

Evaluación de una turbina bulbo para una planta mareomotriz tipo embalse en Buenaventura

Alvaro Jose Salazar Benavidez



Universidad del Valle
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica
Santiago de Cali, Colombia
Febrero de 2026

Evaluación de una turbina bulbo para una planta mareomotriz tipo embalse en Buenaventura

Alvaro Jose Salazar Benavidez

Documento presentado como requisito para optar por el título de
Ingeniero Mecánico

Director:

Dr. Eng. Juan Gabriel Rueda Bayona

Universidad del Valle
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica
Santiago de Cali, Colombia
Febrero de 2026

DEDICATORIA

A mi amada madre, que ya no está físicamente, pero vive en cada paso que doy.
Gracias por todo lo que me diste

RESUMEN

Este estudio evalúa el desempeño hidráulico de una turbina tipo bulbo para una planta mareomotriz propuesta bajo configuración de presa de marea en Buenaventura, Colombia. La costa Pacífica del país, caracterizada por rangos mesomareales entre 2 y 4 metros, ofrece condiciones altamente favorables para el aprovechamiento de energía mareomotriz. Pues se identificaron velocidades de flujo entre 9 y 11 m/s, correspondientes a un potencial energético teórico de aproximadamente 5,4 MW por turbina. Estos resultados evidencian la magnitud del recurso mareal disponible en Buenaventura y respaldan la viabilidad de futuros proyectos de energía renovable en la región.

Para analizar el comportamiento de la turbina bajo las condiciones hidráulicas locales, se desarrolló un modelo de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), validado con datos de la central hidroeléctrica Jebel Aulia, la cual opera turbinas bulbo HYDROMATRIX de Andritz. El proceso de validación alcanzó un error de convergencia de malla del 1%, lo que confirma la confiabilidad del modelo, y un error del 4% en la validación del modelo. Posteriormente, el modelo se adaptó a las condiciones específicas del sitio en Buenaventura. Se aplicó un diseño factorial 2^k con cinco factores (ángulo álabes guías, ángulo álabes del rotor, ángulo salida de la recámara, velocidad aguas arriba de la recámara y densidad del agua) y un total de 32 simulaciones para evaluar de manera sistemática los efectos de la velocidad de entrada, velocidad de salida, torque y distribución de presiones sobre los álabes guía y el rotor.

Los resultados mostraron que la velocidad de entrada es el factor estadísticamente más significativo en el rendimiento de la turbina, con valores de R^2 superiores a 0,9 tanto en el ANOVA como en los modelos de regresión. Esta fuerte correlación valida la capacidad predictiva del modelo basado en CFD. Dado que la velocidad del flujo es directamente proporcional a la potencia generada y a las presiones sobre los álabes. También, se identificó que las mareas vivas representan el escenario operativo más favorable, maximizando la eficiencia y la producción energética, dado que la producción de energía es mayor en sicigia con una eficiencia del 72%, mientras para cuadratura la eficiencia es de 15,3%.

Los resultados aportan información clave para el diseño hidráulico y la futura implementación de plantas mareomotrices de tipo embalse en Colombia. Como trabajo futuro, se plantea el desarrollo de ecuaciones modelo normalizadas para nuevas variables de respuesta, partiendo de las encontradas y la exploración de geometrías de turbinas optimizadas para flujo bidireccional.

Palabras clave: energía mareomotriz, turbina bulbo, CFD, planta de tipo dique, optimización hidráulica, Colombia.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi familia que me apoyo en este proceso y siempre estuvo para mí a lo largo de esta carrera.

A mis amigos que logré conocer en mi vida universitaria, especialmente a Víctor Rincón, quien fue incondicional en todo el proceso y fundamental para la culminación del proyecto.

Igualmente agradezco a mi director Juan Gabriel Rueda Bayona quien no solo me acompañó a lo largo de este proyecto, sino que también me enseñó el mundo de la investigación y como desde mi carrera puedo aportar en el ámbito de las energías marinas renovables. También, le agradezco al profesor Guillermo Jaramillo que en un principio me ayudo con el proyecto y también en mi formación profesional.

También, al grupo de investigación Hidromar y mis compañeros del grupo de quienes aprendí y me ayudaron a culminar este trabajo.

Finalmente, agradezco a la universidad del Valle y a la escuela de ingeniería mecánica que se convirtió en mi segunda casa y me permitió formarme como persona y profesional.

Tabla de Contenido

1.	Introducción	7
1.1.	Identificación del problema.....	7
1.2.	Antecedentes	7
1.3.	Estado del Arte	8
1.4.	Justificación.....	8
2.	Objetivos	9
2.1.	Objetivo General	9
2.2.	Objetivos Específicos.....	9
3.	Marco Teórico	10
3.1.	Propiedades del agua de mar	10
3.1.1.	Presión.....	10
3.1.2.	Temperatura	10
3.1.3.	Densidad.....	11
3.1.4.	Salinidad.....	12
3.2.	Mareas	13
3.2.1.	Mareas meteorológicas.....	13
3.2.2.	Mareas astronómicas	13
3.2.3.	Marea de sicigia	14
3.2.4.	Marea de cuadratura	14
3.2.5.	Marea diurna	15
3.2.6.	Marea semidiurna	16
3.2.7.	Marea semidiurna mixta.....	16
3.2.8.	Corrientes de marea.....	17
3.2.9.	Análisis armónico de mareas.....	17
3.1.	Tecnología mareomotriz	18
3.2.	Presa de marea.....	18
3.2.1.	Laguna de marea	19
3.2.2.	Arrecife de marea	20
3.3.	Turbinas hidráulicas	20
3.3.1.	Potencia hidráulica y mecánica	20
3.3.2.	Parametrización de turbinas axiales	21
3.3.3.	Triangulo de velocidades	21
3.3.4.	Diagrama de colinas de turbinas	23

3.3.5.	Turbina de bulbo	23
3.3.6.	Turbina Straflo	24
3.3.7.	Turbina bulbo modificada	25
3.3.8.	Turbina VLH.....	25
3.4.	Dinámica computacional de fluidos	26
3.4.1.	Ecuaciones de gobierno.....	26
3.4.2.	Modelo de turbulencia.....	27
3.4.2.1.	Modelo k- ω SST.....	27
3.5.	Diseño de experimentos	28
3.5.1.	Diseño factorial 2^k	29
3.5.1.1.	Contrastes	29
3.5.1.2.	Efectos.....	29
3.5.1.3.	Suma de cuadrados.....	29
3.5.1.4.	Grado de libertad.....	29
3.5.1.5.	Media cuadrática	29
3.5.1.6.	Estadístico F calculado.....	30
3.5.1.7.	F teórica.....	30
3.5.1.8.	P-value.....	30
3.5.1.9.	Efecto estandarizado	30
3.5.1.10.	Margen de Error	30
3.5.2.	Modelo	31
3.5.2.1.	Residuo.....	31
3.5.2.2.	Residuo STD	31
3.5.2.3.	PRESS	31
4.	Metodología	32
	Objetivo específico No. 1: “Seleccionar y adaptar la configuración hidráulica de una planta mareomotriz a las condiciones de Buenaventura.”	32
	Objetivo específico No 2: “Optimizar las características hidráulicas de la configuración adaptada y comparar los parámetros hidráulicos de la turbina adaptada frente a las condiciones operacionales de diseño.”	32
	Objetivo específico No. 3: “Formular recomendaciones para la adaptación de las turbinas comerciales o la posible fabricación de estas considerando las características de Buenaventura.”	32
5.	Resultados	33
5.1.	Caracterización zona de estudio	33
5.2.	Verificación del modelo.....	37

5.3.	Doe-Anova	43
5.3.1.	Ángulo de los álabes guía.....	44
5.3.2.	Ángulo álabes del rotor	44
5.3.3.	Ángulo de salida de recámara de descarga.....	44
5.3.4.	Velocidad del flujo	45
5.3.5.	Densidad del agua	45
5.4.	Resultados Doe-Anova.....	48
5.4.1.	Análisis velocidad entrada.....	49
5.4.2.	Análisis de velocidad aguas abajo.....	55
5.4.3.	Análisis del torque.....	60
5.4.4.	Análisis de la presión en los álabes guías.....	67
5.4.5.	Análisis de la presión en el rotor	73
5.5.	Recomendaciones para la adaptación de las turbinas en la Bahía de Buenaventura.	79
6.	Conclusiones	81
6.1.	Futuros trabajos	81
7.	Bibliografía	82

Lista de Figuras

Figura 3.1: Perfil típico de temperatura en océano abierto para una región de latitud media [17]. ..	11
Figura 3.2: Perfil de densidad representativo del océano abierto en latitudes medias [17].	12
Figura 3.3: Perfil de salinidad para latitud alta y latitud baja [17].	13
Figura 3.4: Marea de sicigia [17].	14
Figura 3.5: Marea de cuadratura [17].	15
Figura 3.6: Marea diurna.	15
Figura 3.7: Marea Semidiurna.	16
Figura 3.8: Marea semidiurna mixta.	17
Figura 3.9: Principales turbinas de corriente de marea [22].	18
Figura 3.10: Estructura de una presa de marea.	19
Figura 3.11: Laguna de marea [24].	20
Figura 3.12: Arrecife de marea [26].	20
Figura 3.13: Triangulo de velocidades.	22
Figura 3.14: Gráfico de colinas común para turbinas [28].	23
Figura 3.15: Turbina bulbo.	24
Figura 3.16: Turbina straflo.	24
Figura 3.17: Turbina bulbo modificada.	25
Figura 3.18: Turbina VLH.	25
Figura 5.1: Serie de Nivel del Mar Horario DIMAR.	33
Figura 5.2: serie de tiempo modelada de un año.	35
Figura 5.3: ubicación de la presa en la bahía de Buenaventura.	36
Figura 5.4: Modelo esquemático 3D del embalse y recámaras [36].	36
Figura 5.5: Vista en sección y fotografía de los módulos en estado elevado de la presa de Jebel Aulia [37].	37
Figura 5.6: Desarrollo del perfil NACA 66, para la turbina hidromatrix.	38
Figura 5.7: Rodete hidromatrix Jebel.	39
Figura 5.8: Turbina bulbo hidromatrix.	39
Figura 5.9: Materiales asignados en CFD Autodesk.	40
Figura 5.10: Condiciones de borde.	40
Figura 5.11: Convergencia de la malla.	41
Figura 5.12: Malla Jebel.	42
Figura 5.13: Valor de y^+	42
Figura 5.14: Resultados aguas arriba y aguas abajo de la turbina.	43
Figura 5.15: Nivel bajo y alto de los álabes guía	44
Figura 5.16: Nivel bajo y alto de los álabes del rotor.	44
Figura 5.17: Nivel bajo y alto ángulo de salida recámara de descarga.	45
Figura 5.18: Mapa de estaciones de muestreo de la REDCAM en Buenaventura [42]	46
Figura 5.19: Variación histórica (2001-2023) de la salinidad del agua en las estaciones y zonas REDCAM en Valle del Cauca tomado y editado de [42].	46
Figura 5.20: Probabilidad normal de los efectos para la velocidad en la entrada.	50
Figura 5.21: Diagrama de Pareto efecto estandarizado velocidad aguas arriba considerando todas las interacciones.	51
Figura 5.22: Ajuste vs Residuo velocidad de entrada.	52

Figura 5.23: Grafica de efectos para la velocidad de entrada.....	53
Figura 5.24: Gráfica de factores para la velocidad de entrada.	53
Figura 5.25: Comparación Respuesta, ANOVA sin filtrar y Ajuste filtrado.	54
Figura 5.26: Probabilidad normal de los efectos para la velocidad en la salida.....	56
Figura 5.27: Diagrama de Pareto para la velocidad de salida.	57
Figura 5.28: Ajuste vs Residuo velocidad de salida.....	58
Figura 5.29: Gráfica de efectos para la velocidad aguas abajo.	59
Figura 5.30: Gráficas de factores velocidad aguas abajo.	59
Figura 5.31: Comparación respuesta, ANOVA sin filtrar y Ajuste filtrado para la velocidad aguas abajo.	60
Figura 5.32: Probabilidad normal de los efectos para el torque.	62
Figura 5.33: Diagrama de Pareto para el torque.....	63
Figura 5.34: Ajuste vs Residuo para el torque.	65
Figura 5.35: Gráfica de efectos para el torque.	65
Figura 5.36: Gráfica de factores para el torque.....	66
Figura 5.37: Comparación respuesta, ANOVA sin filtrar y Ajuste para el torque filtrado.....	67
Figura 5.38: Probabilidad normal de los efectos para la presión en los álabes guías.....	68
Figura 5.39: Diagrama de Pareto para la presión en los álabes guías.	69
Figura 5.40: Ajuste vs Residuo para la presión en los álabes guías.....	71
Figura 5.41: Gráfica de efectos para la presión en los álabes guías.....	71
Figura 5.42: Gráfica de factores para la presión en los albes guías.	72
Figura 5.43: Comparación Respuesta, ANOVA sin filtrar y Regresión filtrada para la presión en los álabes guías.	73
Figura 5.44: Probabilidad normal de los efectos para la presión en el rotor.	74
Figura 5.45: Diagrama de Pareto para la presión en el rotor.....	75
Figura 5.46: Ajuste vs Residuo para la presión en el rotor.	77
Figura 5.47: Gráfica de efectos para la presión en el rotor.	77
Figura 5.48: Gráfica de factores para la presión en el rotor.	78
Figura 5.49: Comparación Respuesta, ANOVA sin filtrar y Regresión filtrada para la presión en el rotor.....	79
Figura 5.50: Distribución recomendada.	80

Lista de Tablas

Tabla 5-1: Principales armónicos de marea constituyentes de la Bahía de Buenaventura calculados a partir de datos medidos del nivel del agua entre 2011 y 2021 [14].	34
Tabla 5-2: armónicos para agregar amplificación de mareas [14].	34
Tabla 5-3: Resultados CFD de velocidades de fluidos a través de las compuertas de la planta de energía mareomotriz [36].	37
Tabla 5-4: Datos técnicos de la planta de Jebel Aulia.	37
Tabla 5-5: Convergencia de la malla.	41
Tabla 5-6: Resultados simulación de validación.	43
Tabla 5-7: Factores y niveles evaluados.	47
Tabla 5-8: Combinaciones evaluadas.	47
Tabla 5-9: Resultados simulaciones.	48
Tabla 5-10: Contraste y efectos de la velocidad aguas arriba.	49
Tabla 5-11: Análisis factores e interacciones velocidad de entrada.	50
Tabla 5-12: Regresión DOE-ANOVA para la velocidad de entrada.	51
Tabla 5-13: Contrastes y efectos en la velocidad aguas abajo.	55
Tabla 5-14: Análisis factores e interacciones velocidad de salida.	56
Tabla 5-15: Regresión DOE-ANOVA para la velocidad aguas abajo.	57
Tabla 5-16: Contraste y efectos del torque.	61
Tabla 5-17: Análisis factores e interacciones para el torque.	62
Tabla 5-18: Regresión DOE-ANOVA para el torque.	63
Tabla 5-19: Contrastes y efectos para la presión en los álabes guías.	67
Tabla 5-20: Análisis de factores e interacciones para la presión en los álabes guías.	69
Tabla 5-21: Regresión DOE-ANOVA para la presión en los alanes guías.	70
Tabla 5-22: Contrastes y efectos para la presión en el rotor.	73
Tabla 5-23: Análisis de factores e interacciones para la presión en el rotor.	75
Tabla 5-24: Regresión DOE-ANOVA para la presión en el rotor.	76

1. Introducción

El cambio climático es una problemática mundial y para enfrentarlo se busca reducir la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) proveniente de los combustibles fósiles. En ese sentido las fuentes no convencionales de energía renovable (FNCER) son una solución a la problemática, y a su vez contribuyen a diversificar la matriz energética de las naciones. En Colombia, de acuerdo con el plan nacional de desarrollo (PND) se busca realizar la transición energética, para esto se incorporarán nuevas fuentes de energía a la red nacional impulsando el desarrollo de FNCER [1]. La energía mareomotriz es una FNCER que aprovecha las mareas para la extracción de energía, se pueden clasificar en presa de marea y corriente de marea. Las tecnologías de energía mareomotriz representan la mayor parte de la capacidad de energía oceánica instalada a nivel mundial con alrededor de 512 MW, de éstos 501.5 MW son producidos por plantas de presa mareomotriz operativas [2].

1.1. Identificación del problema

Para la producción de energía mareomotriz por medio de presa de marea se utilizan turbinas hidráulicas, dichas turbinas se ubican en recámaras y para seleccionar la óptima es necesario conocer condiciones de la configuración hidráulica. Esto hace resaltar la necesidad de evaluar los diseños hidráulicos de la planta mareomotriz para las turbinas.

1.2. Antecedentes

Colombia tiene una matriz de generación de energía eléctrica diversificada, pues cuenta con generación hidroeléctrica, térmica y renovables no convencionales como solar y eólica, finalmente biomasa. Se cuenta con grandes centrales hidroeléctricas como hidro Ituango (2400 MW), Guavio (1250 MW), entre otras. Con la desventaja de que la producción disminuye en épocas de sequía [1]. Sin embargo, aún no cuenta con una planta que aproveche las energías marinas.

Tres proyectos principales de presas mareomotrices constituyen alrededor del 98 % de la capacidad total instalada de energía oceánica: la central eléctrica mareomotriz Sihwa Lake de 254 MW en la República de Corea, la central eléctrica mareomotriz La Rance de 240 MW en Francia y la central eléctrica mareomotriz Annapolis de 20 MW en Canadá (actualmente está siendo dado de baja y ya no está operativo). Otros países que albergan plantas de energía de barrera de mareas más pequeñas incluyen la Federación Rusa y China [2].

La planta de Sihwa Lake aprovecha la energía de las mareas en la Bahía de Kyeonggi, en el este del Mar Amarillo, para su producción utiliza 10 turbinas tipo bulbo de 25,4 MW con diámetro de rodete de 7,5 m a 64,29 rpm. La estructura de la turbina y el generador es monolítica con un techo abierto que utiliza luz y ventilación naturales [3]. En la planta mareomotriz francesa La Rance se usan 24 turbinas tipo bulbo de 10 MW, el caudal máximo de cada turbina es 6.600 m³/s. Además, cuenta con 6 compuertas tipo “vagón” de 10 m de altura de elevación, 15 m de ancho y caudal trasvasado de 9.600 m³/s [4]. La central de Annapolis fue un proyecto piloto el cual utilizó la turbina Straflo más grande del mundo para producir más de 30 millones de kWh al año, suficiente para alimentar 4.000 hogares [5]. La planta de Kislaya Guba en Rusia solo produce 1,5 MW ya que es una planta de prueba y utiliza el mismo tipo de turbina que la planta de La Rance [6]. En china se encuentra Jiangxia, que es la planta de mareas más grande de dicho país y está sujeta a amplitudes de marea de 8,39 m. En esa planta se cuenta con 6 turbinas de bulbo que funcionan de forma bidireccional, produciendo una capacidad instalada de 3,9 MW [6].

1.3. Estado del Arte

La turbina de bulbo o tubular se combina con un generador instalado en una carcasa en forma de bulbo en el canal. Este tipo es resultado del desarrollo llevado a cabo principalmente en Alemania durante la Segunda Guerra Mundial y posteriormente en Francia. El objetivo de este desarrollo es reducir los costes de las centrales hidroeléctricas de baja cabeza mediante el uso de turbinas Kaplan muy compactas y posiblemente incluso más eficientes [7]. Las turbinas de bulbo se utilizan para la generación de energía eléctrica, tienen un impacto negativo mínimo en el medio ambiente y es común que se use en hidroeléctricas de baja cabeza [8].

Las turbinas de bulbo han sido estudiadas a lo largo de la historia, esto con el objetivo de conocer y mejorar su desempeño en la producción de energía. Luo et al. [9] analizaron y discutieron las condiciones de trabajo en las que el rodete tiene más probabilidades de sufrir problemas de fatiga. Para determinar los puntos críticos de tensión utilizaron modelos de simulación CFD y FEM. Basándose en un enfoque probabilístico de un defecto, se ha calculado la probabilidad de que no crezcan grietas para una amplia gama de condiciones de operación, concluyendo que la fiabilidad de las palas para una vida infinita es muy baja cuando está bajo la condición de cabezas muy altas. Ahn et al. [8] analizaron el desempeño hidráulico de un prototipo de turbina de bulbo, basándose en la teoría de la producción de entropía. Obteniendo que el flujo en el rodete se ve influenciado por los álabes guías y por los soportes que sostiene el cuerpo del bulbo. Li et al. [10] estudiaron el efecto del borde anti-cavitación sobre el rendimiento y características del vórtice de fuga para una turbina tubular, utilizando el método de simulación numérica del modelo de turbulencia SST-CC basado en la corrección de rotación y curvatura. Encontrando que la pérdida de energía se reduce cada vez más con el aumento del espesor del borde anti-cavitación.

Las presas de marea son las tecnologías con mayor madurez para la producción de energía mareomotriz, de estas se han realizado diversos estudios como Samo et al. [11] que desarrollaron el diseño preliminar de una planta de energía mareomotriz en Kuching, La planta calculada se compone de cuatro turbinas bulbo instaladas en cada compuerta de presa. Las palas de la turbina tipo bulbo estarían orientadas hacia el mar con un tubo de aspiración de 11,32 m de longitud. Podría rendir 10.23 GWh/año y funcionaria en reflujo. Parrado-Vallejo et al. [12] realizó el diseño de una planta mareomotriz para la bahía de Buenaventura a partir del modelo hidrodinámico Delft 3D, el modelo Hec-Ras y modelamiento CFD, obteniendo una potencia de 158.4 MW

1.4. Justificación

En las presas de mareas es común que se trabaje con turbinas de bulbo ya que pueden operar en lugares de baja cabeza, además de que fueron diseñadas especialmente para la planta de La Rance [4], sobre éstas se han hecho diversos estudios que permiten optimizar el funcionamiento y rendimiento de estas, enfocándose en el rodete. Por su ubicación Colombia puede acceder a esta energía, ya que en el Pacífico cuenta con acceso al océano que es fuente de energía mareomotriz, pues en este lugar las mareas se caracterizan por ser mesomareales (rangos de alentre 3 y 5 m). A pesar de tener estas condiciones de marea, se encuentran pocos estudios, pero muestran resultados prometedores [13], [14], [15]. Teniendo en cuenta el potencial con el que Colombia cuenta en Buenaventura, el presente estudio amplía el conocimiento sobre la optimización del sistema hidráulico de una presa de marea para una turbina tipo bulbo, tomando como caso de estudio a Buenaventura, Colombia. Además, ayuda con el desarrollo del proyecto de investigación: Identificación de zonas para el aprovechamiento de energía marina (mareomotriz) en la zona Sur del Pacífico colombiano.

2. Objetivos

2.1. Objetivo General

- Evaluar el comportamiento hidráulico de una turbina tipo bulbo para una futura planta mareomotriz tipo embalse en Buenaventura.

2.2. Objetivos Específicos

- Seleccionar y adaptar la configuración hidráulica de una planta mareomotriz a las condiciones de Buenaventura.
- Optimizar las características hidráulicas de la configuración adaptada y comparar los parámetros hidráulicos de la turbina adaptada frente a las condiciones operacionales de diseño.
- Formular recomendaciones para la adaptación de las turbinas comerciales o la posible fabricación de estas considerando las características de Buenaventura.

3. Marco Teórico

3.1. Propiedades del agua de mar

Como toda sustancia, las aguas oceánicas también cuentan con propiedades fisicoquímicas las cuales cambian de acuerdo con el lugar. La densidad, presión, temperatura y salinidad son características con las que cuenta el agua de mar y los valores de estas cantidades se relacionan, pues si una cambia, las otras también varían, estos son parámetros que se deben tener en cuenta al momento de diseñar sistemas que estarán expuestos al océano [16].

3.1.1. Presión

En el océano se presenta la presión hidrostática, dicha presión se presenta por el peso de la columna de agua que presiona sobre un objeto. La presión aumenta linealmente con la profundidad, pues si se sumerge un objeto, la cantidad de agua sobre él se incrementa a medida que se va sumergiendo, por cada 10 m de descenso, la presión aumenta 1 atm [17].

3.1.2. Temperatura

En el océano la temperatura varía de acuerdo con la ubicación, el valor de éstas oscila entre -2 y $30\text{ }^{\circ}\text{C}$. El agua superficial es más cálida en las zonas de latitud baja y más fría en los polos, la temperatura del agua depende de varios factores como el sol o las corrientes oceánicas.

La temperatura también varía con la profundidad, en la Figura 3.1 se muestra un perfil de temperatura típico para aguas de mar abierto en latitudes medias. En la superficie se presenta el agua de mayor temperatura, ya que es la que recibe directamente los rayos del sol. Entre los primeros $100\text{-}200\text{ m}$ se presenta una temperatura constante, a esta zona se le conoce como capa mixta, ésta es resultado de los vientos, olas y corrientes superficiales, que se encargan de mezclar el agua de la superficie y distribuir el calor en esta capa. Debajo de la capa mixta la temperatura presenta un rápido descenso en un aumento de profundidad corto, a este fenómeno se le llama “*termoclina*”. Pasada la termoclina, se presenta una temperatura bastante constante para el océano profundo. Los perfiles varían de acuerdo con el lugar, pues cerca del ecuador el agua es más cálida si se compara con los polos donde la temperatura es menor.

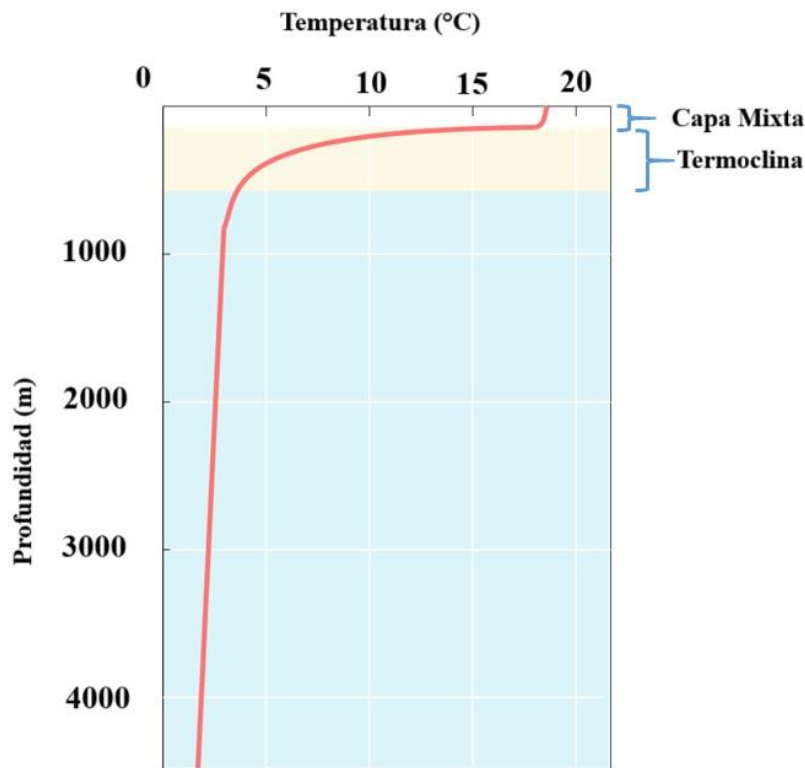


Figura 3.1: Perfil típico de temperatura en océano abierto para una región de latitud media [17].

3.1.3. Densidad

La densidad es el valor que relaciona la cantidad de masa por unidad de volumen. La densidad del agua dulce es de 1 g/cm^3 a 4°C , pero la adición de sales y otras sustancias disueltas aumenta la densidad del agua de mar superficial entre $1,02$ y $1,03 \text{ g/cm}^3$. La densidad del agua de mar puede cambiar al variar temperatura, salinidad o la presión. La temperatura son los factores más importantes para determinar la densidad. La presión tiene menor impacto en la densidad por la incompresibilidad del agua, se vuelve importante a profundidades extremas [17].

La densidad es más baja en la superficie, donde el agua es más cálida. A medida que aumenta la profundidad, hay una región donde la densidad aumenta rápidamente con la profundidad, la cual es llamada “*picnoclina*” (Ver Figura 3.2). La picnoclina coincide con la termoclina, ya que es la disminución repentina de la temperatura la que conduce al aumento de la densidad. Por debajo de la picnoclina, la densidad puede considerarse constante o puede continuar aumentando ligeramente hacia el fondo [17].

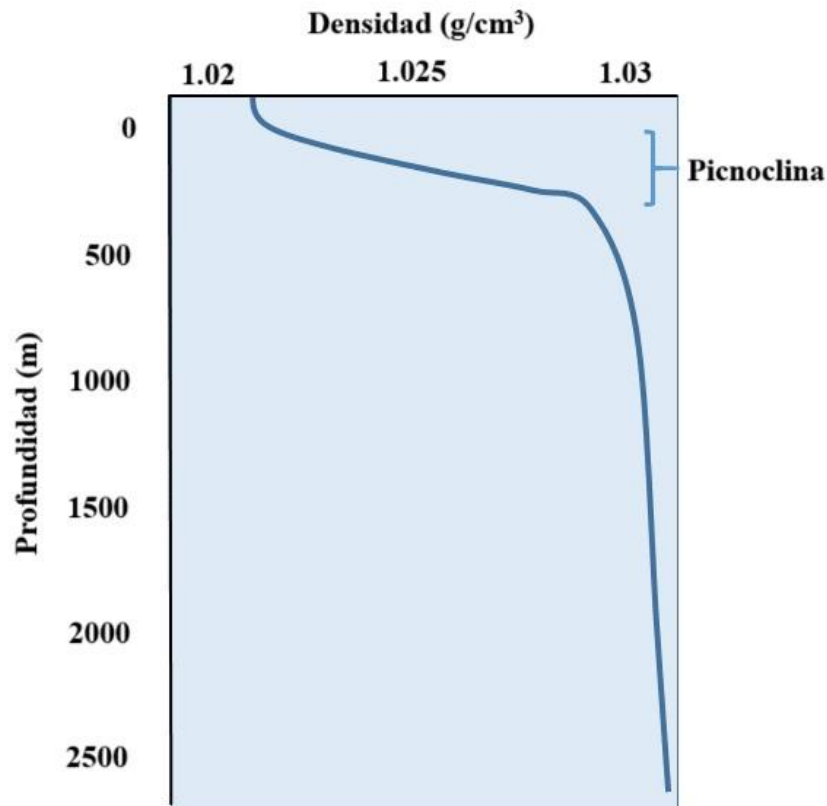


Figura 3.2: Perfil de densidad representativo del océano abierto en latitudes medias [17].

3.1.4. Salinidad

Al contenido de sales minerales presentes en un cuerpo de agua se le conoce como salinidad, esta es una propiedad que se presenta en el océano y es de 33-37 *ppm* en promedio en mar abierto. La salinidad varía de acuerdo con la región, dadas las diferentes tasas de precipitación, evaporación, descarga de ríos y formación de hielo, que afectan el valor. También se presenta un cambio en la salinidad en función de la profundidad, en los primeros 200 m se presenta la capa mixta en la cual la salinidad es constante. Bajo esta capa se presenta una zona llamada “*haloclina*” donde se presenta un cambio rápido y es la transición entre la capa mixta y el océano profundo. Bajo la haloclina el valor de salinidad presenta poca variación. En la Figura 3.3 se observa la baja salinidad superficial en latitudes altas y la mayor salinidad superficial en latitudes bajas [17].

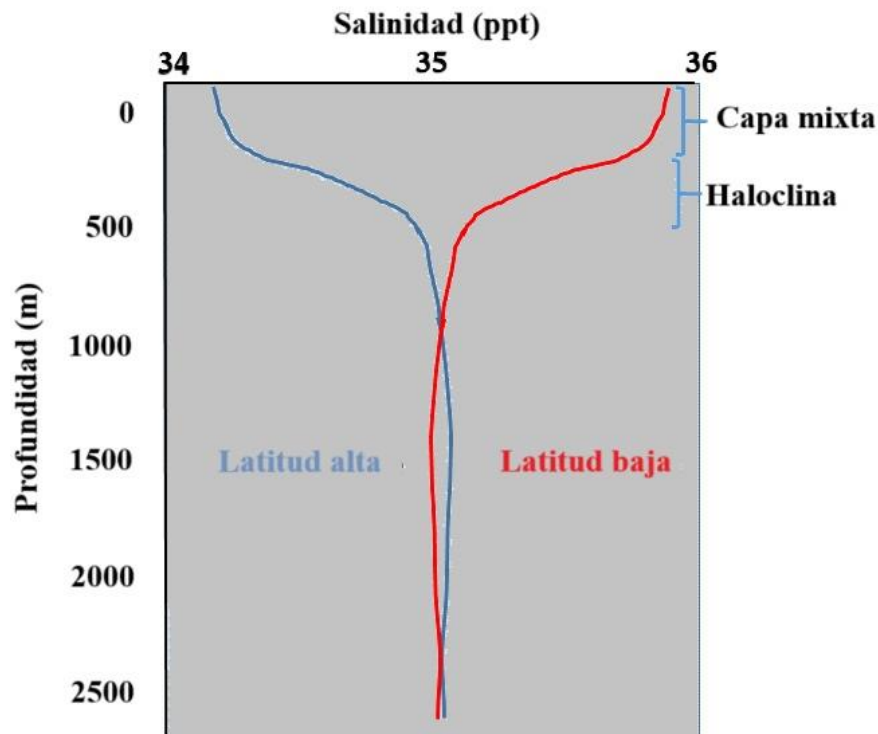


Figura 3.3: Perfil de salinidad para latitud alta y latitud baja [17].

3.2. Mareas

Al cambio que se presenta en el nivel del agua del mar se le conoce como marea, estas se pueden dividir en marea astronómica y marea meteorológica [18].

3.2.1. Mareas meteorológicas

La marea meteorológica es el tipo de marea que se genera por los fenómenos meteorológicos y la topografía costera. El viento es la principal variable, ya que su interacción con la superficie de océano genera olas como “*seas*” y “*swell*”, que cuando alcanzan la costa se acumulan y combinan con el flujo de marea incrementando el nivel del mar [18].

3.2.2. Mareas astronómicas

La marea astronómica es el ascenso y descenso en la superficie del océano, este movimiento se da por las fuerzas gravitacionales que existen por la interacción entre la luna y la tierra, y en cierta medida entre el sol y la tierra [19].

De acuerdo con la interacción gravitacional que esté ocurriendo las mareas se pueden clasificar de acuerdo con su amplitud en sicigia y cuadratura, y de acuerdo con el periodo en diurna, semidiurna y semidiurna mixta.

3.2.3. Marea de sicigia

Las mareas de sicigia, viva o alta, son las mareas que tienen mayor amplitud y ocurren cuando el Sol, la Tierra y la Luna están alineados como se ve en la Figura 3.4, esto ocurre durante las lunas nueva y llena. Cuando la amplitud de la marea generada por la interacción Tierra-Luna y Tierra-Sol se suman se genera este tipo de marea [17].

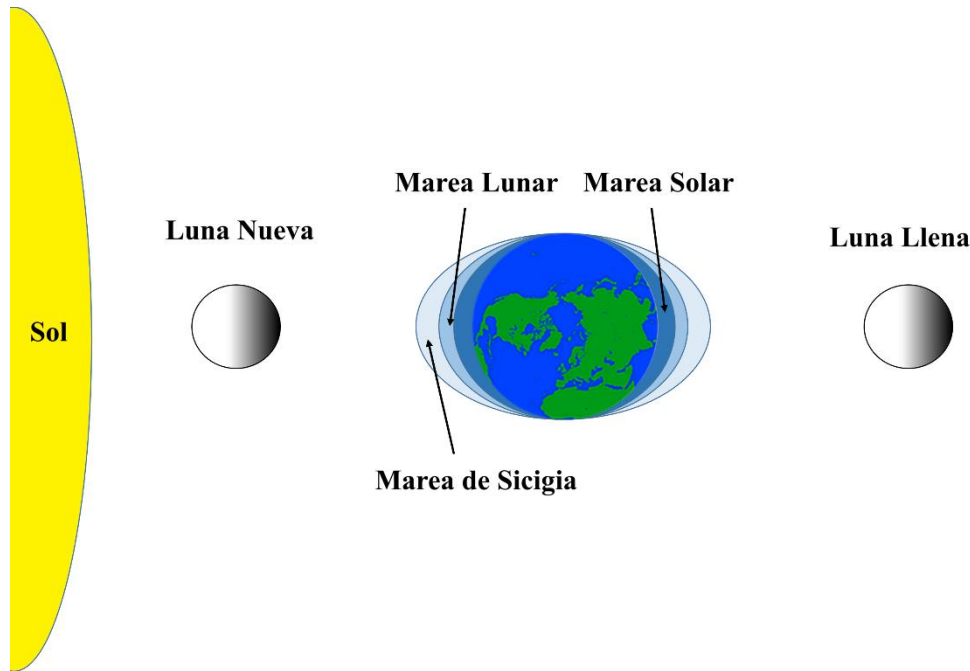


Figura 3.4: Marea de sicigia [17].

3.2.4. Marea de cuadratura

La marea de cuadratura, baja o muerta es la que se da cuando el Sol, la Tierra y la Luna forman un ángulo de 90° entre sí como se ve en Figura 3.5. Las mareas solar y lunar están desfasadas y se anulan entre ellas. Las mareas de cuadratura ocurren cada dos semanas, cuando la luna se encuentra en sus fases de cuarto creciente y cuarto menguante [17].

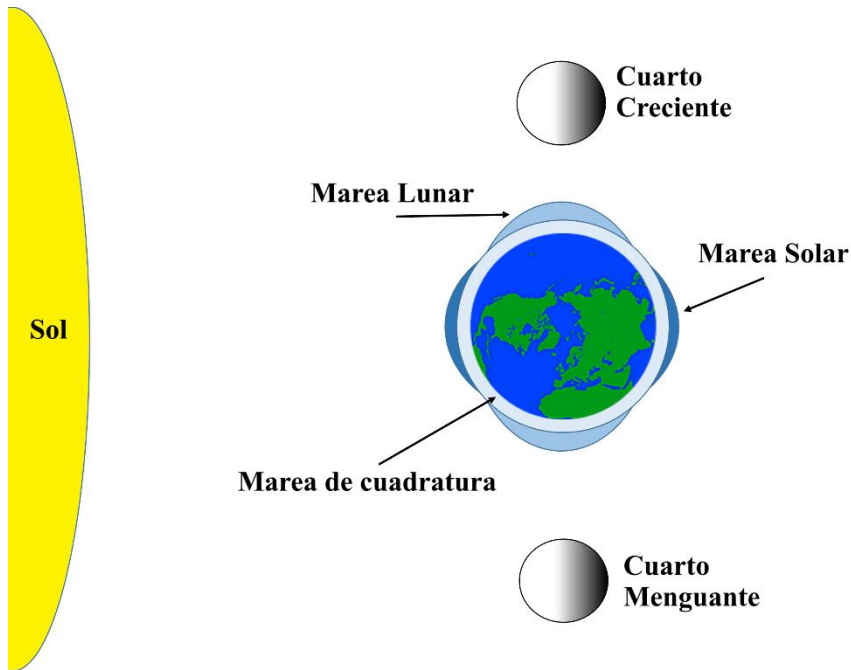


Figura 3.5: Marea de cuadratura [17].

3.2.5. Marea diurna

La marea diurna hace referencia a un ciclo de marea completo por día, es decir que en 24 horas se presenta una marea alta y una marea baja, tal como se ve en la Figura 3.6 [17].

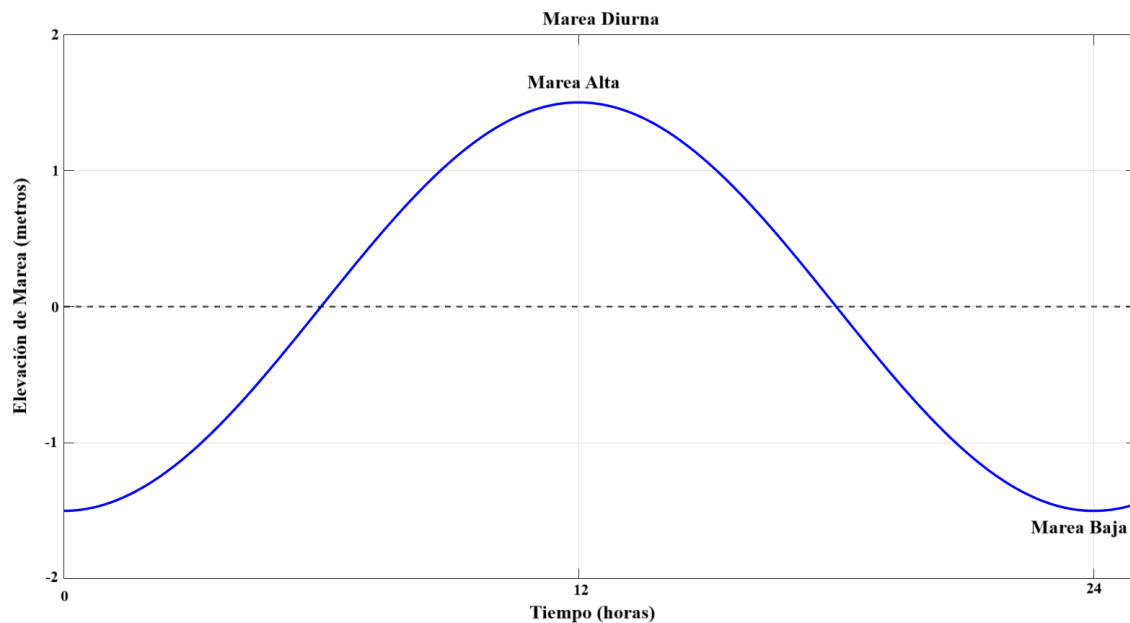


Figura 3.6: Marea diurna.

3.2.6. Marea semidiurna

Se llama marea semidiurna al tipo de marea que tiene dos mareas altas y dos mareas bajas en un día tal como se ve en la Figura 3.7, un ciclo de marea dura medio día [17].

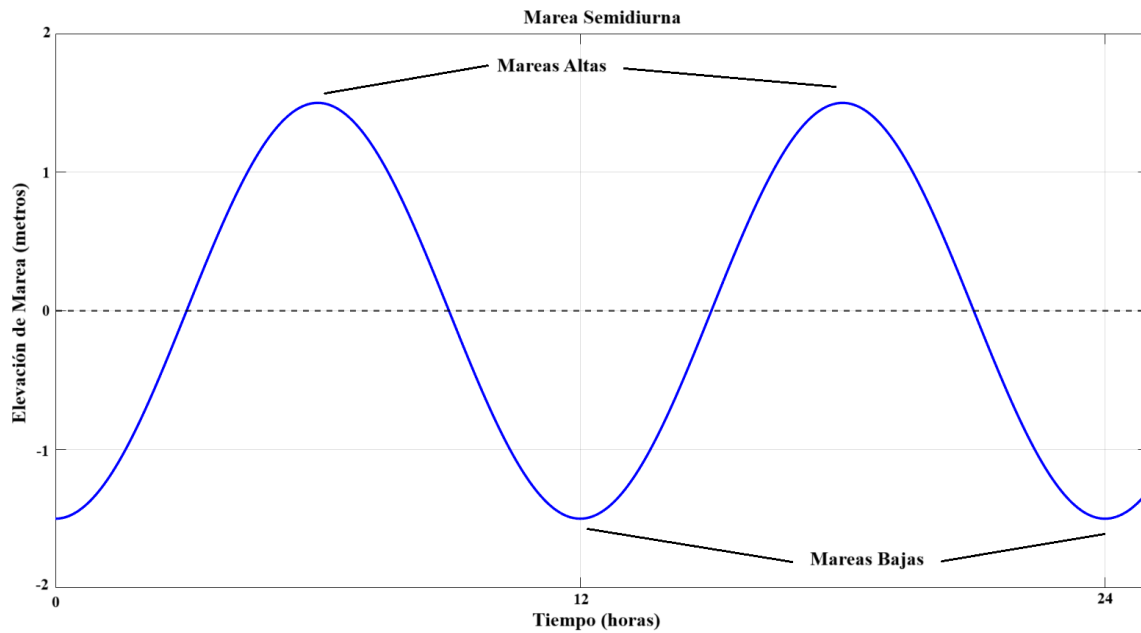


Figura 3.7: Marea Semidiurna.

3.2.7. Marea semidiurna mixta

Las mareas mixtas o también semidiurnas mixtas son un régimen de marea en el cual se presentan dos mareas altas y dos mareas bajas, pero la amplitud de las mareas no es la misma como se ve en la Figura 3.8 [17].

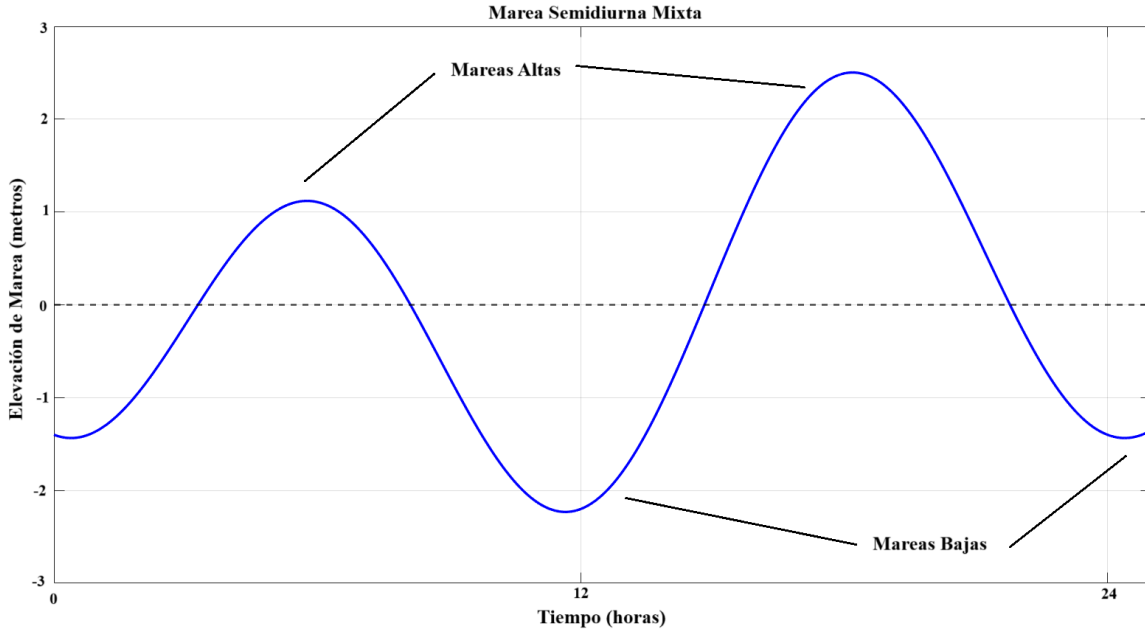


Figura 3.8: Marea semidiurna mixta.

3.2.8. Corrientes de marea

El movimiento del agua que se genera por las mareas altas y bajas da origen a lo que se conoce como corrientes de marea. Conforme sube la marea, el agua fluye hacia un área, creando lo que se conoce como corriente de inundación o flujo. Durante este proceso, el agua fluye en una corriente constante hacia la costa y se puede evidenciar en mayor medida en zonas costeras estrechas, canales y entradas de ríos. [17].

Cuando la marea desciende se presenta una corriente que se le conoce como corriente de reflujo, esta es lo opuesto a la corriente de inundación. Lo que sucede es que el agua fluye alejándose de la costa. Otro fenómeno que tiene lugar es el llamado mareas tranquilas o estoa, éste ocurre durante la transición de marea alta entrante y marea baja saliente, el cambio de dirección hace que las aguas permanezcan inmóviles [17].

3.2.9. Análisis armónico de mareas

El análisis armónico de mareas es un método que permite caracterizar y predecir el comportamiento de la marea en determinado punto. Éste consiste en descomponer los registros del nivel del mar en un número finito de ondas cuyo periodo y fase están establecidos, que cuando se combinan utilizando la ecuación (1) generan la marea compuesta [20].

$$y(t_n) = C_0 + \sum C_k \cos(w_k t_n - \phi_k) \quad (1)$$

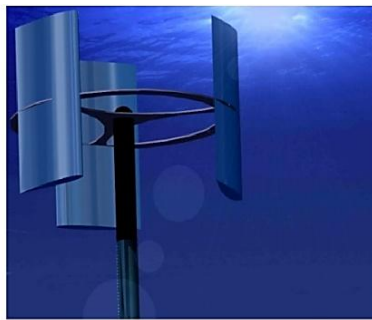
Donde C_0 es la amplitud media de los datos, C_k es la amplitud del i-esimo armónico, w_k es la frecuencia del i-esimo armónico, t_n es el vector de tiempo y ϕ_k es la fase del i-esimo armónico.

3.1. Tecnología mareomotriz

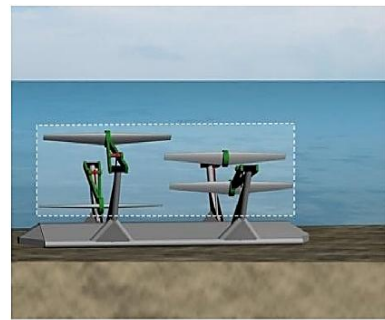
De las mareas se pueden obtener dos tipos de energía, que son la energía cinética de las corrientes de marea y la energía potencial del agua ascendente [21]. Para el aprovechamiento de la energía cinética se utilizan turbinas de corriente de marea (TCT) entre las que se encuentran las turbinas de eje horizontal, turbinas de eje vertical, hidroala oscilante, turbinas con conductos, tornillo de Arquímedes y cometa de marea (Ver Figura 3.9) [22]. Para lograr extraer la energía potencial se utilizan las presas de mareas que crean una cabeza a un lado de la presa a medida que la marea sube o baja [6].



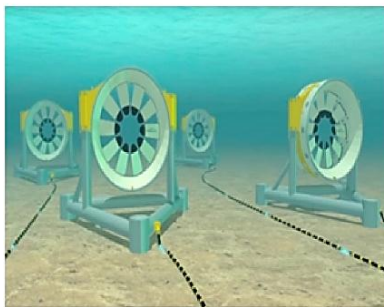
(a) Turbina de eje horizontal.



(b) Turbina de eje vertical.



(c) Hidroala oscilante.



(d) Turbina con conductos.



(e) Tornillo de Arquímedes.



(f) Cometa de marea.

Figura 3.9: Principales turbinas de corriente de marea [22].

3.2. Presa de marea

Una presa de marea es una construcción civil que se ubica en un estuario o desembocadura de un río y se compone de una presa, varias compuertas y turbinas colocadas en la presa, además de un depósito situado al otro lado de la presa donde se almacena el agua (ver Figura 3.10). Debido a la aparición de las mareas, el agua puede transferirse entre el océano y el embalse a través de las compuertas, entonces las turbinas situadas en las recámaras pueden girar y generar electricidad [19].

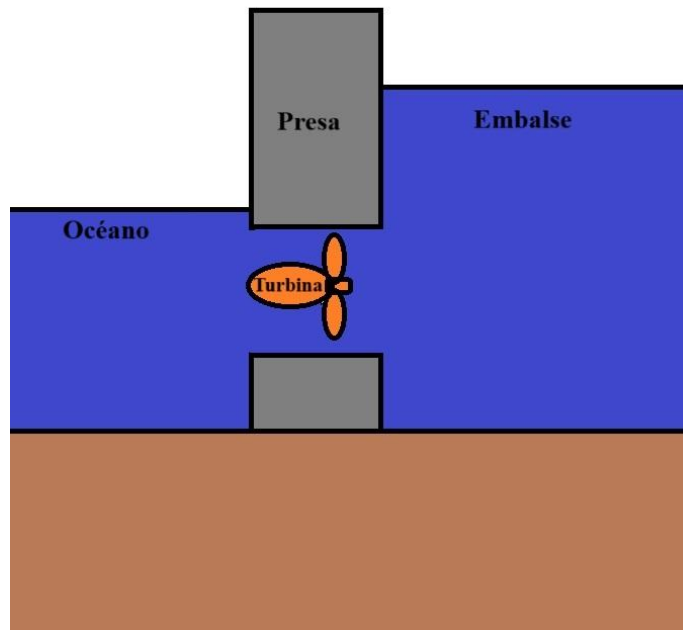


Figura 3.10: Estructura de una presa de marea.

Para extraer la energía de las mareas, la presa mareomotriz puede funcionar de tres modos, flujo, reflujo o bidireccional. El modo de flujo se da cuando se presenta una corriente de inundación y el agua se transfiere de la cuenca al embalse por medio de compuertas que se encuentran equipadas con turbinas utilizadas para generar electricidad, y cuando ocurre el reflujo el agua sale por compuertas sin turbinas. En el modo de reflujo, durante la inundación el agua se transfiere por compuertas sin turbinas para llenar el embalse y cuando se da lugar al reflujo, el agua se deja salir hacia el océano por las recámaras donde están las turbinas. En el modo de generación bidireccional todas las compuertas están equipadas con turbinas, entonces durante la inundación y el reflujo se genera electricidad [19].

A parte de la presa de marea también existen otras adaptaciones de esta tecnología con las que se busca reducir costos e impacto ambiental entre estas están las lagunas de marea, arrecife de marea y valla de marea [19].

3.2.1. Laguna de marea

La laguna de marea como la presa es una construcción civil que aprovecha la diferencia de cabeza que se genera por la marea alta y baja. Esta tecnología puede clasificarse en dos tipos, costa afuera o en tierra. La costa afuera se caracteriza porque la presa es circular y la que es en tierra porque la presa tiene forma de herradura y se cierra con la costa como se ve en Figura 3.11 [23].



Figura 3.11: Laguna de marea [24].

3.2.2. Arrecife de marea

El arrecife de marea (ver Figura 3.12) es un nuevo concepto que buscan minimizar el impacto ambiental ya que por su diseño no detiene el movimiento del agua, para la producción de energía utilizan turbinas de baja altura, pues la diferencia de altura es de aproximadamente 2 m [25].

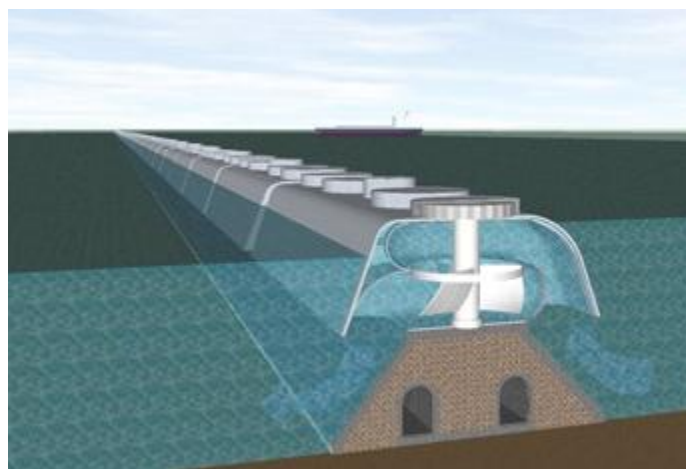


Figura 3.12: Arrecife de marea [26].

3.3. Turbinas hidráulicas

Las turbinas hidráulicas son turbomáquinas de flujo incompresible que utilizan la energía del fluido que pasa a través de ella para generar un movimiento de rotación que mediante un eje se transfiere a un generador para convertir la energía mecánica en energía eléctrica [27].

3.3.1. Potencia hidráulica y mecánica

La generación de energía hidráulica se da a partir de la energía potencial del agua que por medio de una turbina se transforma en trabajo útil. La potencia hidráulica (P_h) se calcula mediante la ecuación (2) donde se ve que es función de la densidad (ρ), la gravedad (g), el caudal (Q), y la cabeza hidráulica disponible (H).

$$P_h = \rho g Q H \quad (2)$$

Por otro lado, la potencia mecánica obtenida (P) es igual a la potencia hidráulica por la eficiencia (η) tal como se ve en la ecuación (3).

$$P = \eta P_h \quad (3)$$

La potencia mecánica obtenida también se puede expresar mediante la ecuación (4).

$$P = \frac{T 2 \pi N}{60} \quad (4)$$

Donde, T es el torque y N es la velocidad de rotación en rpm.

3.3.2. Parametrización de turbinas axiales

Para las turbinas axiales se presentan parámetros que permiten escalar y dimensionar las turbinas. En la ecuación (5) se presenta la velocidad de la turbina (S_p) en rpm, donde, f_g es la frecuencia de la red y G_p es el numero de poles del generador [27].

$$S_p = \frac{2 \cdot 60 \cdot f_g}{G_p} \quad (5)$$

Las ecuaciones (6) y (7) presentan velocidad unitaria n_{11} (rpm) y la descarga específica Q_{11} (m³/s)

$$n_{11} = \frac{S_p \cdot D}{\sqrt{H}} \quad (6)$$

$$Q_{11} = \frac{Q}{D^2 \sqrt{H}} \quad (7)$$

Donde, D es el diámetro (m).

La velocidad específica (N_s) que se calcula con la ecuación (8), es un parámetro no dimensional que relaciona la geometría del rodete con su régimen de giro, permitiendo calcular la velocidad de rotación a la cual trabaja la turbina para una cabeza hidráulica y caudal dado.

$$N_s = \frac{N \sqrt{P}}{H^{5/4}} \quad (8)$$

Donde N es la velocidad de rotación.

3.3.3. Triangulo de velocidades

El triángulo de velocidades (ver Figura 3.13) es una representación gráfica y vectorial que se usa en turbomáquinas para poder describir cómo es el movimiento del fluido en la entrada y en la salida del rodete. Dicho triángulo está conformado por tres vectores, La velocidad absoluta del fluido $\vec{V}$, que es la dirección del flujo real; la velocidad relativa del fluido respecto al álabe $\vec{W}$, que es la dirección del flujo relativo visto desde el álabe; y la velocidad periférica del álabe $\vec{U}$, que es tangencial al giro del rodete [27].

$$\vec{V} = \vec{W} + \vec{U} \quad (9)$$

$\vec{V}$ se descompone en V_f que es la velocidad axial dada por la ecuación (10), donde A es el área efectiva que es la diferencia entre el área exterior del rodete y el área del cubo; y V_w es la velocidad tangencial que se puede calcular por medio de la ecuación (11) la cual se obtiene después de aplicar el triángulo de velocidades a la ecuación de Euler para turbomáquinas.

$$V_f = \frac{Q}{A} \quad (10)$$

$$V_w = \frac{P}{\rho Q U} \quad (11)$$

La velocidad periférica del álabe (U) se calcula usando la ecuación (12).

$$U = \frac{\pi D N}{60} \quad (12)$$

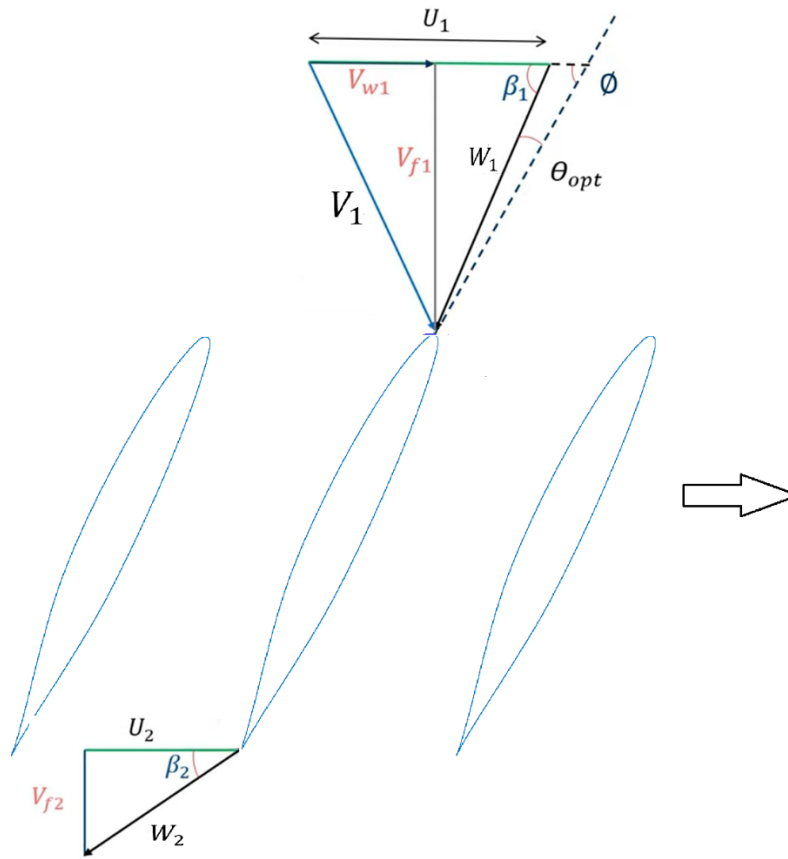


Figura 3.13: Triangulo de velocidades.

$$\beta_1 = \tan^{-1}\left(\frac{V_{f1}}{U - V_{w1}}\right) \quad (13)$$

$$\phi = \beta_1 - \theta_{opt} \quad (14)$$

$$\beta_2 = \tan^{-1}\left(\frac{V_{f2}}{U_2}\right) \quad (15)$$

En las ecuaciones (13), (14) y (15), se muestra como calcular los ángulos que se ven en la Figura 3.13, donde β_1 y β_2 son los ángulos relativos del agua al álabe para la entrada y la salida respectivamente, ϕ es el ángulo de inclinación del álabe con respecto a la horizontal y θ_{opt} es el ángulo de ataque del perfil, el cual depende de los coeficientes de arrastre (C_D) y sustentación (C_L) del perfil, en este caso se busca la mayor sustentación y el menor arrastre, es decir para que ángulo de ataque el C_L/C_D tiene el valor máximo [27].

3.3.4. Diagrama de colinas de turbinas

Los diagramas de colinas de turbinas son modelos gráficos correspondientes a un diseño de turbina particular, éstos son creados por los fabricantes de las turbinas y contienen la información del comportamiento de la turbina durante su funcionamiento [28]. Se representan en términos de fórmulas adimensionales conocidas como leyes de afinidad, generalmente se construyen trazando la velocidad unitaria frente a la descarga específica que vienen dadas por las ecuaciones (6) y (7) respectivamente.

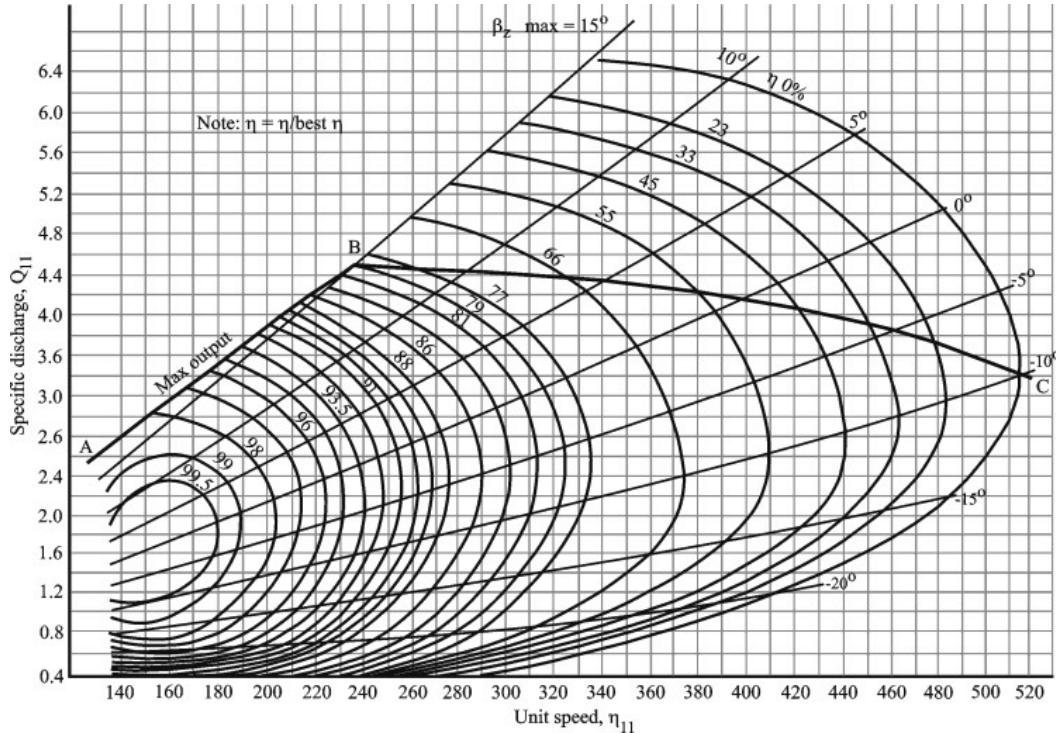


Figura 3.14: Grafico de colinas común para turbinas [28].

Por las condiciones de donde se ubican las presas de mareas, las turbinas que se utilizan deben estar en el rango de marea. Las turbinas que están en este rango se presentan a continuación.

3.3.5. Turbina de bulbo

La turbina de bulbo es la evolución de las turbinas Kaplan, pasando de un dispositivo vertical y engorroso hasta uno más compacto en forma de bulbo como se ve en la Figura 3.15. Principalmente se compone de tres partes, el bulbo que en su interior contiene al generador, álabes guía los cuales se

encargan de direccionar el flujo hacia el rotor y finalmente está el rotor que cuenta con álabes ajustables que reciben la energía del flujo del agua para generar el movimiento de rotación. Esta es la turbina más común en las presas de marea y en las situaciones de marea baja [25].

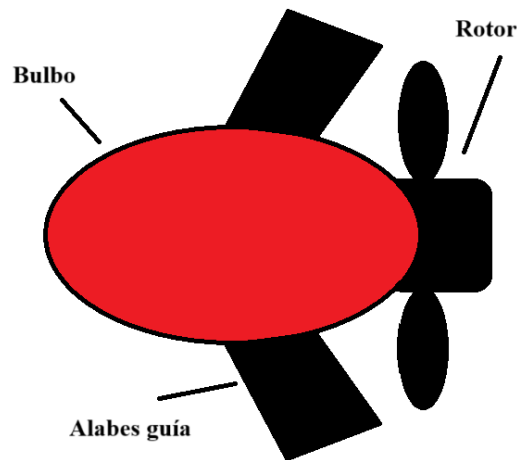


Figura 3.15: Turbina bulbo.

Las turbinas de bulbo son conocidas por llegar a valores de más del 90% de eficiencia, estas turbinas pueden operar de forma bidireccional, pero cuando opera en reversa solo logra un valor máximo de 71.55% [25].

3.3.6. Turbina Straflo

Esta es una turbina axial que fue creada en 1919, este tipo de turbina solo se ha desplegado en Annapolis, donde se registraron valores de eficiencia entre 78% y 89%, lo que la deja mal calificada al compararse con las turbinas de bulbo. La principal característica diferenciadora de esta turbina es que su generador contiene una serie de electroimanes alrededor del borde del rodete, fuera del flujo (ver Figura 3.16) [25].

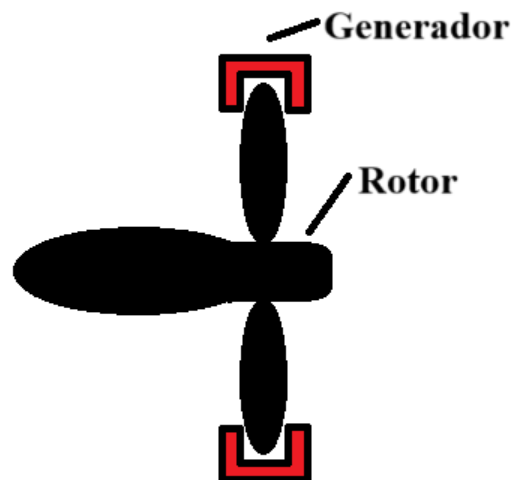


Figura 3.16: Turbina strafflo.

3.3.7. Turbina bulbo modificada

La turbina bulbo modificada tiene los mismos componentes que una turbina bulbo. Su característica diferenciadora es que cuenta con álabes guías adicionales como se ve en la Figura 3.17, estos le permiten aumentar la eficiencia cuando la turbina trabaja en reversa. Este tipo de turbina se diseñó con el objetivo de tener una eficiencia alta en los ciclos de inundación y reflujo [25].

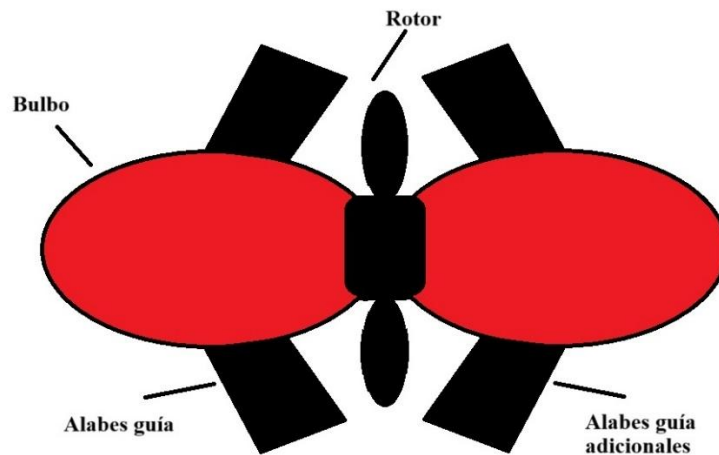


Figura 3.17: Turbina bulbo modificada.

3.3.8. Turbina VLH

La turbina VLH es una turbina diseñada para la producción de energía a partir de condiciones de ultra baja cabeza. Se compone por un grupo generador-hélice regulado fijo en un simple canal cuadrado. Los álabes están cubiertos por un fino estante para basura ubicado en la parte superior de la carcasa del sistema. Dependiendo de la altura disponible del sitio, las turbinas se montan en un rango de 15° a 45° , como se muestra en la Figura 3.18 [29].

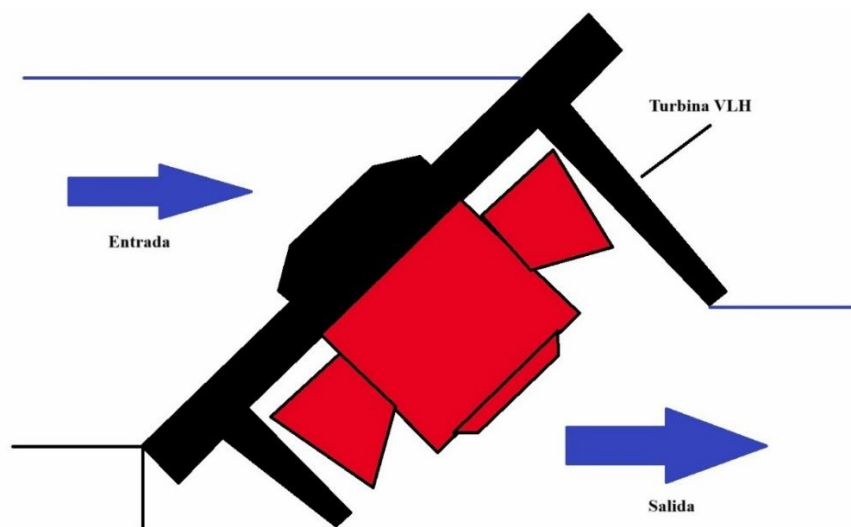


Figura 3.18: Turbina VLH.

3.4. Dinámica computacional de fluidos

La dinámica computacional de fluidos o CFD para abreviar es un método en el que se utilizan softwares y computadoras que tienen la capacidad de resolver las ecuaciones diferenciales que resultan complejas y describen el comportamiento de los fluidos a partir de sistemas de ecuaciones algebraicas [30], [31].

3.4.1. Ecuaciones de gobierno

Las ecuaciones de Navier-Stokes (ecuación de continuidad y ecuación de cantidad de movimiento) son las ecuaciones que gobiernan el comportamiento de los fluidos incompresibles en los análisis CFD. Estas ecuaciones se encargan de modelar la conservación de masa y de momento del fluido en movimiento.

A continuación, se presenta la ecuación de continuidad, también conocida como la ecuación de conservación de masa (16), muestra que la tasa de cambio de masa dentro de un volumen de control es igual a la diferencia entre la masa que entra y la que sale de dicho volumen, garantizando que la masa del fluido no se crea ni se destruye [30], [31].

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \vec{v} = 0 \quad (16)$$

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

También aparecen los siguientes términos: $\frac{\partial \rho}{\partial t}$, que es la derivada temporal, este representa los cambios que sufre la densidad del fluido en un punto a lo largo del tiempo. Este término es despreciable si el flujo es estacionario. El otro término de la ecuación de continuidad es la derivada convectiva $\nabla \cdot \rho \vec{v}$, este se encarga de describir como es el transporte de la masa en el fluido por su movimiento. Es importante este término pues muestra los cambios que se presentan en el volumen de control debido a las velocidades del flujo.

La ecuación de cantidad de movimiento o también llamada ecuación de conservación del momento (17), define como cambia la velocidad del fluido por las fuerzas externas, como lo son presión, viscosidad y otras fuerzas aplicadas en el sistema. Esta ecuación es fundamental para predecir el comportamiento del flujo, pues relaciona las propiedades del fluido con las aceleraciones y cambios de dirección que se presentan durante su movimiento [30], [31].

$$\frac{\partial(\rho \vec{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu \nabla \vec{v}) + \vec{F} \quad (17)$$

En la ecuación el término $\frac{\partial(\rho \vec{v})}{\partial t}$, es la derivada temporal y representa el cambio del momento lineal a lo largo del tiempo. Para fenómenos transitorios este término es relevante pues tiene en cuenta cómo es el comportamiento del flujo a medida que avanza el tiempo. La derivada convectiva es $\nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v})$, y se encarga de mostrar como es el transporte de momento en el fluido, describiendo como afecta la velocidad del flujo en una dirección a otro flujo que se encuentra en otra dirección.

El gradiente de presión ($-\nabla p$), es el término que representa la fuerza que se genera por la presión dentro del fluido, indicando el cambio espacial de la presión, y es importante cuando se modelan turbomáquinas, pues en estas se presentan cambios de presión entre la entrada y la salida. El término viscoso ($\nabla \cdot (\mu \nabla \vec{v})$), representa los efectos disipativos que se dan debido a la viscosidad del fluido,

permitiendo describir los cambios en los gradientes de velocidad que se dan por las fuerzas viscosas. Finalmente, $\vec{F}$, son otras fuerzas externas que se pueden presentar en el sistema.

3.4.2. Modelo de turbulencia

Debido a la naturaleza turbulenta del flujo, las ecuaciones de Navier–Stokes se formulan en términos de valores medios mediante el promediado de Reynolds, dando lugar a las ecuaciones RANS, que viene de las siglas de Reynolds-Averaged Navier–Stokes. Este procedimiento introduce los esfuerzos de Reynolds, los cuales representan el efecto de las fluctuaciones turbulentas sobre el campo de velocidades promedio.

La presencia de estos términos adicionales genera el problema de cierre del sistema de ecuaciones, el cual se resuelve mediante el uso de un modelo de turbulencia. En este trabajo, dicho cierre se realiza utilizando el modelo $k - \omega$ SST.

3.4.2.1. Modelo $k-\omega$ SST

El modelo $k-\omega$ SST combina el desempeño del modelo $k-\omega$ en la región proxima a la pared con la robustez del modelo $k-\varepsilon$ en el flujo libre, mediante funciones de mezcla que permiten una transición suave entre ambos comportamientos. Este enfoque mejora la predicción de flujos con separación y altos gradientes de esfuerzo cortante.

El modelo resuelve dos ecuaciones de transporte adicionales: una para la energía cinética turbulenta k y otra para la frecuencia específica de disipación ω .

La ecuación de energía cinética turbulenta k , se expresa mediante la ecuación (18).

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j k)}{\partial x_j} = P_k - \beta^* \rho k \omega - \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (18)$$

Esta ecuación describe la evolución temporal y espacial de la energía cinética asociada a las fluctuaciones turbulentas. $\frac{\partial(\rho k)}{\partial t}$ es la derivada temporal que presenta el cambio temporal de la energía cinética turbulenta en un punto, es importante en flujos transitorios, donde las fluctuaciones turbulentas varían con el tiempo. La derivada convectiva es $\frac{\partial(\rho u_j k)}{\partial x_j}$ y describe el transporte de la energía cinética turbulenta debido al movimiento del fluido, indicando como las fluctuaciones de velocidad se propagan a lo largo del dominio de flujo. El término de producción P_k representa la generación de turbulencia debida a los gradientes de velocidad, especialmente intensos en las regiones cercanas a las aspas del rotor. $\frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right]$ son los términos de difusión los cuales modelan el transporte y la disipación de la energía turbulenta a través del fluido.

La ecuación de la frecuencia especifica de disipación ω , se presenta como se ve en la ecuación (19).

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j \omega)}{\partial x_j} = \alpha \frac{\omega}{k} P_k - \beta \rho \omega^2 - \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] \quad (19)$$

Esta ecuación gobierna la tasa a la cual la energía cinética turbulenta se disipa. Su correcta resolución permite una adecuada predicción del comportamiento turbulento tanto en la capa límite como en el flujo principal. $\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t}$ es la derivada temporal y mide el cambio de la frecuencia de disipación, es importante para modelar la tasa en la cual la energía turbulenta se disipa con el tiempo. La derivada

convectiva $\frac{\partial(\rho u_j \omega)}{\partial x_j}$ describe el transporte de la frecuencia específica de disipación a lo largo del flujo, mostrando cómo se mueve y propaga la tasa de disipación a través del dominio. La difusión turbulenta $\frac{\partial}{\partial x_j}[(\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j}]$ se encarga de representar la difusión de la frecuencia de disipación a través del fluido, permitiendo predecir cómo es la distribución de la disipación de energía en las regiones turbulentas.

Un elemento clave en el modelo SST es la función de mezcla F_1 , pues se encarga de controlar el modelo $k-\omega$ en la región cercana a la pared y el modelo $k-\varepsilon$ en la región de flujo libre. Esta función permite que se obtenga una formulación robusta y precisa en todo el dominio de cálculo, la función se define como se aprecia en la ecuación (20).

$$F_1 = \tanh[(\min(\max(\frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500\nu}{y^2 \omega}), \frac{4\sigma_{\omega 2} k}{CD_{k\omega} y^2}))^4] \quad (20)$$

Donde k es la energía cinética turbulenta, ω es la frecuencia específica de disipación, y es la distancia a la pared, ν es la viscosidad cinemática, β^* y $\sigma_{\omega 2}$ son constantes del modelo, y $CD_{k\omega}$ es el termino de difusión cruzada.

Cuando $F_1 \approx 1$, significa está en la región cerca a la pared y utiliza el modelo $k-\omega$; Cuando $F_1 \approx 0$, quiere decir que está en flujo libre y utiliza el modelo $k-\varepsilon$.

En las simulaciones con el modelo $k-\omega$ SST el parámetro y^+ es crucial para la precisión de la simulación. Dicho parámetro es una medida adimensional que describe la distancia normalizada entre la pared y la primera capa de celdas en la malla y se describe mediante la ecuación (21).

$$y^+ = \frac{u_t y}{\nu} \quad (21)$$

Donde, u_t es la velocidad de fricción de la pared, y es la distancia del primer nodo a la pared y ν es la viscosidad cinemática.

De acuerdo con el valor de y^+ , la capa límite se puede dividir en tres regiones, la primera es la subcapa viscosa, donde el flujo es dominado por la viscosidad, que se presenta cuando $y^+ < 5$. La segunda región es la zona buffer, donde se presenta la transición viscosa-turbulenta y se da lugar con $5 < y^+ < 30$. Finalmente, la última región es la región logarítmica, se presenta cuando $30 < y^+ < 300$, donde la turbulencia está plenamente desarrollada.

Para simulaciones de turbo maquinaria empleados con el modelo de turbulencia $k-\omega$ SST se recomienda utilizar valores de $y^+ < 1$ idealmente, sin embargo, un valor de $y^+ < 5$ representan aceptablemente los efectos viscosos cerca a la pared.

3.5. Diseño de experimentos

Un diseño de experimentos (DOE) es una herramienta estadística que permite estudiar un conjunto de experimentos de una manera eficiente, permitiendo evaluar el efecto de uno o la combinación de varios factores para una o más respuestas (R). Esto se utiliza con el objetivo de optimizar procesos, minimizar el número de experimentos y obtener conclusiones que sean validas basándose en la estadística[32].

3.5.1. Diseño factorial 2^k

Un diseño factorial 2^k es un DOE específico en el que se evalúan k factores con dos niveles, alto (1) y bajo (-1). Con este tipo de DOE se realizan 2^k combinaciones, por ejemplo, si son 5 factores que se evalúan se realizan 32 combinaciones, permitiendo ver el efecto de cada factor individualmente y también como la interacción entre ellos afecta a las respuestas [32].

3.5.1.1. Contrastes

Los contrastes son una combinación lineal de medias de tratamientos que permiten calcular los efectos de los factores y las interacciones. El contraste se calcula con la ecuación (22).

$$Contraste = \sum_{i=1}^{2^k} Nivel_i * R_i \quad (22)$$

Donde el nivel es 1 o -1 y se encarga de dar el signo y R es la respuesta de la combinación.

3.5.1.2. Efectos

En un DOE 2^k los efectos son la medida de la variación promedio de la respuesta analizada cuando un factor pasa de un nivel bajo a alto, mientras los otros factores no cambian de nivel, es decir cuanto sube o baja la medida de la respuesta con el cambio que sufre el factor. Con la ecuación (23) se calculan los efectos para los factores o interacciones.

$$Efecto = \frac{Contraste}{2^{k-1}} \quad (23)$$

3.5.1.3. Suma de cuadrados

La suma de cuadrados (SS) es un valor el cual se encarga de cuantificar la variabilidad explicada por cada efecto, siguiendo la ecuación (24) se calcula la suma de cuadrados.

$$SS = \frac{Efecto^2}{2^k} \quad (24)$$

3.5.1.4. Grado de libertad

El grado de libertad (GL) es un número que indica la cantidad de información independiente disponible para estimar la variabilidad de un efecto o del error. En un diseño 2^k cada factor o interacción tiene 1 como grado de libertad, este se da ya que cada contraste de efectos es calculado con una sola combinación lineal de las medias.

3.5.1.5. Media cuadrática

La media cuadrática (MS) es el valor que representa la varianza asociada a cada fuente de variación en el análisis de varianza (ANOVA). Dicho valor se calcula a partir de la ecuación (25).

$$MS = \frac{SS}{GL} \quad (25)$$

En otras palabras, la media cuadrática es la suma de cuadrados promedio por grado de libertad y es útil para comparar la variabilidad explicada y la variabilidad no explicada.

3.5.1.6. Estadístico F calculado

El estadístico F calculado (FC) es un valor que se obtiene a través de la ecuación (26).

$$FC = \frac{MS_{efecto}}{MS_{error}} \quad (26)$$

Donde MS_{efecto} es la media cuadrática de cada factor o combinación y MS_{error} es la media cuadrática asociada a la variabilidad no explicada. Permitiendo conocer si el factor o la combinación explica la variación de la respuesta, pues da a conocer si la variación explicada por el efecto es significativamente mayor que el error experimental.

3.5.1.7. F teórica

El valor que se conoce como F teórica (FT) es un valor el cual nos muestra cual es el punto critico tomado de la distribución F de Fisher-Snedecor y es utilizado como un punto de comparación contra el FC.

FT depende del nivel de significancia (α) que para el DOE-ANOVA es típicamente 0.05, los grados de libertad asociados al efecto y los grados de libertad asociados al error. Si FC es mayor que FT, quiere decir que la variabilidad explicada por el efecto es mucho mayor que la variabilidad del error, y por tanto el efecto es significativo. Si se da el caso contrario, muestra que no es significativo.

3.5.1.8. P-value

El p-value es la probabilidad de obtener un valor del estadístico de prueba tan extremo o más extremo que el observado, suponiendo que la hipótesis nula es cierta.

La hipótesis nula (H_0) dice que los efectos no son significativos y la hipótesis alterna (H_1) que dice que al menos un efecto es significativo. Para el p-value se mide que tan compatibles son los datos con H_0 , comparándolo con el nivel de significancia. Si p-value es menor que α quiere decir que el factor es estadísticamente significativo y en caso contrario el factor no tiene significancia alguna en la respuesta.

El p-value es similar a FT, se usan para conocer qué tan significativos son los factores o las combinaciones.

3.5.1.9. Efecto estandarizado

El efecto estandarizado (EFECTO STD) es el valor que muestra el efecto dividido por su error estándar, con este valor es posible tener una representación de los factores en un diagrama de Pareto. Para calcularlo se utiliza la ecuación (27), pero solo cuando GL es 1.

$$EFECTO\ STD = \sqrt{FC} \quad (27)$$

3.5.1.10. Margen de Error

El margen de error (ME) es un valor limite que nos dice que, si el efecto estandarizado es menor al ME, entonces el factor o combinación no es significativo y se muestra como el límite en el diagrama de Pareto. Es decir que representa el límite de variabilidad permitido para decidir si un efecto es importante. Se calcula con la distribución t y el error estándar del efecto.

3.5.2. Modelo

El modelo de regresión en un diseño factorial es una ecuación lineal la cual explica la respuesta en función de los factores codificados. Con este modelo es posible cuantificar, predecir y optimizar el comportamiento del sistema que se estudia, por medio de la ecuación (28) se obtiene el modelo.

$$y = \bar{x} + \frac{\alpha_i}{2} \hat{X}_i + \frac{\beta_j}{2} \hat{X}_j + \dots + \frac{\gamma_{ij}}{2} \hat{X}_i \hat{X}_j \quad (28)$$

Donde, y es la variable dependiente (AJUSTE). α , β y γ son los efectos de los factores o combinaciones (A, B, C, AB, ..., ABC) y $\hat{X}_i$ es el símbolo del nivel del factor o combinación, el cual se puede calcular a través de la ecuación (29) con el fin de dejar a x como la variable independiente (el factor), x_{min} y x_{max} son los valores del factor para el nivel bajo y alto respectivamente. Finalmente, a y b son los límites normalizados -1 y 1 respectivamente.

$$\hat{X}_i = a + \frac{[x - x_{min}] * (b - a)}{x_{max} - x_{min}} \quad (29)$$

Para ver que tanto se acerca el ajuste a la respuesta se realizan unos cálculos para realizar la comparación.

3.5.2.1. Residuo

El residuo es el valor que nos muestra cual es la diferencia que hay entre la respuesta y el ajuste que se realiza, permitiendo ver que tan lejos se encuentra el modelo de los resultados reales.

3.5.2.2. Residuo STD

El residuo estándar es una herramienta que permite analizar la regresión, ya que presenta la comparación de los residuos en una misma escala permitiendo identificar posibles outliers y verificar la validez del modelo.

$$Residuo\ STD = \frac{Residuo}{\sqrt{MSE * (1 - H_{ii})}} \quad (30)$$

El MSE es la media cuadrática del error y H_{ii} es la influencia del punto i , es decir que tanto afecta el punto i en el ajuste del modelo.

3.5.2.3. PRESS

El PRESS (Suma de Cuadrados de los Residuos de Predicción), es un valor el cual sirve para indicar que tan bien el modelo sirve para predecir nuevos datos.

$$PRESS = \sum_{i=1}^n \left(\frac{Residuo}{1 - H_{ii}} \right)^2 \quad (31)$$

Un valor pequeño del PRESS indica una mejor capacidad predictiva. Con el PRESS se calcula el R^2 del modelo, tal como se ve en la ecuación (32).

$$R^2 = 1 - \frac{PRESS}{Total\ SS} \quad (32)$$

4. Metodología

Para terminar satisfactoriamente con el proyecto es necesario cumplir una serie de actividades las cuales se dividen en metodologías particulares para cada objetivo específico.

Objetivo específico No. 1: “Seleccionar y adaptar la configuración hidráulica de una planta mareomotriz a las condiciones de Buenaventura.”

1. Revisar los diseños de plantas mareomotrices que actualmente se encuentran en operación con énfasis en su capacidad de generación, configuración hidráulica y condiciones oceanográfica de la zona.
2. Recopilar información de corrientes, olas, viento, densidad, termohalinas, entre otros, de la zona de estudio a partir de bases de datos.
3. Realizar la caracterización oceanográfica de la zona de estudio mediante el análisis armónico de marea, análisis de densidad, temperatura, salinidad y corrientes.
4. Identificar lugares dentro de la zona de estudio para la ubicación de plantas mareomotrices según estado del arte de Colombia.
5. Dimensionar una presa de marea que se adapta a las condiciones del lugar de estudio, considerando los diseños identificados en la revisión de literatura.

Objetivo específico No 2: “Optimizar las características hidráulicas de la configuración adaptada y comparar los parámetros hidráulicos de la turbina adaptada frente a las condiciones operacionales de diseño.”

1. Importar geometrías adaptadas al software de simulación.
2. Seleccionar las condiciones de frontera e iniciales de acuerdo con la caracterización oceanográfica efectuada en el objetivo 1, con el fin de evaluar los escenarios representativos.
3. Evaluar el comportamiento hidráulico de las recámaras mediante simulación CFD utilizando el campo completo.
4. Validar de los resultados del modelo con base a información secundaria.
5. Calcular los parámetros hidráulicos de presas mareomotrices.
6. Optimizar de los parámetros hidráulicos utilizando el diseño factorial 2^k [33] y siguiendo las metodologías utilizadas en [28], [34], [35].

Objetivo específico No. 3: “Formular recomendaciones para la adaptación de las turbinas comerciales o la posible fabricación de estas considerando las características de Buenaventura.”

1. Presentar los parámetros optimizados en el objetivo 2.
2. Mostrar el comportamiento de los parámetros y como estos afectan el comportamiento de la planta.
3. Indicar las características necesarias de las turbinas para tener un funcionamiento optimo en Buenaventura.

5. Resultados

5.1. Caracterización zona de estudio

En la costa Pacífica colombiana las mareas tienen una amplitud de hasta 3 m de amplitud y se caracterizan por ser mareas semidiurnas y mixtas tendiendo a semidiurnas. Para describir y predecir el comportamiento de las mareas se utiliza el análisis armónico de mareas el cual consiste en descomponer los registros del nivel del mar en un numero finito de ondas cuyo periodo y fase están perfectamente establecidos.

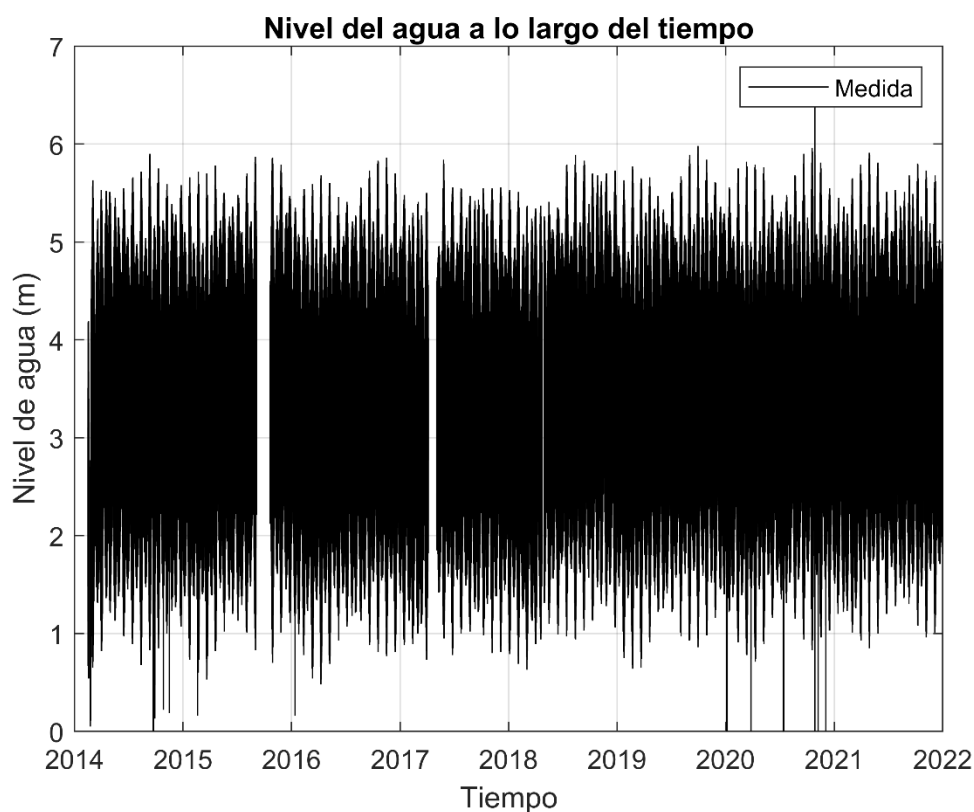


Figura 5.1: Serie de Nivel del Mar Horario DIMAR.

En la Tabla 5-1 se presentan los armónicos de marea constituyentes de la Bahía de Buenaventura, identificando varios componentes de marea con períodos semidiurnos, diurnos y de orden superior. Además, en la se presentan los armónicos para agregar amplificación de mareas en el modelado hidrodinámico [14].

Tabla 5-1: Principales armónicos de marea constituyentes de la Bahía de Buenaventura calculados a partir de datos medidos del nivel del agua entre 2011 y 2021 [14].

Armónico	Periodo (h)	Frecuencia (cph)	Amplitud (m)	Fase (°)	SNR
SA	8,766.23	0.000114074	0.120153074	234.846538	54.8204206
SSA	4,382.91	0.000228159	0.070128659	139.28321	20.7556345
O1	25.8193417	0.038730654	0.022875503	2.01720742	65.4415609
P1	24.0658902	0.041552587	0.035745417	342.142001	119.335514
S1	23.9999969	0.041666672	0.016676698	260.161438	22.6915168
K1	23.9344696	0.041780746	0.104467627	347.868857	1,534.33
J1	23.0984767	0.043292898	0.01004813	21.2761055	10.334983
EPS2	13.1272674	0.076177316	0.015830933	93.6921331	14.98525
2N2	12.9053745	0.077487097	0.03795249	60.7336994	81.6428649
MU2	12.8717576	0.077689468	0.049905025	94.4746628	148.602114
N2	12.6583482	0.078999249	0.316093425	83.7442921	5,371.59
NU2	12.6260044	0.07920162	0.057155105	87.0754912	237.119084
M2	12.4206012	0.080511401	1.506794911	109.525356	131,116.17
LDA2	12.2217742	0.081821181	0.017621982	86.4619221	13.4578625
L2	12.1916202	0.082023553	0.041684396	114.81695	80.8357544
T2	12.0164492	0.083219259	0.029581004	160.806738	49.3869777
S2	12	0.083333333	0.401177467	163.24526	9,879.12
K2	11.9672348	0.083561492	0.089005163	161.782011	474.390257
MO3	8.38630296	0.119242055	0.004550463	25.7765568	11.7369588
M3	8.2804008	0.120767101	0.006672359	171.47227	20.3778373
SK3	7.99270557	0.12511408	0.010186052	298.607934	52.3151947
MN4	6.2691739	0.159510649	0.027602629	267.559013	252.643317
M4	6.2103006	0.161022801	0.06734016	286.891327	1,359.29
SN4	6.16019278	0.162332582	0.011716516	2.77450291	51.27939
MS4	6.10333928	0.163844734	0.04394011	351.789085	819.764246
MK4	6.094852	0.164072893	0.010045556	347.855267	32.8258501
S4	6	0.166666667	0.008064286	66.9938208	24.9040138
2MK5	4.93088021	0.202803548	0.002693228	45.238758	11.1893999
2MS6	4.09238754	0.244356135	0.00661569	336.413261	42.5052822
2SM6	4.04566639	0.247178067	0.004248617	13.9920981	17.0670442
M8	3.1051503	0.322045603	0.009453122	260.378944	207.662663

Tabla 5-2: armónicos para agregar amplificación de mareas [14].

Armónico	Periodo (h)	Amplitud (m)	Fase (°)
1	12	0,015	0,785531
2	24	0,015	0,785531
3	12.42	0,25	0,785531

Con los armónicos constituyentes, se presenta la serie de tiempo de un año como se ve en Figura 5.2.

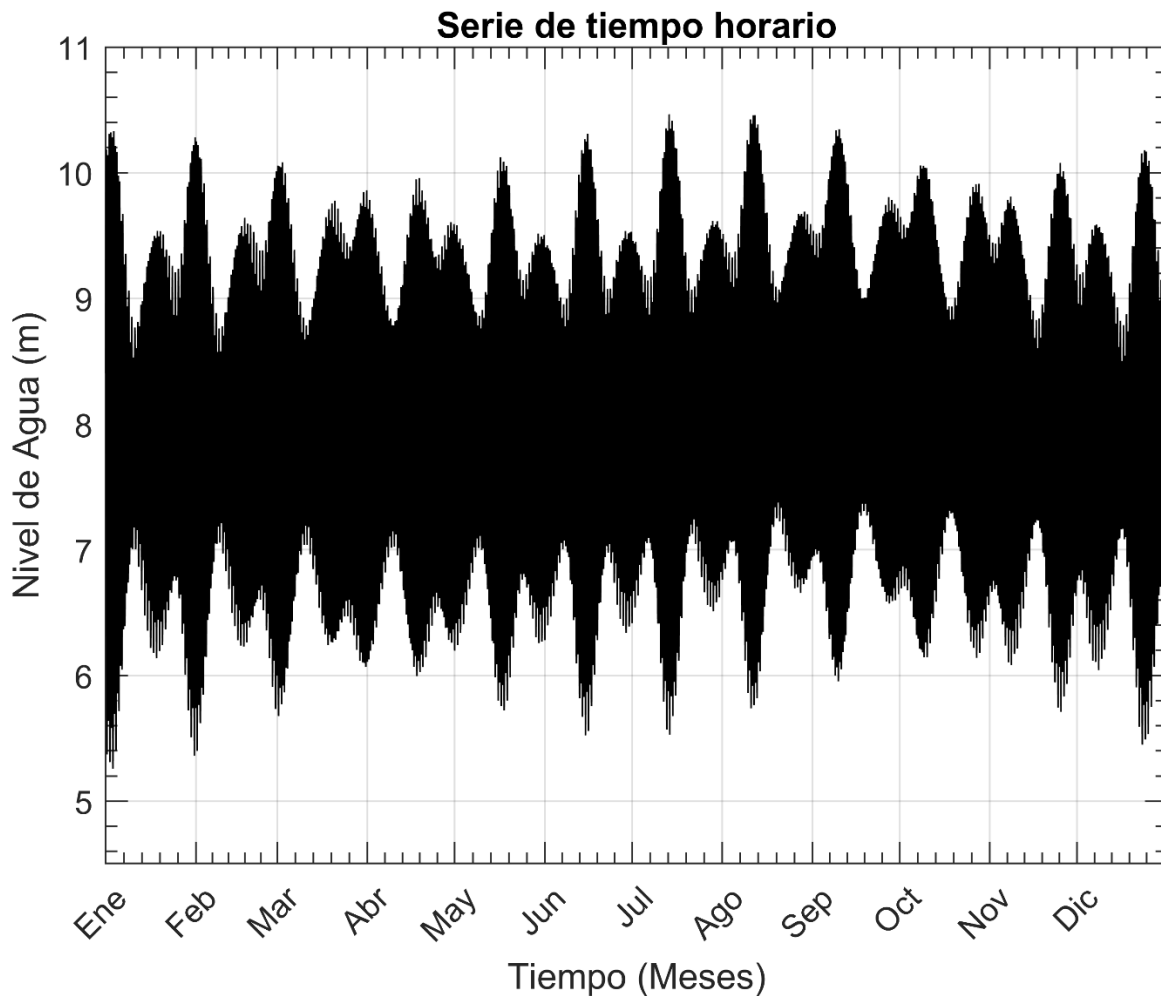


Figura 5.2: serie de tiempo modelada de un año.

En la bahía de buenaventura existen muchos lugares para desarrollar una presa mareomotriz, pero un buen lugar de estudio es el que se presenta en [36], en la Figura 5.3 se puede apreciar la ubicación del lugar de estudio, ya que es un lugar en el cual se pueden realizar obras civiles. Además, se presenta el diseño de una presa mareomotriz con 24 recámaras cuadradas de 5x5 m como se ve en Figura 5.4, Esta investigación implementó un modelo hidrodinámico 3D para simular la hidrodinámica del Bahía de Buenaventura para proporcionar datos como insumo para evaluar la hidráulica de una presa de marea sin compuertas a través del modelado CFD. En la Tabla 5-3 se pueden ver los resultados de velocidad de las compuertas obtenidos del modelo CFD.

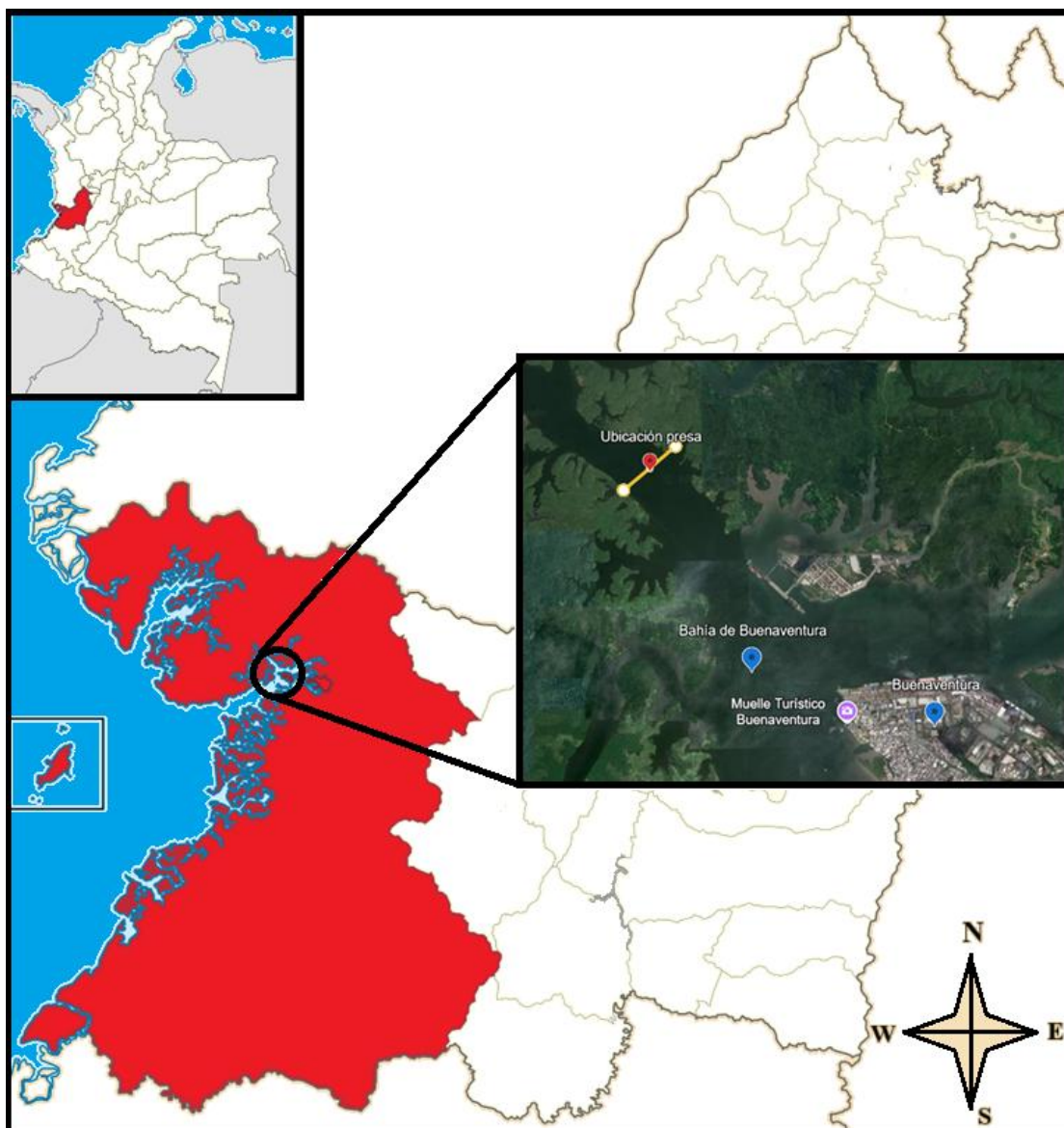


Figura 5.3: ubicación de la presa en la bahía de Buenaventura.

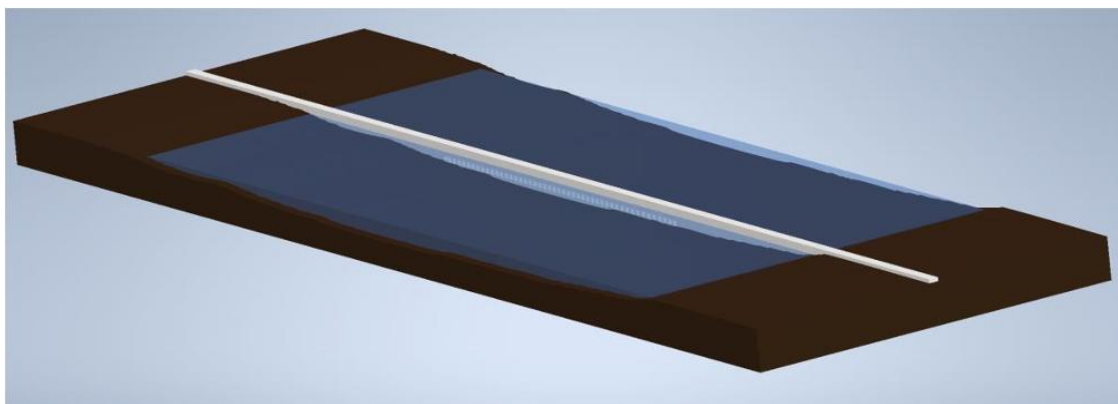


Figura 5.4: Modelo esquemático 3D del embalse y recámaras [36].

Tabla 5-3: Resultados CFD de velocidades de fluidos a través de las compuertas de la planta de energía mareomotriz [36].

		Velocidad (m/s)																							
Compuerta		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Cuadratura	Flujo	4,0	4,0	4,0	6,0	5,5	5,5	5,5	5,6	6,0	6,0	6,0	5,8	5,7	5,4	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	3,5	3,2	3,2	3,2	3,2
	Reflujo	4,4	4,1	4,0	4,0	3,6	3,8	2,6	2,7	2,7	2,6	2,6	2,7	3,2	3,0	3,4	3,5	3,6	3,8	3,6	3,8	3,8	3,8	3,9	3,9
Estoa	N/A	1,3	1,3	1,4	1,6	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,5	1,5	1,4	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3
Sicigia	Flujo	5,5	6,0	6,0	5,5	5,5	5,5	6,5	5,5	5,5	6,5	6,5	6,5	6,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,0	3,2	2,2	2,2	2,2	3,2	3,2
	Reflujo	7,5	6,5	4,2	5,5	4,5	6,5	6,5	4,3	4,3	4,3	6,8	6,8	7,2	4,3	4,3	6,5	8,2	11,0	7,0	7,5	6,8	6,8	7,5	4,5

Los resultados obtenidos muestran el potencial energético de este lugar, con base en estos resultados se hace la evaluación de la turbina bulbo.

5.2. Verificación del modelo.

La evaluación de la turbina se hace utilizando CFD, para comprobar el modelo se realiza la simulación de la presa de Jebel Aulia que está situada en el río Blanco Nilo. Esta presa trabaja con 80 unidades de la turbina Hidromatrix de Andritz Hidro, en la Figura 5.5 se ve la vista en sección y la foto de la presa y en la Tabla 5-4 se encuentra la información técnica.

Para comprobar el modelo se escoge esta turbina ya que es una turbina bulbo, es comercial y se ha usado en proyectos con baja cabeza hidráulica. Además, cuenta con información técnica que permite la realización del CAD, a partir del cual se busca comprobar que el modelo y el software representan correctamente el caso buscando un error menor al 10 % y así este mismo pueda ser usado en Buenaventura.

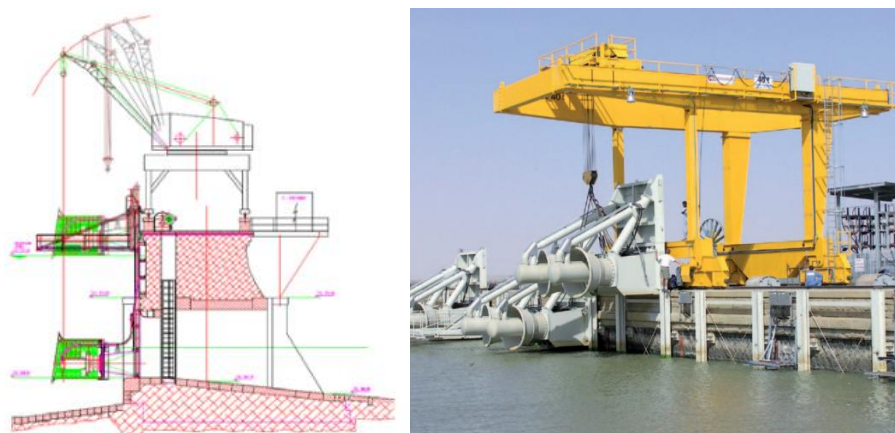


Figura 5.5: Vista en sección y fotografía de los módulos en estado elevado de la presa de Jebel Aulia [37]

Tabla 5-4: Datos técnicos de la planta de Jebel Aulia.

Datos técnicos	
Potencia de la unidad	380 kW
Voltaje	690 V
Cabeza hidráulica	5,5 m
Velocidad	375 rpm

Diámetro del Runner	1120 mm
Número de unidades	80
Producción media anual	116,4 GWh

Con base a la información recolectada se hace el modelo CFD, se realiza el modelo CAD de la turbina, para el bulbo se realiza con dimensiones reportadas por el proyecto y se realiza el desarrollo del rodete con base a los triángulos de velocidades y al perfil hidrodinámico, que para turbinas bulbo se recomienda el NACA (MOD) 66 [38], [39]. En la Figura 5.6 se puede ver el desarrollo del perfil a lo largo del álabe.

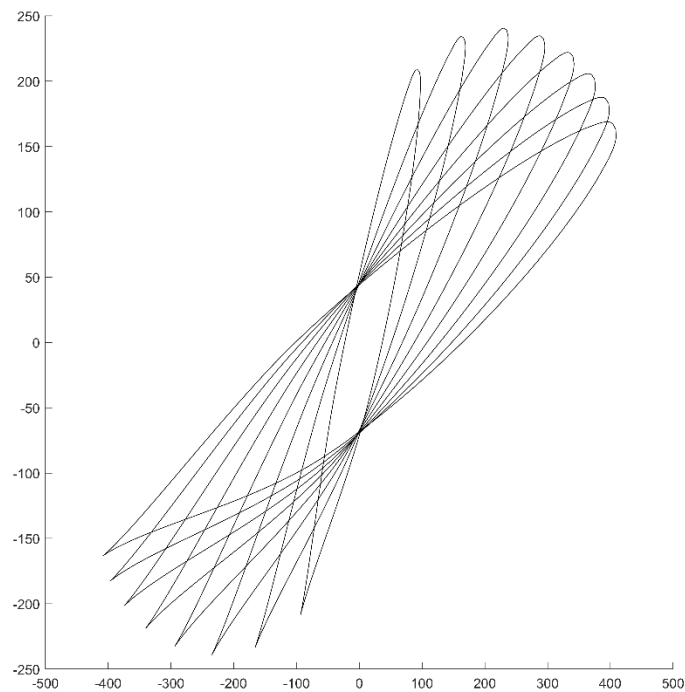


Figura 5.6: Desarrollo del perfil NACA 66, para la turbina hidromatrix.

En Figura 5.7 se ve el rodete realizado en Inventor y en Figura 5.8 se ve el ensamble de la turbina en la recámara.

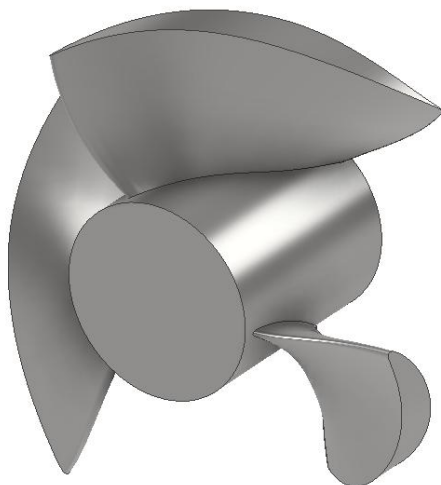


Figura 5.7: Rodete hidromatrix Jebel.

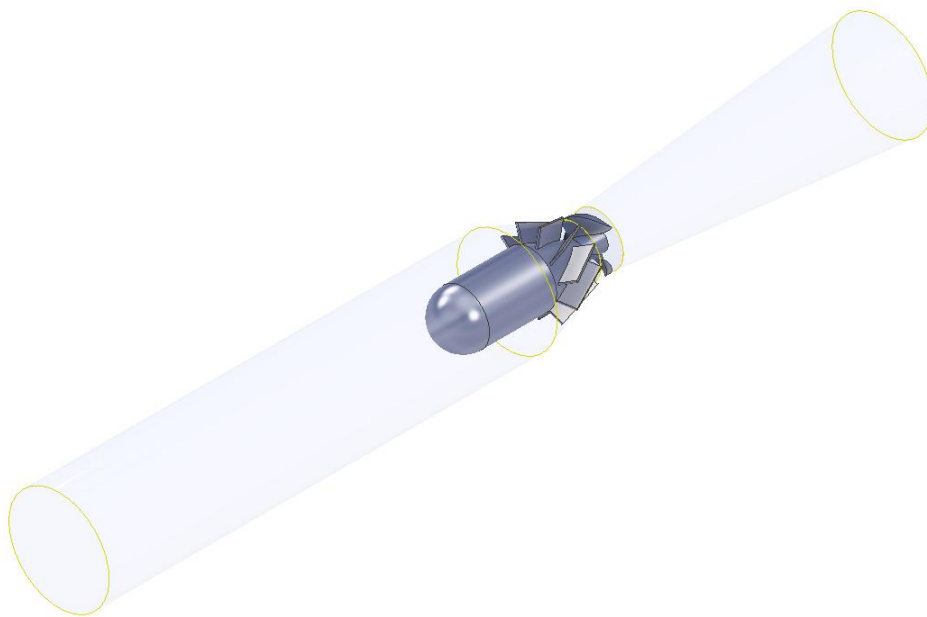


Figura 5.8: Turbina bulbo hidromatrix.

En Figura 5.9 se ve la turbina en el software de CFD Autodesk y los materiales asignados, para los elementos solidos de la turbina se le asigno aluminio, que es uno de los materiales con los que se fabrican las turbinas, también se asigna agua como fluido de trabajo y para modelar el efecto de la rotación del rodete, se definió una región rotante asociada al rotor con velocidad de 375 RPM, empleando un marco de referencia rotante (MRF, Multiple Reference Frame) dentro del entorno de Autodesk CFD.

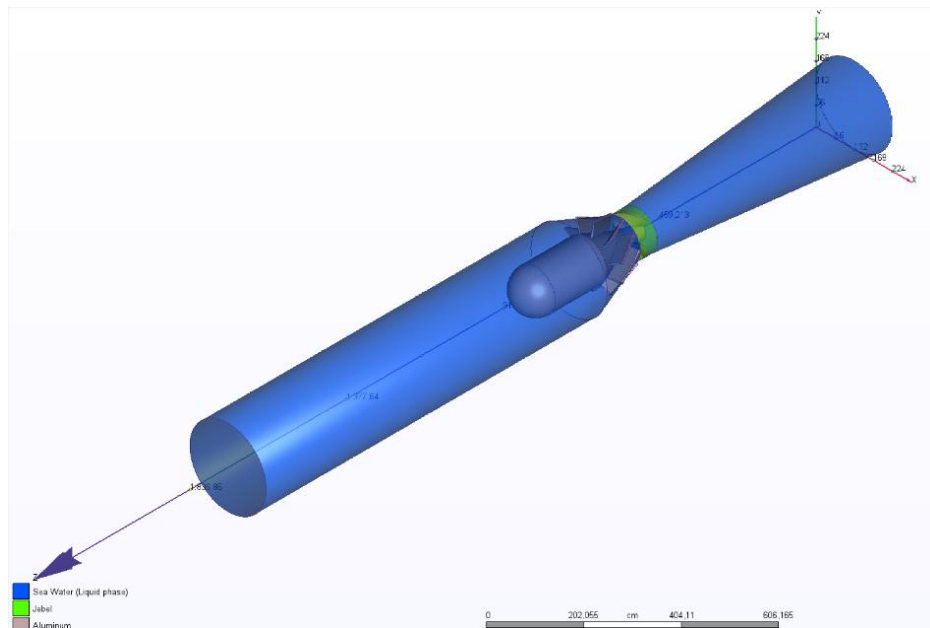


Figura 5.9: Materiales asignados en CFD Autodesk.

El análisis se desarrolló bajo un enfoque transitorio, con el objetivo de capturar la evolución temporal del campo de flujo inducida por la rotación del rodete y representar de forma más realista el comportamiento hidráulico de la turbina. Este enfoque resulta adecuado en turbomáquinas, donde la interacción entre el rotor y el fluido genera variaciones temporales en las variables de velocidad y presión.

Como condiciones de borde (ver Figura 5.10) se coloca a la entrada la velocidad del flujo que para el caso es de 8,11 m/s, dicha velocidad en normal a la sección de entrada; y en la salida presión de 0 Pa, con la intención de presentar una descarga libre del flujo, permitiendo que el campo de velocidades y presiones se ajusten de manera natural dentro del dominio.

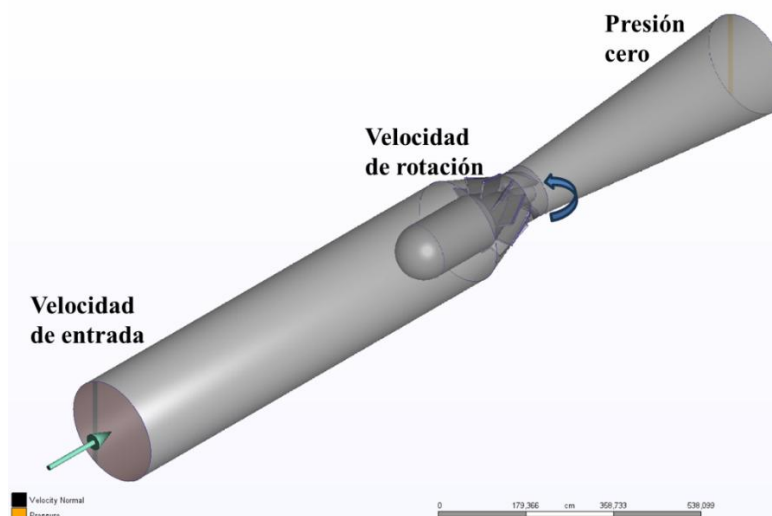


Figura 5.10: Condiciones de borde.

En la Tabla 5-5 y en Figura 5.11 se puede ver la convergencia de la malla. Para la convergencia se evalúa mediante un criterio físico, en este caso es la velocidad promedio que se presenta aguas abajo del rotor. Ya que el cambio entre iteraciones consecutivas se redujo de forma significativa y se ubicó en un rango bajo (1%), se considera que la solución alcanzó un estado suficientemente estable para el objetivo del estudio. También, se decide parar ahí, ya que cumple con lo mínimo para representar el problema y el equipo donde se realizaron las simulaciones contaba solo con 4 núcleos y 12 GB de RAM, lo que limita seguir con el refinamiento de la malla.

Tabla 5-5: Convergencia de la malla.

#	# Elementos	V out [m/s]	Error
1	1270768	7,04	-
2	1888851	6,31	10%
3	3509736	6,4	1%

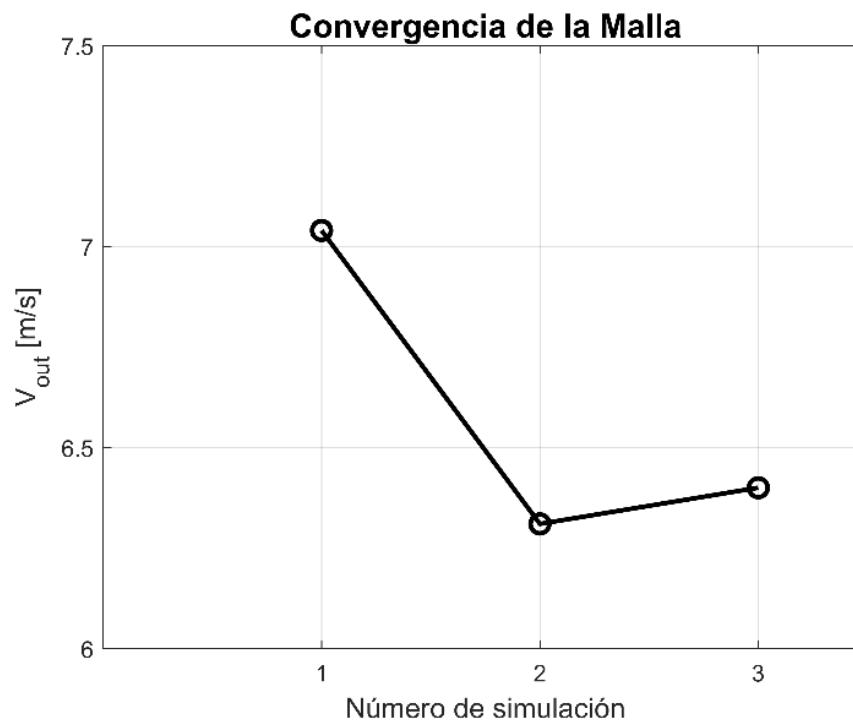


Figura 5.11: Convergencia de la malla.

En Figura 5.12 se ve la malla final que se utiliza en la simulación, dicha malla se refina en la zona de los álabes guías y el rotor de la turbina mediante la opción de refinamiento por regiones, pues es una

zona critica ya que es donde ocurren los mayores cambios en la velocidad, la presión y la turbulencia del flujo. Con esto se busca garantizar una simulación más realista con resultados confiables.

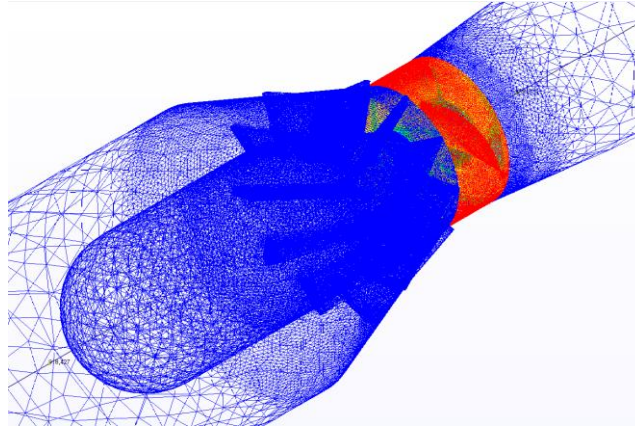


Figura 5.12: Malla Jebel.

Dado que el modelo de turbulencia es $k-\omega$ SST, el valor de y^+ debe ser menor a 5 para garantizar que se presente en la subcapa viscosa, en la Figura 5.13 se puede apreciar como para los álabes guías y el rodete el valor reportado es menor que 5.

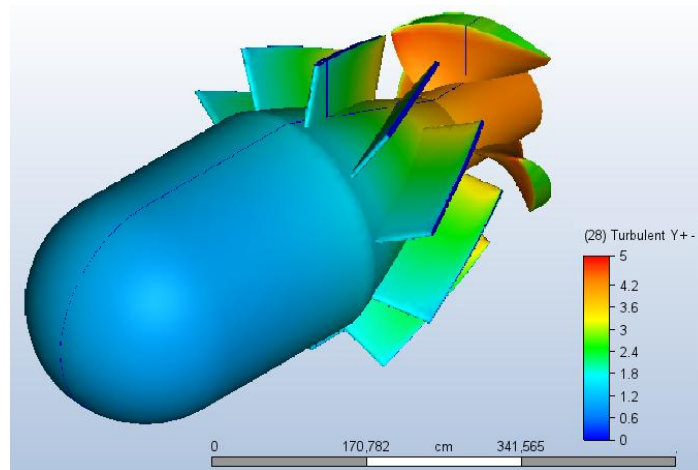


Figura 5.13: Valor de y^+ .

Para validar el modelo se usa la ecuación (33), la cual permite calcular la cabeza hidráulica (H) a partir de la velocidad y presión aguas arriba y aguas debajo de la turbina [40].

$$H = \frac{p_{in} - p_{out}}{\rho g} + \frac{v_{in}^2 - v_{out}^2}{2g} \quad (33)$$

Donde p_{in} es la presión a la entrada, p_{out} la presión a la salida, v_{in} es la velocidad a la entrada, v_{out} es la velocidad en la salida, ρ es la densidad del agua y g es la gravedad.

En Figura 5.14 se pueden ver los planos en la entrada y en la salida de donde se sacaron los valores de la simulación.

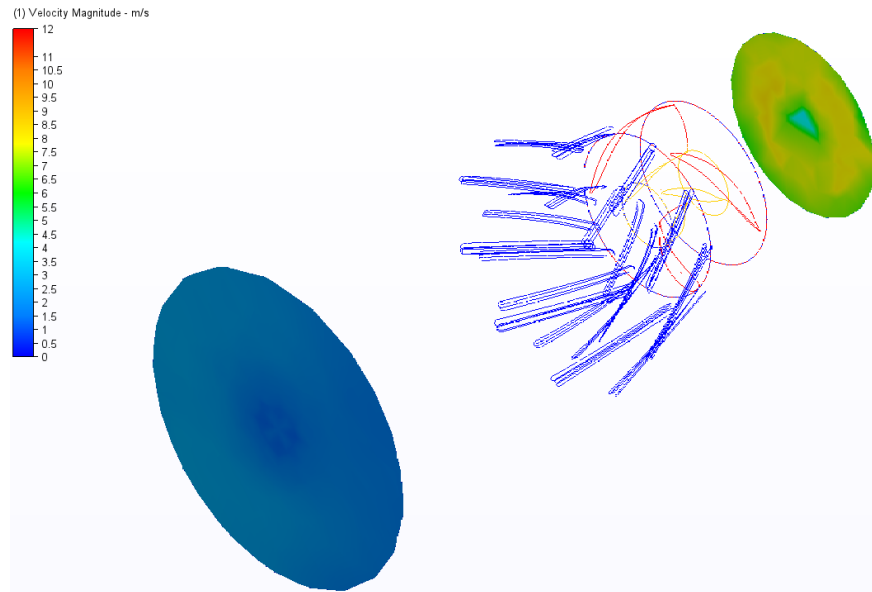


Figura 5.14: Resultados aguas arriba y aguas abajo de la turbina.

En la Tabla 5-6 se muestran los resultados de la simulación, donde se puede ver que la cabeza hidráulica es de 5,27 m para la simulación y la real de la plata de Jebel es de 5,5 m, teniendo así un error del 4%, a pesar de que no se tenían los CADs los cuales fueron creados desde cero con base a datos y recomendaciones para las turbinas bulbo. Así, teniendo en cuenta este resultado, se toma como validado el modelo.

Tabla 5-6: Resultados simulación de validación.

Resultados	
V_{int} (m/s)	2,11
V_{out} (m/s)	6,4
P_{in} (Pa)	91000,4
P_{out} (Pa)	19476
g (m/s ²)	9,81
ρ (kg/m ³)	1021,2
H simulación (m)	5,27
H real (m)	5,5
Error	4%

5.3. Doe-Anova

Para el desarrollo de este proyecto se realiza un diseño factorial 2^k , se escogieron 5 factores los cuales influyen directamente en el comportamiento hidráulico y energético del sistema. Dichos niveles se evaluaron en dos niveles alto y bajo, estos se definieron a partir de rangos operativos reales y propiedades físicas del fluido. A continuación, se presenta la descripción de los factores evaluados y sus niveles.

5.3.1. Ángulo de los álabes guía

Este ángulo determina la dirección y velocidad con la que el flujo ingresa al rotor. Este es un factor clave, ya que afecta la eficiencia y el caudal disponible para la generación de energía, así como el funcionamiento del equipo. Los niveles evaluados son 17° (bajo) y 23° (alto).

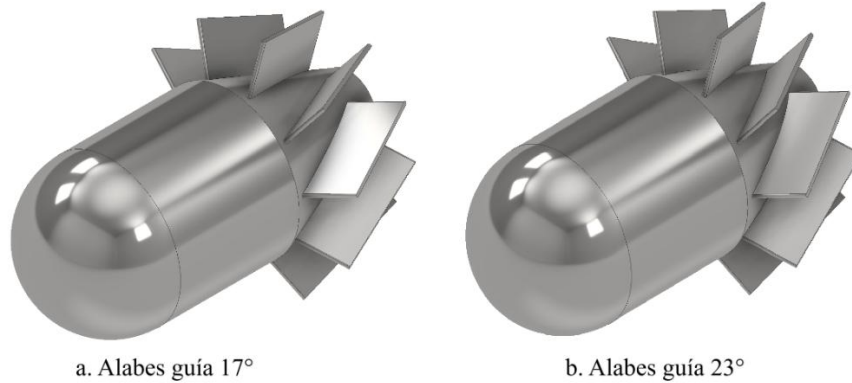


Figura 5.15: Nivel bajo y alto de los álabes guía

5.3.2. Ángulo álabes del rotor

Describe la inclinación de los álabes del rotor que son los que reciben el flujo del agua afectando directamente el aprovechamiento de la energía hidráulica disponible. Los niveles que se avalúan para este factor son 3° (bajo) y 5° (alto).

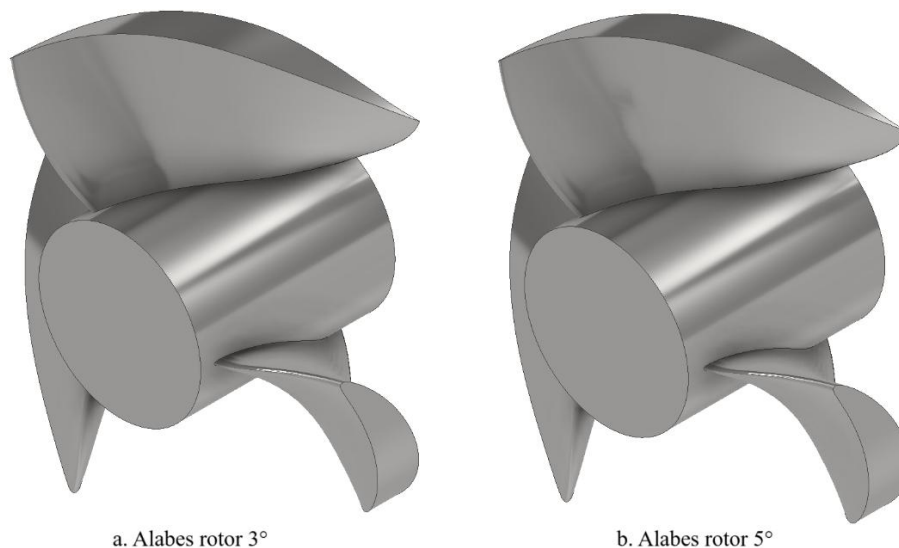


Figura 5.16: Nivel bajo y alto de los álabes del rotor.

5.3.3. Ángulo de salida de recámara de descarga

Este ángulo indica la apertura de la recámara o del difusor por donde sale el fluido del sistema. Modificar este ángulo permite estudiar el comportamiento del flujo aguas abajo y como afecta al ecosistema. Los niveles que se estudian en este factor son 0° (bajo) y 10° (alto).

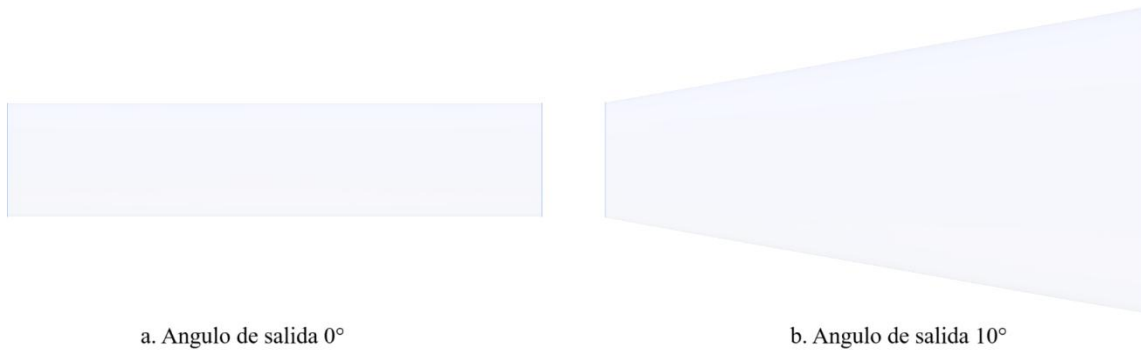


Figura 5.17: Nivel bajo y alto ángulo de salida recámara de descarga.

5.3.4. Velocidad del flujo

Esta es la rapidez con la que el fluido entra al sistema, el valor de esta determina la cantidad de energía cinética disponible. Para este factor se evaluaron 3,5 m/s (bajo) y 6,2 m/s (alto) estos son los valores promedio de reflujo en cuadratura y reflujo sicigia que son los casos críticos de la Tabla 5-3.

5.3.5. Densidad del agua

La densidad es un factor que varía de acuerdo con la temperatura, presión y salinidad del fluido. Estos cambios pueden considerarse pequeños, pero tienen un efecto sobre la cantidad de energía disponible en el fluido, este factor es importante considerarlo, ya que el lugar de estudio es en el pacífico colombiano que es reconocido por una alta cantidad de precipitaciones. Los niveles evaluados son 1003,1 kg/m³ (bajo) y 1005,3 kg/m³ (alto).

Para calcular la densidad se utiliza la función `gsw_rho(SA,CT,p)` de TEOS-10 que se basa en una formulación de la función de Gibbs a partir de la cual se obtienen todas las propiedades termodinámicas del agua de mar [41].

En la función `gsw_rho(SA,CT,p)`, la densidad en función de la salinidad (SA), la temperatura (CT) y la presión (p). La presión que se utiliza es de 1 atm ya que es al nivel del mar, la temperatura se toma de 28.5 °C [42] y para la salinidad se toma de la Figura 5.19 que muestra la variación histórica (2001-2023) de la salinidad del agua en las estaciones y zonas REDCAM en Valle del Cauca [42], de donde se sacan los valores críticos de 9 y 12 para precipitaciones altas y precipitaciones bajas respectivamente del punto más cercano al lugar de estudio el cual es el 211-BDB (ver Figura 5.18) y se tienen los datos históricos desde el 2003.

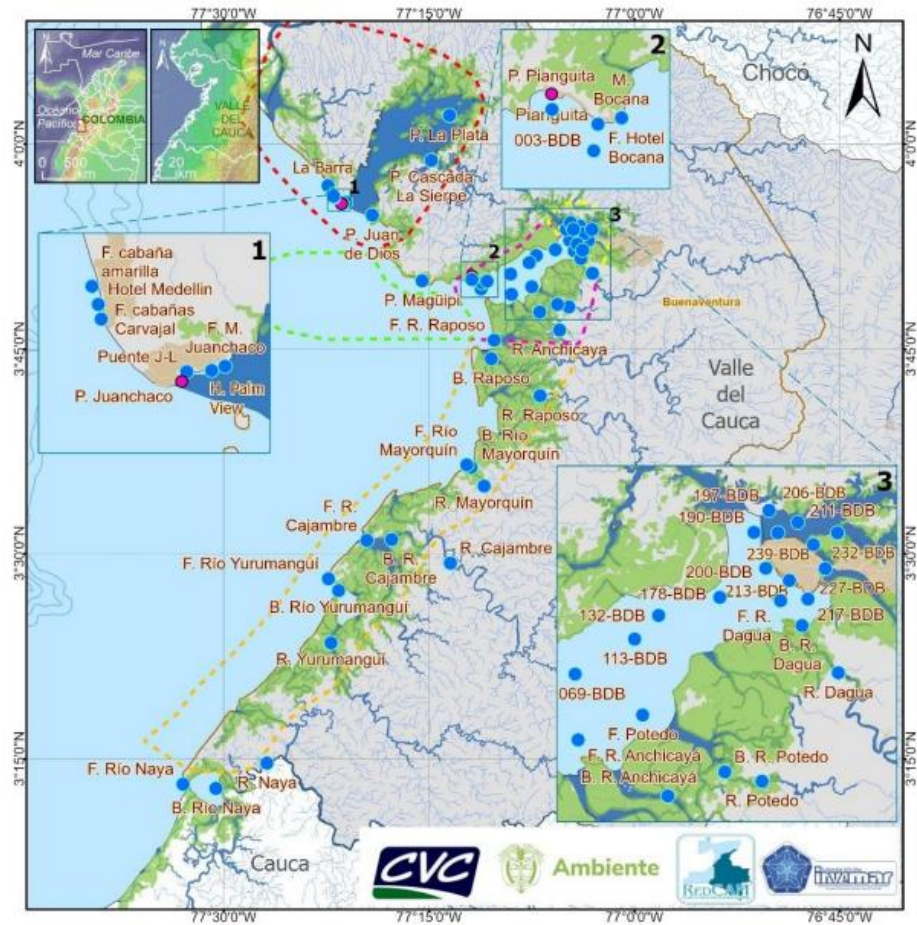


Figura 5.18: Mapa de estaciones de muestreo de la REDCAM en Buenaventura [42]

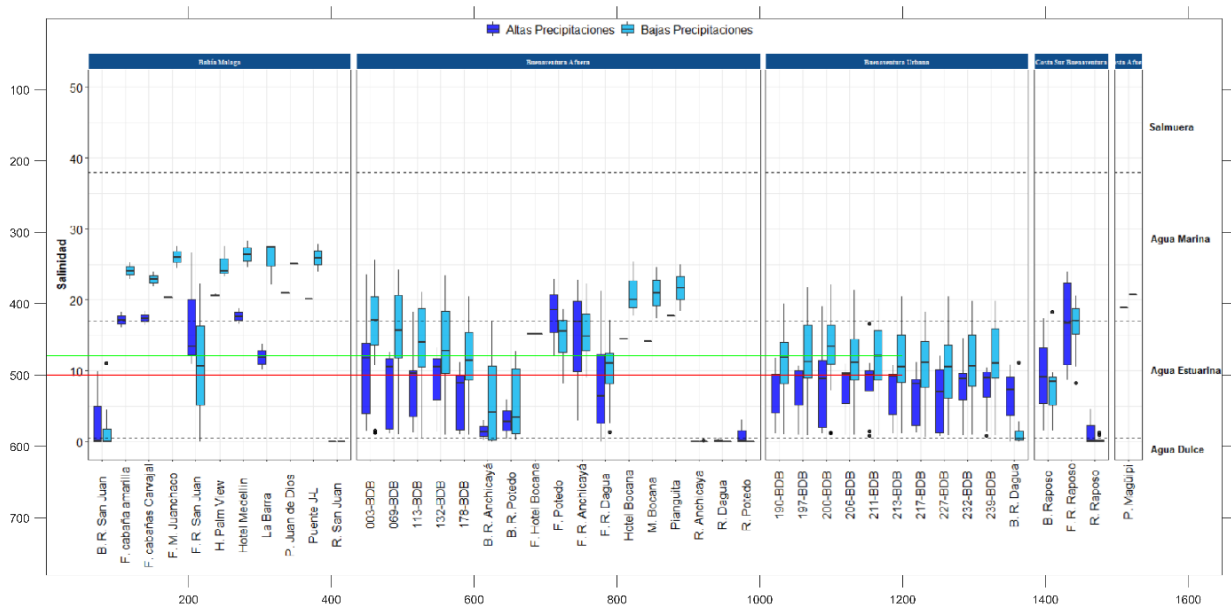


Figura 5.19: Variación histórica (2001-2023) de la salinidad del agua en las estaciones y zonas REDCAM en Valle del Cauca tomado y editado de [42].

Al evaluar la función con estos dos valores de salinidad se tienen los niveles alto y bajo de la densidad mencionados anteriormente. Finalmente, en la Tabla 5-7 se puede ver los niveles y los factores que se evalúan.

Tabla 5-7: Factores y niveles evaluados.

Factor		Alto (1)	Bajo (-1)
Ángulo álabes guías	A	23°	17°
Ángulo álabes del rotor	B	5°	3°
Ángulo salida de recámara	C	10°	0°
Velocidad aguas arriba de la recámara	D	6,2 m/s	3,5 m/s
Densidad agua	E	1005,3 kg/m ³	1003,1 kg/m ³

Para la evolución se usa el mismo tipo de turbina con el que se comprobó el modelo, pero para aprovechar la mayor cantidad de energía producida, la turbina evaluada tiene un diámetro de 2,5 m cuya potencia nominal es de 433 kW, este cálculo es para una velocidad de flujo de 6 m/s.

En la Tabla 5-8 se presentan las 32 combinaciones evaluadas donde 1 se refiere al nivel alto y -1 al nivel bajo.

Tabla 5-8: Combinaciones evaluadas.

#	A	B	C	D	E
1	-1	-1	-1	-1	-1
2	1	-1	-1	-1	-1
3	-1	1	-1	-1	-1
4	1	1	-1	-1	-1
5	-1	-1	1	-1	-1
6	1	-1	1	-1	-1
7	-1	1	1	-1	-1
8	1	1	1	-1	-1
9	-1	-1	-1	1	-1
10	1	-1	-1	1	-1
11	-1	1	-1	1	-1
12	1	1	-1	1	-1
13	-1	-1	1	1	-1
14	1	-1	1	1	-1
15	-1	1	1	1	-1
16	1	1	1	1	-1
17	-1	-1	-1	-1	1
18	1	-1	-1	-1	1
19	-1	1	-1	-1	1
20	1	1	-1	-1	1
21	-1	-1	1	-1	1
22	1	-1	1	-1	1

23	-1	1	1	-1	1
24	1	1	1	-1	1
25	-1	-1	-1	1	1
26	1	-1	-1	1	1
27	-1	1	-1	1	1
28	1	1	-1	1	1
29	-1	-1	1	1	1
30	1	-1	1	1	1
31	-1	1	1	1	1
32	1	1	1	1	1

5.4. Resultados Doe-Anova

De las simulaciones realizadas se sacan 5 resultados, los cuales son velocidad aguas arriba de la turbina, velocidad aguas abajo, torque, presión en los álabes del rotor y la presión en los álabes guías. A estos resultados se les realiza el análisis estadístico y también se generan ecuaciones que sirven para predecir otras combinaciones. En Tabla 5-9 se presentan los resultados de las simulaciones.

Tabla 5-9: Resultados simulaciones.

#	Velocidad entrada [m/s]	Velocidad salida [m/s]	Torque [N-m]	Presión álabes [Pa]	Presión álabes guía [Pa]
1	2,69	0,40	1752,84	2600,00	600,00
2	2,68	0,35	1104,63	1900,00	800,00
3	2,67	0,39	1673,69	2500,00	350,00
4	2,69	0,32	1668,03	2700,00	900,00
5	2,68	0,07	2239,45	2154,00	629,00
6	2,70	0,05	2461,49	2678,00	858,00
7	2,68	0,06	4574,68	3700,00	865,00
8	2,65	0,04	4798,00	3670,00	850,00
9	4,78	0,65	5747,48	7598,00	1635,00
10	4,81	0,68	4926,31	9155,00	2672,00
11	4,66	0,66	6304,06	7246,00	880,00
12	4,71	0,70	7170,00	7359,00	2865,00
13	4,79	0,10	9152,58	7859,00	3625,00
14	4,77	0,11	5766,71	7210,00	1302,00
15	4,87	0,12	3794,97	7515,00	1542,00
16	4,83	0,07	8373,72	9715,00	5561,00
17	1,78	0,47	4568,00	2634,00	368,00
18	2,69	0,36	1274,67	3232,00	761,00
19	2,21	0,38	1475,60	2600,00	554,00
20	2,75	0,33	1493,39	2557,00	850,00
21	2,66	0,06	2359,67	2511,00	1155,00
22	2,70	0,06	2025,72	2340,00	821,00
23	2,69	0,07	2458,00	2000,00	614,00

24	2,68	0,04	1475,20	2550,00	745,00
25	4,83	0,81	6661,54	7150,00	1351,00
26	4,74	0,69	4876,10	8012,00	2840,00
27	4,78	0,63	6040,80	7250,00	870,00
28	4,81	0,79	4590,00	7957,00	2350,00
29	4,85	0,10	8238,62	7750,00	2654,00
30	4,75	0,12	4350,00	6350,00	1652,00
31	4,90	0,11	4904,06	6500,00	2200,00
32	4,57	0,06	8207,32	9000,00	5210,00

5.4.1. Análisis velocidad entrada

Como primer paso se realiza el cálculo de los contrastes y los efectos de las combinaciones, en la Tabla 5-10 se pueden apreciar.

Tabla 5-10: Contraste y efectos de la velocidad aguas arriba.

COMBINACIÓN	CONTRASTE	EFFECTOS
A	1,01	0,06312
B	0,25	0,01563
C	1,49	0,09312
D	34,85	2,17813
E	-1,27	-0,07937
AB	-0,55	-0,03438
AC	-1,95	-0,12188
BC	-0,31	-0,01937
AD	-1,95	-0,12188
BD	-0,63	-0,03937
CD	-1,07	-0,06688
AE	0,97	0,06063
BE	0,53	0,03313
CE	0,93	0,05813
DE	1,29	0,08062
ABC	-0,15	-0,00937
ABD	0,33	0,02063
ACD	0,93	0,05813
BCD	0,73	0,04563
ABE	-0,51	-0,03188
ACE	-1,63	-0,10188
BCE	-0,95	-0,05938
ADE	-1,99	-0,12438
BDE	-0,59	-0,03688
CDE	-1,71	-0,10688
ABCD	-0,63	-0,03938
ABCE	0,09	0,00563

ABDE	0,29	0,01812
ACDE	1,17	0,07313
BCDE	-0,07	-0,00437
ABCDE	-0,71	-0,04438

Se organizaron los efectos de menor a mayor y se grafica la probabilidad normal de los efectos como se ve en Figura 5.20, encontrando que el factor D (velocidad) es el efecto de mayor influencia, pues no sigue con la tendencia.

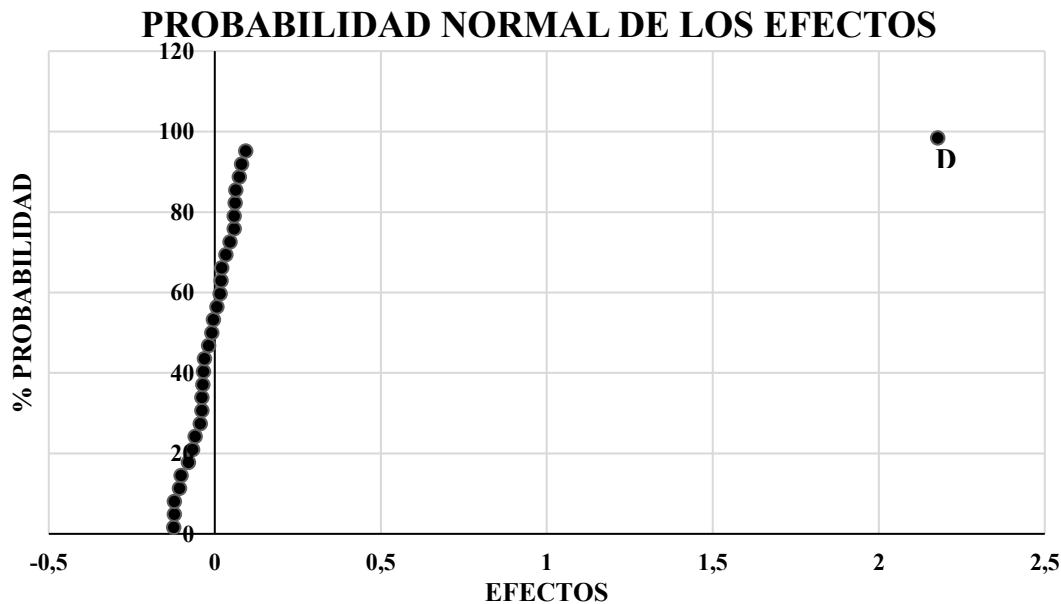


Figura 5.20: Probabilidad normal de los efectos para la velocidad en la entrada.

Con base a lo anterior se dice que la velocidad aguas arriba de la recámara (D) genera efecto significativo en la velocidad a la entrada de la turbina. Por lo anterior en Tabla 5-11 se presenta el análisis para los factores que generan algún efecto en la respuesta y sus interacciones.

Tabla 5-11: Análisis factores e interacciones velocidad de entrada.

FACTORES	SS	GL	MS	FC	FT	p-value	EFECTO STD	ME
D	37,954	1	37,954	1227,571	4,451	2,72E-17	35,037	2,898
AD	0,119	1	0,119	3,843	4,451	6,65E-02	1,960	2,898
CD	0,036	1	0,036	1,157	4,451	2,97E-01	1,076	2,898
DE	0,052	1	0,052	1,682	4,451	2,12E-01	1,297	2,898
ABD	0,003	1	0,003	0,110	4,451	7,44E-01	0,332	2,898
ACD	0,027	1	0,027	0,874	4,451	3,63E-01	0,935	2,898
BCD	0,017	1	0,017	0,539	4,451	4,73E-01	0,734	2,898
ADE	0,124	1	0,124	4,003	4,451	6,17E-02	2,001	2,898
BDE	0,011	1	0,011	0,352	4,451	5,61E-01	0,593	2,898
CDE	0,091	1	0,091	2,956	4,451	1,04E-01	1,719	2,898
ABCD	0,012	1	0,012	0,401	4,451	5,35E-01	0,633	2,898
ABDE	0,003	1	0,003	0,085	4,451	7,74E-01	0,292	2,898
BCDE	0,000	1	0,000	0,005	4,451	9,45E-01	0,070	2,898
ABCDE	0,016	1	0,016	0,510	4,451	4,85E-01	0,714	2,898

ERROR	0,526	17	0,031
TOTAL	38,990	31	1,258

En la tabla se presenta para cada factor la suma de cuadrados, los grados de libertad, la media cuadrática, F calculado, F teórica, p-value, efecto estandarizado y margen de error. Se puede ver que el factor D es el único que es significativo pues FC es mayor que FT y el p-value es menor que 0.05.

Este análisis ANOVA presenta un R^2 de 0,97 y un s de 0,18; lo anterior muestra que el modelo representa correctamente los resultados obtenidos, también en la Figura 5.21 se ve que el factor D es el único que sobrepasa el ME, confirmando lo mencionado anteriormente.

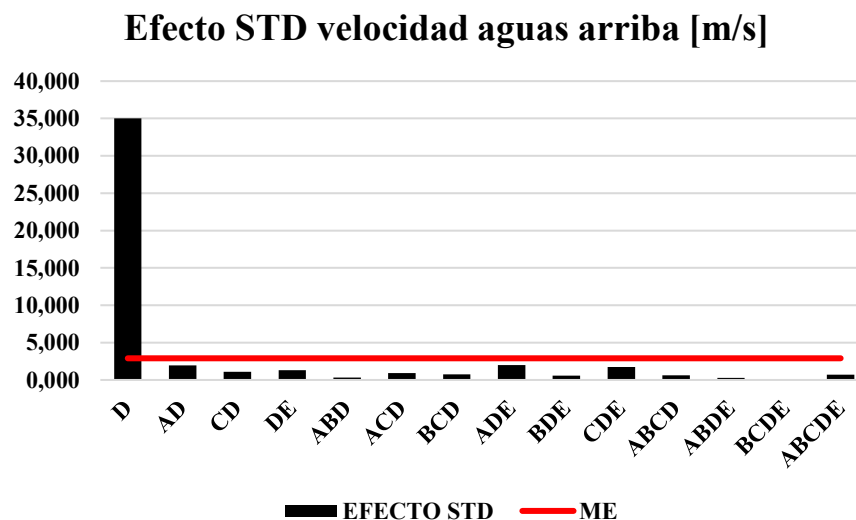


Figura 5.21: Diagrama de Pareto efecto estandarizado velocidad aguas arriba considerando todas las interacciones.

Ya que D es el único valor que es significativo, se procede a hacer la regresión con dicho valor obteniendo los resultados de la Tabla 5-12.

Tabla 5-12: Regresión DOE-ANOVA para la velocidad de entrada.

RESPUESTA	Ecuación filtrada	RESIDUO	Hii	Residuo Std	PRESS
2,69	2,60	0,0900	0,50	0,68	0,032
2,68	2,60	0,0800	0,50	0,61	0,026
2,67	2,60	0,0700	0,50	0,53	0,020
2,69	2,60	0,0900	0,50	0,68	0,032
2,68	2,60	0,0800	0,50	0,61	0,026
2,7	2,60	0,1000	0,50	0,76	0,040
2,68	2,60	0,0800	0,50	0,61	0,026
2,65	2,60	0,0500	0,50	0,38	0,010
4,78	4,78	0,0019	0,50	0,01	0,000
4,81	4,78	0,0319	0,50	0,24	0,004
4,66	4,78	-0,1181	0,50	-0,90	0,056

4,71	4,78	-0,0681	0,50	-0,52	0,019
4,79	4,78	0,0119	0,50	0,09	0,001
4,77	4,78	-0,0081	0,50	-0,06	0,000
4,87	4,78	0,0919	0,50	0,70	0,034
4,83	4,78	0,0519	0,50	0,39	0,011
1,78	2,60	-0,8200	0,50	-6,24	2,690
2,69	2,60	0,0900	0,50	0,68	0,032
2,21	2,60	-0,3900	0,50	-2,97	0,608
2,75	2,60	0,1500	0,50	1,14	0,090
2,66	2,60	0,0600	0,50	0,46	0,014
2,7	2,60	0,1000	0,50	0,76	0,040
2,69	2,60	0,0900	0,50	0,68	0,032
2,68	2,60	0,0800	0,50	0,61	0,026
4,83	4,78	0,0519	0,50	0,39	0,011
4,74	4,78	-0,0381	0,50	-0,29	0,006
4,78	4,78	0,0019	0,50	0,01	0,000
4,81	4,78	0,0319	0,50	0,24	0,004
4,85	4,78	0,0719	0,50	0,55	0,021
4,75	4,78	-0,0281	0,50	-0,21	0,003
4,9	4,78	0,1219	0,50	0,93	0,059
4,57	4,78	-0,2081	0,50	-1,58	0,173

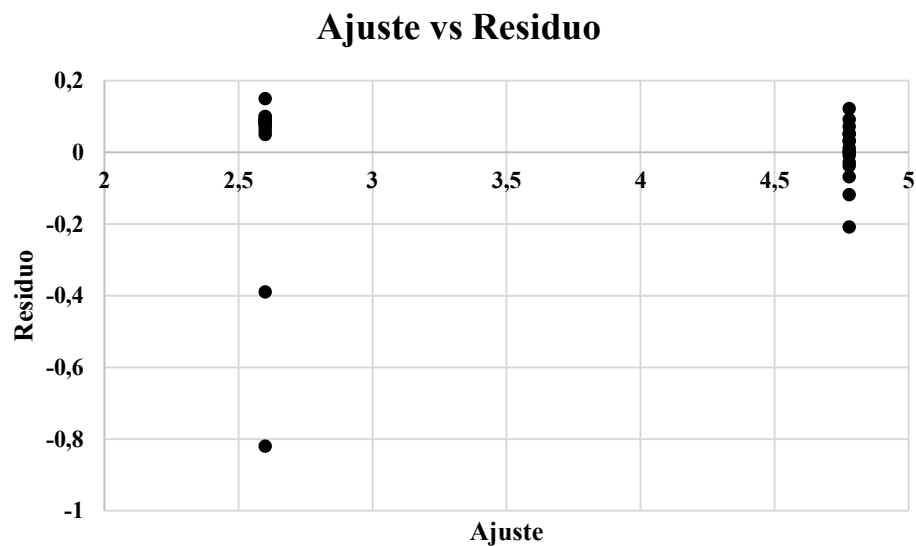


Figura 5.22: Ajuste vs Residuo velocidad de entrada.

En la Figura 5.22 se ve la representación del ajuste vs el residuo, buscando que la variabilidad del residuo sea aproximadamente constante alrededor de cero, lo cual se cumple en general, menos para un dato cuyo valor es -0,82, pero dicho valor se puede tomar como un dato atípico que no afecta con el modelo de regresión, pues el valor del coeficiente R^2 es de 0,91.

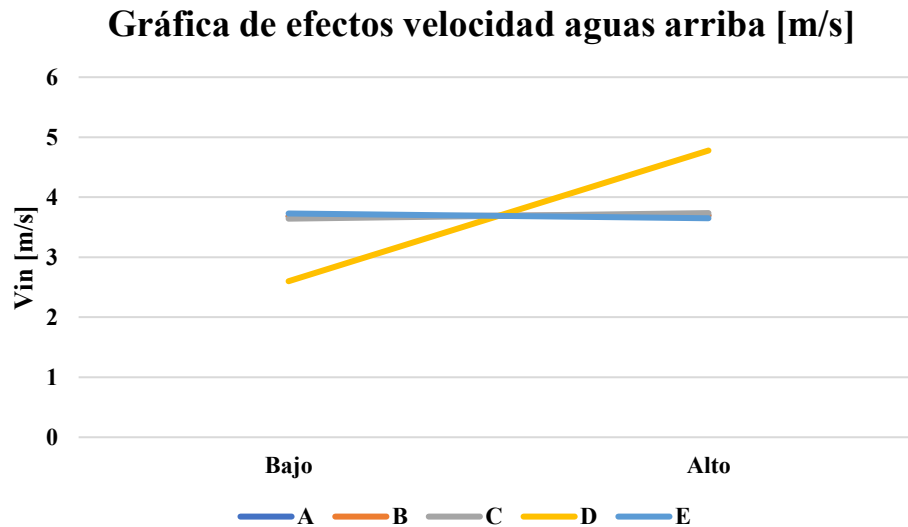


Figura 5.23: Grafica de efectos para la velocidad de entrada.

En la Figura 5.23 se puede ver como claramente el factor D es claramente el único que influye sustancialmente en la variable dependiente, pues A, B, C y E se pueden ver como constantes mostrando que su influencia es nula. El factor D es la velocidad que se pone como condición de borde y es el valor significativo, ya que la velocidad antes entrar en contacto con la turbina solo depende de esta condición.

En la Figura 5.24 se ven las gráficas de los factores que muestra que no existe una interacción significativa entre los factores pues las líneas que se aprecian son paralelas para todas las interacciones. Confirmando lo mostrado en la Figura 5.21 donde el factor D es el único que supera el ME.

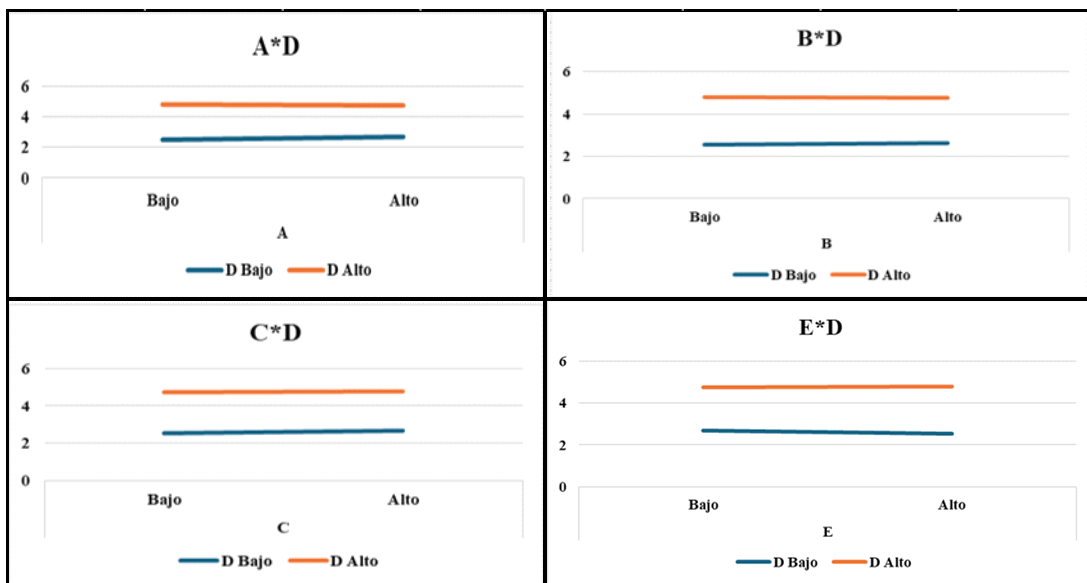


Figura 5.24: Gráfica de factores para la velocidad de entrada.

Con base a los resultados se obtiene la ecuación del modelo ANOVA sin filtrar (34), pues se tienen factores que no son significativos y es función de los niveles alto y bajo de cada factor (1 y -1 respectivamente), es decir es dependiente de dichos niveles como se ve en la ecuación (28).

$$v_{in} = 3,689 + 0,0316X_A + 0,0078X_B + 0,0465X_C + 1,089X_D - 0,0396X_E \quad \left[\frac{m}{s}\right] \quad (34)$$

En la ecuación (21) se presenta la ecuación del ajuste filtrado y solo depende del valor numérico real de los factores significativos, es decir por medio de la ecuación (29) se realizó el procedimiento para que el valor numérico del factor significativo sea independiente del nivel, para este caso el factor significativo es D que es la velocidad aguas arriba de la recámara.¹

$$v_{in} = 0,81D - 0,22 \quad \left[\frac{m}{s}\right] \quad (35)$$

Finalmente se obtiene la ecuación paramétrica de la velocidad de entra v_{in} con todas las variables estandarizadas Ec. (34), y la ecuación optimizada con una sola variable natural Ec. (35), la cual facilita el modelado del parámetro.

En la Figura 5.25 se puede ver el comportamiento del ANOVA y el Ajuste con respecto a la respuesta obtenida de las simulaciones CFD, logrando apreciar que ambos modelan adecuadamente el comportamiento de la respuesta y en la simulación 17 se puede ver una discrepancia que corresponde al dato que se consideró como un dato atípico, pues no afecta en la representación total del modelo.

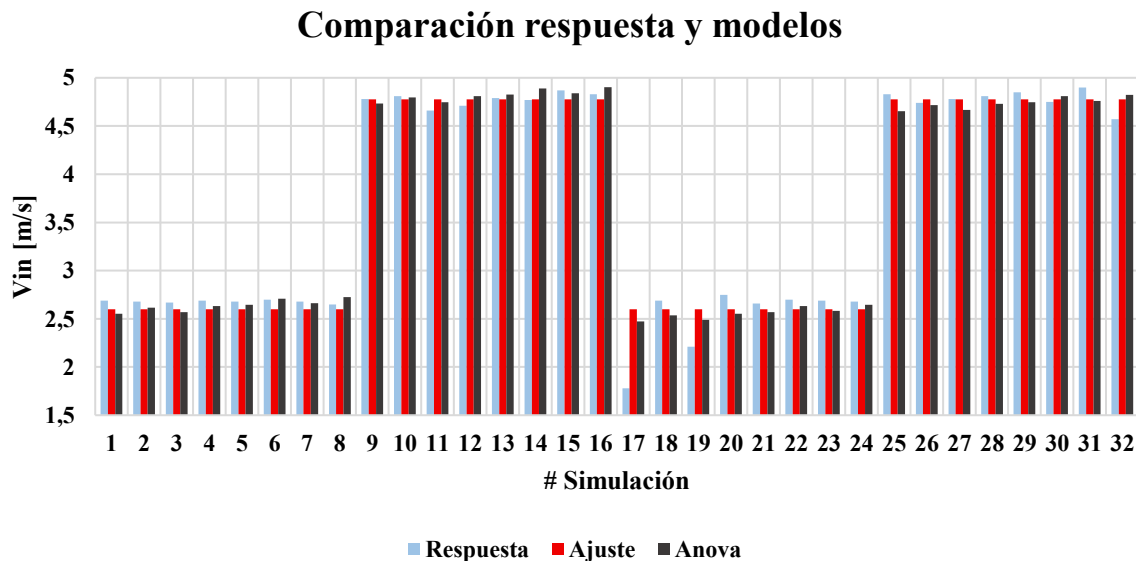


Figura 5.25: Comparación Respuesta, ANOVA sin filtrar y Ajuste filtrado.

¹ **Nota:** para las ecuaciones que son independientes del nivel se usaran las letras A, B, C, D, y E, para referenciarlas a el valor numérico independiente de cada factor, como indica en la Tabla 5-7. Además, se sigue la misma metodología para la obtención de las ecuaciones de las otras respuestas estudiadas.

5.4.2. Análisis de velocidad aguas abajo

Con base a los resultados de velocidad obtenidos aguas debajo de la turbina se realiza el análisis obteniendo en la Tabla 5-13 los resultados de los contrastes y efectos de los factores y combinaciones.

Tabla 5-13: Contrates y efectos en la velocidad aguas abajo.

COMBINACION	CONTRASTE	EFFECTOS
A	-0,31	-0,01963
B	-0,32	-0,01988
C	-7,37	-0,46050
D	2,95	0,18413
E	0,31	0,01925
AB	0,16	0,01025
AC	0,03	0,00163
BC	0,10	0,00638
AD	0,39	0,02450
BD	0,08	0,00475
CD	-2,27	-0,14213
AE	-0,05	-0,00313
BE	-0,21	-0,01338
CE	-0,31	-0,01950
DE	0,14	0,00863
ABC	-0,50	-0,03100
ABD	0,15	0,00963
ACD	-0,39	-0,02425
BCD	-0,14	-0,00900
ABE	0,32	0,01975
ACE	0,09	0,00563
BCE	0,17	0,01038
ADE	0,02	0,00100
BDE	-0,06	-0,00375
CDE	-0,16	-0,01013
ABCD	-0,35	-0,02163
ABCE	-0,38	-0,02400
ABDE	0,21	0,01313
ACDE	0,00	-0,00025
BCDE	0,00	-1,13E-17
ABCDE	-0,17	-0,01063

Después de realizar la probabilidad normal de los efectos se obtiene la Figura 5.26 donde se ve que hay tres puntos que no siguen la tendencia. Estos puntos corresponden a D, E y CD, lo que nos da a entender que son los posibles factores y combinación significativa para la velocidad de salida analizada.

PROBABILIDAD NORMAL DE LOS EFECTOS

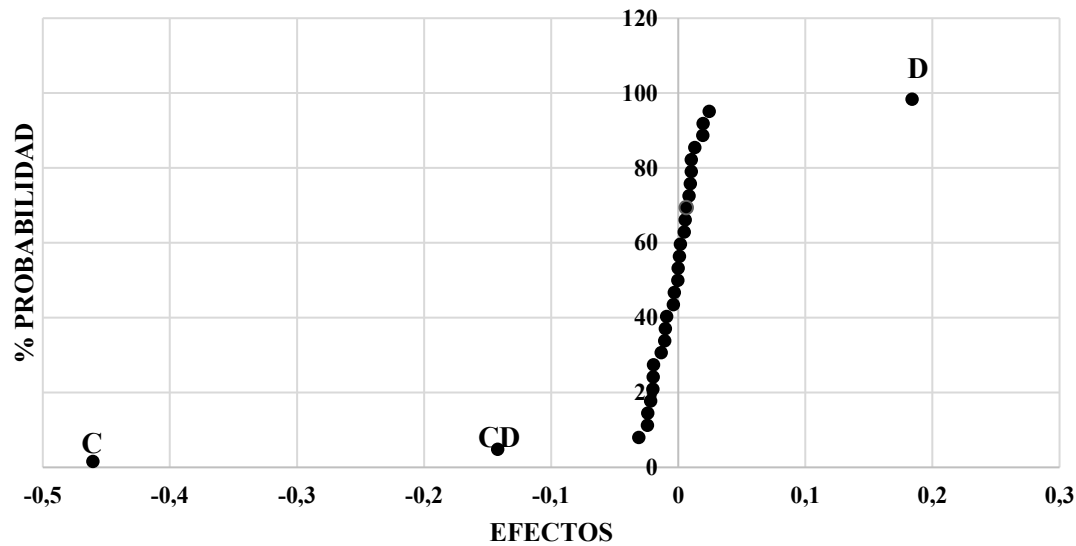


Figura 5.26: Probabilidad normal de los efectos para la velocidad en la salida.

Con base a esto se realiza el análisis ANOVA obteniendo la Tabla 5-14 donde para C, D, y CD son los únicos que tienen un p-value menor a 0,05 indicando que son los factores e interacción significativa en la Figura 5.27 se puede ver como estos son los únicos que superan el ME.

Tabla 5-14: Análisis factores e interacciones velocidad de salida.

FACTORES	SS	GL	MS	FC	FT	p-value	EFECTO STD	ME
C	1,696	1	1,696	809,170	5,591	1,71E-08	1,302	3,499
D	0,271	1	0,271	129,362	5,591	9,10E-06	0,521	3,499
AC	0,000	1	0,000	0,010	5,591	0,923	0,005	3,499
BC	0,000	1	0,000	0,155	5,591	0,705	0,018	3,499
AD	0,005	1	0,005	2,290	5,591	0,174	0,069	3,499
BD	0,000	1	0,000	0,086	5,591	0,778	0,013	3,499
CD	0,162	1	0,162	77,076	5,591	5,01E-05	0,402	3,499
CE	0,003	1	0,003	1,451	5,591	0,268	0,055	3,499
DE	0,001	1	0,001	0,284	5,591	0,611	0,024	3,499
ABC	0,008	1	0,008	3,667	5,591	0,097	0,088	3,499
ABD	0,001	1	0,001	0,353	5,591	0,571	0,027	3,499
ACD	0,005	1	0,005	2,244	5,591	0,178	0,069	3,499
BCD	0,001	1	0,001	0,309	5,591	0,596	0,025	3,499
ACE	0,000	1	0,000	0,121	5,591	0,738	0,016	3,499
BCE	0,001	1	0,001	0,411	5,591	0,542	0,029	3,499
ADE	0,000	1	0,000	0,004	5,591	0,952	0,003	3,499
BDE	0,000	1	0,000	0,054	5,591	0,823	0,011	3,499

CDE	0,001	1	0,001	0,391	5,591	0,552	0,029	3,499
ABCD	0,004	1	0,004	1,784	5,591	0,223	0,061	3,499
ABCE	0,005	1	0,005	2,198	5,591	0,182	0,068	3,499
ABDE	0,001	1	0,001	0,657	5,591	0,444	0,037	3,499
ACDE	5,00E-07	1	5,00E-07	2,38E-04	5,591	0,988	0,001	3,499
BCDE	1,02E-33	1	1,02E-33	4,85E-31	5,591	1,000	0,000	3,499
ABCDE	0,001	1	0,001	0,431	5,591	0,533	0,030	3,499
ERROR	0,015	7	0,002					
TOTAL	2,179	31	0,070					

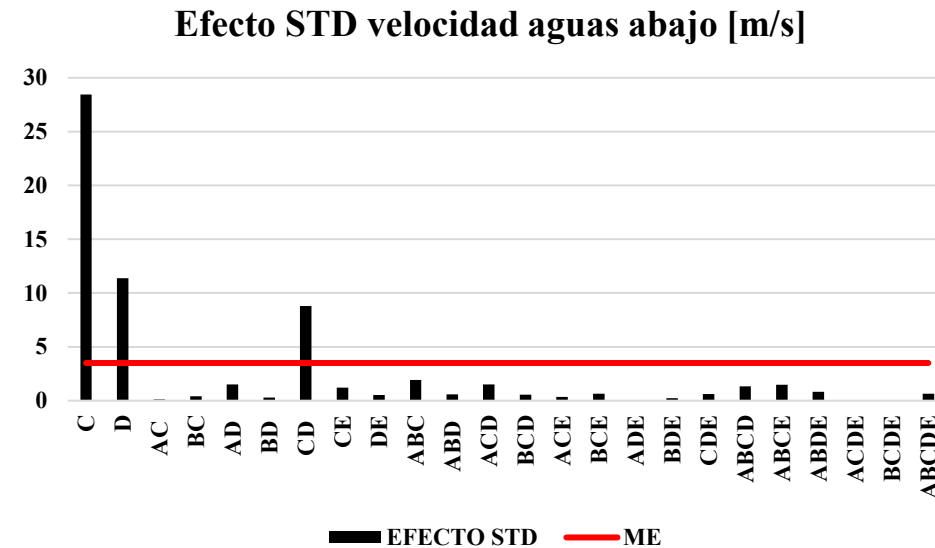


Figura 5.27: Diagrama de Pareto para la velocidad de salida.

El análisis ANOVA presenta un R^2 de 0,99 y s de 0,042. Confirmando que D, C y CD son los únicos factores significativos. Con los que se realiza el ajuste como se ve en la Tabla 5-15. Para dicho ajuste se obtiene un R^2 de 0,96.

Tabla 5-15: Regresión DOE-ANOVA para la velocidad aguas abajo.

RESPUESTA	AJUSTE	RESIDUO	Hii	Residuo Std	Press
0,40	0,375	0,025	0,250	0,627	1,111E-03
0,35	0,375	-0,025	0,250	-0,627	1,111E-03
0,39	0,375	0,015	0,250	0,376	4,000E-04
0,32	0,375	-0,055	0,250	-1,379	5,378E-03
0,07	0,057	0,013	0,250	0,335	3,180E-04
0,05	0,057	-0,005	0,250	-0,116	3,803E-05
0,06	0,057	0,005	0,250	0,135	5,136E-05
0,04	0,057	-0,017	0,250	-0,417	4,914E-04
0,65	0,701	-0,051	0,250	-1,285	4,669E-03
0,68	0,701	-0,021	0,250	-0,533	8,028E-04
0,66	0,701	-0,041	0,250	-1,035	3,025E-03

0,70	0,701	-0,001	0,250	-0,031	2,778E-06
0,10	0,099	0,001	0,250	0,034	3,361E-06
0,11	0,099	0,011	0,250	0,285	2,300E-04
0,12	0,099	0,021	0,250	0,536	8,123E-04
0,07	0,099	-0,031	0,250	-0,768	1,667E-03
0,47	0,375	0,095	0,250	2,383	1,604E-02
0,36	0,375	-0,015	0,250	-0,376	4,000E-04
0,38	0,375	0,005	0,250	0,125	4,444E-05
0,33	0,375	-0,045	0,250	-1,129	3,600E-03
0,06	0,057	0,005	0,250	0,135	5,136E-05
0,06	0,057	0,004	0,250	0,110	3,403E-05
0,07	0,057	0,012	0,250	0,310	2,723E-04
0,04	0,057	-0,020	0,250	-0,492	6,847E-04
0,81	0,701	0,109	0,250	2,727	2,103E-02
0,69	0,701	-0,011	0,250	-0,282	2,250E-04
0,63	0,701	-0,071	0,250	-1,787	9,025E-03
0,79	0,701	0,089	0,250	2,226	1,400E-02
0,10	0,099	0,001	0,250	0,034	3,361E-06
0,12	0,099	0,021	0,250	0,536	8,123E-04
0,11	0,099	0,011	0,250	0,285	2,300E-04
0,06	0,099	-0,038	0,250	-0,944	2,517E-03

En la Figura 5.28 se puede ver el ajuste vs residuo donde no se presenta una variabilidad regular, pues los residuos se encuentran distribuidos aleatoriamente alrededor de cero, sin patrones evidentes y con varianza constante. Por lo anterior el modelo se puede tomar como estadísticamente valido y aunque algunos valores se ven altos, se pueden considerar aceptables.

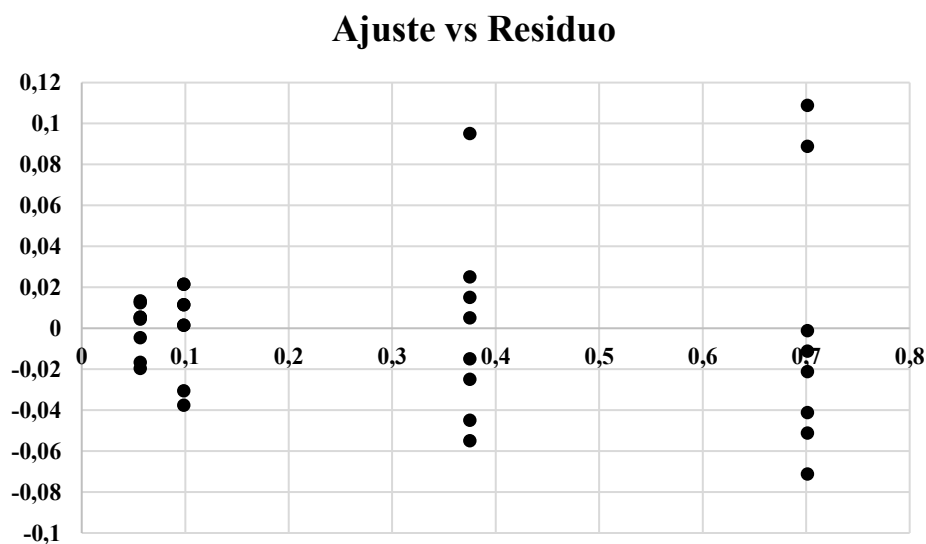


Figura 5.28: Ajuste vs Residuo velocidad de salida.

Gráfica de efectos velocidad aguas abajo

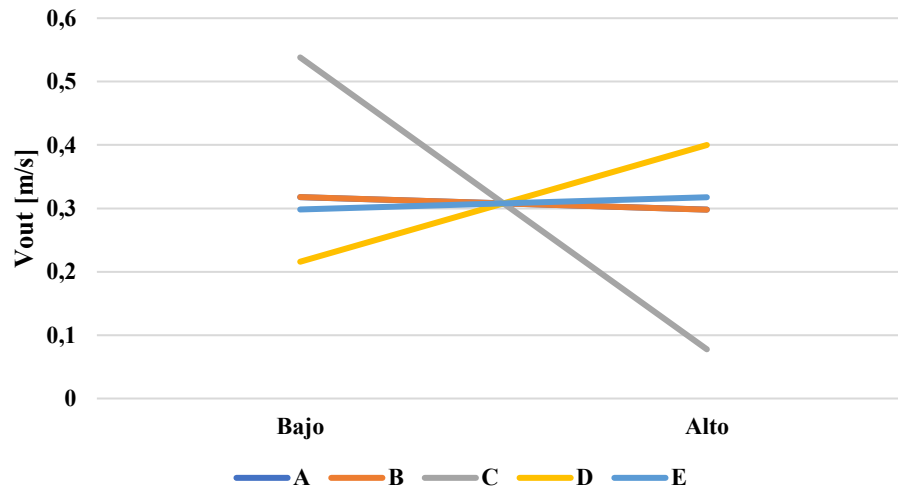


Figura 5.29: Gráfica de efectos para la velocidad aguas abajo.

En la Figura 5.29 se pueden ver los efectos de cada factor y como el factor C es el más significativo pues reduce considerablemente la respuesta al pasar de un nivel bajo a alto y también que el factor D influye en la respuesta, mientras que los otros factores no presentan una significancia considerable en comparación con los anteriores.

El factor C es el ángulo de salida de la recámara, por lo que al estar en el nivel alto (10°), el área transversal va aumentando, disminuyendo la velocidad del flujo, conservando así el caudal masico en esta parte de la recámara. La velocidad de entrada D influye directamente, pues es el factor que condiciona la velocidad inicial del flujo.

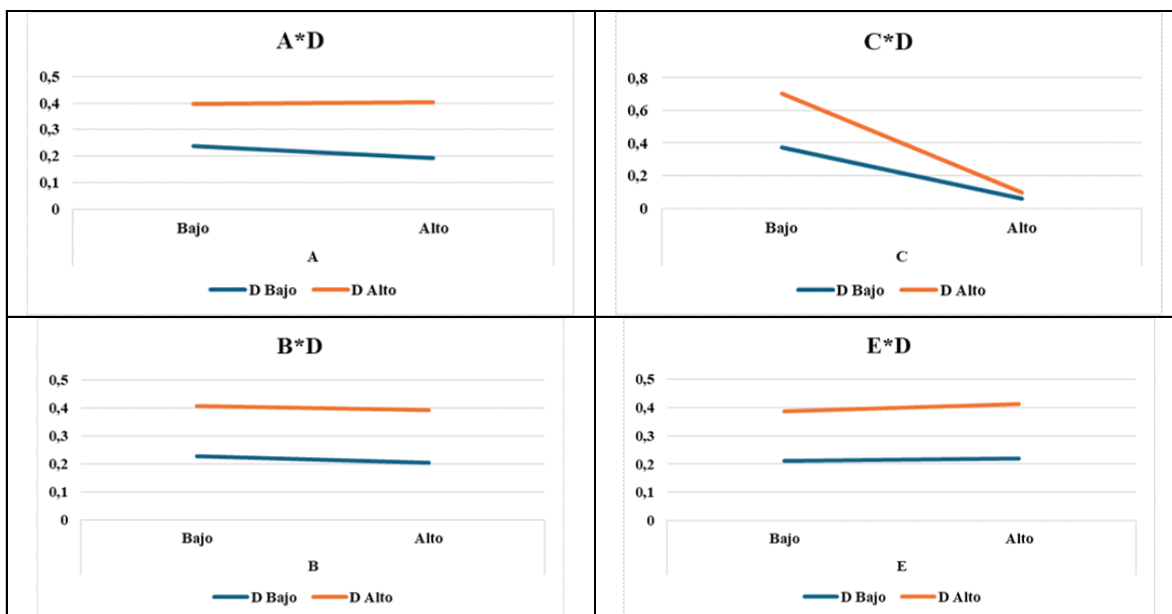


Figura 5.30: Gráficas de factores velocidad aguas abajo.

En la Figura 5.30 se puede ver como interactúan los factores notando como C y D son los únicos factores que interactúan entre sí, evidenciando que el factor C es más fuerte cuando D está en un nivel alto.

$$v_{out} = 0,308 - 0,0098X_A - 0,0099X_B - 0,2303X_C + 0,0921X_D - 0,0096X_E \left[\frac{m}{s} \right] \quad (36)$$

$$v_{out} = 0,00424C + 0,1208D - 0,0105CD - 0,0447 \left[\frac{m}{s} \right] \quad (37)$$

Se obtienen la ecuación del modelo ANOVA sin filtrar (36) y la ecuación del ajuste filtrado en función del ángulo de salida (C) y la velocidad aguas arriba de la recámara (D) (37).

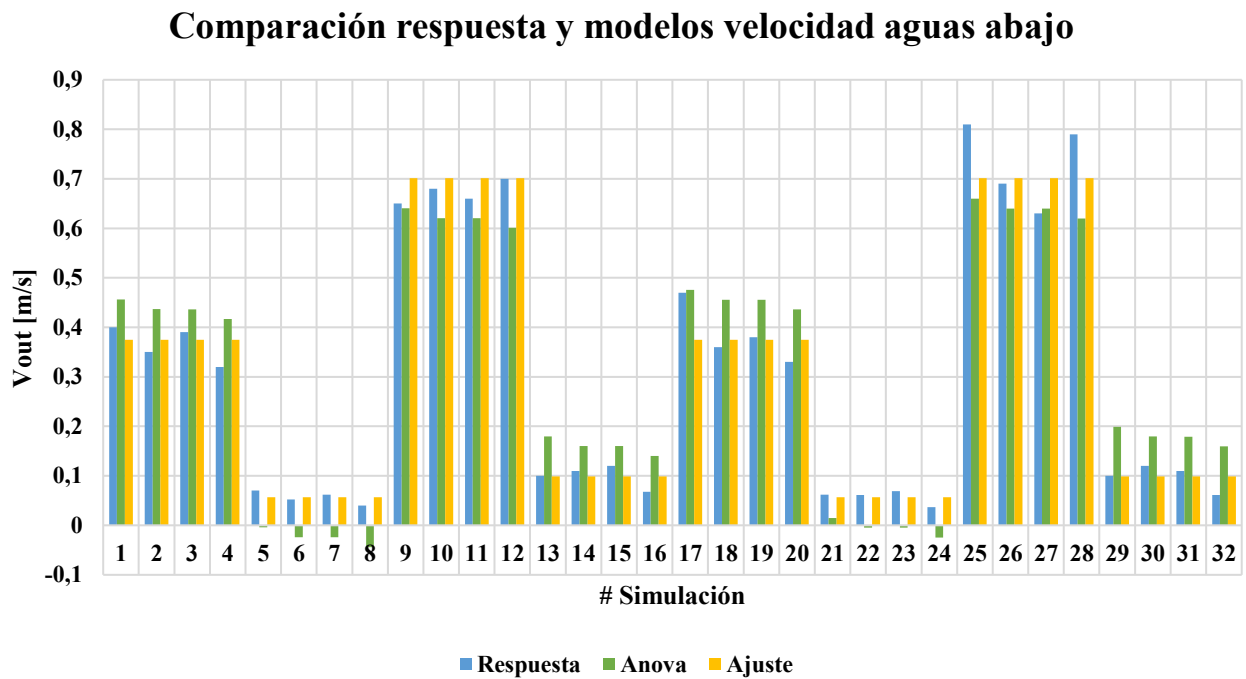


Figura 5.31: Comparación respuesta, ANOVA sin filtrar y Ajuste filtrado para la velocidad aguas abajo.

Se puede apreciar en la Figura 5.31 el comportamiento de la respuesta, el ANOVA sin filtrar y el ajuste filtrado logrando apreciar como estos modelos describen de una forma aceptable el comportamiento de la velocidad en la salida de la recámara. Sin embargo, se identifican ligeras discrepancias en los valores extremos, donde el modelo tiende a subestimar los picos observados en los resultados de las simulaciones, pero se considera el modelo adecuado para la predicción.

5.4.3. Análisis del torque

En la Tabla 5-16 se aprecian los resultados de los contrastes y efectos de los factores y combinaciones que se obtuvieron para realizar el análisis del torque.

Tabla 5-16: Contraste y efectos del torque.

COMBINACION	CONTRASTE	EFFECTOS
A	-7384,75	-461,55
B	1495,71	93,48
C	13853,05	865,82
D	61701,21	3856,33
E	-6509,95	-406,87
AB	20484,35	1280,27
AC	6857,01	428,56
BC	2487,71	155,48
AD	2216,85	138,55
BD	-2164,53	-135,28
CD	-909,67	-56,85
AE	-9443,03	-590,19
BE	-8915,61	-557,23
CE	-7776,07	-486,00
DE	-224,83	-14,05
ABC	8533,51	533,34
ABD	13872,15	867,01
ACD	740,97	46,31
BCD	-10730,25	-670,64
ABE	-106,77	-6,67
ACE	2362,33	147,65
BCE	5214,47	325,90
ADE	-675,47	-42,22
BDE	8048,11	503,01
CDE	8958,93	559,93
ABCD	17735,99	1108,50
ABCE	-2738,97	-171,19
ABDE	-4143,65	-258,98
ACDE	643,21	40,20
BCDE	8746,47	546,65
ABCDE	3898,43	243,65

Con base a los resultados mostrados en la Tabla 5-16 se realiza la probabilidad normal de los efectos como se ve en la Figura 5.32. donde se puede saber que C, D, AB, ABD y ABCD tienden a ser los factores significativos, pero D tiene una mayor significancia, pues es el que se encuentra por completo fuera de la tendencia. Se realiza el análisis de factores y se encuentra que solo D y AB tienen un p-value menor que 0,05, además el análisis ANOVA presenta un R^2 de 0,96 y s de 1284,06.

PROBABILIDAD NORMAL DE LOS EFECTOS

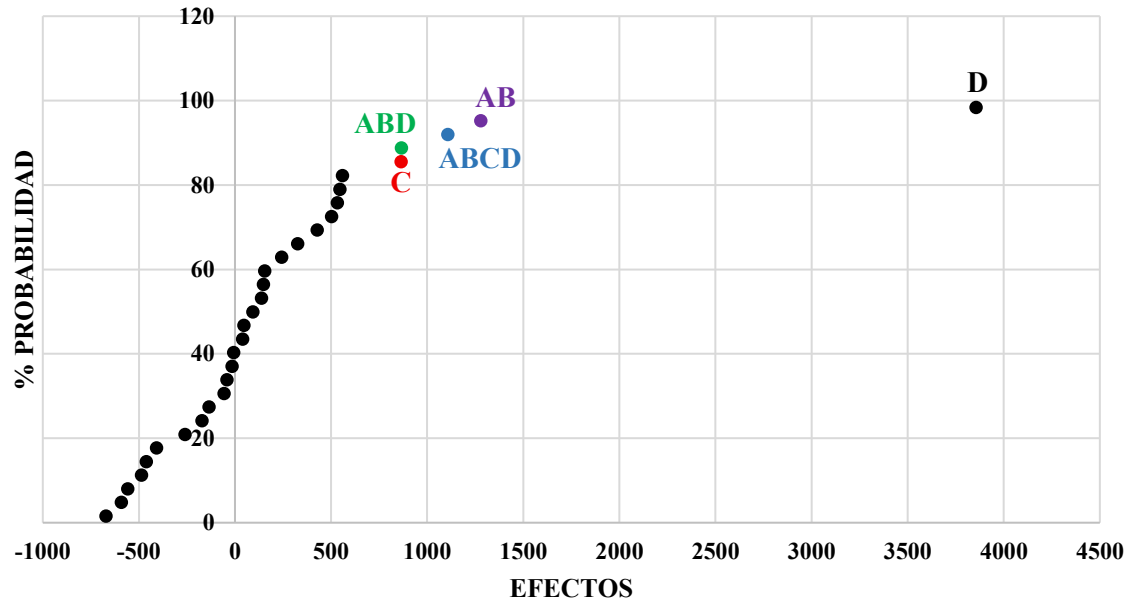


Figura 5.32: Probabilidad normal de los efectos para el torque.

Tabla 5-17: Análisis factores e interacciones para el torque.

FACTORES	SS	GL	MS	FC	FT	p-value	EFECTO STD	ME
A	1704204,143	1	1704204,143	1,034	7,709	0,367	1,017	4,604
B	69910,888	1	69910,888	0,042	7,709	0,847	0,206	4,604
AB	13112768,591	1	13112768,591	7,953	7,709	0,048	2,820	4,604
C	5997093,572	1	5997093,572	3,637	7,709	0,129	1,907	4,604
D	118969978,608	1	118969978,608	72,154	7,709	0,001	8,494	4,604
AC	1469330,817	1	1469330,817	0,891	7,709	0,399	0,944	4,604
BC	193396,908	1	193396,908	0,117	7,709	0,749	0,342	4,604
AD	153575,748	1	153575,748	0,093	7,709	0,775	0,305	4,604
BD	146412,191	1	146412,191	0,089	7,709	0,781	0,298	4,604
CD	25859,360	1	25859,360	0,016	7,709	0,906	0,125	4,604
CE	1889602,020	1	1889602,020	1,146	7,709	0,345	1,071	4,604
DE	1579,642	1	1579,642	0,001	7,709	0,977	0,031	4,604
ABC	2275649,779	1	2275649,779	1,380	7,709	0,305	1,175	4,604
ABD	6013642,051	1	6013642,051	3,647	7,709	0,129	1,910	4,604
ACD	17157,392	1	17157,392	0,010	7,709	0,924	0,102	4,604
BCD	3598070,783	1	3598070,783	2,182	7,709	0,214	1,477	4,604
ACE	174393,845	1	174393,845	0,106	7,709	0,761	0,325	4,604
BCE	849709,293	1	849709,293	0,515	7,709	0,513	0,718	4,604
ADE	14258,116	1	14258,116	0,009	7,709	0,930	0,093	4,604
BDE	2024127,330	1	2024127,330	1,228	7,709	0,330	1,108	4,604
CDE	2508200,836	1	2508200,836	1,521	7,709	0,285	1,233	4,604

ABCD	9830166,915	1	9830166,915	5,962	7,709	0,071	2,442	4,604
ABCE	234436,146	1	234436,146	0,142	7,709	0,725	0,377	4,604
ABDE	536557,354	1	536557,354	0,325	7,709	0,599	0,570	4,604
ACDE	12928,722	1	12928,722	0,008	7,709	0,934	0,089	4,604
BCDE	2390648,046	1	2390648,046	1,450	7,709	0,295	1,204	4,604
ABCDE	474929,890	1	474929,890	0,288	7,709	0,620	0,537	4,604
ERROR	6595305,190	4	1648826,298					
TOTAL	181283894,173	31	5847867,554					

Teniendo en cuenta los resultados de la tabla anterior se realiza el diagrama de Pareto como se ve en la Figura 5.33 donde nos indica que solo D es el valor significativo, pero al hacer la regresión solo con ese valor, entonces se tiene en cuenta los factores e interacciones que se consideran significativas a partir de la probabilidad normal de los efectos, pues al considerar solo D como factor, el modelo no es válido ya que solo tiene un R^2 de 0,4. Por otro lado, si se consideran los otros factores e interacciones tiene un R^2 de 0,94.

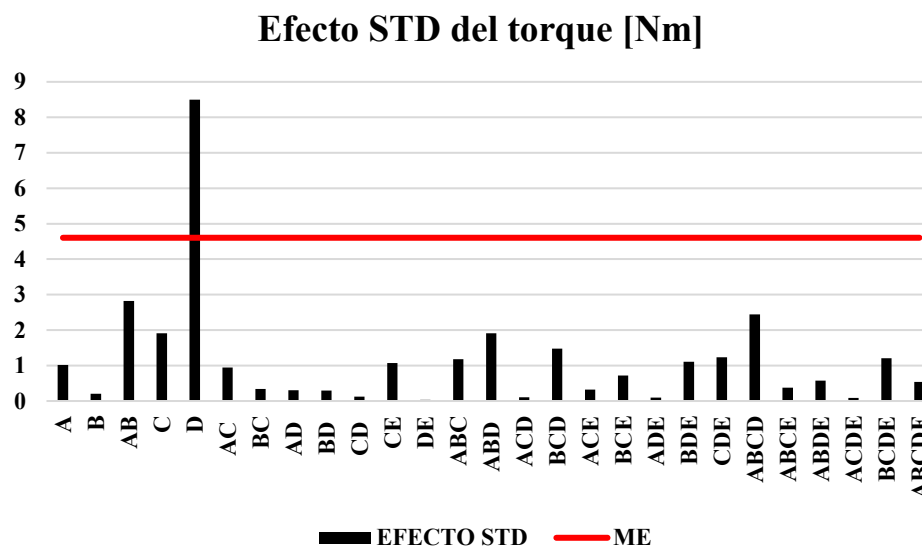


Figura 5.33: Diagrama de Pareto para el torque.

Tabla 5-18: Regresión DOE-ANOVA para el torque.

RESPUESTA	AJUSTE	RESIDUO	Hii	Residuo Std	Press
1752,84	2419,41	-666,57	0,03125	-0,007	473437,217
1104,63	448,64	655,99	0,03125	0,007	458539,549
1673,69	1662,54	11,15	0,03125	0,000	132,428
1668,03	1668,61	-0,58	0,03125	0,000	0,355
2239,45	2930,39	-690,94	0,03125	-0,008	508691,051
2461,49	2874,43	-412,94	0,03125	-0,004	181700,338
4574,68	4324,27	250,41	0,03125	0,003	66815,913
4798,00	3944,53	853,47	0,03125	0,009	776163,274

5747,48	6540,49	-793,01	0,03125	-0,009	670086,947
4926,31	5237,18	-310,87	0,03125	-0,003	102977,224
6304,06	6331,31	-27,25	0,03125	0,000	790,952
7170,00	6038,88	1131,13	0,03125	0,012	1363319,892
9152,58	9283,55	-130,97	0,03125	-0,001	18278,517
5766,71	5646,31	120,40	0,03125	0,001	15446,962
3794,97	4108,56	-313,59	0,03125	-0,003	104783,361
8373,72	8049,56	324,16	0,03125	0,004	111967,090
4568,00	3901,43	666,57	0,03125	0,007	473437,217
1274,67	1930,66	-655,99	0,03125	-0,007	458539,549
1475,60	1486,75	-11,15	0,03125	0,000	132,428
1493,39	1492,81	0,58	0,03125	0,000	0,355
2359,67	1668,73	690,94	0,03125	0,008	508691,051
2025,72	1612,78	412,94	0,03125	0,004	181700,338
2458,00	2708,41	-250,41	0,03125	-0,003	66815,913
1475,20	2328,67	-853,47	0,03125	-0,009	776163,274
6661,54	5868,53	793,01	0,03125	0,009	670086,947
4876,10	4565,23	310,87	0,03125	0,003	102977,224
6040,80	6013,56	27,25	0,03125	0,000	790,952
4590,00	5721,13	-1131,13	0,03125	-0,012	1363319,892
8238,62	8107,65	130,97	0,03125	0,001	18278,517
4350,00	4470,40	-120,40	0,03125	-0,001	15446,962
4904,06	4590,47	313,59	0,03125	0,003	104783,361
8207,32	8531,48	-324,16	0,03125	-0,004	111967,090

En la Tabla 5-18 se puede ver la regresión que se obtuvo para el valor del torque y en la Figura 5.34 se presenta el ajuste vs residuo donde se puede ver que el comportamiento muestra que los errores se centran alrededor de cero, lo cual es positivo, pero existe una variabilidad creciente a medida que aumentan los valores ajustados, sugiriendo heterocedasticidad. Además, se identifican posibles outliers que podrían estar afectando la calidad del ajuste. Pero es posible considerar que el modelo describe el comportamiento general.

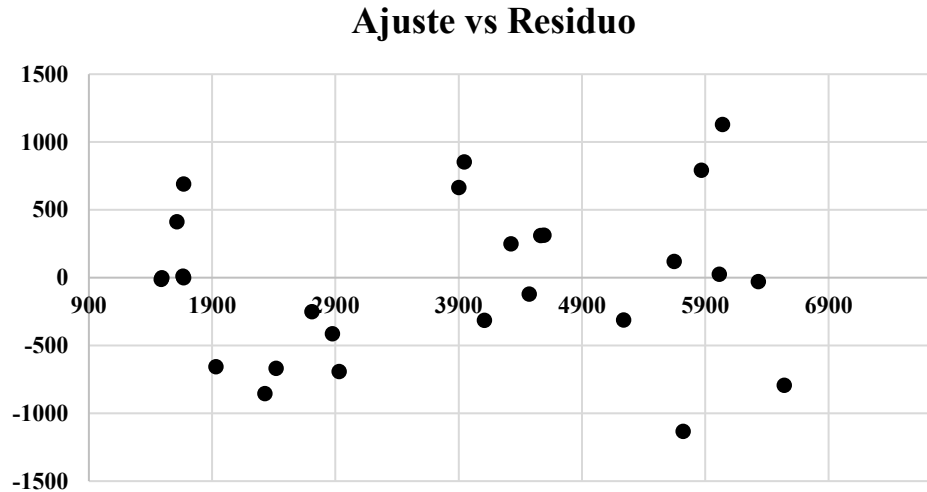


Figura 5.34: Ajuste vs Residuo para el torque.

Dado que los resultados provienen de simulaciones, las diferencias en los residuos se atribuyen a las simplificaciones del modelo matemático y no a errores experimentales. Aun con estas desviaciones, el modelo reproduce adecuadamente las tendencias generales del sistema.

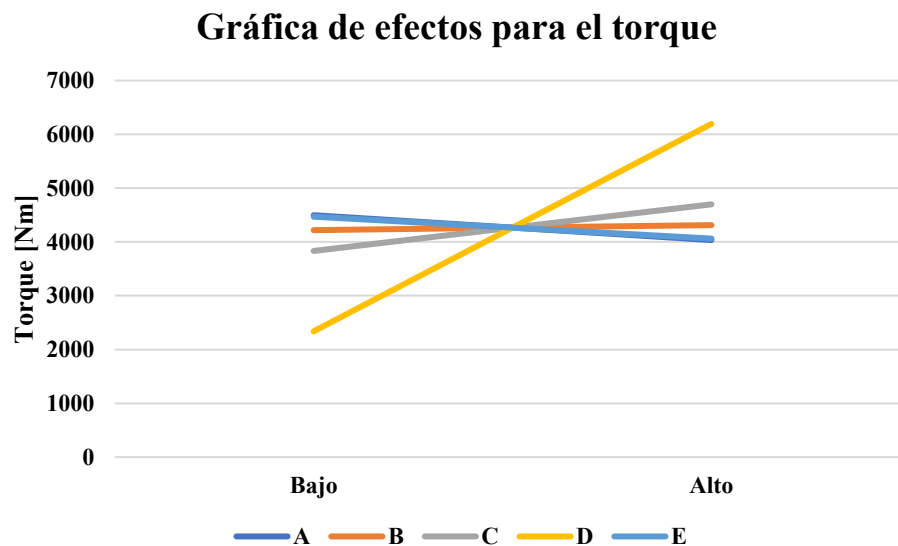


Figura 5.35: Gráfica de efectos para el torque.

En la Figura 5.35 que muestra los efectos principales evidencia que el factor D es el único con influencia significativa sobre el torque, mostrando un incremento marcado al pasar de su nivel bajo a alto. Los factores A, B, C y E presentan efectos marginales, con variaciones que se consideran mínimas en comparación con la del efecto D, las cuales no modifican de manera sustancial la respuesta. Esto confirma que el diseño está dominado por el comportamiento del factor D, el cual debe considerarse como variable crítica en la optimización del torque, ya que cuando la velocidad del flujo es mayor, el torque también lo es, por eso se ve como aumenta cuando la velocidad está en el nivel alto.

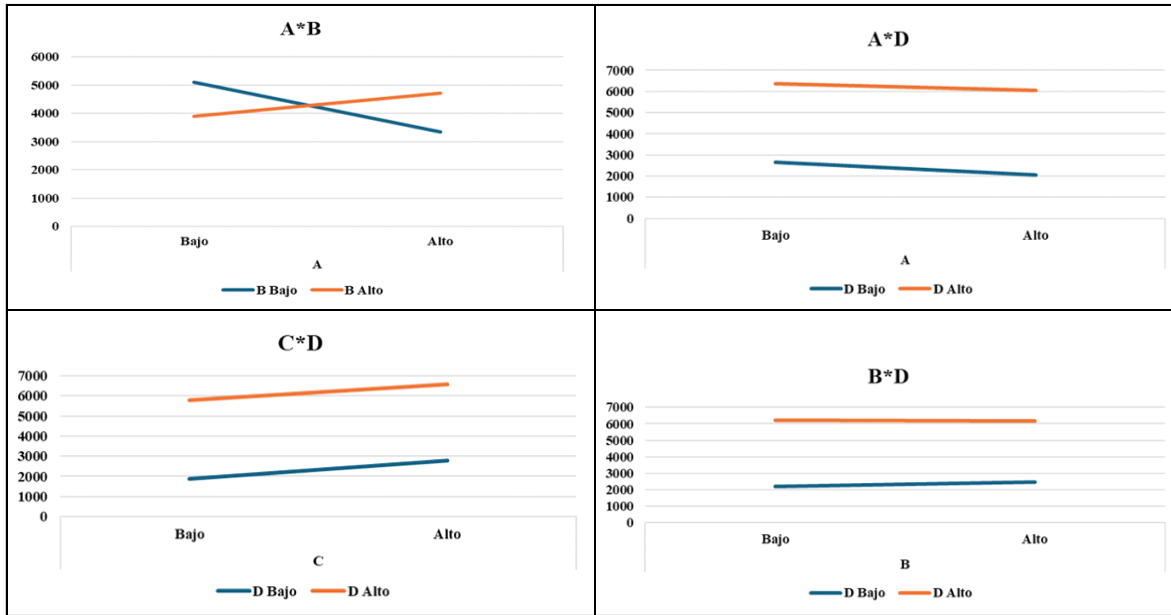


Figura 5.36: Gráfica de factores para el torque.

En la Figura 5.36 se ven la interacción de los factores donde solo A y B presentan interacción significativa tal como se vio con el p-value en la Tabla 5-17. Mostrando que con ambos factores en el nivel bajo se obtiene mayor torque, incluso con ambos en nivel alto se obtiene un torque alto, pero una combinación cruzada (Bajo-Alto o Alto-Bajo) no es recomendada.

Se obtienen la ecuación del modelo ANOVA sin filtrar (38) y la ecuación del ajuste filtrado para estimar el torque(39).

$$T = 4265,85 - 230,77X_A + 46,74X_B + 432,91X_C + 1928,16X_D - 203,44X_E \quad [Nm] \quad (38)$$

$$\begin{aligned} T = & -4845475,924 - 1279,918A + 967244,657B + 336726,901C + 872411,630D \\ & + 4851,472E + 269,084AB + 468,612AC + 130,642AD - 27196,264BC \\ & - 169279,357BD - 969,547BE - 35503,043CD - 345,567CE \\ & - 870,711DE - 114,968ABC - 29,814ABD - 108,338ACD - 597,084BCD \\ & + 29,628BCE + 169,363BDE + 37,706CDE + 27,370ABCD \end{aligned} \quad (39)$$

En la Figura 5.37 se puede ver la comparación entre los dos modelos y la respuesta para el torque. La comparación muestra que ambos modelos tienen la capacidad para describir de manera adecuada el comportamiento del torque, validando la utilidad de los análisis estadísticos aplicados. Sin embargo, el modelo de regresión muestra un mejor ajuste en los puntos críticos, esto se da ya que el modelo de regresión presenta las combinaciones de los factores, lo que lo convierte en una herramienta más confiable para la predicción.

Comparación respuesta y modelos

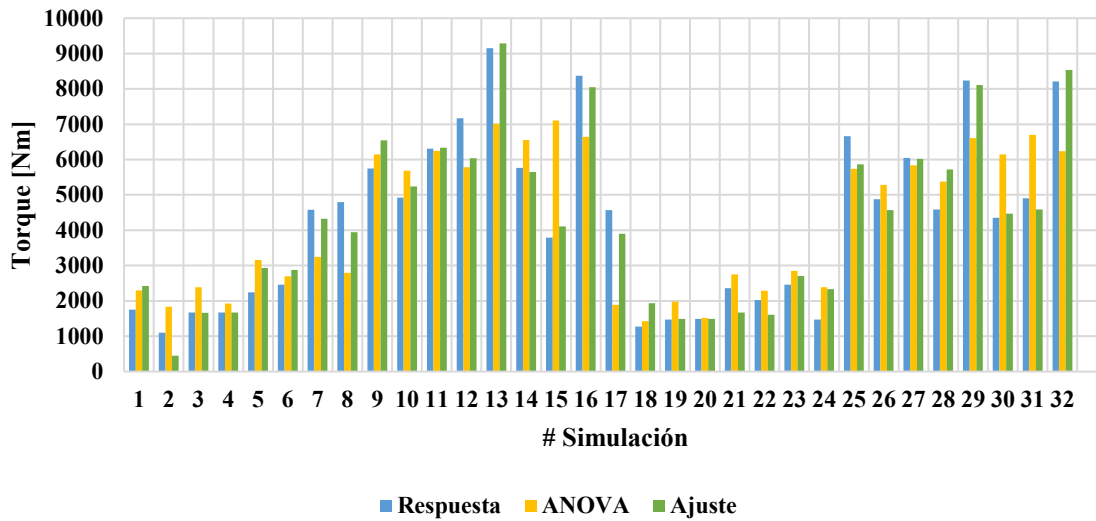


Figura 5.37: Comparación respuesta, ANOVA sin filtrar y Ajuste para el torque filtrado.

5.4.4. Análisis de la presión en los álabes guías

Otro de los resultados a analizar es la presión de los álabes guías en la Tabla 5-19 se pueden ver los contrastes y efectos para la presión de los álabes guías.

Tabla 5-19: Contrastes y efectos para la presión en los álabes guías.

COMBINACIÓN	CONTRASTES	EFFECTOS
A	11145	696,5625
B	3483	217,6875
C	9637	602,3125
D	27489	1718,0625
E	-939	-58,6875
AB	11767	735,4375
AC	-3715	-232,1875
BC	6299	393,6875
AD	8245	515,3125
BD	4011	250,6875
CD	6929	433,0625
AE	-219	-13,6875
BE	99	6,1875
CE	577	36,0625
DE	-971	-60,6875
ABC	9383	586,4375
ABD	10819	676,1875
ACD	-859	-53,6875

BCD	7327	457,9375
ABE	-3025	-189,0625
ACE	9	0,5625
BCE	67	4,1875
ADE	737	46,0625
BDE	939	58,6875
CDE	77	4,8125
ABCD	9447	590,4375
ABCE	-217	-13,5625
ABDE	-3549	-221,8125
ACDE	721	45,0625
BCDE	2607	162,9375
ABCDE	-2529	-158,0625

Con base a los resultados obtenidos para la presión en los álabes guías se realiza la gráfica de la probabilidad normal de los efectos, obteniendo lo mostrado en la Figura 5.38 donde se ve que la mayoría de las interacciones y factores siguen la tendencia, exceptuando el factor D, dicho factor se encuentra alejado de la tendencia por lo que se puede concluir que es un factor con alta significancia en la respuesta.

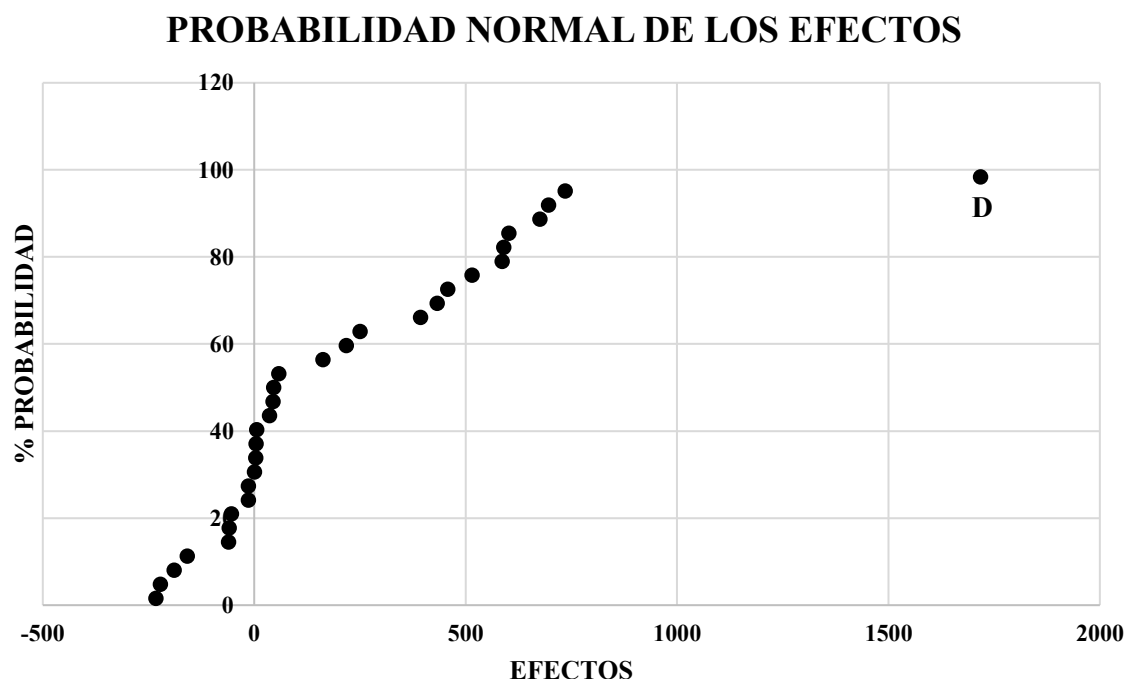


Figura 5.38: Probabilidad normal de los efectos para la presión en los álabes guías.

Sabiendo que el factor D es significativo, se realiza el análisis ANOVA, obteniendo los resultados que se ven en la Tabla 5-20, donde A, C, D AB, BC, AD, CD, ABC, ABD, BCD y ABCD son los factores e interacciones significativos, pues tienen un p-value menor a 0,05. Además, el R^2 es de 0,94 y el s es de 325,85.

Tabla 5-20: Análisis de factores e interacciones para la presión en los álabes guías.

FACTORES	SS	GL	MS	FC	FT	p-value	EFFECTO STD	ME
A	3881594,53	1	3881594,53	36,558	4,494	1,70E-05	6,05	2,92
B	379102,78	1	379102,78	3,571	4,494	7,71E-02	1,89	2,92
C	2902242,78	1	2902242,78	27,334	4,494	8,28E-05	5,23	2,92
D	23613910,03	1	23613910,03	222,403	4,494	8,34E-11	14,91	2,92
E	27553,78	1	27553,78	0,260	4,494	6,17E-01	0,51	2,92
AB	4326946,53	1	4326946,53	40,752	4,494	9,06E-06	6,38	2,92
AC	431288,28	1	431288,28	4,062	4,494	6,10E-02	2,02	2,92
BC	1239918,78	1	1239918,78	11,678	4,494	3,53E-03	3,42	2,92
AD	2124375,78	1	2124375,78	20,008	4,494	3,84E-04	4,47	2,92
CD	1500345,03	1	1500345,03	14,131	4,494	1,71E-03	3,76	2,92
ABC	2751271,53	1	2751271,53	25,912	4,494	1,09E-04	5,09	2,92
ABD	3657836,28	1	3657836,28	34,451	4,494	2,37E-05	5,87	2,92
ACD	23058,78	1	23058,78	0,217	4,494	6,47E-01	0,47	2,92
BCD	1677654,03	1	1677654,03	15,801	4,494	1,09E-03	3,98	2,92
ABCD	2788931,53	1	2788931,53	26,267	4,494	1,02E-04	5,13	2,92
ERROR	1698821,50	16	106176,34					
TOTAL	53024851,97	31	1710479,10					

La Figura 5.39 muestra el diagrama de Pareto el cual confirma que los efectos e interacciones mencionadas anteriormente son significativas. Con esto en mente se realiza la regresión, obteniendo los resultados que se muestran en la Tabla 5-21, con R^2 de 0.96.

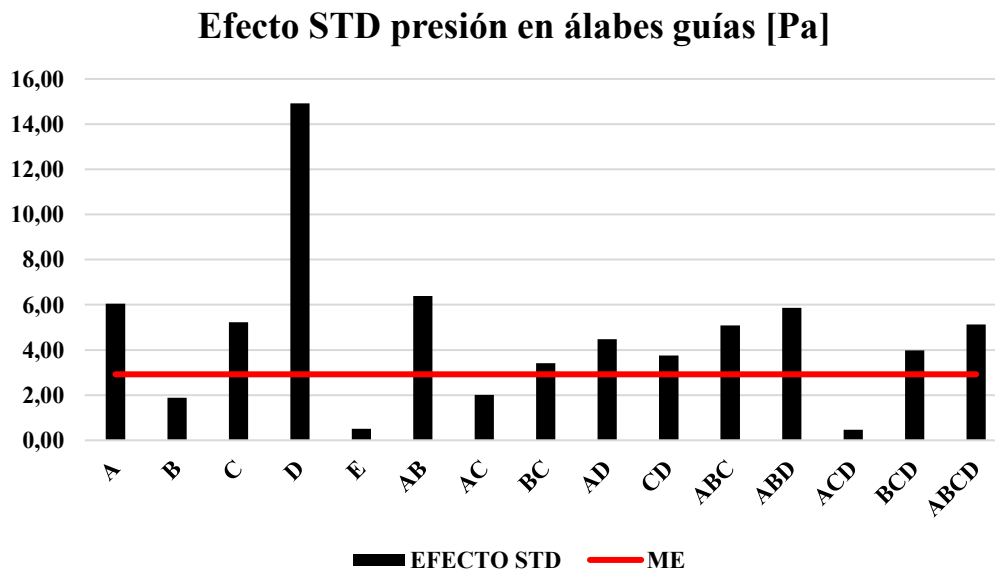


Figura 5.39: Diagrama de Pareto para la presión en los álabes guías.

Tabla 5-21: Regresión DOE-ANOVA para la presión en los alanes guías.

RESPUESTA	AJUSTE	RESIDUO	Hii	Residuo Std	Press
600	388,00	212,00	0,0625	1,80E-03	51136,28
800	684,50	115,50	0,0625	9,79E-04	15178,24
350	606,69	-256,69	0,0625	-2,18E-03	74966,44
900	1029,69	-129,69	0,0625	-1,10E-03	19136,11
629	796,00	-167,00	0,0625	-1,42E-03	31731,48
858	743,50	114,50	0,0625	9,71E-04	14916,55
865	894,19	-29,19	0,0625	-2,47E-04	969,28
850	952,19	-102,19	0,0625	-8,66E-04	11881,00
1635	1647,69	-12,69	0,0625	-1,08E-04	183,15
2672	2910,69	-238,69	0,0625	-2,02E-03	64821,16
880	779,00	101,00	0,0625	8,56E-04	11606,47
2865	2511,50	353,50	0,0625	3,00E-03	142179,27
3625	3294,19	330,81	0,0625	2,80E-03	124514,88
1302	1631,69	-329,69	0,0625	-2,79E-03	123669,44
1542	1775,00	-233,00	0,0625	-1,98E-03	61768,82
5561	5289,50	271,50	0,0625	2,30E-03	83868,16
368	329,31	38,69	0,0625	3,28E-04	1702,94
761	625,81	135,19	0,0625	1,15E-03	20793,64
554	548,00	6,00	0,0625	5,09E-05	40,96
850	971,00	-121,00	0,0625	-1,03E-03	16658,20
1155	737,31	417,69	0,0625	3,54E-03	198499,95
821	684,81	136,19	0,0625	1,15E-03	21102,40
614	835,50	-221,50	0,0625	-1,88E-03	55821,94
745	893,50	-148,50	0,0625	-1,26E-03	25090,56
1351	1589,00	-238,00	0,0625	-2,02E-03	64448,28
2840	2852,00	-12,00	0,0625	-1,02E-04	163,84
870	720,31	149,69	0,0625	1,27E-03	25493,44
2350	2452,81	-102,81	0,0625	-8,72E-04	12026,78
2654	3235,50	-581,50	0,0625	-4,93E-03	384730,74
1652	1573,00	79,00	0,0625	6,70E-04	7100,87
2200	1716,31	483,69	0,0625	4,10E-03	266187,20
5210	5230,81	-20,81	0,0625	-1,76E-04	492,84

Una vez obtenidos los resultados del ajuste se realiza grafica de Ajuste vs Residuo, como se ve en la Figura 5.40, la cual nos muestra que los valores están distribuidos aleatoriamente alrededor de cero, y no muestra un comportamiento que nos indique que el modelo no representa el comportamiento de la respuesta, tomando así el modelo como aceptable para representar la presión en los álabes guías de la turbina. Sin embargo, hay valores que están alejados de cero, por lo que son datos atípicos que no afectan el comportamiento del modelo, estos datos se pudieron presentar ya que, al momento de sacar los resultados de la presión, dicho valor se obtuvo visualmente y reduciendo el rango donde se encontraba el valor máximo, por tal razón se pueden presentar esos errores por la apreciación humana.

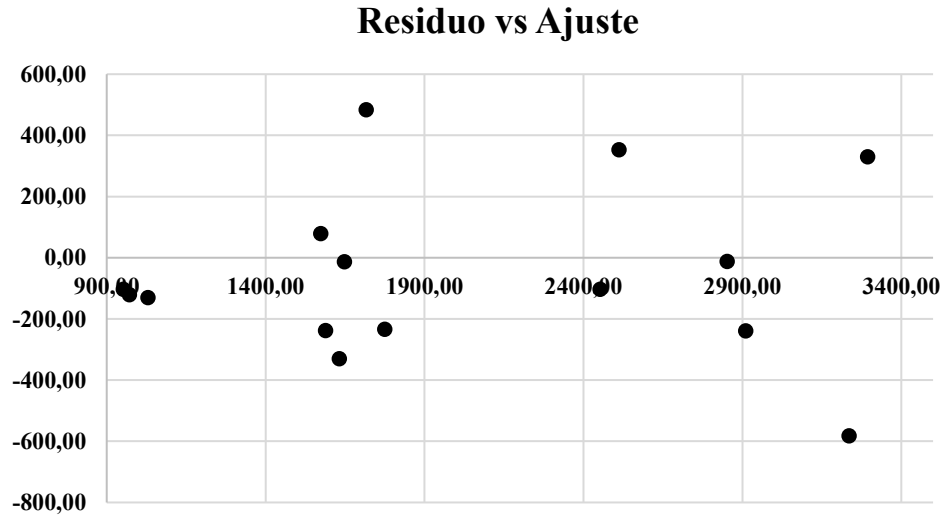


Figura 5.40: Ajuste vs Residuo para la presión en los álabes guías.

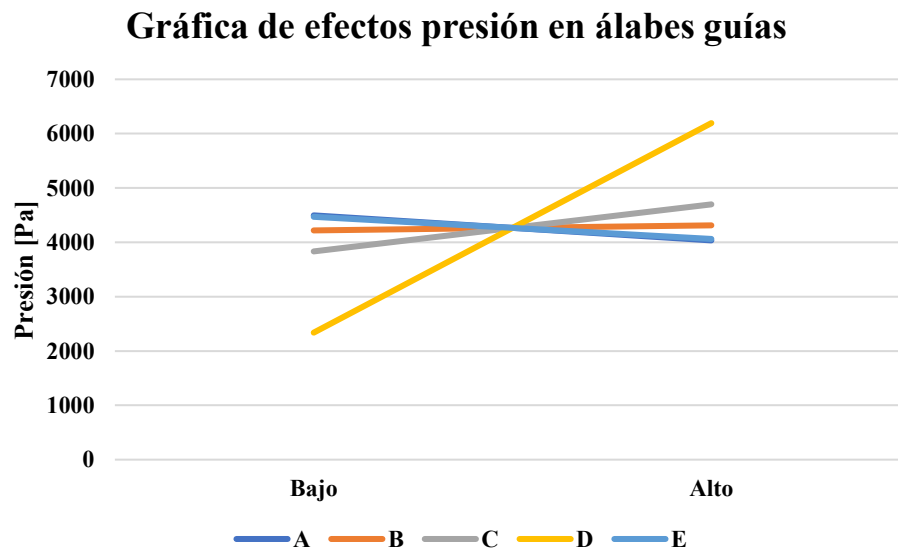


Figura 5.41: Gráfica de efectos para la presión en los álabes guías.

En la gráfica de efectos se puede ver como claramente como la presión aumenta por el factor D, el cual es el más significativo en la respuesta, los otros factores como A, B y C aumentan la presión, pero no con la misma magnitud que D y solo el factor E reduce la presión en un nivel alto, pero la magnitud no es comparable con la del factor D. El factor de que es la velocidad inicial es más significativo ya que es el que está directamente relacionado con la cantidad de movimiento que lleva el fluido y la fuerza que soportan los álabes guías. También, el factor A influye ya que es el ángulo de los álabes guías, influyendo directa mente en la dirección de como reciben el flujo y como la fuerza de distribuye sobre el área de este.

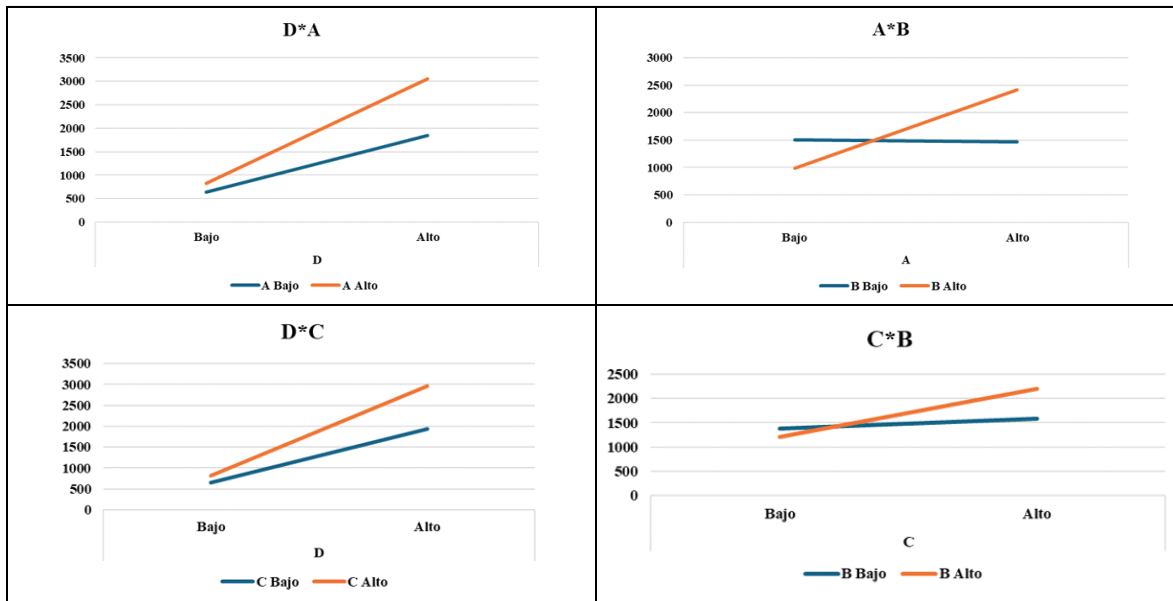


Figura 5.42: Gráfica de factores para la presión en los albes guías.

En la Figura 5.42 presenta qué factores tienen interacciones entre sí, de las cuales se puede decir que para tener una menor presión en los álabes guías es mejor el factor D en nivel bajo, B alto con C y A bajo.

La ecuación (40) presenta la ecuación que se obtiene para el modelo ANOVA sin filtrar y la ecuación (41) es la ecuación del ajuste filtrado, ambas son para la presión máxima en los álabes guías (P_G).

$$P_G = 1591,531 + 348,281X_A + 108,843X_B + 301,156X_C + 859,031X_D - 29,344X_E \quad [Pa] \quad (40)$$

$$P_G = 24429,198 - 79,863A + 1264,807B - 3661,249C + 596,327D - 26,676E - 26,511AB + 203,325AC + 27,901AD + 898,026BC - 381,335BD + 1089,202CD - 51,159ABC + 10,586ABD - 59,64ACD - 257,653BCD + 14,579ABCD \quad [Pa] \quad (41)$$

En la Figura 5.43 se puede ver gráficamente la comparación entre la respuesta y los modelos, de los cuales se puede decir que representan adecuadamente la presión en los álabes guías, pero presentan diferencias en precisión. Pues, el modelo de regresión tiene un ajuste más preciso en las zonas donde la presión es mayor. Por otro lado, el modelo ANOVA tiene una aproximación más suavizada, la cual es útil para describir tendencias generales, sin ser exacta en los picos y comportamientos no lineales.

Comparación respuesta y modelos

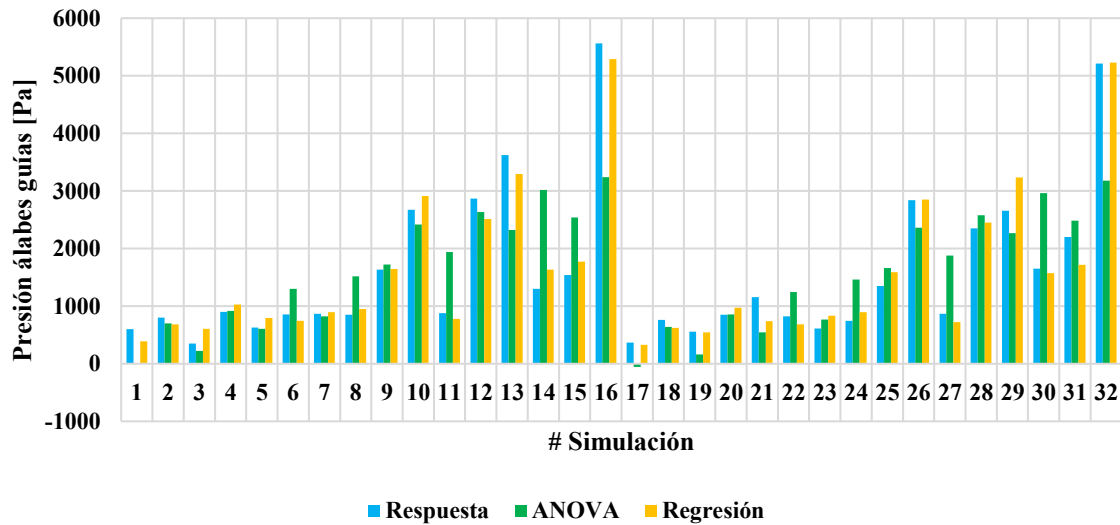


Figura 5.43: Comparación Respuesta, ANOVA sin filtrar y Regresión filtrada para la presión en los álabes guías.

5.4.5. Análisis de la presión en el rotor

Como ultima respuesta a analizar se tiene la presión en el rotor pues es una parte muy importante en la turbina y debe ser estudiada. En la Tabla 5-22 se presentan los contrastes y efectos de acuerdo con los factores e interacciones.

Tabla 5-22: Contrastes y efectos para la presión en el rotor.

COMBINACIÓN	CONTRASTE	EFFECTOS
A	6818	426,125
B	3686	230,375
C	1052	65,750
D	81300	5081,250
E	-5166	-322,875
AB	5576	348,500
AC	230	14,375
BC	7910	494,375
AD	4962	310,125
BD	-770	-48,125
CD	-708	-44,250
AE	388	24,250
BE	-2816	-176,000
CE	-5834	-364,625
DE	-2210	-138,125
ABC	8256	516,000

ABD	4724	295,250
ACD	-1406	-87,875
BCD	3418	213,625
ABE	2074	129,625
ACE	-1520	-95,000
BCE	-4384	-274,000
ADE	-1492	-93,250
BDE	5680	355,000
CDE	2414	150,875
ABCD	8440	527,500
ABCE	2578	161,125
ABDE	2606	162,875
ACDE	820	51,250
BCDE	-1524	-95,250
ABCDE	-3054	-190,875

Con base a los resultados de efectos se realiza la gráfica de probabilidad normal de los efectos, como se ve en la Figura 5.44, obteniendo que D es el único resultado significativo pues es el único que no sigue la tendencia.

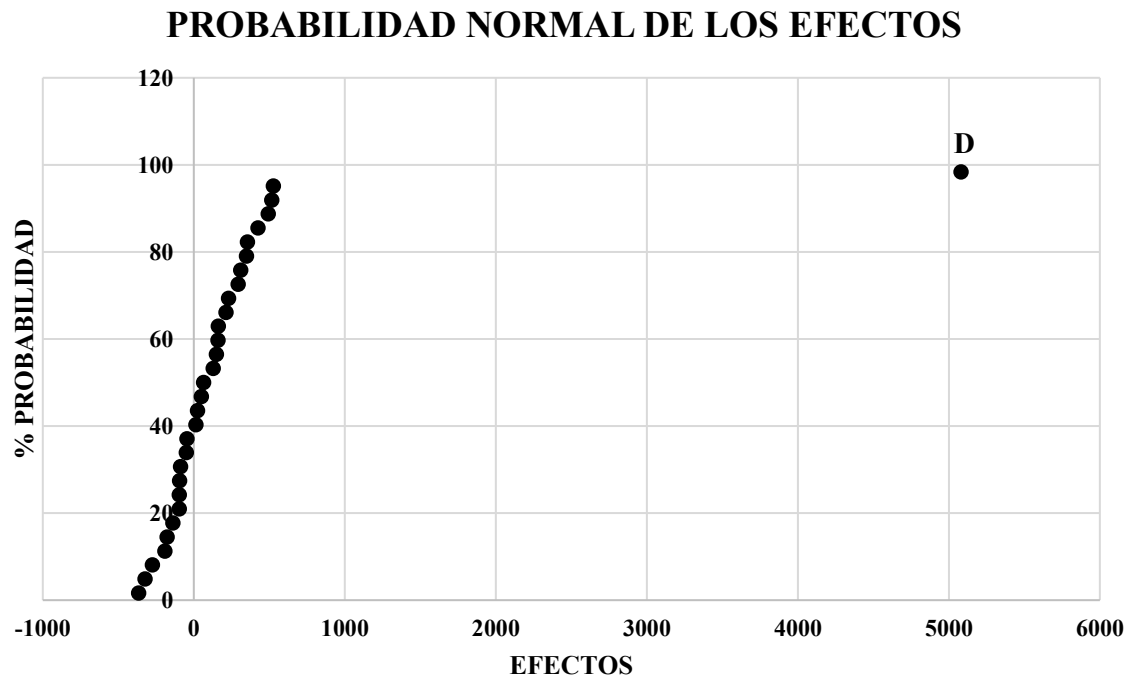


Figura 5.44: Probabilidad normal de los efectos para la presión en el rotor.

En la Tabla 5-23 se tiene el análisis de factores e interacciones para la presión en el rotor partiendo del resultado mostrado por la Figura 5.44, de realizar el análisis se confirma que D es el único factor significativo, ya que el p-value es menor a 0,05 y en la Figura 5.45 que presenta el diagrama de Pareto

para la presión en el rotor, se ve que es el único factor que supera el margen de error. Además, el R^2 del análisis es de 0,92 y un s de 755,96.

Tabla 5-23: Análisis de factores e interacciones para la presión en el rotor.

FUENTE	SS	GL	MS	FC	FT	p-value	EFEECTO STD	ME
A	1452660,13	1	1452660,13	2,542	4,667	0,135	1,594	3,012
B	424581,13	1	424581,13	0,743	4,667	0,404	0,862	3,012
C	34584,50	1	34584,50	0,061	4,667	0,810	0,246	3,012
D	206552812,50	1	206552812,50	361,439	4,667	7,19E-11	19,012	3,012
E	833986,13	1	833986,13	1,459	4,667	0,249	1,208	3,012
AD	769420,13	1	769420,13	1,346	4,667	0,267	1,160	3,012
CD	15664,50	1	15664,50	0,027	4,667	0,871	0,166	3,012
DE	152628,13	1	152628,13	0,267	4,667	0,614	0,517	3,012
ABD	697380,50	1	697380,50	1,220	4,667	0,289	1,105	3,012
ACD	61776,13	1	61776,13	0,108	4,667	0,748	0,329	3,012
BCD	365085,13	1	365085,13	0,639	4,667	0,438	0,799	3,012
ADE	69564,50	1	69564,50	0,122	4,667	0,733	0,349	3,012
BDE	1008200,00	1	1008200,00	1,764	4,667	0,207	1,328	3,012
CDE	182106,13	1	182106,13	0,319	4,667	0,582	0,565	3,012
ABCD	2226050,00	1	2226050,00	3,895	4,667	0,070	1,974	3,012
ABDE	212226,13	1	212226,13	0,371	4,667	0,553	0,609	3,012
BCDE	72580,50	1	72580,50	0,127	4,667	0,727	0,356	3,012
ABCDE	291466,13	1	291466,13	0,510	4,667	0,488	0,714	3,012
ERROR	7429155,75	13	571473,52					
TOTAL	222851928,00	31	7188771,87					

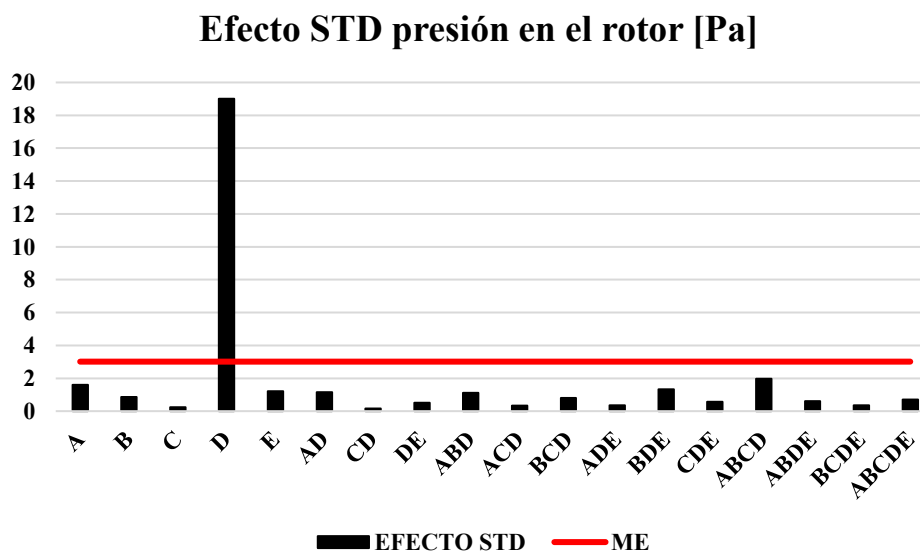


Figura 5.45: Diagrama de Pareto para la presión en el rotor.

Conociendo que D es el único factor significativo, se realiza el ajuste obteniendo los resultados de la Tabla 5-24, con un R^2 de 0,92.

Tabla 5-24: Regresión DOE-ANOVA para la presión en el rotor.

Respuesta	Ajuste	Residuo	Hii	Residuo Std	Press
2600	2645,375	-45,375	0,0625	-4,35E-04	2342,560
1900	2645,375	-745,375	0,0625	-7,15E-03	632131,004
2500	2645,375	-145,375	0,0625	-1,39E-03	24045,671
2700	2645,375	54,625	0,0625	5,24E-04	3395,004
2154	2645,375	-491,375	0,0625	-4,71E-03	274715,751
2678	2645,375	32,625	0,0625	3,13E-04	1211,040
3700	2645,375	1054,625	0,0625	1,01E-02	1265475,004
3670	2645,375	1024,625	0,0625	9,83E-03	1194503,271
7598	7726,625	-128,625	0,0625	-1,23E-03	18823,840
9155	7726,625	1428,375	0,0625	1,37E-02	2321356,960
7246	7726,625	-480,625	0,0625	-4,61E-03	262827,111
7359	7726,625	-367,625	0,0625	-3,53E-03	153768,551
7859	7726,625	132,375	0,0625	1,27E-03	19937,440
7210	7726,625	-516,625	0,0625	-4,96E-03	303674,471
7515	7726,625	-211,625	0,0625	-2,03E-03	50955,538
9715	7726,625	1988,375	0,0625	1,91E-02	4498358,204
2634	2645,375	-11,375	0,0625	-1,09E-04	147,218
3232	2645,375	586,625	0,0625	5,63E-03	391542,204
2600	2645,375	-45,375	0,0625	-4,35E-04	2342,560
2557	2645,375	-88,375	0,0625	-8,48E-04	8886,204
2511	2645,375	-134,375	0,0625	-1,29E-03	20544,444
2340	2645,375	-305,375	0,0625	-2,93E-03	106102,204
2000	2645,375	-645,375	0,0625	-6,19E-03	473894,560
2550	2645,375	-95,375	0,0625	-9,15E-04	10349,671
7150	7726,625	-576,625	0,0625	-5,53E-03	378307,004
8012	7726,625	285,375	0,0625	2,74E-03	92659,360
7250	7726,625	-476,625	0,0625	-4,57E-03	258470,560
7957	7726,625	230,375	0,0625	2,21E-03	60384,871
7750	7726,625	23,375	0,0625	2,24E-04	621,671
6350	7726,625	-1376,625	0,0625	-1,32E-02	2156198,560
6500	7726,625	-1226,625	0,0625	-1,18E-02	1711910,560
9000	7726,625	1273,375	0,0625	1,22E-02	1844888,338

Se realiza la gráfica de ajuste vs residuo como se ve en la Figura 5.46, donde se aprecia que solo hay dos valores para la presión, esto se da a que solo hay un factor significativo y por cada nivel se obtiene una respuesta, también se observa que el residuo está alrededor de cero, exceptuando tres casos que se aprecian alejados pero que, aun así, se puede considerar que el modelo representa correctamente el fenómeno.

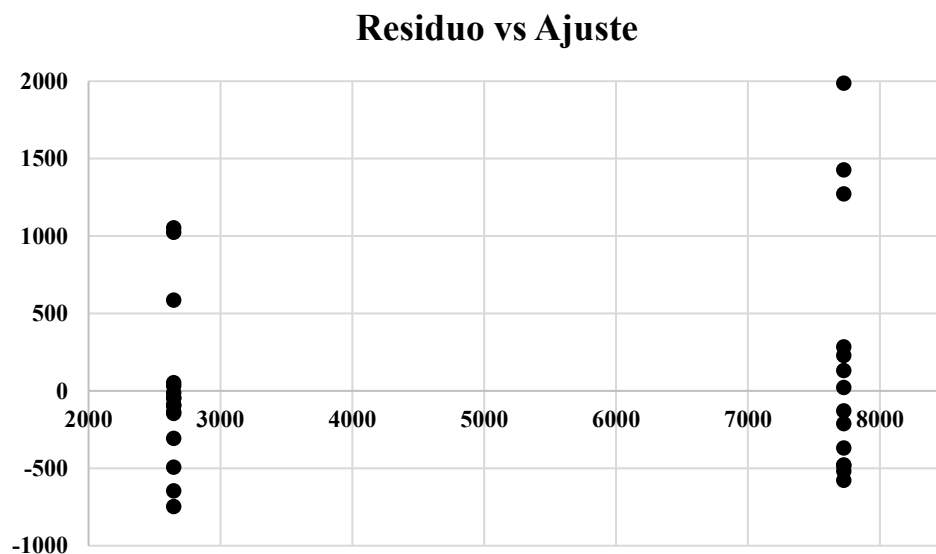


Figura 5.46: Ajuste vs Residuo para la presión en el rotor.

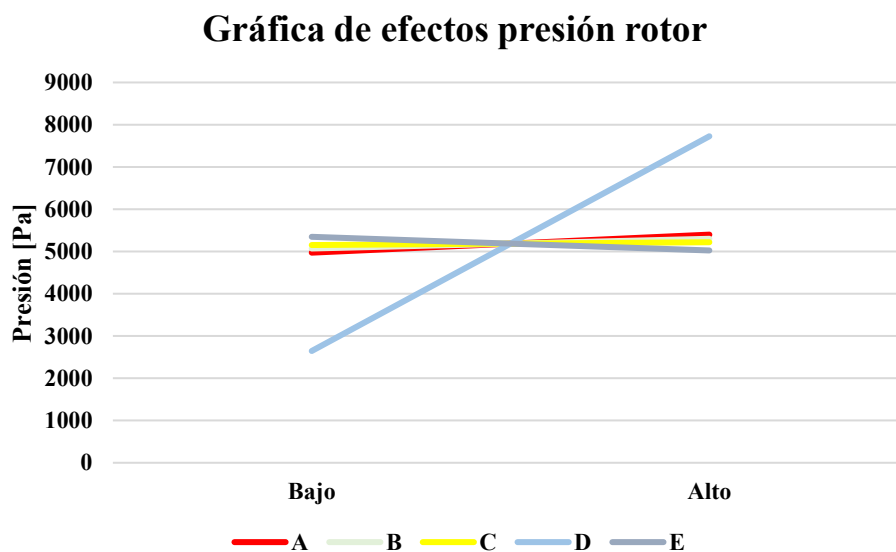


Figura 5.47: Gráfica de efectos para la presión en el rotor.

Ya se conoce que el factor D es el único factor significativo y en la Figura 5.47 se puede confirmar esto, pues en esta figura se comparan los factores y se ve como el efecto del factor D tiene una pendiente mucho más inclinada que los otros efectos. Como se mencionó en el análisis del torque, la velocidad está directamente relacionada con el torque, y el torque depende directamente de la diferencia de presión sobre los álabes que es generada por la cantidad de movimiento del fluido.

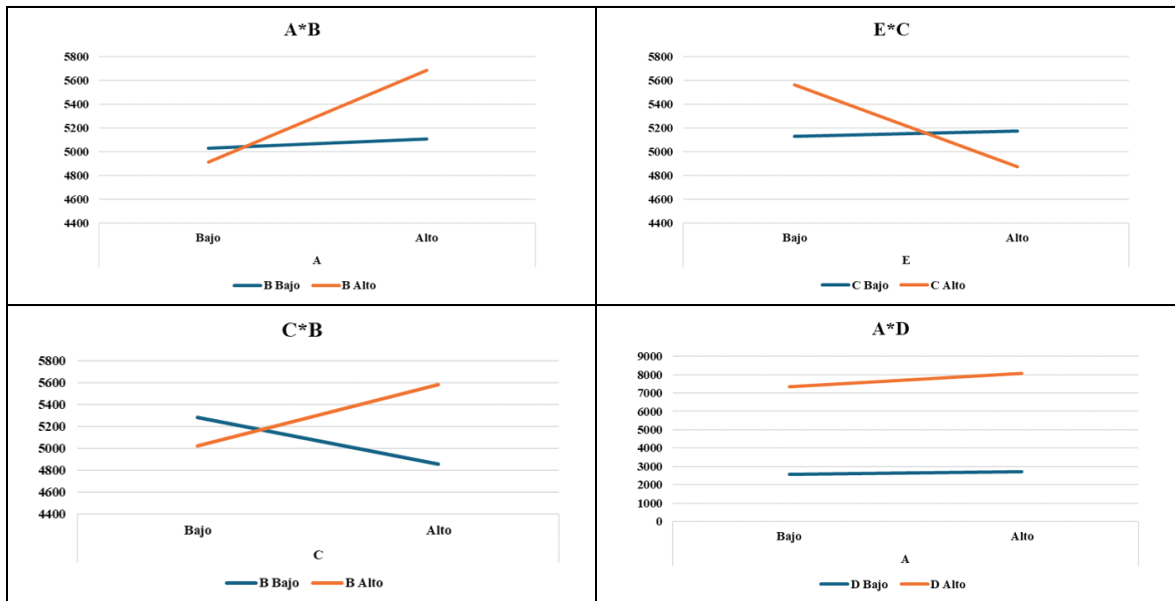


Figura 5.48: Gráfica de factores para la presión en el rotor.

Aunque D es el único factor significativo, se presentan interacciones entre los factores tal como se ve en la Figura 5.48, pero yo no llegan a ser significativas para la respuesta. Se puede decir que para reducir la presión en el rotor es recomendable combinar A en nivel alto con D y B bajo, por otro lado, se recomienda C y E en nivel alto con B en nivel bajo.

Teniendo los modelos en las ecuaciones (42) y (43) se presentan las ecuaciones para el modelo ANOVA sin filtrar y para el ajuste filtrado respectivamente.

$$P_R = 5186 + 213,063X_A + 115,188X_B + 32,875X_C + 2540,625X_D - 161,438X_E \quad [Pa] \quad (42)$$

$$P_R = 1881,204D - 3938,839 \quad [Pa] \quad (43)$$

Para conocer si los modelos describen el comportamiento de las respuestas obtenidas, en la Figura 5.49 se presenta la comparación entre los modelos y la respuesta para la presión en el rotor. Donde se ve que ambos representan correctamente el fenómeno evaluado sin llegar a ser exactos por los picos que presenta la respuesta. El modelo ANOVA presenta mayor cercanía con los picos y esto se da ya que la ecuación cuenta con más factores. Sin embargo, la ecuación del modelo de regresión a pesar de ser construida solo teniendo en cuenta el único factor significativo también representa el fenómeno como se había dicho anteriormente, además de que se puede usar para predecir otros escenarios.

Comparación respuesta y modelos presión rotor

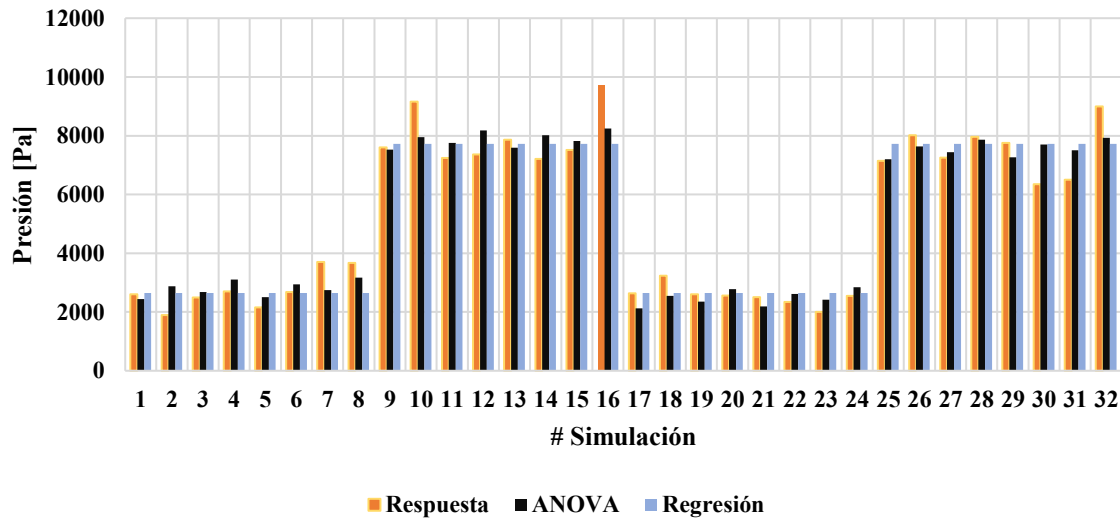


Figura 5.49: Comparación Respuesta, ANOVA sin filtrar y Regresión filtrada para la presión en el rotor.

5.5. Recomendaciones para la adaptación de las turbinas en la Bahía de Buenaventura.

De acuerdo con la ecuación (2) la potencia hidráulica que se tiene sabiendo que la turbina es de 2,5 m de diámetro es de 433 kW como se había mencionado anteriormente. De acuerdo con los resultados obtenidos, la potencia promedio es 66,1 kW cuando la velocidad del flujo es 3,5 m/s y de 311,35 kW cuando la velocidad del flujo es 6,2 m/s. es decir para cuadratura reflujo la eficiencia es de 15,3% y en sicigia reflujo la eficiencia es de 72%, valor, aunque bajo es cercano al 89% de eficiencia de la turbina HYDROMATRIX, la cual se usó como base para el estudio. Lo anterior muestra la importancia de la marea en sicigia, por lo que se recomienda trabajar en esta temporada, sin descuidar cuadratura ya que también es posible generar energía.

Para el rotor, el ángulo de ataque que se recomienda es de 4°, ya que variarlo, no presenta un cambio significativo, pero con un ángulo de ataque de 4° el C_L/C_D presenta un valor mayor, Y para los niveles evaluados, es recomendable que el ángulo de los álabes guías y el ángulo de ataque del rotor compartan el mismo nivel. Para el diseño de los álabes es indispensable que se tenga en cuenta que la presión máxima reportada fue de 9715 Pa, por lo que con base a este valor se debe tener en cuenta el diseño, además que las presiones máximas se presentan en la raíz y borde de fuga del álabe.

Es posible implementar la presa para épocas de altas y bajas precipitaciones sin presentar cambios en el diseño, pues el cambio en la densidad del agua no es significativo, ya que no aumenta la producción y tampoco las presiones que soportan los álabes.

Teniendo en cuenta los resultados usar un ángulo de 10° a la salida de la recámara sirve para reducir la velocidad del flujo, por lo que se recomienda usar dicho ángulo, pues al desacelerarse el flujo permite que se disminuyan vórtices, protegiendo la estructura aguas abajo. Además, ayuda a tener

una descarga estable, evitando ocasionar remezcla que se torne violenta, eludiendo posibles daños al ecosistema.

El caso numero 13 es la mejor configuración, pues es el de mayor torque (9152.58 Nm), lo que significa que es el de mayor generación, el ángulo de salida es 10° por lo que se presenta desaceleración a la salida de la recámara protegiendo el ecosistema y las personas, este caso la presión máxima a soportar es 7859 Pa, no es la mayor presión que se presenta, por lo que se debe tener en cuenta dicho valor para diseñar la turbina y asegurar la durabilidad.

El caso 16 también presenta un torque alto (8373.72 Nm) y la salida de la recámara es con el ángulo de 10° , que la hace una buena opción, pero en comparación con el caso 13 sufre la mayor presión de todos los casos 9715 Pa, poniendo en riesgo la durabilidad del sistema.

Además de lo anterior, a partir de los resultados obtenidos y considerando el alcance definido del presente estudio, se presentan a continuación una serie de recomendaciones derivadas del análisis realizado. Estas recomendaciones se formulan en el marco de la evaluación específica de la turbina tipo bulbo y buscan orientar trabajos posteriores o estudios complementarios.

Teniendo en cuenta que la presa es de 24 recámaras, en cuadratura la producción es de 1,59 MW y para sicigia es de 7,47 MW. La turbina evaluada se puede colocar como módulos una encima de la otra por lo que hay espacio para tener un total de 48 turbinas como se ve en la Figura 5.50, teniendo una producción de 3,18 MW y 14,94 MW para cuadratura y sicigia respectivamente, es decir una producción de 18,12 MW, solo en refluo, pues no se tiene en cuenta cuando la marea está en flujo.

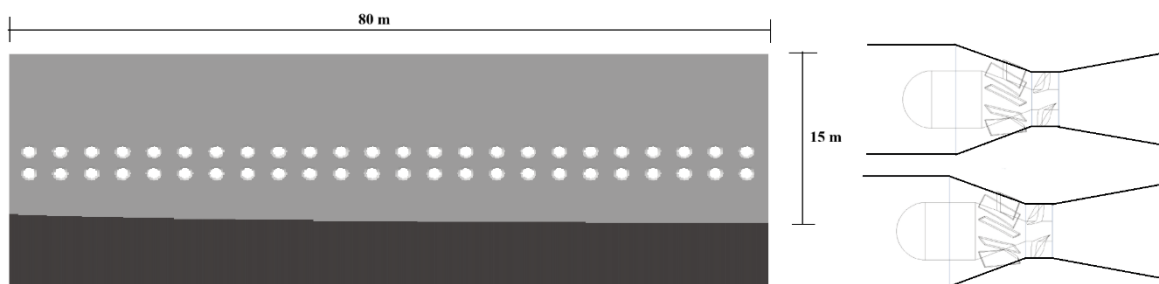


Figura 5.50: Distribución recomendada.

La implementación de puentes ecológicos también se recomienda, pues permite el paso de la fauna y de personas que se dedican a la pesca, permitiendo así que haya desarrollo y se respete el ecosistema y a las personas que habitan este territorio. Esto también sirve para impulsar el progreso en el lugar, pues se generarían empleos y diversificaría la red eléctrica del país.

Aprovechando la obra civil, la presa puede ser utilizada como puente para ayudar en la comunicación vial terrestre en la región, sabiendo que en buenaventura se presenta uno de los puertos más importantes.

6. Conclusiones

Después de finalizar con el estudio se presentan las siguientes conclusiones.

- Colombia tiene la oportunidad de aprovechar energía mareomotriz a partir de una presa de marea en Buenaventura, de la evaluación de la turbina y su recámara se encontró que se cuenta con un potencial de 18,12 MW solo en reflujo. El lugar cuenta con una amplitud de marea de hasta 3 metros con mareas semidiurnas y mixtas tendiendo a semidiurnas, además en la bahía de buenaventura se encuentra un lugar que puede ser intervenido para la realización de obras civiles y que es un estuario que está al norte de Buenaventura, que permite la acumulación de agua por el movimiento de la marea y la descarga de los ríos, ayudando así a tener un mayor aprovechamiento de la energía.
- Se encontró que la velocidad aguas arriba de la recámara es el factor que es significativo para la velocidad aguas arriba de la turbina, la velocidad aguas abajo de la turbina, el torque y la presión en los álabes guías y del rotor, dado que dicho valor condiciona la cantidad de movimiento del flujo. Además, el cambio en la densidad del agua es mínimo por lo que no es influyente en la producción de energía. Finalmente, la producción de energía es mayor en sicingia con una eficiencia del 72%, mientras para cuadratura la eficiencia es de 15,3%. Valores menores al 89% de la turbina HYDROMATRIX.
- Para una mayor producción de energía se recomienda trabajar con la velocidad aguas arriba en un nivel alto (6,2 m/s) y los ángulos de ataque en el rotor y el ángulo en los álabes guías deben estar en el mismo nivel, ya sea ambos alto (5° y 23°) o ambos bajo (3° y 17°), aunque esto aumenta la presión en los álabes guías. Para disminuir el impacto del flujo al ecosistema y proteger la salida de la recámara, es mejor usar un nivel alto en el ángulo de salida de la recámara (10°), pues desacelera el flujo. El mejor caso que representa esto es el 13, el cual tiene 17° y 3° como los ángulos de los álabes guías y los álabes del rotor respectivamente; la velocidad aguas arriba es de 6.2 m/s.
- Del análisis de presiones sobre la turbina, se recomienda para la construcción de la turbina buscar materiales amigables con el medio ambiente como lo son polímeros reforzados con fibras naturales [43], los cuales deben soportar una presión máxima de 9715 Pa.

6.1. Futuros trabajos

Como futuros trabajos se recomienda realizar pruebas físicas experimentales para terminar de validar los resultados encontrados, enfocándose en los factores que se encontraron significativos y buscando mejorar las eficiencias obtenidas. También, realizar la evaluación con una turbina bulbo modificada que permita aprovechar el flujo y el reflujo de la marea, esto con el fin de obtener una mayor producción de energía.

7. Bibliografía

- [1] Departamento Nacional de Planeación, “Colombia, potencia mundial de la vida: Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026,” 2023.
- [2] I. Renewable Energy Agency, *Offshore renewables: An action agenda for deployment (A contribution to the G20 Presidency)*. 2021. [Online]. Available: www.irena.org
- [3] Y. H. Bae, K. O. Kim, and B. H. Choi, “Lake Sihwa tidal power plant project,” *Ocean Engineering*, vol. 37, no. 5–6, 2010, doi: 10.1016/j.oceaneng.2010.01.015.
- [4] “Usine marémotrice de la Rance : un site unique en Europe | EDF FR.” Accessed: Sep. 18, 2023. [Online]. Available: <https://www.edf.fr/usine-maremotrice-rance/presentation>
- [5] S. Sheth and M. Shahidehpour, “Tidal Energy in Electric Power Systems”, doi: <https://doi.org/10.1109/PES.2005.1489454>.
- [6] S. Waters and G. Aggidis, “Tidal range technologies and state of the art in review,” 2016. doi: 10.1016/j.rser.2015.12.347.
- [7] Hans G. Hansson, “Development of the Kaplan turbine”.
- [8] S. H. Ahn *et al.*, “Hydraulic performances of a bulb turbine with full field reservoir model based on entropy production analysis,” *Renew Energy*, vol. 211, pp. 347–360, Jul. 2023, doi: 10.1016/J.RENENE.2023.04.138.
- [9] Y. Luo, A. Presas, Z. Wang, Y. Xiao, H. Wang, and X. Jiang, “Operating conditions leading to crack propagation in turbine blades of tidal barrages. Influence of head and operating mode,” *Eng Fail Anal*, vol. 108, 2020, doi: 10.1016/j.engfailanal.2019.104254.
- [10] C. Li, X. Luo, G. Wu, Y. Fu, J. Feng, and G. Zhu, “Investigation on effect of anti-cavitation edge on performance and leakage vortex characteristics of tubular turbine for ocean power generation,” *Ocean Engineering*, vol. 281, 2023, doi: 10.1016/j.oceaneng.2023.114797.
- [11] K. A. Samo, A. Baharun, A. Ragai, and H. Rigit, “The Development of a Preliminary Design for a Tidal Energy Plant,” 2021. [Online]. Available: www.etasr.com
- [12] D. Parrado and J. G. Rueda-Bayona, “Three-Dimensional Hydrodynamic and CFD Modeling of a Tidal Barrage Power Plant without Sluicing in Buenaventura, Colombia,” *Infrastructures (Basel)*, vol. 9, no. 8, Aug. 2024, doi: 10.3390/INFRASTRUCTURES9080127.
- [13] A. F. Osorio, S. Ortega, and S. Arango-Aramburo, “Assessment of the marine power potential in Colombia,” 2015, doi: 10.1016/j.rser.2015.09.057.
- [14] J. G. Rueda-Bayona, J. L. García Vélez, and D. M. Parrado-Vallejo, “Effect of Sea Level Rise and Access Channel Deepening on Future Tidal Power Plants in Buenaventura Colombia,” *Infrastructures (Basel)*, vol. 8, no. 3, Mar. 2023, doi: 10.3390/infrastructures8030051.
- [15] G. E. Quintero Aguilar and J. G. Rueda Bayona, “Tidal Energy Potential in the Center Zone of the Colombian Pacific Coast,” *INGE CUC*, vol. 17, no. 2, Apr. 2021, doi: 10.17981/ingecuc.17.2.2021.07.

- [16] S. K. Chakrabarti, "Ocean Environment," *Handbook of Offshore Engineering (2-volume set)*, pp. 79–131, Jan. 2005, doi: 10.1016/B978-008044381-2.50006-0.
- [17] Paul Webb, *Introduction to Oceanography*. 2020. Accessed: Oct. 22, 2023. [Online]. Available: <https://rwu.pressbooks.pub/webboceanography/>
- [18] J. M. Polo, J. Rodríguez Profesor Asociado Director, and A. Sarmiento, "Tidal Current Potential for Energy Generation along the Colombian Coastline," *Revista de Ingeniería*, no. 28, pp. 99–105, 2008, Accessed: Oct. 29, 2023. [Online]. Available: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0121-49932008000200014&lng=en&nrm=iso&tlng=es
- [19] M. R. Negahdari, A. Ghaedi, M. Nafar, and S. Mohsen, "Optimal planning of the barrage type tidal power plants equipped to the hydro-pumps," *Electric Power Systems Research*, vol. 220, p. 109347, Jul. 2023, doi: 10.1016/J.EPSR.2023.109347.
- [20] P. Schureman and U. S. C. and G. Survey, *Manual of harmonic analysis and prediction of tides*. Washington, D.C: U.S. Govt. Print. Off, 1971. doi: 10.5962/bhl.title.38116.
- [21] M. I. Yuce and A. Muratoglu, "Hydrokinetic energy conversion systems: A technology status review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 43, pp. 72–82, Mar. 2015, doi: 10.1016/J.RSER.2014.10.037.
- [22] M. Nachtane, M. Tarfaoui, I. Goda, and M. Rouway, "A review on the technologies, design considerations and numerical models of tidal current turbines," *Renew Energy*, vol. 157, pp. 1274–1288, Sep. 2020, doi: 10.1016/J.RENENE.2020.04.155.
- [23] S. Waters and G. Aggidis, "A World First: Swansea Bay Tidal lagoon in review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 56, pp. 916–921, Apr. 2016, doi: 10.1016/J.RSER.2015.12.011.
- [24] "Tidal Lagoon Swansea Bay, las mareas como fuente de energía - HidrojING." Accessed: Nov. 08, 2023. [Online]. Available: <https://www.hidrojing.com/tidal-lagoon-swansea-bay-las-mareas-como-fuente-de-energia/>
- [25] S. Waters and G. Aggidis, "Tidal range technologies and state of the art in review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 59, pp. 514–529, Jun. 2016, doi: 10.1016/J.RSER.2015.12.347.
- [26] "BBC NEWS | UK | Wales | South East Wales | Severn reef plan is 'more green.'" Accessed: Nov. 08, 2023. [Online]. Available: http://news.bbc.co.uk/2/hi/uk_news/wales/south_east/7748431.stm
- [27] C. Mataix, *Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas*, 1ª edición. Madrid, España, 1975.
- [28] G. A. Aggidis and O. Feather, "Tidal range turbines and generation on the Solway Firth," *Renew Energy*, vol. 43, pp. 9–17, Jul. 2012, doi: 10.1016/J.RENENE.2011.11.045.
- [29] R. K. Chaulagain, L. Poudel, and S. Maharjan, "A review on non-conventional hydropower turbines and their selection for ultra-low-head applications," *Heliyon*, vol. 9, no. 7, p. e17753, Jul. 2023, doi: 10.1016/J.HELİYON.2023.E17753.

- [30] J. H. Ferziger and M. Perić, *Computational Methods for Fluid Dynamics*, 3rd Edition. Berlin; Heidelberg; New York; Barcelona; Hong Kong; London; Milan; Paris; Tokio: Springer, 2002.
- [31] J. D. Anderson Jr, “Computational Fluid Dynamics The Basics with Applications,” pp. 23–24, 1995.
- [32] M. Douglas, “Diseño y análisis de experimentos,” *Limusa Wiley*, pp. 1–681, 2002, Accessed: Nov. 26, 2025. [Online]. Available: https://books.google.com/books/about/Dise%C3%B1o_y_an%C3%A1lisis_de_experimentos.html?hl=es&id=TJFoAAAACAAJ
- [33] D. C. MONTGOMERY, *DISEÑO Y ANALISIS DE EXPERIMENTOS*, 2a. ed. MEXICO: LIMUSA WILEY, 2005.
- [34] A. Ghaedi and H. Gorginpour, “Generated power enhancement of the barrage type tidal power plants,” *Ocean Engineering*, vol. 226, p. 108787, Apr. 2021, doi: 10.1016/J.OCEANENG.2021.108787.
- [35] J. G. Rueda-Bayona, N. Paez, J. J. C. Eras, and A. S. Gutiérrez, “DOE-ANOVA to Optimize Hydrokinetic Turbines for Low Velocity Conditions,” *Mathematical Modelling of Engineering Problems*, vol. 9, no. 4, pp. 979–988, Aug. 2022, doi: 10.18280/mmep.090415.
- [36] D. Parrado and J. G. Rueda-Bayona, “Three-Dimensional Hydrodynamic and CFD Modeling of a Tidal Barrage Power Plant without Sluicing in Buenaventura, Colombia,” *Infrastructures (Basel)*, vol. 9, no. 8, Aug. 2024, doi: 10.3390/INFRASTRUCTURES9080127.
- [37] “Paper for 61st IECM and 6th ARC of ICID Conference ‘Improvement of Irrigation and Drainage Efficiency through Participatory Irrigation Development’ ‘Hydroelectric power generation at multi-purpose irrigation dams using HYDROMATRIX® Technology’”.
- [38] L. M. C. Ferro, L. M. C. Gato, and A. F. O. Falcão, “Design of the rotor blades of a mini hydraulic bulb-turbine,” *Renew Energy*, vol. 36, no. 9, pp. 2395–2403, Sep. 2011, doi: 10.1016/J.RENENE.2011.01.037.
- [39] L. M. C. Ferro, L. M. C. Gato, and A. F. O. Falcão, “Design and experimental validation of the inlet guide vane system of a mini hydraulic bulb-turbine,” *Renew Energy*, vol. 35, no. 9, pp. 1920–1928, Sep. 2010, doi: 10.1016/J.RENENE.2010.01.020.
- [40] Z. Krzemianowski and M. Kaniecki, “Low-head high specific speed Kaplan turbine for small hydropower – design, CFD loss analysis and basic, cavitation and runaway investigations: A case study,” *Energy Convers Manag*, vol. 276, p. 116558, Jan. 2023, doi: 10.1016/J.ENCONMAN.2022.116558.
- [41] IOC, SCOR, and IAPSO, “The international thermodynamic equation of seawater – 2010: Calculation and use of thermodynamic properties (Manuals and Guides No. 56),” Paris, 2010. Accessed: Mar. 24, 2025. [Online]. Available: <https://www.teos-10.org>
- [42] INVEMAR, “Diagnóstico y Evaluación de la Calidad de las Aguas Marinas y Costeras en el Caribe y Pacífico colombianos. Cusba, J; Obando, P; Espinosa, L (Eds),” Santa Marta, 2024.
- [43] S. R. J. Walker and P. R. Thies, “A life cycle assessment comparison of materials for a tidal stream turbine blade,” *Appl Energy*, vol. 309, p. 118353, Mar. 2022, doi: 10.1016/J.APENERGY.2021.118353.