



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO ELECTROMECAÁNICO**

**TEMA: 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.**

**AUTORES: JONATHAN ALEXIS HARO VALLADARES
EDISON FABRICIO SANAGUANO JIMÉNEZ**

DIRECTOR: WILSON SÁNCHEZ

LATACUNGA

2016



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, “**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**” realizado por el señor **JONATHAN ALEXIS HARO VALLADARES** y el señor **EDISON FABRICIO SANAGUANO JIMÉNEZ**, ha sido revisado en su totalidad y analizado por el software anti-plagio, el mismo cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, por lo tanto me permito acreditarlo y autorizar a los señores **JONATHAN ALEXIS HARO VALLADARES** y el señor **EDISON FABRICIO SANAGUANO JIMÉNEZ** para que lo sustente públicamente.

Latacunga, 30 de noviembre de 2016

Una firma manuscrita en tinta azul, que parece ser la del director mencionado en el texto.

.....
ING. WILSON EDMUNDO SÁNCHEZ OCAÑA
DIRECTOR



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA

AUTORIA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, **JONATHAN ALEXIS HARO VALLADARES**, con cédula de identidad N° 1721779476, y **EDISON FABRICIO SANAGUANO JIMÉNEZ**, declaramos que este trabajo de titulación, **“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”** ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas.

Consecuentemente declaro que este trabajo es de nuestra autoría, en virtud de ello me declaro responsable del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada.

Latacunga, 30 de noviembre del 2016

.....
Jonathan Alexis Haro Valladares
C.C.: 1721779476

.....
Edison Fabricio Sanaguano Jiménez
C.C.: 1718484288



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA

AUTORIZACIÓN

Nosotros, **JONATHAN ALEXIS HARO VALLADARES** y **EDISON FABRICIO SANAGUANO JIMÉNEZ**, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar en la biblioteca virtual de la institución el presente trabajo de titulación “**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**” cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra autoría y responsabilidad.

Latacunga, 30 noviembre del 2016

Jonathan Alexis Haro Valladares

C.C.: 1721779476

Edison Fabricio Sanaguano Jiménez

C.C.: 1718484288

DEDICATORIA

A mi familia, con mucho amor y cariño por su apoyo incondicional a lo largo de mi vida, y a Diana C. que ha estado siempre junto a mí, en cada paso que doy.

Jonathan

Principalmente dedico este trabajo a mis padres, que, con su esfuerzo y apoyo durante el transcurso de mi formación como ingeniero electromecánico, han formado en mí la persona que soy ahora, a mis hermanos y Gabriela B, que siempre me han dado señales de aliento para no bajar mis brazos durante todo este tiempo.

Edison

AGRADECIMIENTO

A nuestros padres que han estado en la buenas y en las malas durante toda nuestra vida.

A la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE extensión Latacunga, por habernos dado la oportunidad de estudiar en tan prestigiosa carrera, al ingeniero Wilson Sánchez por su total apoyo durante el transcurso de la realización del proyecto de titulación y nuestra directora de carrera Katya Torres quien ha sido un pilar fundamental para lograr nuestro objetivo final, y finalmente al ingeniero Washington Freire, que más que un docente, ha sido un amigo.

A nuestros compañeros "Ricardo, Wilson, Carlos, Luis, Diego y Leonardo" por el apoyo brindado, a su modo, todo este tiempo.

A todas las personas que han aportado con su granito de arena durante todo nuestro proceso de formación académica.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CARÁTULA	i
CERTIFICACIÓN	ii
AUTORIA DE RESPONSABILIDAD	iii
AUTORIZACIÓN	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTO	vi
ÍNDICE DE CONTENIDO	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	xi
ÍNDICE DE TABLAS	xv
RESUMEN	xvi
ABSTRACT	xvii

CAPÍTULO I

GENERALIDADES	1
1.1. Introducción	1
1.2. Planteamiento del problema	1
1.3. Justificación e importancia	2
1.4. Objetivos	2
1.4.1. Objetivo General	2
1.4.2. Objetivos específicos	2
1.5. Alcance	2

CAPÍTULO II

FUNDAMENTO TEÓRICO	3
2.1. Generación de Energía Eléctrica	3
2.2. Fuentes de energía eléctrica	3
2.2.1. Fuentes de energías convencionales	3
2.2.2. Fuentes de energías no convencionales	3
2.2.3. Centrales de generación eléctrica	3
2.3. Central de generación hidroeléctrica	4
2.3.1. Tipos de centrales hidroeléctricas	4
2.3.2. Centrales hidroeléctricas de pasada o sin embalse	5
2.3.3. Centrales de regulación o con embalse	5
2.3.4. Centrales de acumulación por bombeo	6

2.4.	Central hidroeléctrica gravitacional de vórtice	6
2.5.	Teoría de modelos	7
2.6.	Modelación hidráulica.....	7
2.7.	Ecuaciones de conservación aplicadas en CFD	7
2.7.1.	Fluido y propiedades	7
2.7.2.	Conservación de la masa.....	8
2.7.3.	Conservación de la energía – Ecuación de Bernoulli	9
2.7.4.	Ecuación de energía	9
2.7.5.	Ecuaciones de movimiento	10
2.8.	Dinámica computacional de fluidos	11
2.9.	ANSYS	12
2.9.1.	Como trabaja ANSYS CFD	12
2.9.2.	Solución CFD ANSYS	13
2.9.3.	ANSYS CFX	14
2.9.4.	Visualización de los resultados en el post-procesador.....	14
2.9.5.	ANSYS Workbench.....	15
2.9.6.	Métodos de discretización	18
2.9.7.	Clasificación de las mallas	19
2.9.8.	Calidad de la malla.....	20
2.9.9.	Calidad de malla métrica.....	22

CAPÍTULO III

CASA DE LA CALIDAD	23	
3.1.	Desarrollo del estado de la ciencia	23
3.2.	Estudio del sistema de vórtice gravitacional.....	23
3.2.1.	Situación inicial	23
3.2.2.	Situación final.....	24
3.2.3.	Descripción de la caja negra	24
3.2.4.	Despliegue de la función de la calidad	24
3.2.5.	Diagrama funcional	24
3.3.	Estudio de soporte se sistema	25
3.3.1.	Situación inicial	25
3.3.2.	Situación final.....	25
3.3.3.	Descripción de la caja negra	25
3.3.4.	Despliegue de la función de la calidad	25
3.3.5.	Diagrama funcional	26
3.4.	Módulos.....	26
3.5.	Definición de módulos	26
3.6.	Planteamiento y selección de alternativas	27
3.6.1.	Sistema gravitacional de vórtice.....	27
3.6.2.	Estructura de soporte	27

3.6.3.	Reservorio.....	28
3.6.4.	Turbina.....	28
3.7.	Análisis computacional de materiales seleccionados.....	29
3.7.1.	Sistema gravitacional de vórtice.....	29
3.7.2.	Estructura de soporte.....	35
3.7.3.	Reservorio.....	40
3.7.4.	Turbinas.....	45
3.8.	Selección de alternativas de módulo.....	59
3.8.1.	Alternativa 1.....	60
3.8.2.	Alternativa 2.....	60
3.8.3.	Alternativa 3.....	60
3.8.4.	Generalidades de alternativas.....	61
3.8.5.	Bosquejo de prototipo a diseñar.....	61

CAPÍTULO IV

Estudio ANSYS CFX.....	63	
4.1.	Desarrollo de geometría.....	63
4.1.1.	Creación del modelo sólido.....	63
4.2.	Diseño y creación de mallado.....	64
4.2.1.	Creación de malla.....	64
4.2.2.	Calidad de malla.....	65
4.2.3.	Creación de condiciones de borde.....	65
4.3.	Pre procesamiento ANSYS CFX.....	67
4.3.1.	Análisis de fluidos.....	67
4.3.2.	Expresiones.....	74
4.3.3.	Solucionador.....	75
4.4.	CFX Solver manager.....	77

CAPÍTULO V

ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	78	
5.1.	Estadísticas de mallado.....	78
5.1.1.	Diagnóstico de calidad de malla.....	78
5.1.2.	Número total de nodos, elementos y fronteras en la malla.....	79
5.2.	Simulación de vórtice en función del tiempo.....	80
5.2.1.	Vista a 0.5 segundos.....	80
5.2.2.	Vista a 1.5 segundos.....	81
5.2.3.	Vista a 2.5 segundos.....	82
5.2.4.	Vista a 6 segundos.....	83
5.3.	Fracción de volumen de agua en el sistema gravitacional.....	84

5.4.	Presión en la superficie	86
5.5.	Generación.....	87
5.5.1.	Caudal.....	87
5.5.2.	Gravedad	88
5.5.3.	Densidad del agua	88
5.5.4.	Altura.....	88
5.5.5.	Cálculo de potencia.....	88

CONCLUSIONES 91

RECOMENDACIONES..... 93

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 94

ANEXOS..... 97

ANEXO A Caja negra de vórtice gravitacional

ANEXO B Caja negra de base del vórtice gravitacional

ANEXO C Manual de procedimiento de simulación

ANEXO D Artículo

ANEXO E Características técnicas de motores

ANEXO F Planos mecánicos del prototipo

ANEXO G Ensamble del prototipo de vórtice gravitacional

ANEXO H Plan de mantenimiento de bomba

ANEXO I Licencia ANSYS

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Central de pasada.....	5
Figura 2 Central con embalse	5
Figura 3 Central de bombeo	6
Figura 4 Funcionamiento central hidroeléctrica gravitacional de vórtice.....	7
Figura 5 Elementos de fluidos para conservación de leyes.....	8
Figura 6 Formulación de tasa de conservación de masa	9
Figura 7 Esfuerzos realizados en la superficie en dirección X.....	10
Figura 8 Tipo de volumen de control	13
Figura 9 Estructura de ANSYS CFX.....	14
Figura 10 Entrono ANSYS Workbench	15
Figura 11 Sub módulos de sistema CFX.....	16
Figura 12 Ejemplos de métodos de mallados.....	17
Figura 13 a) Malla computacional 2D b) Malla computacional 3D.....	17
Figura 14 Métodos de mallado.....	18
Figura 15 Ejemplo de malla estructurada.....	19
Figura 16 Malla no estructurada.....	20
Figura 17 Malla Ortogonalidad	20
Figura 18 Tipo de mallado por expansión	21
Figura 19 Tipo de mallado por relación de aspecto del mallado.....	21
Figura 20 Descripción de diagrama de Sistema Gravitacional de Vórtice.....	24
Figura 21 Descripción de diagrama funcional de base del sistema	26
Figura 22 Módulos de funcionamiento de Sistema Gravitacional de Vórtice	26
Figura 23 Dimensiones de sistema gravitacional de vórtice	29
Figura 24 Sistema gravitacional de vórtice (Vista 3D)	30
Figura 25 Interfaz de Static Structural del sistema gravitacional de vórtice	30
Figura 26 Propiedades mecánicas insertadas en ANSYS.....	31
Figura 27 Visualización de mallado de sistema gravitacional de vórtice.....	31
Figura 28 Ubicación de la base del sistema a analizar.....	32
Figura 29 Detalles de fuerza aplica a sistema gravitacional de vórtice.....	32
Figura 30 Fuerza hidrostática aplica a sistema gravitacional de vórtice	33
Figura 31 Deformación de sistema gravitacional de vórtice	33
Figura 32 Tensión de Von-Mises de sistema gravitacional de vórtice	34
Figura 33 Factor de seguridad de sistema gravitacional de vórtice	34
Figura 34 Soporte de sistema 3D.....	35
Figura 35 Interfaz de Static Structural de mesa de trabajo.....	36

Figura 36	Datos propios de acero estructural en ANSYS.....	36
Figura 37	Ubicación de soportes en estructura	36
Figura 38	Fuerza de 98N colocada en la parte superior.....	37
Figura 39	Fuerza de 147N colocada en la parte media	37
Figura 40	Mallado realizado de mesa de trabajo.....	37
Figura 41	Deformación resultante de estructura	39
Figura 42	Tensión de Von-Mises de estructura.....	39
Figura 43	Factor de seguridad de mesa de trabajo	40
Figura 44	Vista frontal y lateral de reservorio	41
Figura 45	Vista 3D de reservorio.....	41
Figura 46	Interfaz Static Structural de reservorio	41
Figura 47	Propiedades mecánicas de acrílico en ANSYS	42
Figura 48	Mallado de reservorio.....	42
Figura 49	Colocación de soporte en reservorio.....	43
Figura 50	Parámetros de presión hidrostática.....	43
Figura 51	Aplicación de presión hidrostática a reservorio	44
Figura 52	Deformación en ANSYS de reservorio	44
Figura 53	Tensión equivalente de (Von-Mises) de reservorio.....	45
Figura 54	Factor de seguridad de reservorio.....	45
Figura 55	Dimensiones generales de la Turbina Uno.....	46
Figura 56	CAD de la Turbina Uno	46
Figura 57	Interfaz “Static Structural” de la Turbina Uno.....	46
Figura 58	Propiedades mecánicas de polietileno en ANSYS	47
Figura 59	Mallado de la turbina Uno	47
Figura 60	Colocación de soporte en la turbina Uno.....	48
Figura 61	Parámetros de las fuerzas en cada álabe de la turbina Uno	48
Figura 62	Caras seleccionadas de la turbina Uno	48
Figura 63	Deformación en ANSYS de la Turbina Uno.....	49
Figura 64	Tensión equivalente de (Von-Mises) de la Turbina Uno	50
Figura 65	Factor de seguridad de la Turbina Uno	50
Figura 66	Dimensiones generales de la Turbina Dos.....	50
Figura 67	CAD de la Turbina Dos	51
Figura 68	Interfaz “Static Structural” de la Turbina Dos.....	51
Figura 69	Mallado turbina Dos	52
Figura 70	Colocación de soporte en la Turbina Dos.....	52
Figura 71	Parámetros de las fuerzas en cada álabe de la turbina Dos.....	53
Figura 72	Caras seleccionadas de la turbina Dos	53

Figura 73 Deformación en ANSYS de la Turbina Dos	53
Figura 74 Tensión equivalente de (Von-Mises) de la Turbina Dos	54
Figura 75 Factor de seguridad de la Turbina Dos	54
Figura 76 Dimensiones generales de la Turbina Tres	55
Figura 77 CAD de la Turbina Tres	55
Figura 78 Interface “Static Structural” de la Turbina Tres	56
Figura 79 Mallado de la Turbina Tres.....	56
Figura 80 Colocación de soporte en la Turbina Tres.....	57
Figura 81 Parámetros de las fuerzas en cada álabe de la Turbina Tres.....	57
Figura 82 Caras seleccionadas de la Turbina Tres	57
Figura 83 Deformación en ANSYS de la Turbina Tres	58
Figura 84 Tensión equivalente de (Von-Mises) de la Turbina Tres	59
Figura 85 Factor de seguridad de la Turbina Tres.....	59
Figura 86 a) Alternativa 1 b) Alternativa 2 c) Alternativa 3.....	60
Figura 87 Visualización 3D de sistema a construir	62
Figura 88 Selección apartada de sistema	63
Figura 89 Modelo sólido a utilizar.....	63
Figura 90 Mallado inicial	64
Figura 91 Mallado Final.....	64
Figura 92 Mejoramiento de malla.....	65
Figura 93 Condición de entrada	65
Figura 94 Condición de salida.....	66
Figura 95 Condición de superficie.....	66
Figura 96 Condición de paredes	66
Figura 97 Datos de inicialización.....	67
Figura 98 Creación de materiales	68
Figura 99 Características de material AGUA.....	68
Figura 100 Características de material AIRE	69
Figura 101 Configuración de dominio de modelo	69
Figura 102 Detalles de Multiphase.....	70
Figura 103 Definición de parámetros característicos.....	70
Figura 104 Configuración de entrada	71
Figura 105 Definición de valor de agua.....	71
Figura 106 Definición de valor de aire.....	72
Figura 107 Configuración de salida.....	72
Figura 108 Configuración de superficie.....	72
Figura 109 Definición de valor de agua.....	73

Figura 110 Definición de valor de aire.....	73
Figura 111 Configuración de parámetros de pared	73
Figura 112 Unidades a utilizar.....	75
Figura 113 Control de solución	76
Figura 114 Datos de salida	77
Figura 115 Definición de particiones	77
Figura 116 Estadísticas de mallado	78
Figura 117 Total número de nodos	79
Figura 118 Vista agua a 0.5 segundos.....	80
Figura 119 Vista real a 0.5 segundos.....	81
Figura 120 Vista agua a 1.5 segundos.....	81
Figura 121 Vista real a 1.5 segundos.....	82
Figura 122 Vista agua a 2.5 segundos.....	82
Figura 123 Vista real a 2.5 segundos.....	83
Figura 124 Vista agua a 6 segundos.....	83
Figura 125 Vista real a 6 segundos.....	84
Figura 126 Vista superior de fracción de volumen de agua.....	84
Figura 130 Vista superior real de fracción de volumen de agua	84
Figura 128 Vista lateral de fracción de volumen de agua	85
Figura 129 Vista lateral real de fracción de volumen de agua	85
Figura 130 Vista frontal de fracción de volumen de agua.....	86
Figura 134 Vista frontal real de fracción de volumen de agua.....	86
Figura 132 Presión ejercida en las paredes	87
Figura 133 Altura de caída de agua	88
Figura 134 Multímetro digital.....	89
Figura 135 Diagrama del circuito	89

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Estado de celda en CFX.....	16
Tabla 2 Calidad de malla según su Oblicuidad.....	22
Tabla 3 Calidad de malla según su Ortogonalidad	22
Tabla 4 Selección de alternativas de construcción	26
Tabla 5 Alternativas de material de sistema gravitacional de vórtice	27
Tabla 6 Alternativas de material de soporte o estructura	27
Tabla 7 Alternativas de material de reservorio.....	28
Tabla 8 Alternativas de material de turbina.....	28
Tabla 9 Propiedades mecánicas de Acrílico	30
Tabla 10 Propiedades de mallado de sistema gravitacional de vórtice	31
Tabla 11 Dimensiones de mesa de soporte.....	35
Tabla 12 Parámetros de calidad de malla realizada	38
Tabla 13 Propiedades mecánicas de acrílico	42
Tabla 14 Calidad de malla de reservorio	43
Tabla 15 Calidad de malla turbina Uno.....	47
Tabla 16 Calidad de malla turbina Dos.....	52
Tabla 17 Calidad de malla turbina Tres	56
Tabla 18 Ventajas y desventajas.....	61
Tabla 19 Calidad de mallado.....	65
Tabla 20 Mínimo ángulo de ortogonalidad.....	78
Tabla 21 Factor de expansión de malla.....	79
Tabla 22 Máximo aspecto de radio.....	79
Tabla 23 Tomas de mediadas de caudal.....	87

RESUMEN

Se diseñó y estudio experimental del prototipo de sistema gravitacional de vórtice en función del análisis mecánico realizado en el paquete gratuito para estudiantes de ingeniería ANSYS 17.1. El diseño consta de cuatro componentes que son: “Estructura, reservorio, turbinas y Sistema gravitacional de vórtice”; los cuales se implementaron en un módulo que está enfocado al aprendizaje de nuevos conceptos y criterios de una central hidroeléctrica. Mediante la herramienta CFX proporcionada por el mismo software, se estudió el efecto de los diversos parámetros y el comportamiento del flujo de agua en forma individual, para la formación de un vórtice artificial en el prototipo creado en polimetilmetacrilato, que posteriormente dará movimiento a tres distintas turbinas de forma individual, para visualizar el voltaje generado mediante un display. El presente estudio es el primer proyecto en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, sometido a análisis en el software computacional ANSYS, que permite predecir con seguridad como los productos se comportarán en el mundo real. Se comprobó que la generación en el sistema es muy baja debido a las dimensiones del prototipo, la cuales fueron realizadas en función del tipo de licencia que se utilizó, ya que es proporcionada de forma gratuita por ANSYS, con la limitación en la generación de malla.

PALABRAS CLAVE:

- **ENERGÍA ELÉCTRICA**
- **VÓRTICE GRAVITACIONAL**
- **SOFTWARE ANSYS**
- **CENTRALES HIDROELÉCTRICAS**

ABSTRACT

It was designed and experimental study of prototype gravitational vortex system according to the mechanical analysis in the free package for engineering students ANSYS 17.1. The design consists of four components: "Structure, reservoirs, turbines and gravitational vortex system"; which they were implemented in a module that is focused on learning new concepts and criteria of a hydroelectric plant. By CFX tool provided by the same software, the effect of the various parameters and the flow behavior of water individually to the formation of an artificial vortex in the prototype created in poly (methyl methacrylate), which will later provide movement studied three different individually turbines, to display the voltage generated by a display. This study is the first project at the University of the Armed Forces ESPE, subjected to analysis in the ANSYS computer software that allows reliably predict how products will behave in the real world. It was found that the generation in the system is very low due to the dimensions of the prototype, which were made depending on the type of license that was used, as it is provided for free by ANSYS, with the limitation on the mesh generation.

KEYWORDS:

- **ELECTRIC POWER**
- **GRAVITY VORTEX**
- **SOFTWARE ANSYS**
- **HYDROELECTRIC PLANTS**

CAPÍTULO I

GENERALIDADES

1.1. Introducción

En Ecuador, el Gobierno Nacional apoya a la ejecución de proyectos de energías renovables, adaptándose a la nueva matriz energética. A esto se suma que, por su posición geográfica, se puede aprovechar la energía hidráulica en casi todo su territorio. En base a las líneas de investigación de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, se incentiva a que la comunidad universitaria se involucre en la implementación de proyectos de energías renovables que forman parte de la matriz productiva del país.

Además de fomentar el uso de herramientas dinámicas computacionales para fluidos, ya que la dinámica de los fluidos es poco intuitiva, si no imposible, predecir el comportamiento de los flujos de fluidos en un sistema determinado.

Por este motivo, la realización de este tipo de proyectos relacionados con energías renovables y de herramientas computacionales, requieren la formación de profesionales con amplios conocimientos de diseño y construcción.

1.2. Planteamiento del problema

Uno de los principales problemas que aqueja a la población mundial es la contaminación ambiental, producida en cierta parte por la generación de energía eléctrica por medio de centrales nucleares o de vapor; por lo cual se requiere la incentivación de investigar nuevas formas de generación eléctrica que no produzcan contaminación y disminuyan el impacto ambiental, tales como la micro-central gravitacional de vórtice, además la simulación por computadora permite que la persona experimente con muchas políticas y argumentos diferentes sin cambiar o experimentar con el sistema existente real y por ende se garantiza un ahorro económico ya que se pueden modificar variables sin necesidad de implementar un prototipo o sistema por cada una de ellas.

Este tipo de proyecto es respaldado por el Art. 3 de la Ley de Consultoría que establece que son servicios de apoyo a la consultoría: la computación, el procesamiento de datos y el uso auxiliar de equipos especiales.

1.3. Justificación e importancia

Considerando que es necesario la investigación e implementación del uso de energías renovables que contribuyan al ecosistema, como a su vez asegurando alternativas a la matriz productiva. En este proyecto de investigación se consolidará el estudio de los fluidos de una micro-central hidroeléctrica.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

- Estudiar y analizar mediante simulación computacional (ANSYS CFD y ANSYS CFX) el flujo de un micro-central hidroeléctrico gravitacional de vórtice para la generación de energía eléctrica que será demostrada en un prototipo.

1.4.2. Objetivos específicos

- Modelar el sistema de vórtice gravitacional en el software ANSYS.
- Implementar un prototipo en función de análisis realizado.
- Proveer una guía para la modelación de la dinámica computacional de fluidos en el módulo CFX de ANSYS.
- Realizar un artículo técnico de acuerdo a las normativas institucionales.

1.5. Alcance

Mediante la implementación del prototipo de una micro-central gravitacional de vórtice, se pretende fomentar a los estudiantes de Ingeniería Electromecánica a ampliar su conocimiento mediante nuevas metodologías sobre la misma en tiempo real, ya que utiliza un sistema de generación nuevo y de poco conocimiento a nivel institucional.

CAPÍTULO II

FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1. Generación de Energía Eléctrica

La producción de la energía eléctrica trata de la transformación de algún tipo de energía como mecánica o hidráulica, por medio del movimiento relativo entre los conductores y el campo de un generador, siguiendo el principio de Faraday. (Generadores y Maquinaria, 2015)

Existe gran variedad de fuentes para la producción de energía eléctrica siendo estas convencionales o no convencionales.

2.2. Fuentes de energía eléctrica

2.2.1. Fuentes de energías convencionales

Son las fuentes de energía comúnmente utilizadas principalmente la energía hidráulica y térmica. Nuestro país posee un importante recurso hídrico el cual es aprovechado y siendo esta la más utilizada para la producción de la energía eléctrica. (Blanca, 2016)

2.2.2. Fuentes de energías no convencionales

Son las fuentes de energía que por su alto costo de instalación no son comúnmente utilizadas a pesar que son energías limpias para el medio ambiente, dentro de este tipo de fuentes de energías existen: (Blanca, 2016)

- Energía Eólica
- Energía Solar
- Energía Geotérmica
- Energía Mareomotriz
- Biomasa

2.2.3. Centrales de generación eléctrica

Son instalaciones previamente diseñadas para la producción de energía eléctrica, la disposición del área de una instalación depende del tipo de central y la capacidad de generación, existen centrales de generación eléctrica en el mundo con energías convencionales y no convencionales. (Educa, 2016)

2.3. Central de generación hidroeléctrica

El recurso renovable utilizado para este tipo de centrales es el agua de los ríos, aprovechando su energía potencial y cinética para transformarlas en energía eléctrica.

Comúnmente se construye una presa la cual se encarga de contener y almacenar el agua proveniente de los ríos en un embalse y posteriormente dirigirla a la sala de máquinas donde se encuentran las turbinas de los generadores. (Gobierno de España, 2015)

2.3.1. Tipos de centrales hidroeléctricas

Hay muchos tipos de centrales hidroeléctricas, ya que el emplazamiento de la central condiciona en gran parte su diseño, considerando las características constructivas y de operación las podemos clasificarlas en: (Cardozo, 2011)

- **De acuerdo al tipo de embalse**
 - Central de pasada o sin embalse.
 - Centrales de regulación o con embalse.
 - Centrales de acumulación por bombeo.
- **De acuerdo a la altura neta de salto**
 - Saltos de pequeña altura: menores a 14,99 metros.
 - Saltos de mediana altura: Entre 15 y 49,99 metros.
 - Saltos de gran altura: Mayores a 50 metros.
- **Según la potencia instalada**
 - Centrales de gran potencia: Mayores a 10MW.
 - Centrales de media potencia o Mini centrales hidroeléctricas: Entre 1 a 10 MW.
 - Micro central: Menores a 1 MW.
- **Según el sistema de explotación**
 - Centrales aisladas e independientes
 - Centrales coordinadas
- **Según la demanda que satisfacen**
 - Centrales de Base
 - Centrales de Punta

Especificando los tipos de centrales según al tipo de embalse.

2.3.2. Centrales hidroeléctricas de pasada o sin embalse

En este tipo de centrales no existe embalse por lo que no hay acumulación de agua para el funcionamiento de las turbinas, la geografía del terreno no posee gran desnivel, por lo cual la corriente del río tiene que ser lo suficientemente constante durante todo el año para así satisfacer la potencia de diseño. (Educa, 2016)



Figura 1 Central de pasada

Fuente: (Ecovive, 2010)

2.3.3. Centrales de regulación o con embalse

Para este tipo de centrales se construye una o más presas para el almacenamiento de un volumen de agua en forma artificial por encima de las turbinas; el embalse permite regular la cantidad de agua que llega a las turbinas del generador. Las centrales con embalse tienen mayor costo en su instalación, pero se prevé que las turbinas generen la potencia deseada durante todo el año aun en meses de sequía. (Educa, 2016)

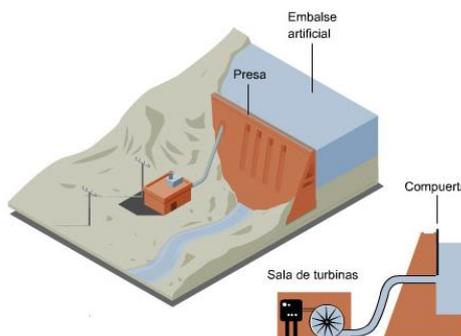


Figura 2 Central con embalse

Fuente: (Ecovive, 2010)

2.3.4. Centrales de acumulación por bombeo

Las centrales por bombeo son sistemas hidroeléctricos que resultan de la combinación de una central hidroeléctrica y una estación de bombeo, este tipo de centrales necesitan dos represas, el agua cae desde el embalse superior haciendo girar la turbina del generador, quedando almacenada en el embalse inferior.

El sistema presenta un mínimo impacto ambiental haciendo que sea posible un uso racional del recurso hídrico, en las horas donde existe la menor demanda de consumo de energía eléctrica, el agua es bombeada al embalse superior para su posterior reutilización. (Hidroproyectos, 2014)

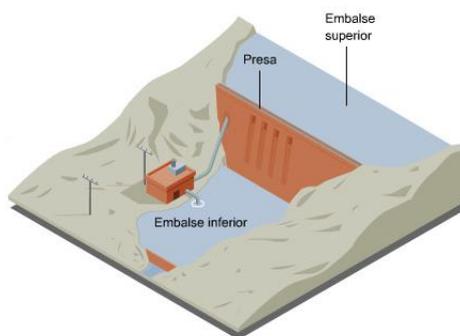


Figura 3 Central de bombeo

Fuente: (Ecovive, 2010)

2.4. Central hidroeléctrica gravitacional de vórtice

Es una innovadora solución para la generación de energía eléctrica diseñada por el ingeniero austriaco, Franz Zotlötere conocida como planta hidroeléctrica de gravedad con vórtice; su energía es proveniente del remolino del agua causado artificialmente, este tipo de centrales son convenientes a partir de un flujo de agua con pequeñas diferencias de altura y lugares con alta sensibilidad ecológica. (Wasserwirbe, 2015)

Su funcionamiento se basa en un estanque redondo con un desagüe central, el flujo del agua que es transportado forma un vórtice estable con lo que mueve la turbina y genera energía eléctrica, a pesar de que esta central posee un rendimiento más bajo que las micro centrales hidroeléctricas convencionales su impacto ambiental es mucho más bajo debido a que los peces pueden transportarse libremente. (Wikipedia, 2016)

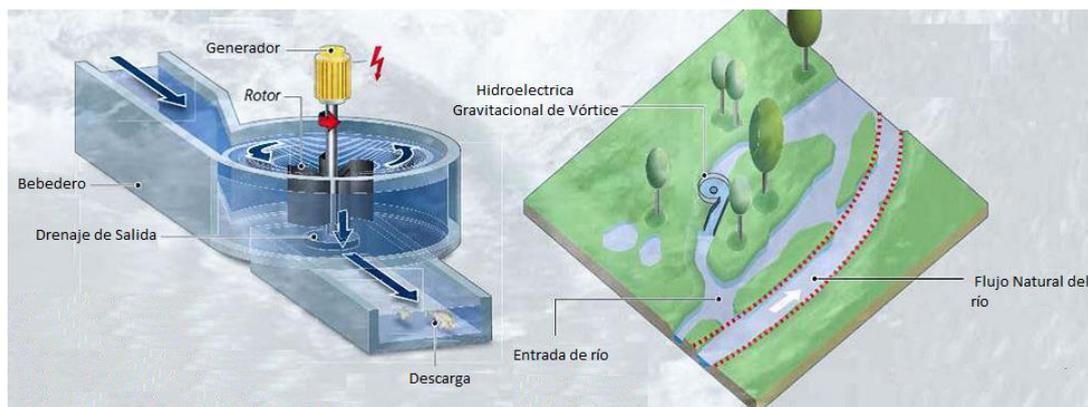


Figura 4 Funcionamiento central hidroeléctrica gravitacional de vórtice

Fuente: (Stiftung KEV, 2011)

2.5. Teoría de modelos

Es el estudio de la lógica matemática que permite predecir el comportamiento de un hecho o fenómeno real con la experimentación de un prototipo, en base en el conocimiento y en la ecuación de dimensiones de las variables físicas que intervienen. (Sebastian, 2012)

2.6. Modelación hidráulica.

A un proceso hidráulico se lo puede estudiar empíricamente, es decir haciendo pruebas y con la observación de los hechos, o analíticamente por medio de cálculos matemáticos. El enfoque experimental tiene la ventaja de que trata con el sistema físico real y la cantidad deseada, no obstante, este método es caro, tardado y, a menudo, poco práctico, la técnica analítica que incluyen las teorías de similitud hidráulica, ahorra tiempo y costos de diseño agilizando los procesos haciendo que sea el método más aceptado en los últimos tiempos. (Mott, 2014)

2.7. Ecuaciones de conservación aplicadas en CFD

2.7.1. Fluido y propiedades

El comportamiento del fluido se describe en términos de propiedades macroscópicas:

- Velocidad U
- Presión P
- Densidad δ
- Temperatura T

- Energía E

Por lo general ignorar (x, y, z, t) en la notación, las propiedades son promedios de un número suficientemente grande de moléculas y un elemento de fluido puede ser pensado como el volumen más pequeño para el que la suposición continua es válida.

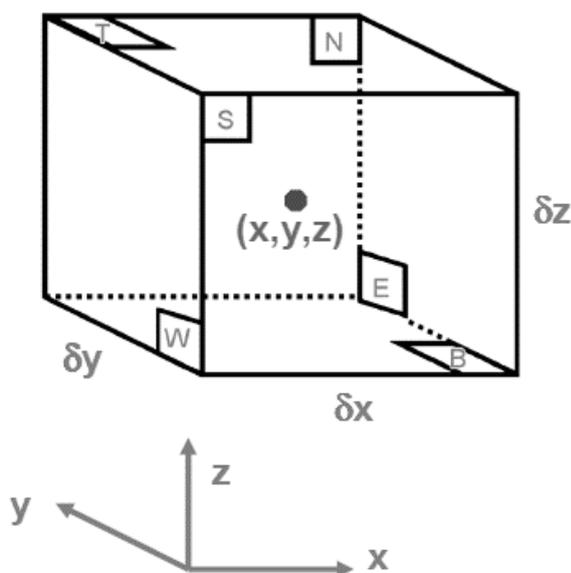


Figura 5 Elementos de fluidos para conservación de leyes

Fuente: (Bakker, 2006)

Por ejemplo, las propiedades en las caras p_W y p_E se expresan con los dos primeros términos del desarrollo en serie de Taylor.

$$p_W = p - \frac{\partial p}{\partial x} \frac{\delta x}{2} \quad \text{EC.1}$$

$$p_E = p + \frac{\partial p}{\partial x} \frac{\delta x}{2} \quad \text{EC.2}$$

2.7.2. Conservación de la masa

- La tasa de aumento de la masa de un líquido es igual a la tasa neta de flujo de masa del mismo.
- Tasa de aumento es:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \delta x \delta y \delta z) = \frac{\partial \rho}{\partial t} (\delta x \delta y \delta z) \quad \text{EC.3}$$

- Las entradas (positivo) y salidas (negativo) se muestran:

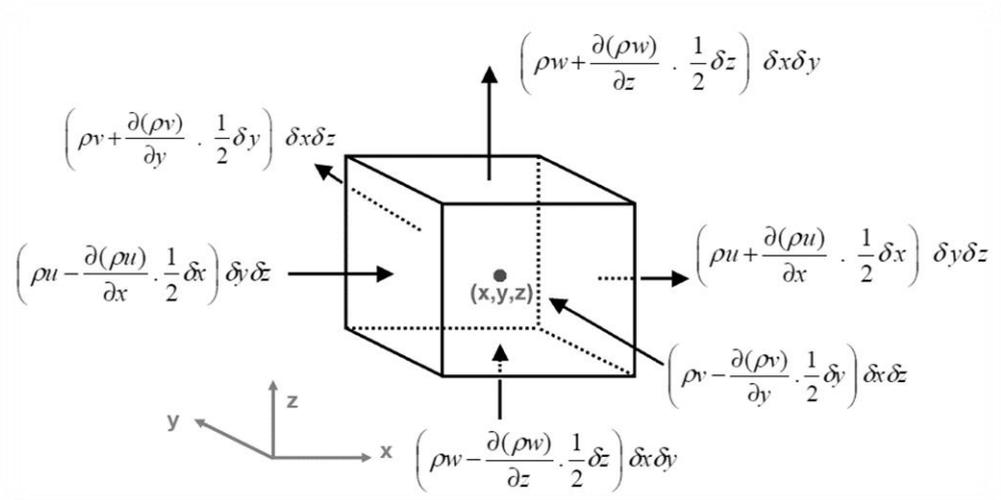


Figura 6 Formulación de tasa de conservación de masa

Fuente: (Bakker, 2006)

2.7.3. Conservación de la energía – Ecuación de Bernoulli

Para el análisis de un problema similar a tubería, se toma en cuenta toda la energía del sistema. Es decir, describe el comportamiento del fluido a lo largo de una corriente de agua.

2.7.4. Ecuación de energía

- **Primera ley de la termodinámica:** relaciona el trabajo y el calor transferido intercambiado en un sistema a través de una nueva variable termodinámica, la energía interna
- Tasa de aumento de la energía es $\frac{\rho \Delta E}{\Delta t}$.
- La energía $E = i + \frac{1}{2}(u^2 + v^2 + w^2)$.
- En este caso, i es la (energía térmica) interna.
- $\frac{1}{2}(u^2 + v^2 + w^2)$ es la energía cinética.
- La energía potencial (la gravedad), por lo general se trata por separado e incluido como un término fuente.
- Vamos a derivar la ecuación de la energía mediante el establecimiento de la derivada total, igual al cambio de energía como resultado del trabajo realizado.

- A continuación, vamos a restar la ecuación de la energía cinética para llegar a una ecuación de conservación de la energía interna.

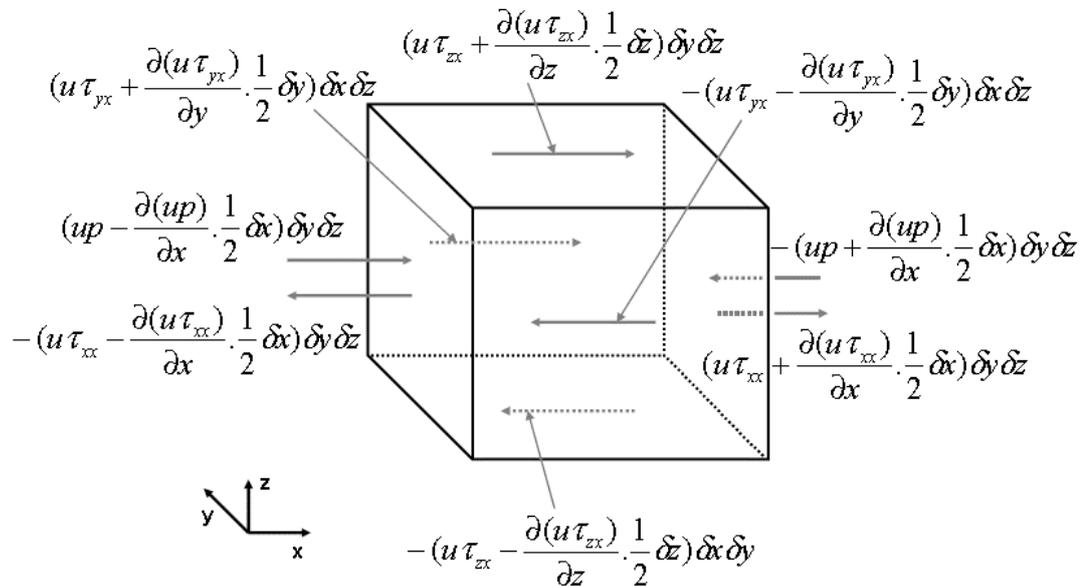


Figura 7 Esfuerzos realizados en la superficie en dirección X

Fuente: (Bakker, 2006)

El ajuste de la derivada total de la energía en una partícula de fluido es igual a los términos de flujo de trabajo y energía derivados previamente, da lugar a la siguiente ecuación de la energía:

$$\rho \frac{\Delta E}{\Delta t} = -\text{div}(pu) + \left[\frac{\partial(u\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(u\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(u\tau_{zx})}{\partial z} + \frac{\partial(v\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(u\tau_{yy})}{\partial y} \right. \quad \text{EC.4}$$

$$\left. + \frac{\partial(u\tau_{zy})}{\partial z} + \frac{\partial(u\tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial(u\tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial(u\tau_{zz})}{\partial z} + \text{div}(k \text{ grad } T) \right]$$

$$+ S_E$$

Tenga en cuenta que también se ha añadido un término S_E , que incluye las fuentes (Energía potencial, fuentes de calor debido a la producción de productos químicos, reacciones, etc.).

2.7.5. Ecuaciones de movimiento

Para el flujo laminar estacionario de un fluido viscoso, newtoniano, incompresible y sin efectos de superficie libre, las ecuaciones de movimiento son la ecuación de continuidad:

$$\vec{\nabla} * \vec{V} = 0 \quad \text{EC.5}$$

Y la ecuación de Navier-Stokes:

$$(\vec{V} * \vec{\nabla})\vec{V} = -\frac{1}{\rho}\vec{\nabla}P' + \nu\nabla^2\vec{V} \quad \text{EC.6}$$

Las ecuaciones de movimiento pueden resolverse mediante el CFD para el caso de flujo estacionario, incompresible, laminar de un fluido newtoniano con propiedades constantes y sin efecto de superficies libres. Se utiliza un sistema coordenado cartesiano. Hay cuatro ecuaciones y cuatro incógnitas: u,v,w y P'.

Continuidad:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad \text{EC.7}$$

Cantidad de movimiento en x:

$$u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} + w\frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial P'}{\partial x} + \nu\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}\right) \quad \text{EC.8}$$

Cantidad de movimiento en y:

$$u\frac{\partial v}{\partial x} + v\frac{\partial v}{\partial y} + w\frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial P'}{\partial y} + \nu\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2}\right) \quad \text{EC.9}$$

Cantidad de movimiento en z:

$$u\frac{\partial w}{\partial x} + v\frac{\partial w}{\partial y} + w\frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial P'}{\partial z} + \nu\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2}\right) \quad \text{EC.10}$$

2.8. Dinámica computacional de fluidos

Del acrónimo en inglés CFD *Computational Fluid Dynamics*, dentro de la Mecánica de fluidos que se fundamenta en el análisis numérico computacional para resolver problemas que, por su complejidad, no se pueden resolver analíticamente y se encuentran relacionados con el movimiento de los fluidos, transferencia de calor, reacciones químicas etc. (Sebastian, 2012)

La dinámica computacional de fluidos es una técnica que utiliza programas computacionales y ordenadores avanzados capaces de ejecutar un gran número de operaciones de cálculo por unidad de tiempo, reduciendo así tiempo y costes de diseño, obteniendo resultados sujetos a la exactitud de las

suposiciones, aproximaciones e idealizaciones establecidas en el análisis. (Cengel & Cimbala, 2012)

El análisis CFD complementa pruebas y experimentación mediante la reducción total de esfuerzos y los costes necesarios para la experimentación y adquisición de datos y se utiliza en todas las etapas de diseño:

- Los estudios conceptuales de nuevos diseños.
- Desarrollo detallado del producto.
- Solución del problema.
- Rediseño.

2.9. ANSYS

Es un paquete computacional que se encuentra involucrado en la simulación de ingeniería, utilizado para predecir cómo se comportan los diseños de producto en entornos del mundo real.

El software ayuda a verificar cómo funcionara un producto antes de que se construya el prototipo, garantizando la confiabilidad del producto haciendo que los ingenieros puedan explorar fácilmente distintas simulaciones y así llegar a la única y mejor solución de diseño. (ANSYS ACADEMIC 17.1, 2016)

2.9.1. Como trabaja ANSYS CFD

El conjunto de ecuaciones que describen los procesos de movimiento, calor y transferencia de masa se conocen como las ecuaciones de Navier-Stokes. Estas ecuaciones diferenciales parciales tuvieron origen en el siglo XIX y no tienen solución analítica conocida, pero en general pueden ser discretizadas y resueltas numéricamente. (ANSYS, 2014)

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \phi dV + \oint_A \rho \phi V \cdot dA = \oint_A \Gamma_\phi \nabla \phi \cdot dA + \int_V S_\phi dV \quad \text{EC.11}$$

Inestable + Advección = Difusión + Generación

Existen diferentes métodos de solución que se utiliza el CFD. El más común, es el que se basa en CFX.

CFX se conoce como la técnica de volúmenes finitos, la región de interés se divide en pequeñas sub regiones, llamado volúmenes de control. Como resultado, se puede obtener una aproximación del valor de cada variable en

puntos específicos a lo largo del dominio. De esta manera, uno obtiene una imagen completa del comportamiento del flujo.

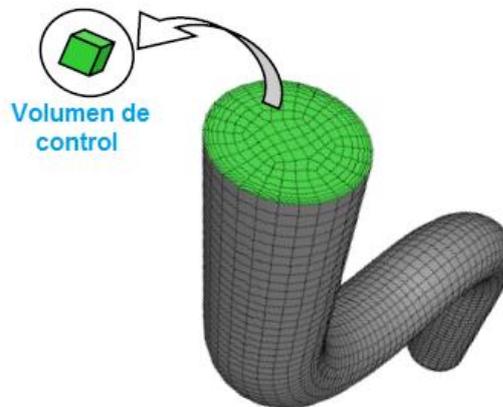


Figura 8 Tipo de volumen de control

Fuente: (ANSYS ACADEMIC 17.1, 2016)

2.9.2. Solución CFD ANSYS

El componente que resuelve el problema de CFD se llama el solucionador. Produce los resultados requeridos en un proceso no interactivo. Un problema CFD se resuelve: (ANSYS, 2014)

- Las ecuaciones diferenciales parciales están integradas sobre todos los volúmenes de control en la región de interés. Esto es equivalente a aplicar una ley básica de conservación (para la masa o impulso) para cada volumen de control.
- Estas ecuaciones integrales se convierten en un sistema de ecuaciones algebraicas mediante la generación de un conjunto de aproximaciones para los términos en las ecuaciones integrales.
- Las ecuaciones algebraicas se resuelven iterativamente debido a la naturaleza no lineal de las ecuaciones.
- La solución exacta depende de una serie de factores, incluyendo el tamaño y forma de los volúmenes de control y el tamaño de los residuos finales. Los procesos físicos complejos, tales como la combustión y la turbulencia, a menudo se modelan usando relaciones empíricas. Las aproximaciones inherentes en estos modelos también contribuyen a las diferencias entre la solución de CFD y el flujo real.

- El solucionador genera un archivo de resultados que pasa a través del post-procesador.

2.9.3. ANSYS CFX

Es un software diseñado principalmente para la dinámica computacional de fluidos (CFD), que consta de cuatro módulos que tienen una geometría, un mallado en la zona de estudio o llamado también el dominio del fluido y el solucionador avanzado con potentes capacidades de pre-procesamiento y post-procesamiento.

ANSYS CFX es capaz de modelar flujos laminares y turbulentos, flujos en múltiples marcos de referencia, flotabilidad, etc., con un proceso de configuración intuitiva, utilizando los menús y gráficos avanzados, obteniendo una eficiente presentación de los análisis de resultados. (ANSYS ACADEMIC 17.1, 2016)

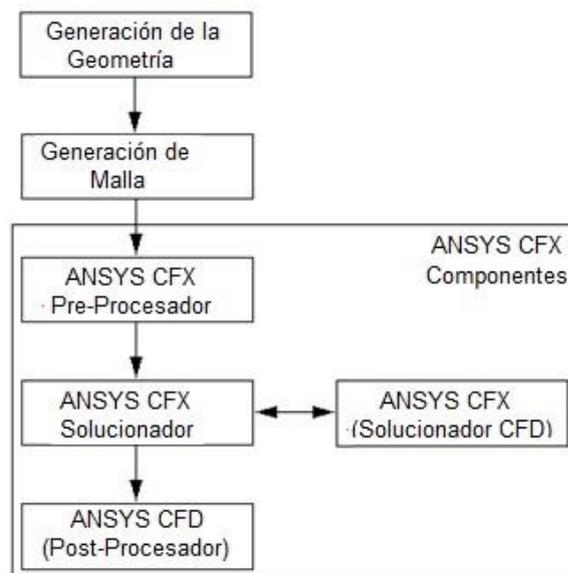


Figura 9 Estructura de ANSYS CFX

Fuente: (ANSYS ACADEMIC 17.1, 2016)

2.9.4. Visualización de los resultados en el post-procesador

El post-procesador es el componente utilizado para analizar, visualizar y presentar los resultados de forma interactiva, incluyendo la obtención de los valores de puntos a secuencias animadas.

Ejemplos de algunas de las características importantes de post-procesadores son:

- Visualización de los volúmenes de geometría y de control.
- Vector que muestra la dirección y magnitud del flujo.
- La visualización de la variación de las variables escalares (variables que sólo tienen magnitud, no de dirección, tales como la temperatura, presión y velocidad) a través del dominio.
- Cálculos numéricos cuantitativos
- Animación
- Gráficos que muestran representaciones gráficas de las variables.

2.9.5. ANSYS Workbench

Es una herramienta de gestión de proyectos que hace fácil realizar automáticamente los estudios para el mejoramiento del diseño, se encarga de administrar los archivos, comprobar los proyectos de forma gráfica en una página y maneja el paso de los datos entre ANSYS Geometría, malla, solver y post-procesado. (ANSYS, 2014)

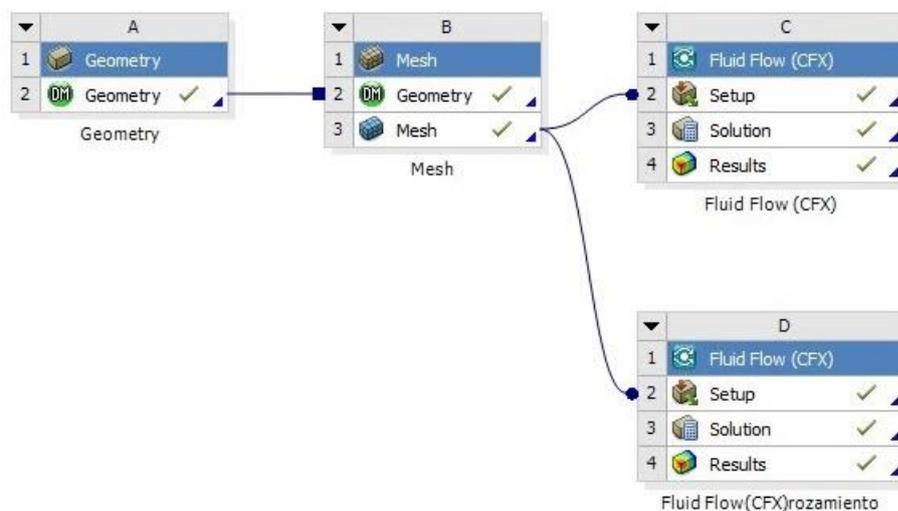


Figura 10 Entorno ANSYS Workbench

Fuente: (ANSYS ACADEMIC 17.1, 2016)

Al combinar múltiples componentes en el sistema el proyecto se establece en un flujo de trabajo, que comprende todos los pasos necesarios para un análisis típico.

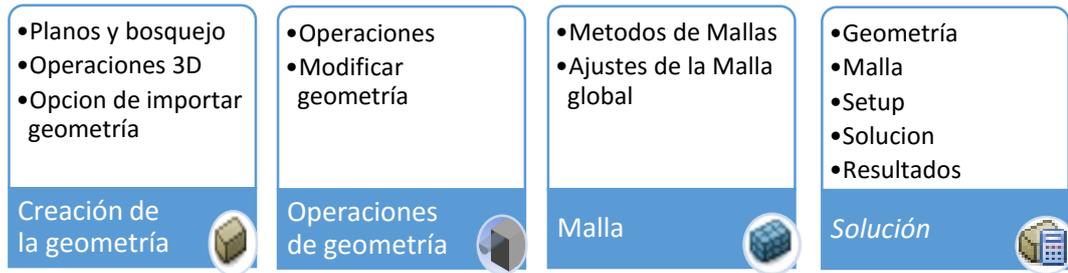


Figura 11 Sub módulos de sistema CFX

a. Estado de la celda

A medida que se completa cada etapa en el modelo de acumulación, el estado de la celda se modifica según sea el caso. (ANSYS, 2014)

Tabla 1
Estado de celda en CFX

Icono	Significado
	Listo
	Requiere actualizar, los datos de subida han sido modificados
	Requiere actualizar, los datos locales han sido modificados
	Sin cumplirse, No existen datos
	Se requiere atención
	Resolviendo
	Error de actualización
	Actualización interrumpida
	Cambios pendientes, listo pero los datos anteriores se han cambiado

Fuente: (ANSYS ACADEMIC 17.1, 2016)

b. Mallado

Es uno de los componentes de Ansys Workbench en la dinámica computacional de fluidos (CFD), se fundamenta en la discretización espacial del dominio es decir divide en un número finito de subdominios (elementos, volúmenes de control, nodos, entre otros), para posteriormente calcular sobre

la misma la aproximación numérica de los flujos. (Vázquez, Jesús Sánchez, 2004)

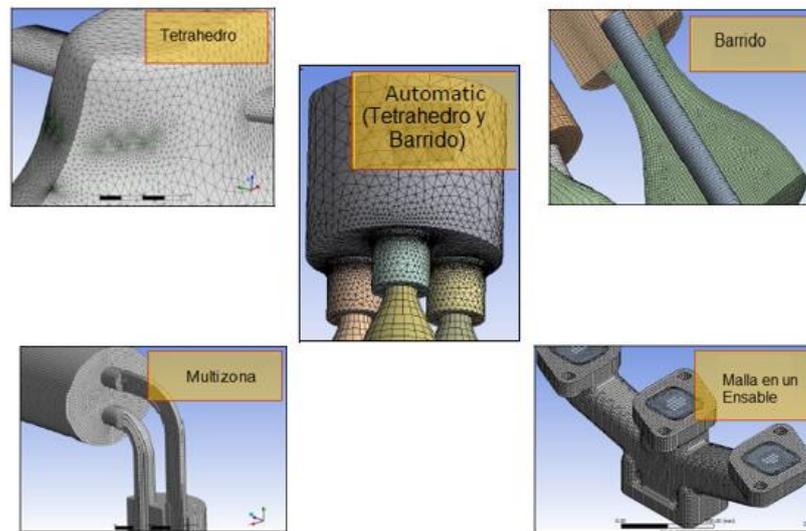


Figura 12 Ejemplos de métodos de mallados

Fuente: (ANSYS, 2014)

Elementos de un mallado

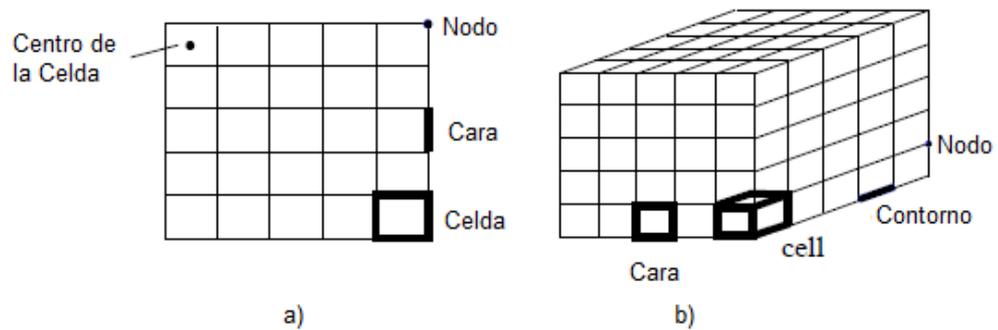


Figura 13 a) Malla computacional 2D b) Malla computacional 3D

Fuente: (ANSYS ACADEMIC 17.1, 2016)

c. Formas de mallados

Existen varios tipos de mallados disponibles en el paquete de ANSYS, la selección del tipo de mallado depende de la geometría, el problema a resolver y las capacidades de solución del computador, estas son:

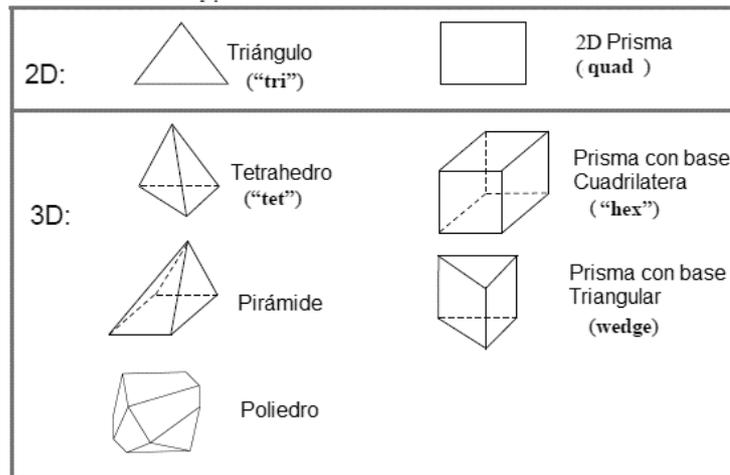


Figura 14 Métodos de mallado

Fuente: (ANSYS, 2014)

2.9.6. Métodos de discretización

Existen varios métodos para la discretización espacial, los principales son:

a. Métodos de diferencias finitas

Fue el primer método aplicado para obtener la solución numérica de las ecuaciones diferenciales por medio de formulación diferencial. El dominio se cubre con puntos llamados nodos en los cuales la ecuación es aproximada reemplazando las derivadas parciales por aproximaciones en términos de los valores nodales de la función. Son sencillos y efectivos en geometrías simples con mallas estructuradas, su principal inconveniente es que la conservación no se garantiza si no se tiene especial cuidado en geometrías irregulares. (Vázquez, Jesús Sánchez, 2004)

b. Métodos de volúmenes finitos

Se basa en la discretización directa de las ecuaciones de conservación de la masa, cantidad de movimiento y la energía en su forma integral. El dominio se divide en volúmenes de control en los cuales se aplican las ecuaciones integrales que son aproximadas mediante cuadraturas. Son conservativos y aplicables a geometrías complejas. (Durán, 2015)

c. Métodos de elementos finitos

Tiene una base matemática muy rígida, particularmente en problemas elípticos y parabólicos, Utilizan la formulación débil. El dominio se divide en elementos y en cada uno de ellos la solución es aproximada, generalmente

de forma lineal, utilizando los valores de la función en los vértices del elemento. Esta aproximación es sustituida en la ecuación integral pesada y se impone que la derivada de dicha integral con respecto al valor en cada nodo sea cero. (Durán, 2015)

2.9.7. Clasificación de las mallas

a. Mallas estructuradas

Son aquellas formadas por un conjunto de nodos o volúmenes de control, que pueden ser identificados de forma única mediante un grupo de índices ordenados (i, j, k) en 3D o (i, j) en 2D. Es el tipo de malla más simple y es equivalente a una malla cartesiana mediante el cambio de coordenadas apropiado. Su mayor desventaja es que sólo pueden ser utilizadas en dominios con geometrías simples y muchas veces acumulan puntos en regiones que no son de interés. Esta representación tiene ventajas en cuanto al ahorro de información que se requiere para la generación de modelos con elementos en forma cuadriláteros o hexaedros. (Durán, 2015)

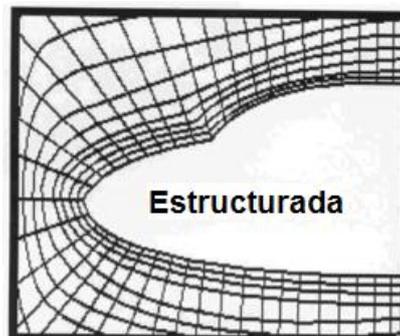


Figura 15 Ejemplo de malla estructurada

Fuente: (Toba, 2015)

b. Mallas no estructuradas

Las mallas se construyen utilizando triángulos o cuadriláteros en 2D y tetraedros o hexaedros en 3D, a diferencia de la malla estructurada, en la no estructurada, no puede identificarse a las celdas de manera única mediante los índices (i, j, k) ; en cambio, las celdas se enumeran internamente por el paquete CFD. La ventaja de su flexibilidad contrasta con la estructura irregular de los datos que produce y la necesidad de usar algoritmos más complicados. (Durán, 2015)



Figura 16 Malla no estructurada

Fuente: (Toba, 2015)

2.9.8. Calidad de la malla

Una malla adecuada es muy importante para controlar errores de discretización ya que una mala calidad en el mallado puede provocar, dificultad de convergencia, mala descripción física del dominio, solución difusa entre otros problemas, por lo que se tiene que tomar en cuenta que la ortogonalidad del mallado, la expansión y la relación de aspecto (o estiramiento) se encuentren en rangos aceptables. (ANSYS ACADEMIC 17.1, 2016)

a. Mallado Ortogonal

El concepto de ortogonalidad de malla se refiere a qué tan cerca los ángulos entre las caras son adyacentes, un ángulo de 90° es óptimo para una superficie cuadrada y 60° para los elementos de caras triangulares. La medida más relevante de la ortogonalidad de malla para el solucionador CFX se ilustra a continuación.

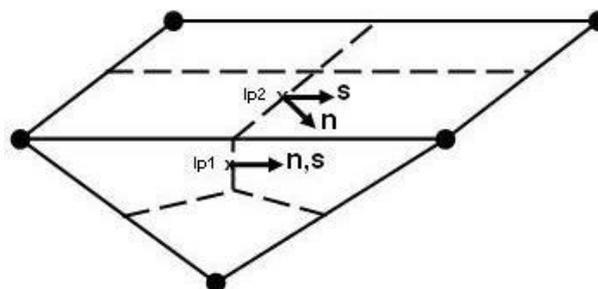


Figura 17 Malla Ortogonalidad

Fuente: (ANSYS ACADEMIC 17.1, 2016)

El ángulo comprendido entre el vector que une dos nodos (s) de la malla y el vector normal para cada superficie (punto de integración n) asociados con ese borde. La ortogonalidad significativa y la no ortogonalidad se ilustran en los puntos IP1 e IP2, respectivamente. (ANSYS ACADEMIC 17.1, 2016)

b. Expansión del mallado

Se refiere a la tasa de cambio en la magnitud de las áreas o volúmenes de las caras del elemento adyacente es decir es el cambio de volúmenes entre celdas vecinas.

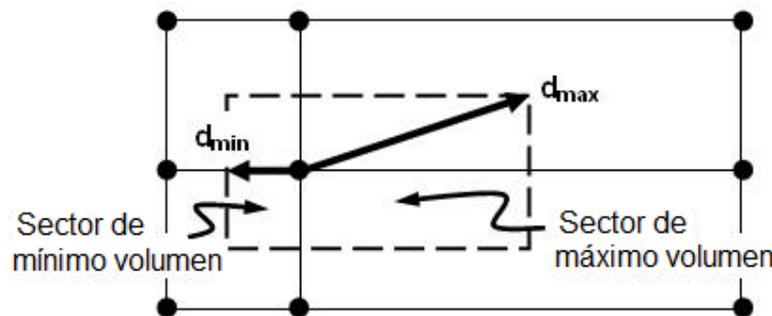


Figura 18 Tipo de mallado por expansión

Fuente: (ANSYS ACADEMIC 17.1, 2016)

Para conseguir un rango aceptable, La relación entre el sector de mayor volumen y el de menor volumen, debe ser menor al valor de 20 para cada volumen de control, los valores de estas medidas también dependen en gran medida de las discretizaciones utilizadas. (ANSYS ACADEMIC 17.1, 2016)

c. Relación del Aspecto del mallado

Es la relación entre el lado más largo y el más pequeño del elemento, este valor tiene que ser menor a 100 para ser aceptable.

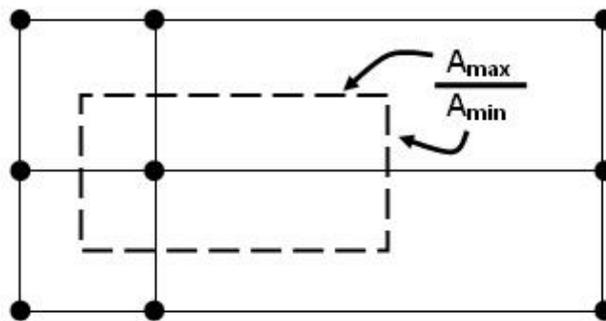


Figura 19 Tipo de mallado por relación de aspecto del mallado

Fuente: (ANSYS ACADEMIC 17.1, 2016)

2.9.9. Calidad de malla métrica

Es necesario comprobar que los criterios de la calidad de la malla se encuentren en los rangos adecuados para la obtención de buenos resultados, no se recomienda valores bajos o altos en la calidad de malla ortogonal, en general, mantener la calidad mínima ortogonal de $>0,1$, o máxima $<0,95$, a continuación, se detalla los espectros de oblicuidad y ortogonalidad para satisfacer una malla de calidad. (ANSYS ACADEMIC 17.1, 2016)

Tabla 2
Calidad de malla según su Oblicuidad

Espectro de la Calidad de la Malla (Oblicuidad)					
Excelente	Muy Buena	Buena	Aceptable	Mala	Inaceptable
0-0,25	0,25-0,5	0,5-0,8	0,8-0,94	0,95-0,97	0,98-1

Fuente: (ANSYS, 2014)

Tabla 3
Calidad de malla según su Ortogonalidad

Espectro de la Calidad de la Malla (Ortogonal)					
Inaceptable	Mala	Aceptable	Buena	Muy Buena	Excelente
0-0,001	0,001-0,14	0,15-0,20	0,2-0,69	0,70-0,95	0,95-1

Fuente: (ANSYS, 2014)

CAPÍTULO III

CASA DE LA CALIDAD

Para el prototipo del sistema de vórtice gravitacional, es de suma importancia realizar un estudio previo de los materiales que se utilizaran en su construcción, debido a que cada uno puede aportar con distintas características y aumentar, o a su vez reducir el funcionamiento del sistema; para lo cual se muestra a continuación la casa de la calidad para los distintos componentes.

3.1. Desarrollo del estado de la ciencia

El presente proyecto de investigación tiene como objetivo principal el estudiar y construir un prototipo de una micro central de generación hidroeléctrica gravitacional de vórtice, con tecnología y materiales de fácil obtención ajustados a las exigencias necesarias. El prototipo debe ser capaz de mostrar de forma didáctica a los estudiantes, el funcionamiento de este sistema para una comprensión más amplia del mismo.

El estudio para la construcción del sistema gravitacional de vórtice está dividido principalmente en dos partes fundamentales que son:

- El sistema gravitacional de vórtice, que comprende la sección de entrada, cilindro de generación de vórtice y cono de succión; los cuales permitirán que el agua forme un pequeño vórtice.
- El sistema de soporte o estructura, que tendrá la función principal de sostener el sistema gravitacional de vórtice.

Los materiales utilizados para los dos sistemas han sido seleccionados de acuerdo a las exigencias requeridas y a su disponibilidad en el mercado nacional.

3.2. Estudio del sistema de vórtice gravitacional

3.2.1. Situación inicial

Se plantea la construcción de un sistema de vórtice gravitacional con los materiales adecuados e ideales, que permitan la libre circulación sin fricción del agua y a su vez la visualización de la misma.

3.2.2. Situación final

Diseñar y establecer el material adecuado para la construcción del sistema gravitacional de vórtice, tomando en cuenta un dimensionamiento ideal para su correcto funcionamiento.

3.2.3. Descripción de la caja negra

En el (Anexo A) se muestra la distribución en función de las necesidades para la construcción del sistema.

3.2.4. Despliegue de la función de la calidad

De acuerdo al criterio y necesidades, el sistema gravitacional de vórtice debe constar con las siguientes características para poder cumplir con el punto principal de su respectivo aplicativo.

- Que se cumpla con la función y objetivo del mismo.
- Que sea un sistema liviano.
- Que tenga bajo costo.
- Que sea resistente ante cargas repetitivas.
- Que no requiera ayuda adicional, que sea casi independiente.
- Que no requiera mantenimiento en tiempos muy cercanos.
- Que el sistema sea estable.

De esta manera aseguramos que nuestro sistema sea adecuado para las necesidades planteadas, teniendo en cuenta los aspectos de los materiales y geometría del mismo para tener un sistema útil y seguro.

3.2.5. Diagrama funcional



Figura 20 Descripción de diagrama de Sistema Gravitacional de Vórtice

3.3. Estudio de soporte se sistema

3.3.1. Situación inicial

Se plantea la construcción de una estructura de soporte para el sistema de vórtice gravitacional con los materiales adecuados y resistente al peso necesario.

3.3.2. Situación final

Diseñar y establecer el material adecuado para la construcción de la estructura de soporte del sistema gravitacional de vórtice, tomando en cuenta las dimensiones ideales para un correcto funcionamiento.

3.3.3. Descripción de la caja negra

En el (Anexo B) se muestra la distribución en función de las necesidades para la construcción del sistema.

3.3.4. Despliegue de la función de la calidad

De acuerdo a la necesidad del sistema, debe constar con las siguientes características para poder cumplir con el punto principal de su respectivo aplicativo.

- Que se cumpla con la función y objetivo del mismo.
- Que sea un sistema liviano.
- Que tenga bajo costo.
- Que sea resistente ante cargas.
- Que no requiera mantenimiento en tiempos muy cercanos.
- Que el sistema sea estable.
- Fácil movilización.

De esta manera aseguramos que nuestro sistema sea adecuado para las necesidades planteadas, teniendo en cuenta los aspectos de los materiales y geometría del mismo para tener un sistema útil y seguro.

3.3.5. Diagrama funcional

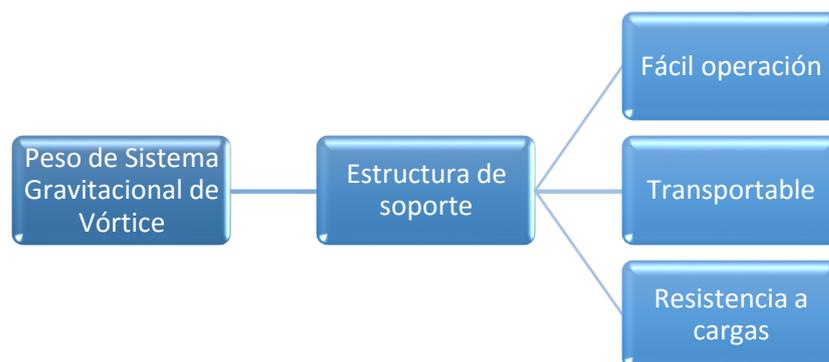


Figura 21 Descripción de diagrama funcional de base del sistema

3.4. Módulos

Para entender el funcionamiento del sistema gravitacional de vórtice, se utilizará los módulos que se indican en la (figura 8) y de esta manera tener una idea clara del proceso y orden de funcionamiento.



Figura 22 Módulos de funcionamiento de Sistema Gravitacional de Vórtice

3.5. Definición de módulos

Para esta definición se toman en cuenta los distintos materiales que se pueden utilizar.

Tabla 4
Selección de alternativas de construcción

N°	Módulos	Alternativas		
1	Sistema Gravitacional de Vórtice	Latón	Acrílico	Fibra de vidrio
2	Estructura de soporte	Tol	Acero inoxidable	Acero estructural
3	Turbina	Tol	Plástico	Fibra de carbono
4	Reservorio	Plástico	Latón	Acrílico

3.6. Planteamiento y selección de alternativas

En esta sección se plantean las distintas alternativas en función de las distintas necesidades, para después poder seleccionar la adecuada para su construcción.

Para la selección de la mejor alternativa se utilizará el siguiente sistema de ponderación:

- 0Min – 1Max
- 10Max – 1Min

Donde:

0Min – 1Max: Es el grado de importancia que posee cada parámetro; la sumatoria de las ponderaciones debe ser igual a 1.

10Max – 1Min: Es la calificación que se designa en función de cada uno de los parámetros.

3.6.1. Sistema gravitacional de vórtice

Tabla 5

Alternativas de material de sistema gravitacional de vórtice

Parámetro	Latón	Acrílico	Fibra de vidrio
Liviano	0,2	8	9
Bajo costo	0,2	8	8
Resistente	0,4	4	6
Mantenimiento	0,2	9	9
TOTAL		6,6	7,6

La mejor alternativa para la construcción del sistema gravitacional de vórtice es el acrílico; debido a su alta resistencia en conjunto con su bajo costo y peso, además de proporcionar una característica transparente para poder visualizar el flujo de agua y la formación del vórtice artificial.

3.6.2. Estructura de soporte

Tabla 6

Alternativas de material de soporte o estructura

Parámetro	Tol	Acero inoxidable	Acero estructural
Liviano	0,2	8	6

Continua 

Bajo costo	8	5	6
	0,1	0,1	0,1
Resistente	4	8	8
	0,6	0,6	0,6
Mantenimiento	9	9	9
	0,1	0,1	0,1
TOTAL	5,7	7,4	7,7

La mejor alternativa para la construcción de la estructura de soporte es el acero estructural; debido a su alta resistencia, peso y bajo costo.

3.6.3. Reservorio

Tabla 7
Alternativas de material de reservorio

Parámetro	Plástico	Latón	Acrílico
Liviano	8	6	8
	0,1	0,1	0,1
Bajo costo	6	8	8
	0,1	0,1	0,1
Resistente	8	8	8
	0,7	0,7	0,7
Mantenimiento	9	9	9
	0,1	0,1	0,1
TOTAL	7,9	7,9	8,1

La mejor alternativa de construcción del reservorio es el acrílico por su resistencia y peso; proporcionando también una visualización de su contenido.

3.6.4. Turbina

Tabla 8
Alternativas de material de turbina

Parámetro	Tol	Plástico	Fibra de carbono
Liviano	5	9	8
	0,4	0,4	0,4
Bajo costo	8	5	6
	0,1	0,1	0,1
Resistente	8	8	8
	0,4	0,4	0,4
Mantenimiento	9	9	9
	0,1	0,1	0,1
TOTAL	6,9	8,2	7,9

La mejor alternativa para la construcción de la turbina es el plástico debido a que nos permitirá acoplar al eje del generador sin reducir el movimiento, por

el peso de la misma; además se podrá realizar la turbina con una precisión adecuada puesto que se puede imprimir en impresora 3D.

3.7. Análisis computacional de materiales seleccionados

3.7.1. Sistema gravitacional de vórtice

Para la simulación del modelo del sistema gravitacional de vórtice, es de suma importancia realizar el análisis previo, para garantizar que soporte el peso total del agua que va a interactuar en el sistema.

Se muestra el análisis realizado tomando en cuenta los principales factores de diseño que se detallarán a continuación.

Las medidas del sistema gravitacional fueron realizadas en función al dimensionamiento de la mesa de trabajo y siguiendo el modelo de la planta hidroeléctrica de gravedad con vórtice desarrollada por el Dipl. Ing. Franz Zotlöterer, de esta manera se detallan a continuación las dimensiones. (NET, 2010)

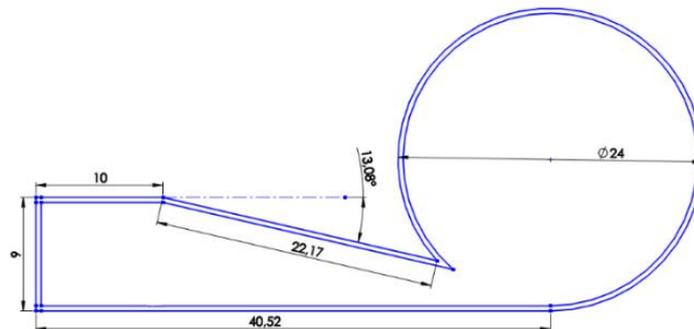


Figura 23 Dimensiones de sistema gravitacional de vórtice

Con las medidas seleccionadas y un espesor de 4 mm de material establecido anteriormente, se realizó el diseño en computadora, para posteriormente someterla a los esfuerzos respectivos.

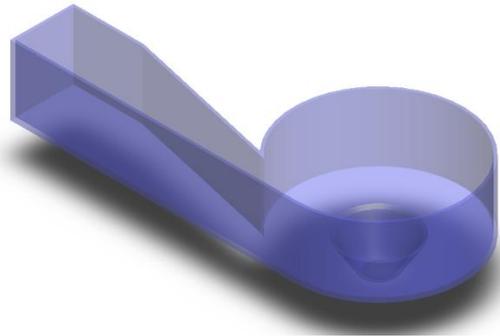


Figura 24 Sistema gravitacional de vórtice (Vista 3D)

El material del sistema gravitacional de vórtice es polimetilmetacrilato o comúnmente llamado acrílico, por su propiedad de resistencia y transparencia ayuda a la observación del flujo de agua que interactuará el sistema.

Una vez obtenido el sistema gravitacional de vórtice, procedemos a realizar el análisis respectivo en ANSYS utilizando el módulo “Static Structural”.

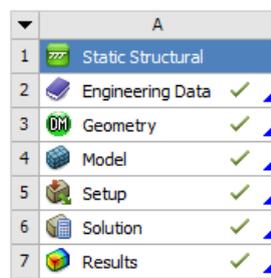


Figura 25 Interfaz de Static Structural del sistema gravitacional de vórtice

En la opción, “Engineering Data”, al no existir el polimetilmetacrilato, se creará el material con sus propiedades mecánicas que se detallan en la siguiente tabla.

Tabla 9
Propiedades mecánicas de Acrílico

Propiedades mecánicas del Polimetilmetacrilato (Acrílico)		
Propiedad	Valor	Unidad
Densidad	1180	Kg/m^3
Módulo de Young	6000	MPa
Módulo de Poisson	0,33	-
Resistencia a la fluencia	70	MPa

Propiedades of Outline Row 3: Acrílico				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
2	Density	1180	kg m ⁻³	
3	Isotropic Elasticity			
4	Derive from	Young's Modulus and Poisson...		
5	Young's Modulus	6000	Pa	
6	Poisson's Ratio	0,33		
7	Bulk Modulus	5882,4	Pa	
8	Shear Modulus	2255,6	Pa	
9	Tensile Yield Strength	7E+07	Pa	
10	Compressive Yield Strength	7E+07	Pa	

Figura 26 Propiedades mecánicas insertadas en ANSYS

Para que la simulación muestre un correcto resultado se tendrá que realizar un buen mallado, donde compararemos los aspectos de mallados recomendados por el software, con los obtenidos, los cuales se detallan a continuación.

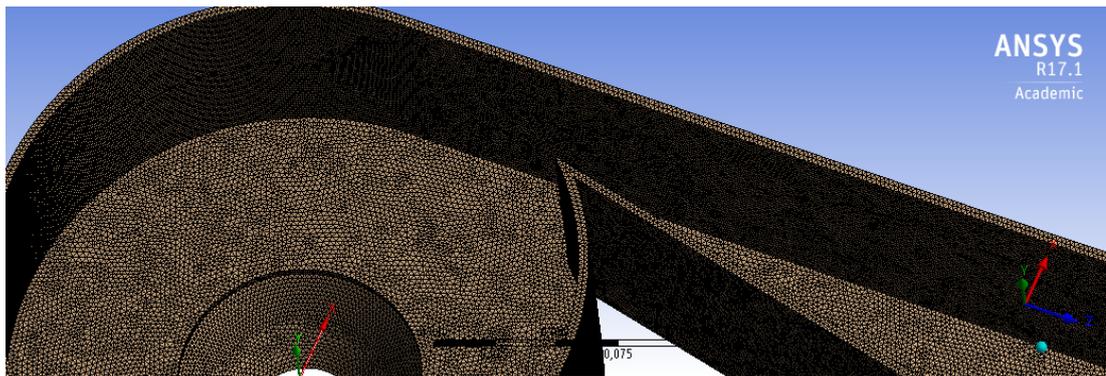


Figura 27 Visualización de mallado de sistema gravitacional de vórtice

Tabla 10

Propiedades de mallado de sistema gravitacional de vórtice

Parámetro	Recomendado por Software	Obtenido por simulación	Calidad de Malla
Ortogonalidad	Promedio 1	Promedio 0.82	Muy Buena
Oblicuidad	Promedio 0.25	Promedio 0.33	Muy Buena

Una vez terminado el mallado en la opción “Static Structural” se selecciona la cara que va estar de soporte para el análisis.

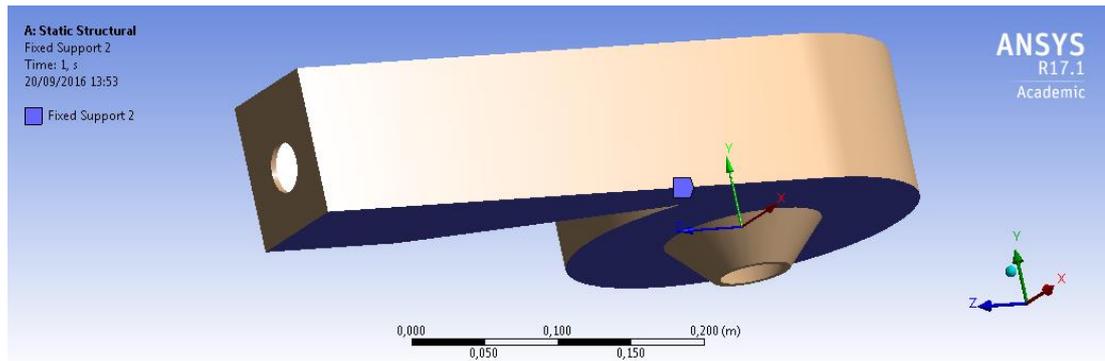


Figura 28 Ubicación de la base del sistema a analizar

Para colocar la carga que va a simular el peso en el sistema gravitacional de vórtice se selecciona la opción “Static Structural” en “loads”, se desplegará un cuadro de detalles como se muestra a continuación.

Details of "Hydrostatic Pressure"	
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	6 Faces
Definition	
Type	Hydrostatic Pressure
Coordinate System	Global Coordinate System
Suppressed	No
<input type="checkbox"/> Fluid Density	1000, kg/m ³
Hydrostatic Acceleration	
Define By	Vector
<input type="checkbox"/> Magnitude	-9,8 m/s ² (ramped)
Direction	Click to Change
Free Surface Location	
<input type="checkbox"/> X Coordinate	0, m
<input type="checkbox"/> Y Coordinate	5,e-002 m
<input type="checkbox"/> Z Coordinate	-7,3479e-018 m
Location	Click to Change

Figura 29 Detalles de fuerza aplica a sistema gravitacional de vórtice

Seleccionando las caras a las cuales estará interactuando directamente el agua y a una dirección aplicada a las paredes del sistema de vórtice gravitacional de $9,8 \text{ m/s}^2$, se obtendrá los siguientes resultados.

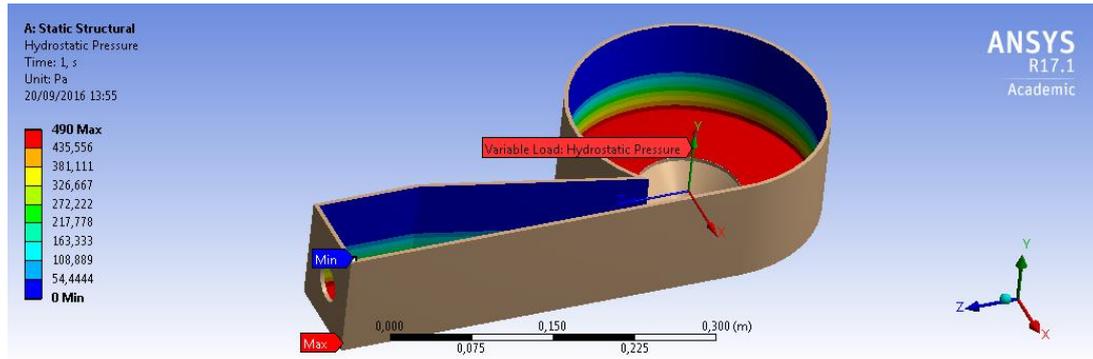


Figura 30 Fuerza hidrostática aplica a sistema gravitacional de vórtice

a. Deformación

Se mostrará el movimiento total que ha efectuado cada una de las partículas del sistema, siguiendo la función $\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$; es decir, la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de cada una de las componentes del mismo.

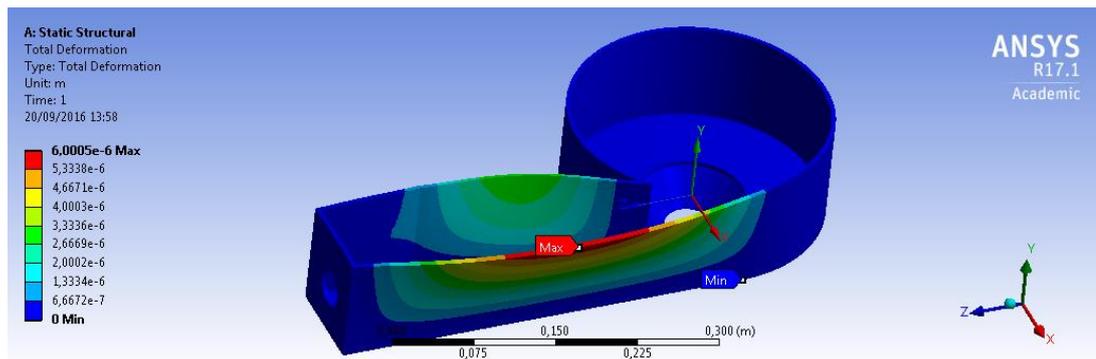


Figura 31 Deformación de sistema gravitacional de vórtice

b. Tensión equivalente (Von-Mises)

Son las cargas por la unidad de área, que ayuda a resumir las tensiones en una única magnitud escalar, siguiendo la ecuación $\sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}}$; es decir, la tensión resultante de la raíz cuadrada de la diferencia de las tensiones principales, dividida entre dos.

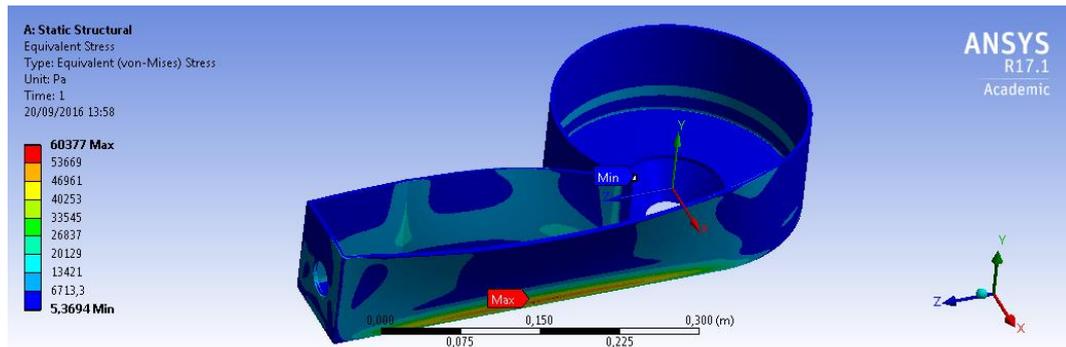


Figura 32 Tensión de Von-Mises de sistema gravitacional de vórtice

c. Factor de seguridad

Se muestra el factor de seguridad asociado al estado tensional del sistema gravitacional de vórtice según la ecuación $F_s = \frac{\sigma_{limite}}{\sigma_1}$, el máximo factor asociado es mayor a 15, ANSYS solamente asume 15 como valor a mostrar. El factor limite σ_{limite} se define con el valor de la resistencia a la fluencia de cada material.

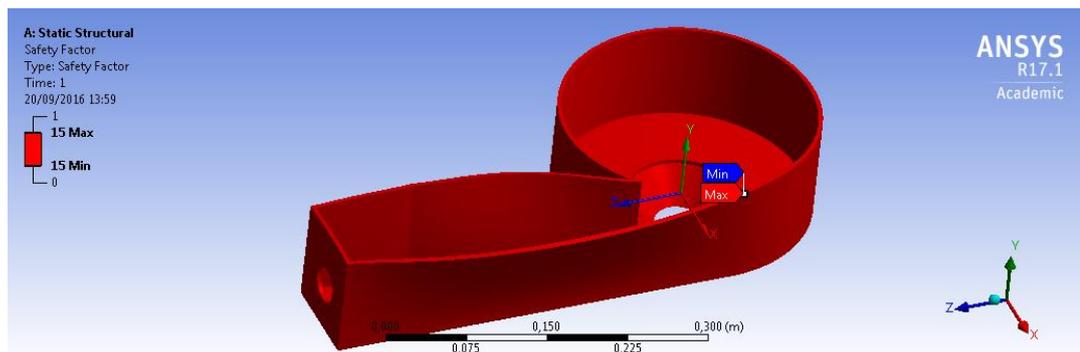


Figura 33 Factor de seguridad de sistema gravitacional de vórtice

$$F_s = \frac{\sigma_{limite}}{\sigma_1} \quad \text{EC.12}$$

$$F_s = \frac{70000000 \text{ Pa}}{60377 \text{ Pa}}$$

$$F_s = 1159.38$$

Una vez obtenido el factor de seguridad se observa que cumple con el requisito de diseño y que el sistema gravitacional de vórtice no va a fallar.

3.7.2. Estructura de soporte

Para la fabricación de la estructura de soporte es de suma importancia realizar el análisis previo, para así asegurar que soporte todas las cargas respectivas a la que será sometida.

Se muestra el análisis realizado, tomando en cuenta los principales factores de diseño que se detallaran a continuación.

Las medidas de la mesa de trabajo fueron realizadas en función de la necesidad del laboratorio de hidráulica; y a su vez que sea fácilmente transportable, de esta manera se detallan a continuación las medidas principales.

Tabla 11
Dimensiones de mesa de soporte

Altura	75 cm
Ancho	35 cm
Profundidad	70 cm
Altura de soporte de reservorio	35 cm

Con estas medidas se simulo su geometría en ANSYS Desing Model, para posteriormente someterla a los esfuerzos respectivos.



Figura 34 Soporte de sistema 3D

Una vez que ya tenemos el CAD del sistema completo de la estructura procedemos a realizar el análisis respectivo en ANSYS utilizando el módulo de análisis estructural

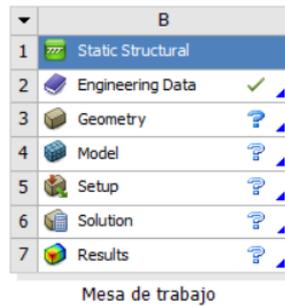


Figura 35 Interfaz de Static Structural de mesa de trabajo

En el módulo de “Engineering Data”, seleccionamos el material a utilizar en la construcción de la estructura que será acero estructural.

Properties of Outline Row 3: Structural Steel			
A	B	C	D E
Property	Value	Unit	
1			
2	Density	7850	kg m ⁻³
3	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion		
6	Isotropic Elasticity		
7	Derive from	Young's Modulus and Poisson...	
8	Young's Modulus	2E+11	Pa
9	Poisson's Ratio	0,3	
10	Bulk Modulus	1,6667E+11	Pa
11	Shear Modulus	7,6923E+10	Pa
12	Alternating Stress Mean Stress	Tabular	
16	Strain-Life Parameters		
24	Tensile Yield Strength	2,5E+08	Pa
25	Compressive Yield Strength	2,5E+08	Pa
26	Tensile Ultimate Strength	4,6E+08	Pa
27	Compressive Ultimate Strength	0	Pa

Figura 36 Datos propios de acero estructural en ANSYS

En la sección “Model” colocamos primeramente el sistema de soportes de la estructura, las ubicaciones serán de manera exacta en la colocación de las ruedas de la estructura.

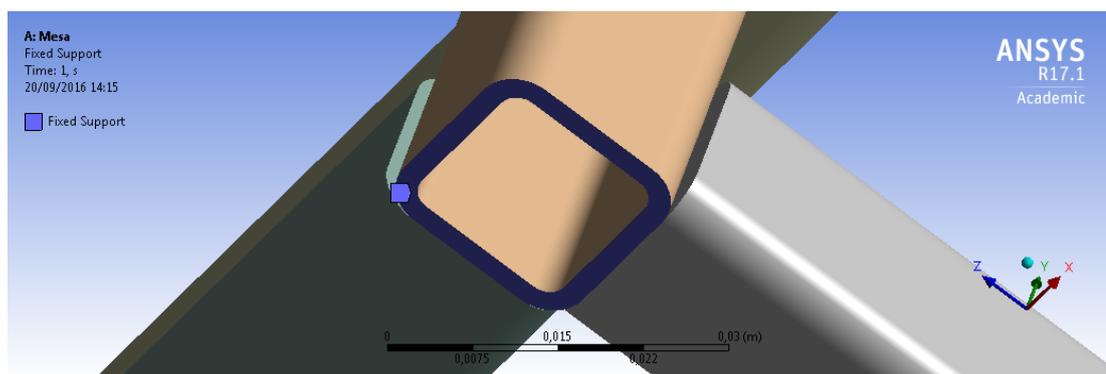


Figura 37 Ubicación de soportes en estructura

Mediante la opción de “Remote Force”, aplicamos las fuerzas equivalentes al peso que se va a colocar en el módulo que serán: una de 98N en la parte

superior y otra de 147N en la parte media, los cuales serán distribuidos de manera uniforme.

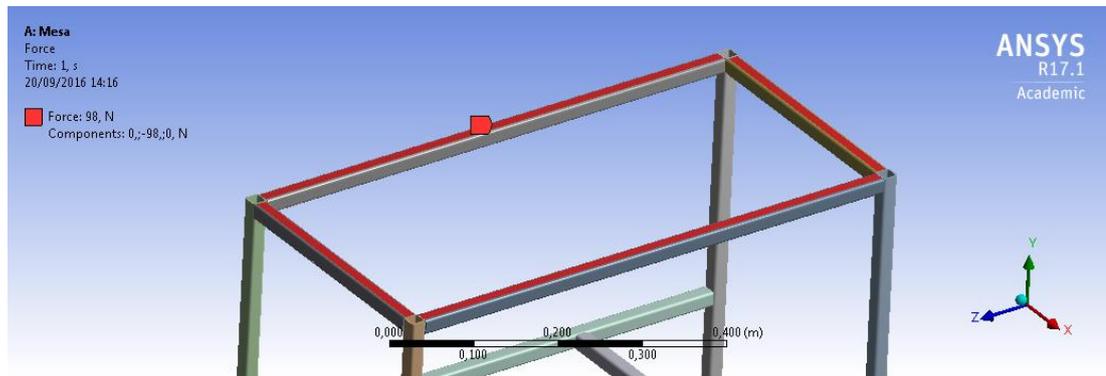


Figura 38 Fuerza de 98N colocada en la parte superior

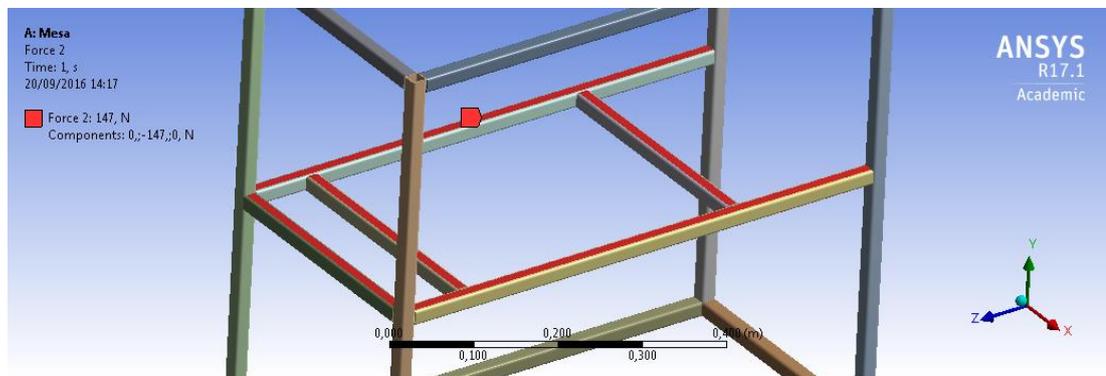


Figura 39 Fuerza de 147N colocada en la parte media

Para que la simulación muestre un correcto resultado tenemos que realizar un buen mallado, para esto nos guiaremos en los aspectos de mallado proporcionados por el software, donde tendremos que comparar con los obtenidos por la simulación, que se detallan a continuación.

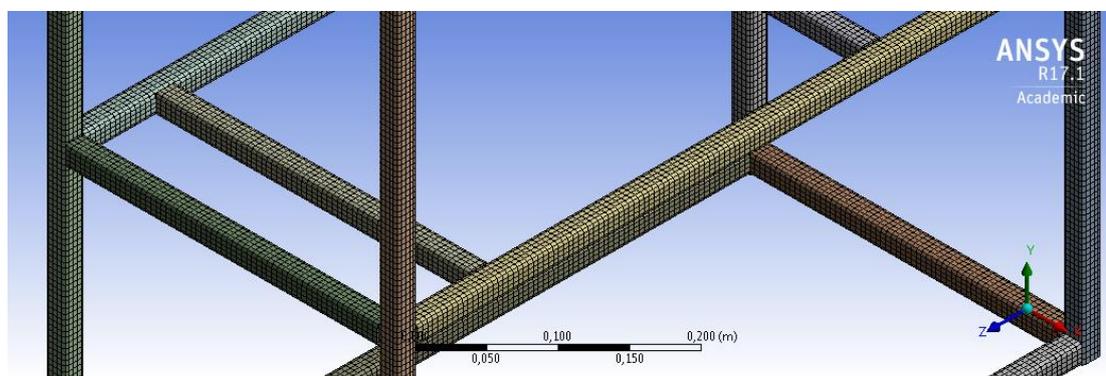


Figura 40 Mallado realizado de mesa de trabajo

Tabla 12
Parámetros de calidad de malla realizada

Parámetro	Recomendado por Software	Obtenido por simulación	Calidad de Malla
Ortogonalidad	Promedio 1	Promedio 0.93	Muy Buena
Oblicuidad	Promedio 0	Promedio 0.18	Excelente

Con estos resultados podemos trabajar de manera idónea ya que el rango que admite el software para un correcto análisis favorece nuestros resultados.

a. Deformación

Para que el diseño realizado por software sea válido, debe cumplir con la siguiente condición de diseño:

$$\delta r \leq \left[\frac{L}{800} \right] \quad \text{EC.12}$$

Donde:

δr = Deflexión que soporta el acero estructural

$\frac{L}{800}$ = Deflexión permisible de la estructura

L = Distancia entre soportes laterales

$$\delta r \leq \left[\frac{L}{800} \right]$$

$$\delta r \leq \frac{350 \text{ mm}}{800}$$

$$\delta r \leq 0,4375 \text{ mm}$$

Donde:

$$0,057 \text{ mm} \leq 0,4375 \text{ mm}$$

Los resultados obtenidos de la simulación no sobrepasan los límites de deflexión, por lo tanto, no afecta el funcionamiento propio del sistema.

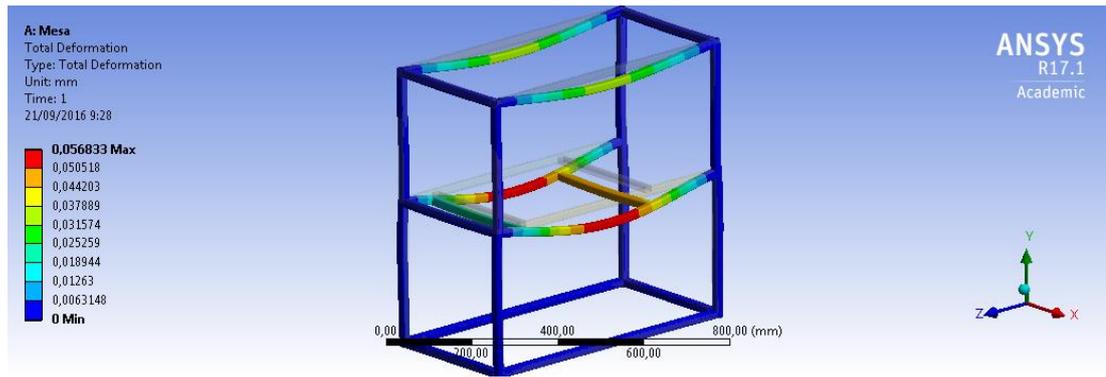


Figura 41 Deformación resultante de estructura

b. Tensión equivalente (Von-Mises)

En la (figura 42) se muestra el esfuerzo máximo que realiza la estructura, que es de 19.617 MPa, aplicando una fuerza en la parte superior de 98N que equivale en sí, a los componentes del sistema de vórtice gravitacional y el agua que este contendrá; 147N en la parte media de la estructura que equivale a la fuerza que ejercerá el reservorio de agua que contendrá 40lt.

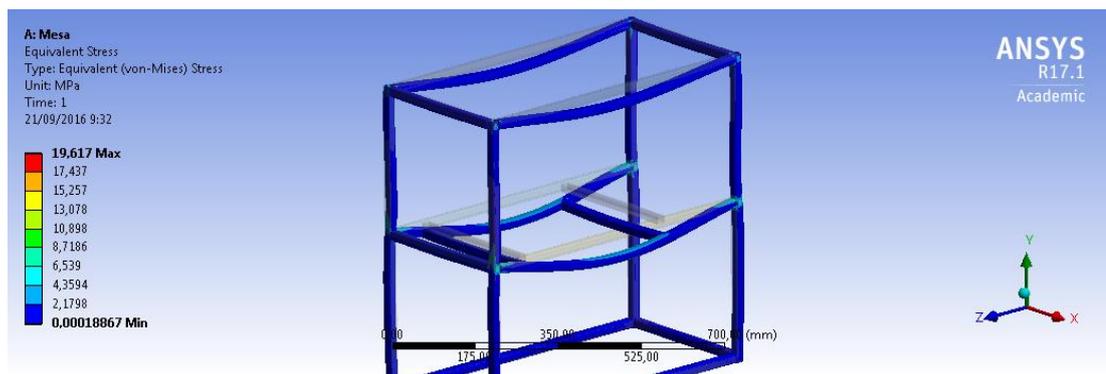


Figura 42 Tensión de Von-Mises de estructura

Para convalidar el diseño aplicamos la ecuación básica de diseño estructural:

$$F_{calc} \leq F_{permi} \quad \text{EC.13}$$

Donde:

F_{calc} = Esfuerzo calculado en un componente estructural bajo las cargas

F_{perm} = Esfuerzo permisible

$$F_{calc} \leq F_{permi}$$

$$19.617 \text{ MPa} \leq 0,66S_Y$$

$$19.617 \text{ MPa} \leq 0,66 (460 \text{ MPa})$$

$$19.617 \text{ MPa} \leq 303.6 \text{ MPa}$$

Al aplicar las técnicas de diseño podemos observar que cumple con la condición propuesta.

c. Factor de seguridad

El factor de seguridad mínimo mostrado en la (figura 43) es 12.744; es decir, que el diseño está dentro de los parámetros ideales de diseño.

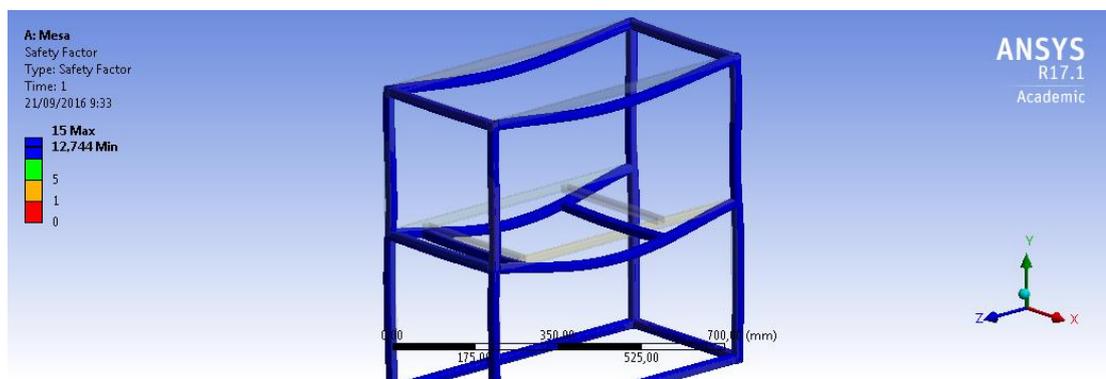


Figura 43 Factor de seguridad de mesa de trabajo

3.7.3. Reservorio

Para la fabricación del reservorio del sistema gravitacional de vórtice, es de suma importancia realizar el análisis previo, para garantizar que soporte el peso total del agua que va a interactuar en el sistema.

Se muestra el análisis realizado tomando en cuenta los principales factores de diseño que se detallaran a continuación.

Las medidas del reservorio del sistema gravitacional fueron realizadas en función al dimensionamiento de la mesa de trabajo y que contenga al menos 20 litros de agua, a continuación, se detallan las dimensiones.

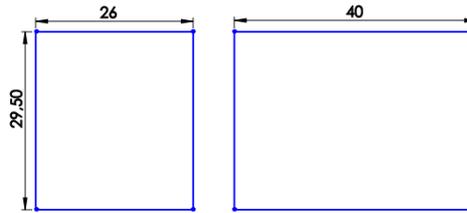


Figura 44 Vista frontal y lateral de reservorio

Con las medidas seleccionadas y un espesor de 4 mm de material, se realizó el diseño en computadora, para posteriormente someterla a los esfuerzos respectivos.

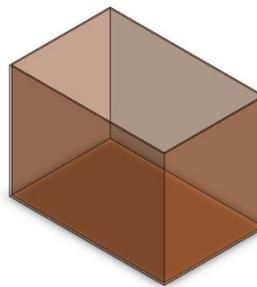


Figura 45 Vista 3D de reservorio

El material del reservorio del sistema gravitacional de vórtice es polimetilmetacrilato o comúnmente llamado acrílico, por su propiedad de resistencia y transparencia ayuda a la observación del contenido de agua que necesitara el sistema.

Una vez obtenido CAD del reservorio gravitacional de vórtice, procedemos a realizar el análisis respectivo en ANSYS.

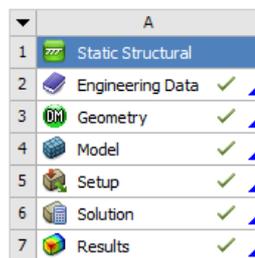


Figura 46 Interfaz Static Structural de reservorio

En la opción, “Engineering Data”, al no existir el polimetilmetacrilato, se creará el material con sus propiedades mecánicas.

Tabla 13
Propiedades mecánicas de acrílico

Propiedades mecánicas del Polimetilmetacrilato (Acrílico)		
Propiedad	Valor	Unidad
Densidad	1180	Kg/m^3
Módulo de Young	6000	MPa
Módulo de Poisson	0,33	-
Resistencia a la fluencia	70	MPa

The screenshot shows the ANSYS Engineering Data interface. The top window, 'Outline of Schematic A2: Engineering Data', displays a tree view with 'Material' expanded to 'Acrylic'. The bottom window, 'Properties of Outline Row 3: Acrylic', shows the following properties:

Property	Value	Unit
Density	1180	$kg\ m^{-3}$
Isotropic Elasticity		
Derive from	Young's Modulus and Poisson...	
Young's Modulus	$6E+09$	Pa
Poisson's Ratio	0,33	
Bulk Modulus	$5,8824E+09$	Pa
Shear Modulus	$2,2556E+09$	Pa
Tensile Yield Strength	$7,3774E+07$	Pa
Compressive Yield Strength	$7,3774E+07$	Pa

Figura 47 Propiedades mecánicas de acrílico en ANSYS

Para que la simulación muestre un correcto resultado se tendrá que realizar un buen mallado, donde compararemos los aspectos de mallado proporcionados por el software, con los obtenidos, los cuales se detallan a continuación.

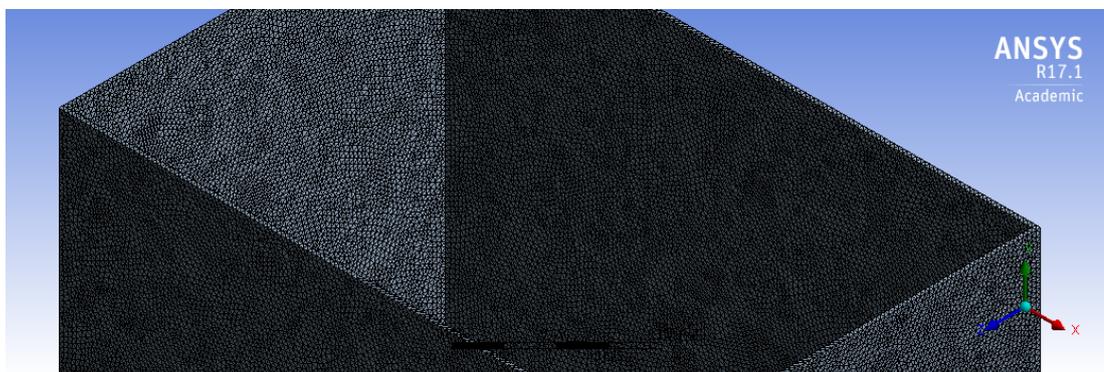


Figura 48 Mallado de reservorio

Tabla 14
Calidad de malla de reservorio

Parámetro	Recomendado por Software	Obtenido por simulación	Calidad de la malla
Ortogonalidad	Promedio 1	Promedio 0,79	Muy Buena
Oblicuidad	Promedio 0,25	Promedio 0,35	Muy buena

Una vez terminado el mallado, en la opción “Static Structural” se selecciona la cara que va estar de soporte para el análisis.

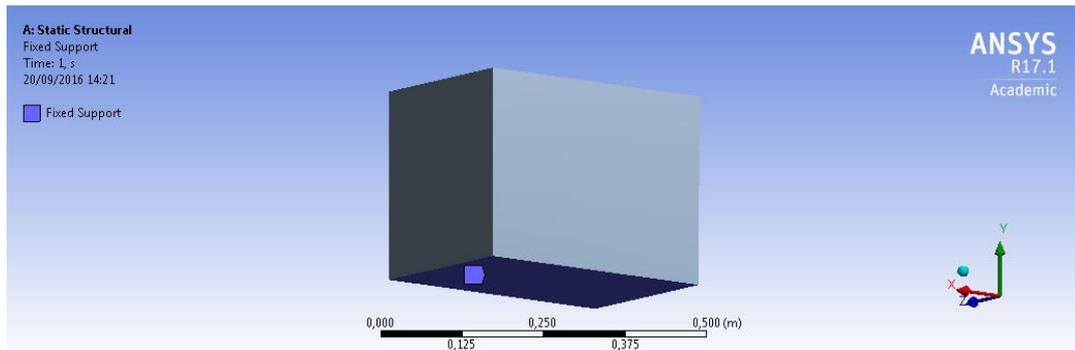


Figura 49 Colocación de soporte en reservorio

Para colocar la carga que va a simular el peso en el sistema gravitacional de vórtice se selecciona la opción “Static Structural” en “loads”, aparecerá un cuadro de detalles en el que se detalla a continuación.

Details of "Hydrostatic Pressure"	
[-] Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	4 Faces
[-] Definition	
Type	Hydrostatic Pressure
Coordinate System	Global Coordinate System
Suppressed	No
Fluid Density	1000, kg/m ³
[-] Hydrostatic Acceleration	
Define By	Vector
Magnitude	9,8 m/s ²
Direction	Click to Change
[-] Free Surface Location	
X Coordinate	0, m
Y Coordinate	0, m
Z Coordinate	0, m
Location	Click to Change

Figura 50 Parámetros de presión hidrostática

Seleccionando las caras a las cuales estará interactuando directamente el agua y a una dirección aplicada a las paredes del sistema de vórtice gravitacional de $9,8 \text{ m/s}^2$ en dirección negativa, se obtendrá los siguientes resultados.

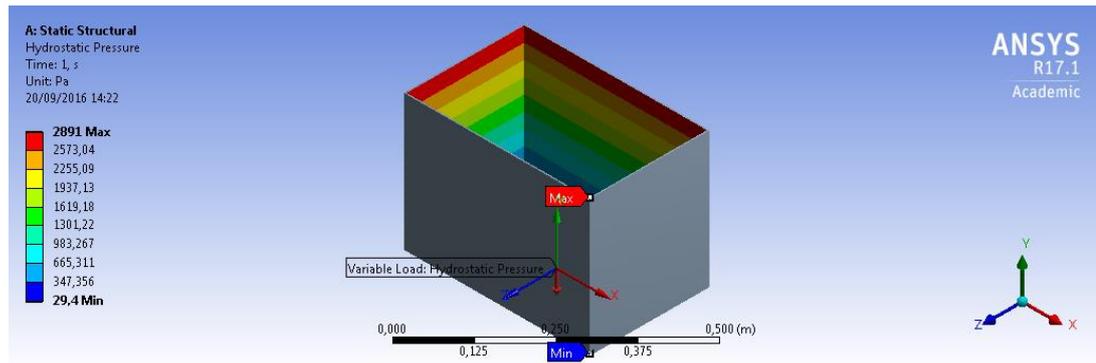


Figura 51 Aplicación de presión hidrostática a reservorio

a. Deformación

Se mostrará el movimiento total que ha efectuado cada una de las partículas del sistema, siguiendo la función $\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$; es decir, la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de cada una de las componentes del mismo.

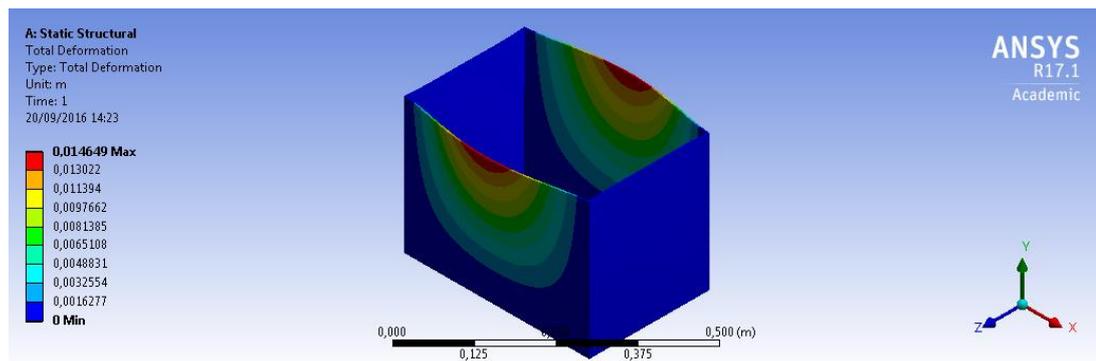


Figura 52 Deformación en ANSYS de reservorio

b. Tensión equivalente (Von-Mises)

Para convalidar el diseño aplicamos la ecuación básica de diseño:

$$F_{calc} \leq F_{permi} \quad \text{EC.14}$$

Donde:

F_{calc} = Esfuerzo calculado en un componente estructural bajo las cargas

F_{perm} = Esfuerzo permisible

$$F_{calc} \leq F_{permi}$$

$$14.9 \text{ MPa} \leq 0,66S_Y$$

$$14,9 \text{ MPa} \leq 0,66 (70 \text{ MPa})$$

$$14,9MPa \leq 46.2 MPa$$

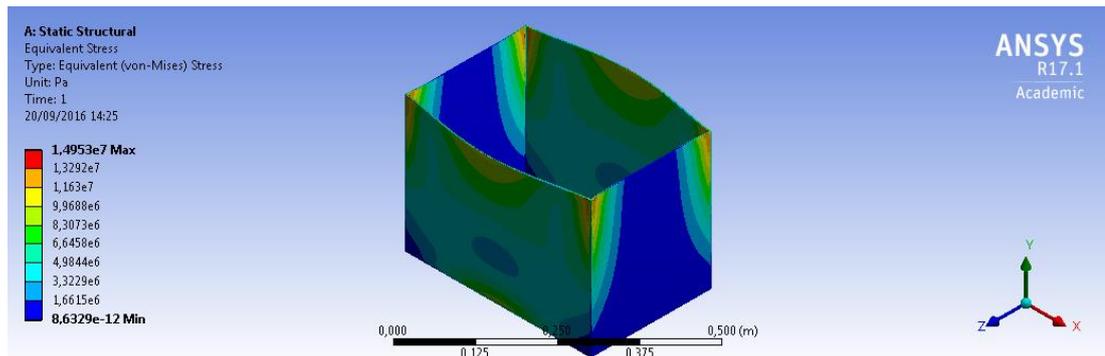


Figura 53 Tensión equivalente de (Von-Mises) de reservorio

c. Factor de seguridad

El factor de seguridad es de 4,93 como se muestra en la (figura 54), por lo tanto, al aplicar las técnicas de diseño podemos observar que cumple con la condición propuesta.

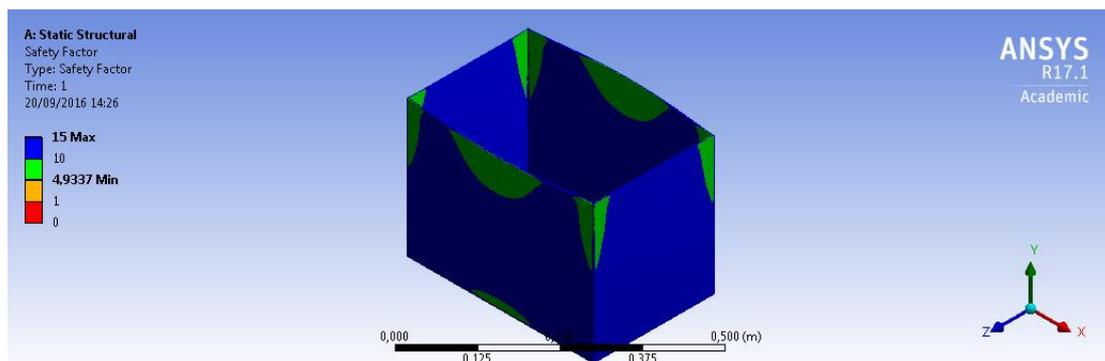


Figura 54 Factor de seguridad de reservorio

3.7.4. Turbinas

Para la construcción de las turbinas, es de suma importancia realizar el análisis previo, para garantizar el funcionamiento en el sistema.

A continuación, se muestra el análisis realizado para 3 diferentes modelos de turbinas con un diámetro de 5 centímetros y una altura total de 12 centímetros, las turbinas están diseñadas junto con el eje central para un acople rápido hacia el generador, los alabes de las turbinas poseen un espesor de 0,2 centímetros, el material de las turbinas es de polietileno ya que éstas serán impresas en impresora 3D. (Asuero, 2014)

a. Turbina Uno

La turbina uno posee 6 alabes separados 60° , como se muestra en la figura.

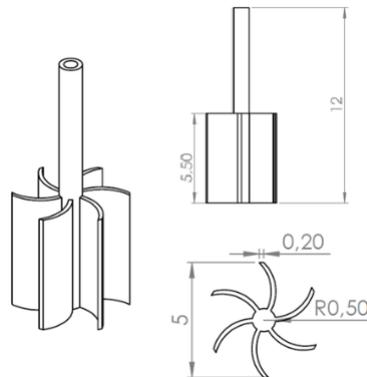


Figura 55 Dimensiones generales de la Turbina Uno

Con las medidas seleccionadas, se realizó el diseño en computadora, para posteriormente someterla a los esfuerzos respectivos.

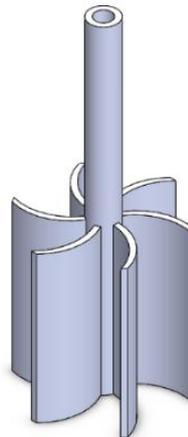


Figura 56 CAD de la Turbina Uno

Una vez obtenido el CAD, procedemos a realizar el análisis respectivo en ANSYS, con el módulo de "Static Structural".

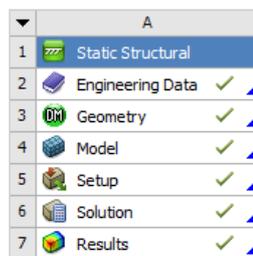


Figura 57 Interfaz "Static Structural" de la Turbina Uno

En la opción, “Engineering Data”, seleccionamos el polietileno para las tres turbinas ANSYS posee cargado el material “polyethylene” por lo que no es necesario crear el material.

Properties of Outline Row 10: Polyethylene			
	A	B	C
	Property	Value	Unit
2	Density	950	kg m ⁻³
3	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion		
6	Isotropic Elasticity		
7	Derive from	Young's Modulus and Poisson's...	
8	Young's Modulus	1,1E+09	Pa
9	Poisson's Ratio	0,42	
10	Bulk Modulus	2,2917E+09	Pa
11	Shear Modulus	3,8732E+08	Pa
12	Tensile Yield Strength	2,9E+07	Pa
13	Compressive Yield Strength	0	Pa
14	Tensile Ultimate Strength	3,3E+07	Pa
15	Compressive Ultimate Strength	0	Pa

Figura 58 Propiedades mecánicas de polietileno en ANSYS

Para que la simulación muestre un correcto resultado se tendrá que realizar un buen mallado, donde compararemos los aspectos de mallado proporcionados por el software, con los obtenidos, los cuales se detallan a continuación.

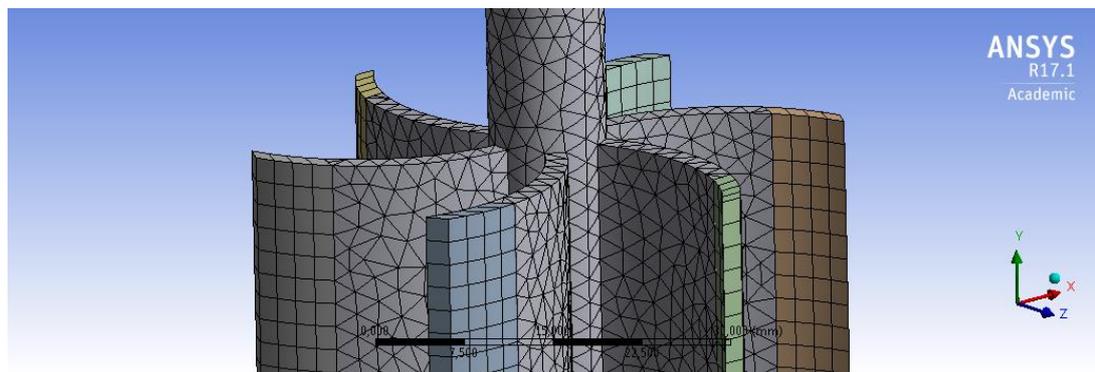


Figura 59 Mallado de la turbina Uno

Tabla 15
Calidad de malla turbina Uno

Parámetro	Recomendado por Software	Obtenido por simulación	Calidad de la malla
Ortogonalidad	Promedio 1	Promedio 0,81	Muy Buena
Oblicuidad	Promedio 0,25	Promedio 0,32	Muy Buena

Una vez terminado el mallado, en la opción “Static Structural” se selecciona la cara que va estar de soporte para el análisis.

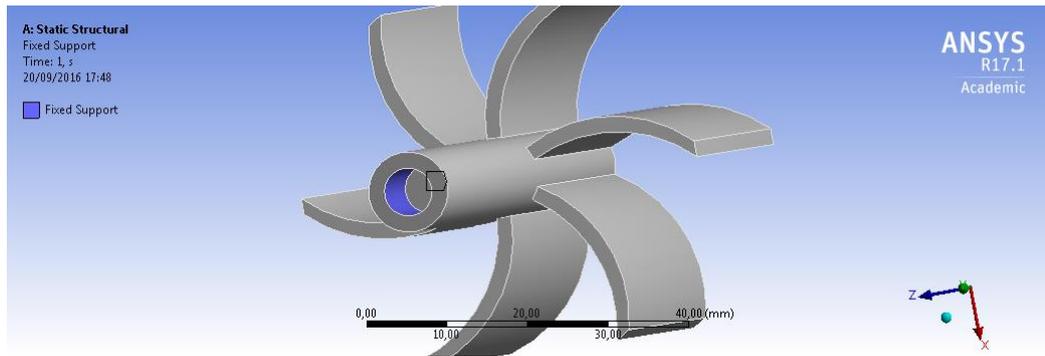


Figura 60 Colocación de soporte en la turbina Uno

Para colocar las cargas que va a simular la fuerza en cada una de los álabes de la turbina se selecciona la opción “Static Structural” en “loads”, “Remote Force” y se coloca 1 Newton de Fuerza en cada sección del álabes que simulara el golpe del agua seleccionando un vector en la dirección adecuada para cada álabes.

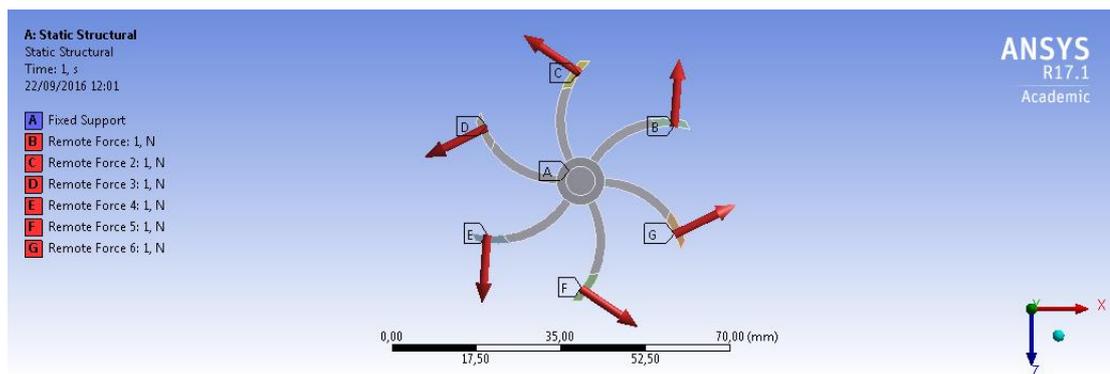


Figura 61 Parámetros de las fuerzas en cada álabes de la turbina Uno

Seleccionando las caras a las cuales estará interactuando directamente el agua y a una dirección aplicada, se obtendrá los siguientes resultados.

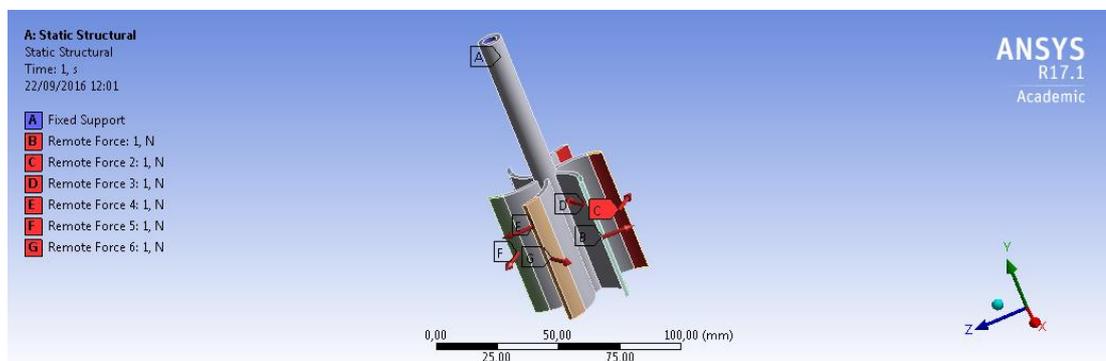


Figura 62 Caras seleccionadas de la turbina Uno

a.1. Deformación

La deformación física se puede calcular dentro o fuera de cualquier pieza o ensamble, tomando en cuenta que los soportes fijos previenen la deformación en la sección donde es aplicada, la deformación está calculada relativamente por secciones o por ensambles, siguiendo la función $\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$; es decir, la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de cada una de las componentes del mismo.

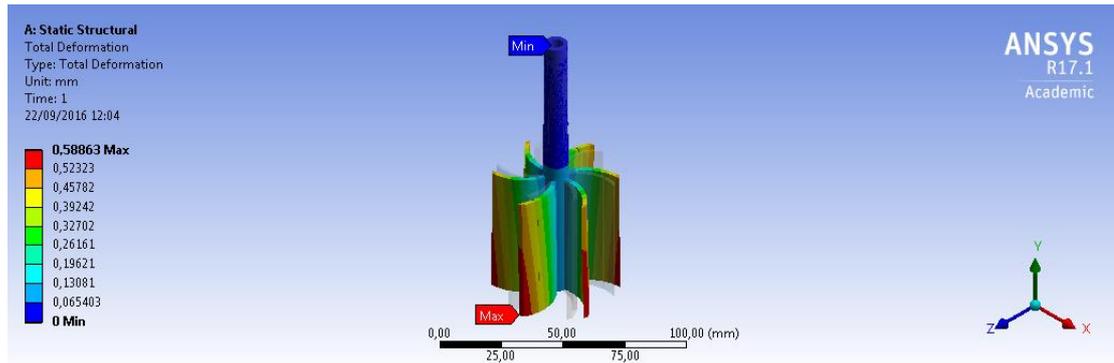


Figura 63 Deformación en ANSYS de la Turbina Uno

a.2. Tensión equivalente (Von-Mises)

Para convalidar el diseño aplicamos la ecuación básica de diseño:

$$F_{calc} \leq F_{permi} \quad \text{EC.15}$$

Donde:

F_{calc} = Esfuerzo calculado en un componente estructural bajo las cargas

F_{perm} = Esfuerzo permisible

$$F_{calc} \leq F_{permi}$$

$$MPa \leq 0,66S_Y$$

$$1,14 MPa \leq 0,66 (33 MPa)$$

$$1,14MPa \leq 21,78 MPa$$

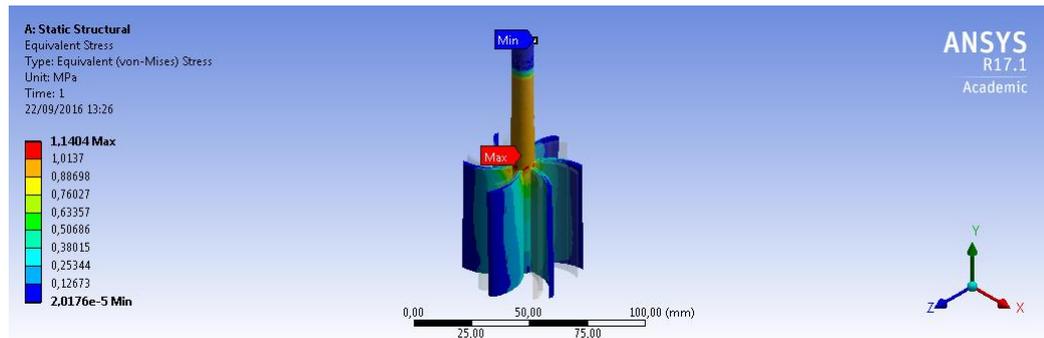


Figura 64 Tensión equivalente de (Von-Mises) de la Turbina Uno

a.3. Factor de seguridad

El factor de seguridad es mayor a 15 como se muestra en la (figura 65), por lo tanto, al aplicar las técnicas de diseño podemos observar que cumple con la condición propuesta.

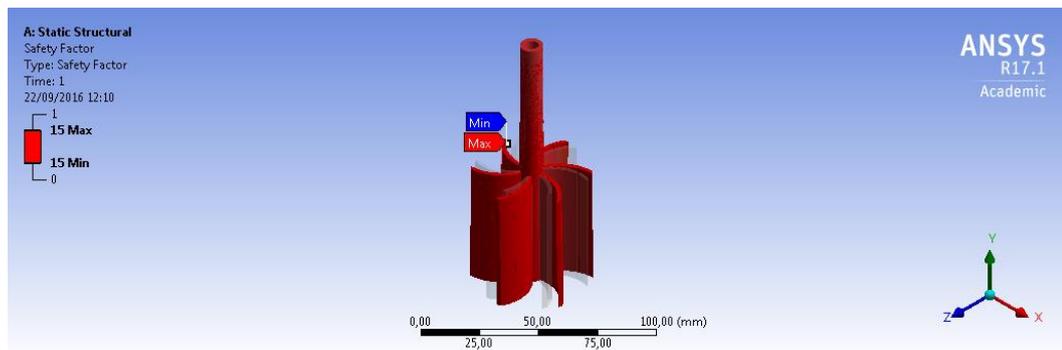


Figura 65 Factor de seguridad de la Turbina Uno

b. Turbina Dos

La turbina dos posee 10 alabes separados 36° , a continuación, se muestra el modelo y las dimensiones de la turbina.

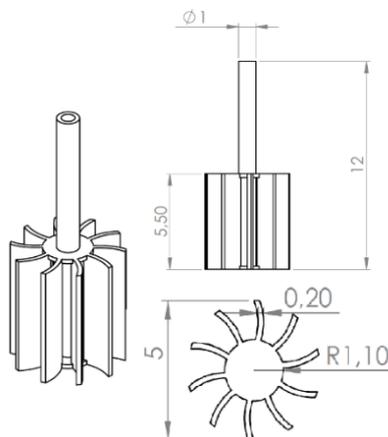


Figura 66 Dimensiones generales de la Turbina Dos

Con las medidas seleccionadas, se realizó el diseño en computadora, para posteriormente someterla a los esfuerzos respectivos.

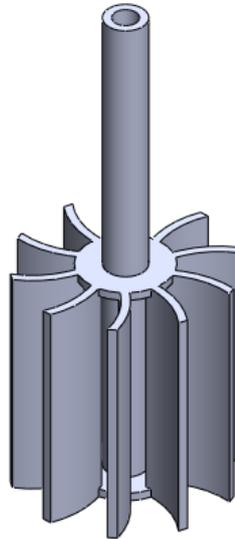


Figura 67 CAD de la Turbina Dos

Una vez obtenido el CAD, procedemos a realizar el análisis respectivo en ANSYS, con el módulo de “Static Structural”.

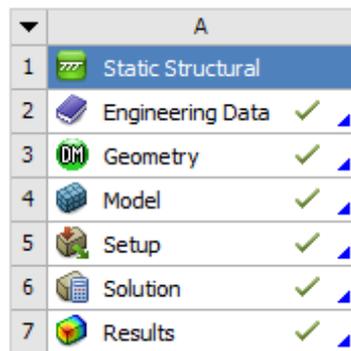


Figura 68 Interfaz “Static Structural” de la Turbina Dos

Para que la simulación muestre un correcto resultado se tendrá que realizar un buen mallado, donde compararemos los aspectos de mallado proporcionados por el software, con los obtenidos, los cuales se detallan a continuación.

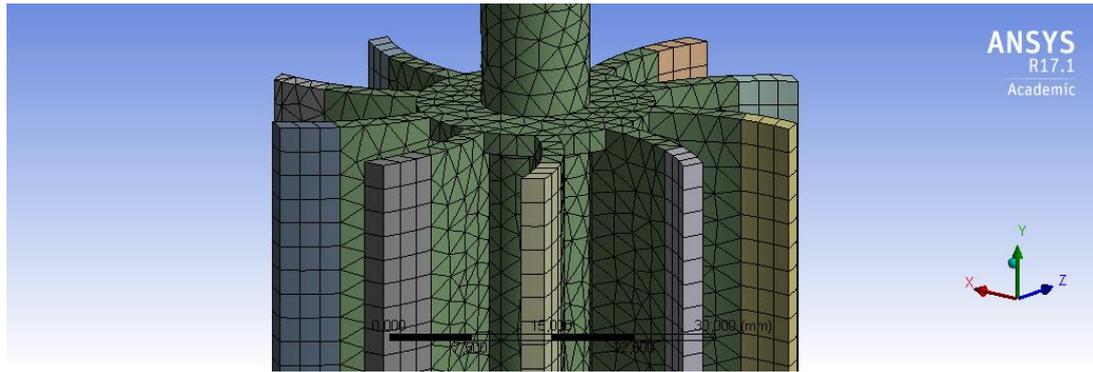


Figura 69 Mallado turbina Dos

Tabla 16
Calidad de malla turbina Dos

Parámetro	Recomendado por Software	Obtenido por simulación	Calidad de la malla
Ortogonalidad	Promedio 1	Promedio 0,80	Muy Buena
Oblicuidad	Promedio 0,25	Promedio 0,345	Muy Buena

Una vez terminado el mallado, en la opción “Static Structural” se selecciona la cara que va a estar de soporte para el análisis.

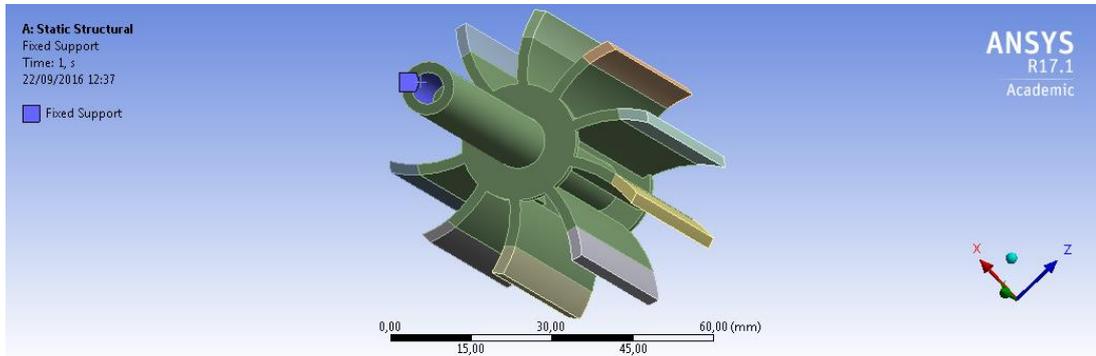


Figura 70 Colocación de soporte en la Turbina Dos

Para colocar las cargas que va a simular la fuerza en cada una de los alabes de la turbina se selecciona la opción “Static Structural” en “loads”, “Remote Force” y se coloca 1 Newton de Fuerza en cada sección del álabe que simulara el golpe del agua seleccionando un vector en la dirección adecuada para cada álabe.

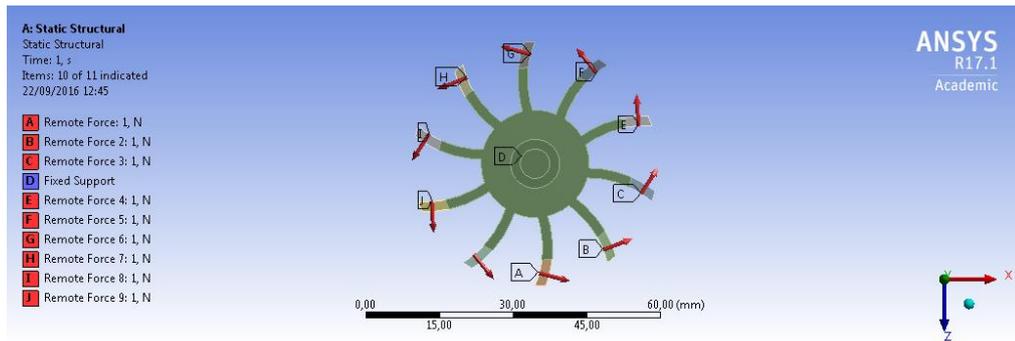


Figura 71 Parámetros de las fuerzas en cada álabe de la turbina Dos

Seleccionando las caras a las cuales estará interactuando directamente el agua y a una dirección aplicada, se obtendrá los siguientes resultados.

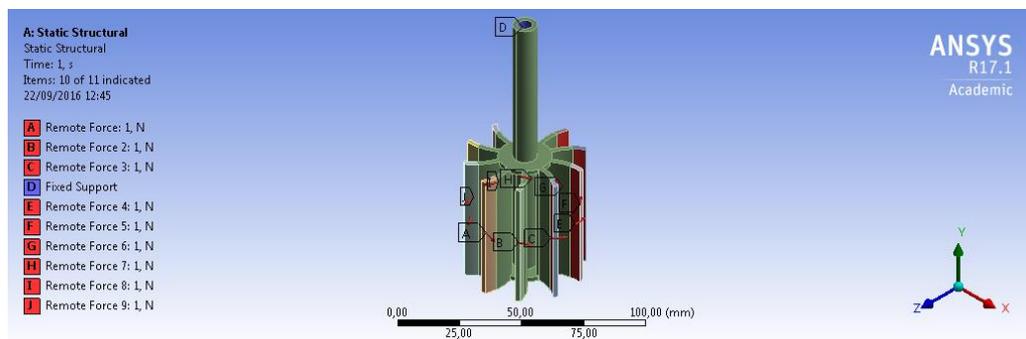


Figura 72 Caras seleccionadas de la turbina Dos

b.1. Deformación

Se mostrará el movimiento total que ha efectuado cada una de las partículas del sistema, siguiendo la función $\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$; es decir, la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de cada una de las componentes del mismo.

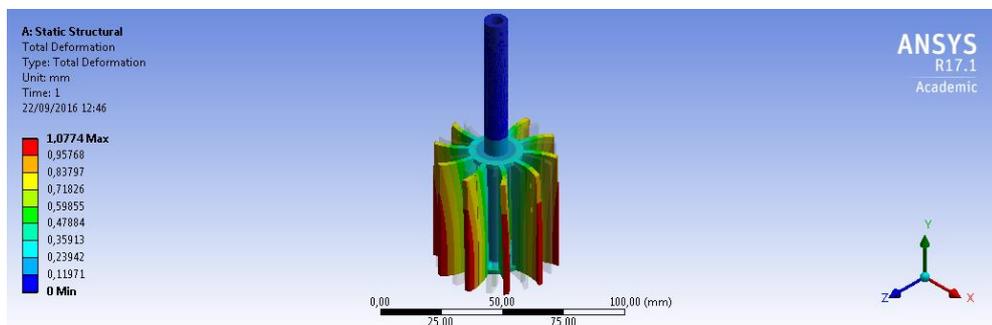


Figura 73 Deformación en ANSYS de la Turbina Dos

b.2. Tensión equivalente (Von-Mises)

Para convalidar el diseño aplicamos la ecuación básica de diseño:

$$F_{calc} \leq F_{permi}$$

EC.16

Donde:

F_{calc} = Esfuerzo calculado en un componente estructural bajo las cargas

F_{permi} = Esfuerzo permisible

$$F_{calc} \leq F_{permi}$$

$$MPa \leq 0,66S_Y$$

$$4,47 MPa \leq 0,66 (33 MPa)$$

$$4,47 MPa \leq 21,78 MPa$$

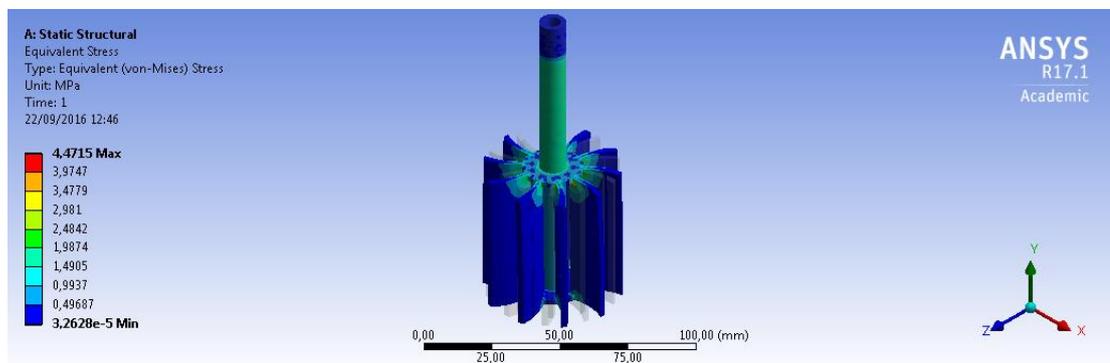


Figura 74 Tensión equivalente de (Von-Mises) de la Turbina Dos

b.3. Factor de seguridad

El factor de seguridad es mayor a 15 como se muestra en la (figura 48), por lo tanto, al aplicar las técnicas de diseño podemos observar que cumple con la condición propuesta.

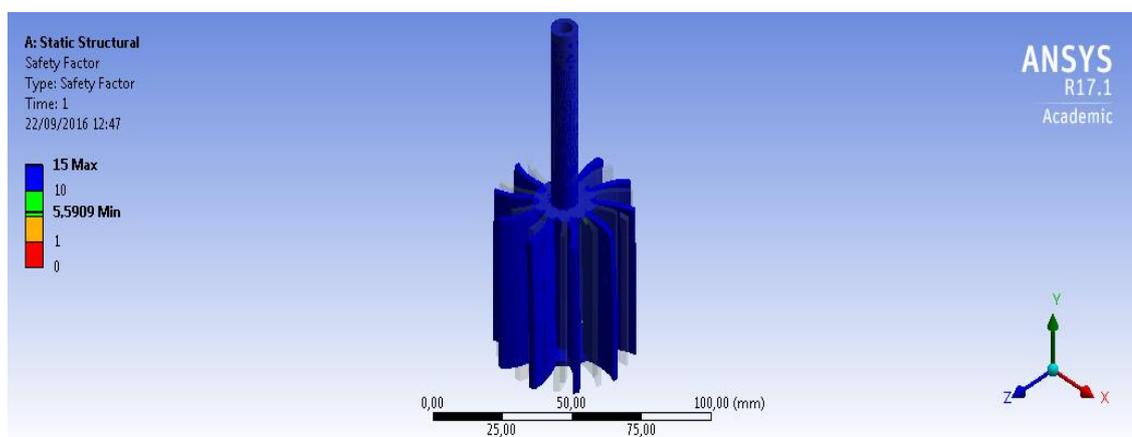


Figura 75 Factor de seguridad de la Turbina Dos

c. Turbina Tres

La turbina dos posee 15 alabes separados 24° , esta turbina fue diseñada por Franz Zotlötere el mismo que invento la central hidroeléctrica de vórtice en el año 2014, a continuación, se muestra el modelo y las dimensiones de la turbina.

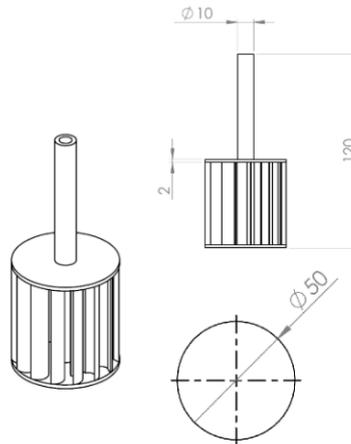


Figura 76 Dimensiones generales de la Turbina Tres

Con las medidas seleccionadas, se realizó el diseño en computadora, para posteriormente someterla a los esfuerzos respectivos.

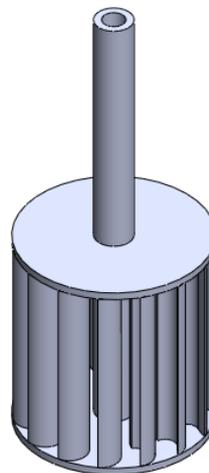


Figura 77 CAD de la Turbina Tres

Una vez obtenido el CAD, procedemos a realizar el análisis respectivo en ANSYS, con el módulo de "Static Structural".

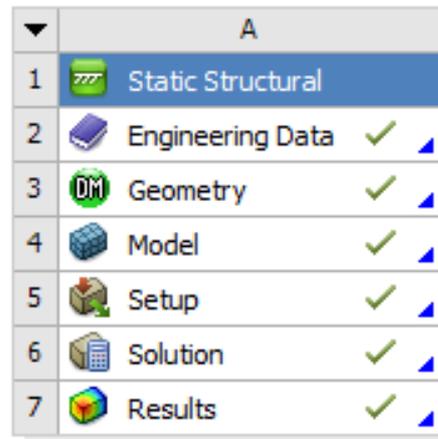


Figura 78 Interface “Static Structural” de la Turbina Tres

Para que la simulación muestre un correcto resultado se tendrá que realizar un buen mallado, donde compararemos los aspectos de mallado proporcionados por el software, con los obtenidos, los cuales se detallan a continuación.

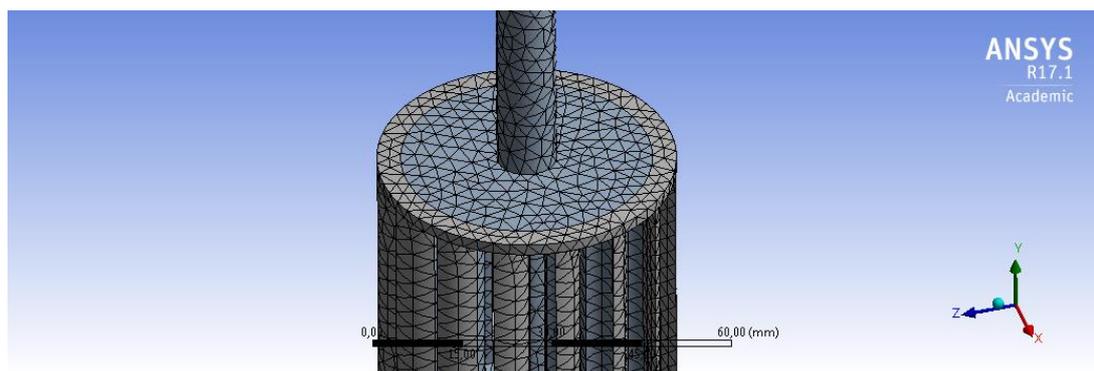


Figura 79 Mallado de la Turbina Tres

Tabla 17

Calidad de malla turbina Tres

Parámetro	Recomendado por Software	Obtenido por simulación	Calidad de la malla
Ortogonalidad	Promedio 1	Promedio 0,76	Muy Buena
Oblicuidad	Promedio 0,25	Promedio 0,38	Muy Buena

Una vez terminado el mallado, en la opción “Static Structural” se selecciona la cara que va estar de soporte para el análisis.

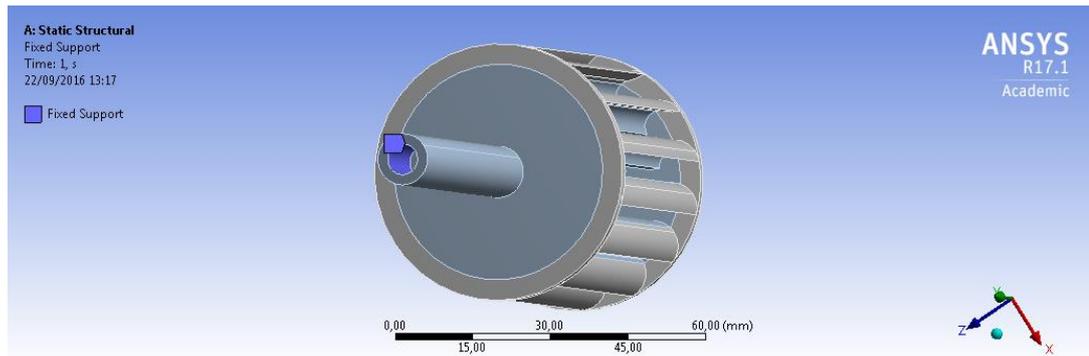


Figura 80 Colocación de soporte en la Turbina Tres

Para colocar las cargas que va a simular la fuerza en cada una de los álabes de la turbina se selecciona la opción “Static Structural” en “loads”, “Remote Force” y se coloca 1 Newton de Fuerza en cada sección del álabe que simulara el golpe del agua seleccionando un vector en la dirección adecuada para cada álabe.

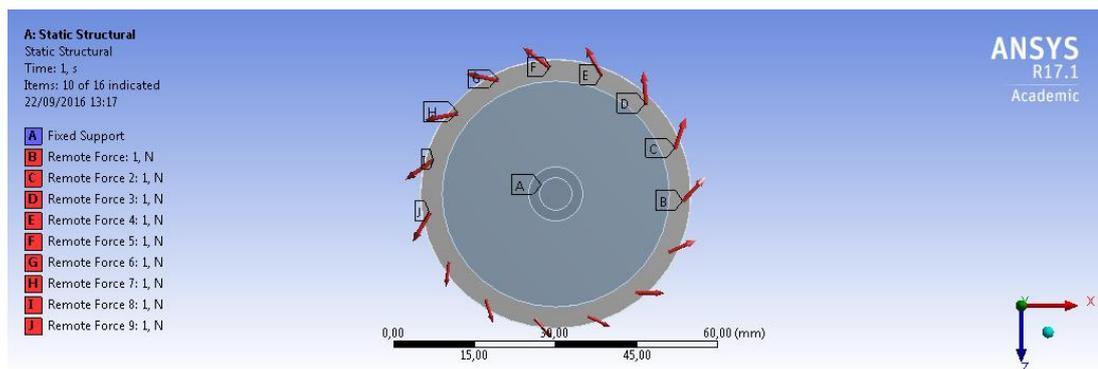


Figura 81 Parámetros de las fuerzas en cada álabe de la Turbina Tres

Seleccionando las caras a las cuales estará interactuando directamente el agua y a una dirección aplicada, se obtendrá los siguientes resultados.

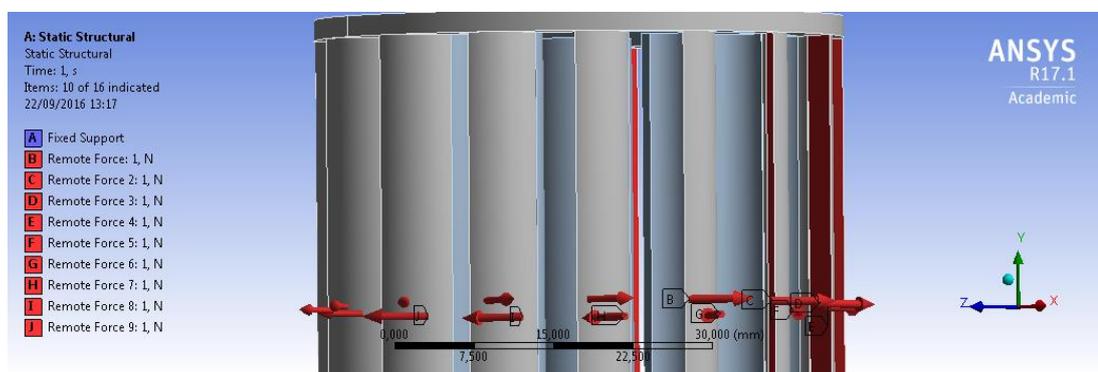


Figura 82 Caras seleccionadas de la Turbina Tres

c.1. Deformación

Se mostrará el movimiento total que ha efectuado cada una de las partículas del sistema, siguiendo la función $\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$; es decir, la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de cada una de las componentes del mismo.

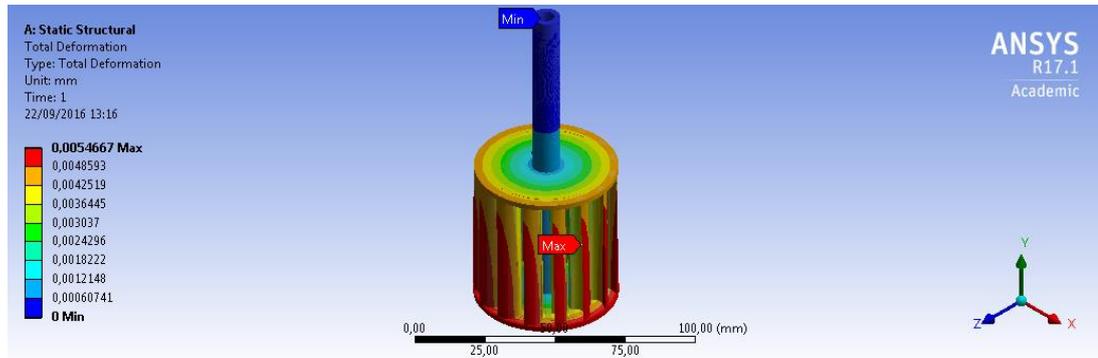


Figura 83 Deformación en ANSYS de la Turbina Tres

c.2. Tensión equivalente (Von-Mises)

Para convalidar el diseño aplicamos la ecuación básica de diseño:

$$F_{calc} \leq F_{permi} \quad \text{EC.17}$$

Donde:

F_{calc} = Esfuerzo calculado en un componente estructural bajo las cargas

F_{permi} = Esfuerzo permisible

$$F_{calc} \leq F_{permi}$$

$$MPa \leq 0,66S_y$$

$$2,56 MPa \leq 0,66 (33 MPa)$$

$$2,56MPa \leq 21,78 MPa$$

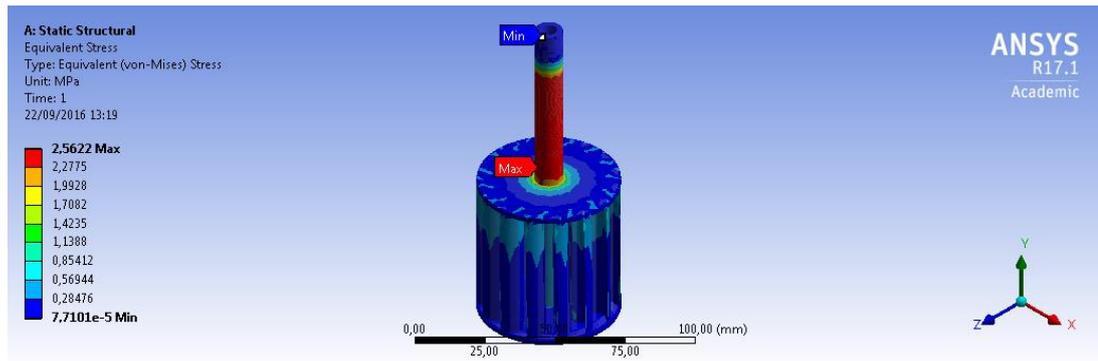


Figura 84 Tensión equivalente de (Von-Mises) de la Turbina Tres

c.3. Factor de seguridad

El factor de seguridad es mayor a 15 como se muestra en la (figura 85), por lo tanto, al aplicar las técnicas de diseño podemos observar que cumple con la condición propuesta.

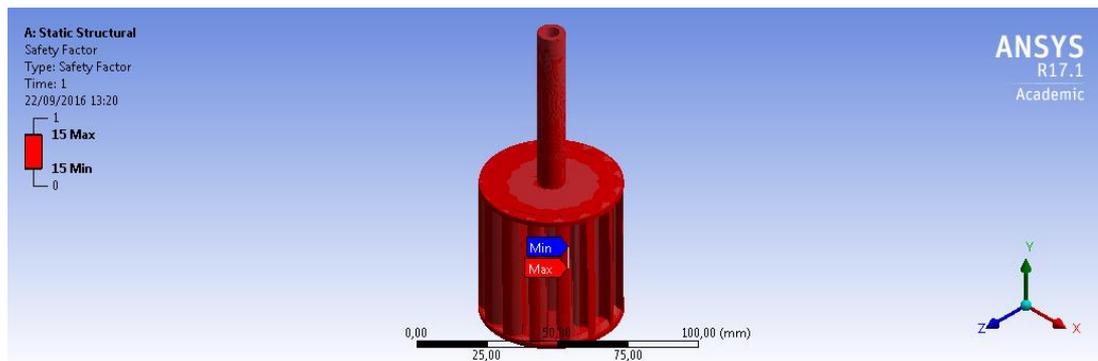


Figura 85 Factor de seguridad de la Turbina Tres

3.8. Selección de alternativas de módulo

Para poder realizar un correcto estudio, es esencial tener un buen diseño del prototipo a utilizar, es por esto que se detallan a continuación tres distintas alternativas.

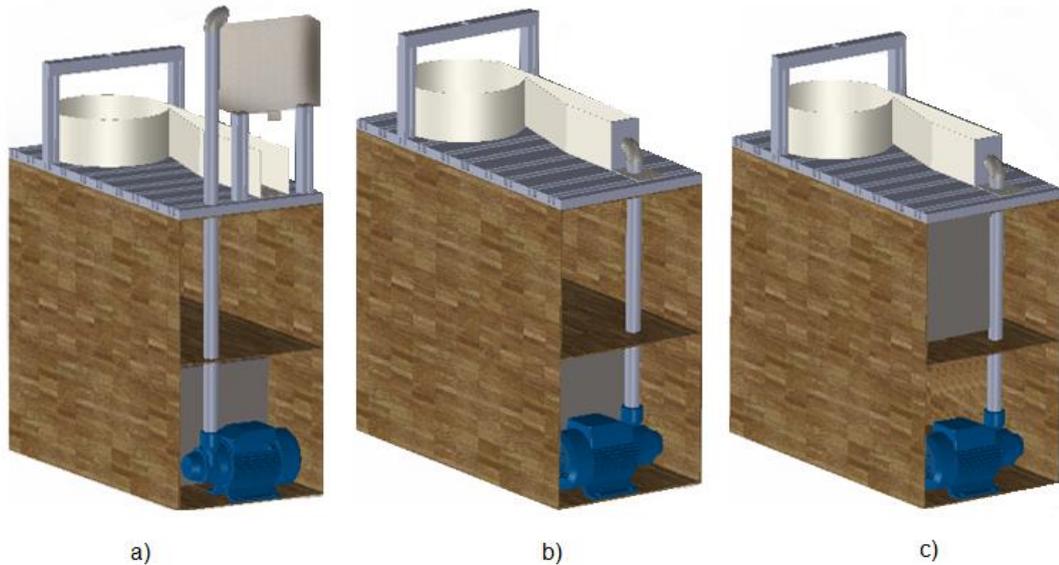


Figura 86 a) Alternativa 1 b) Alternativa 2 c) Alternativa 3

3.8.1. Alternativa 1

En esta alternativa se ha tomado en cuenta un reservorio en la parte inferior, así como en la parte superior, una bomba cuya función será principalmente suministrar de agua al reservorio superior y este a su vez, utilizar la gravedad para abastecer de agua al sistema gravitacional de vórtice.

En la parte frontal se instalará un sistema tipo puente, donde se anclará la turbina y el generador.

3.8.2. Alternativa 2

En esta alternativa se ha tomado en cuenta un reservorio únicamente en la parte inferior, una bomba cuya función será principalmente suministrar de agua al sistema gravitacional de vórtice directamente.

En la parte frontal se instalará un sistema tipo puente, donde se anclará la turbina y el generador.

3.8.3. Alternativa 3

En esta alternativa se ha tomado en cuenta un reservorio únicamente en la parte media del módulo, una bomba cuya función será principalmente suministrar de agua al sistema gravitacional de vórtice directamente y absorber del reservorio ubicado sobre la misma.

En la parte frontal se instalará un sistema tipo puente, donde se anclará la turbina y el generador.

3.8.4. Generalidades de alternativas

Una vez establecidas las tres distintas propuestas de construcción del prototipo, se muestra la (tabla 15), donde se detallan las distintas ventajas y desventajas de cada una de las alternativas.

Tabla 18
Ventajas y desventajas

	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Alternativa 1	Control de caída de agua	Pérdida de velocidad
		Aumento de tamaño del prototipo
		Necesidad de enserar bomba
Alternativa 2	Aprovechamiento de potencia de la bomba	Necesidad de enserar bomba
	Aumento de velocidad	
	Conservación de dimensiones originales	
Alternativa 3	Aprovechamiento de potencia de la bomba	
	Aumento de velocidad	
	Conservación de dimensiones originales	
	No necesita ser enserada la bomba	

3.8.5. Bosquejo de prototipo a diseñar

En función de las ventajas y desventajas descritas anteriormente, se llega a la conclusión que la mejor alternativa de construcción es la tercera, debido a que al estar colocado el reservorio en la parte media, la bomba ya no necesita ser enserada para cada prueba, puesto que siempre estará con agua producto de la gravedad.



Figura 87 Visualización 3D de sistema a construir

Al sistema se le aplicara una pintura al horno para así evitar en gran porcentaje la oxidación del mismo en caso de tener contacto con el agua.

CAPÍTULO IV

ESTUDIO ANSYS CFX

4.1. Desarrollo de geometría

Para un correcto estudio es importante tener en cuenta el dominio de interés, es decir, aislar la geometría a simular, siendo esta, el sistema gravitacional de vórtice; hay que tener en cuenta dónde estará el comienzo y final del dominio computacional.

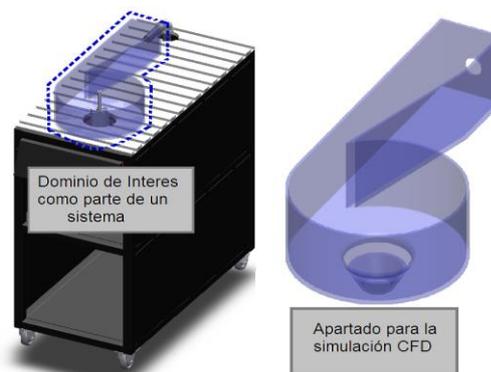


Figura 88 Selección apartada de sistema

4.1.1. Creación del modelo sólido

La creación de la geometría en forma sólida, es debido, a que el software tiene herramientas propias de discretización, que se utilizarán para la selección de los distintos dominios, de manera individual, retirando las características innecesarias.

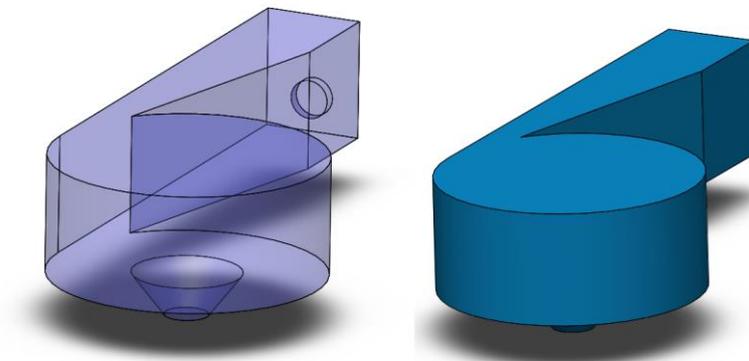


Figura 89 Modelo sólido a utilizar

4.2. Diseño y creación de mallado

4.2.1. Creación de malla

Para obtener una alta calidad de malla se utilizará dos controles de mallado locales, que se detallarán a continuación.

a. Control de dimensiones locales

Para acercarse a los criterios de aceptación de malla, se deberá refinar el mallado en muchos de los casos, es decir, este control de mallado permite aumentar el número de divisiones; en la sección "Element Size" se ingresa cualquier valor, decimal o entero, teniendo en cuenta que mientras los valores ingresados se aproximen a cero, el número de divisiones será mayor. Si el valor ingresado es cero, ANSYS asumirá los valores predeterminados.

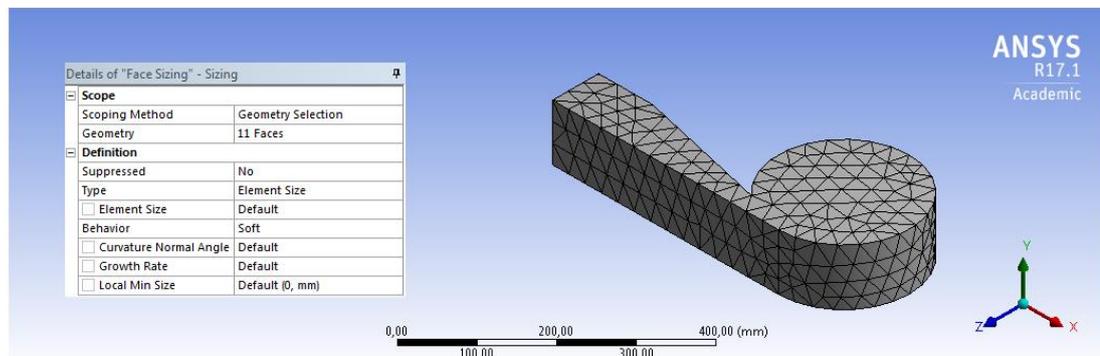


Figura 90 Mallado inicial

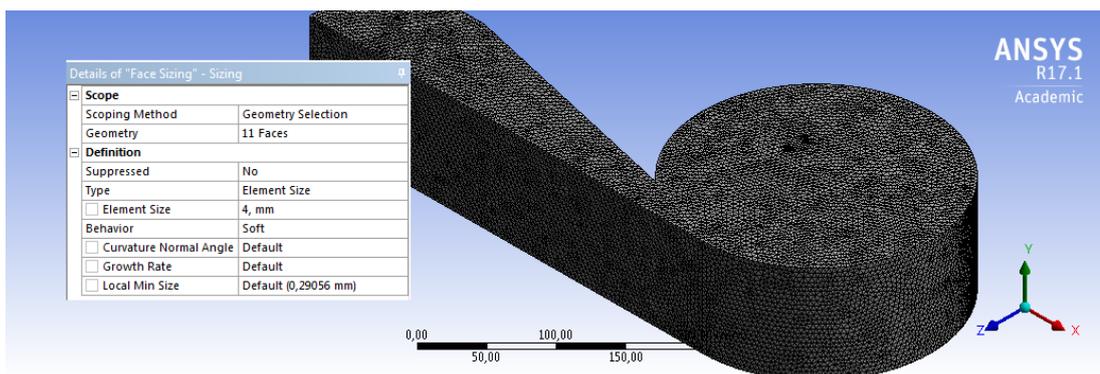


Figura 91 Mallado Final

b. Control de métodos para cuerpos sólidos

Esta opción es recomendada para cuerpos sólidos, ya que mejora la calidad de malla, haciéndola simétrica, creando únicamente hexaedros por medio de cuadrilátero/triangular o todo cuadrilátero.

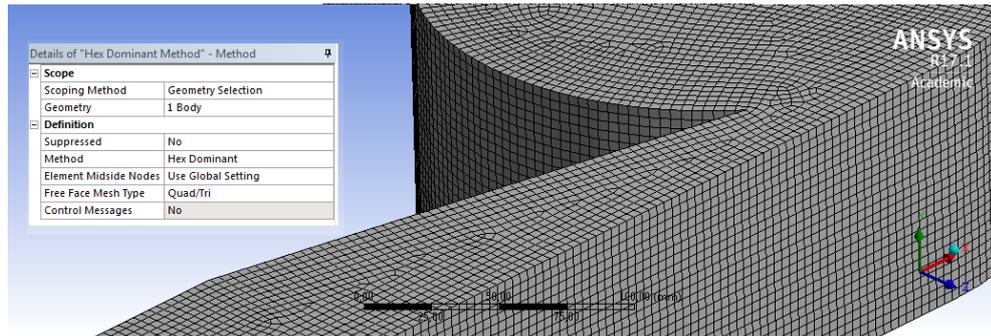


Figura 92 Mejoramiento de malla

4.2.2. Calidad de malla

Para verificar que la malla está correctamente realizada para el estudio, se determinará por medio del criterio de oblicuidad y ortogonalidad, que se muestran en la (Tabla 2 y Tabla 3) respectivamente.

Tabla 19

Calidad de mallado

Parámetro	Recomendado por Software	Obtenido por simulación	Calidad de Malla
Ortogonalidad	Promedio 0.95 – 1	Promedio 0.86	Muy Buena
Oblicuidad	Promedio 0 – 0.25	Promedio 0.24	Excelente

4.2.3. Creación de condiciones de borde

Para la creación de las condiciones de borde se detallan cada uno de los componentes que intervendrán en la solución que realizará posteriormente.

a. Entrada

Sección del sistema donde dará lugar al inicio de la simulación.

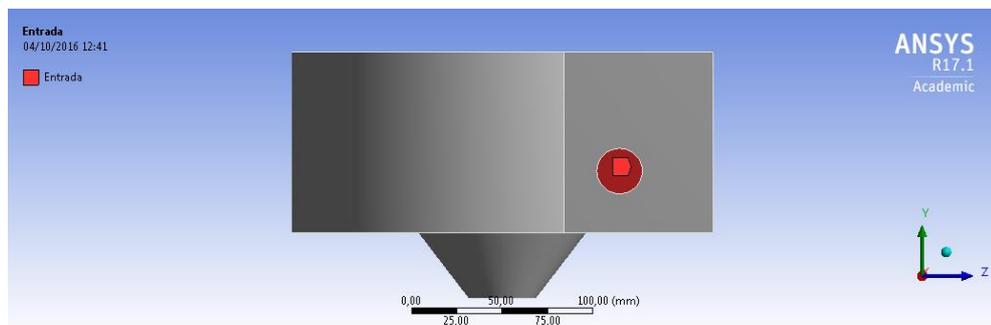


Figura 93 Condición de entrada

b. Salida

Sección en la que el agua finaliza el recorrido, dirigiéndose hacia el reservorio.

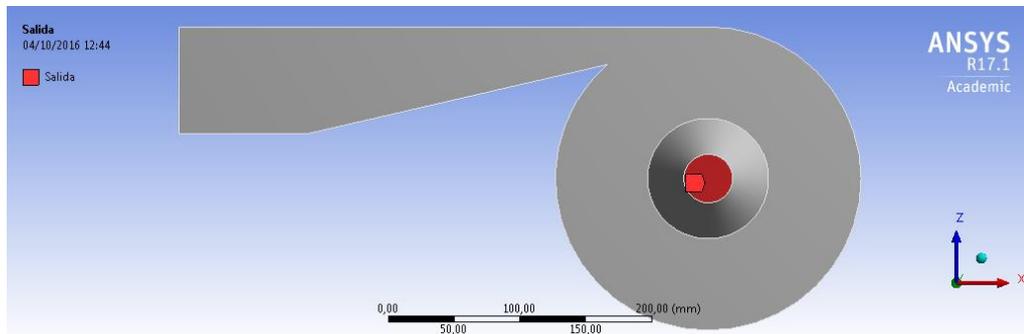


Figura 94 Condición de salida

c. Superficie libre

Sección superior del sistema que estará interactuando con el aire, es decir, es el área expuesta del agua hacia la presión atmosférica.

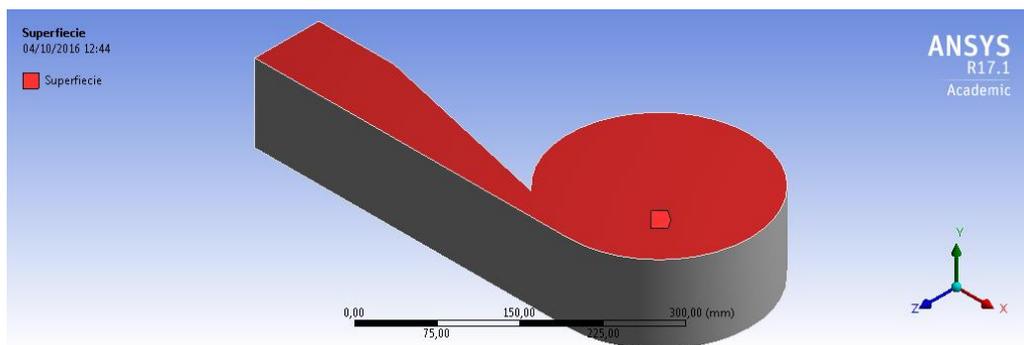


Figura 95 Condición de superficie

d. Pared

Sección del sistema que dará soporte al peso y al flujo de agua.

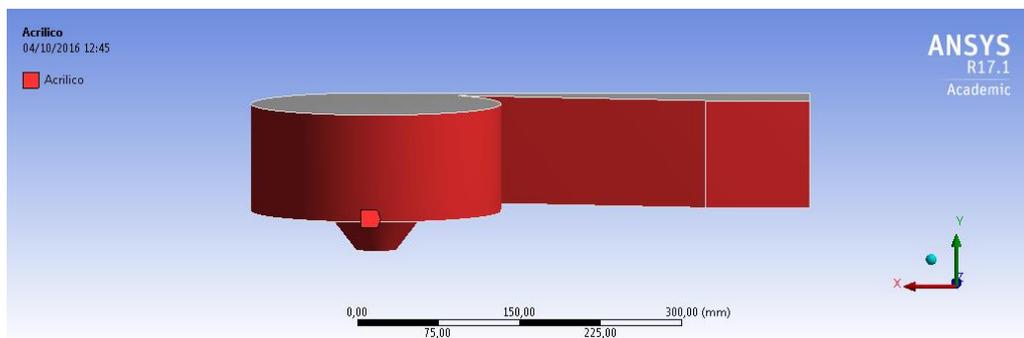


Figura 96 Condición de paredes

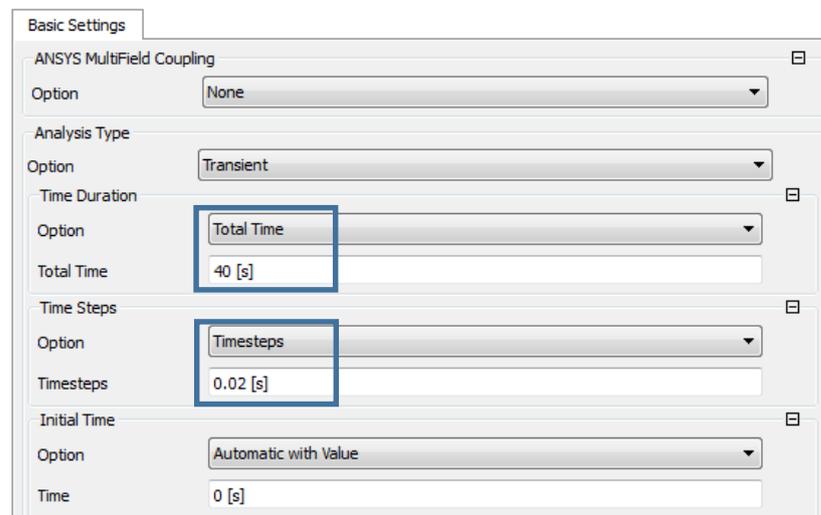
4.3. Pre procesamiento ANSYS CFX

El Pre procesamiento de ANSYS es usado para definir los parámetros de simulación, al iniciar tendremos todo el sistema con parámetros iniciales que son proporcionados por el software, estos parámetros tienen que ser remplazados por los que más se asemejen a la realidad, ya que esto ayudará a que tenga una convergencia más rápida.

4.3.1. Análisis de fluidos

a. Parámetros de inicialización

En este parámetro necesitamos activar la opción “Transient”, una vez ubicado en esta sección, se ingresará el tiempo real que transcurre hasta que el sistema se estabilice en la pestaña de “Total time”, al haber realizado un sistema pequeño, el tiempo de estabilización es de 40 segundos. En la pestaña “Timesteps” se ingresa cada cuanto tiempo se desea obtener y almacenar un resultado del análisis interno del pre procesamiento, se ingresó un tiempo de 0.02 segundos; los dos valores ingresados nos dan el número de iteraciones que realizará el software, esto se obtiene dividiendo el tiempo total para las fracciones de tiempo, es decir, tendremos 2000 iteraciones.



The image shows the 'Basic Settings' dialog box in ANSYS CFX. The 'ANSYS MultiField Coupling' section is set to 'None'. The 'Analysis Type' is set to 'Transient'. Under 'Time Duration', the 'Option' is 'Total Time' and the 'Total Time' is set to '40 [s]'. Under 'Time Steps', the 'Option' is 'Timesteps' and the 'Timesteps' value is '0.02 [s]'. The 'Initial Time' section is set to 'Automatic with Value' with a 'Time' of '0 [s]'. Red boxes highlight the 'Total Time' and 'Timesteps' fields.

Section	Option	Value
ANSYS MultiField Coupling	Option	None
Analysis Type	Option	Transient
	Time Duration	
Time Duration	Option	Total Time
	Total Time	40 [s]
Time Steps	Option	Timesteps
	Timesteps	0.02 [s]
Initial Time	Option	Automatic with Value
	Time	0 [s]

Figura 97 Datos de inicialización

b. Definición de parámetros iniciales

Para poder realizar la simulación, hay que tener en cuenta que se tendrá interacción entre agua y aire, por lo cual, se debe crear dos tipos de materiales con las características necesarias.

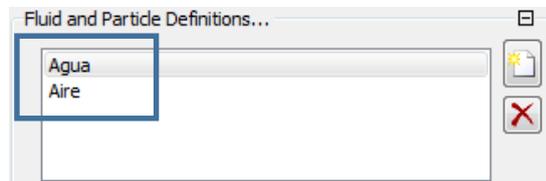


Figura 98 Creación de materiales

Las configuraciones que se realizan para cada uno de estos dos parámetros se encuentran determinados en la opción “material”, se selecciona el material deseado, y cada uno de estos tiene sus características pre establecidas.

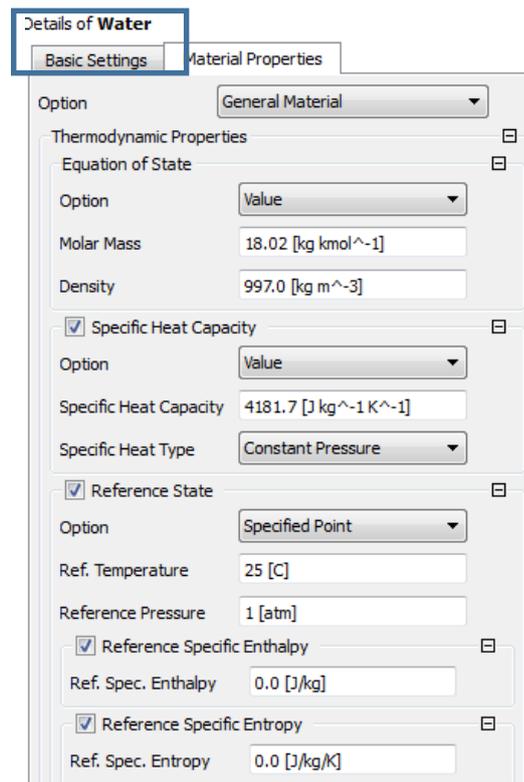


Figura 99 Características de material AGUA

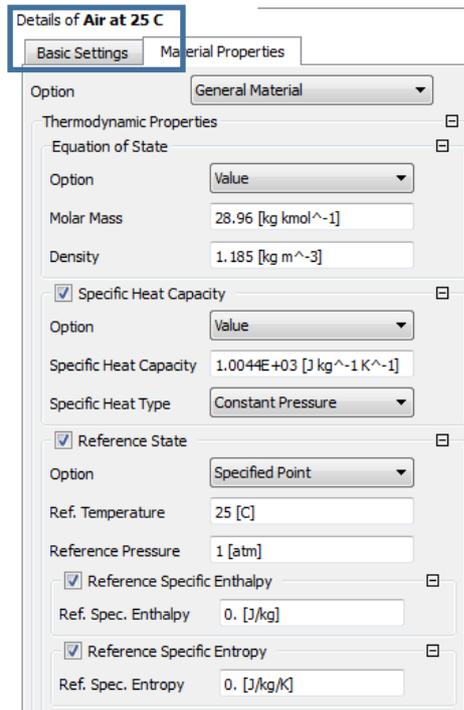


Figura 100 Características de material AIRE

En el modelo del dominio se coloca la presión de referencia que es igual a una atmósfera, en las secciones siguientes se seleccionará el eje en el que actuará la gravedad con su respectiva densidad; dichos valores son estándares.

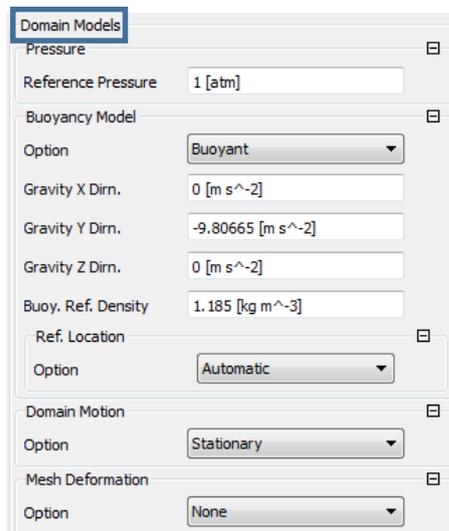


Figura 101 Configuración de dominio de modelo

En la pestaña “Fluid Models” se coloca los siguientes parámetros: “Multiphase” y “Homogeneous Model”, el cual permitirá representar los dos flujos de manera independiente, en la opción de turbulencia seleccionamos la

opción “SSG Reynolds Stress”, este modelo es basado en la ecuación de movimiento de todos sus componentes, y mantenemos constantes los demás parámetros ya que son independientes de la modelación que vamos a realizar.

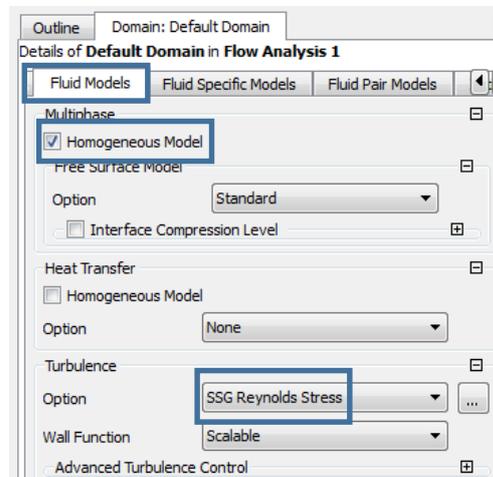


Figura 102 Detalles de Multiphase

Se mantiene las características de “Fluid Specifics Models”, en “Fluid Pair Models” se selecciona la opción “Surface Tension Coefficient”, se ingresa el coeficiente de tensión superficial que es de 0,072 N/m en el sistema internacional. Una vez terminada la configuración aplicamos y aceptamos los cambios.

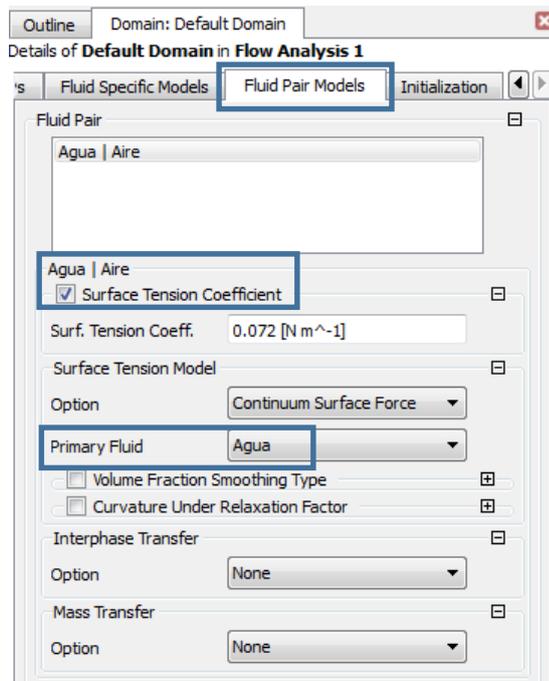


Figura 103 Definición de parámetros característicos

c. Definición de dominios

En esta sección se creará 4 distintos dominios, entrada, salida, superficie libre y paredes. Cada una de estos dominios necesitan configuraciones diferentes que se detallan a continuación.

c.1. Entrada

En configuraciones básicas se selecciona el lugar por donde va a ingresar el fluido y se especifica que será entrada “Inlet”.

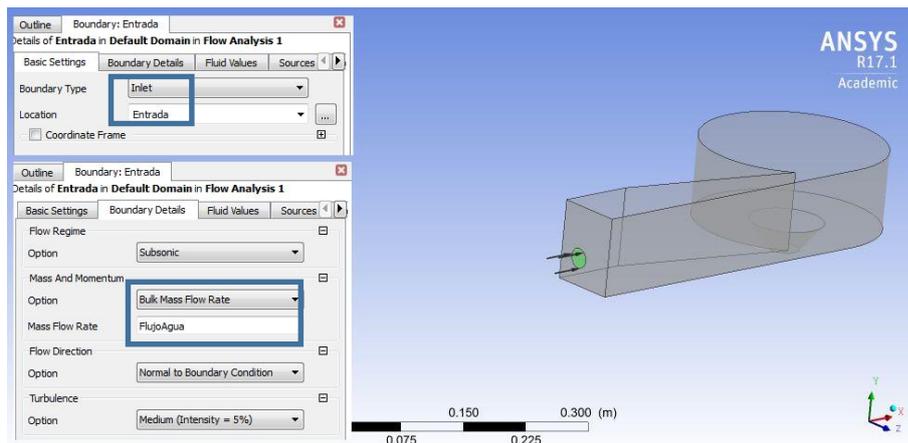


Figura 104 Configuración de entrada

Para que el software interprete que fluido es el que va a ingresar, se coloca el valor de 1 en agua y 0 en aire; esto quiere decir que únicamente ingresará agua por el lugar seleccionado.

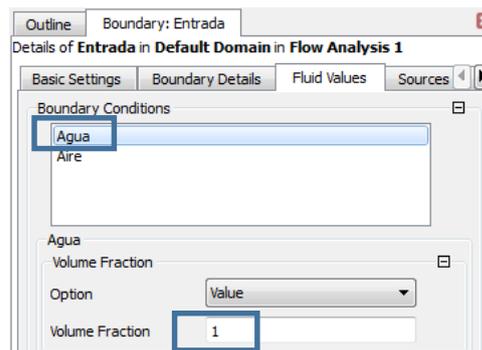


Figura 105 Definición de valor de agua

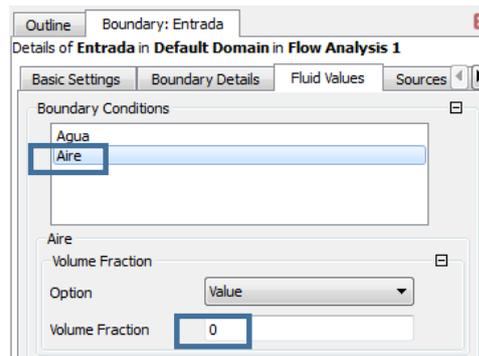


Figura 106 Definición de valor de aire

c.2. Salida

En configuraciones básicas se selecciona el lugar por donde va a salir el fluido y se especifica que será salida “Outlet”, 0 pascales para la presión relativa y el valor por defecto de 0,05, o 5%, puede ser apropiado para la mezcla de presiones. (ANSYS ACADEMIC 17.1, 2016)

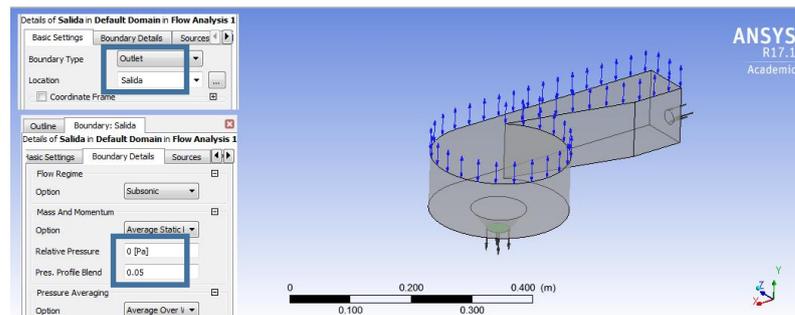


Figura 107 Configuración de salida

c.3. Superficie libre

En configuraciones básicas se selecciona el lugar que va a tener una superficie libre y se especifica que esta estará abierta “Opening”.

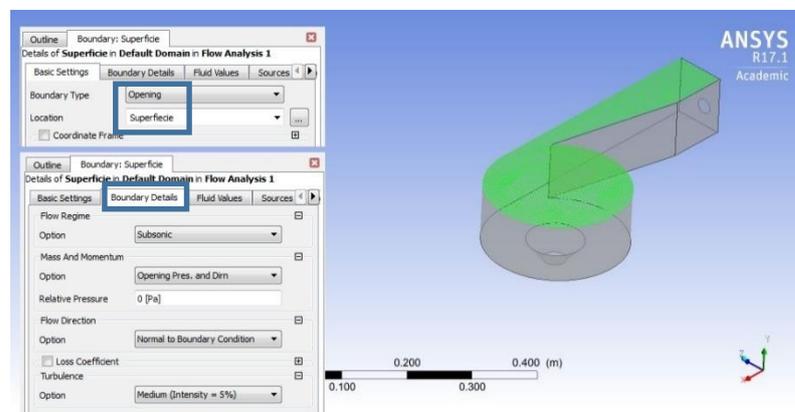


Figura 108 Configuración de superficie

Para que el software interprete que fluido es el que va a interactuar con la superficie libre, se coloca el valor de 0 en agua y 1 en aire; esto asumirá que toda la superficie está libre y no presenta ningún impedimento.

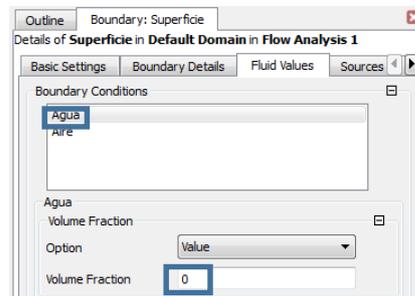


Figura 109 Definición de valor de agua

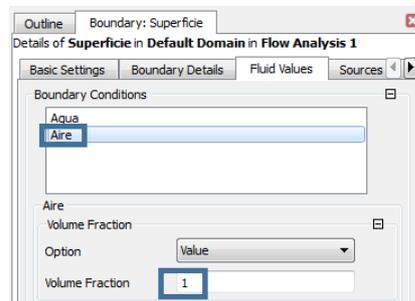


Figura 110 Definición de valor de aire

c.4. Paredes

En esta sección el software reconoce todas las caras que no han sido utilizadas anteriormente como pared. Al utilizar polimetilmetacrilato en la construcción del sistema, una de las características principales de este material, es presentar una fricción mínima, por lo que se coloca como nula ante los fluidos.

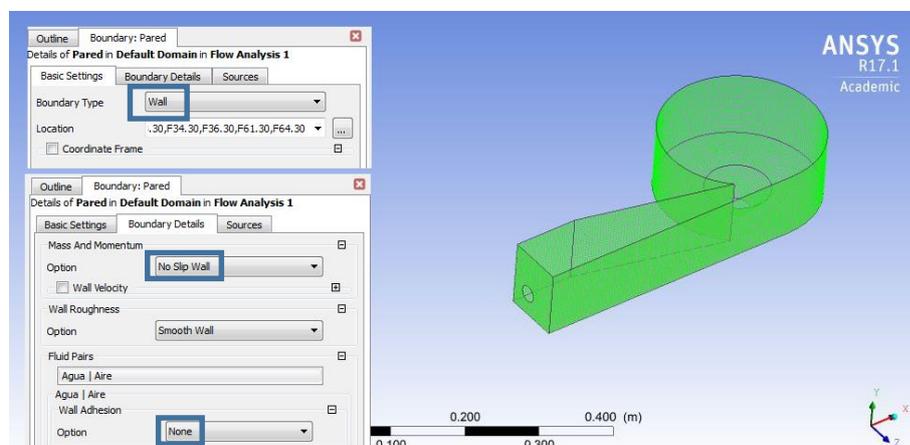


Figura 111 Configuración de parámetros de pared

d. Inicialización

Para detallar la inicialización se debe colocar valores que se aproximen a la realidad para obtener una rápida convergencia, se colocan valores estándares, en este caso cero. (ANSYS ACADEMIC 17.1, 2016)

4.3.2. Expresiones

Para definir un valor en función de la variación del fluido, se crean las ecuaciones siguientes.

a. Flujo continuo de agua

Se define como (FlujoAgua), esta expresión nos permite mantener constante el flujo de agua durante el tiempo establecido que es de 2 minutos. Se utilizará un flujo de 0.7 kg/s que se obtuvo experimentalmente con el prototipo del sistema gravitacional de vórtice. (Armijos, 2014)

$$if(t < 2[min], 0.7 \left[\frac{kg}{s} \right], 0 \left[\frac{kg}{s} \right]) \quad EC.18$$

b. Presión de agua

Se define como (PresionAgua), esta expresión define la presión que ejerce el fluido en las paredes del sistema gravitacional de vórtice y está dada por:

$$997 \left[\frac{kg}{m^3} \right] * 9.80665 \left[\frac{m}{s^2} \right] * (2.5[cm] - y) * aguaVF$$

Donde:

$997 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$ Densidad del agua

$9.80665 \left[\frac{m}{s^2} \right]$ Aceleración gravitacional estándar

$2.5[cm]$ Altura de entrada de agua

y Nivel de agua existente en simulación

$aguaVF$ Fracción de volumen de agua

c. Volumen de agua

Se define como (VolumenAgua), esta expresión integra la variable especificada a la dirección del dominio principal, sirve para controlar y visualizar el volumen de agua en el dominio durante la simulación.

$$\text{volumeInt}(\langle \text{variable} | \text{Expresión} \rangle) @ \langle \text{Localización} \rangle$$

EC.19

Donde:

$\langle \text{variable} | \text{Expresión} \rangle$ es una variable o expresión

$\langle \text{Localización} \rangle$ es la región en 3D como el dominio o un sub dominio.

$$\text{volumeInt}(\text{Agua.Volume Fraction}) @ \text{Default Domain}$$

d. Fracción de volumen de agua

Se define como (aguaVF), esta expresión toma el valor de 1 cuando el nivel de agua de la simulación no supera el nivel de altura de entrada de agua. (Armijos, 2014)

$$\text{if}(y < 2.5[\text{cm}], 1, 0)$$

4.3.3. Solucionador

a. Unidades para la solución

En esta sección “Solutions Units”, se determinará las unidades con las que se desea realizar la simulación, se recomienda ubicarlas en el sistema internacional para tener mayor facilidad en la interpretación final.

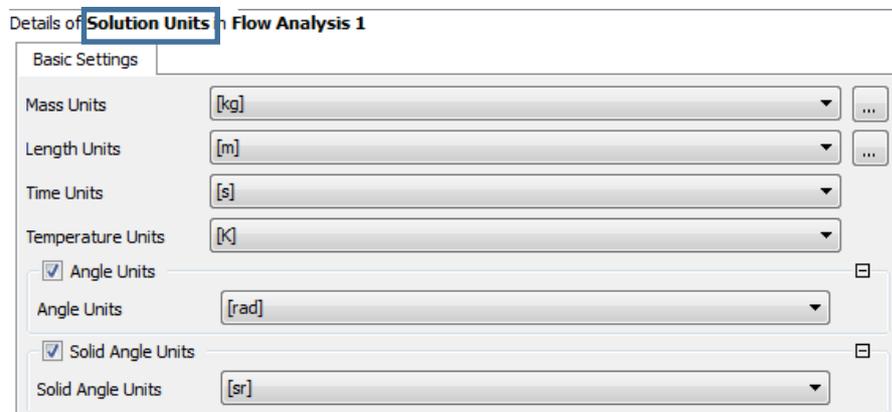


Figura 112 Unidades a utilizar

b. Control de solución

En el control de solución se define la discretización algorítmica para los términos puestos anteriormente en parámetros de inicialización, ANSYS recomienda la opción, “Second Order Backward Euler”, esta opción es aplicable para constantes y variables en dimensión de pasos de tiempo, e ideal para régimen transitorio, First Order Backward Euler resuelve

ecuaciones de turbulencia. En el control de convergencia se selecciona el número de sub iteraciones que realizará el software por cada iteración propuesta anterior mente; se tendrá un total de 20000 sub iteraciones, hay que tomar en cuenta que todas estas configuraciones mencionadas, son pre establecidas por el software. (ANSYS ACADEMIC 17.1, 2016)

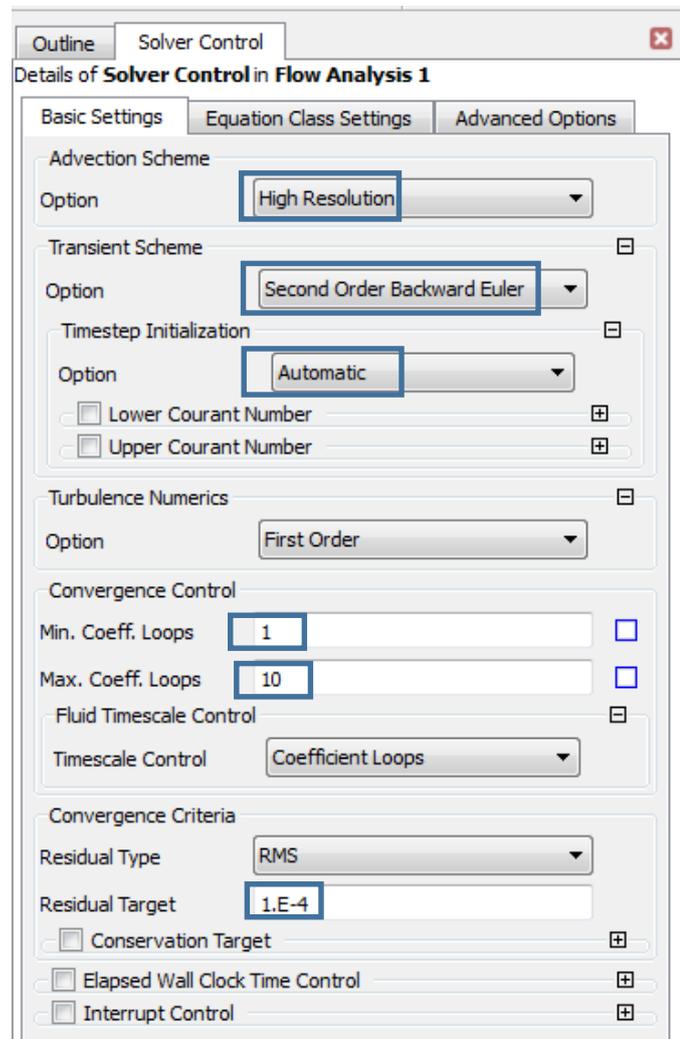


Figura 113 Control de solución

a. Control de datos de salida

En la opción de “Output Control” se crea una etiqueta para las variables que se desee monitorear, existen varios tipos, de las cuales se utiliza las siguientes:

- Conservación de fracción de volumen de agua
- Presión absoluta
- Presión

- Velocidad de agua
- Velocidad de aire
- Velocidad
- Fracción de volumen de agua
- Fracción de volumen de aire

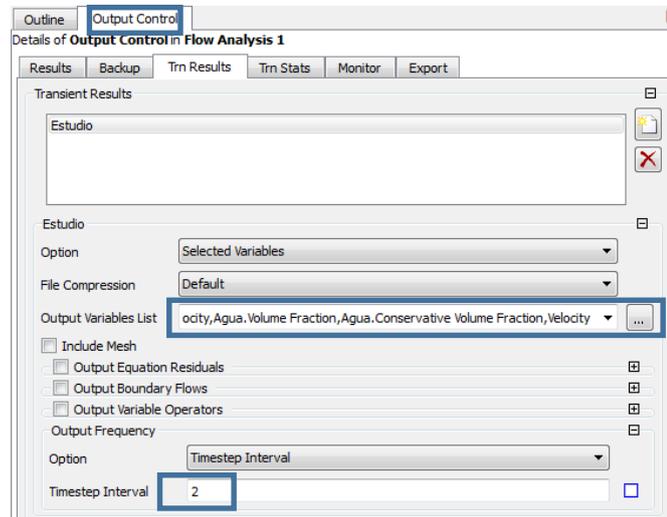


Figura 114 Datos de salida

4.4. CFX Solver manager

Para poder simular de manera correcta, se escoge que inicie la simulación mediante los valores iniciales; para obtener una mayor rapidez de procesamiento, se recomienda utilizar todos los núcleos del procesador mediante la opción “Platform MPI local parallel” como se muestra en la figura 118.

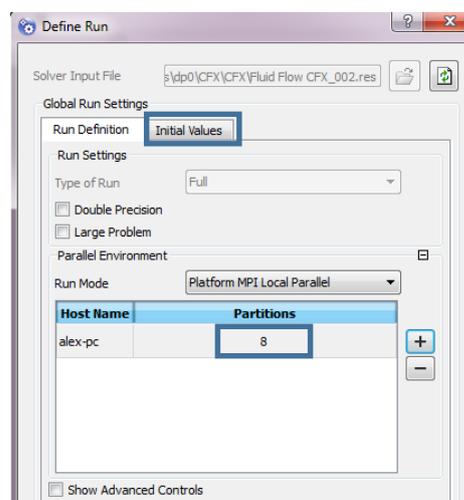


Figura 115 Definición de particiones

CAPÍTULO V

ANÁLISIS DE RESULTADOS

El módulo “CFX-Result” es generado a partir del módulo “CFX-Solver”, esta sección contiene los datos generados anteriormente, así como toda la descripción del fluido incluyendo el mallado del volumen y la solución del sistema. (ANSYS ACADEMIC 17.1, 2016)

5.1. Estadísticas de mallado

Las estadísticas de mallado resumen los dominios específicos y globales que son:

5.1.1. Diagnóstico de calidad de malla

En el diagnóstico de calidad de malla se incluyen los valores de ortogonalidad de malla, expansión y aspecto de radio, para cada uno de estos valores existe un rango definido por “bueno (**OK**), aceptable (**ok**), discutible (**!**)”.

Mesh Statistics									
Domain Name	Orthog. Angle			Exp. Factor			Aspect Ratio		
	Minimum [deg]			Maximum			Maximum		
Default Domain	22.2 ok			326 !			14 OK		
	#!	%ok	%OK	#!	%ok	%OK	#!	%ok	%OK
Default Domain	0	5	95	4	13	83	0	0	100

Figura 116 Estadísticas de mallado

El ángulo de ortogonalidad tiene un dominio de 22.2° y está definido por aceptable debido a los rangos de aceptación que constan en la tabla 20.

Tabla 20

Mínimo ángulo de ortogonalidad

Mínimo ángulo de ortogonalidad	OK	> 50°
	Ok	50° > 20°
	!	< 20°

Fuente: (ANSYS ACADEMIC 17.1, 2016)

El factor de expansión de malla tiene un dominio de 326 y está definido por discutible debido a los rangos de aceptación que constan en la tabla 21.

Tabla 21

Factor de expansión de malla

Factor de expansión de malla	OK	< 5.0
	ok	5.0 < 20.0
	!	

Fuente: (ANSYS ACADEMIC 17.1, 2016)

El máximo aspecto de radio tiene un dominio de 14 y está definido por bueno debido a los rangos de aceptación que constan a continuación.

Tabla 22

Máximo aspecto de radio

Máximo aspecto de radio	OK	< 100.0
	ok	100.0 < 1000.0
	!	

Fuente: (ANSYS ACADEMIC 17.1, 2016)

5.1.2. Número total de nodos, elementos y fronteras en la malla

En esta sección se detalla el número de nodos que en función del tipo y calidad de malla se crearon, esta cantidad tiene que ser contrastada con el número de nodos permitidos por el software, ya que es una versión académica y permite un máximo de 512 mil nodos.

```

+-----+
|                               Mesh Statistics                               |
+-----+

Domain Name : Default Domain

Total Number of Nodes           =      114739
Total Number of Elements        =      122315
  Total Number of Tetrahedrons   =         7890
  Total Number of Prisms         =         1221
  Total Number of Hexahedrons    =      99483
  Total Number of Pyramids       =      13721

Total Number of Faces           =      17876

```

Figura 117 Total número de nodos

El número total de nodos es de 114739 y el número total de elementos es 122315, la mayor cantidad de elementos se encuentra en la sección de hexaedros; esto se debe a que al realizar la malla se selecciona esta opción para poder tener una mejor calidad de mallado, los demás elementos son utilizados principalmente en esquinas y redondeos del sistema, el total de caras creadas es de 17876.

5.2. Simulación de vórtice en función del tiempo

Los resultados obtenidos se los visualizará en el transcurso del tiempo para examinar y extraer datos útiles de la simulación, estos resultados se los analizará para la posterior generación de energía.

5.2.1. Vista a 0.5 segundos

A los 0.5 segundos el impulso del agua choca contra la pared lateral izquierda del sistema, para inicial la formación del vórtice artificial con una velocidad de 0.75 m/s; la presión que ejerce el agua al inicio, hace que en la entrada al cilindro se produzca un pequeño desborde, que se elimina casi de forma inmediata.

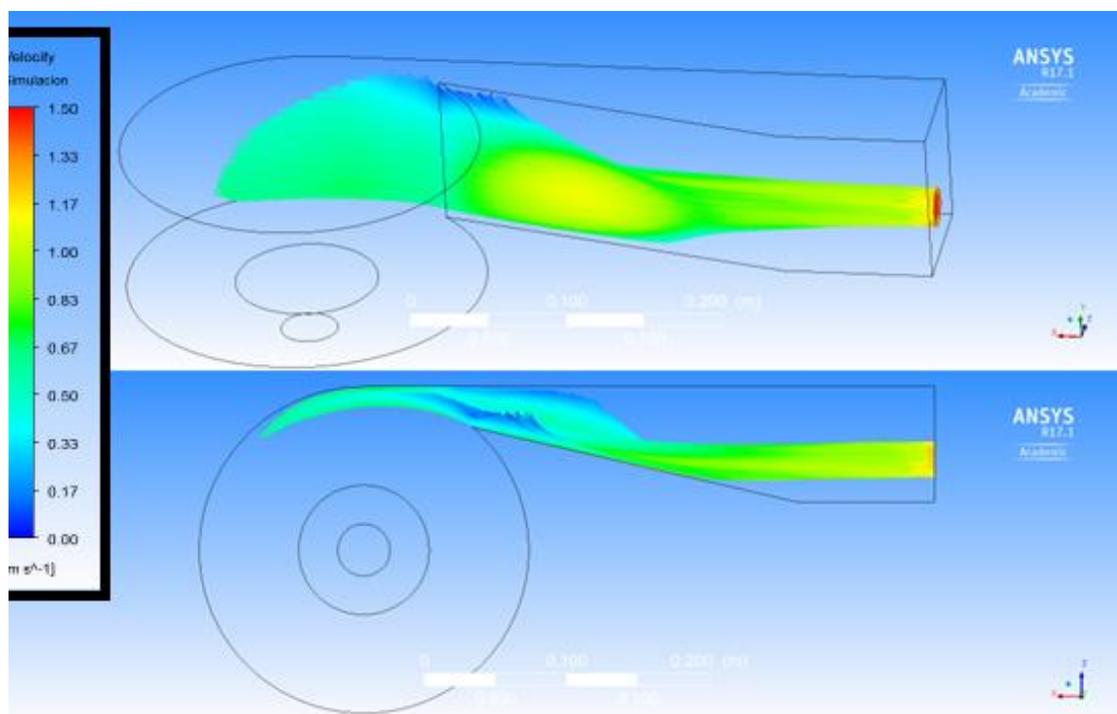


Figura 118 Vista agua a 0.5 segundos



Figura 119 Vista real a 0.5 segundos

5.2.2. Vista a 1.5 segundos

A los 1.5 segundos el agua recorre casi todo el perfil del cilindro sin producir desborde, además de ya formar el vórtice en una pequeña fracción, con una velocidad promedio de 0.52 m/s; en la sección del inicio de vórtice artificial, el agua que no ingresa al cilindro retorna hacia la entrada.

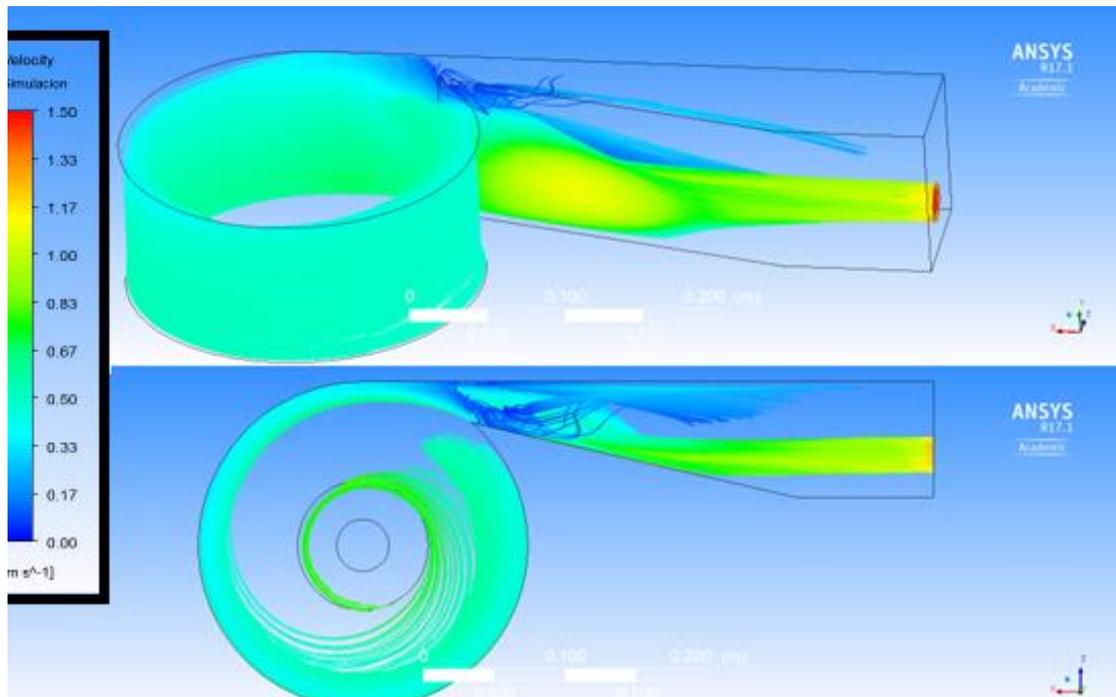


Figura 120 Vista agua a 1.5 segundos



Figura 121 Vista real a 1.5 segundos

5.2.3. Vista a 2.5 segundos

A los 2.5 segundos el volumen de agua existente en el cilindro aumenta, formando el vórtice artificial y aumentando su velocidad en el centro del cilindro a 0.83 m/s; el agua que intenta retornar a la entrada es impulsada nuevamente hacia el cilindro.

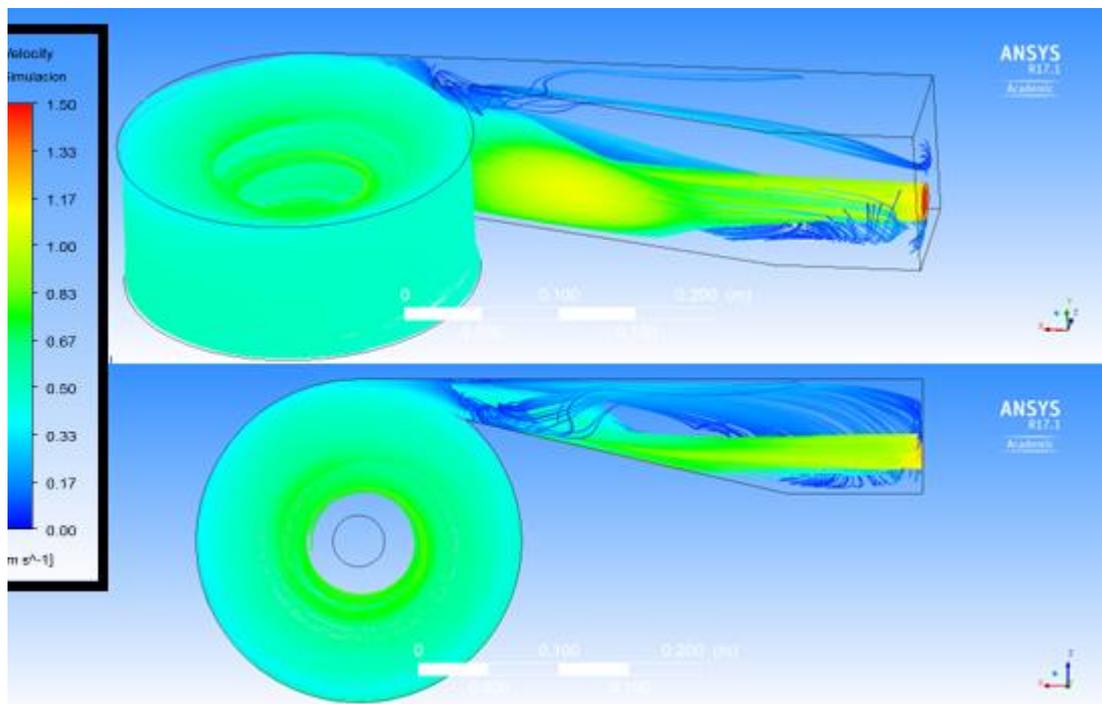


Figura 122 Vista agua a 2.5 segundos



Figura 123 Vista real a 2.5 segundos

5.2.4. Vista a 6 segundos

A los 6 segundos todo el sistema ya se encuentra estabilizado, manteniendo un flujo constante en el vórtice gravitacional con una velocidad de 0.9 m/s, siendo esta la velocidad con la que se generará energía eléctrica mediante un generador DC; el agua que no ingresa al cilindro, se mantiene en constante movimiento hasta que es impulsada nuevamente.

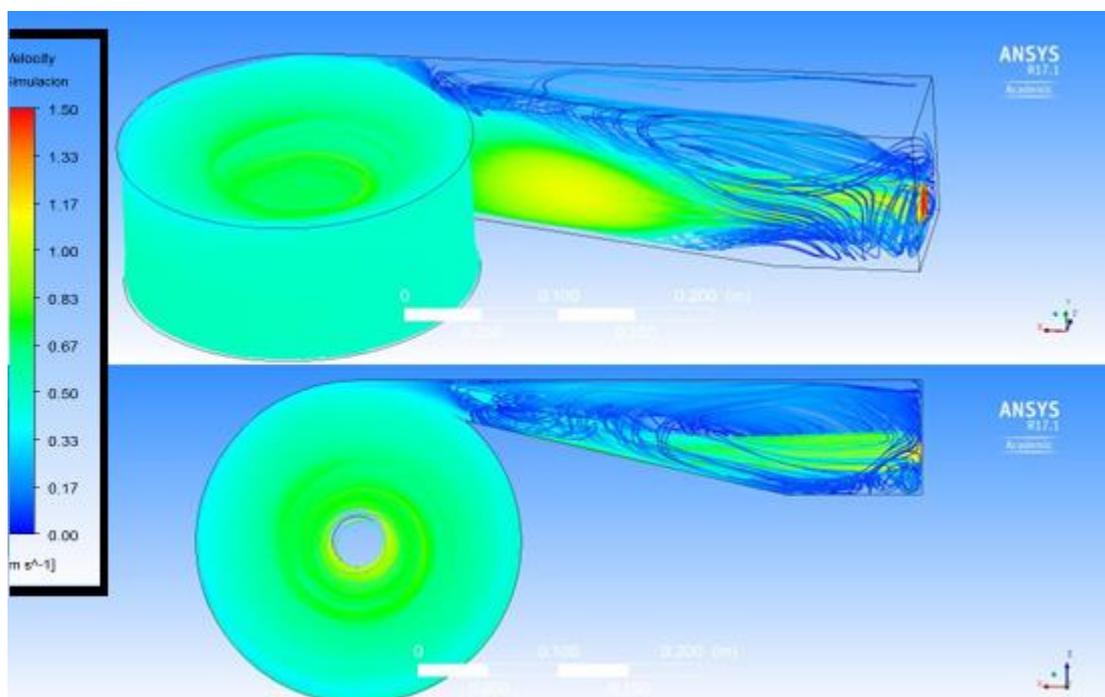


Figura 124 Vista agua a 6 segundos



Figura 125 Vista real a 6 segundos

5.3. Fracción de volumen de agua en el sistema gravitacional

En las figuras siguientes se muestran las vistas seccionadas del sistema; el color azul muestra la fracción de volumen de agua y el color gris la fracción de volumen de aire.

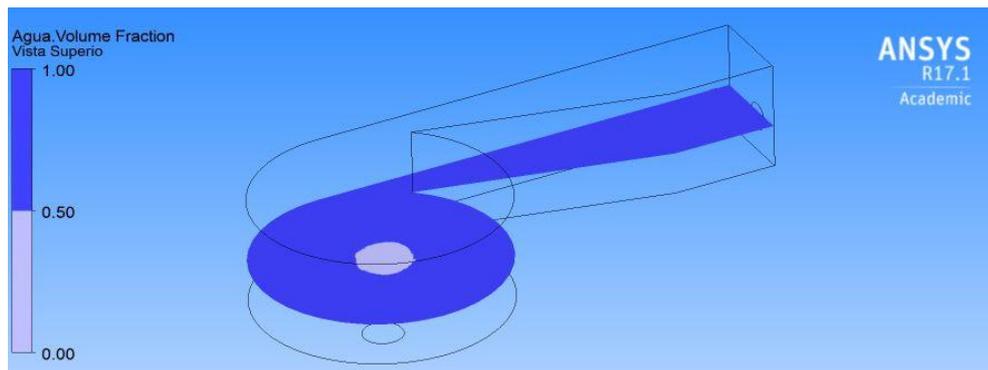


Figura 126 Vista superior de fracción de volumen de agua



Figura 127 Vista superior real de fracción de volumen de agua

En la figura 128 y 129, se observa el comportamiento del agua en la vista lateral del sistema gravitacional de vórtice, tanto en la simulación como en la vida real, se puede identificar que existe un ligero rebose de agua en el inicio del recorrido que posteriormente se estabiliza teniendo un flujo de agua constante.

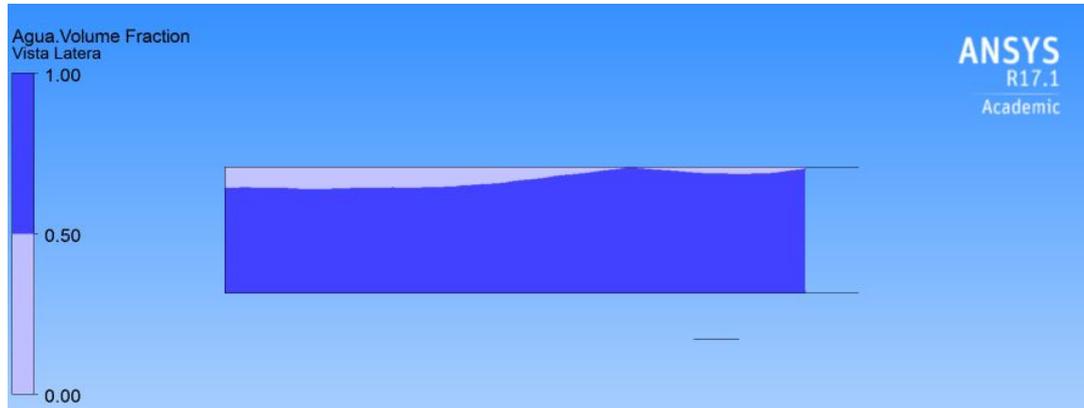


Figura 128 Vista lateral de fracción de volumen de agua



Figura 129 Vista lateral real de fracción de volumen de agua

En las figuras 130 y 131, se observa la vista frontal del sistema gravitacional de vórtice, el flujo de agua entra al cilindro con una energía cinética, permitiendo formar un remolino en su centro y teniendo un efecto de succión por el cono de descarga y convirtiéndose en energía potencial hidráulica, la misma que será utilizada para la generación de energía eléctrica, este vórtice dará movimiento a la turbina que obtuvo mayor rendimiento en pruebas realizadas experimentalmente, esta estará acoplada a un generador el cual será sometido a carga.

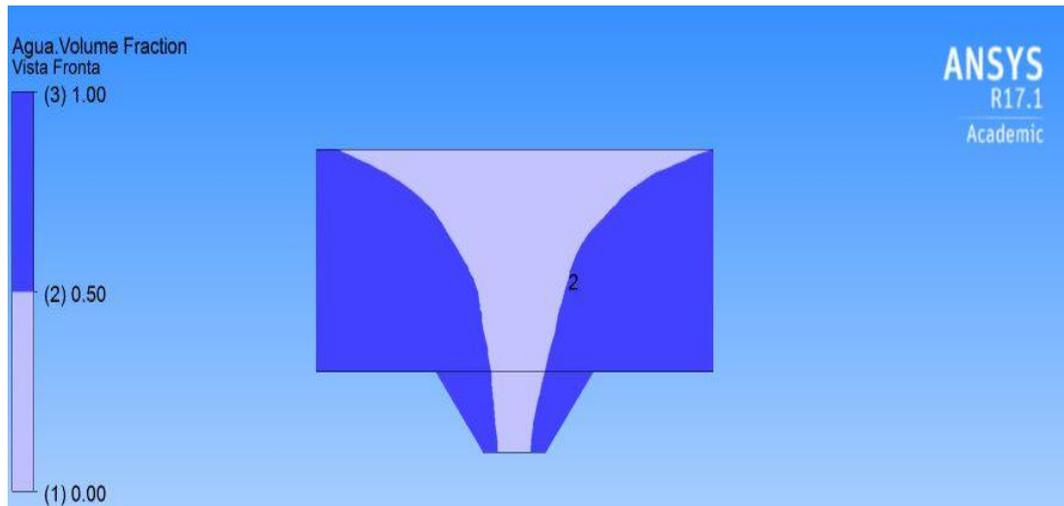


Figura 130 Vista frontal de fracción de volumen de agua



Figura 131 Vista frontal real de fracción de volumen de agua

5.4. Presión en la superficie

El agua ejerce una presión hidrodinámica en las paredes del sistema gravitacional de vórtice, siendo 1050 pascales la máxima presión que ejerce, esta principalmente se encuentra en los bordes de la parte inferior del cilindro por la fuerza del flujo de agua y el efecto de vorticidad del fluido, existe una ligera variación de presión en la pared del canal ya que el agua choca al ingresar al sistema estos valores se encuentran entre los 583 y 700 pascales.

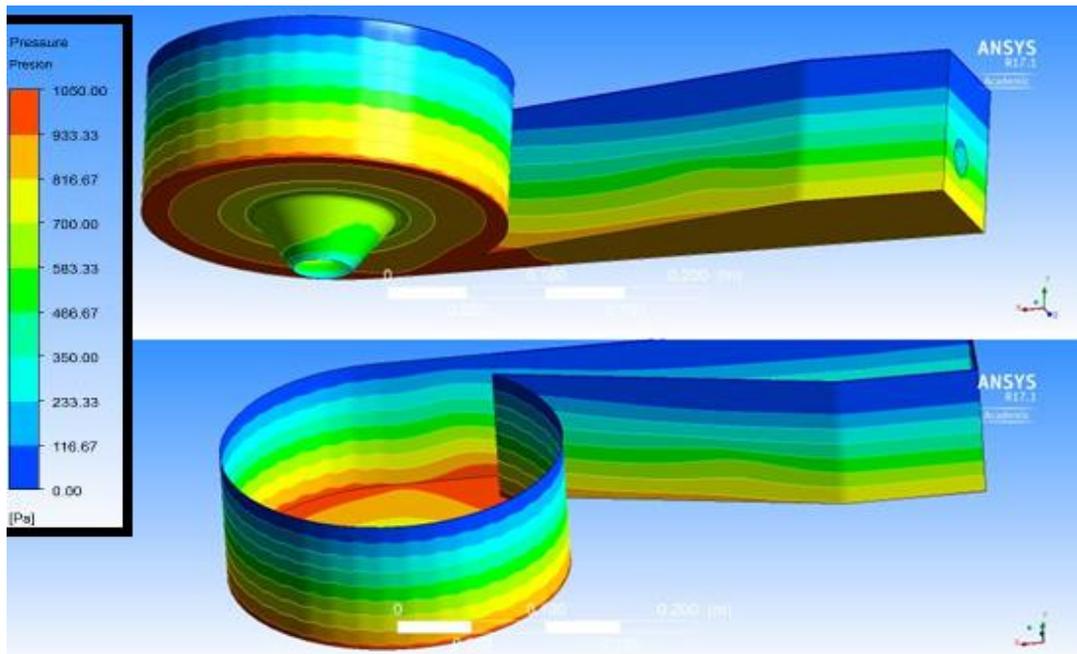


Figura 132 Presión ejercida en las paredes

5.5. Generación

Para el cálculo de la generación teórica, de energía eléctrica del prototipo del sistema gravitacional de vórtice, se utilizará la ecuación de potencia hidráulica donde intervienen cuatro factores que se detallan a continuación.

5.5.1. Caudal

Para el cálculo de caudal en el prototipo, tomando en cuenta que es un caudal pequeño, se utiliza el método volumétrico; el cual consiste en el llenado de un recipiente con un volumen conocido, el tiempo que este demore en ser llenado, será dividido para el volumen total del recipiente. Para tener una medida más exacta del caudal, se realiza 5 distintas tomas de medidas, de las cuales se obtiene la media.

Tabla 23

Tomas de mediadas de caudal

N° de medición	Volumen (lt)	Tiempo (s)	Caudal (lt/s)
1	5	7,4	0,68
2	5	7,2	0,69
3	5	7,3	0,68
4	5	7,3	0,68
5	5	7,2	0,69
TOTAL			0,69

La media de los caudales medidos es aproximadamente $0,7 \frac{lt}{s}$.

$$0.7 \frac{lt}{s} = 0.0007 \frac{m^3}{s}$$

5.5.2. Gravedad

La aceleración gravitacional estándar es la fuerza física que ejerce la tierra hacia el centro de ella, que está dada por el valor de $9.80665 \frac{m}{s^2}$ en el sistema internacional.

5.5.3. Densidad del agua

Es la relación entre la masa y el volumen del agua, que está establecida por el sistema internacional con un valor de $997 \frac{kg}{m^3}$.

5.5.4. Altura

El sistema gravitacional de vórtice aprovecha una altura h igual a 0,05 metros, .

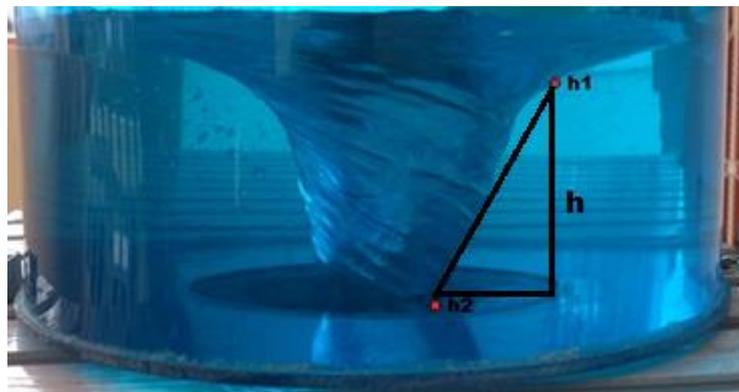


Figura 133 Altura de caída de agua

5.5.5. Cálculo de potencia

a) Potencia teórica

Para el cálculo de la energía eléctrica, se necesita la energía potencial del agua, el valor máximo de potencia hidráulica teórica está dado por la fórmula:

$$P(W) = Q * g * \delta * h \quad \text{EC. 20}$$

Donde:

δ Densidad del agua en $\frac{kg}{m^3}$

g Aceleración gravitacional estándar en $\frac{m}{s^2}$

h Altura de entrada de agua en m

Q Caudal de agua en $\frac{m^3}{s}$

$$P(W) = 0.0007 \frac{m^3}{s} * 9.80665 \frac{m}{s^2} * 997 \frac{kg}{m^3} * 0,05m$$

$$P(W) = 0,34 W$$

b) Potencia real

Para obtener la potencia real del sistema, se mide el voltaje y la corriente con un multímetro digital, utilizando como carga 4 mini motores coreless con una resistencia de 9 ohmios cada uno, con lo que se obtuvo un voltaje de 0.28V y 0,1A como se muestra en la siguiente figura.



Figura 134 Multímetro digital

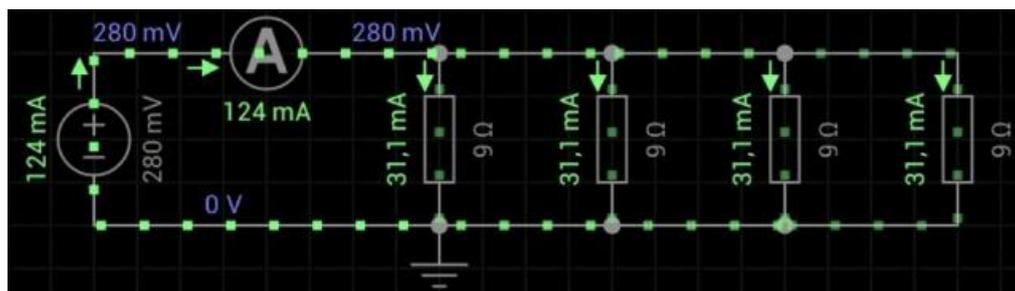


Figura 135 Diagrama del circuito

Se obtuvo una potencia total de:

$$P_{real} = V \times I$$

$$P_{real} = 0,28 V \times 0,124A$$

$$P_{real} = 0,03472 \text{ Vatios}$$

Con una eficiencia de:

$$Eficiencia = \frac{P_{teórica}}{P_{real}} \times 100\%$$

$$Eficiencia = \frac{0,03472}{0,34} \times 100\%$$

$$Eficiencia = 10,21\%$$

CONCLUSIONES

- Se realizó el estudio, y se analizó mediante la dinámica computacional de fluidos en ANSYS CFX, el comportamiento del flujo en un prototipo de una central de vórtice gravitacional, demostrando que en la simulación como en la vida real, el flujo de agua actúa de igual manera.
- Con la licencia que se posee del software, limita la construcción de un prototipo más grande, ya que el mallado restringe a una cantidad específica de nodos.
- La calidad de malla no siempre será mejor si se la refina más, es importante que las medidas de expansión de mallado, ortogonalidad y simetría se encuentren en los rangos adecuados, ya que si no se cumplen se tendrá resultados erróneos o a su vez la simulación no finalizara y mostrará errores.
- En la simulación presenta un pequeño salpique de agua, que, para corregirlo, se colocó una pequeña tapa en la parte superior de la entrada del sistema gravitacional de vórtice.
- El sistema de vórtice gravitacional fue desarrollado en polimetilmetacrilato, ya que permite la visibilidad del comportamiento del flujo agua y así, poder comparar con los resultados de la simulación.
- Para la generación de voltaje, la turbina número dos demostró ser la más adecuada para el sistema, debido a que posee 10 alabes separados 36° , seguida por la turbina con 6 alabes, la turbina 3 que se diseñó con 15 alabes no alcanzó mover el rotor del generador ya que el agua permanecía en el centro de la turbina.
- El tiempo de convergencia del análisis CFX realizado depende de gran medida de las herramientas computacionales que se posea y de las condiciones iniciales que se establezcan.
- El comportamiento del fluido es de forma turbulenta en los primeros 3 segundos, después se estabiliza formando un vórtice estable dentro del cilindro, y se mantiene turbulento en la sección de entrada.
- Los distintos resultados obtenidos en función de los tiempos, concuerdan de manera exacta con el comportamiento en el prototipo del sistema gravitacional de vórtice.

- La mayor velocidad de agua se localizó en la parte inferior del cono de descarga del sistema gravitacional de vórtice, siendo esta de 0.9 m/s.
- La mayor cantidad de presión que se ejerce sobre la superficie del polimetilmetacrilato está dada en los vértices inferiores del cilindro del sistema, ya que el peso está en constante movimiento sobre ellos, otra sección es en la cara que esta frente a la entrada de agua, debido a que ingresa y choca ahí primeramente, antes de continuar el transcurso durante todo el sistema.
- Se justificó que el diseño del sistema gravitacional de vórtice desarrollado fue adecuado para las necesidades establecidas.

RECOMENDACIONES

- Adquirir la licencia original de ANSYS, para poder realizar cualquier tipo de estudio.
- Realizar estudios en ANSYS que permitan a los estudiantes de la carrera de Ingeniería Electromecánica a fortalecer el conocimiento en el área de electromagnetismo.
- Realizar simulaciones variando las dimensiones en el diámetro del cono de descarga y el espesor de entrada al cilindro de vórtice gravitacional.
- Realizar un modelamiento matemático que relacione la cantidad de flujo másico de entrada con la velocidad en la parte inferior del vórtice
- Poner en marcha proyectos hidroeléctricos gravitacionales de vórtice para zonas rurales del Ecuador.
- Realizar estudios necesarios para la generación hidroeléctrica, dando como objetivo el desarrollo sustentable de la nación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANSYS. (25 de Junio de 2014). Introduction to ANSYS Workbench. USA.
- ANSYS. (07 de Mayo de 2014). Introduction to CFD Methodology & CFX. USA.
- ANSYS ACADEMIC 17.1. (01 de Enero de 2016). *ANSYS HELP*. Recuperado el 20 de Junio de 2016, de <http://www.ansys.com/es-ES/About-ANSYS>
- Armijos, E. P. (2014). *Estudio del comportamiento hidralico de un flujo a traves de un sistema de vortice gravitacional utilizando tecnicas de dinamica de fluidos computacional (CFD)*. Loja: Universidad Tecnica Particular de Loja .
- Asuero, H. R. (2014). *Diseño de una central minihidraulica basada en vortice gravitacional*. Loja: Universidad Tecnica Particular de Loja.
- Bakker, A. (2006). Ecuaciones de conservacion. Alemania.
- Blanca. (10 de Septiembre de 2016). *Erenovable.com*. Recuperado el 15 de Junio de 2016, de ERENOVABLE: <http://erenovable.com/las-energias-convencionales/>
- Cardozo, C. M. (25 de Julio de 2011). *Olade*. Recuperado el 11 de Agosto de 2016, de Organización latinoamericana de energía: http://www.olade.org/sites/default/files/Parte_I.pdf
- Cengel, Y. A., & Cimbala, J. M. (2012). *Mecánica de fluidos*. México, D.F: McGRAW-HILL/INTERAMERICANAS.S.A. DE C.V. Recuperado el 29 de Julio de 2016
- Durán, A. L. (9 de Noviembre de 2015). *Fluid Dynamics Group UPM*. Recuperado el 10 de 07 de 2016, de Apuntes sobre Dinámica de Fluidos Computacional: http://torroja.dmt.upm.es/adrian/wp-content/uploads/2015/11/Apuntes_CFD_2015.pdf
- Ecovive. (24 de Noviembre de 2010). *ECOVIVE.COM*. Recuperado el 10 de Julio de 2016, de ECOVIVE.COM: <http://www.ecovive.com/centrales-segun-la-afluencia-del-caudal>

- Educa, E. (23 de Enero de 2016). *endesaeduca.com*. Recuperado el 10 de Julio de 2016, de endesaeduca.com: http://www.endesaeduca.com/Endesa_educa/recursos-interactivos/produccion-de-electricidad/xi.-las-centrales-hidroelectricas
- Generadores y Maquinaria. (2015). *Generadores Eléctricos*. Recuperado el 15 de Junio de 2016, de Funcionamiento de los generadores eléctricos: <http://generadoreselectricos.info/funcionamiento/>
- Gobierno de España. (13 de Noviembre de 2015). *Newton.cnice*. Recuperado el 23 de Junio de 2016, de Ministerio de educación: http://newton.cnice.mec.es/newton2/Newton_pre/escenas/trabajo_energia/hidraulica.php
- Hidroproyectos. (24 de Junio de 2014). *Hidropoyectos.com*. Recuperado el 25 de Julio de 2016, de Hidroproyectos.com: <http://www.hidroproyectos.com/n?n=CENTRALES-HIDROELECTRICAS-DE-BOMBEO>
- Mott. (2014). *Mecánica de fluidos*. México: Pearson educación de México. Recuperado el 29 de Agosto de 2016
- NET, H. (5 de Octubre de 2010). *Plantas Hidroeléctrica*. Recuperado el 24 de Agosto de 2016, de Planta Hidroeléctrica de Vórtice: http://www.hidroenergia.net/index.php?option=com_content&view=article&id=103:planta-hidroelectrica-de-vortice&catid=35:innovaciones&Itemid=63
- Sebastian, S. (25 de Enero de 2012). *Universidad de país Vasco*. Recuperado el 29 de Julio de 2016, de <http://www.ehu.eus/inwmooqb/asignaturas/Mecanica%20de%20fluidos/APUNTES%20DE%20MF%202011-12.pdf>
- Stiftung KEV. (2011). *Energía hidroeléctrica Schofland*. Recuperado el 15 de Junio de 2016, de <http://www.stipgtung-kev.ch/it/riferimenti/energia-idroelettrica.html>
- Toba, A. (Dirección). (2015). *Tutorial ANSYS Workbench Estrategias de Mallado I* [Película].

Vázquez, Jesús Sánchez. (Septiembre de 2004). *Biblioteca Universidad de Sevilla*. Recuperado el 10 de 07 de 2016, de Simulación numérica directa en paralelo de la ecuaciones de Navier-Stokes en flujos con capa límite desprendida. Aplicaciones en instalaciones deportivas con gradas cubiertas:
<http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/3718/direccion/Parte+I%252F>

Wasserwirbe. (31 de Octubre de 2015). *genossenschaft*. Recuperado el 22 de Junio de 2016, de <http://gwwk.ch/about/main-message/>

Wikipedia. (29 de Septiembre de 2016). *Wikipedia*. Recuperado el 01 de Agosto de 2016, de Wasserwirbelkraftwerk:
<https://de.wikipedia.org/wiki/Wasserwirbelkraftwerk>

ANEXOS



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

CARRERA DE INGENIERIA ELECTROMECAÁNICA

CERTIFICACIÓN

Se certifica que el presente trabajo fue desarrollado por los señores:
JONATHAN ALEXIS HARO VALLADARES y **EDISON FABRICIO SANAGUANO JIMÉNEZ**.

En la ciudad de Latacunga, a los **06 días del mes de noviembre del 2016**.

Ing. Wilson Sánchez
DIRECTOR DEL PROYECTO

Aprobado por:

Ing. Katya Torres
DIRECTORA DE CARRERA

Dr. Rodrigo Vaca Corrales
SECRETARIO ACADÉMICO