

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA EN ENERGÍA**



UNS
UNIVERSIDAD
NACIONAL DEL SANTA

“Evaluación de la geometría del tanque en la velocidad de vórtice gravitacional para un sistema de generación de energía hidráulica”

Tesis para obtener el título Profesional de Ingeniero en Energía

Autores:

Bach. Gonzalez Chonseng, Nicol Dayana

Bach. Sandoval Vásquez, Ursus Jhonatan

Asesor:

Dr. Edgar Paz Pérez

COD. ORCID: 0009-0001-6853-8144

Nuevo Chimbote -Perú

2023-01-30



UNS
UNIVERSIDAD
NACIONAL DEL SANTA

CARTA DE CONFORMIDAD DEL ASESOR

La presente Tesis para Título ha sido revisada y desarrollada en cumplimiento del objetivo propuesto y reúne las condiciones formales y metodológicas, estando encuadrado dentro de las áreas y líneas de investigación conforme al reglamento general para obtener el Título Profesional en la Universidad Nacional del Santa (R.D: N° 492-2017-CU-R-UNS) de acuerdo con la denominación siguiente:

**TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO
EN ENERGÍA**

**EVALUACIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL TANQUE EN LA
VELOCIDAD DE VÓRTICE GRAVITACIONAL PARA UN SISTEMA DE
GENERACIÓN DE ENERGÍA HIDRÁULICA**

AUTOR:

Bach. Gonzalez Chonseng Nicol Dayana Antonieta

Bach. Sandoval Vasquez Ursus Jhonatan

Dr. Paz Pérez Edgar

ASESOR

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA EN ENERGÍA



UNS
UNIVERSIDAD
NACIONAL DEL SANTA

HOJA DE CONFORMIDAD DEL JURADO EVALUADOR

Terminada la sustentación de la tesis titulada: “EVALUACIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL TANQUE EN LA VELOCIDAD DE VÓRTICE GRAVITACIONAL PARA UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA HIDRAÚLICA”; sustentada el día 30 de enero del 2023.

Tiene la aprobación del jurado calificador, quienes firmaron en señal de la conformidad.

M.g. Hector D. Benites Villegas
PRESIDENTE
DNI:17821639
Cod. Orcid: 0000-0002-8809-6371

M.Sc. Roberto C. Chucuya Huallpachoque
SECRETARIO
DNI:40149444
Cod. Orcid: 0000-0001-9175-5545

Dr. Edgar Paz Pérez
INTEGRANTE
DNI:32978304
Cod. Orcid: 0009-0001-6853-8144

NUEVO CHIMBOTE – PERÚ

2023



ACTA DE SUSTENTACION DE TESIS

A los treinta días del mes de enero del año dos mil veintitrés, siendo las once horas de la mañana, se reunieron en el aula E-3 del pabellón de la EPIE, el Jurado Evaluador designado mediante **Resolución N° 597-2022-UNS-CFI**, integrado por los siguientes docentes:

- **Mg. HECTOR DOMINGO BENITES VILLEGAS** : PRESIDENTE
- **M.Sc. ROBERTO CARLOS CHUCUYA HUALLPACHOQUE** : SECRETARIO
- **Dr. EDGAR PAZ PEREZ** : INTEGRANTE

Y según la **resolución decanal N° 041-2023-UNS-FI**, se declara expedito al bachiller para dar inicio a la sustentación y evaluación de la Tesis titulada: **“EVALUACIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL TANQUE EN LA VELOCIDAD DE VÓRTICE GRAVITACIONAL PARA UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA HIDRAÚLICA”** elaborado por el Bachiller de Ingeniería en Energía: **GONZALEZ CHONSENG NICOL DAYANA ANTONIETA** con código de matrícula N° 201611044, teniendo como asesor al docente Dr. Edgar Paz Pérez, según Resolución Decanal N° 706-2021-UNS-FI, de fecha 30.11.21.

Terminada la sustentación del Bachiller, respondió las preguntas formuladas por los miembros del jurado y el público presente.

El Jurado después de deliberar sobre aspectos relacionados con el trabajo, contenido y sustentación del mismo y con las sugerencias pertinentes, en concordancia con el artículo 103° del Reglamento General de Grados y Títulos de la Universidad Nacional del Santa, declara:

BACHILLER	PROMEDIO	PONDERACIÓN
GONZALEZ CHONSENG NICOL DAYANA ANTONIETA	Decisione (17)	BuENO

Siendo las doce horas del mismo día, se da por terminado el acto de sustentación, firmando los integrantes del jurado en señal de conformidad.


Mg. Hector Domingo Benites Villegas
PRESIDENTE


M.Sc. Roberto Carlos Chucuya Huallpachoque
SECRETARIO


Dr. Edgar Paz Perez
INTEGRANTE



UNS
UNIVERSIDAD
NACIONAL DEL SANTA

FACULTAD DE INGENIERIA
Dirección E.P. de Ingeniería en Energía

ACTA DE SUSTENTACION DE TESIS

A los treinta días del mes de enero del año dos mil veintitrés, siendo las once horas de la mañana, se reunieron en el aula E-3 del pabellón de la EPIE, el Jurado Evaluador designado mediante Resolución N° 597-2022-UNS-CFI, integrado por los siguientes docentes:

- Mg. HECTOR DOMINGO BENITES VILLEGAS : PRESIDENTE
- M.Sc. ROBERTO CARLOS CHUCUYA HUALLPACHOQUE : SECRETARIO
- Dr. EDGAR PAZ PEREZ : INTEGRANTE

Y según la resolución decanal N° 041-2023-UNS-FI, se declara expedito al bachiller para dar inicio a la sustentación y evaluación de la Tesis titulada: "EVALUACIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL TANQUE EN LA VELOCIDAD DE VÓRTICE GRAVITACIONAL PARA UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA HIDRAÚLICA" elaborado por el Bachiller de Ingeniería en Energía: SANDOVAL VÁSQUEZ URSUS JHONATAN con código de matrícula N° 201611034, teniendo como asesor al docente Dr. Edgar Paz Pérez, según Resolución Decanal N° 706-2021-UNS-FI, de fecha 30.11.21.

Terminada la sustentación del Bachiller, respondió las preguntas formuladas por los miembros del jurado y el público presente.

El Jurado después de deliberar sobre aspectos relacionados con el trabajo, contenido y sustentación del mismo y con las sugerencias pertinentes, en concordancia con el artículo 103° del Reglamento General de Grados y Títulos de la Universidad Nacional del Santa, declara:

BACHILLER	PROMEDIO	PONDERACIÓN
SANDOVAL VÁSQUEZ URSUS JHONATAN	Diecisiete (17)	BuENO

Siendo las doce horas del mismo día, se da por terminado el acto de sustentación, firmando los integrantes del jurado en señal de conformidad.


Mg. Hector Domingo Benites Villegas
PRESIDENTE


M.Sc. Roberto Carlos Chucuya Huallpachoque
SECRETARIO


Dr. Edgar Paz Perez
INTEGRANTE

DEDICATORIA

A Dios por su acompañamiento y protección en aún este camino de formación profesional.

A mis padres por su ánimo, paciencia y cuidado constante.

A mis hermanas por creer en mí, alentarme y protegerme.

Y por último y no menos importante a mí misma por mantenerme perseverante y fuerte.

N. D. G. CH.

A mis padres y hermano por su ánimo y firme apoyo durante toda mi formación profesional.

A mis familiares tales como mis tíos quienes con su aliento me ayudaron a sobrellevar los momentos difíciles.

A mis amigos por creer en mí haciendo las cosas más llevaderas y divertidas.

Y a Dios que me dio la fuerza y el empuje necesario para poder salir adelante.

U. J. S. V.

RECONOCIMIENTO

Al Dr. Edgar Paz Pérez por su asesoría
inestimable en la culminación de la tesis.

Al M. Sc. Roberto Carlos Chucuya
Huallpachoque por su constante orientación desde
las bases hasta la terminación de la tesis.

Y a nuestros maestros de la E. P. de Ingeniería en
Energía por su notable labor desarrollada.

Atentamente,

N. D. G. CH.

U. J. S. V.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	7
ABSTRAC.....	8
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN.....	9
1.1. Realidad Problemática	10
1.2. Enunciado del Problema	11
1.3. Antecedentes	11
1.4. Justificación	15
1.5. Hipótesis	15
1.6. Objetivos.....	15
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.....	17
2.1. Energías Renovables.....	18
2.2. Centrales Hidroeléctricas	19
2.2.1. Clasificación de pequeñas Centrales Hidroeléctricas según su capacidad	19
2.2.2. Tipos de Centrales Hidroeléctricas.....	20
2.3. Vórtice Gravitacional.....	22
2.3.1. Micro – Centrales Hidroeléctricas basado en Vórtice Gravitacional	26
2.4. ANSYS	27
2.4.1. Aplicaciones de ANSYS	28
2.4.2. Simulación de dinámica de fluidos computacionales (CFD)	29
2.4.3. Modelos y Ecuaciones de la CFD.....	30
1.6.1. Mallado de Geometría	32
CAPÍTULO III: MATERIALES Y MÉTODOS.....	37
3.1. Material.....	38
3.2. Metodología de Cálculo: Diseño de canal y tanque de circulación	38
3.2.1. Diseño de tanque de circulación.....	39
3.2.2. Diseño de Canal de tanque	40

3.3.	Establecimiento de Mallado de Geometrías	43
3.3.1.	Configuración global de la malla.....	43
3.4.	Configuración de Ansys CFX.....	44
3.4.1.	Configuración del dominio	44
3.4.2.	Configuración de las condiciones de borde.....	45
3.4.3.	Configuración de solver.....	46
3.5.	CFD POST	47
CAPITULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIONES		48
4.1.	Resultados de diseño.....	49
4.2.	Determinación de Mallado de estructuras	54
4.3.	Resultados de Simulación Numérica	57
CONCLUSIONES.....		64
Recomendaciones		66
Referencias Bibliográficas y Virtuales		67
ANEXOS.....		69

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 21 Esquema de proyecto eléctrico de pasada.....	21
Figura 22 Esquema de proyecto eléctrico de embalse.....	22
Figura 23 Formación de vórtice forzado	23
Figura 24 Formación de un vórtice libre	24
Figura 25 Velocidades de un vórtice cilíndrico.....	25
Figura 6 Velocidades de un vórtice espiral	25
Figura 26 Modelo teórico de un vórtice compuesto o Rankine.....	26
Figura 8 Malla estructurada.....	33
Figura 9 Malla no estructurada.....	34
Figura 10 Parámetros de calidad de elemento	35
Figura 11 Relación de aspecto de celdas de mallado	36
Figura 12 Valores de Oblicuidad.....	36
Figura 13 Software de simulación Ansys Workbench 2022 R1.....	38
Figura 14 Gráfica de selección de potencia.....	39
Figura 15 Interfaz CFD Post Resultados	47
Figura 16 Selección de potencia de diseño.....	49
Figura 17 Mallado de tanque cilíndrico.....	54
Figura 18 Mallado de tanque cónico	55
Figura 19 Resultados de imbalances - tanque cilíndrico	57
Figura 20 Resultados de Imbalances - Tanque cónico	58
Figura 21 Resultados CFD-POST - Tanque cilíndrico.....	60
Figura 22 Resultados CFD-POST - Tanque cónico	60
Figura 23 Plano corte transversal - Tanque cilíndrico.....	61
Figura 24 Plano corte transversal - Tanque cónico	62

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Valores de diseño según potencia demanda	40
Tabla 2 Secciones hidráulicas óptimas	41
Tabla 3 Valores referenciales de configuración de dominio	44
Tabla 4 Criterios de configuración de fluido	45
Tabla 5 Valor coeficiente de tensión superficial	45
Tabla 6 Valores de condiciones de borde	46
Tabla 7 Selección de dimensiones para diseño de simulación	50
Tabla 8 Valores de diseño para sistema de generación con tanque cilíndrico	53
Tabla 9 Valores de diseño para sistema de generación con tanque cónico	53
Tabla 10 Valores de calidad de malla de sistemas de generación en análisis	55
Tabla 11 Resultados de imbalances de sistema de generación con tanque cilíndrico....	57
Tabla 12 Resultados de imbalances de sistema de generación con tanque cónico.....	58

RESUMEN

El presente trabajo de investigación se orienta a la evaluación de la velocidad de vórtice en un sistema de generación hidráulico tipo vórtice gravitacional, planteándose así como objetivo el analizar la velocidad de vórtice en dos tipos de geometrías de tanque, una cilíndrica y otra cónica, el diseño de las estructuras de los sistemas de generación a analizar serán extraídas de la recopilación de información de diversos estudios precedentes a este trabajo de investigación que proporcionaran las nociones correctas para el diseño, posteriormente se plasmarán los diseños en el software Autodesk Inventor 2021, que luego pasaran a ser exportados al software simulación Ansys Workbenck 2022 R1 donde estableceremos los criterios de evaluación para la realización numérica de la experimentación. Finalmente, los datos obtenidos nos permitirán realizar las discusiones pertinentes para la determinación de la geometría óptima para un máximo aprovechamiento de la energía cinética del vórtice gravitacional.

Palabras clave: Simulación, CFX, vórtice gravitacional, velocidad de vórtice, geometría de tanque

ABSTRAC

The present research work is oriented to the evaluation of the vortex velocity in a gravitational vortex hydraulic generation system. The objective is to analyze the vortex velocity in two types of tank geometries, one cylindrical and the other conical, The design of the structures of the generation systems to be analyzed will be extracted from the collection of information from various studies preceding this research work that will provide the correct notions for the design, then the designs will be captured in the Autodesk Inventor 2021 software, which will then be exported to the simulation software Ansys Workbenck 2022 R1 where we will establish the evaluation criteria for the numerical realization of the experimentation. Finally, the data obtained will allow us to carry out the pertinent discussions for the determination of the optimal geometry for a maximum use of the kinetic energy of the gravitational vortex.

Keywords: Simulation, CFX, gravitational vortex, vortex velocity, tank geometry.

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1. Realidad Problemática

En el aspecto internacional la energía es el pilar del desarrollo de un país, y debido a esto, cada vez la demanda de energía aumenta. El mundo en la actualidad se ha mantenido emergente gracias a la energía producida por el consumo de combustibles fósiles baratos y de mayor energía como el carbón, el petróleo y el gas. Estas fuentes de energía no renovables han mejorado el nivel de vida de millones de personas, pero su rápida explotación ha traído consecuencias adversas al medio ambiente, además el acceso desigual a la energía en todo el mundo ha creado tensiones políticas y sociales como resultado de una dependencia económica de los países productores de petróleo. Si bien es cierto, no todo un sistema de generación está basado en el uso de combustibles, en algunos casos se opta por la generación eléctrica mediante grandes hidroeléctricas que necesitan abundantes cantidades y almacenamiento de agua sin mencionar que estos tipos de generación de energía requiere de grandes inversiones que solamente satisface la demanda en zonas donde sea viable instalar estos grandes sistemas de distribución de energía eléctrica, no llegando a satisfacer la demanda energética en su totalidad. En la búsqueda de nuevas alternativas de generación que puedan satisfacer esta demanda y tengan un menor impacto ambiental, se presenta la tecnología de generación hidráulica tipo vórtice gravitacional, la cual a diferencia de otros tipos de generación hidráulica requiere de poca altura, bajo caudal, y no necesita almacenamiento de agua. Podría ser instalado a orillas de un pequeño río, además de ser amigable con el medio ambiente. Puede satisfacer fácilmente la demanda energética de una pequeña comunidad, que generalmente son estas las que no cuentan con energía eléctrica debido a su remota ubicación geográfica.

En el aspecto nacional, en nuestro país aún se cuenta con población sin acceso a energía eléctrica, por lo que se requiere el planteamiento de nuevos proyectos para cubrir esta demanda, una alternativa viable es la generación hidráulica tipo vórtice gravitacional, ya que cuenta con la facilidad de instalación y generación para zonas de difícil acceso, en nuestro país solo se cuenta con un proyecto con este tipo de generación realizado por el Centro de Investigación de Tecnología Apropriada Kadagaya, ubicada en la ciudad de Chanchamayo, Junín, Perú.

Este centro de Investigación Kadagaya (2020), hace referencia a la falta de optimización del sistema, que requieren estudios para optimización debido a la novedad de la tecnología de generación.

Es de conocimiento que la hidroeléctrica de vórtice de agua gravitacional, es un sistema relativamente nuevo que aún no está optimizada (Alzamora, Glasscock y Whitehouse, 2020).

Debido a esto en el presente trabajo se pretende analizar un campo de posible optimización mediante el estudio de la velocidad de vórtice en geometrías de tanque diferentes, geometría cilíndrica y cónica, para así determinar el diseño adecuado para este tipo de sistemas que nos permitan aprovechar al máximo la energía cinética producida por el vórtice.

1.2. Enunciado del Problema

¿Qué geometría de tanque proporciona la mayor velocidad en un sistema de generación tipo vórtice gravitacional?

1.3. Antecedentes

(Haro & Sanaguano, 2016), en su tesis titulada “Estudio del comportamiento de fluidos de una micro central hidroeléctrica gravitacional de vórtice, mediante la dinámica computacional de fluidos de alto rendimiento, para la generación de energía eléctrica y la implementación de un prototipo”, tuvo como objetivo modelar un sistema de vórtice gravitacional en el software ANSYS y seguidamente implementaron un prototipo en función del análisis previamente realizado. Posteriormente realizaron una guía para la modelación de la dinámica computacional de fluidos en el módulo CFX de ANSYS y finalmente hicieron un artículo técnico de acuerdo a las normativas institucionales. Obtuvieron como resultado que el comportamiento del fluido es de forma turbulenta en los primeros 3 segundos, concluyendo así que después se estabiliza formando un vórtice estable dentro del cilindro, y se mantiene turbulento en la sección de entrada.

(Peña, 2013), en su tesis titulada “Ingeniería de detalle y construcción de un sistema de hidrogenación basado en vórtice gravitacional”, tuvo como objetivo realizar el diseño analítico de un tanque de vórtice gravitacional, que fue anexado al banco hidráulico en el Departamento de Geología, Minas, e, Ingeniería Civil de la Universidad Técnica Particular de Loja. Así como plantear el diseño de cinco variantes para el módulo de turbinas que operaría en el tanque de vórtice gravitacional. Seguidamente dio paso a la construcción del tanque para el sistema de

hidrogeneración basado en vórtice gravitacional y prosiguió con el proceso de ponderación del comportamiento de la circulación o rotación del flujo en el tanque, empleando relaciones cuantitativas y cualitativas sencillas. Luego procedió con el proceso de fabricación de cinco modelos experimentales de turbinas y del banco de soporte a ser probadas en el tanque de vórtice gravitacional, finalmente describió la metodología de obtención de las curvas de operación de cada uno de los 5 modelos experimentales de turbinas diseñados y construidos para el sistema de hidrogeneración basado en vórtice gravitacional instalado en la UTPL. Obteniendo como resultado que la instalación de las turbinas a 0.30m del fondo del tanque presenta una mayor potencia efectiva, concluyendo finalmente que la etapa de diseño del tanque de vórtice gravitacional se convierte en el parámetro de mayor importancia tomando en cuenta que es aquí donde ocurre la transformación de la energía.

(Ortega & Romero, 2014), en su tesis titulada “Generación eléctrica y monitoreo de un sistema de hidrogeneración basada en vórtice gravitacional”, se plantearon como objetivo realizar el pre-diseño del bloque de generación, definiendo la máquina eléctrica a utilizar. Seguidamente se seleccionaron la estructura y los elementos de la transmisión mecánica requerida para acoplar el eje de la turbina y el eje del generador. Instalado el bloque de generación eléctrica, diseñaron el módulo de monitoreo constituido por cinco módulos; el módulo de adquisición de datos, módulo de procesamiento, módulo de comunicación, módulo de visualización, y, módulo de registro de data. Finalmente, se evaluó en forma preliminar el desempeño del bloque de generación. Concluyendo así que el campo magnético en el generador eléctrico seleccionado puede ser considerado constante, y, que en el proyecto de aprovechan los recursos del banco hidráulico del Laboratorio de Hidráulica del Departamento de Geología y Minas, e, Ingeniería Civil de la UTPL, de decidió controlar la energía generada en función de la regulación de la velocidad de rotación del generador, a través de la variación del caudal turbinado.

Rojas (2014), en su tesis titulada “Diseño de una central mini hidráulica basada en vórtice”, tuvo como objetivo el diseño de un prototipo de estructura capaz de generar un vórtice gravitacional hidráulico, se diseñó un modelo a escala del prototipo original de la estructura de vórtice gravitacional y se prosiguió a su construcción. Luego se fabricó el grupo de turbinas para el modelo a escala y finalmente se realizó pruebas

de laboratorio del sistema. Obteniendo como resultado que la estructura diseñada posee la ventaja constructiva de causar la menor perturbación al flujo de aproximación al tanque de circulación, lo que garantiza un ingreso de agua controlada y sin turbulencias considerables. Además, se concluyó que, desde el punto de vista práctico, el fondo cónico incorporado a la estructura del tanque de circulación facilita una descarga directa, ya que, no permite una recirculación de flujo en el fondo del tanque.

Loaiza (2015) en su tesis titulada “Generación eléctrica basada en vórtice gravitacional, una opción para la provisión sustentable de energía eléctrica en la zona rural del cantón”, se planteó como objetivo describir el marco conceptual y matemático para el diseño y construcción de un sistema de hidrogenación basado en vórtice gravitacional conformado por un tanque, paletas, y el subsistema de generación eléctrica. El sistema se implementó y probó en el banco hidráulico del Laboratorio de Hidráulica del Departamento de Geología, Minas, e, Ingeniería Civil de la UTPL. Los resultados obtenidos en el subsistema de generación eléctrica fueron optimizados el trabajo de titulación “Diseño, construcción e implementación de un bloque de generación eléctrica y un módulo de monitoreo para un sistema de hidrogenación basada en vórtice gravitacional”, desarrollado por Ortega y Romero (2014). En este trabajo, se diseñó y construyó un generador eléctrico tipo asíncrono monofásico de fase dividida (GAM-FD), capaz de generar voltajes senoidales con errores de no más de 0.01% respecto a la senoide perfecta, demostrando la capacidad de construcción de tales máquinas en la provincia de Loja. El diseño del tanque de circulación fue mejorado como resultado del trabajo de titulación “Diseño de una central minihidráulica basada en vórtice gravitacional” de Rojas (2014). Llegando a la conclusión que las micro centrales de generación eléctrica basadas en vórtice gravitacional son una opción interesante para la provisión de energía a baja escala, en las condiciones de la zona rural del cantón Loja.

Guevara (2015) en su tesis titulada “Efecto del diámetro de salida en un tanque cónico en la eficiencia de una Turbina de Vórtice Gravitacional para pico-generación”, se planteó determinar, mediante análisis de dinámica de fluidos computacional (CFD por sus siglas en inglés) el efecto en la eficiencia del diámetro del orificio de salida del tanque cónico de una TVG. Para el desarrollo de este estudio,

se seleccionan con base a la literatura, un rotor Darrieus tipo H y tres (3) turbinas de tanque cónico con relación de diámetro de tanque y diámetro de salida de 14%, 16% y 18% (caso A, B y C respectivamente), los resultados obtenidos muestran que el caso C generó un mayor momento torsor 0.178 Nm con una eficiencia del 79 %, por otro lado, el caso A y B generaron un momento torsor de 0.118Nm y 0.153Nm, además presentaron eficiencias del orden del 52 y 68 % aproximadamente, llegando así a la conclusión de que mayor diámetro de salida más fuerte será la formación del vórtice gravitacional, una buena formación del vórtice evita formación de fluidos de recirculación que producen pérdidas hidráulicas.

Bonilla y Calderón (2019) en su tesis titulada “Análisis del impacto en la variación de las características geométricas de canales de turbinas de vórtice mediante ANSYS CFX”, se plantea como objetivo analizar el efecto de la variación de las características geométricas de la cuenca de una turbina y analizar los resultados obtenidos por el programa Ansys CFX, para el desarrollo del estudio los autores consideraron exponer los conceptos básicos que involucran las máquinas hidráulicas, los fenómenos hidráulicos como son los vórtices y finalizando con el funcionamiento del software CAE empleado para este trabajo (Ansys CFX) entre otros conceptos. Más adelante se observa el proceso de realización de las simulaciones desde la selección del modelo de referencia, pasando por el proceso enmallado y de asignación de los parámetros y las condiciones de borde. Obteniendo como resultado, que la variación de la velocidades depende del cono de descarga de tanque, dando así variaciones de aumento de velocidad y disminución de presión. Concluyendo así que el aumento del diámetro de desagüe tiene una relación directa con la formación del vórtice ya que para diámetros de desagüe superiores a 300 mm en el caso del modelo de fondo plano y diámetros de desagüe superiores a 350mm en el caso del prototipo de fondo cónico el fluido deja de comportarse como un vórtice por lo que los valores de energía cinética que podrían obtenerse en esos escenarios es muy inferior en comparación a cuencas de desagües inferiores, ciertamente esto representa un factor delimitante ya que con estos resultados se puede trabajar en torno a evitar superar estos valores de diámetro.

1.4. Justificación

El sistema de generación tipo vórtice gravitacional tiene alta relevancia en el aspecto tecnológico, ya que este sistema nos brinda una visión distinta de generación de energía eléctrica, con respecto al mini – hidro convencionales. Su fácil adaptación para zonas de difícil acceso, y el aprovechamiento de la energía hidráulica por medio de la formación de un vórtice forzado debido a la estructura del sistema, hacen que requieran alturas mínimas de 1 a 5 metros, y flujos de agua altos, para la correcta generación de energía eléctrica. Es una solución para minimizar el impacto medioambiental de algunas grandes presas que pueden alterar el discurrir del río o retener sedimentos y nutrientes fluviales necesarias. Resaltando que una red de turbinas de vórtice gravitacional produce la misma energía que una presa pequeña.

En un aspecto social el estudio de este nuevo sistema de generación, permitiría llevar energía eléctrica a poblaciones de difícil acceso, donde otros sistemas de generación de energía sean inviables, gracias a su practicidad de operación y costos de mantenimiento mínimos.

Por ende, la necesidad de investigar y mejorar el accionar de esta prometedora propuesta, mediante el estudio de la velocidad de vórtice en dos distintas geometrías de tanque, que permitirá determinar con certeza qué tipo de geometría de tanque es la adecuada para un máximo aprovechamiento de la energía de vórtice forzado formado por la estructura del sistema de vórtice gravitacional.

1.5. Hipótesis

La velocidad de vórtice en un tanque de geometría cónica es mayor a la velocidad de vórtice en un tanque de geometría cilíndrica.

1.6. Objetivos

Objetivo general

Determinar la influencia de la geometría cilíndrica y cónica del tanque en la velocidad de vórtice, para un sistema de generación hidráulica tipo vórtice gravitacional.

Objetivos específicos

- Determinar las dimensiones del tanque cilíndrico y cónico del sistema de vórtice gravitacional.

- Diseñar el tanque cilíndrico y cónico mediante el uso de la herramienta CAD Autodesk Inventor 2021.
- Establecer el mallado del tanque cilíndrico y cónico mediante el uso del software ANSYS 2022 R1.
- Realizar la simulación numérica mediante el uso de la herramienta Fluid Flow CFX del software ANSYS R1a fin de evaluar el comportamiento del fluido en los tanques cónico y cilíndrico.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. Energías Renovables

Las energías renovables son aquellas que se producen a partir de fuentes naturales de energía teóricamente inagotables, ya sea por la inmensa cantidad de energía que contienen, o debido a que son capaces de regenerarse a través de un ciclo natural no alterado. En el contexto del planeta tierra, el sol es el génesis de casi todas las energías renovables, debido a que, su energía calorífica produce en la tierra las diferencias de presión que dan origen a los vientos, fuente de energía eólica; el sol es el principal responsable del ciclo del agua, por lo que, la energía hidráulica depende del sol; además, las plantas hacen uso de la energía solar para realizar la fotosíntesis y de esta manera vivir y crecer; toda esa materia vegetal es la biomasa, la cual es un recurso potencial para generar energía. Por último, el sol es aprovechado directamente a través de las energías solares, tanto térmica como fotovoltaica. (Rojas, 2014).

El pronóstico de utilización de la energía renovable a futuro es a gran escala, y tiene una gran importancia en la participación de elevar el nivel de vida de las poblaciones aún en desarrollo y sobretodo en combatir el calentamiento global con el propósito de reemplazar a los combustibles fósiles convencionales. En la actualidad gran parte de la energía renovable se encuentra en constante investigación y se proyecta a un gran crecimiento de la industria.

Entre las energías renovables que mas destacan se encuentran:

Energía hidráulica: La energía hidráulica, es la energía que se obtiene al aprovechar la energía potencial y cinética del agua. De forma indirecta tiene al sol como origen. La radiación solar evapora parte del agua de los mares, lagos y ríos. El vapor asciende por la atmosfera, arrastrado por masas de aire cálido. Cuando el aire se enfría, no puede contener el vapor de agua y entonces se condensa. En ese momento se alcanza el punto de rocío, lo cual da origen a la formación de nubes; que posteriormente se transformarán en lluvia o en nieve, lo cual, asegura la perennidad del ciclo hidrológico. Luego, el efecto de la gravedad terrestre permite aprovechar los caudales de agua descendentes a través de las centrales hidroeléctricas, las cuales transforman en energía eléctrica el movimiento de turbinas, que se genera al precipitar una masa de agua entre dos puntos a diferente altura (Rojas, 2014).

Energía Solar: Es aquella energía que utiliza la radiación solar como fuente para la generación eléctrica. Los rayos solares por medio de la radiación solar es convertida

en energía térmica para luego producir electricidad a través de un ciclo de vapor; otro modo de aprovechar esta energía es mediante celdas fotovoltaicas que mediante la estimulación de estas generan corriente eléctrica.

Energía eólica: La energía eólica aprovecha las corrientes de aire que son aprovechadas por las grandes hélices de las turbinas para transformar esta energía mecánica en energía eléctrica. En la actualidad la energía eólica es una de las principales energía renovables en crecimiento.

Energía de biomasa: Por lo general esta energía hace uso de los residuos de las sustancias que forman parte de los seres vivos, para producir energía. La biomasa se puede aprovechar directamente a través de la combustión o puede ser transformada en alimentos o combustibles (Jarabo & Fernández, 1999)

2.2. Centrales Hidroeléctricas

Este tipo de centrales tiene como uso de recurso el agua de ríos y/o lagos para la producción de energía eléctrica, consideradas entre las principales centrales de gran capacidad para la generación de energía eléctrica.

Por lo general, la inversión para la construcción de una de estas grandes centrales es considerable, pero es compensada a largo plazo por los bajos costes de operación y mantenimiento. Es por eso que las centrales hidroeléctricas son consideradas como las de mayor rentabilidad.

2.2.1. Clasificación de pequeñas Centrales Hidroeléctricas según su capacidad

En la actualidad se ha optado por la implementación de pequeñas centrales hidroeléctricas para satisfacer la demanda de energía en zonas de difícil acceso, y están clasificadas según su capacidad.

Según la Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial (ONUUDI) se opta por la siguiente clasificación (Escobar, 2020):

Nano o Pico Centrales: Centrales cuya potencia de generación es inferior a 1kW. Fundamentalmente utilizadas para suministro familiar y aplicaciones mecánicas.

Micro Centrales: Corresponden a las centrales cuya potencia de generación está entre 1kW y 100kW. Su uso principal en el mundo ha sido abastecer redes eléctricas comunales en sectores aislados.

Mini Centrales: Son las que poseen una capacidad de generación entre los 100kW y los 1.000kW. Estas se han usado en el mundo para abastecer varias comunidades cercanas como también para la conexión a la red de energía nacional.

2.2.2. Tipos de Centrales Hidroeléctricas

Las centrales hidroeléctricas, y dentro de ellas las mini y micro-centrales hidroeléctricas, se encuentran condicionadas por las características que presente el lugar en donde serán ubicadas (Rojas,2014).

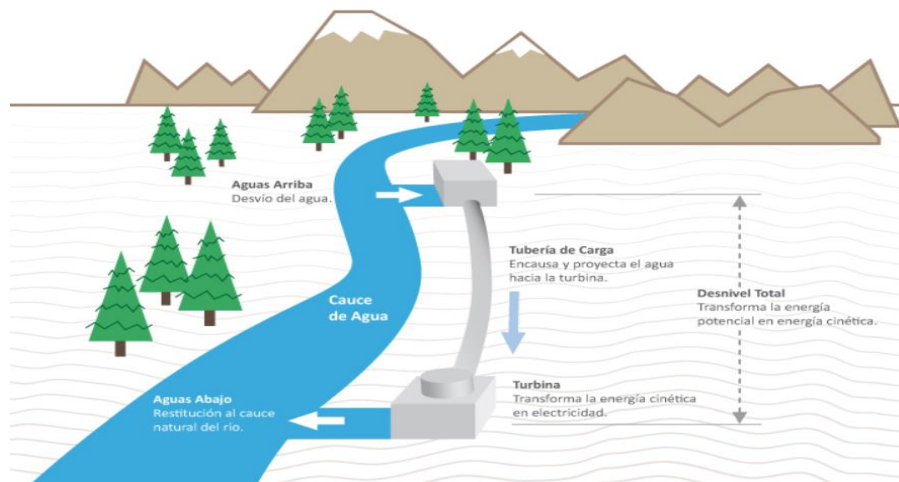
Clasificándose así en , centrales de pasada y centrales de pie de presa.

Centrales de pasada

Son centrales que no poseen reservas de agua, por esta razón, el caudal con el que funcionan oscila según las estaciones del año. En la temporada en que las precipitaciones son abundantes, son capaces de alcanzar su máxima potencia. Por otro lado, durante la época seca la potencia disminuye en función del caudal. (Rojas,2014).

Figura 1

Esquema de proyecto eléctrico de pasada



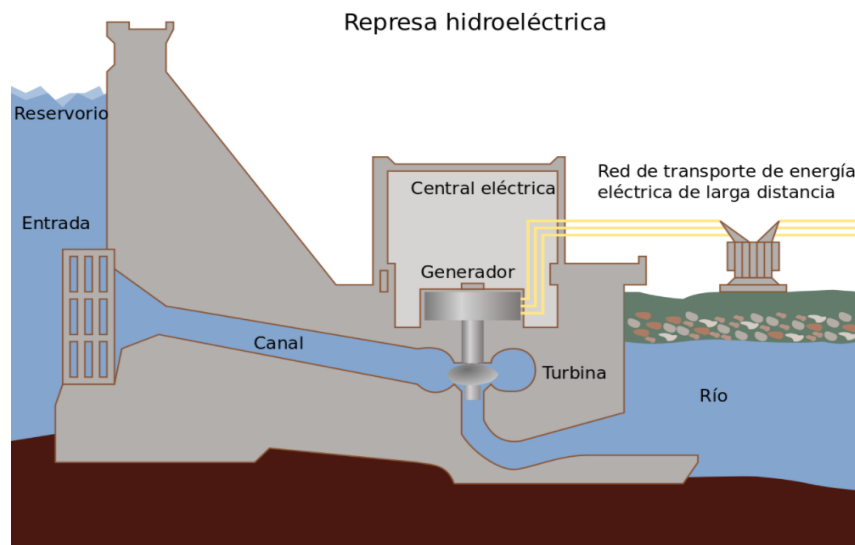
Nota. La imagen representa el flujo de funcionamiento de una central hidroeléctrica de pasada, por Goodenergy (<http://www.goodenergy.cl/images/central-paso.png>)

Centrales de pie de presa

Centrales situadas en la parte baja de embalses destinados a usos hidroeléctricos, por lo que se logra aprovechar de esta manera el desnivel creado por la presa, generalmente este tipo de centrales son de grandes capacidades de generación.

Figura 2

Esquema de proyecto eléctrico de embalse



Nota. La imagen representa el flujo de funcionamiento de una central hidroeléctrica de embalse. Extraído de (http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hydroelectric_dam-es.svg)

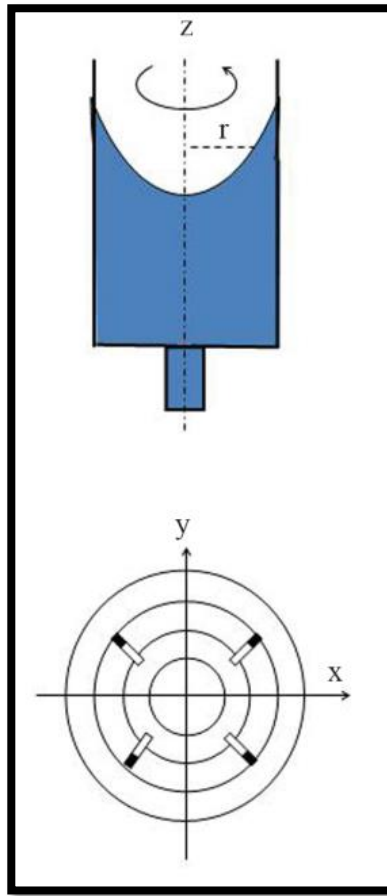
2.3. Vórtice Gravitacional

En dinámica de fluidos, se define a un vórtice como el movimiento de un fluido a lo largo de un camino encorvado, caracterizado por el patrón de flujo curvo. Cuando el fluido fluye entre las líneas de flujo encorvadas, la fuerza centrífuga es aplicada, y es contra-balanceada por la fuerza de presión que actúa sobre la dirección radial (Loaiza Jaramillo, 2015)

En una primera clasificación, los vórtices son forzados o libres. Un vórtice forzado se define como aquel en el que un torque externo es requerido para rotar el fluido. En este tipo de vórtice, las partículas del fluido rotan con una velocidad angular constante. El ejemplo más común de vórtice forzado, es un cilindro vertical que contiene un líquido rotando sobre su eje central, con cierta velocidad angular y se ilustra a continuación en la Figura 3.

Figura 3

Formación de vórtice forzado

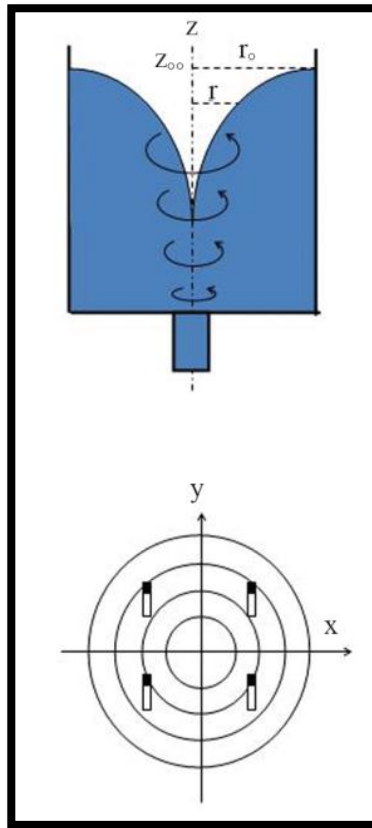


Fuente. Revista Brasileira de Ensino de Física

Un vórtice libre es aquel en el que el fluido rota sin necesidad de una fuerza externa. El movimiento se puede deber a una rotación previamente impartida a las partículas del fluido, o, a alguna acción interna. Algunos ejemplos de vórtices libres son el flujo de un líquido alrededor de un quiebre encorvado, el remolino en un río, y el flujo de un líquido a través del fondo de un contenedor y se ilustra a continuación en la Figura 4.

Figura 4

Formación de un vórtice libre

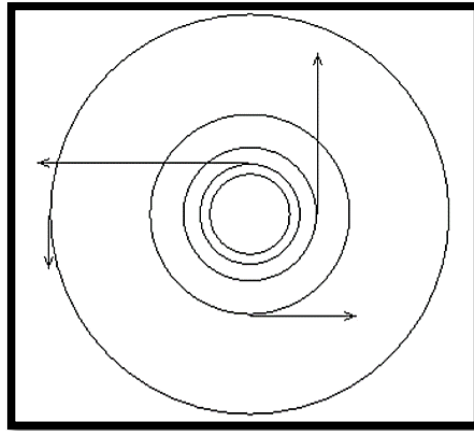


Fuente. Revista Brasileira de Ensino de Física

En otra clasificación, los vórtices son cilíndricos o espirales. En un vórtice cilíndrico el fluido rota en círculos concéntricos (ver Figura 5), mientras que en un vórtice espiral el fluido se mueve en espiral hacia adentro o hacia afuera (ver Figura 6). El movimiento de los vórtices espirales se obtiene combinando un vórtice cilíndrico con un movimiento radial.

Figura 5

Velocidades de un vórtice cilíndrico

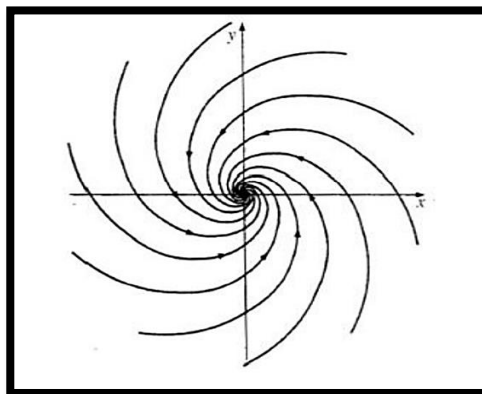


Fuente.

https://en.wikipedia.org/wiki/Vortex#/media/File:Vortex_in_draining_bottle_of_water.jpg

Figura 6

Velocidades de un vórtice espiral



Fuente.

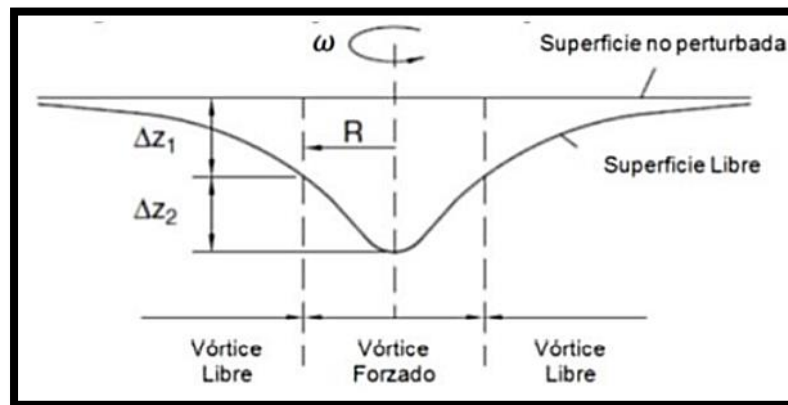
<http://galileo.phys.virginia.edu/classes/311/notes/fluids1/fluids11/node8.htm>

2.3.1. Micro – Centrales Hidroeléctricas basado en Vórtice Gravitacional

La micro-central hidroeléctrica de vórtice gravitacional es una nueva tecnología que aprovecha de manera eficiente la energía de rotación de un vórtice gravitacional hidráulico que presenta las características de un vórtice compuesto o vórtice Rankine (ver Figura 7), en el que el flujo próximo al núcleo se comporta como un sólido rígido, mientras el resto del flujo se comporta como un vórtice libre, generado por el flujo tangencial de la garganta del inductor de vórtice en contacto con la cámara cilíndrica estacionaria de vórtice (Rojas, 2014).

Figura 7

Modelo teórico de un vórtice compuesto o Rankine



Fuente.

https://www.ucursos.cl/usuario/c1f33623c53cd7f58fd77ef459693d6c/mi_blog/r/Estudio_de_la_formacion_de_vortices.pdf

Este vórtice es utilizado para mover una turbina hidráulica que se encuentra ubicada en la parte inferior del tanque contenedor de vórtice, la energía mecánica producida por el movimiento de esta turbina es aprovechada para la generación de energía eléctrica.

En teoría, la potencia eléctrica generada por una micro-central hidroeléctrica basado en vórtice gravitacional, puede ser determinada por la siguiente ecuación. (Mulligan & Hull, 2010):

$$P(\text{vórtice}) = \rho(\text{kg/m}^3) \times g(\text{m/s}^2) \times Z_v(\text{m}) \times Q(\text{l/s}) \dots\dots\dots(1)$$

Donde:

P: potencia (W)

ρ: densidad del agua

g: gravedad

Z_v: altura de vórtice dentro del tanque

Según Mulligan y Hull (2010), nos dice que, la mejor manera de extraer energía de un vórtice es que este cuente con una velocidad tangencial fuerte.

La velocidad angular que es la que generará la formación del vórtice estará definida de la siguiente manera:

$$V(\text{m/s}) = r(\text{m}) \times \omega(\text{rad/s}) \dots\dots\dots(2)$$

Donde:

V: velocidad tangencial

r: radio de vórtice

ω: velocidad angular

2.4. ANSYS

Ansys es un software de simulación CAE donde se pueden plantear una gran variedad de fenómenos físicos presentes en la ingeniería, este software ayuda a su usuario a entender la situación gracias a una serie de pasos en los cuales parametriza su objeto de interés y obtiene gracias a ello la solución de ecuaciones necesarias para la convergencia del problema. Ansys le permite a su usuario interactuar con sus resultados a través de su matriz gráfica, el usuario gracias a ello puede entender fácilmente el fenómeno presentado, copilar información para ser presentada y reflexionar formas de enriquecer su proceso u estudio. Los usuarios de Ansys van desde ingenieros que lo utilizan como herramienta de cálculo en la industria hasta estudiantes o profesores que lo ven como una herramienta indispensable para

visualizar situaciones básicas necesarias que el estudiante comprenda, por otro lado, Ansys es una herramienta que facilita que el estudiante o profesor proponga sus propios estudios a desarrollar (Bonilla Correa & Calderón Reyes, 2019).

Ansys es un ecosistema de programas CAE para diseño, análisis y simulación de partes por elementos finitos, incluye las fases de preparación de meshing o malleo, ejecución y post proceso, el programa ejecuta análisis de piezas sometidas a fenómenos físicos usadas en ingeniería y diseño mecánico, puede resolver problemas físicos sometidos a esfuerzos térmicos, fluidos, vibración y aplicaciones específicas, brevemente se describen sus módulos principales por disciplina.

2.4.1. Aplicaciones de ANSYS

Ansys es una plataforma de software desde donde se crean los proyectos de análisis en diferentes disciplinas, donde se despliega gráficamente el intento de la simulación en ingeniería y se establecen las relaciones entre fenómenos físicos y sus módulos incluyendo multi física.

Entre sus aplicaciones en la industria podemos mencionar lo siguiente:

- Aeroespacial
- Automotor
- Defensa
- Energía
- Cuidado de la salud
- Alta tecnología
- Equipo industrial

En un campo específico de los tipos de simulación, mencionamos los siguientes:

- Análisis de Fluidos Dinámicos
- Multifísica en Ansys
- Análisis estructural mecánico
- Dinámica explícita
- Ingeniería Electromagnética
- Turbo Sistemas

Para esta investigación nos centraremos en la simulación de Análisis de Fluidos Dinámicos, donde se evaluará la velocidad del vórtice, mediante la simulación de paso de agua por las estructuras de evaluación (ANSYS, 2022).

2.4.2. Simulación de dinámica de fluidos computacionales (CFD)

La dinámica de fluidos computacional (CFD) de Ansys, han sido validados y son muy capaces en poder de cómputo superior y resultados precios, ayuda a reducir el tiempo y los esfuerzos de desarrollo mientras se mejora el rendimiento y la seguridad de su producto (ANSYS, 2022).

En la actualidad se tiene tres softwares CFD, para el análisis de datos, los cuales se detalla a continuación:

Ansys Fluent

Con Ansys Fluent, puede crear modelos físicos avanzados y analizar una variedad de fenómenos de fluidos, todo un espacio personalizable e intuitivo, entre los campos de trabajo que se puede analizar tenemos los siguientes:

- Flujos de trabajo basado en tareas
- Modelado de turbulencia
- Flujos monofásicos y multifásicos
- Modelos de pedidos reducidos
- Acústica
- Combustión
- Transferencia de calor conjugada
- Malla superpuesta
- Interacción fluido-estructura

Ansys CFX

CFX es el software CFD estándar de oro cuando se trata de aplicaciones de turbomaquinaria. Tanto el solucionador como los modelos están integrados en una GUI moderna, intuitiva y flexible, con amplias capacidades de personalización y automatización mediante archivos de sesión, secuencias de comandos y un potente lenguaje de expresión. La computación de alto rendimiento altamente escalable ayudará a acelerar las simulaciones que

incluyen bombas, ventiladores, compresores y turbinas, entre lo que se puede desarrollar tenemos (ANSYS, 2022):

- Configuraciones Turbo optimizaciones
- Métodos de balance armónicos
- Modelos avanzados de vapor y gas real
- Interacción rotor – estator
- Métodos de fila de álabes transitorios
- Enfriamiento de la película de la hoja
- Automatización del mapa del rendimiento

Ansys Chemkin-Pro

Los estándares energéticos actuales exigen altos rendimientos, eficiencia y calidad con un mínimo de subproductos o desperdicios. Ansys Chemkin-Pro es un simulador de cinética química que modela flujos de reacción idealizados y proporciona información sobre los resultados antes de las pruebas de producción. Confiar únicamente en las pruebas para verificar los procesos químicos es prohibitivo, dados los ciclos de diseño más cortos de la actualidad. La simulación efectiva es crítica para diseños rentables y lleva su producto al mercado más rápido (ANSYS, 2022).

- Reacciones de gas y superficie
- Análisis de ruta y reacción
- Deposición de vapor químico
- Simulación de red de reactores equivalentes

El software seleccionado para la evaluación de la investigación, es el Ansys CFX, que a nuestra consideración, muestra interfaz amigable, facilidad para interacción de datos y visualización de los mismos.

2.4.3. Modelos y Ecuaciones de la CFD

Los modelos CFD se basan para sus análisis de simulación en las ecuaciones de conservación de masa, energía y momentum. Estas ecuaciones con derivadas de las ecuaciones de movimiento de Navier-Stokes. El modelo CFD

analiza los distintos escenarios de análisis basado en estas ecuaciones para predecir el comportamiento de un fluido, considerando cualquier tipo de flujo.

Ecuaciones de Navier-Stokes

La teoría básica de la modelación con CFD son las ecuaciones de la dinámica de fluidos de Navier-Stokes, las cuales son usadas para modelar parámetros del flujo de un fluido, como velocidad, temperatura y presión. Los contornos de velocidad pueden ser posteriormente utilizados para trazar las trayectorias de partículas que viajan a través del flujo, por lo que se pueden calcular distribuciones de tiempo de residencia (Xu, 2010).

Las ecuaciones de Navier-Stokes describen el movimiento de pequeñas regiones y/o volúmenes de fluido. Estas ecuaciones surgen de la aplicación de la segunda ley de Newton para el movimiento de fluidos, juntas con el supuesto de que los esfuerzos del fluido son la suma de un término difuso viscoso (proporcional al gradiente de velocidad, más un término de presión.

Las ecuaciones de Navier-Stokes en coordenadas cartesianas para un flujo compresible, se expresan de la siguiente manera (López Rebollar, 2015):

- Ecuación de Conservación de masa

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \dots \dots \dots (3)$$

- Ecuación de Conservación de movimiento (momentum)

$$M_x: \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + u \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + v \frac{\partial(\rho u)}{\partial y} + w \frac{\partial(\rho u)}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \dots \dots (4)$$

$$M_y: \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + u \frac{\partial(\rho v)}{\partial x} + v \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + w \frac{\partial(\rho v)}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \dots \dots (5)$$

$$M_z: \frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + u \frac{\partial(\rho w)}{\partial x} + v \frac{\partial(\rho w)}{\partial y} + w \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z} + \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \dots (6)$$

- Ecuación de Conservación de energía

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\lambda}{\rho C_p} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\lambda}{\rho C_p} \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\lambda}{\rho C_p} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \dots \dots \dots (7)$$

Donde: x , y , z son los ejes del sistema coordenado. u , v y w son las componentes radial, tangencial y vertical de la velocidad. ρ es la densidad del fluido.. T es la cantidad de calor del fluido. C_p es el calor específico del fluido.

1.6.1. Mallado de Geometría

“Una malla es la representación discretizada del modelo de estudio. Está formada por un conjunto de nodos y aristas que unidos forman superficies, los cuales se van colocando sobre nuestro modelo hasta rodearlo por completo. A la unión de todas estas superficies resultante se la denomina malla de superficie. Estas superficies podrán ser triángulos, cuadriláteros o una mezcla de ambos. Las propiedades físicas del fluido serán calculadas en cada nodo de la malla, y se interpolará el valor de estas en las aristas que unan a dos nodos. Podemos afirmar entonces que cuanto mayor sea el número de nodos de nuestra malla, y por tanto de elementos, más se aproximará nuestro resultado a la realidad” (Vehi Sarrazin, 2016).

La generación del mallado de la estructura es fundamental y se realiza mediante la discretización del dominio, pues del resultado de una buena realización de mallado depende la convergencia de los resultados.

Existen dos tipos de mallado:

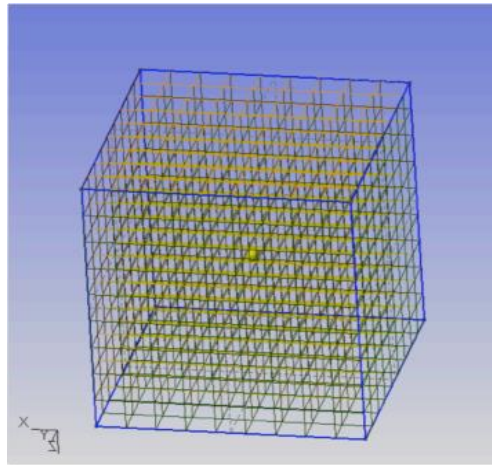
- Mallado estructurado

Este tipo de mallado se caracteriza por tener una estructura con patrón reticular, utilizados fundamentalmente en elementos cuadriláteros o hexaédricos, a partir de ellos pueden generarse también triángulos y tetraedros respectivamente.

La creación de este tipo de mallas tiende a imponer fuertes condiciones sobre el contorno del dominio por lo que en muchos casos no son realizables, o de ser realizable tienden a presentar una muy baja calidad.

Figura 8

Malla estructurada



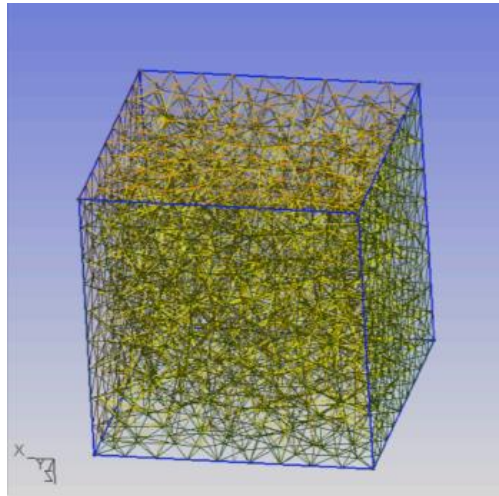
Nota. Representación de formación de celdas en una malla estructurada, por Vehi Sarrazin

- Mallado No estructurado

Este tipo de mallado a diferencia de las estructuradas no presentan un patrón de conectividad predeterminado, ya que esta se adapta al contorno de los elementos. Este tipo de discretización es representado en elementos triangulares o tetraédricos, en los últimos años se han desarrollado técnicas de generación de mallas estructuradas con cuadriláteras o hexaédricas, comumente utilizadas para la evaluación de geometrías complejas.

Figura 9

Malla no estructurada



Nota. Representación de formación de celdas en una malla no estructurada, por Vehi Sarrazin.

Entre los métodos de mallado tenemos:

1. Automático

Es el método de mallado estándar de Ansys que genera un mallado que se adapta a la geometría, podría generar mallas tetra como Hexa de acuerdo a la geometría en evaluación.

2. Tetraédrico

Este tipo de mallado posee dos tipos de algoritmos de mallado que son patch conforming y patch independent, en ambos casos de evaluación generará una malla tetraédrica.

3. Hexa Dominant

Comúnmente este tipo de malla generará una malla hexagonal, esta opción se recomienda para sólidos en los que no puedan realizarse barridos.

4. Sweep

Este tipo de malla genera una malla a partir de dos tipos de elementos (hexaédricos y tetraédricos), aplicada únicamente en cuerpos con barridos identificables.

5. Multizone

Generalmente este tipo de malla tienden a realizar una descomposición automática de la geometría en regiones barribles y regiones libres, permitiendo finalmente entrelazar todas las regiones e una malla hexaédrica pura.

6. Cartesiana

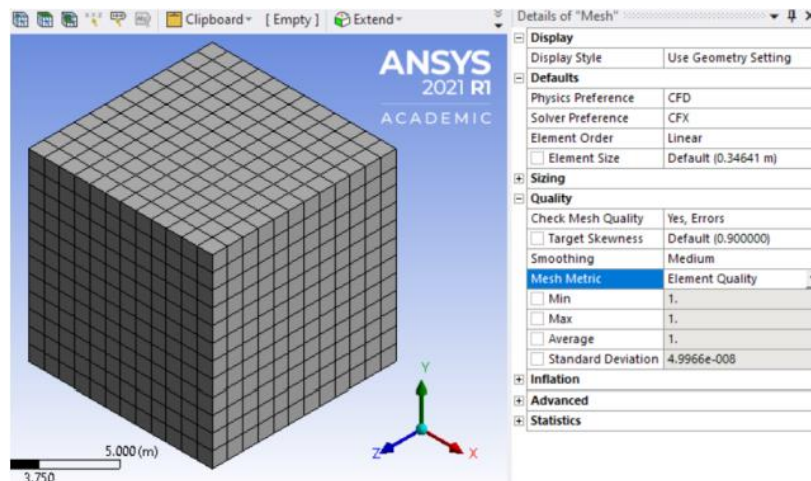
El mallado cartesiano tiende a crear una malla hexadécimal no estructurada de continuidad generalmente uniforme y se ajusta a la geometría.

Para la evaluación de la calidad de la malla, tendremos en consideración los siguientes parámetros de calidad:

1. Calidad del Elemento: Este valor de calidad oscila entre 0 y 1, siendo 1 el valor que representa el volumen de un cubo o cuadrado perfecto el cual proporciona un valor óptimo para una evaluación, mientras que un valor cercano a 0 indica que el elemento tiene un volumen irregular y poco favorable para la evaluación.

Figura 10

Parámetros de calidad de elemento

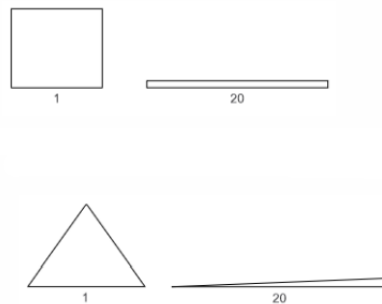


Nota. Interfaz de mallado donde se visualiza el resumen de valores de calidad de elemento.

2. Relación Aspecto: Este parámetro de calidad representa la relación entre un lado mas largo y uno mas corto, tanto para geometrías como cuadriláteros o triángulos. La mejor relación de aspecto es el valor de 1, sin embargo puede aceptarse que este valor no supere el valor de 3.

Figura 11

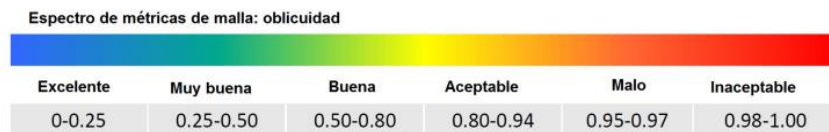
Relación de aspecto de celdas de mallado



3. Oblicuidad: Este parámetro es el que evalúa la asimetría del elemento, ayuda a determinar que tan cerca esta el elemento en análisis de la forma ideal (equilátero o equiángulo); los valores de evaluación oscilan entre un 0 y 1, donde un valor de 0 indica una celda equilátera y un valor de 1 representa una celda desproporcionada o comúnmente llamada astilla.

Figura 12

Valores de Oblicuidad



Nota. Estratificación de rango de valores para análisis de oblicuidad de un mallado, por Bonilla Correa.

4. Ortogonalidad: Este parámetro evalúa los ángulos de las celdas de la malla, los parámetros de evaluación oscilan entre 0 y 1, donde un valor cercano a 1 representa que la celda posee un ángulo cercano a 90° lo cual sería el valor ideal.

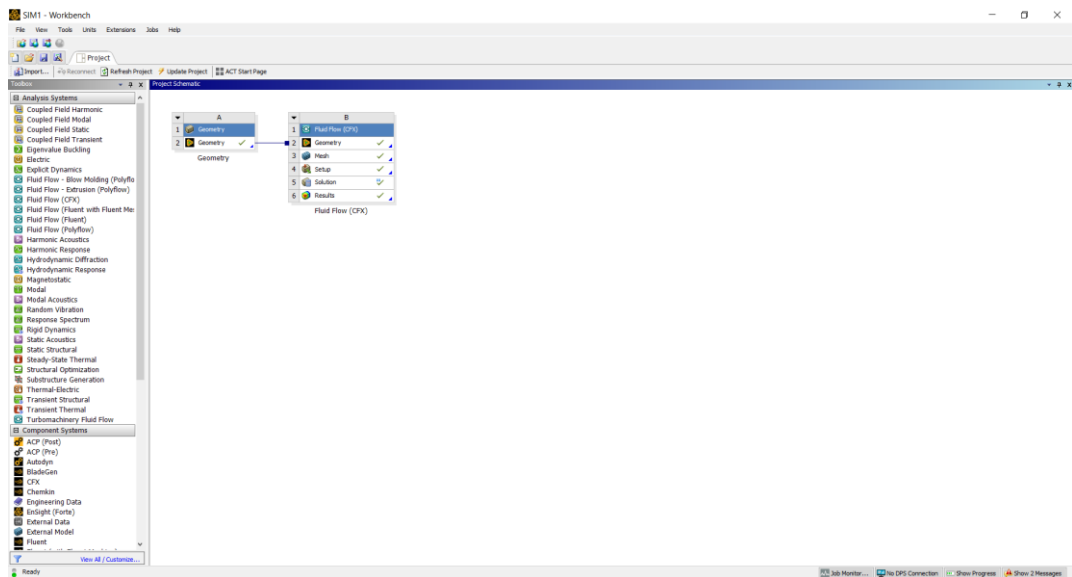
CAPÍTULO III: MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Material

El material utilizado viene dado por el software Ansys cuyo interfaz se puede apreciar en la Figura 8.

Figura 13

Software de simulación Ansys Workbench 2022 R1



Nota. Panel de interfaz de software Ansys Workbench 2022 R1, donde se puede apreciar el proceso de diseño para la simulación.

3.2. Metodología de Cálculo: Diseño de canal y tanque de circulación

La eficiencia de una central de generación basada en vórtice gravitacional radica, principalmente, en la formación óptima del vórtice gravitacional hidráulico. En la última década, han sido numerosas las investigaciones relacionadas a la optimización de este tipo de centrales, con el fin de ir mejorando su eficiencia. Para la presente investigación, se han considerado recomendaciones de diseño de diferentes autores, resultados de una investigación previa, con la finalidad de elaborar una estructura optimizada para nuestro estudio de simulación (Rojas, 2014).

Para la realización del diseño de los tanques cilíndricos y cónico, partimos del diseño y cálculo en primera instancia del canal de toma de agua, y en una segunda etapa se detallará las consideraciones para la determinación de las medidas del tanque según su geometría específica (cilíndrica y cónica).

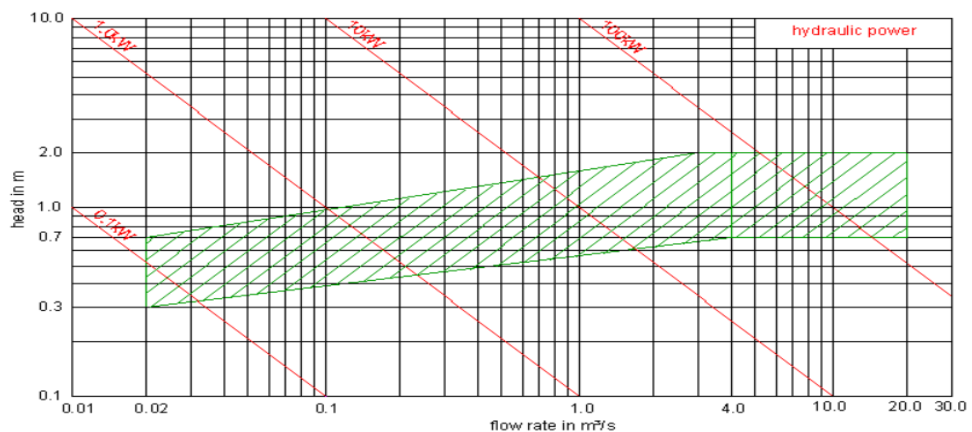
3.2.1. Diseño de tanque de circulación

Para el diseño del tanque de circulación según lo expuesto anteriormente, partiremos de las siguientes consideraciones derivadas de investigaciones previas:

- El máximo aprovechamiento de la energía cinética del vórtice se encuentra en la relación de diámetro de orificio de salida/ diámetro de tanque de circulación (d/D) de un 18% que favorece a la formación del vórtice del agua lo que se traduce en una mayor cantidad de energía aprovechada (Guevara, 2019).
- Los mayores valores de velocidad angular se encontraron cuando se tiene que la relación de la base de entrada al tanque de circulación/diámetro de orificio de salida (b_e/d) es de 0.52 (Torres, 2012).
- Definiremos la potencia (kW) que se desea adquirir y el caudal (m^3/s) a evaluar para nuestro sistema de generación para poder ubicar en la tabla que se presenta a continuación la altura o caída de necesaria para este sistema.

Figura 14

Gráfica de selección de potencia



Nota. Gráfica de identificación de potencia de diseño en base a caudal y altura, planteada por Zotloeterer, recopilado de <http://www.zotloeterer.com/welcome/gravitation-water-vortex-power-plants/application-area/>

- Partiendo de las consideraciones del punto anteriormente expuesto se procedió a determinar un valor aproximado del diámetro del tanque de rotación para la potencia que se desea obtener, valor que podemos encontrar en la Tabla 1.

Tabla 1

Valores de diseño según potencia demanda

Potencia	Caida [m]	Caudal [m ³ /s]	Diametro del tanque de rotacion [m]
1kW-GWVPP-kit	~0,8	~0,21	~2,9
5kW-GWVPP-kit	~1,2	~0,68	~4,2
10kW-GWVPP-kit	~1,5	~1,03	~5,3
20kW-GWVPP-kit	~1,7	~1,72	~8,0
30kW-GWVPP-kit	~2,0	~2,10	~9,6
50kW-GWVPP-kit	~2,5	~2,75	~10,2
100kW-GWVPP-kit	~2,8	~4,86	~12,8

Fuente. “Kits and components”, por Zotloeterer. Recopilado de <http://www.zotloeterer.com/welcome/gravitation-water-vortex-power-plants/products/>

3.2.2. Diseño de Canal de tanque

Se considera un canal de ingreso al tanque de circulación debido a la importancia de tener el fluido controlado y en un mínimo estado de turbulencia para lograr así la correcta formación de vórtice dentro del tanque de circulación.

Las variables a considerar en el proceso de diseño son: el tipo de material que conformará el canal, la velocidad mínima permisible, la pendiente del fondo del canal y las pendientes laterales, el borde libre y la sección mas optima ya sea determinada hidráulica o empíricamente (Rojas, 2014).

Establecidos los valores de caudal y velocidad se determinará el área de la sección, mediante la siguiente ecuación:

$$Q = A \times V \dots\dots\dots(8)$$

Donde:

Q: caudal del sistema

A: área de sección de canal de circulación

V : velocidad del fluido

De la cual despejaremos y hallaremos el área en función del caudal y volumen:

$$A = \frac{Q}{V} \dots\dots\dots(9)$$

Para la determinación de la sección hidráulica óptima, se presenta las geometrías para algunas secciones hidráulicas óptimas que se aprecian en la siguiente tabla:

Tabla 2

Secciones hidráulicas óptimas

Sección transversal	Área A	Perímetro mojado P	Radio hidráulico R	Ancho superficial T	Profundidad hidráulica D	Factor de sección Z
Trapezio, medio hexágono	$\sqrt{3}y^2$	$2\sqrt{3}y$	$\frac{1}{2}y$	$\frac{4}{3}\sqrt{3}y$	$\frac{3}{4}y$	$\frac{3}{2}y^{2.5}$
Rectángulo, medio cuadrado	$2y^2$	$4y$	$\frac{1}{2}y$	$2y$	y	$2y^{2.5}$
Triángulo, medio cuadrado	y^2	$2\sqrt{2}y$	$\frac{1}{4}\sqrt{2}y$	$2y$	$\frac{1}{2}y$	$\frac{\sqrt{2}}{2}y^{2.5}$
Semicírculo	$\frac{\pi}{2}y^2$	πy	$\frac{1}{2}y$	$2y$	$\frac{\pi}{4}$	$\frac{\pi}{4}y^{2.5}$
Parábola $T = 2\sqrt{2}y$	$\frac{4}{3}\sqrt{2}y^2$	$\frac{8}{3}\sqrt{2}y$	$\frac{1}{2}y$	$2\sqrt{2}y$	$\frac{2}{3}y$	$\frac{8}{3}\sqrt{3}y^{2.5}$
Catenaria hidrostática	$1.39586y^2$	$2.9836y$	$0.46784y$	$1.917532y$	$0.72795y$	$1.19093y^{2.5}$

Fuente. Tabla de formulaciones para cálculo de secciones hidráulicas óptimas, “Hidráulica de Canales Abiertos” , Ven Te Chow, (1994).

Para el caso de nuestro sistema se tendrá en consideración un sistema rectangular, según la tabla nos muestra que el área óptima para un canal de sección rectangular esta dada por la ecuación

$$A = 2y^2 \dots\dots\dots(10)$$

Donde:

A: área de sección

y : tirante óptimo de operación

De la cual despejaremos la ecuación para hallar el tirante óptimo de operación del sistema

$$y = \sqrt{\frac{A}{2}} \dots\dots\dots(11)$$

Obtenido el resultado del tirante óptimo para nuestro sistema, procedemos a calcular la base de nuestro canal mediante la ecuación:

$$A = b \times y \dots\dots\dots(12)$$

Donde:

A: área de sección

b : base de canal

y : tirante óptimo de operación

Despejamos la ecuación en función a la base de nuestro sistema:

$$b = \frac{A}{y} \dots\dots\dots(13)$$

Obtenidos los valores de tirante, base, área, rugosidad, caudal, procedemos a realizar el cálculo de la pendiente de la base mediante la siguiente ecuación:

$$S = \left(\frac{Q \times n}{A \times R^{\frac{2}{3}}} \right) \dots\dots\dots(14)$$

$$S = 0.0066$$

Donde:

S: Pendiente de la base

A : área de sección de canal

R : valor de radio hidráulico

n : valor de rugosidad

Teniendo en consideración la ecuación para el cálculo de radio hidráulico de nuestro sistema en función a la Tabla 2 $R = \frac{y}{2}$.

Como punto final tenemos que calcular la longitud de transición, por lo tanto se hizo uso de la siguiente ecuación:

$$L = \frac{b_1 - b_2}{2 \times \tan(12.5^\circ)} \dots\dots\dots(15)$$

Donde:

L: longitud de transición de canal

b1 : base de canal

b2 : base de entrada a tanque de circulación

Definido las medidas de los tanques, procedemos a diseñar la estructura en el software Autodesk Inventor, para posteriormente ser exportado al ANSYS Workbench 2022 R1 software donde se realizará los estudios de simulación.

3.3. Establecimiento de Mallado de Geometrías

Para realizar el mallado de las geometrías en evaluación, se procede en primera instancia a ejecutar el barrido del cuerpo de las estructuras en evaluación, en base a eso se determinará el tipo de mallado adecuado para la evaluación.

Para el sistema con tanque cilíndrico se plantea establecer dos tipos de mallado, un mallado multizone para la parte del canal de la estructura y un mallado automatic para la parte del tanque de circulación.

Y para el sistema con tanque cónico se plantea establecer un mallado único multizone.

Establecidos los tipo de mallas se procede a realizar la evaluación de la calidad del mallado para garantizar el correcto desarrollo de la simulación.

3.3.1. Configuración global de la malla

Para la configuración global del mallado parte del establecimiento de los siguientes criterios de evaluación:

- Physics preference: Esta opción permite establecer como Ansys realizará el mallado pues establecerá los valores predeterminados para los controles de la malla.

- Solver preference: Esta opción definirá el tipo de solucionador que tendrá nuestra evaluación, (CFD , CFX , Fluent y Poliflow); cada uno de ellos nos proporcionará valores y opciones predeterminados conforme al tipo de solucionador seleccionado.

3.4. Configuración de Ansys CFX

Definida la malla para la evaluación de las geometrías, el siguiente paso es definir los campos que se detallan a continuación, con el propósito de definir parámetros de operación, bordes y el solver para obtención de los resultados.

Realizada la definición del tipo de malla, procedemos a realizar la configuración de los siguientes campos de CFX para la realización de la evaluación de las geometría.

Los campos a definir son:

3.4.1. Configuración del dominio

- **Basic setting:** En este campo tendremos que seleccionar el tipo de dominio, los materiales, presión de referencia y establecer en la opción de bouyancy model los valores de referencia para la evaluación en el sistema en base a los 3 dimensionales (eje X, Y y Z). Se presenta la tabla con los valores propuestos para la evaluación de nuestro sistema.

Tabla 3

Valores referenciales de configuración de dominio

Tipo de dominio	Fluido
Materiales	Agua y aire
Presión de referencia	1 atm
Bouyant Model	
Densidad de referencia	1.2 kg/m ³
Grav. Eje Y	- 9.81 m/s ²
Grav. Eje X	0 m/s ²
Grav. Eje Z	0 m/s ²

Nota. Valores propuestos de configuración de dominio para simulación en CFX.

- **Fluid Models:** En este siguiente campo configuraremos las especificaciones del fluido a analizar, transferencia de calor y el tipo de modelo de turbulencia que se tendrán en cuenta para la simulación. Se presenta las selecciones que se considerarán para el análisis de los tanques.

Tabla 4

Criterios de configuración de fluido

Modelo multifásico	Estándar
Tranferencia de calor	isotérmico
Modelo de turbulencia	K-e

Nota. Criterios de configuración propuestos para fluido en evaluación.

- **Fluid Pair Models:** Por último en este campo se tiene que definir las consideraciones de los fluidos que entran en relación en la simulación, en este caso, el agua y el aire; se definirá el coeficiente de tensión superficial, el modelo de tensión superficial y la interfase de transferencia. Se presenta las selecciones que se considerarán para el tipo de simulación que se realiza.

Tabla 5

Valor coeficiente de tensión superficial

Coeficiente de tensión superficial	0.072 N/m
Modelo de tensión superficial	Fuerza superficial continua
Interphase transfer	superficie libre

Nota. Valor asignado de coeficiente de tensión superficial entre fluidos para el caso de estudio determinado.

3.4.2. Configuración de las condiciones de borde

En esta procedemos a la definición de condiciones de entrada(inlet) , salida (outlet) , apertura (opening) y de borde (wall) para realizar nuestro análisis, cuyos valores y campos de detallan en la tabla que se muestra a continuación.

Tabla 6*Valores de condiciones de borde*

Inlet	
Velocidad de entrada	Velocida de análisis según sistema
Turbulencia	5%
Valor de fluido	agua=1; aire=0
Outlet	
Presión relativa	0 Pa
Opening	
Presión relativa	0 Pa
Wall	
Rugosidad	0.036 mm

Nota. Valores de configuración de condiciones de borde para la simulación, paredes y zona exterior.

3.4.3. Configuración de solver

Definido el fluido y las condiciones de la simulación, como punto final se tiene la configuración del solucionador o también llamado solver, en las cuales evaluaremos la forma en la que se modela numéricamente las ecuaciones de transporte (advection Scheme), el costo computacional (turbulence numerics), el número máximo de iteraciones para la solución de nuestra simulación (converge control), los criterios de convergencia

Para la configuración del solucionador de nuestro sistema, procederemos a realizar las definiciones de los siguientes campos:

- **Advection Scheme:** Esta opción nos permite definir la forma en que se modela numéricamente las ecuaciones de transporte, para este campo lo recomendable es definirlo en High resolution.
- **Turbulence numerics:** Opción seleccionada para reducir el costo computacional al momento de lanzar la simulación, la opción recomendable es la de first order.
- **Converge control:** En esta opción definiremos el número máximo de iteraciones a realizar durante la simulación, cabe resaltar que mientras más número de iteraciones se tenga nuestros resultados serán mas exactos y podremos llegar a la convergencia de la simulación.
- **Convergence criterio:** Los criterios de convergencia nos permitirá definir la precisión de los resultados, y el momento en que la simulación

debe de converger en base al RMS (medida de precisión con que se resuelven las ecuaciones).

Dentro de este criterio procedemos a definir el conservation target o el desequilibrio para encontrar la convergencia, para la exactitud de resultados se considerará un 0.01 o 1% de desequilibrio.

- **Solver Manager:** En el cuadro de solver manager tendremos que realizar las configuraciones en base a la capacidad de nuestro sistema computacional utilizado para la simulación. Las opciones recomendadas para la ejecución del solver son las de seleccionar la doble precisión , la cual nos ayudará a mejorar la convergencia de simulaciones con casos de transferencia de masa en interface y el parallel enviroment; que nos ayudará a habilitar el uso en paralelo de los multiples procesadores con que cuente nuestro sistema computacional con la finalidad de reducir los tiempos de solución.

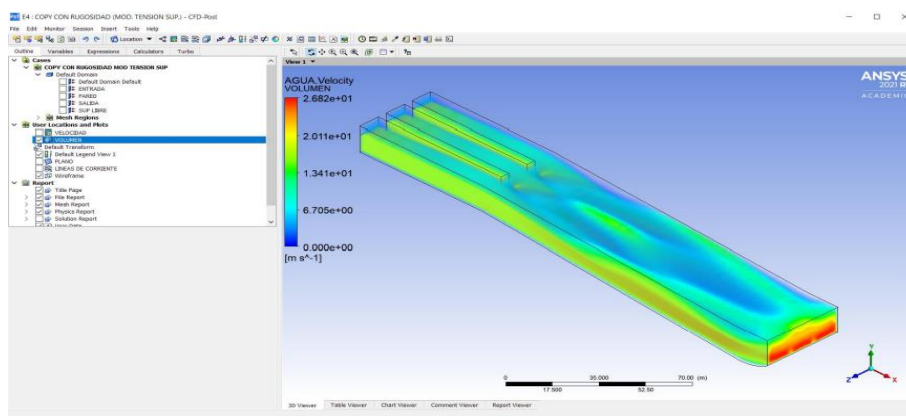
3.5. CFD POST

La herramienta de CFD Post es un procesador que ayuda a procesar la información tanto de CFX y Fluent.

Nos permitirá realizar la visualización de los resultados mediante: planos, contornos, vectores, isosuperficies, líneas de corriente y animaciones del fluido.

Figura 15

Interfaz CFD Post Resultados



Nota. Interfaz gráfica de visualización de resultados de simulación numérica efectuada.

CAPITULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIONES

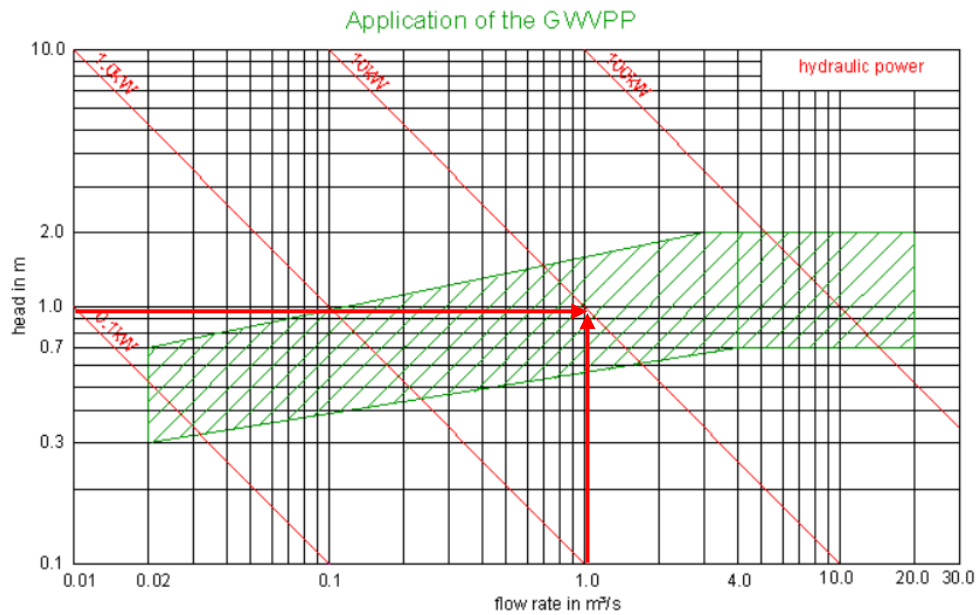
4.1. Resultados de diseño

Para el dimensionamiento de los tanques de circulación se tendrá en cuenta la potencia de diseño que se estimará para nuestro sistema de generación para esto la potencia a considerar será de 10 kW.

Observamos la Figura 16 y teniendo en cuenta la potencia considerada obtenemos los siguientes datos.

Figura 16

Selección de potencia de diseño



Nota. Gráfica que muestra el proceso de identificación de caudal y altura requeridas para la potencia de diseño del sistema de generación.

$Q = 1 \text{ m}^3/\text{s}$ - Caudal de nuestro sistema.

$H = 1 \text{ m}^3/\text{s}$ - Altura del sistema.

En base a los valores obtenidos, procedemos a estimar el diámetro de nuestro sistema de generación según a tabla **Zotlöterer, "KITS AND COMPONENTS"**

Tabla 7*Selección de dimensiones para diseño de simulación*

Potencia	Caida [m]	Caudal [m ³ /s]	Diametro del tanque de rotacion [m]
1kW-GWVPP-kit	~0.8	~0.21	~2.9
5kW-GWVPP-kit	~1.2	~0.68	~4.2
10kW-GWVPP-kit	~1.5	~1.03	~5.3
20kW-GWVPP-kit	~1.7	~1.72	~8.0
30kW-GWVPP-kit	~2.0	~2.10	~9.6
50kW-GWVPP-kit	~2.5	~2.75	~10.2
100kW-GWVPP-kit	~2.8	~4.86	~12.8

Nota. Potencia de diseño de 10 kW para sistemas de generación en evaluación.

$$D = 5,5 \text{ m}$$

El diámetro seleccionado se aplicará tanto para la geometría cilíndrica y cónica.

Para el cálculo del orificio de salida de nuestro sistema de generación tendremos en consideración lo planteado por (Guevara Muñoz 2018), teniendo en cuenta esto obtenemos:

$$\frac{d}{D} = 18\% = 0.18$$

Donde:

d = diámetro de orificio de salida de tanque de circulación

D = Diámetro del tanque de circulación

Entonces desarrollando la ecuación obtenemos:

$$d = D \times 0.18$$

$$d = 5,5 \times 0.18$$

$$d = 0.99 \cong 1 \text{ m}$$

Para el cálculo de la medida de la base de entrada al tanque de circulación tendremos en cuenta lo descrito por (Flabio Chaparro 2012), teniendo en cuenta sus criterios obtenemos:

$$\frac{be}{d} = 0.52$$

Donde:

be = base entrada al tanque de circulación

d = diámetro de orificio de salida de tanque de circulación

$$be = d \times 0.52$$

$$be = 1 \times 0.52$$

$$\mathbf{be = 0.52 m}$$

Cálculo de canal de tanque

Para el cálculo de del área del canal tendremos en cuenta la ecuación (2), de la cual tenemos:

$$\mathbf{A = \frac{Q}{v}}$$

Donde:

A = Área de sección de canal de circulación

v = Velocidad del fluido

Q = Caudal del sistema

La velocidad para el fluido considerada será de 0.9 m/s

Entonces desarrollando la ecuación obtenemos:

$$A = \frac{1 \text{ m}^3/\text{s}}{0.9 \text{ m/s}}$$

$$\mathbf{A = 1.1 \text{ m}^2}$$

Ahora hallamos la sección hidráulica óptima para un sistema rectangular, dada por la ecuación (4):

$$y = \sqrt{\frac{A}{2}}$$

$$y = \sqrt{\frac{1.1 \text{ m}^2}{2}}$$

$$\mathbf{y = 0.74 m}$$

obtenido el valor de la sección hidráulica óptima procedemos a calcular nuestra base de nuestro canal, mediante la ecuación (6):

$$\mathbf{b = \frac{A}{y}}$$

$$b = \frac{1.1 \text{ m}}{0.74 \text{ m}}$$

$$\mathbf{b = 1.5 \text{ m}}$$

El cálculo de la pendiente de la base mediante la ecuación (7), teniendo en cuenta el cálculo del radio hidráulico esta determinado según la **Tabla 2**.

$$S = \left(\frac{Q \times n}{A \times R^{\frac{2}{3}}} \right)$$

$$S = \left(\frac{1 \text{ m}^3 \times 0.014}{1.11 \text{ m}^2 \times \left(\frac{0.74}{2} \right)^{\frac{2}{3}}} \right)$$

$$S = 0.0066$$

Para la longitud de transición de nuestro sistema aplicaremos la fórmula (8):

$$L = \frac{b_1 - b_2}{2 \times \tan(12.5^\circ)}$$

Donde:

$L =$ Longitud de transición

$b_1 =$ Base de canal

$b_2 =$ Base de entrada al tanque de circulación

$$L = \frac{1.5 \text{ m} - 0.52 \text{ m}}{2 \times \tan(12.5^\circ)}$$

$$\mathbf{L = 4.42 \text{ m} \cong 4.5 \text{ m}}$$

El resumen de los datos obtenidos para nuestras geometrías son las siguientes,

Tabla 8*Valores de diseño para sistema de generación con tanque cilíndrico*

Condiciones		Medida	Unidad
Caudal	Q	1	m ³ /s
Altura Sistema	H	1	m
Diámetro de tanque de circulación	D	5.5	m
Diámetro mayor de orificio de salida de tanque de circulación	d	1	m
Diámetro menor de orificio de salida de tanque de circulación	dm	0.8	m
Altura de cono de descarga	h	0.4	m
Base entrada de tanque de circulación	be	0.52	m
Área de sección de canal de circulación	A	1.1	m ²
Sección hidráulica óptima para sistema rectangular	y	0.74	m ²
base de canal	b	1.5	m
Pendiente de base	S	0.0006	m
Longitud de transición	L	4.5	m

Nota. Recopilación de valores de diseño obtenido del cálculo.

Tabla 9*Valores de diseño para sistema de generación con tanque cónico*

Condiciones		Medida	Unidad
Caudal	Q	1	m ³ /s
Altura Sistema	H	1	m
Diámetro de tanque de circulación	D	5.5	m
Diámetro mayor de orificio de salida de tanque de circulación	d	1	m
Base entrada de tanque de circulación	be	0.52	m
Área de sección de canal de circulación	A	1.1	m ²
Sección hidráulica óptima para sistema rectangular	y	0.74	m ²
base de canal	b	1.5	m
Pendiente de base	S	0.0006	m
Longitud de transición	L	4.5	m

Nota. Recopilación de valores de diseño obtenido del cálculo.

Los planos de los sistemas con los detalles de las dimensiones pueden observarse en los Anexo 1 y Anexo 2.

Realizado el cálculo se tienen las mismas medidas para ambos sistemas de generación con su geometría particular, con la finalidad de poder comparar los resultados en igualdad de condiciones de diseño, para así poder analizar el comportamiento del fluido y su velocidad durante todo su recorrido por el sistema.

4.2. Determinación de Mallado de estructuras

Realizándose el barrido de cuerpos para el sistema de generación con tanque de geometría cilíndrica optamos por definir un mallado multizone para la parte del canal de nuestro sistema y automatic para la parte del tanque, esto debido a la mejora de la calidad de malla para la evaluación tal y como se puede apreciar en la Figura 17. Este tipo de configuración de mallado nos arroja un valor de 509 921 nodos para evaluación.

A diferencia del barrido de los cuerpos que conforman el sistema de generación con tanque de geometría cónica nos permitió optar por seleccionar el tipo de mallado para la estructura en su totalidad en un mallado tipo Multizone. Este tipo de configuración nos arroja un valor de 506 193 nodos para la evaluación tal y como se observa en la Figura 18.

Figura 17

Mallado de tanque cilíndrico

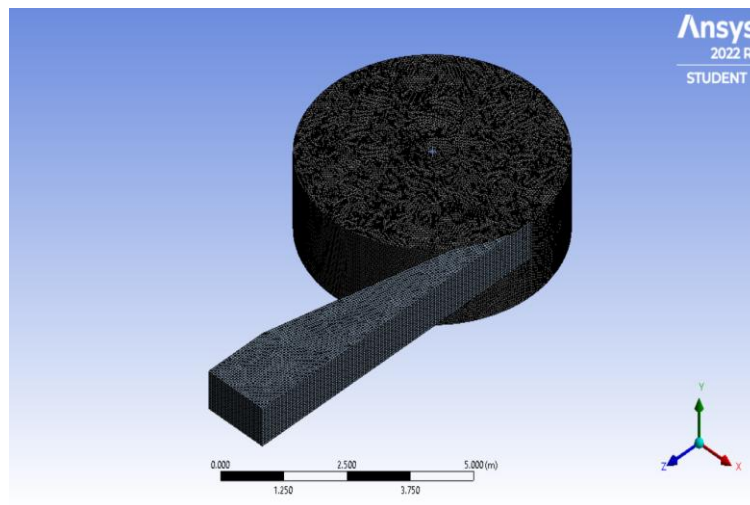
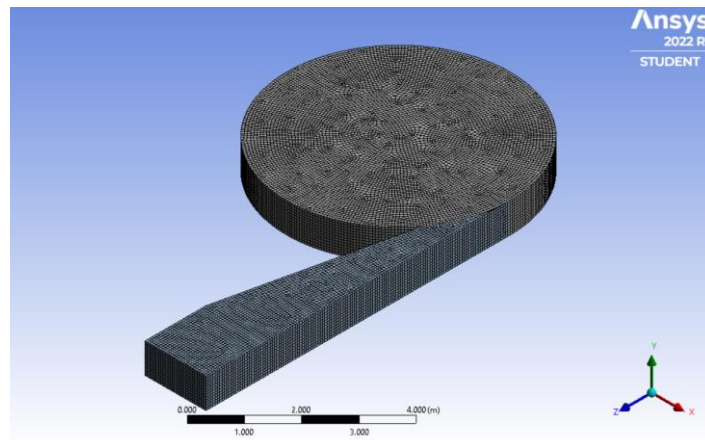


Figura 18

Mallado de tanque cónico



Con los mallados realizados, se obtuvo los siguientes resultados de calidad de mallada, tal y como se puede apreciar en la Tabla 10.

Tabla 10

Valores de calidad de malla de sistemas de generación en análisis

Parámetros de Calidad	Cilindrico	Cónico
Calidad del Elemento	0.85	0.53
Relación Aspecto	1.77	3.43
Oblicuidad	0.19	0.51
Ortogonalidad	0.8	0.60

Nota. Valores resultantes de mallado de sistemas de generación en evaluación obtenido de Ansys Workbench 2022 R1.

En los resultados obtenidos podemos observar que ambos sistemas están en los rangos establecidos para una correcta evaluación de calidad de malla, sin embargo encontramos diferencias entre la calidad del mallado de ambas geometrías:

- Partiendo del análisis de calidad del elemento, el valor más cercano a 1 que es el valor idóneo para la evaluación de este parámetro lo tiene el sistema de generación con tanque cilíndrico que tiene una diferencia de un 0.32 con respecto al sistema de generación con tanque cónico.

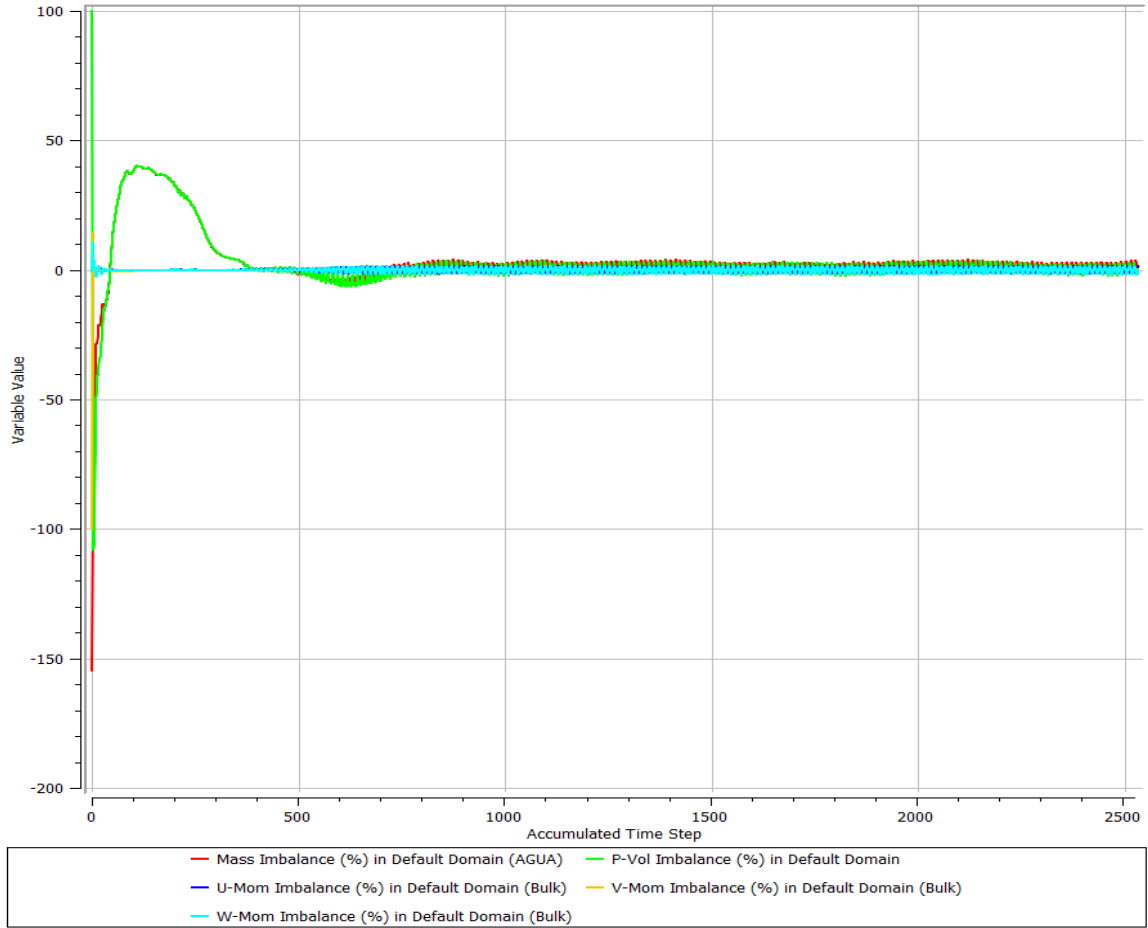
- Para la evaluación de relación aspecto, los dos sistemas se encuentran en el rango establecido de 1 a 4, sin embargo el sistema de generación con tanque cilíndrico tiene un valor más cercano a 1 que es el valor ideal para la medida de este parámetro, a diferencia del sistema de generación con tanque cónico que un valor más cercano a 4, lo cuál podría representar una cierta entre las redes de mallado.
- Para la evaluación de la oblicuidad , parámetro que nos ayudará a determinar que tan cerca esta el elemento del análisis de forma ideal, cuyo valor sería el más cercano a 0. Para nuestros sistemas encontramos que el sistema con tanque cilíndrico tiende un valor más cercano al valor ideal con un 0.19 el cual se encuentra en un rango excelente a diferencia del valor de 0.51 para el sistema con tanque cónico.
- Para la evaluación de ortogonalidad, criterio que evalua el ángulo de formación de las celdas de las mallas y cuyo valor ideal es 1, determinamos que el sistema de generación con tanque cilíndrico tiene una mejor ortoganilidad con un valor de 0.8 a comparación con el sistema de generación con tanque cónico con un valor de 0.6 sin embargo ambos sistemas se encuentran en el rango establecido.

Habiendo analizado cada uno de los criterios para la calidad de malla se determina que ambos sistemas se encuentran dentro de los rangos establecidos, sin embargo se muestra una mejor calidad de malla en el sistema de generación con tanque cilíndrico con respecto al sistema de generación con tanque cónico en cada uno de los criterios.

4.3. Resultados de Simulación Numérica

Figura 19

Resultados de imbalances - tanque cilíndrico



Nota. En la imagen se puede observar el comportamiento del desarrollo de las ecuaciones que gobiernan la simulación CFD hasta la convergencia.

Tabla 11

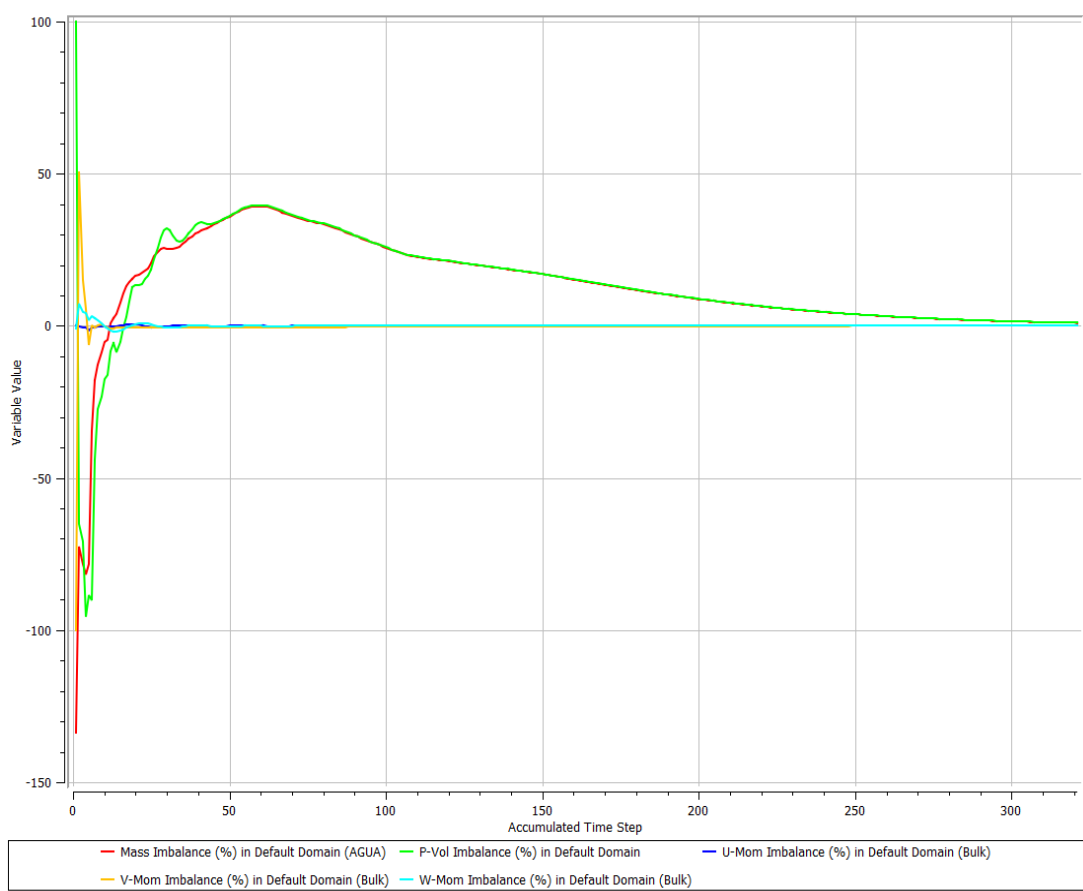
Resultados de imbalances de sistema de generación con tanque cilíndrico

Normalised Imbalance Summary		
Equation	Maximum Flow	Imbalance (%)
U-Mom-Bulk	2.8572E+05	1.4199
V-Mom-Bulk	2.8572E+05	0.1627
W-Mom-Bulk	2.8572E+05	-0.3087
P-Vol	1.1067E+03	-0.6468
Mass-AGUA	1.1067E+03	0.1922

Nota. Recopilación de resumen de valores obtenidos de desarrollo de ecuaciones de la simulación para sistema de generación con tanque cilíndrico.

Figura 20

Resultados de Imbalances - Tanque cónico



Nota. En la imagen se puede observar el comportamiento del desarrollo de las ecuaciones que gobiernan la simulación CFD hasta la convergencia.

Tabla 12

Resultados de imbalances de sistema de generación con tanque cónico

Normalised Imbalance Summary		
Equation	Maximum Flow	Imbalance (%)
U-Mom-Bulk	1.9986E+05	0.0002
V-Mom-Bulk	1.9986E+05	-0.0085
W-Mom-Bulk	1.9986E+05	-0.0010
P-Vol	1.1067E+03	0.9927
Mass-AGUA	1.1067E+03	0.9811

Nota. Recopilación de resumen de valores obtenidos de desarrollo de ecuaciones de la simulación para sistema de generación con tanque cónico.

Los resultados de imbalances representan una parte fundamental de la simulación, ya que es la que determina la veracidad de los datos de la simulación establecida, esto en base a la convergencia de los resultados del desarrollo de las ecuaciones de balance de masa, conservación de momento (momentum) en el plano tridimensional (V,W,U) y la fracción de volumen del fluido dentro del sistema a evaluación.

Así para la Figura 19 muestra el desarrollo de imbalances para el sistema de generación con tanque cilíndrico, esta simulación tuvo una duración de 30 hrs, en la que observamos que en la iteración 2530 se llega a la convergencia de los resultados, lográndose así el 1% de imbalances.

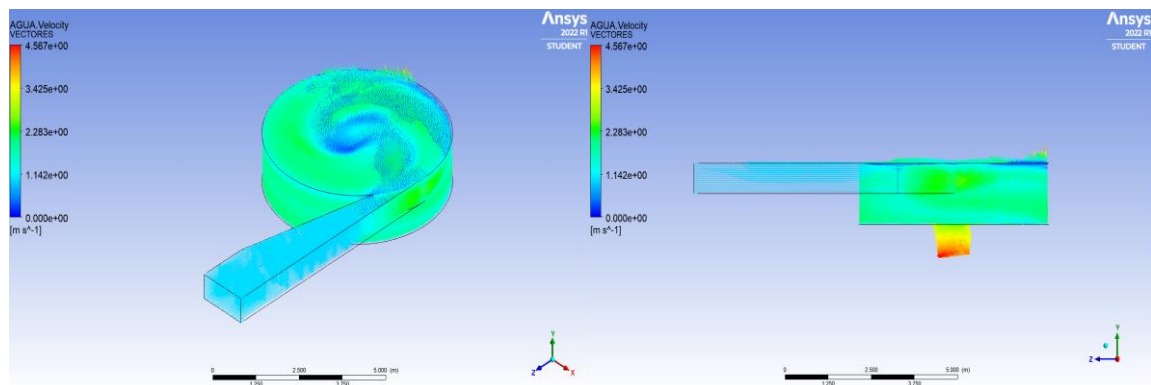
Por otro lado tenemos en la Figura 20 el desarrollo de imbalances para el sistema de generación con tanque cónico, esta simulación a diferencia de la anteriormente descrita tuvo una duración de 3 hrs, en la que se observa la convergencia en la iteración 350 lográndose así 1% de imbalances y garantizándose la convergencia de los resultados, a diferencia del sistema de generación con geometría cilíndrica, se tuvo una rápida y mejor convergencia de los resultados lo cual es un indicador de un mejor comportamiento del fluido.

Al analizar los resultados de la Tabla N° 11 y la Tabla N° 12 observamos que se tiene un 99.02% de convergencia en los resultados y un 0.98% de imbalances para el sistema de generación con tanque cónico, a diferencia de un 99.81% de convergencia en los resultados y un 0.19% de imbalances para para el sistema de generación con tanque cilíndrico, diferenciándose en un 0.79% entre resultados de convergencia el sistema de generación con tanque cilíndrico muestra un mejor resultado de imbalances.

Para la visualización gráfica de los resultados de la simulación numérica se hace uso de la herramienta CFD- POST del software Ansys Workbench 2022 R1 que nos proporcionará una visión clara del comportamiento del fluido en cada uno de los sistemas analizados.

Figura 21

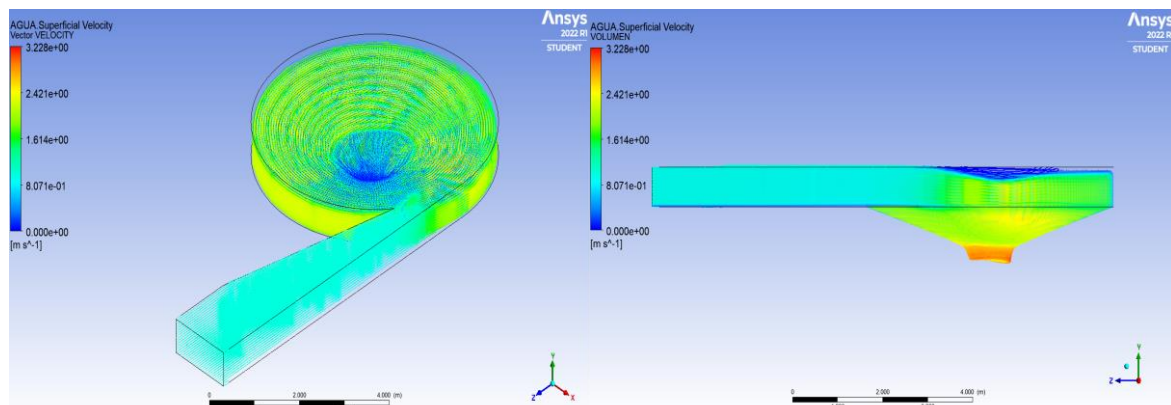
Resultados CFD-POST - Tanque cilíndrico



Nota. Se observa el comportamiento del fluido durante el recorrido por la estructura del sistema de generación, así como se observa la interpretación del rango de velocidades obtenidos de la simulación numérica.

Figura 22

Resultados CFD-POST - Tanque cónico



Nota. Se observa el comportamiento del fluido durante el recorrido por la estructura del sistema de generación, así como se observa la interpretación del rango de velocidades obtenidos de la simulación numérica.

En la Figura 21 y 22 se presentan los resultados gráficos, donde se observa la variación de la velocidad durante todo su recorrido para cada uno de los sistemas en análisis.

Partimos la evaluación de los resultados analizando la velocidad en el canal de transmisión, donde se muestra que tanto para el sistema de generación con geometría cilíndrica y cónica, las velocidades son bajas, presentando unos valores que oscilan entre 0 - 1.14 m/s para el sistema con tanque cilíndrico y 0 – 0.80 m/s para el sistema con tanque cónico, obteniéndose un pequeño incremento de velocidad en la parte final del canal de transmisión para el sistema de generación con tanque cilíndrico.

Posteriormente analizamos el campo de velocidades obtenido en el tanque de circulación donde se aprecia la formación del vórtice para ambos sistemas, el rango de velocidades para el sistema con tanque cilíndrico oscila entre 2.28 m/s y valores cercanos a los 3 m/s , a diferencia del sistema con tanque cónico que muestra menores valores de velocidades que oscilan entre 1.6 y 2.42 m/s, sin embargo al concentrarnos en las vistas isométricas de ambas figuras en análisis se observa un pequeño desembalse en los alrededores del sistema de generación con tanque cilíndrico así como una formación de vórtice irregular, en comparación con el sistema de generación con tanque cónico que muestra un mejor comportamiento del fluido y se puede apreciar una mejor formación de vórtice. Para ambos sistemas se puede apreciar que las mayores velocidades obtenidas se encuentran en la zona de descarga con un valor de 4.5 m/s para el sistema de generación con tanque cilíndrico frente a un valor de un 3.2 m/s para el sistema de generación con tanque cónico.

Para poder tener un mejor visualización del vórtice formado en el interior de los tanques y determinar las velocidades del mismo, cada uno de los sistemas en análisis, se optó por realizar un seccionamiento transversal y mostrar un plano de resultados a mitad de tanque en ambos sistemas, tal y como se puede apreciar en la Figura 23 y Figura 24.

Figura 23

Plano corte transversal - Tanque cilíndrico

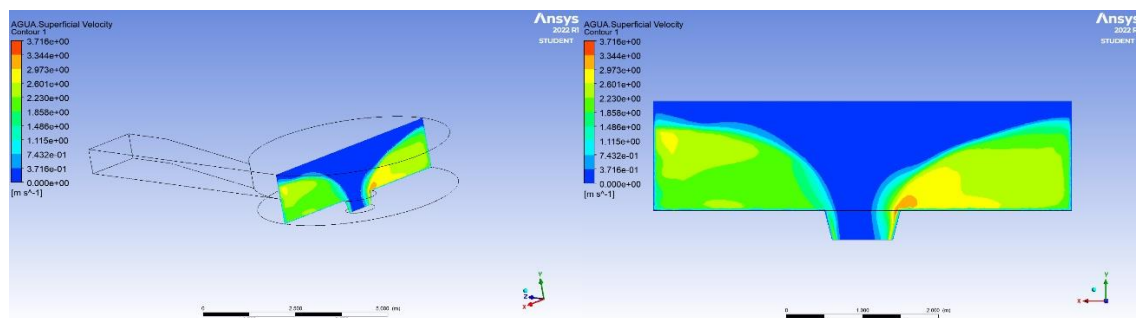
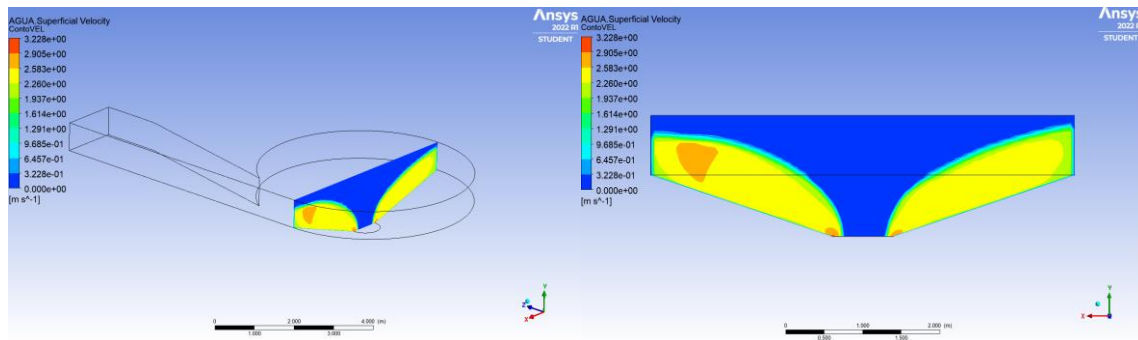


Figura 24

Plano corte transversal - Tanque cónico



Para poder analizar el campo de velocidades que será aprovechada por la turbina de generación de vórtice gravitacional, tendremos que tener en cuenta la posición y las dimensiones de la turbina, en base a esto tenemos que “la relación de 18%D (diámetro de tanque) aumentará la energía cinética en la turbina de vórtice gravitacional propuesta y permite la formación del agua, aumentando así su eficiencia, lo que se traduce en una mayor cantidad de energía aprovechada” (Guevara Muñoz, 2019).

Estableciendo las dimensiones de los posibles rotores para la turbina de vórtice gravitacional para cada sistema en evaluación, se determinó que el diámetro de rotor sería de 1.1 metro aproximadamente, con esta medida el posicionamiento estimado del rotor de la turbina de vórtice gravitacional dentro de la cámara de tanque para el sistema de generación con tanque cilíndrico presentaría velocidades aprovechables distintas en cada extremo del fluido con valores que oscilan entre 0.7 a 2.2 m/s, la formación de vórtice no es uniforme como se puede apreciar en las fracciones de masa de aire (color azul) y agua (resto colores) como se puede apreciar en la Figura 23.

Para el caso del sistema de generación con tanque cónico, en el cual se observa que el fluido tiene un mejor comportamiento que se puede observar mediante la proporcionalidad de fracciones de masa de aire y agua. En este sistema se presenta una proporcionalidad de velocidades en la formación del vórtice con un valor uniforme de 2.58 m/s lo cual se traduce en un mejor aprovechamiento de la energía cinética para el sistema de generación con tanque cónico tal y como se observa en la Figura 24. Para ambos sistemas no muestran los mayores rangos de velocidad ya que

estos se encuentran en zona de descarga, zona donde la colocación del rotor de la turbina no es viable debido a la turbulencia del fluido.

Interpretados los resultados, podemos suponer que la particularidad del comportamiento del fluido en el sistema de generación con tanque cilíndrico se debe al diseño del cono de descarga, sin embargo, el desembalse observado en la Figura 21, puede deberse al excesivo caudal del fluido al ingreso del tanque.

CONCLUSIONES

- Se obtuvieron medidas similares en el diseño de los sistemas con tanque cónico y cilíndrico, cuyas dimensiones son de un caudal (Q) de $1 \text{ m}^3/\text{s}$, una altura de sistema (H) 1 m , diámetro de tanque de circulación (D) 5.5 m , diámetro mayor de orificio de salida de tanque de circulación (d) de 1 m , base entrada de tanque de circulación (b_e) 0.52 m , área de sección de canal de circulación (A) de 1.1 m^2 , sección hidráulica óptima para sistema rectangular (y) 0.74 m^2 , base de canal (b) 1.5 m , pendiente de base (S) 0.0006 m y una longitud de transición (L) de 4.5 m con la diferencia que para el sistema de generación con tanque cilíndrico se añade un cono de descarga a fin de controlar la descarga del fluido, la altura para este cono de descarga (h) es de 0.4 m y el diámetro menor de orificio de salida del tanque (d_m) es de 0.8 m , el diseño fue realizado mediante el uso del Software CAD Autodesk Inventor 2021 ya que ofrece mejores herramientas para plasmar los diseños y posteriormente se exportó a Ansys Workbench 2022 R1.
- Se determinó la siguiente configuración de malla para el sistema de generación con tanque cilíndrico, un mallado multizone para la parte de canal y automatic para la parte del tanque de circulación arrojándonos un valor de 509 921 nodos de análisis, un valor de calidad de elemento de 0.85, relación aspecto de 1.77, oblicuidad de 0.19 y una ortogonalidad de 0.8, a diferencia de la configuración de malla del sistema de generación con tanque cónico, que presenta un mallado único multizone para toda la estructura que nos arrojó un valor de 506 193 nodos de análisis, un valor de calidad de elemento de 0.53, relación de aspecto de 3.43, oblicuidad de 0.51 y ortogonalidad de 0.6, los valores obtenidos nos muestran que se presentó un mejor mallado para el sistema de generación con tanque cilíndrico, tanto en el número de nodos como en los valores de calidad de mallado.
- Se realizó la simulación numérica mediante el uso de la herramienta CFX del software Ansys Workbench 2022 R1, obteniéndose la convergencia de resultados para ambas simulaciones lo que se traduce en un resultado de imbalances menor a 1% que garantiza la fiabilidad de los datos; para el sistema de generación con tanque cilíndrico, se obtuvo un valor de imbalances de 0.19% frente a un 0.98% de imbalances para el sistema de generación con tanque cónico.

- Se evaluó la formación y el rango de velocidades aprovechables del vórtice gravitacional en ambos sistemas, llegándose a determinar que el sistema de generación con tanque cónico es el óptimo para el diseño de una central de generación basado en vórtice gravitacional , ya que presenta una formación de vórtice y velocidad estable, este valor de velocidad oscila entre el rango de 2.58 y 2.9 m/s con respecto al valor irregular de velocidades que se obtuvo en el sistema de generación con tanque cilíndrico que oscilan entre 0.7 y 2.2 m/s.

Recomendaciones

- Ejecutar un estudio de simulación en el sistema de generación con tanque cilíndrico realizando evaluando la proporción de fluido entrante al sistema, mediante la variación del caudal de ingreso a fin de encontrar el punto óptimo de caudal para evitar el desembalse en el sistema.
- Mejorar el diseño de zona de descarga de sistema con tanque cilíndrico a fin de obtener un mejor comportamiento del fluido y aumentar el aprovechamiento de la energía cinética.

Referencias Bibliográficas y Virtuales

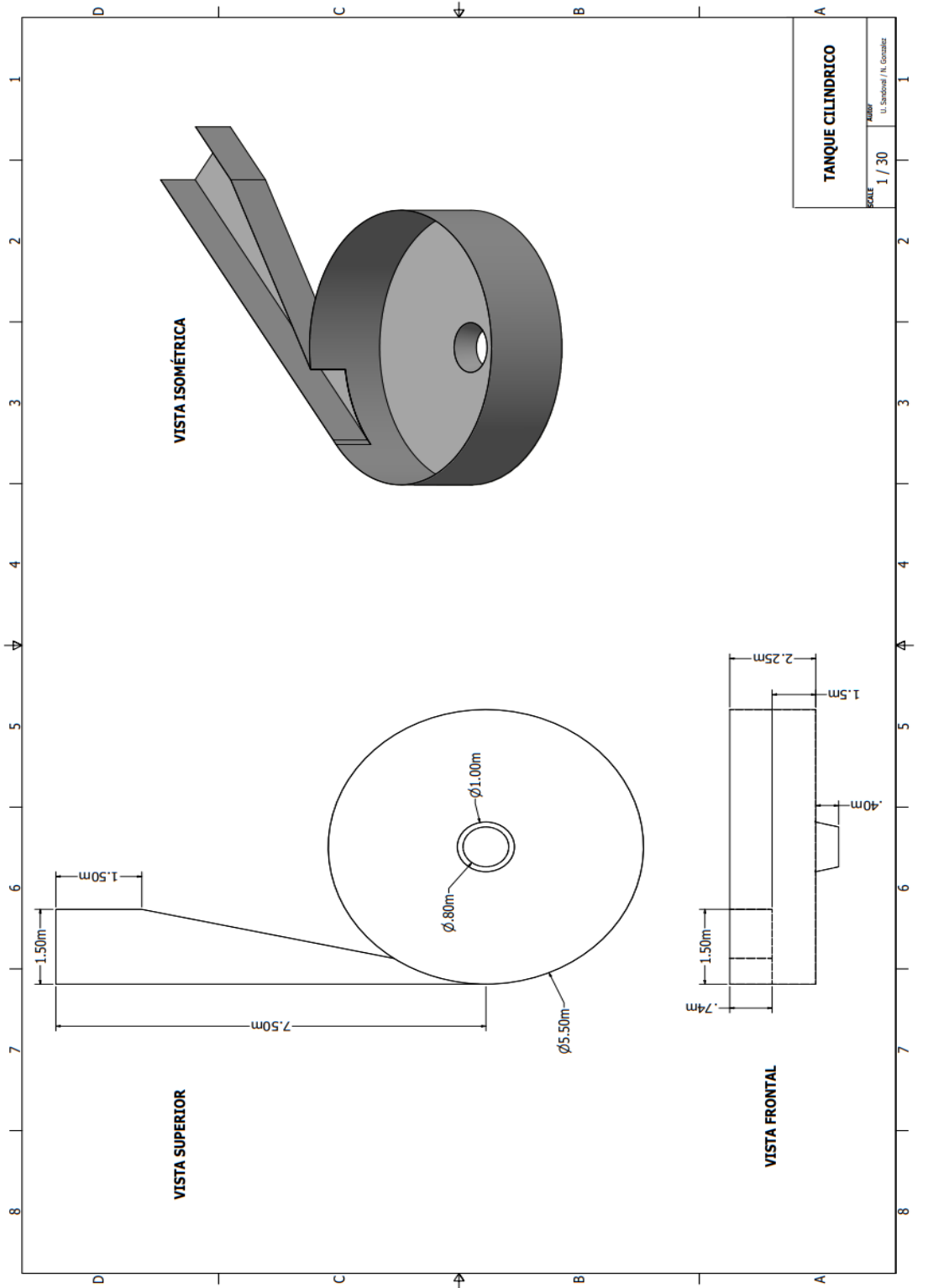
- ANSYS. (2022). *ansys.com*. Obtenido de <https://www.ansys.com/academic>
- Bonilla Correa, D., & Calderón Reyes, N. (2019). *Análisis del Impacto en la variación de las características geométricas de canales de turbinas de vórtice mediante ANSYS CFX*. Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá.
- Escobar, A. (2020). *Grupo de Investigación Barión Semillero de Investigación Barión*. Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia.
- Guevara, A. (2019). *Efecto del diámetro de salida en un tanque cónico en la eficiencia de una Turbina de Vórtice Gravitacional para pico-generación*. Instituto Tecnológico Metropolitano ITM, Medellín, Colombia.
- Haro, J., & Sanaguano, E. (2016). *Estudio del Comportamiento de Fluidos de una Micro Central Hidroeléctrica Gravitacional de Vórtice, mediante la Dinámica Computacional de Fluidos de Alto Rendimiento, para la Generación de Energía Eléctrica e Implementación de un Prototipo*. Universidad de las Fuerzas Armadas de Ecuador, Ecuador.
- Jarabo, F., & Fernández, J. (1999). *La Energía de la Biomasa*. SAPT.
- Kadagaya. (Agosto de 2020). *Kadagaya.org*. Obtenido de <https://kadagaya.org/#:~:text=The%20Kadagaya%20campus%20is%20located,economy%20based%20mainly%20on%20agriculture>.
- Loaiza Jaramillo, P. (2015). *Generación eléctrica basada en vórtice gravitacional, una opción para la provisión sustentable de energía eléctrica en la zona rural del cantón Loja*. Universidad Técnica Particular de Loja, Loja, Ecuador.
- López Rebollar, B. (2015). *Aplicación de CFD-ANSYS FLUENT en el Estudio Hidrodinámico de Tanques de Recirculación Empleados en Acuicultura*. Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca, México.
- Mulligan, S., & Hull, P. (2010). *Design and Optimization of a Water Vortex*. Instituto de Tecnología de Sligo, Irlanda.

- Ortega, J., & Romero, G. (2014). *Generación eléctrica y monitoreo de un sistema de hidrogenación basada en vórtice gravitacional*. Universidad Técnica Particular de Loja, Ecuador.
- Peña, J. (2013). *Ingeniería de detalle y construcción de un sistema de hidrogenación basado en vórtice gravitacional*. Universidad Técnica Particular de Loja, Ecuador.
- Rojas, H. (2014). *Diseño de una central minihidráulica basada en vórtice gravitacional*. Universidad Técnica Particular de Loja, Loja - Ecuador.
- Torres, G. (2012). Algunas características hidrodinámicas de un vórtice en un cilindro inducido por una corriente de agua. *Premio Fabio Chaparro*, 8.
- Vehi Sarrazin, J. (2016). *Mallado de Geometrías Complejas Mediante CFD*. Universidad Politecnica de Catalunya, Barcelona, España.
- Xu, Q. (2010). *Internal Hydraulics of baffled disinfection contact tanks using Computational*. Colorado State University, Department of Civil and Environmental Engineering, Colorado.

ANEXOS

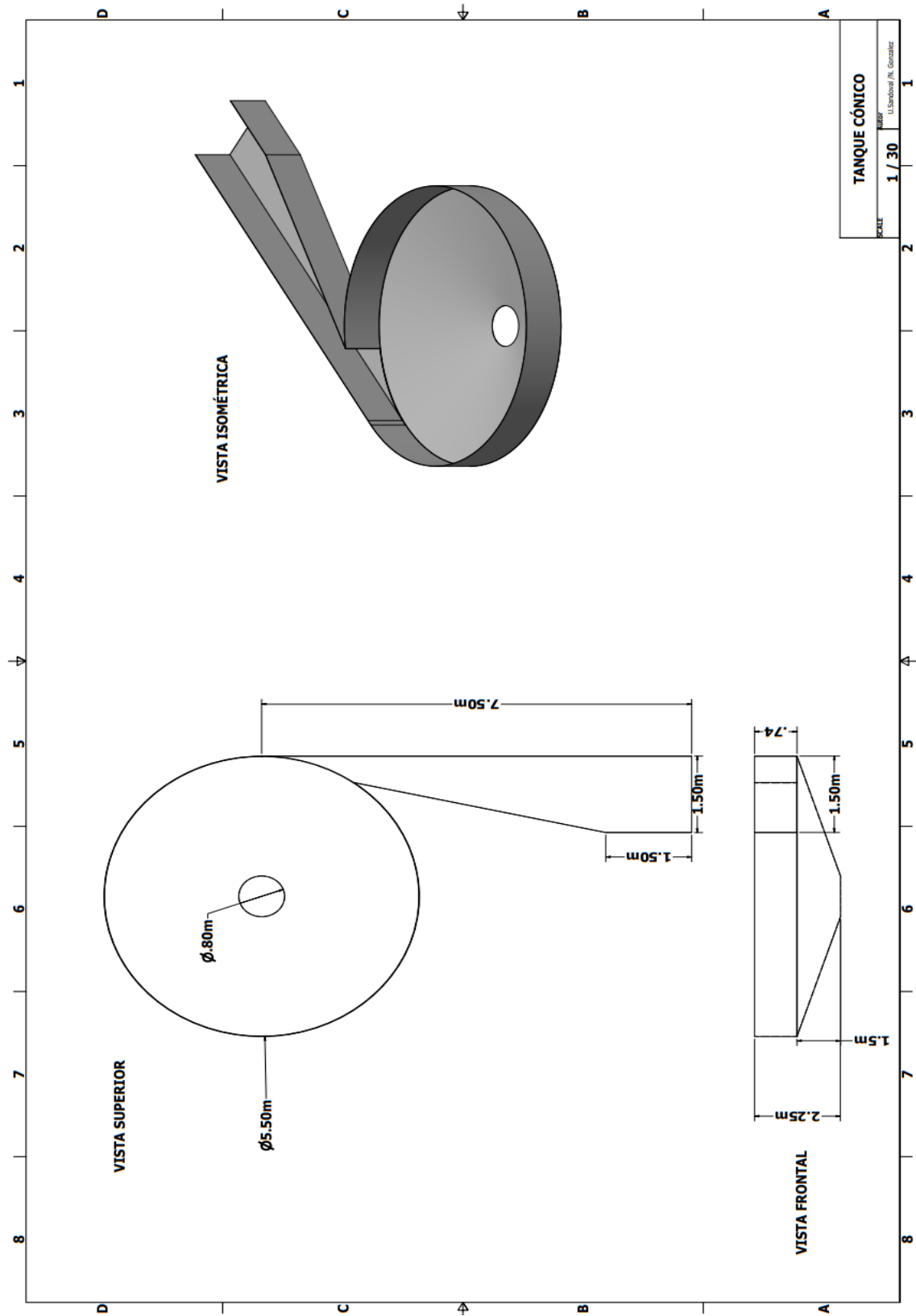
ANEXO 1

Plano de sistema de generación con tanque cilíndrico elaborado en software Autodesk Inventor 2022.



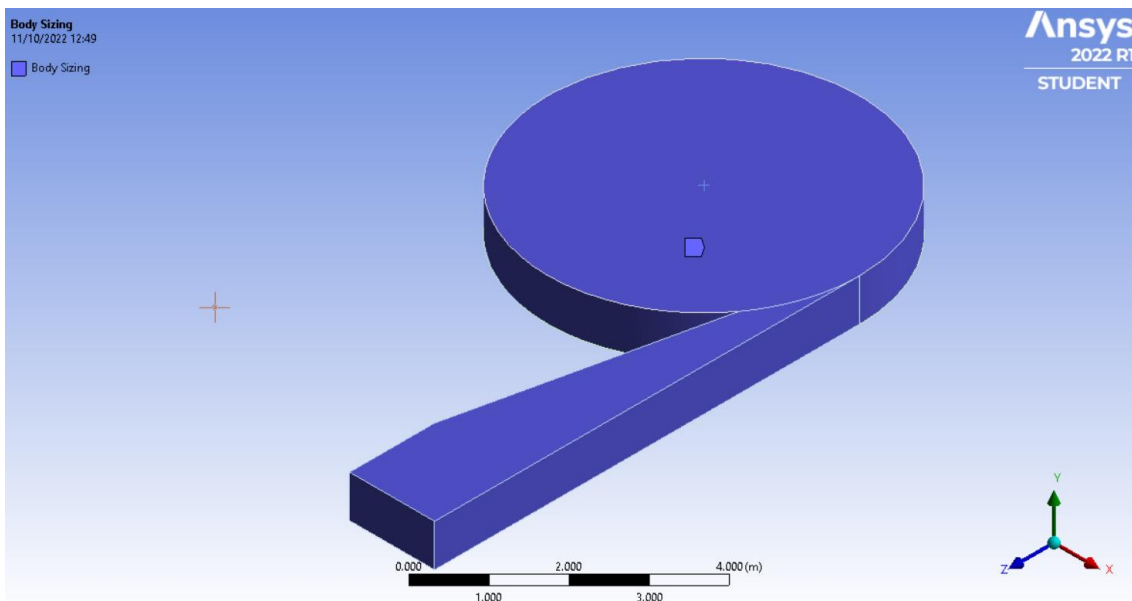
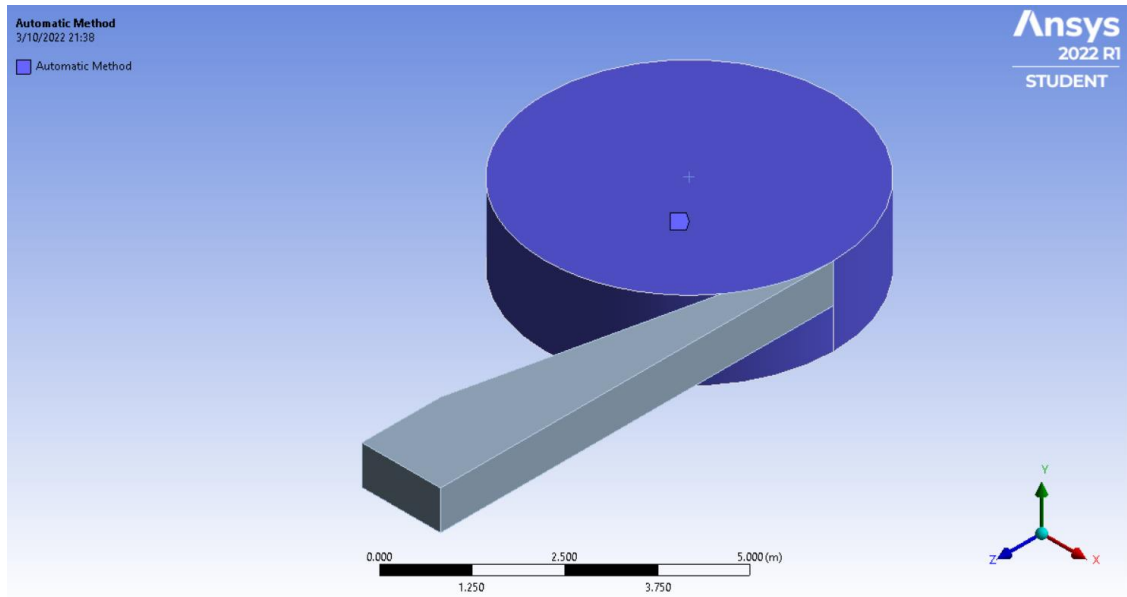
ANEXO 2

Plano de sistema de generación con tanque cónico elaborado en software Autodesk Inventor 2022.



ANEXO 3

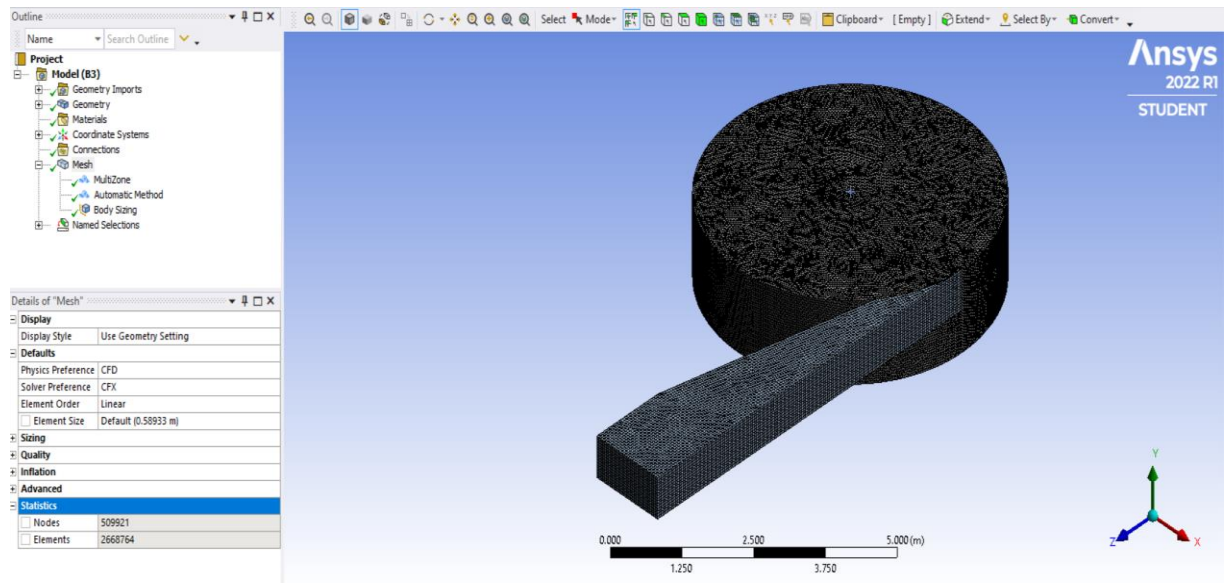
Barrido de estructura previo a mallado realizados en Software Ansys 2022 R1



Identificación de partes que conforman el sistema de generación mediante el barrido de cuerpos, paso previo al establecimiento del mallado adecuado para cada parte del sistema.

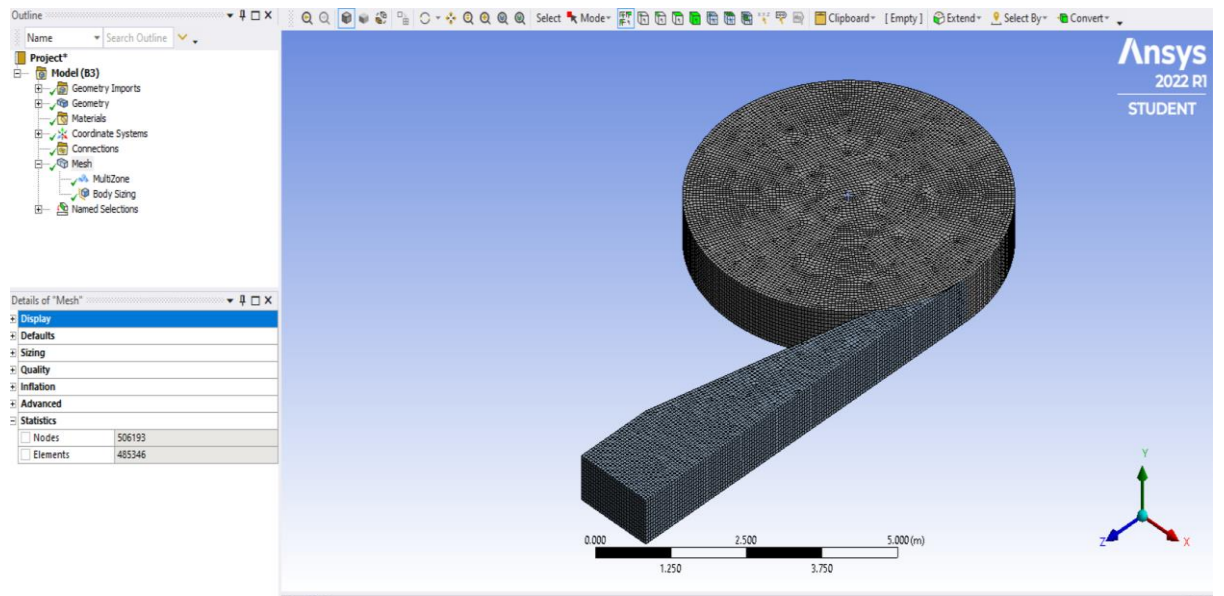
ANEXO 4

Mallado de geometría cilíndrica en Software Ansys 2022 R1



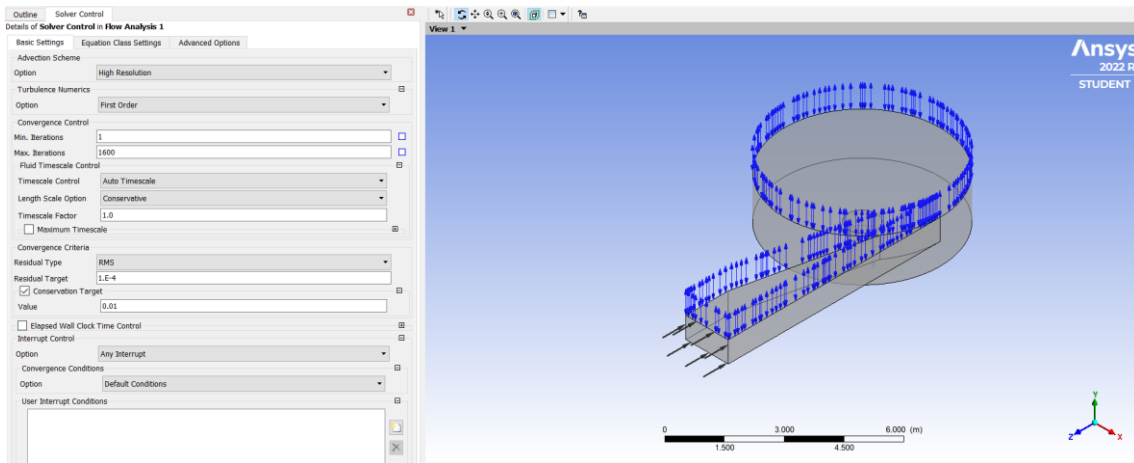
ANEXO 5

Mallado de geometría cónica en Software Ansys 2022 R1



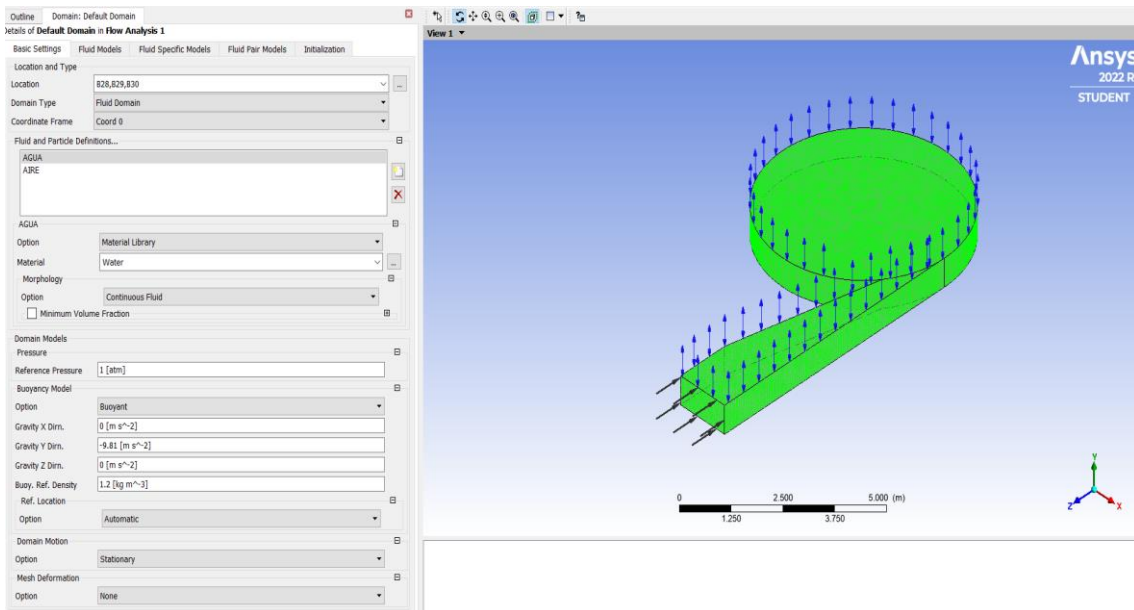
ANEXO 6

Determinación de condiciones de borde de geometría cilíndrica en Software Ansys 2022 R1



ANEXO 7

Determinación de condiciones de borde de geometría cónica en Software Ansys 2022 R1



Informe del Asesor de Tesis para obtener el título profesional

- 1) Apellidos/Nombres: Gonzalez Chonseng Nicol Dayana Antonieta
Sandoval Vasquez Ursus Jhonatan

- 2) Título de la Tesis: Evaluación de la geometría del tanque en la velocidad de vórtice gravitacional para un sistema de generación de energía hidráulica

- 3) Evaluación del Contenido: La presente tesis para título reúne las condiciones metodológicas de la investigación científica y está en conformidad con los Artículos N° 39 y 40 del Reglamento General de Grados y Títulos vigente de la Universidad Nacional del Santa, concluyéndose que el tesista ha elaborado el presente informe dentro de las líneas de investigación que promueve la E.P.I.E.

- 4) Observaciones: Ninguna

- 5) Certificación de Aprobación: En calidad de asesor certifico la aprobación de la tesis para título.

Fecha: Nuevo Chimbote, enero del 2023.



Dr. Edgar Paz Pérez
Asesor



DECLARACION JURADA DE AUTORÍA

Yo, Nicol Dayana Antonieta Gonzalez Chonseng, Bachiller de la E.P de Ingeniería en Energía

Facultad:	Ciencias		Educación		Ingeniería	X
Escuela Profesional:	Ingeniería en Energía					
Departamento Académico:						
Escuela de Posgrado	Maestría			Doctorado		

Programa:

De la Universidad Nacional del Santa; Declaro que el trabajo de investigación es un **trabajo inédito**, intitulado:

EVALUACIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL TANQUE EN LA VELOCIDAD DE VÓRTICE GRAVITACIONAL PARA UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA HIDRÁULICA

presentado en 77 folios, para la obtención del Grado académico:	()
Título profesional: (X)	Investigación anual: ()

- He citado todas las fuentes empleadas, no he utilizado otra fuente distinta a las declaradas en el presente trabajo.
- Este trabajo de investigación no ha sido presentado con anterioridad ni completa ni parcialmente para la obtención de grado académico o título profesional.
- Comprendo que el trabajo de investigación será público y por lo tanto sujeto a ser revisado electrónicamente para la detección de plagio por el VRIN.
- De encontrarse uso de material intelectual sin el reconocimiento de su fuente o autor, me someto a las sanciones que determinan el proceso disciplinario.

Nuevo Chimbote, enero de 2023

Firma:

Nombres y Apellidos: Nicol Dayana Antonieta Gonzalez Chonseng

DNI: 76915781



DECLARACIÓN JURADA DE AUTORÍA

Yo, Ursus Jhonatan Sandoval Vasquez, Bachiller de la E.P de Ingeniería en Energía

Facultad:	Ciencias		Educación		Ingeniería	X
Escuela Profesional:	Ingeniería en Energía					
Departamento Académico:						
Escuela de Posgrado	Maestría			Doctorado		

Programa:

De la Universidad Nacional del Santa; Declaro que el trabajo de investigación es un **trabajo inédito**, intitulado:

EVALUACIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL TANQUE EN LA VELOCIDAD DE VÓRTICE GRAVITACIONAL PARA UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA HIDRÁULICA

presentado en 77 folios, para la obtención del Grado académico: ()

Título profesional: (X) Investigación anual: ()

- He citado todas las fuentes empleadas, no he utilizado otra fuente distinta a las declaradas en el presente trabajo.
- Este trabajo de investigación no ha sido presentado con anterioridad ni completa ni parcialmente para la obtención de grado académico o título profesional.
- Comprendo que el trabajo de investigación será público y por lo tanto sujeto a ser revisado electrónicamente para la detección de plagio por el VRIN.
- De encontrarse uso de material intelectual sin el reconocimiento de su fuente o autor, me someto a las sanciones que determinan el proceso disciplinario.

Nuevo Chimbote, enero de 2023

Firma:

Nombres y Apellidos: Ursus Jhonatan Sandoval Vasquez

DNI: 76034416



ACTA DE APROBACIÓN DE ORIGINALIDAD

Yo, Edgar Paz Pérez asesor del trabajo de Investigación de la

Facultad:	Ciencias		Educación		Ingeniería	X
Departamento Académico:						
Escuela de Posgrado:	Maestría			Doctorado		

Programa:

De la Universidad Nacional del Santa; Asesor / Unidad de Investigación revisora del trabajo de Investigación intitulado:

EVALUACIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL TANQUE EN LA VELOCIDAD DE VÓRTICE GRAVITACIONAL PARA UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA HIDRÁULICA

Del estudiante / docente:

Gonzalez Chonseng Nicol Dayana Antonieta
Sandoval Vasquez Ursus Jhonatan

De la escuela / departamento académico: Ingeniería en Energía

Constato que la investigación presentada por los bachilleres es un trabajo propio, el cual se trabajó en conjunto con mi persona asesorando en las observaciones que se obtuvieron durante su proceso. Quién suscribe la presente, declaro el haber analizado dicha tesis y concluyo que lo presentado a la escuela de Ingeniería en Energía no se conforman como plagio. A mi claro saber y entender, la investigación cumple con las normas de citas y referencias establecidas por la Universidad Nacional del Santa.

Nuevo Chimbote, enero de 2023

Firma:

Nombres y Apellidos del Asesor: Edgar Paz Pérez

DNI: 32978304