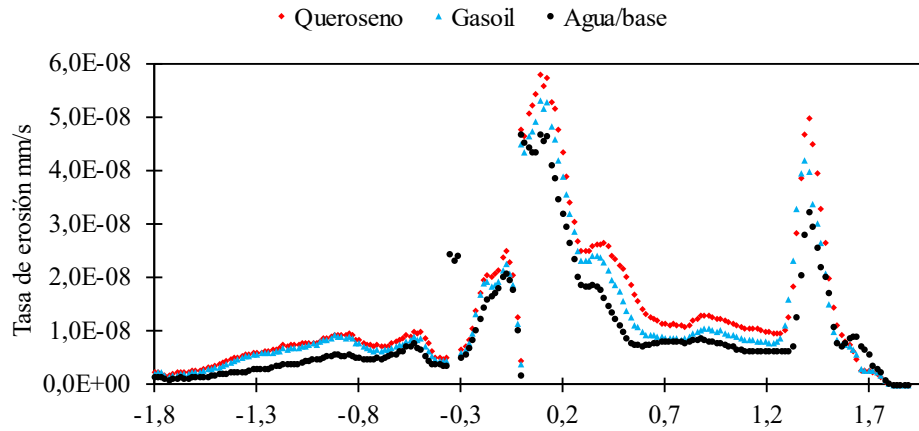


Figura 77 Tasas de erosión promediadas a lo largo del eje Y para el caso 12.1.

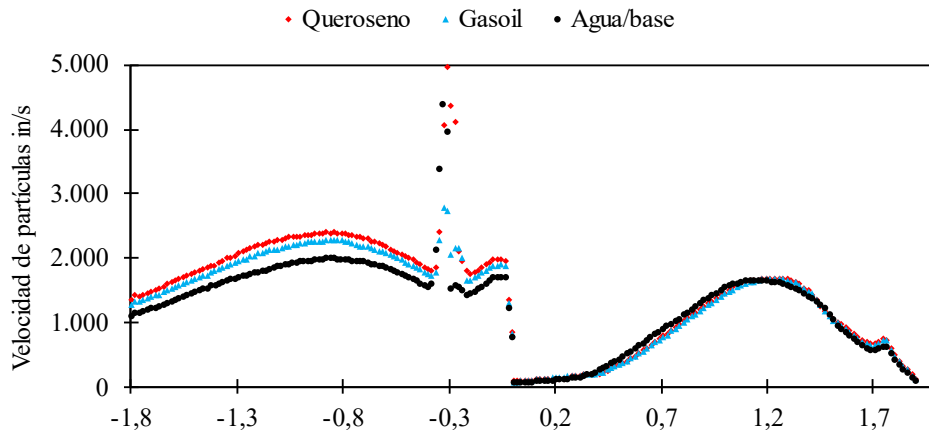


Figura 78 Velocidad de partículas a lo largo del eje Y para el caso 12.1.

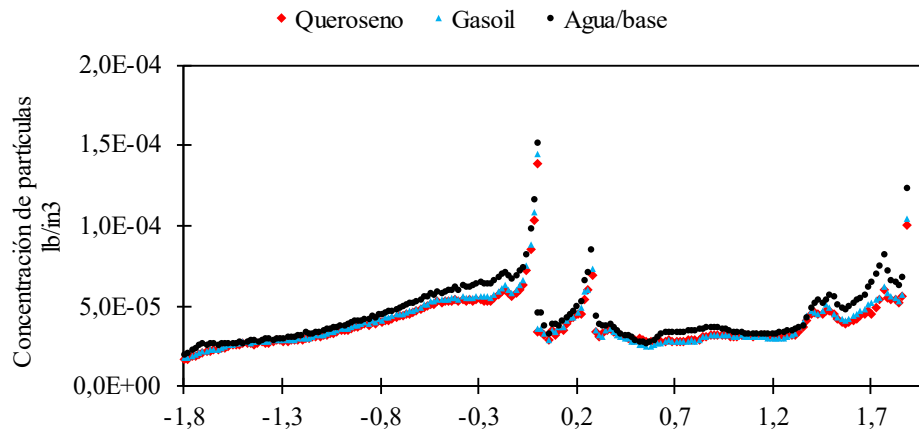


Figura 79 Concentración de partículas a lo largo del eje Y para el caso 12.1.

El queroseno y gasoil al ser menos densos que el agua transfieren menor arrastre a las partículas lo que se evidencia en el aumento de velocidad, sin embargo, la viscosidad es mayor en ambos casos, pero en esta simulación no se tienen en cuenta las características tixotrópicas del fluido transportador por lo que no se pueden dar conclusiones relevantes en ese aspecto.

12.2 Efecto de la concentración de arena

Para el efecto de la concentración de arena en el fluido los siguientes flujos máscicos fueron empleados, en el primer caso se reduce a más de la mitad y en el otro se triplica la concentración:

\dot{m}_{arena}	$\frac{0.05 \text{ kg/s} \rightarrow 0.1102 \text{ lbm/s}}{0.399 \text{ kg/s} \rightarrow 0.8796 \text{ lbm/s}}$	\dot{m}_{base}	$0.133 \text{ kg/s} \rightarrow 0.293 \text{ lbm/s}$
-------------------	--	------------------	--

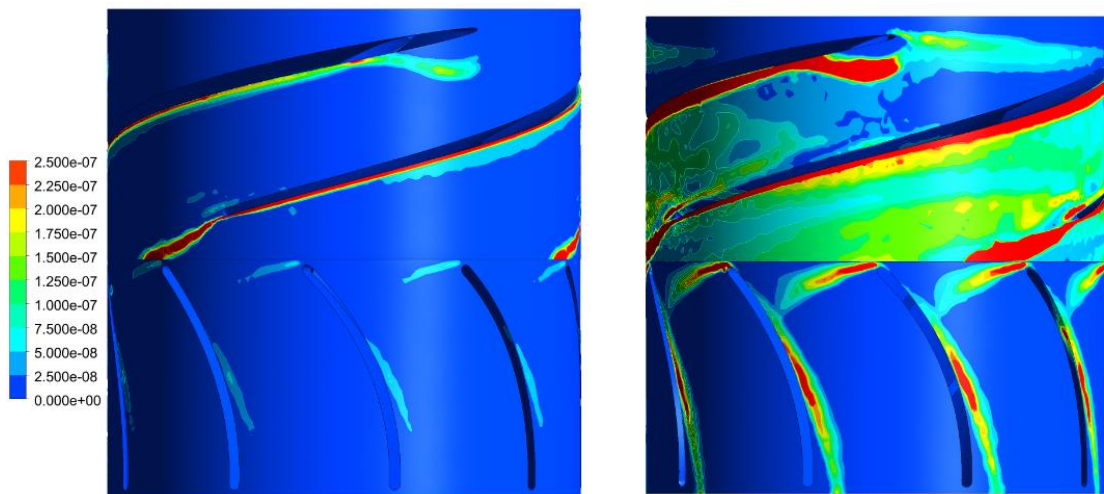


Figura 80 Tasas de erosión en mm/s para una concentración de 0.05 kg/s (izquierda) y 0.399 kg/s (derecha).

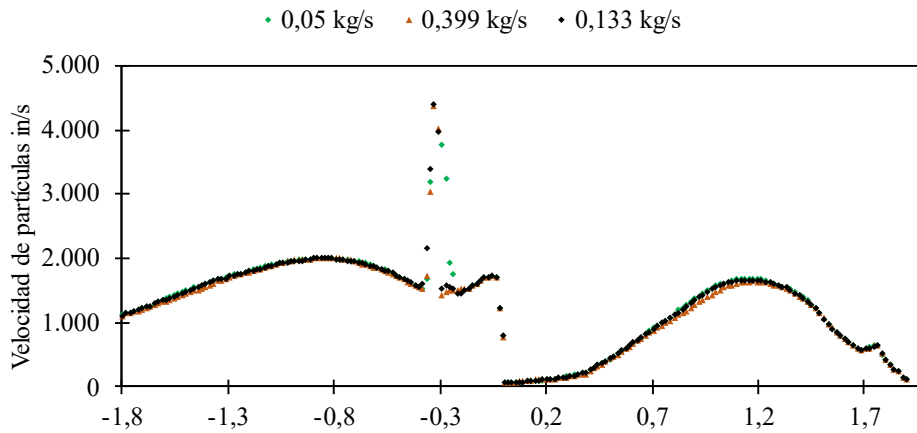


Figura 81 Velocidad de partículas a lo largo del eje Y para el caso 12.2.

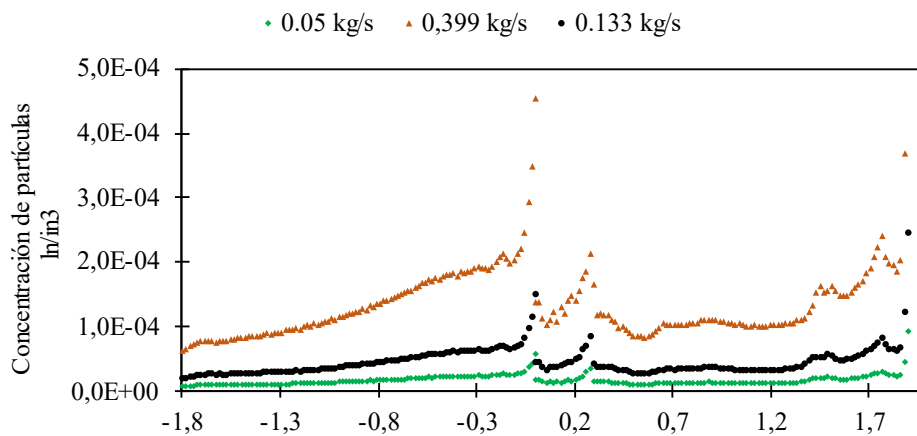


Figura 82 Concentración de partículas a lo largo del eje Y para el caso 12.2.

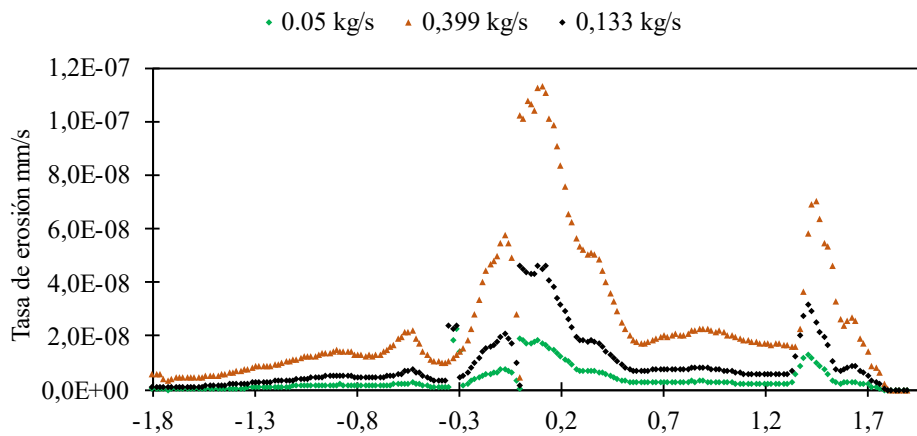


Figura 83 Tasas de erosión en mm/s para el caso 12.2.

Como se observa en la figura 83 al triplicar la concentración de partículas se triplican las tasas de erosión, estos resultados concuerdan con lo dicho en (Bonilla y Chen, 2019; Chen, 2017) donde se asume que las tasas de erosión aumentan proporcionalmente en el tiempo y evidentemente uno de los parámetros que sirve para confirmar esto es la concentración de partículas, sin embargo Tarodiya y Levy (2021) afirman que una vez se alcanzan concentraciones relativamente altas en zonas particulares del dominio, las partículas se acumulan en tumultos que “protegen” la zona formando una especie de escudo, en esta simulación no se modelan las interacciones y contactos partícula-partícula.

12.3 Efecto de distribución de tamaño de arena

Con el fin de tener resultados más realistas se aplican dos distribuciones de tamaño de arena con los siguientes parámetros:

	d_{base}		0.0159 in
d_{min}	0.005 in = 120 mesh		0.004 in = 100 mesh
d_{prom}	0.0098 = 250 mesh	Grano Grueso	0.0048 in = 120 mesh Grano Fino
d_{max}	0.0126 = 320 mesh		0.0059 in = 150 mesh

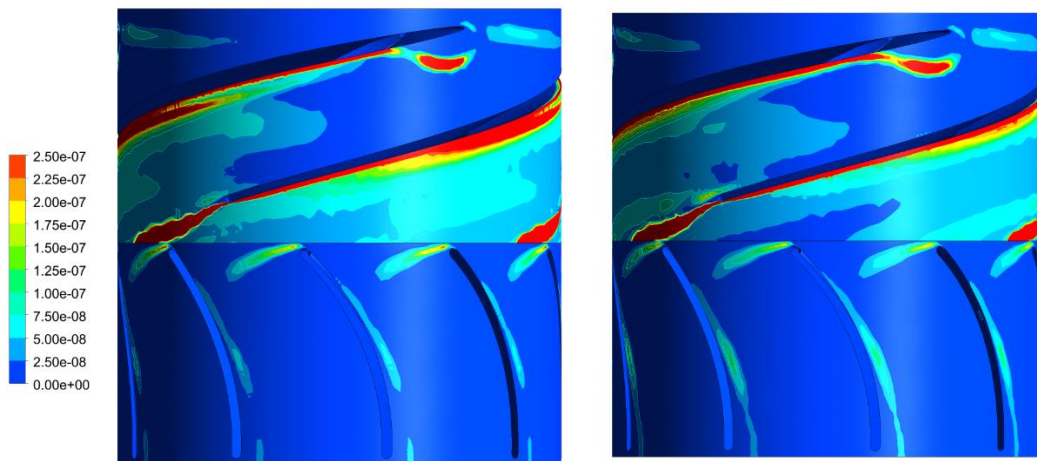


Figura 84 Tasas de erosión en mm/s para granos de arena finos (izquierda) y granos gruesos (derecha).

Como se observa en la figura 85 la mayor tasa de erosión en el impulsor la posee la distribución de granos de arena finos además en la figura 88 se tiene que los diámetros más pequeños se encuentran en la zona del borde de fuga del impulsor por ende estos granos son los responsables de la mayoría de la erosión en esta zona, sumado a esto también son los que tienen mayor velocidad (según figura 86), los granos gruesos se “acumulan” en el borde de ataque y al poseer menor velocidad no tienen la capacidad suficiente para remover altos volúmenes de material, también al tener mayor diámetro poseen mayor masa lo que los hace más “resilientes” frente a los bruscos cambios de flujo en el impulsor, es decir, tienen un número de Stokes > 1 . En el difusor como es la región estática, el comportamiento del flujo es más estacionario y por ello no existe mucha diferencia en los contornos de esta zona como se ve en la figura 84.

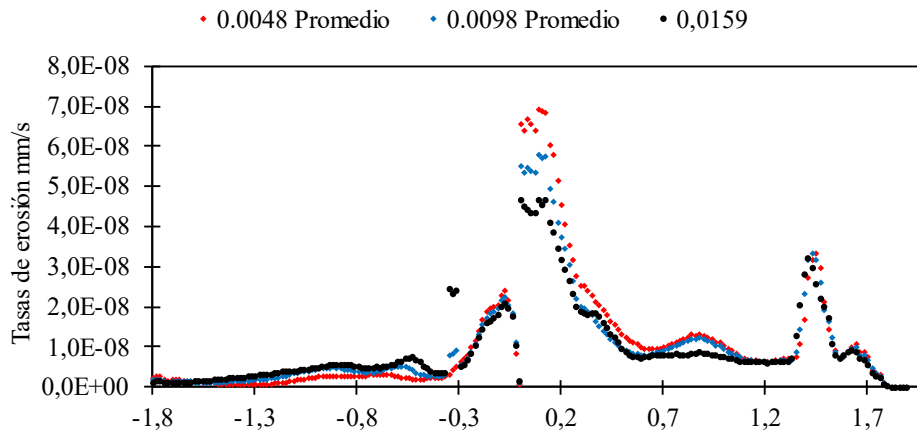


Figura 85 Tasas de erosión en mm/s a lo largo del eje Y en el caso 12.3

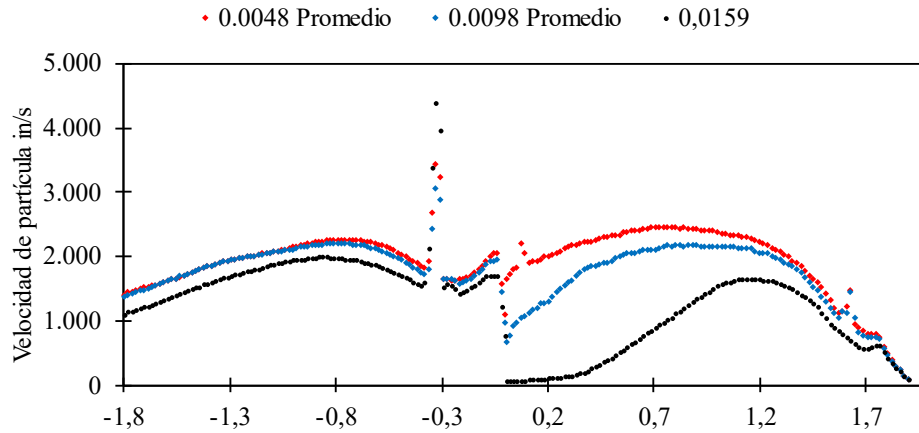


Figura 86 Velocidad de partículas a lo largo del eje Y para el caso 12.3.

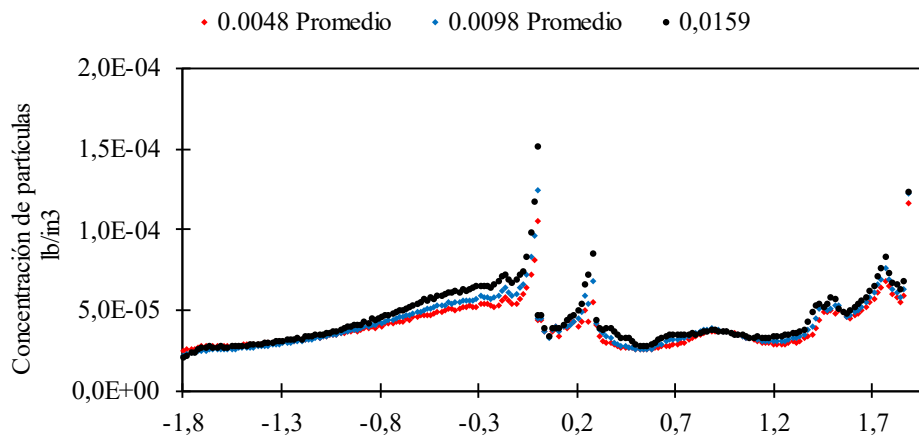


Figura 87 Concentración de partículas a lo largo del eje Y para el caso 12.3.

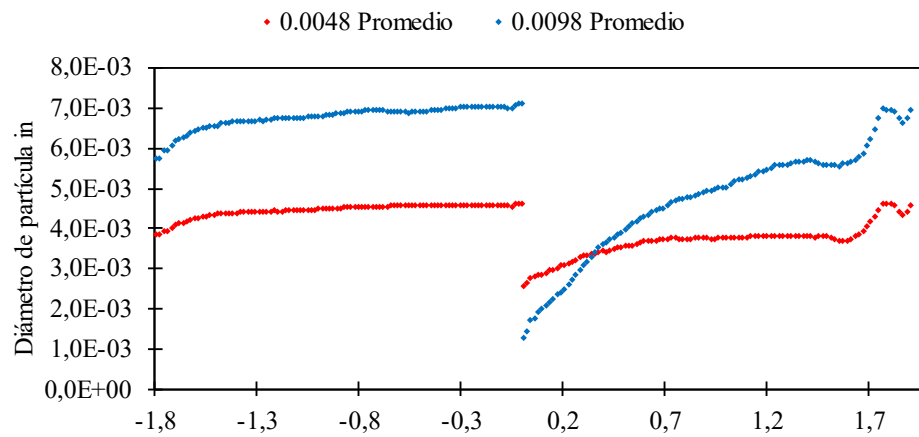


Figura 88 Distribución de diámetros de partícula a lo largo del eje Y para el caso 12.3.

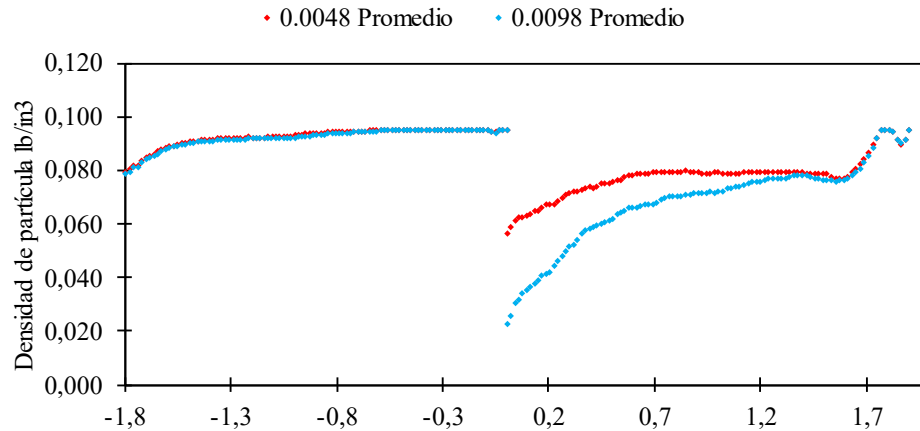


Figura 89 Densidad de partícula ponderada en flujo másico a lo largo del eje Y para el caso 12.3.

12.4 Efecto de la velocidad de rotación

Debido al variador de frecuencia que se encuentra en superficie es muy posible que la bomba gire a diferentes velocidades según la cabeza/presión que se requiera. Sin embargo, no puede ser cualquier tipo de valor ya que las bombas centrífugas axiales operan a altos RPM.

ω_1	3200 RPM	ω_{base}	3600 RPM
ω_2	4000 RPM		

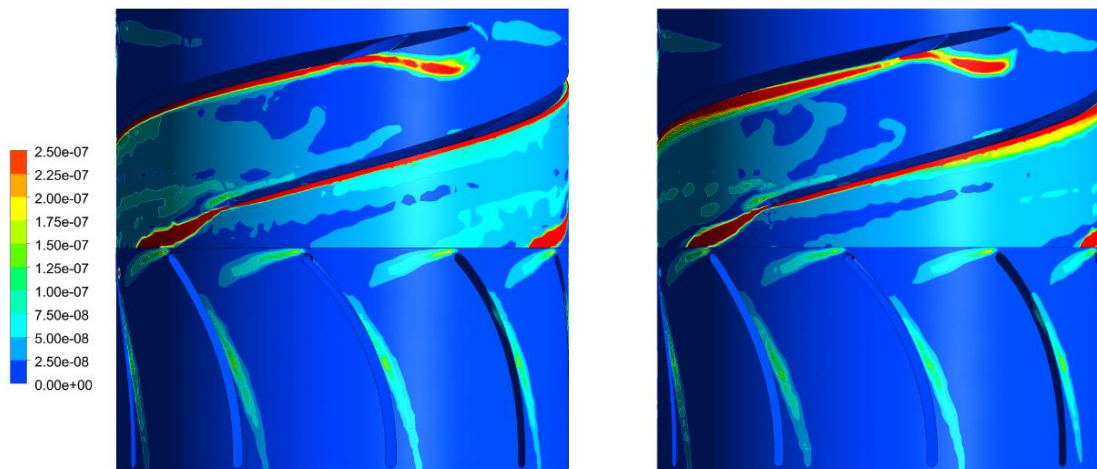


Figura 90 Tasas de erosión en mm/s para 4000 RPM (izquierda) y 3200RPM (derecha).

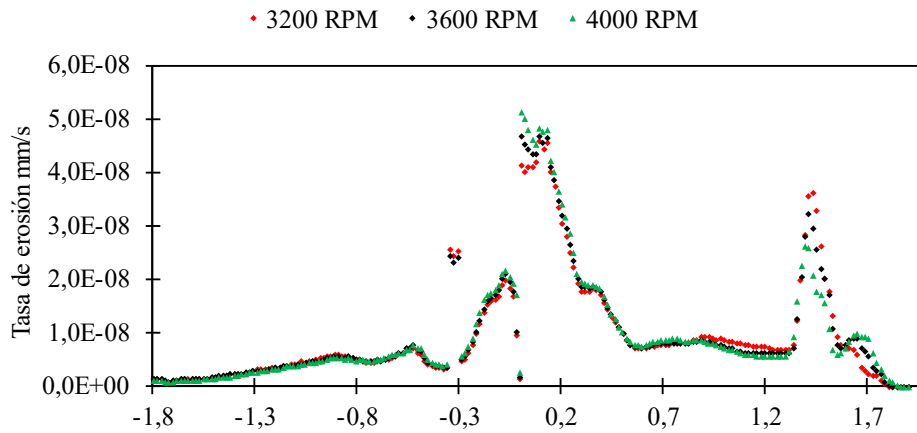


Figura 91 Tasas de erosión en mm/s a lo largo del eje Y para el caso 12.4.

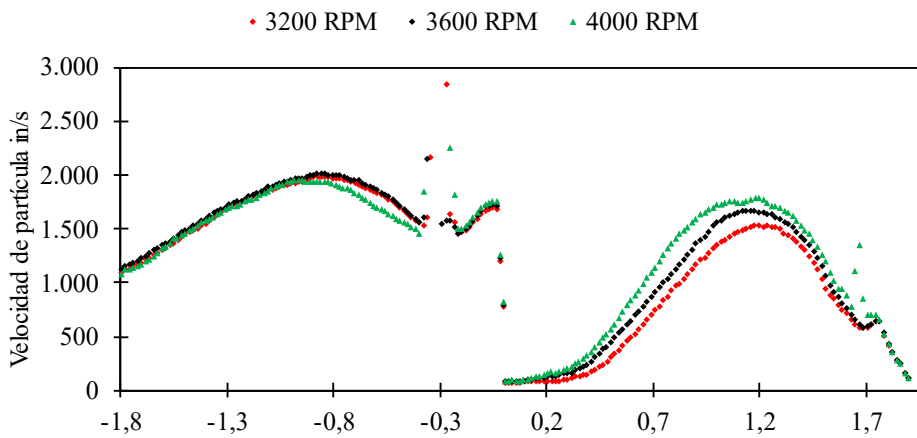


Figura 92 Velocidad de partículas a lo largo del eje Y para el caso 12.4.

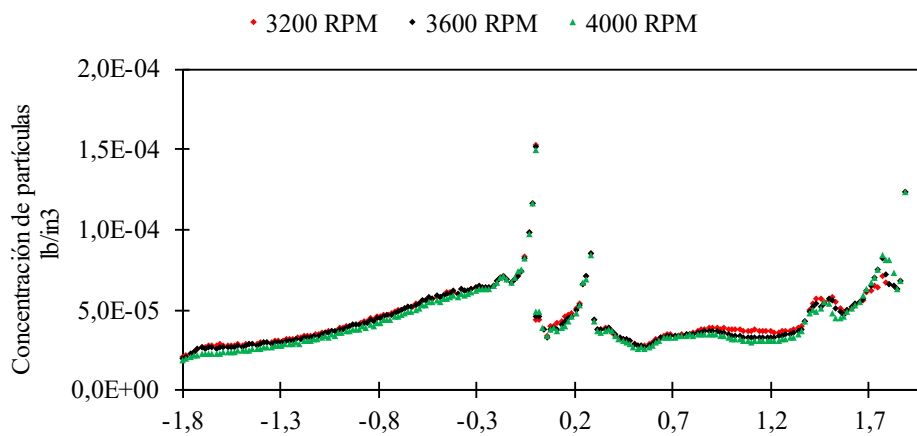


Figura 93 Concentración de partículas a lo largo del eje Y para el caso 12.4.

Al cambiar la velocidad de rotación en el impulsor la eficiencia de la bomba puede variar según su diseño, por lo general mientras más cercano se encuentre el punto operacional al *BEP* (punto de mejor eficiencia) menores serán los efectos no estacionarios que inducen a la alta energía cinética de turbulencia que según Pirouzpanah (2015) es uno de los principales factores que correlaciona de manera proporcional con la erosión en bombas de flujo mixto. En la figura 91 las tasas no varían mucho en ciertas locaciones axiales, debido a que al cambiar las revoluciones el contorno de presiones aumenta ligeramente sin presentar cambios bruscos en las líneas de flujo (ver figura 94).

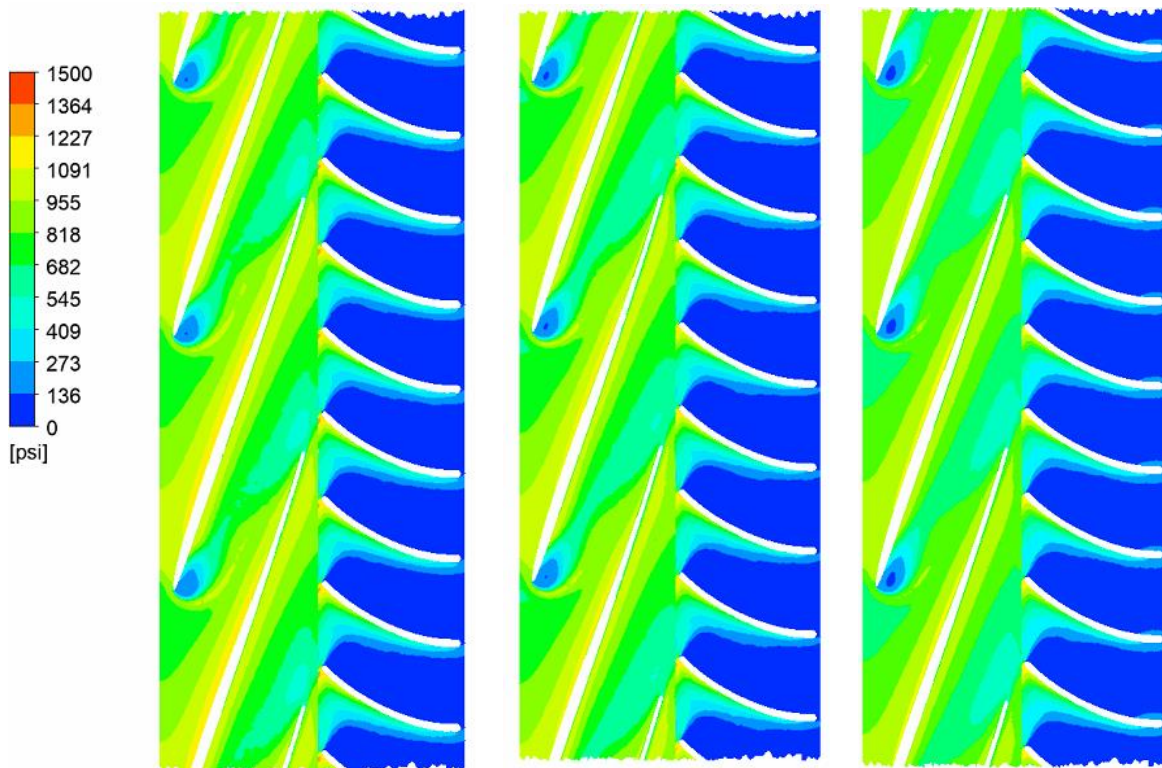


Figura 94 Contornos de presión total para 4000 RPM (izquierda) 3600 RPM (centro) y 3200 RPM (derecha) en un vano igual a 0.5.

12.5 Efecto de la densidad de la arena

Para simular el efecto que tendrían diferentes trazas mineralógicas, se promedian sus densidades en los siguientes valores:

ρ_{p1}	3000 kg/m ³	ρ_{base}	2650 kg/m ³
ρ_{p2}	2050 kg/m ³		

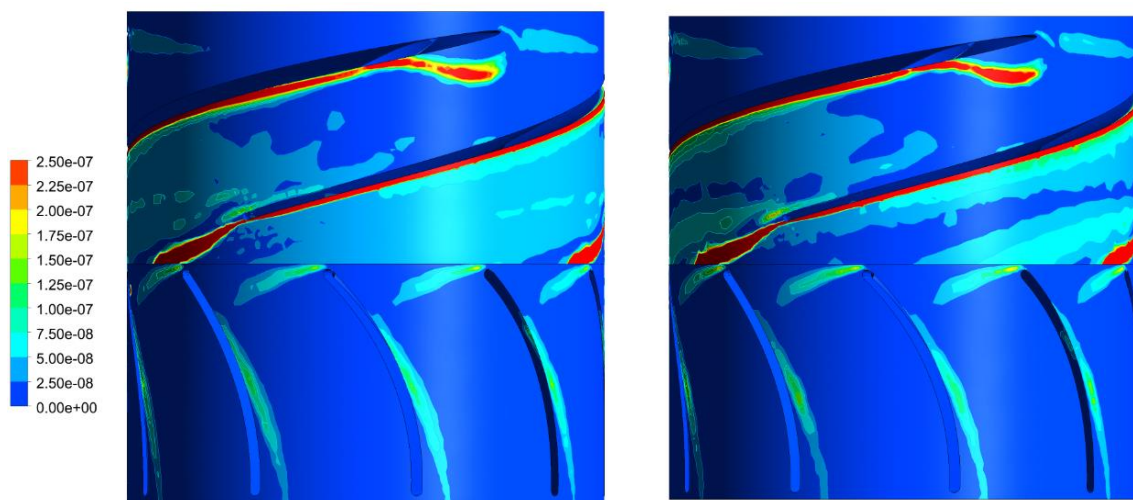


Figura 95 Tasas de erosión en mm/s para 3000 kg/m³ (izquierda) y 2050 kg/m³ (derecha).

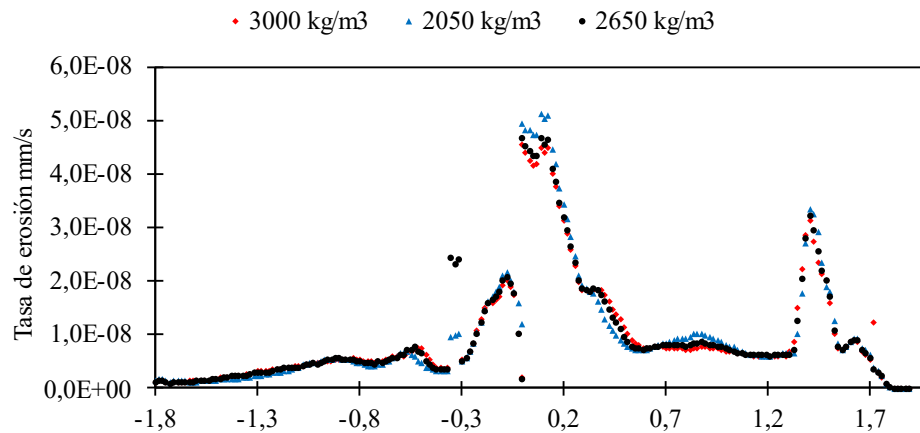


Figura 96 Tasas de erosión en mm/s a lo largo del eje Y para el caso 12.5

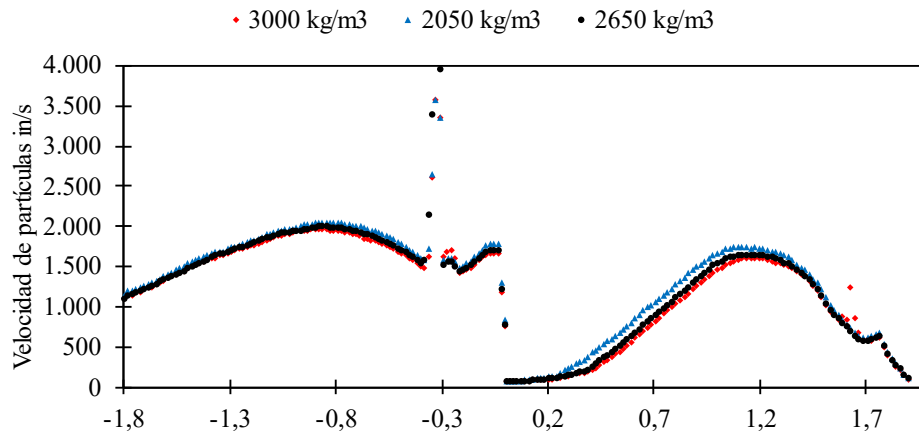


Figura 97 Velocidad de partículas a lo largo del eje Y para el caso 12.5.

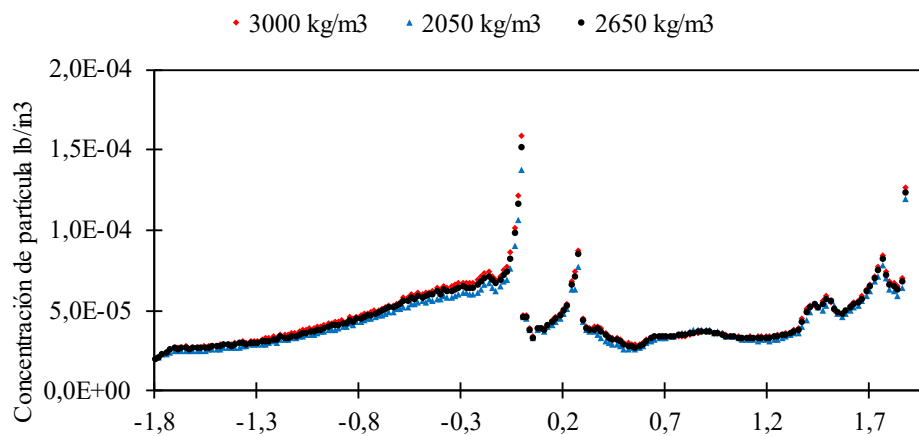


Figura 98 Concentración de partículas a lo largo del eje Y para el caso 12.5.

Para el último caso, en la figura 95 se observan leves cambios en la distribución de las zonas de erosión esto coincide con la teoría, donde las partículas con mayor densidad están asociadas a mayores tasas de erosión ya que se ven menos afectadas por los cambios en el régimen de flujo y su propia inercia las propulsa con mayor fuerza en las zonas de impacto, a pesar de ello en promedio según la figura 96 la magnitud de la erosión no varía significativamente.

13 Conclusiones

- Siguiendo la metodología, se calcularon las tasas de erosión a diferentes casos en una bomba electrosumergible helico axial empleando el modelo de erosión de Chen que fue diseñado especialmente para esta bomba. El diámetro de partícula, la concentración y el fluido transportador son algunos de los parámetros que más afectan la magnitud del proceso erosivo.
- Las tasas de erosión en una bomba electrosumergible helico axial son muy sensibles al diseño que se tenga en el perfil de los alabes del impulsor, y debido a que este componente es vital para el correcto funcionamiento y levantamiento de fluido, debe estar alineado con los requerimientos operacionales para que así se reduzcan las pérdidas por fricción en los canales de flujo primarios, que a fin de cuentas son los responsables de la trayectoria de la mayoría de partículas y promueven la acumulación de impactos en puntos específicos de la geometría.
- Para el modelo de bomba diseñado, la sección cercana al borde de fuga del impulsor tiene las mayores tasas de erosión en todos los casos, a consecuencia del diseño de los ángulos de ataque, descarga y grosor del álabe, por consiguiente, los siguientes pasos serían mejorar el diseño haciéndolo más aerodinámico o reforzar las áreas afectadas con metales de mejor metalurgia.
- La erosión es claramente un fenómeno muy complejo que requiere de pruebas extensas para probar su validez en los códigos CFD, existen diferentes métodos que pueden llegar a funcionar para unas condiciones específicas, pero para otras no. Por tal motivo la

investigación en esta área se enfoca en crear un modelo de erosión universal y hasta ahora el Modelo de Oka se podría considerar dentro de esta categoría.

- El método de rotor estático es rápido y computacionalmente asequible eso le permite obtener una proyección generalizada del comportamiento de los patrones erosivos, con esto los ingenieros a cargo de las operaciones de producción serán capaces de incluir la erosión como un criterio de selección extra al momento de analizar el desempeño una bomba centrífuga de tipo radial, mixta o axial.

14 Recomendaciones para futuros trabajos

- Se recomienda emplear una malla hexaédrica para el dominio del difusor y así tener zonas de recirculación mejor definidas, al igual que en el impulsor. Esto incrementa la velocidad de convergencia y reduce los errores por difusión numérica.
- Aplicar el método de malla deslizante e intrínsecamente resolver el problema transiente por ser una simulación de mayor precisión. Con esto se obtendrán resultados más significativos que ayuden a corroborar los resultados de la presente investigación.
- En vista de las perspectivas con respecto a las reservas de gas en Colombia y su abundancia en offshore, resulta atractivo el manejo de esta bomba para la producción y transporte de gas dado el éxito que ha tenido globalmente, por ello se deben realizar las pruebas necesarias para estudiar su posible aplicabilidad en la región.
- Al ser una bomba diseñada para bombear las tres fases, es recomendable simular las tres fases si y solo si se tienen los datos experimentales que permitan validar tal simulación.
- Si se desea conocer el desempeño de una bomba electrosumergible a medida que evoluciona la erosión esto es posible gracias a una tecnología de simulación conocida como “*Dynamic Mesh Erosion*” que actualiza la malla a medida que avanzan las iteraciones y se “desprende” material, el único inconveniente vendría siendo el alto recurso computacional necesario para llevar a cabo este tipo de simulaciones al nivel de precisión requerido.
- Con respecto al modelo de erosión a elegir existe cierto consenso en la literatura en referencia al modelo de Finnie cuando no se tiene conocimiento de los parámetros mecánicos del material de superficie, en caso de tenerlos, es muy recomendable el modelo de Oka y Yoshida (2005). La ecuación genérica de erosión se debe emplear únicamente si fue calibrada con anterioridad para el problema de interés.

- Según la literatura para problemas de erosión en turbomáquinas el modelo de turbulencia $k - \omega$ es preferible sobre el $k - \epsilon$ ya que modela las fluctuaciones con mayor precisión y más aún cuando se tienen partículas muy pequeñas con $Stk \ll 1$. En este tema se pueden encontrar estudios que fundamentan el uso *LES* (ver figura 31) para analizar el comportamiento de los patrones de flujo multifásico.
- Si se desea tener más información con respecto al estado del arte de los mecanismos de interacción partícula-superficie dirigirse al estudio de Tarodiya y Levy (2021).
- Los mecanismos de interacción partícula-partícula son muy poco comprendidos, una breve introducción al modelado de contactos se puede obtener en Lyczkowski y Bouillard (2002).
- El método *DEM* (Método de elementos discretos) es recomendable para analizar la erosión de partículas con diferentes diámetros virtuales reales y no “puntuales” (ver figura 42), al mismo tiempo permite simular el efecto que tendría la angulosidad de los granos de arena bajo diferentes configuraciones de flujo.
- Los algoritmos de programación genética son conocidos por ser directamente aplicables a este tipo de problemas cuando se requiere optimizar la forma de los álabes de las ESP y así incrementar su eficiencia, más información con respecto a ellos (específicamente NGSA) se puede encontrar en: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.07.029>.

15 Bibliografía

- Ahlert, K. R. (1994). *Effects of particle impingement angle and surface wetting on solid particle erosion of AISI 1018 steel*.
- Ali, A., Yuan, J., Deng, F., Wang, B., Liu, L., Si, Q., & Buttar, N. A. (2021). Research Progress and Prospects of Multi-Stage Centrifugal Pump Capability for Handling Gas-Liquid Multiphase Flow: Comparison and Empirical Model Validation. *Energies*, *14*(4), 896. <https://doi.org/10.3390/en14040896>
- Anderson, J. D. (1995). *Computational Fluid Dynamics*. McGraw-Hill Education.
- Bitter, J. G. A. (1963). A study of erosion phenomena: Part II. *Wear*, *6*(3), 169-190. [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(63\)90073-5](https://doi.org/10.1016/0043-1648(63)90073-5)
- Bonilla, S. G. D., & Chen, H.-Y. (2019). Analytical and Numerical Studies of Sand Erosion in Electrical Submersible Pump (ESP) Systems. *Proceedings of the 7th Unconventional Resources Technology Conference*. Unconventional Resources Technology Conference, Denver, Colorado, USA. <https://doi.org/10.15530/urtec-2019-599>
- Brennen, C. E. (2005). *Fundamentals of multiphase flow*.
- BENAVIDES MARTIN, Ramirez Mendivelso, W., Prieto Jiménez, N., & González Silva, G. (2019). ANALISIS FLUIDODINAMICO DE ALTERNATIVA PARA LA REDUCCION DE EROSION EN CODOS USANDO LA DINAMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL [recurso electronico]. UIS.
- Charalambous, N., Tournlidakis, A., Hadjiyannis, S., & Michaelides, K. (2009). Computational study of solid particle erosion in submersible pumps, combining CFD techniques with a computational erosion model. En Manna M., Martelli F., & Heitmeir F. (Eds.), *Eur. Conf.*

- Turbomach.: Fluid Dyn. Thermodyn., ETC - Conf. Proc.* (pp. 209-222). Verlag der Technischen Universität Graz; Scopus. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84924954594&partnerID=40&md5=372e901b6311f5f87de958903f26b63a>
- Chen, Y. (2017). *Three Phase Erosion Testing and CFD Analysis of a Helico Axial Pump*.
- Chira, J. ., Diaz, A. ., Gonzalez, C. ., Rodriguez, B. ., Serrano, H. ., & Prada, J. . (2017). Maximizing Production in High Gas Wells with Electrical Submersible Pumps Utilizing Variable Speed Drives with Intelligent Gas Control Software: Case History in Colombia. *Day 3 Wed, April 26, 2017, D031S006R002*. <https://doi.org/10.2118/185153-MS>
- Chung, T. J. (2002). *Computational Fluid Dynamics*. Cambridge University Press. <https://books.google.com.co/books?id=yxOTSHy8NIwC>
- Campetrol (2023). INFORME DE TALADROS Y PRODUCCIÓN. Corte a abril de 2023. [recurso en línea]
- Delgado, A., Espinosa, J., Hernandez, M., Gonzalez, G., Guanacas, L., Aya, W., & Perdomo, J. (2022). New Mechanism of Sand Management Above ESPs: Cases Study in Colombia. *Day 2 Wed, August 24, 2022, D022S005R002*. <https://doi.org/10.2118/209734-MS>
- El-Emam, M. A., Zhou, L., Yasser, E., Bai, L., & Shi, W. (2022). Computational Methods of Erosion Wear in Centrifugal Pump: A State-of-the-Art Review. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 29(6), 3789-3814. <https://doi.org/10.1007/s11831-022-09714-x>
- Falcimaigne, J., Brac, J., Charron, Y., Pagnier, P., & Vilagines, R. (2002). Multiphase Pumping: Achievements and Perspectives. *Oil & Gas Science and Technology*, 57(1), 99-107. <https://doi.org/10.2516/ogst:2002007>
- Finnie, I. (1960). Erosion of surfaces by solid particles. *Wear*, 3(2), 87-103. [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(60\)90055-7](https://doi.org/10.1016/0043-1648(60)90055-7)

Fluent, A. (2009). 12.0 Theory Guide. Ansys Inc, 5(5), 15.

Gié, P., Buvat, P., Bratu, C., & Durando, P. (1992). Poseidon Multiphase Pump: Field Tests Results. *All Days*, OTC-7037-MS. <https://doi.org/10.4043/7037-MS>

González Silva, G. (2012). *Metodologia para aplicar LES ao craqueamento catalítico fluido em um reator riser industrial*.

Gudigopuram, S. R. (2016). *Experimental and CFD Simulation of a Helico-Axial Pump*.

Hadjiyannis, S., Charalambous, N., Tournlidakis, A., & Michaelides, K. (2009). An experimental and computational study of the erosion in submersible pumps and the development of a methodology for selecting appropriate protective coatings. *Proc. ASME Turbo Expo*, 6(PART A), 61-72. Scopus. <https://doi.org/10.1115/GT2009-60090>

Humphrey, J. A. C. (1990). Fundamentals of fluid motion in erosion by solid particle impact. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 11(3), 170-195. [https://doi.org/10.1016/0142-727X\(90\)90036-B](https://doi.org/10.1016/0142-727X(90)90036-B)

Hutchings, I. M. (1981). A model for the erosion of metals by spherical particles at normal incidence. *Wear*, 70(3), 269-281. [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(81\)90347-1](https://doi.org/10.1016/0043-1648(81)90347-1)

Hirschfeldt, C.M., & Bertomeu, F. (2014). ANÁLISIS Y REVISIÓN DE LAS MEJORES PRÁCTICAS Y NUEVAS TECNOLOGÍAS EN ESP, con el fin de optimizar la eficiencia del sistema de producción y los costos asociados.

Lyczkowski, R. W., & Bouillard, J. X. (2002). State-of-the-art review of erosion modeling in fluid/solids systems. *Progress in Energy and Combustion Science*, 28(6), 543-602. [https://doi.org/10.1016/S0360-1285\(02\)00022-9](https://doi.org/10.1016/S0360-1285(02)00022-9)

Marsis, E., & Russell, R. (2013). A state-of-the-art computational fluid dynamics simulation for erosion rates prediction in a bottom hole electrical submersible pump. *Soc. Pet. Eng. - SPE*

- Heavy Oil Conf. Canada*, 2, 802-815. Scopus.
<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84883329420&partnerID=40&md5=f65f6de1a074d9d7e082840d45005f33>
- McLaury, B. S. (1993). *A MODEL TO PREDICT SOLID PARTICLE EROSION IN OILFIELD GEOMETRIES*.
- Meng, H. C., & Ludema, K. C. (1995). Wear models and predictive equations: Their form and content. *Wear*, 181-183, 443-457. [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(95\)90158-2](https://doi.org/10.1016/0043-1648(95)90158-2)
- Neilson, J. H., & Gilchrist, A. (1968). Erosion by a stream of solid particles. *Wear*, 11(2), 111-122. [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(68\)90591-7](https://doi.org/10.1016/0043-1648(68)90591-7)
- Oka, Y. I., Ohnogi, H., Hosokawa, T., & Matsumura, M. (1997). The impact angle dependence of erosion damage caused by solid particle impact. *Wear*, 203-204, 573-579. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(96\)07430-3](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(96)07430-3)
- Oka, Y. I., Okamura, K., & Yoshida, T. (2005). Practical estimation of erosion damage caused by solid particle impact. *Wear*, 259(1-6), 95-101. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2005.01.039>
- Oka, Y. I., & Yoshida, T. (2005). Practical estimation of erosion damage caused by solid particle impact. *Wear*, 259(1-6), 102-109. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2005.01.040>
- Oro, J. M. F. (2012). *Técnicas numéricas en ingeniería de fluidos: Introducción a la dinámica de fluidos computacional (CFD) por el método de volúmenes finitos*. Reverte. <https://books.google.com.co/books?id=x9zeDwAAQBAJ>
- Pagalthivarthi, K. V., Gupta, P. K., Tyagi, V., & Ravi, M. R. (2011). CFD Prediction of Erosion Wear in Centrifugal Slurry Pumps for Dilute Slurry Flows. *The Journal of Computational Multiphase Flows*, 3(4), 225-245. <https://doi.org/10.1260/1757-482X.3.4.225>

- Pirouzpanah, S. (2015). *Experimental Measurement of Multiphase Flow and CFD Erosion Modeling in Electrical Submersible Pumps* [Thesis].
<https://oaktrust.library.tamu.edu/handle/1969.1/153919>
- Pirouzpanah, S., Patil, A., Chen, Y., & Morrison, G. (2019). Predictive Erosion Model for Mixed Flow Centrifugal Pump. *Journal of Energy Resources Technology, Transactions of the ASME, 141*(9). Scopus. <https://doi.org/10.1115/1.4043135>
- Stepanoff, A. (1957). *Centrifugal and axial flow pumps, design and applications*. New York: John Willy and Sons.
- Takacs, G. (2009). *Electrical Submersible Pumps Manual: Design, Operations, and Maintenance*. Elsevier Science. <https://books.google.com.co/books?id=DJVAACDCx8YC>
- Tarodiya, R., & Levy, A. (2021). Surface erosion due to particle-surface interactions—A review. *Powder Technology, 387*, 527-559. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.04.055>
- Tilly, G. P. (1973). A two stage mechanism of ductile erosion. *Wear, 23*(1), 87-96. [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(73\)90044-6](https://doi.org/10.1016/0043-1648(73)90044-6)
- Wilcox, D. C. (2006). *Turbulence Modeling for CFD* (Número v. 1). DCW Industries. <https://books.google.com.co/books?id=q4ypAQAACAAJ>
- Zhang, Y., Reuterfors, E. P., McLaury, B. S., Shirazi, S. A., & Rybicki, E. F. (2007). Comparison of computed and measured particle velocities and erosion in water and air flows. *Wear, 263*(1-6), 330-338. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2006.12.048>
- Zhu, H., Zhang, J., Zhu, J., Rutter, R., & Zhang, H.-Q. (2019). A numerical study of turbulence model and rebound model effect on erosion simulations in an electrical submersible pump (ESP). *ASME-JSME-KSME Jt. Fluids Eng. Conf., AJKFluids, 3B-2019*. Scopus. <https://doi.org/10.1115/AJKFluids2019-5538>

- Zhu, H., Zhu, J., Rutter, R., & Zhang, H.-Q. (2019). A Numerical Study on Erosion Model Selection and Effect of Pump Type and Sand Characters in Electrical Submersible Pumps by Sandy Flow. *Journal of Energy Resources Technology, Transactions of the ASME, 141*(12). Scopus. <https://doi.org/10.1115/1.4044941>
- Zhu, H., Zhu, J., Rutter, R., Zhang, J., & Zhang, H.-Q. (2018a). Sand erosion model prediction, selection and comparison for electrical submersible pump (ESP) using CFD method. *ASME Fluids Eng Div Publ FEDSM, 3*. Scopus. <https://doi.org/10.1115/FEDSM2018-83179>
- Zhu, H., Zhu, J., Rutter, R., Zhang, J., & Zhang, H.-Q. (2018b). Sand erosion model prediction, selection and comparison for electrical submersible pump (ESP) using CFD method. *ASME Fluids Eng Div Publ FEDSM, 3*. Scopus. <https://doi.org/10.1115/FEDSM2018-83179>