ANÁLISIS DEL IMPACTO EN LA VARIACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DE CANALES DE TURBINAS DE VÓRTICE MEDIANTE ANSYS CFX

DEIVID ALBERTO BONILLA CORREA
NICOLÁS ESTIBEN CALDERÓN REYES

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS
FACULTAD TECNOLÓGICA
TECNOLOGÍA MECÁNICA
BOGOTÁ D.C.
2019

ANÁLISIS DEL IMPACTO EN LA VARIACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DE CANALES DE TURBINAS DE VÓRTICE MEDIANTE ANSYS CFX

DEIVID ALBERTO BONILLA CORREA
NICOLÁS ESTIBEN CALDERÓN REYES

MONOGRAFÍA PARA OPTAR AL TÍTULO DE TECNÓLOGO EN MECÁNICA

YISSELLE ACUNA HEREIRA

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS
FACULTAD TECNOLÓGICA
TECNOLOGÍA MECÁNICA
BOGOTÁ D.C
2019

NOTA DE ACEPTACIÓN

_____

_____

_____

_____

_____

_____

Firma del jurado

_____

Firma del jurado

Bogotá D.C

CONTENIDO

Pág.

LISTA DE FIGURAS 6
RESUMEN 9
1. INTRODUCCION 12
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 13
3. ESTADO DEL ARTE 15
4. JUSTIFICACION 23
5. OBJETIVOS 24
5.1 OBJETIVO GENERAL 24
5.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS 24
6. MÁQUINAS HIDRAULICAS 25
6.1 CLASIFICACIÓN 25
6.1.1 Turbomáquinas 25
6.1.2 Máquinas de desplazamiento positivo 25
6.2 TURBINAS 26
6.3 TEORÍA DE LOS VÓRTICES 29
6.3.1 Definición de vórtice 29
6.3.2 Vórtices forzados 29
6.3.3 Vórtices libres 30
7. ANSYS CFX 34
7.1 ¿QUÉ ES ANSYS? 34
7.2 ¿QUÉ ES ANSYS CFX? 34
7.3 FUNCIONAMIENTO DE ANSYS CFX 34
7.3.1 Software de generación de geometría 34
7.3.2 Software de generación de malla 34
7.3.3 Ansys CFX-Pre 35
7.3.4 Ansys CFX-Solver 35
7.3.5 Ansys CFX- Post 35
7.3.6 Modelo matemático CFX 36
7.4 ¿QUÉ ES ANSYS WORKBENCH? 37
7.5 METODOLOGÍA DE ANSYS WORKBENCH 38
7.5.1 Geometry 38

7.5.2 Mesh 38
7.5.3 Setup 40
7.5.4 Solution 41
7.5.5 Results 42
8. MODELOS DE TURBULENCIA EN CFD 43
8.1 CLASIFICACIÓN DE LOS MODELOS DE TURBULENCIA 43
8.1.1 RANS (Reynolds Averaged Navier- Strokes) 43
8.1.2 DNS (Direct Numerical Simulation) 46
8.1.3 SRS (Scale Resolving Simulation) 46
8.1.3.1 LES (Large Eddy Simulation) 47
8.1.3.2 DES (Detached Eddy Simulation) 48
8.2 SELECCIÓN DEL MODELO DE TURBULENCIA 48
9. METODOLOGÍA 49
9.1 DEFINICIÓN DE GEOMETRÍA 49
9.2 DEFINICIÓN DE PARÁMETROS 49
9.2.1 Celda Geometry: 49
9.2.2 Celda Mesh 49
9.2.3 Celda Setup: 55
9.2.4 Celda Solver: 67
9.2.5 Celda Results: 68
10. DESARROLLO DE LA PROPUESTA 78
10.1 SELECCIÓN DEL MODELO DE REFERENCIA Y VALIDACIÓN 78
10.2 VARIACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS: CAMBIO DE DIAMETRO 82
10.3 VARIACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS: CAMBIO DE DIAMETRO 84
10.4 ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS 89
9.4.1 Cuenca de fondo plano: 91
9.4.2 Cuenca de fondo cónico: 97
11. CONCLUSIONES 105
12. RECOMENDACIONES 107
13. BIBLIOGRAFÍA 108
13.1 REFERENCIAS FIGURAS 111

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.Resultados simulación turbina vertical....16
Figura 2.Simulación del flujo hidrodinámico con el rodete posicionado....17
Figura 3.Caso de estudio 2....18
Figura 4.Caso de estudio 3....18
Figura 5. Perfil de velocidad en el sistema....19
Figura 6. Vórtice formando un núcleo de aire completo....20
Figura 7.Simulacion del flujo en cuenca de fondo cónico....21
Figura 8.Simulación del flujo en cuenca cilíndrica....21
Figura 9.Clasificación de las turbinas....26
Figura 10.Flujo en turbina GWVPP....27
Figura 11.Turbina GWVPP de flujo axial....28
Figura 12.Turbina GWVPP de flujo tangencial....28
Figura 13.Tipos de vórtices forzados....29
Figura 14.Tipos de vórtices libres....30
Figura 15.a) Vórtice forzado b) Vórtice libre o espontaneo....32
Figura 16.Diagrama de flujo de ANSYS CFX....36
Figura 17.Ansys Workbench....37
Figura 18.Estado de celda....37
Figura 19.Importación de geometrías....38
Figura 20.Hexaedros, tetraedros y prismas....38
Figura 21.Comparación entre tetraedros y hexaedros....39
Figura 22.Ubicación de criterios de calidad de malla....40
Figura 23.Criterio de evaluación de malla....40
Figura 24.Celda Setup....41
Figura 25 Celda de solución....42
Figura 26.Celda de resultados....42
Figura 27.Comparación entre modelo LES y RAMS....47
Figura 28.Metodología: Importación de Geometría....49
Figura 29. Metodología: Asignación de nombres....50
Figura 30.Metodología: Lados principales....50
Figura 31.Metodología: Selección de método....51
Figura 32.Metodología: Tamaño de elemento....52
Figura 33.Metodología: Malla generada....52
Figura 34.Metodología: Orthogonal Quality....53
Figura 35.Metodología: Tabla de calidad de malla bajo criterio de ortogonalidad....53
Figura 36.Metodología: Skewness....54
Figura 37.Metodología: Tabla de calidad de malla bajo criterio de oblicuidad....54
Figura 38.Metodología: Definición de fluidos....55
Figura 39.Metodología: Buoyonant....57
Figura 40.Metodología: Homogeneous model....57
Figura 41.Metodología: Modelos de turbulencia....58

Figura 42.Metodología: Fluid Pair Models 59
Figura 43.Metodología: Basic Settings Inlet.....60
Figura 44.Boundary Details Inlet.....61
Figura 45.Metodología: Fluid Values Inlet.....61
Figura 46.Metodología: Visualización de Inlet 62
Figura 47.Metodología: Basic Settings Opening 62
Figura 48.Metodologia: Boundary Details Opening.....63
Figura 49.Metodología: Fluid Values Opening 63
Figura 50.Metodología: Visualización de Opening.....63
Figura 51.Metodología: Basic Settings Wall 64
Figura 52.Metodología: Boundary Details Wall.....64
Figura 53.Metodología: Basic Settings Outlet.....65
Figura 54.Metodología: Boundary Details Wall.....65
Figura 55.Metodología: Visualización de Outlet.....66
Figura 56.Metodología: Solver Control 67
Figura 57.Metodología: Define Run 67
Figura 58.Metodología: Ubicación de herramienta Contour.....68
Figura 59.Metodología: Ubicación de Contour.....68
Figura 60.Metodología: Definición de variable de Contour 69
Figura 61.Metodología: Visualización de Contour.....69
Figura 62.Metodología: Ubicación de herramienta Isosurface.....70
Figura 63.Metodología: Definición de variable principal Isosurface 70
Figura 64.Metodología: Habilitación de variable secundaria Isosurface 70
Figura 65.Metodología: Definición de variable secundaria Isosurface.....71
Figura 66.Metodología: Visualización de Isorsuface.....71
Figura 67.Metodología: Ubicación de herramienta Contour.....72
Figura 68.Metodología: Selección punto de inicio Streamline 72
Figura 69.Metodología: Definición de variable Streamline y número de elemento 73
Figura 70.Metodología: Visualización de Streamline 73
Figura 71.Metodología: Ubicación de herramienta Plane 74
Figura 72.Metodología selección de plano 74
Figura 73.Metodología: Habilitación y definición de variable Plane 75
Figura 74.Metodología: Visualización de Plane 75
Figura 75.Metodología: Ubicación de herramienta Volume Rendering.....76
Figura 76.Metodología: Definición de variable y transparencia Volumen Rendering 76
Figura 77.Visualización de Volumen Rendering 77
Figura 78.Plano del modelo de referencia 78
Figura 79.Modelo CAD de referencia.....78
Figura 80.Validación de resultados.....79
Figura 81.Distribución de la presión en el sistema.....80
Figura 82.Vista de perfil de la distribución de la presión.....81
Figura 83.Vista en corte (izquierda) y Streamline (derecha) del vórtice.....81
Figura 84.Distribución de velocidades en vista de corte fondo plano 82
Figura 85.Distribución de velocidades en vista superior fondo plano 83

Figura 86.Streamline cuenca de 350mm 84
Figura 87. Diseño modificado 85
Figura 88.Vista en corte (izquierda) y Streamline (derecha) del vórtice de cuenca de fondo cónico.....85
Figura 89. Distribución de la presión cuneca fondo cónico.....86
Figura 90.Excentricidad del vórtice con respecto al centro del desagüe 87
Figura 91. Distribución de velocidades en vista de corte fondo cónico.....87
Figura 92.Distribución de velocidades en vista superior fondo cónico.....88
Figura 93.Streamline cuenca (350mm).....89
Figura 94.Altura vórtice diámetro 100mm (izquierda) y 350mm (derecha) 90
Figura 95.Rotación del fluido de choque diámetro (150mm) 91
Figura 96.Rotación del fluido de choque diámetro (350mm) 91
Figura 97.Distribución de la velocidad en la salida (100mm).....92
Figura 98.Velocidades de trabajo de turbina (300mm) 93
Figura 99 Velocidad del agua (100mm-izquierda) y Velocidad del agua (150mm-derecha).....94
Figura 100.Distribución de la presión (100mm) y distribución de la presión (350mm) 95
Figura 101.Distribución de la presión en el desagüe (100mm).....96
Figura 102.Distribución de la presión en el desagüe (250mm).....96
Figura 103.Vórtice en cuenca con fondo cónico (150mm).....97
Figura 104.Vórtice en cuenca con fondo cónico (300mm).....97
Figura 105.Velocidad de trabajo cuenca fondo cónico (250mm) 98
Figura 106.Velocidad del agua fondo cónico (100mm).....99
Figura 107.Velocidad del agua fondo cónico (150mm).....99
Figura 108.Distribución de la presión en las paredes fondo cónico (100mm).....100
Figura 109.Distribución de la presión en las paredes fondo cónico (250mm).....100
Figura 110.Distribución de la presión en la salida fondo cónico (100mm) 101
Figura 111.Distribución de la presión en la salida fondo cónico (250mm) 102
Figura 112.Dinámica de cuenca de fondo cónico (100mm).....102
Figura 113.Comparación cuenca de fondo plano (100mm y 300mm) 103
Figura 114.Comparación cuenca de fondo cónico (200mm y 250mm).....104

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Clasificación de las turbinas según su potencia eléctrica 26
Tabla 2.Densidad del aire en función de la temperatura.....56
Tabla 3.Tabla de tensión superficial del agua.....58
Tabla 4.Velocidad de entrada recomendada. 60
Tabla 5.Velocidades de salida del Informe. 79
Tabla 6.Velocidades máximas a la salida modelos fondo plano. 83
Tabla 7.Velocidades máximas salida modelo de fondo cónico. 89
Tabla 8.velocidades de trabajo modelo de fondo plano. 93
Tabla 9.Valores de presión fondo modelo fondo plano. 95
Tabla 10.Velocidades de trabajo modelo fondo cónico.....98
Tabla 11.Presiones en el fondo modelos de fondo cónico.....101

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1 31
Ecuación 2 31
Ecuación 3 31
Ecuación 4 32
Ecuación 5 32
Ecuación 6 33
Ecuación 7 36

RESUMEN

Palabras clave: turbinas, simulación, vórtice, CFD.

En el presente documento se muestra el proceso de desarrollo del trabajo de grado para optar por el título de tecnólogo mecánico. Empezando por una breve introducción donde se presenta la energía hidráulica como una alternativa de obtención de energía enfatizando en las plantas hidroeléctricas GWVPP. Luego se expone la importancia de la generación de energía limpia en el contexto ambiental y social actual del planeta. Después se hace una reseña de los diferentes trabajos e investigaciones en el campo de las plantas hidroeléctricas GWVPP y la utilización de software CAE en el estudio de fenómenos hidráulicos. Posteriormente expondrán los conceptos básicos que involucran las maquinas hidráulicas, los fenómenos hidráulicos como son los vórtices y finalizando con el funcionamiento del software CAE empleado para este trabajo (Ansys CFX) entre otros conceptos. Más adelante se podrá observar el proceso de realización de las simulaciones desde la selección del modelo de referencia, pasando por el proceso enmallado y de asignación de los parámetros y las condiciones de borde hasta la visualización de resultados y su posterior análisis y comparación para finalizar unas conclusiones y recomendaciones finales resultado de este proceso de estudio.

1. INTRODUCCION

En el campo de la producción de energía eléctrica, la hidroeléctrica se posiciona como uno de los métodos de obtención más limpios que existe. Tradicionalmente se aprovecha la energía potencial presente en grandes embalses y presas de agua, sin embargo la construcción de estas plantas representa en ocasiones un gran reto de ingeniería debido a las condiciones medioambientales del lugar de su construcción, lo que acarrea sin lugar a dudas una fuerte inversión y sin mencionar el impacto ambiental que involucra interrumpir el ciclo natural del agua de los ecosistemas aledaños, por esta razón la ingeniería se ha propuesto buscar nuevas alternativas para la obtención de energía hidroeléctrica. Las micro centrales hidroeléctricas se han popularizado en los últimos años, ya que estas por el contrario utilizan la energía cinética de pequeños ríos sin necesidad de interrumpir su cauce y en comparación son mucho más económicas y pequeñas, lo que permite su construcción en zonas muy apartadas de la ciudad, como pueblos y aldeas donde no hay acceso a la energía eléctrica.

Las centrales hidroeléctricas GWVPP por sus siglas en inglés Gravitational Water Vortex Power Plant (Planta de energía de vórtice de agua gravitacional) son un tipo especial de micro central hidroeléctrica, inventada por el ingeniero austriaco Franz Zotlöterer, esta planta produce energía mediante la transformación de la energía cinética presente en los vórtices. El funcionamiento de esta planta consiste en la desviación de una pequeña parte del caudal de un río, el flujo pasa a través de un canal hasta llegar a una cuenca donde el fluido empieza a rotar formando un vórtice donde la turbina ubicada en la sección circular de la cuenca recibe la energía y finalmente el flujo regresa al cauce original del río.

Este tipo de centrales hidroeléctricas representan una alternativa bastante prometedora ya que en sus primeras construcciones solo requirieron aproximadamente la mitad de la inversión que normalmente se emplea en la construcción de plantas tradicionales, produciendo 50.00kW/h en su primer año de operación (ZOTLÖ TERER, sf).

Por esta razón los ingenieros se han dedicado a estudiar este tipo de centrales hidroeléctricas y su fiabilidad para su implementación en zonas sin acceso a la energía eléctrica. Una de las herramientas más empleadas para sus estudios es el software CAE Ansys. Ansys CFX es un módulo del software CAE Ansys que permite estudiar fenómenos relacionados a la mecánica de fluidos utilizando las ecuaciones de Navier-Stokes y llegando a su resolución mediante elementos finitos.

En este trabajo se utilizará el software Ansys para hacer un análisis de como la variación de ciertas características geométricas en los canales plantas GWVPP afecta los valores de velocidad y presión en el recorrido del fluido evidenciando la metodología y los pasos realizados para la ejecución exitosa de las simulaciones.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En las últimas décadas la demanda energética de las grandes ciudades ha aumentado significativamente, debido a que el mundo experimenta en la actualidad una nueva revolución tecnológica, dicha revolución cambio para siempre la vida de los humanos, pero es imprescindible que la masificación de la nuevas tecnologías sea respaldada por fuentes de energía cada vez más potentes representando así uno de los grandes desafíos de la ingeniería moderna; pero aun hoy en día, zonas de Latinoamérica y Asia el acceso a la energía eléctrica es precario o inexistente. Es el deber de la ingeniería es no solo ocuparse de los problemas energéticos de las grandes urbes, sino también centrar su atención en solucionar los problemas de estas comunidades vulnerables, brindarles las mismas condiciones de acceso a la energía eléctrica y hacerlos parte de esta revolución tecnológica.

Por otro lado, no es un secreto que el continuo uso de combustibles fósiles ha creado una problemática ambiental muy seria, según indicó la OMN (Organización mundial de meteorología) “2016 fue un año extremo para el clima mundial y se trata del año más caluroso del que se tengan datos”, dijo el Secretario General de la OMM, Petteri Taalas. No obstante, las temperaturas no son sino un aspecto de la nueva realidad” (Organización meteorológica mundial, 2017). Dado esto es de vital importancia implementar fuentes de energía sustentables que ayuden a lidiar con esta problemática, iniciativas que no dañen el ecosistema y que a su vez puedan dar la posibilidad de mantener una calidad de vida digna en términos energéticos.

Colombia es el segundo país del mundo con la riqueza hídrica más grande, cuenta con varios complejos naturales para la generación de agua, territorios fundamentales en el ciclo de este elemento, que se conectan con bastas carreteras fluviales que en algún punto convergen en algún rio aún más grande. La producción por energía hidráulica es uno de los pilares fundamentales de la demanda energética en Colombia, hidroeléctricas como la hidroeléctrica de Guatapé en el departamento de Antioquia, la central hidroeléctrica de Chivor en Boyacá, la central hidroeléctrica San Carlos de Antioquia, entre otras cubren una parte significativa de la demanda energética de Colombia. El problema de estos complejos de generación eléctrica es que requieren de una gran inversión por parte del estado, sea para su construcción o mantenimiento para mantener sus condiciones normales de funcionamiento y sobretodo estas implican un infarto a lo que refiere al ciclo del agua, ya que el agua es retenida de forma masiva, dañando las biósferas aledañas, Colombia es el país con más riqueza biología del mundo ya que la diversidad de su geografía así lo permite, es inapropiado no considerar esto cuando se busca generar energía de forma limpia, dado que las actividades energéticas del hombre no tienen por qué afectar la calidad de vida de las especies que habitan un territorio.

Las herramientas computacionales CFD, facilitan el proceso de análisis para diversos tipos de fenómenos y el estudio de la viabilidad para implementar tecnologías que sean competitivas ante las fuentes tradicionales.

Las plantas hidroeléctricas GWVPP (Gravitation water vortex power plant) plantean un esquema de generación de energía inclusive más limpio que las centrales hidroeléctricas tradicionales, estas a comparación no retienen agua, es por ello que la implementación de estas turbinas debe de ser de gran importancia para un país como Colombia. El potencial principal de estas turbinas es la generación de energía eléctrica en zonas de difícil acceso.

Adicional esto, es un tema aun no abordado por parte de la universidad y con muchas posibilidades, este trabajo espera servir de base para otros proyectos de estudiantes de la universidad que vayan por esta misma línea de investigación.

3. ESTADO DEL ARTE

La utilización de software CAE para el análisis de mecánica de fluidos mediante CFD (dinámica de fluidos computacional) se ha convertido en una opción fascinante para los ingenieros hoy en día debido a la posibilidad de analizar, estudiar y predecir el comportamiento de ciertos fenómenos mediante el modelado virtual, ahorrando tiempo y dinero que una alternativa de construcción de prototipos y pruebas de ensayo y error no contemplan. Razón por la cual la ingeniería ha prosperado en el ámbito del desarrollo de conocimiento e investigación en este campo y así mismo existe una cuantiosa cantidad de información alrededor de este campo.

Aprovechando las facilidades que proporciona el internet se pudo hacer una mesurada investigación en varias bases de datos especializadas en ingeniería y tecnología en torno a contenido relacionado con turbinas hidráulicas, plantas hidroeléctricas y dinámica de fluidos computacional.

Unos de los primeros ítems a tener en cuenta son las condiciones de funcionamiento de la turbina, principalmente los transitorios hidráulicos que en el caso de ser excesivos generan daños en la tubería de impulsión o en la turbina hidráulica y por ende es necesario hacer el respectivo calculo. Partiendo de esta premisa un grupo de ingenieros chinos realizaron una simulación en su trabajo “Herramienta básica de modelado y simulación para el análisis de Transitorios hidráulicos en centrales hidroeléctricas” (Hongqing, Long, Nkosinathi, y Zuyi, 2008), basados en datos reales de una central hidroeléctrica típica variando parámetros como presión y sistema de suministro de agua. Concluyendo que este modelo puede ser aplicado a cualquier tipo de central hidroeléctrica y ser útil para diseños preliminares o la evaluación de nuevos proyectos hidroeléctricos.

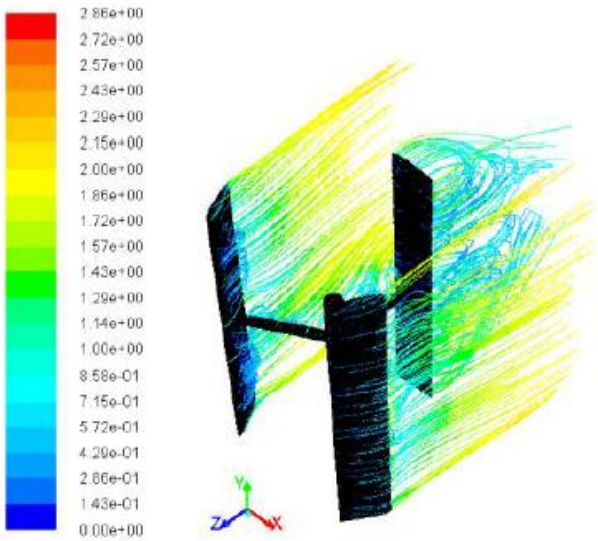
Actualmente se consideran nuevos proyectos en cuanto a la construcción de pequeñas centrales hidroeléctricas en lugares aislados donde se implementan turbinas de corriente fluvial(RCT) o turbinas hidrocinéticas también utilizadas en océanos debido a las fuerzas de marea, no requieren de obras de gran dimensión y tampoco un costo tan elevado como lo sería una central hidroeléctrica ordinaria.
En cuanto a esto “una revisión y simulación de la tecnología basada en análisis de rendimiento de la turbina de corriente fluvial” (Khan, Iqbal y Quaicoe, 2007) fue un estudio realizado del comportamiento de varios tipos de rotores de RCT y dispositivos de canalización en entornos fluviales y marítimos teniendo en cuenta la variabilidad del caudal del rio afectado por factores externos como las lluvias y la presencia de objetos en suspensión tales como piedras o peces. Como resultado se llegó a la deducción que para la implementación de este tipo de proyectos es más apropiado el uso de turbinas de ejes verticales considerando que estas proponen menos desafíos de diseño y tienen la posibilidad de acoplar el generador

sobre el nivel del agua donde el rotor Darrieus de eje vertical es aparentemente el más conveniente.

Uno de los tantos proyectos de construcción de micro centrales hidroeléctricas que están en fase de estudio es “Modelo de simulación de la turbina Darrieus utilizando el software CFD (Dynamic Fluid Computacional) en el distrito Bedono Village de Demak” (Margiantono y Nurhayati, 2017) , donde se habla del levantamiento de una planta de energía mediante la fuerza de marea en un poblado costero aislado llamado Baldono en el distrito de Demak en Indonesia como una opción para proporcionar energía eléctrica limpia ya que la gran mayoría del suministro energético está dado por combustibles fósiles.

Para el estudio de la viabilidad del proyecto se realiza una simulación mediante CFD de una turbina Darrieus tipo H llamada NACA0018 desarrollada por NACA (National Advisory Committee for Aeronautics) especial para aplicaciones de turbinas marinas. La simulación se realiza mediante el modelado de algunos parámetros de la turbina, tales como diámetro y la longitud de la hoja y así mismo la medición de la velocidad de la corriente cada 2 horas

Figura 1.Resultados simulación turbina vertical. (Margiantono y Nurhayati, 2017)



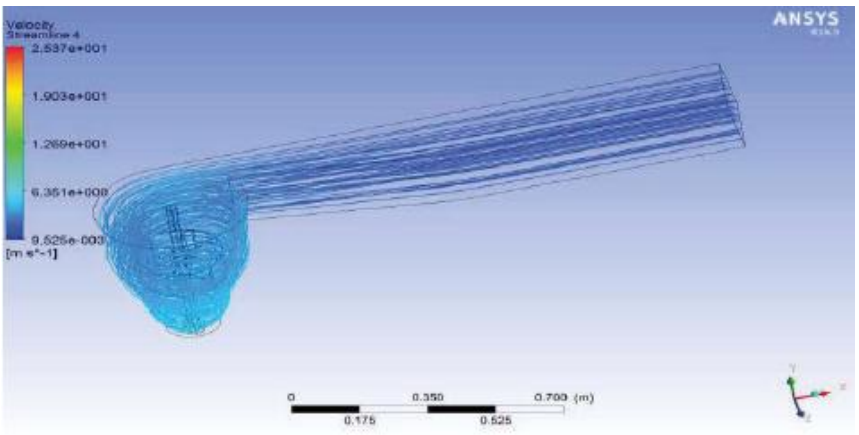
Con los resultados obtenidos de la simulación se determinaron las velocidades máximas y mínimas a lo largo del día y se concluyó que las mareas suministraban la suficiente velocidad para hacer que la turbina funcione normalmente incluso en condiciones donde la velocidad es mínima

La implementación de este tipo de plantas hidroeléctricas en los últimos años alrededor del mundo ha sido intensivo, existen decenas de miles de construcciones de este tipo solo en China y en un gran numero en países como Nepal, Sri Lanka, Pakistán, Vietnam, Perú y Norte América, sin embargo más recientemente se ha estudiado la posibilidad de desarrollar un método de generación de energía empleando vórtices de flujo de agua y aplicar esta tecnología a las plantas hidroeléctricas llamadas centrales eléctricas de vórtice de agua por gravedad (GWVPP).

Las GWVPP consisten en un canal, una estructura base y una turbina donde el flujo de agua pasa a través de del canal y entra a una base redonda (cuenca) donde se empiezan a formar vórtices que después pasara a través del rodete de la turbina generándose energía eléctrica.

En materia de estas hidroeléctricas se encuentran diversos estudios que buscan la optimización de este tipo de plantas mediante simulación como por ejemplo “Investigación Computacional y Experimental de rodete para planta de energía de vórtice de agua gravitacional” (Dhakal et al., 2017) donde se ensaya la geometría de rodete más eficiente para la aplicación en este tipo de entorno usando ANSYS CFX y validando los resultados con una prueba experimental. Se evalúan tres tipos de rodete donde como resultado de la simulación se resuelve que la geometría más adecuada corresponde a la de perfiles curvados con una eficiencia del 82.4% en contraste con los resultados que arrojaron las otras geometrías que arrojaron eficiencias del 43% al 63%. Luego se realizan las pruebas experimentales obteniendo un valor del 71% para el rodete más eficiente y se concluye que el margen de error entre la simulación y la prueba experimental es aceptable.

Figura 2.Simulación del flujo hidrodinámico con el rodete posicionado. (Dhakal et al., 2017)



Estos tipos de centrales están diseñadas para funcionar en condiciones de cabeza de agua entre los 0.5 y 3 metros no requiere de depósitos de almacenamiento de agua y se pueden ubicar en cualquier parte del rio.

La aparición de este relativamente nuevo modelo de planta hidroeléctrica ha despertado el interés de los ingenieros y por ende se han realizado una gran cantidad de estudios en materia de cómo aumentar la eficiencia de este tipo de técnicas y naturalmente uno de los factores más importantes es la formación del vórtice. Basados en esta idea ingenieros del departamento de ingeniería mecánica de la universidad Khon Kaen en Tailandia realizaron un estudio llamado" Diseño Preliminar de un Vortex Pool para Generación eléctrica" (Wanchat y Suntivarakorn, 2010) mediante Ansys CFX. En este estudio se contemplan tres casos diferentes; utilizando una cuenca cilíndrica común, una geometría completamente rectangular y una cuenca cilíndrica con una placa de inclinación a 45 grados. Finalmente se concluye que el caso más eficiente es el último ya que el factor de inclinación de la placa induce un efecto de pre-rotación al fluido aumentando los valores de velocidad a la salida de la cuenca.

Figura 3.Caso de estudio 2 (Wanchat y Suntivarakorn, 2010)

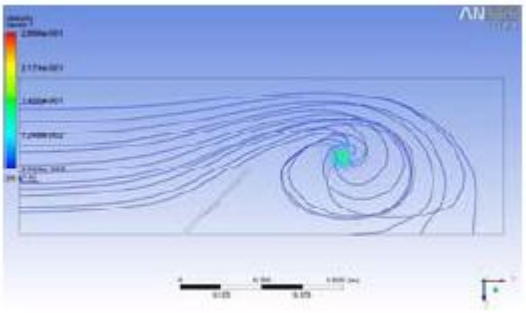
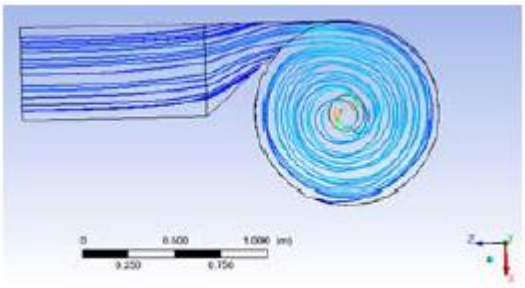


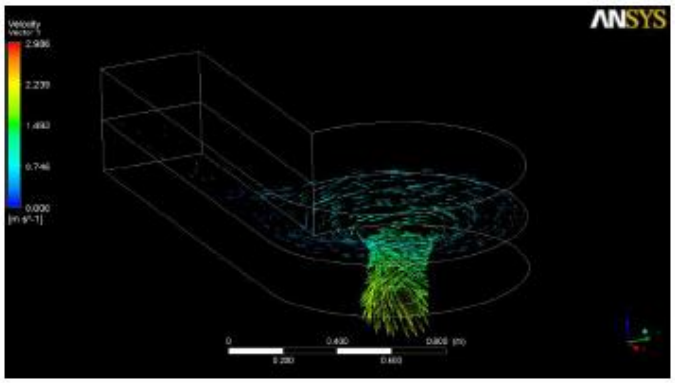
Figura 4.Caso de estudio 3 (Wanchat y Suntivarakorn, 2010)



En otra investigación realizada por ingenieros de la facultad de ingeniería mecánica de la universidad de Malaysia llamada "Validación de CFD para un eficiente sistema de agrupación de vórtices gravitacionales" (Shabara et al.,2015) se hace un estudio mediante Ansys CFX del cambio en la eficiencia de la central hidroeléctrica al

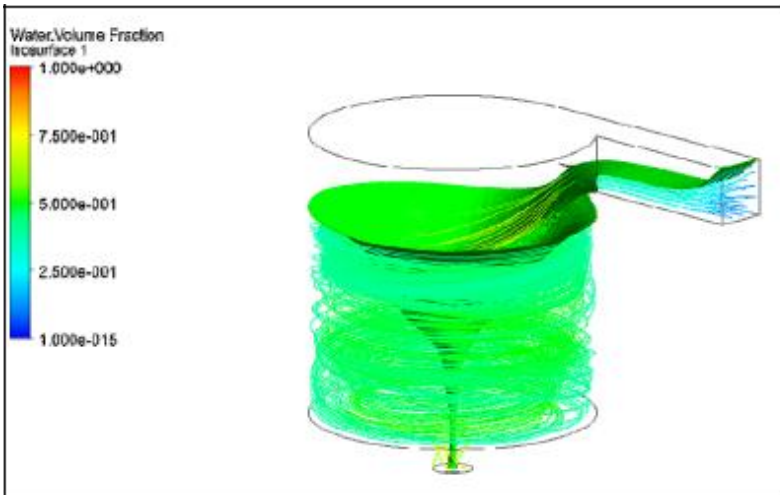
aumentar la altura de la cuenca y posteriormente se hace una validación de los resultados realizando una prueba experimental donde se concluye que no los datos arrojados por el software son consistentes con los obtenidos de forma experimental.

Figura 5. Perfil de velocidad en el sistema (Shabara et al., 2015)



Uno de los fenómenos presentes en estos vórtices hidráulicos es el denominado núcleo de aire que se puede extender desde la superficie del agua hasta el orificio inferior de la cuenca. Este núcleo de aire se manifiesta debido a la succione de aire del orificio inferior y la presión decae por debajo de la presión atmosférica. En un estudio realizado por ingenieros de la Facultad de Ingeniería Mecánica Instituto de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología GIK llamado "Investigación numérica de geometrías de cuenca para la generación de vórtice en una planta de vórtice por agua gravitacional" (Chattha, Cheema y Khan,2017), se analiza mediante simulación como la variación de ciertos parámetros como la velocidad de entrada del agua, los diámetros y la relación de aspecto de la cuenca influyen en este fenómeno de núcleo de aire y de qué manera esto afecta la potencia generada por la turbina. De ahí resulta que al obtener un núcleo de aire completo se logra aumentar la velocidad en el vórtice por lo que se desarrolla una mayor energía cinética y aumenta la potencia generada por la turbina y esto se consigue aumentando el diámetro de salida de la cuenca.

Figura 6. Vórtice formando un núcleo de aire completo (Chattha, Cheema y Khan, 2017)



Todavía cabe señalar que las centrales hidroeléctricas GWVPP presentan ciertas ventajas en contraste con otras plantas del mismo tipo puesto de que se ha comprobado que maximiza la velocidad de flujo en la superficie del agua y disemina los contaminantes del agua.

En otro reciente estudio realizado por ingenieros del Instituto de Ingeniería de la Universidad de Tribhuvan en Nepal llamado “Comparación de lavabos cilíndricos y cónicos con una posición óptima de rodete: Central eléctrica de vórtice de agua gravitacional” (Dhakal et al., 2015), hacen un análisis de como el cambio de geometría de la cuenca del vórtice influye en la eficiencia comparando entre una forma completamente cilíndrica y una cónica utilizando ANSYS CFX .Se realizan dos simulaciones para cada modelo de cuenca independientes entre sí variando ciertos parámetros como velocidad de entrada del agua y haciendo suposiciones tales como viscosidad de 0.001003kg/m-s , densidad 998.2kg/m3 y utilizando el modelo turbulento de RNGk-ε. Finalmente se obtuvo que la cuenca de fondo cónico es mejor en comparación debido a que se determinaron mayores rangos de velocidad lo que incide directamente en la energía eléctrica generada y habría que decir también que con un mayor grado de inclinación de las paredes del cono la velocidad de flujo del vórtice incrementaría.

Figura 7.Simulacion del flujo en cuenca de fondo cónico (Dhakal et al., 2015)

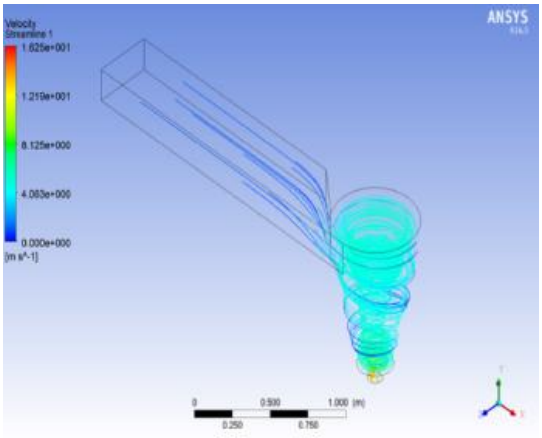
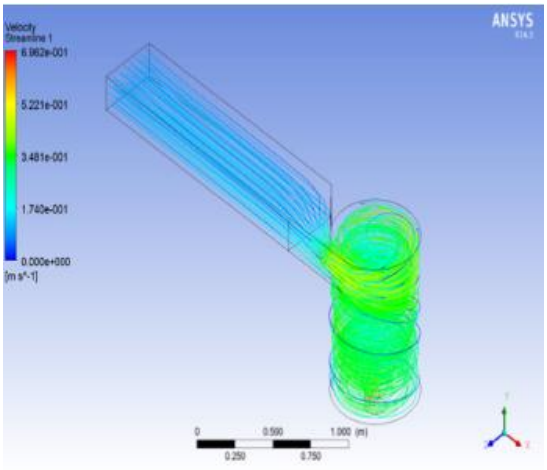


Figura 8.Simulación del flujo en cuenca cilíndrica (Dhakal et al., 2015)



Finalmente en el ámbito de las tesis de grado se encontró un trabajo realizado por Haro Jonathan y Sanaguano Edison de una universidad de las fuerzas armadas de ecuador llamado “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 “(Haro y Sanaguano, 2016) donde utilizan el software Ansys para hacer el estudio preliminar de los esfuerzos a los que puede estar sometido el canal de la turbina y el comportamiento del flujo hidráulico a través de él, para terminar realizan un prototipo a escala donde comparan los resultados del software con los experimentales concluyendo que existe una consistencia en los resultados arrojados por el software.

A pesar de la numerosa cantidad de trabajos, investigaciones y estudios realizados en este campo no se encontró un documento con la metodología empleada para realizar estas simulaciones, un elemento importante y que puede ser un aporte relevante a los estudiantes que quieran involucrarse a este tipo de estudios. Como ya se vio anteriormente Ansys CFX es una herramienta muy poderosa y fiable a la cual se tiene un fácil acceso, por lo cual uno de los enfoques de este proyecto es el de realizar una metodología donde se puedan observar los pasos a seguir para realizar este tipo de simulaciones usando el módulo CFX para fenómenos de mecánica de fluidos.

4. JUSTIFICACION

La ingeniería asistida por computador (CAE) es una herramienta tecnológica de gran utilidad para el diseño en ingeniería desde la aparición de las primeras computadoras. A lo largo de las últimas décadas se han desarrollado tecnologías más sofisticadas en términos de computación que han reducido los costos de hardware y han aumentado la capacidad de las computadoras, lo que ha provocado que este instrumento haya cobrado relevancia cada vez más y se haya convertido en una opción más atractiva y tal vez a futuro indispensable en el proceso de diseño de ingeniería. Ansys es un conglomerado de programas CAE para el diseño, análisis y simulación por elementos finitos, cuenta con etapas de malleo, ejecución y post proceso, lo que permite analizar elementos sometidos a fenómenos físicos como esfuerzos térmicos, fluidos y vibraciones. El módulo de Ansys especializado en el CFD es el denominado Ansys CFX que cuenta con herramientas de modelado, malleo y simulación de fenómenos relacionados a la mecánica de fluidos

La puesta en escena de la planta GWVPP en el territorio colombiano implica algunos retos, ya que los gradientes que presenta cada rio o afluente no van a ser iguales en todos los casos, el software Ansys allí es cuando se hace indispensable, ya que si se varían algunos parámetros dentro del módulo virtual se pueden conseguir resultados muy cercanos a la realidad y realizar un estudio objetivo. Una evaluación realizada con esta herramienta es muy útil si se hace con cuidado. Las comunidades aisladas que no posean el servicio de electricidad se pueden beneficiar con este tipo de turbinas ya que no requieren mantenimiento frecuentemente.

Por lo tanto, es pertinente la elaboración de una metodología para el análisis y simulación de este tipo de turbina, que permita la comparación de distintos tipos de cuenca mediante dinámica de fluidos computacional en Ansys CFX, que sirva como un mecanismo de guía y aprendizaje para el modelado de objetos de este tipo, para estudiantes de la universidad que deseen realizar proyectos relacionados.

5. OBJETIVOS

5.1 OBJETIVO GENERAL

Analizar el efecto de la variación de las características geométricas de la cuenca de una turbina de vórtice mediante Ansys CFX.

5.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Seleccionar los modelos CAD de la cuenca.
- Discretizar los modelos y definir los parámetros de entrada de las simulaciones.
- Realizar las simulaciones y analizar los resultados obtenidos.
- Elaborar un registro en video con fines académicos con la metodología utilizada.

6. MÁQUINAS HIDRAULICAS

6.1 CLASIFICACIÓN

Las máquinas de fluidos son elementos o dispositivos que se caracterizan por trabajar con fluidos para obtener un objetivo haciendo uso de sus propiedades físicas y químicas, estas se clasifican en dos grupos: maquinas hidráulicas y maquinas térmicas. Para fines práctico este trabajo solo hablara de las maquinas hidráulicas.

Las máquinas hidráulicas son dispositivos que su accionar solo compromete las características mecánicas del fluido y su dinámica, la maquinas hidráulicas poseen varias clasificaciones, pero la más usual es: “Según el principio de funcionamiento de la maquina”. En esta clasificación podemos encontrar dos grupos: las turbo máquinas y las máquinas de desplazamiento positivo.

6.1.1 Turbomáquinas

“Las turbomáquinas son mecanismos en los que se produce un intercambio de cantidad de movimiento entre el fluido y la máquina a través de una pieza giratoria, llamada rotor o rodete. El fluido circula de forma continua a través de los canales que forman los álabes del rotor. Las fuerzas son sobre todo de dirección tangencial, por lo que hay un cambio en el momento cinético del fluido cuando atraviesa el rotor, y por ello se transmite un par entre el rotor y el fluido, y un intercambio de energía mecánica” (Robles, 2016).

6.1.2 Máquinas de desplazamiento positivo

“Son mecanismos en los que el intercambio de energía es sobre todo en forma de presión mediante el paso del fluido a través de una cámara de trabajo, en la que entra y sale en un proceso alternativo. El órgano de trabajo es el elemento desplazador y no hay conexión simultánea a través del fluido entre la entrada y la salida. Existe una fuerza entre el fluido y otros órganos móviles que da lugar al intercambio de energía” (Robles, 2016).

6.2 TURBINAS

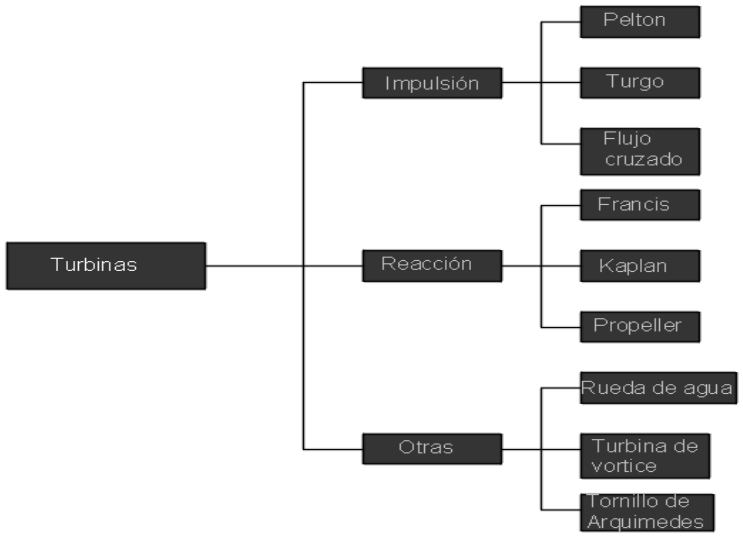
Nuevamente se reducirá el estudio, en este caso solo se enfocará en las turbo máquinas, específicamente en un tipo de ellas: Las turbinas. Las turbinas hidráulicas son dispositivos que intercambian energía mecánica proveniente del fluido y lo transforma en energía eléctrica dada la rotación que produce el fluido en su recorrido por el rodete de la turbina. Las turbinas hidráulicas se pueden clasificar dependiendo de la potencia eléctrica que sean capaces de producir, a continuación, se presenta una imagen con esta clasificación.

Tabla 1 Clasificación de las turbinas según su potencia eléctrica (Benedicto, N. 2015)

Large-Hydro	Más de 100MW
Medium-Hydro	15-100MW
Small-Hydro	1-15MW
Mini-Hydro	100KW-1MW
Micro-Hydro	5KW-100KW
Pico-Hydro	Debajo de 5KW

Las turbinas Micro-hydro y Pico-hydro son turbinas usualmente asociadas con turbinas de rio, estas suelen ir en el orden de máximo hasta 100kW, lo suficiente como para abastecer de energía eléctrica a algunas casas.

Figura 9.Clasificación de las turbinas. (Dhakal et al., 2017)



Las turbinas de interés son las turbinas de vórtice de agua gravitacional, en este tipo turbinas su atractivo principal es que pueden ser empleadas inclusive en pequeños arroyos utilizando el principio de los vórtices.

Esto se logra haciendo una desviación de este fluido mediante canales prefabricados. Con el uso de maquinaria la tierra debe de ser removida para dar lugar a los canales donde el agua correrá, este proceso puede tardar de uno a tres días dependiendo de la dificultad que presente el terreno para excavar. El fluido ingresa al canal cuando se levanta una pared reguladora de caudal recorriéndolo hasta topar con una cuenca en forma de caracol donde el agua adquiere el estado de vórtice, allí aumenta su velocidad el fluido a medida que se va arremolinando, el proceso tiene su punto clave en el Sifón, en este punto es donde el agua hace contacto con el rodete de la turbina y lo empuja provocando que esta adquiera movimiento rotación, el agua luego de haber pasado por la turbina es regresada al rio.

Figura 10.Flujo en turbina GWVPP (Turbulent. 2017)



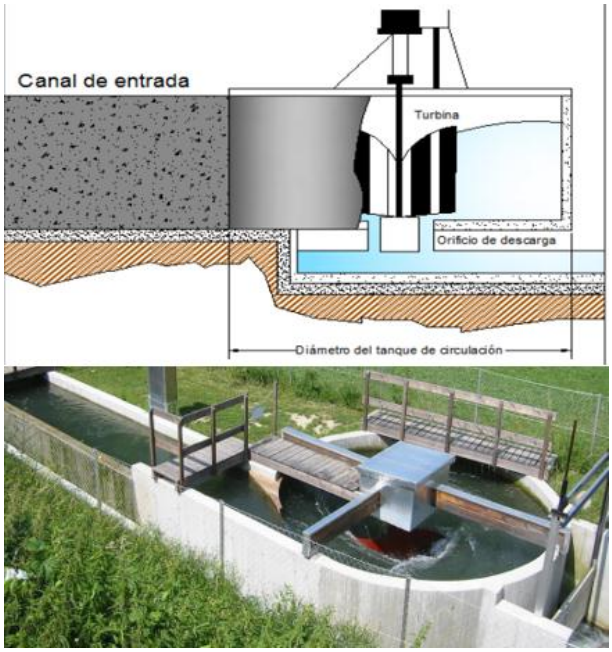
Las turbinas GWVPP utilizan dos diseños de turbina para sustraer la energía cinética del fluido, dichas se diferencian entre sí, tanto en diseño como su ubicación en la cuenca. La primera es una turbina de flujo axial, ubicada en el fondo de la cuenca, justo después de pasar por el sifón, en ella la energía recolectada proviene de la velocidad de la punta o base del vórtice. Al pasar por el sifón inmediatamente se encuentra con la turbina, golpeando sus alabes provocando la rotación de todo el conjunto

Figura 11 Turbina GWVPP de flujo axial (Turbulent. 2017)



El segundo tipo de diseño corresponde a una turbina de flujo tangencial ubicada a la altura media de la cuenca en la región circular, la turbina utiliza la velocidad manifestada en las paredes del vórtice para conseguir rotación, impactando sus alabes de forma tangencial

*Figura 12 Turbina GWVPP de flujo tangencial (*Zotlöterer. 2014)



6.3 TEORÍA DE LOS VÓRTICES

6.3.1 Definición de vórtice

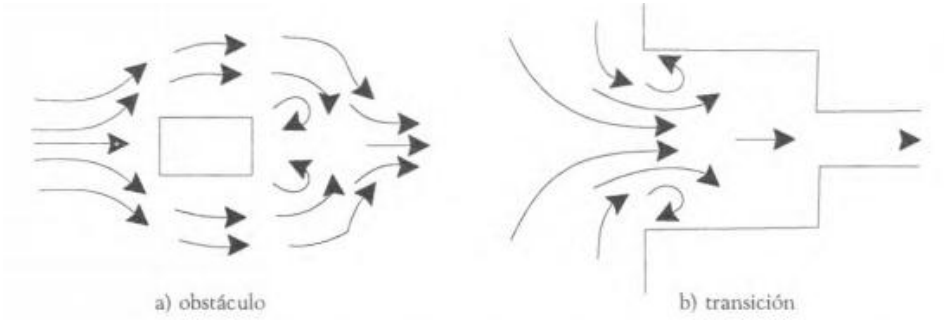
“Un vórtice se manifiesta cuando la masa de un fluido adquiere un movimiento de rotación alrededor de un eje, aparecen diversas fuerzas reales que provocan un gradual hundimiento de la masa del fluido en la zona cercana al eje, produciendo un menisco, en donde la parte central está a menor altura que la parte más alejada del eje” (Manjón et al., 2013)

Los vórtices dados su comportamiento se pueden clasificar en dos tipos: Vórtices forzados y vórtices libres o espontáneos.

6.3.2 Vórtices forzados

“Estos se genera por el contacto entre un fluido real en movimiento y un obstáculo que puede ser una pared fija u otro fluido cuya velocidad sea contraria a la del primero, o simplemente cuya velocidad sea sensiblemente distinta a la del mencionado fluido real. Este caso se presenta cuando una corriente de agua se aproxima a una transición o a cualquier obstáculo que, debido al contacto con este cuerpo sólido, genera una rotación que provoca la formación del fenómeno. Estos vórtices son superficiales y no tienen salida por su p arte inferior como los vórtices libres, en realidad, se trata de depresiones cóncavas que giran en la superficie del agua y su sentido de giro es el que imprime el choque del agua con el obstáculo mencionado.

Figura 13.Tipos de vórtices forzados (Gardea, H. 2001)

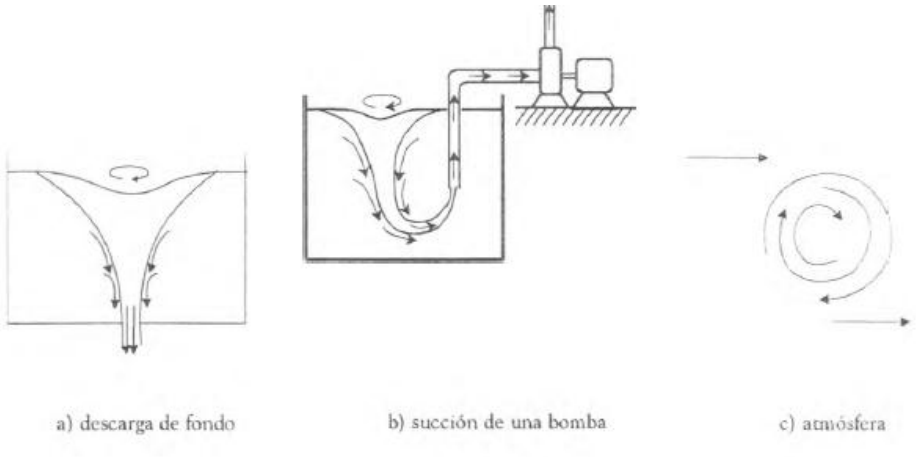


6.3.3 Vórtices libres

El vórtice libre se presenta típicamente sobre una descarga que puede ser “de fondo” como sucede en las tinas de baño o en los lavamanos al vaciarse, cuando el líquido se encontraba originalmente en reposo. U n caso semejante es el del vórtice que se forma debido a la succión provocada en un tanque por la tubería de succión de una bomba.

Para que se forme un vórtice libre debe existir un punto de baja presión que succione el flujo hacia él. Este punto llamado núcleo, es el que en la atmósfera produce un gradiente de presiones que hace que los vientos provenientes de zonas con mayor presión se dirijan hacia él y formen los vórtices que comúnmente llamamos remolinos, o cuando es mayor su magnitud ciclones o tornados. En el caso de los líquidos, la depresión en el núcleo se debe a la succión ya mencionada o a cualquier otro fenómeno físico que produzca una sensible caída de presión. Un ejemplo de lo antes descrito fue lo que observó el Dr. Gabriel Echávez, quien al colaborar con el Dr. Enzo-Levi (1989) en sus investigaciones en el Instituto de Ingeniería de la UNAM, descubrió que, si en un recipiente que contenga un líquido en reposo, se inyecta bajo el agua con un chorro inclinado y orientado hacia el fondo, también aparece un vórtice en la superficie del tanque.” (Gardea, H. 2001)

Figura 14.Tipos de vórtices libres (Gardea, H. 2001)



La ecuación 1 muestra un modelo general que describe el comportamiento de los vórtices. Ésta es la ecuación de Euler.

Ecuación 1

$$-\frac{d}{dr}(p+\gamma\cdot z)=-\rho\frac{V}{2r}$$

Donde:
p: presión sobre la superficie del fluido.
γ: producto de la densidad por la aceleración gravitacional.
z: altura.
ρ: densidad del fluido.
V: velocidad del fluido.
r: distancia al eje de rotación (radio).

A partir de esta ecuación, se llega a dos modelos matemáticos que describen el comportamiento de ambos tipos de vórtices, espontáneos y forzados, mostrados por las Ecuaciones 2 y 3, respectivamente. Éstas muestran una relación entre la altura y el radio.

Ecuación 2

$$z(r)=z_{\infty}-\frac{B^2}{2gr^2}$$

Donde:
$z\infty$: altura máxima del vórtice; corresponde a la altura en la mayor distancia al eje de rotación.
B: constante del modelo.
g: aceleración de gravedad.
r: distancia al eje de rotación (radio)

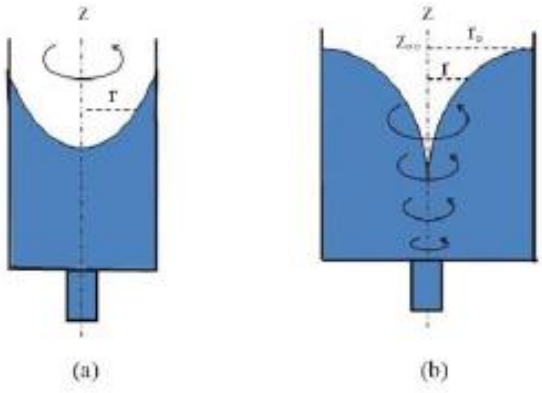
Ecuación 3

$$z(r)=\frac{\omega^2{}_0}{2g}r^2$$

Donde:
ω0: velocidad angular inicial del vórtice.
g: aceleración de gravedad.
r: distancia al eje de rotación (radio).

El comportamiento de los vórtices se puede comparar en la figura 11

Figura 15.a) Vórtice forzado b) Vórtice libre o espontaneo (Arrigada, P. 2014)



Por otro lado, la velocidad angular para un vórtice espontáneo viene dado por la Ecuación 4, y para un vórtice forzado viene dado por la Ecuación 5.

Ecuación 4

$$\omega=\omega_0 \frac{r_0^2}{r^2}$$

Donde:
ω: velocidad angular del vórtice.
ω0: velocidad angular inicial del vórtice.
$r0$: distancia al eje de rotación en el punto más alejado del eje (radio máximo).
r: distancia al eje de rotación (radio).

Ecuación 5

$$\omega=\omega_0$$

Donde:
ω: velocidad angular del vórtice.
ω0: velocidad angular inicial del vórtice.

Esto implica que la velocidad angular para el vórtice espontáneo disminuye conforme se aumenta el radio, por lo que en radios mayores los puntos del fluido giran más lentos. Por otro lado, para un vórtice forzado la velocidad angular es constante en cada punto del fluido, por lo que en todos lados giran a la misma velocidad.

Para el cálculo de la velocidad angular en la superficie del vórtice, se utiliza la Ecuación 6, que relaciona el número de revoluciones por segundo en que un punto del fluido gira con la velocidad angular en ese punto.

Ecuación 6

$$\omega = 2 * \pi * n$$

Donde:
ω: es la velocidad angular.
n: es el número de revoluciones por segundo que un punto gira alrededor del eje.

7. ANSYS CFX

7.1 ¿QUÉ ES ANSYS?

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

7.2 ¿QUÉ ES ANSYS CFX?

Ansys CFX hace parte de las extensiones de estudio que posee Ansys, es un software de análisis y simulación CFD (Computational Fluids Dynamics) que se emplea a lo que refiere a problemas de fluidos, en específico a su desplazamiento o circulación en el sistema propuesto.

7.3 FUNCIONAMIENTO DE ANSYS CFX

ANSYS CFX consta de cuatro módulos de software que toman una geometría y una malla y pasan la información requerido para realizar un análisis de CFD:

7.3.1 Software de generación de geometría

El usuario debe hacer uso de SpaceClaim que es el software CAD que posee Ansys o importar la geometría desde cualquier otro Software CAD (NX, Solid edge, Inventor, etc.) para obtener el diseño que será evaluado.

7.3.2 Software de generación de malla

El usuario con ayuda del módulo de malla de Ansys Workbench del cual se hablará a más adelante, constituirá una malla bajo su criterio.

7.3.3 Ansys CFX-Pre

“Los análisis CFX-Pre consisten en física de flujo, condiciones de contorno, valores iniciales y parámetros de resolución, son también donde se especifica una gama completa de condiciones de contorno, incluidas entradas, salidas y aberturas” (ANSYS academic, 2013).

7.3.4 Ansys CFX-Solver

“CFX-Solver resuelve todas las variables de solución para la simulación para la especificación del problema generado en CFX-Pre.
Una de las características más importantes de ANSYS CFX es su uso de un solucionador acoplado, en el que todas las ecuaciones hidrodinámicas se resuelven como un solo sistema. El solucionador acoplado es más rápido que el solucionador segregado tradicional y se requieren menos iteraciones para obtener una solución de flujo convergente” (ANSYS academic, 2013).

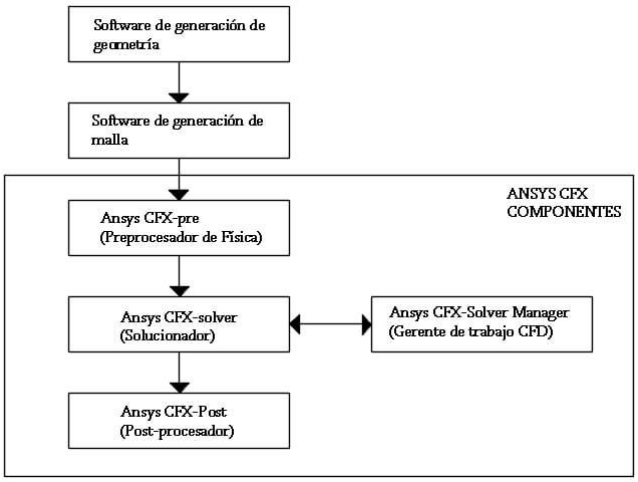
7.3.5 Ansys CFX- Post

“CFD-Post proporciona herramientas gráficas interactivas de post-procesamiento de vanguardia para analizar y presentar los resultados de la simulación ANSYS CFX.

Las características incluyen:

- Post-procesamiento cuantitativo
- La generación de un informe de resultados
- Entrada de línea de comando, archivo de sesión o archivo de estado
- Variables definidas por el usuario
- Generación de una variedad de objetos gráficos donde la visibilidad, la transparencia, el color y la representación de líneas / caras puede ser controlado
- Power Syntax para permitir archivos de sesión completamente programables” (ANSYS academic, 2013).

Figura 16.Diagrama de flujo de ANSYS CFX (ANSYS, Inc. 2015)



7.3.6 Modelo matemático CFX

"El conjunto de ecuaciones que describen los procesos de transferencia de momento, calor y masa se conocen como las ecuaciones de Navier-Stokes. Estas ecuaciones diferenciales parciales se derivaron a principios del siglo XIX y no tienen una solución analítica general conocida, pero se pueden discretizar y resolver numéricamente.

Las ecuaciones que describen otros procesos, como la combustión, también se pueden resolver junto con las ecuaciones de Navier-Stokes. A menudo, se utiliza un modelo aproximado para derivar estas ecuaciones adicionales, siendo los modelos de turbulencia un ejemplo particularmente importante.

Ecuación 7

$$\underset{Inestable}{\frac{\partial}{\partial t}\int_V \rho \emptyset dV} + \underset{Advección}{\oint_A \rho \emptyset V \cdot dA} = \underset{Difusión}{\oint_A \Gamma_\emptyset \nabla \emptyset \cdot dA} + \underset{Generación}{\int_V S_\emptyset dV}$$

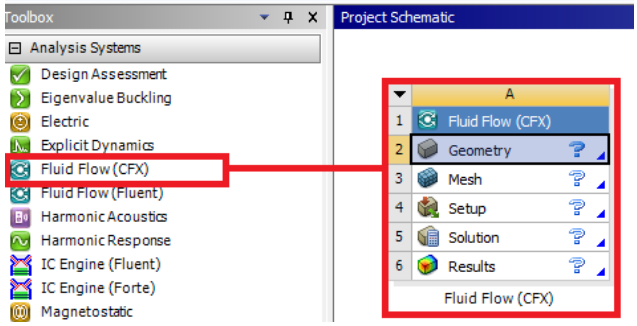
Hay una serie de diferentes métodos de solución que se utilizan en los códigos CFD. La más común, y en la que se basa CFX, se conoce como la técnica de volumen finito.

En esta técnica, la región de interés se divide en pequeñas subregiones, llamadas volúmenes de control. Las ecuaciones están discretizadas y resueltas iterativamente para cada volumen de control. Como resultado, se puede obtener una aproximación del valor de cada variable en puntos específicos en todo el dominio. De esta manera, se deriva una imagen completa del comportamiento del flujo." (ANSYS Inc, 2018)

7.4 ¿QUÉ ES ANSYS WORKBENCH?

Es una herramienta de gestión de proyectos donde se presentan todas las extensiones de Ansys, tales como Ansys Static Structural, Ansys Electric, Ansys Steady State Thermal, Ansys CFX, entre otros de manera gráfica. Cada extensión se encuentra en un módulo, cada uno dividido por cuatro celdas: Geometry, Mesh, Setup, Solution y Results.

Figura 17.Ansys Workbench. (Elaboración propia)



Los módulos de Ansys Workbench trabajan en serie, esto implica que el usuario no puede avanzar a la siguiente celda sin antes haber concluido la actividad anterior y que el software haya revisado y confirmado que no hay ningún problema con la información obtenida. Ansys Workbench en los módulos utiliza una serie de símbolos para indicar al usuario el estado de las celdas como se ve a continuación:

Figura 18.Estado de celda (ANSYS, Inc. 2016)

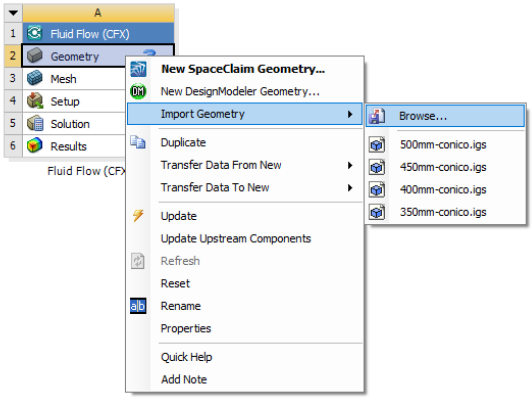
Icono	Significado
	Listo
	Requiere actualizar, los datos de subida han sido modificados
	Requiere actualizar, los datos locales han sido modificados
	Sin cumplirse, No existen datos
	Se requiere atención
	Resolviendo
	Error de actualización
	Actualización interrumpida
	Cambios pendientes, listo pero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

7.5 METODOLOGÍA DE ANSYS WORKBENCH

7.5.1 Geometry

La celda Geometry corresponde al lugar donde el usuario debe seleccionar un sólido de trabajo, para esto el usuario puede usar la matriz de dibujo que posee Ansys (SpaceClaim) o si lo desea puede importarlo desde cualquier software CAD (SolidWorks, Siemens NX, Inventor, Catia, etc.), siempre y cuando el archivo se encuentre en una extensión de dibujo neutra (.IGES, .STEP, .Parasolid) con el fin de que el usuario no encuentre errores a la hora de importarlo al software.

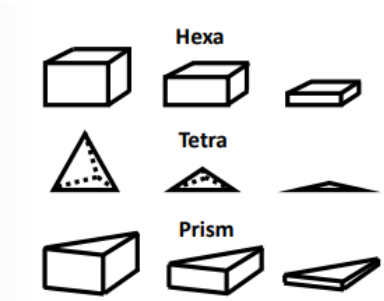
Figura 19.Importación de geometrías (Elaboración propia)



7.5.2 Mesh

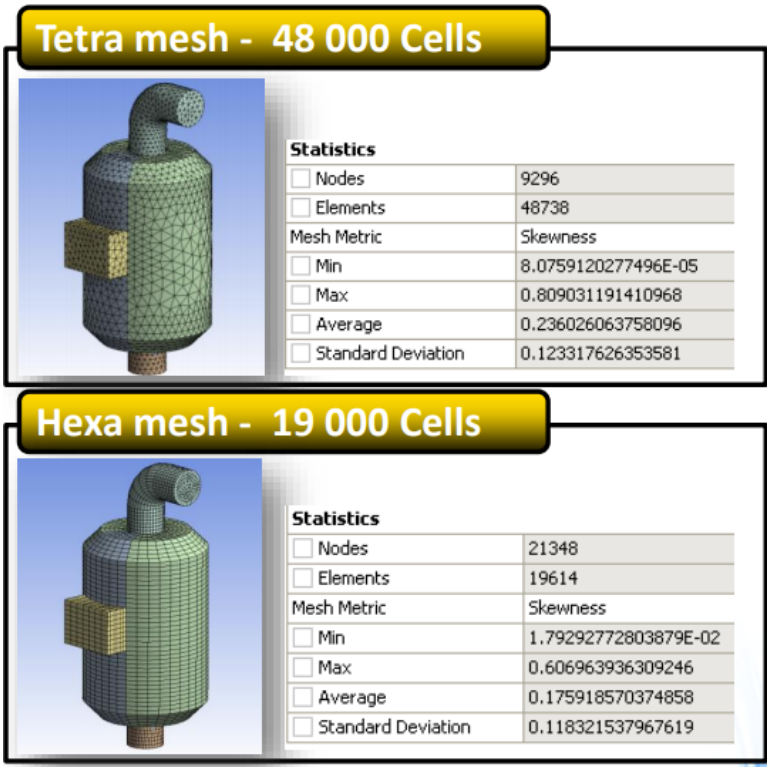
La creación de mallas consiste en la utilización de subvolúmenes o también conocidos como subdominios que imiten la forma de la geometría importada en la celda de Ansys Workbench anterior (Geometry), en otras palabras, a partir de pequeñas secciones construir el sólido de trabajo. Ansys en el área de mallado usualmente en objetos en 3D trabaja con dos figuras geométricas: Hexaedros, tetraedros y prismas.

Figura 20.Hexaedros, tetraedros y prismas (ANSYS, Inc. 2015)



La utilización de cada figura viene condicionada por el tipo de geometría que se planee mallar, ya que no en todas las geometrías es conveniente utilizar Tetraedros, después de todo mientras mayor sea la cantidad de subdominios en la malla, esto representara un costo computacional más alto para la computadora del usuario cuando deba solucionar todo el problema.

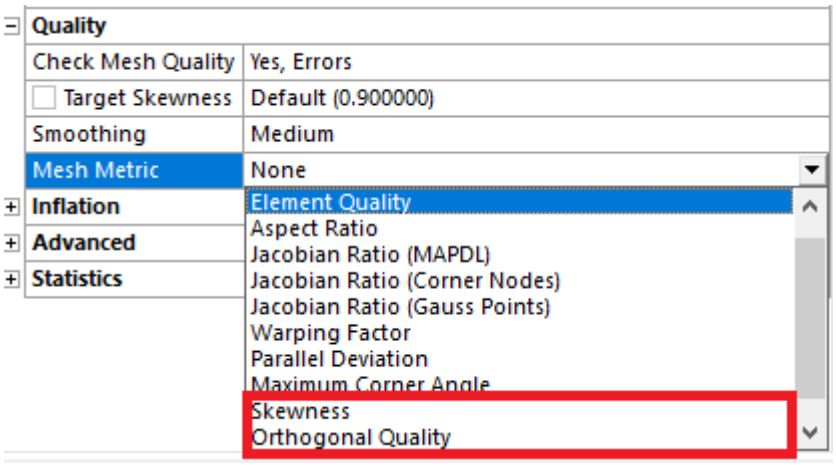
Figura 21.Comparación entre tetraedros y hexaedros (OZEN ENGINEERING.Inc, 2014)



Es necesario aclarar que, así como se debe ser cuidadoso en el número de elementos de la malla, es igual de importante revisar la calidad de la malla con el objetivo de que el análisis a realizar tenga más posibilidad de que converja y que los resultados recogidos tengan la mayor precisión posible. Elementos de mala calidad hacen que los resultados posean un porcentaje de error significativo y haga del estudio algo poco confiable.

En la celda de Mesh el usuario puede ir revisando la calidad de la malla en la pestaña “Quality”, los dos criterios más usados para determinar su calidad son: según su oblicuidad (Skewness) y según su ortogonalidad (orthogonal quality)

Figura 22.Ubicación de criterios de calidad de malla (Elaboración propia)



El criterio de oblicuidad se entiende como que tan deformado se encuentra el elemento respecto a un Angulo de 90° entre sus lados, es debido a lo anterior que mientras sea menor el valor de este criterio la malla tendrá una mejor calidad. Por el contrario, se encuentra el criterio de ortogonalidad de la malla, que evalúa que tan cercano se encuentra cada subdominio a que sus lados formen un ángulo de 90° entre sí. La siguiente figura resume lo anterior:

Figura 23.Criterio de evaluación de malla (ANSYS, Inc. 2015)

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

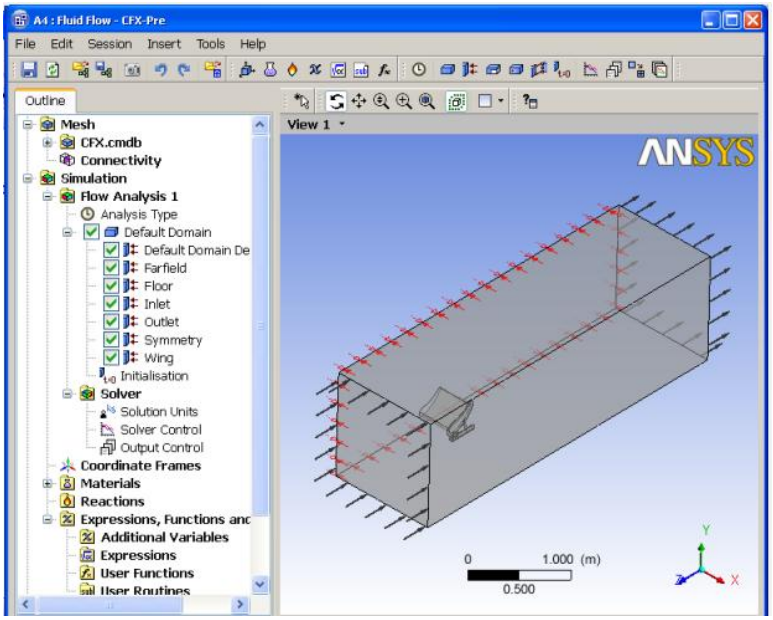
Espectro de la Calidad de la Malla (Ortogonal)

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

7.5.3 Setup

En esta etapa se ingresa los parámetros físicos del fenómeno a evaluar y se relacionan directamente con el sólido en cuestión. Es la etapa donde se definen las entradas, salidas y paredes dentro del sistema. Y definimos que es lo que esperamos de nuestra simulación para luego ser solucionado por la matriz de Ansys.

Figura 24.Celda Setup (Fluid Codes FZ LLE, 2014)



7.5.4 Solution

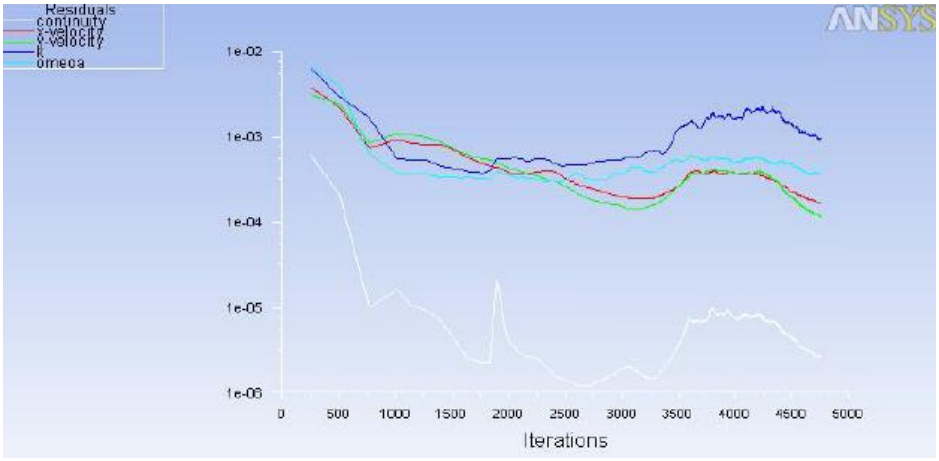
"El componente que resuelve el problema de CFD se llama "Solver". Produce los resultados requeridos en un proceso no interactivo / por lotes. Un problema de CFD se resuelve de la siguiente manera:
Las ecuaciones diferenciales parciales están integradas en todos los volúmenes de control en la región de interés. Esto es equivalente a aplicar una ley de conservación básica (por ejemplo, para masa o impulso) a cada volumen de control. Estas ecuaciones integrales se convierten en un sistema de ecuaciones algebraicas generando un conjunto de aproximaciones para los términos en las ecuaciones integrales.

Las ecuaciones algebraicas se resuelven de forma iterativa. Se requiere un enfoque iterativo debido a la naturaleza no lineal de las ecuaciones, y cuando la solución se aproxima a la solución exacta, se dice que converge. Para cada iteración, se informa de un error o residual como una medida de la conservación general de las propiedades de flujo.

La proximidad de la solución final a la solución exacta depende de varios factores, incluidos el tamaño y la forma de los volúmenes de control y el tamaño de los residuos finales. Los procesos físicos complejos, como la combustión y la turbulencia, a menudo se modelan utilizando relaciones empíricas. Las aproximaciones inherentes a estos modelos también contribuyen a las diferencias

entre la solución CFD y el flujo real. El proceso de solución no requiere la interacción del usuario y, por lo tanto, generalmente se lleva a cabo como un proceso por lotes. El solucionador produce un archivo de resultados que luego se pasa al post-procesador" [12].

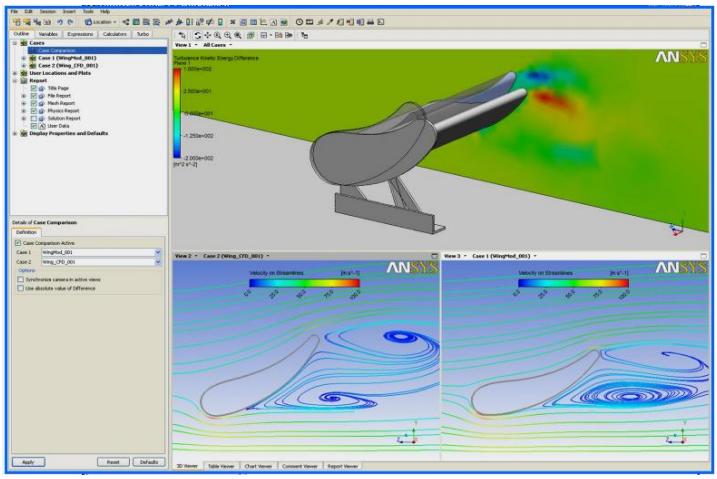
Figura 25 Celda de solución (Ozen engineering Inc, 2014)



7.5.5 Results

El visualizador de resultado es un módulo donde el usuario puede observar los datos obtenidos de una manera visual que va desde la animación de vectores de flujo con su respectiva magnitud, la incidencia del fenómeno a través de todo el dominio estudiado, animaciones y por supuesto gráficos numéricos que representan el fenómeno a lo largo de su recorrido.

Figura 26.Celda de resultados (Fluid Codes FZ LLE, 2014)



8. MODELOS DE TURBULENCIA EN CFD

Como se verá en el siguiente capítulo el proceso de simulación consta de cuatro fases; generación de la geometría y discretización, configuración del modelo físico, resolución y post procesamiento de los datos, sin embargo, la configuración del modelo físico de pende en gran medida del modelo de turbulencia a utilizar puesto que del modelo de turbulencia vienen las ecuaciones que el software CAE tendrá que solucionar.

Los fenómenos de turbulencia se caracterizan por ser fenómenos complejos por esto no existe un modelo absoluto de turbulencia si no varios que varían dependiendo de las variables o detalles específicos que se quieran observar, puede ser resolviendo las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas por Reynolds con modelos para cantidades turbulentas o computándolas directamente. (Sodja, 2007)

8.1 CLASIFICACIÓN DE LOS MODELOS DE TURBULENCIA

Entre los principales criterios para diferenciar los modelos de turbulencia se pueden encontrar: la precisión de los resultados, la gama de datos que se pueden obtener en cuanto los fenómenos inherentes al flujo y el costo computacional y el tiempo que involucra realizar estas simulaciones. Por esto es importante conocer los campos particulares de aplicación de estos modelos para realizar una elección apropiada para el contexto de este trabajo.

Los modelos de turbulencia pueden dividirse en los siguientes tres grandes grupos:

8.1.1 RANS (Reynolds Averaged Navier- Strokes)

Este modelo se basa en realizar un promedio de las variables contempladas en la ecuación de Navier-Strokes. Son los modelos de turbulencia más conocidos y por ende más utilizados por los ingenieros ya que son los que menor costo computacional involucran de forma que utilizarse en ordenadores promedio. La razón principal de que estos sean los modelos más utilizados lo dijo (Ballesteros, 2004)" En aplicaciones ingenieriles, vamos a estar más interesados en los efectos del flujo medio que en los detalles de las fluctuaciones, por lo que se adopta una aproximación estadística, promediando las ecuaciones de conservación ('time-averaging') durante un periodo de tiempo mucho más grande que el periodo característico de las fluctuaciones turbulentas."

A continuación, los modelos RANS más destacables:

8.1.1.1 Eddy-viscosity models (EVM)

En el estudio de la turbulencia en fluidos, una estrategia práctica común es ignorar los vórtices (o remolinos) a pequeña escala en el movimiento y calcular un movimiento a gran escala con una viscosidad efectiva, llamada "viscosidad de Foucault o viscosidad de eddy", que caracteriza el transporte y disipación de energía en el flujo a menor escala (Viscosity s.f).

Existen varias subcategorías para los modelos lineales de viscosidad de Foucault, dependiendo del número de ecuaciones (de transporte) resueltas para calcular el coeficiente de viscosidad de eddy.

- **Spallart-Allmaras**

El modelo Spalart-Allmaras es un modelo relativamente simple de una ecuación que resuelve una ecuación de transporte modelada para la viscosidad (turbulenta) de eddy. El modelo Spalart-Allmaras fue diseñado específicamente para aplicaciones aeroespaciales que involucran flujos limitados a la pared y se ha demostrado que ofrece buenos resultados para las capas límite sometidas a gradientes de presión adversos (Fluent Inc. 2006).

- **Standard k-ε**

Es un modelo semi-empírico basado en ecuaciones de transporte modelo para la energía cinética de turbulencia (k) y su tasa de disipación (ε). En la derivación del modelo k-ε, el supuesto es que el flujo es completamente turbulento, y los efectos de la viscosidad molecular son insignificantes. Por lo tanto, el modelo estándar es válido solo para flujos totalmente turbulentos. (Fluent Inc., 2006).

- **RNG k-ε**

El modelo RNG k-ε se derivó utilizando una técnica estadística rigurosa (llamada teoría de grupos de renormalización). Es similar en forma al modelo estándar k -ε, pero incluye refinamientos. El modelo RNG tiene un término adicional en su ecuación **ε** que mejora significativamente la precisión para flujos rápidamente tensos y el efecto del remolino en la turbulencia se incluye en el modelo RNG, que mejora la precisión de los flujos en remolino (Fluent Inc., 2006).

- **Realizable k-ε**

El modelo realizable k-ε es un desarrollo relativamente reciente y difiere del modelo estándar en dos formas importantes:

El modelo realizable k-ε contiene una nueva formulación para la viscosidad turbulenta. Una nueva ecuación de transporte para la tasa de disipación, ε, se ha derivado de una ecuación exacta para el transporte de la fluctuación de vorticidad cuadrática media (Fluent Inc., 2006).

- **Standard k-ω**

El modelo estándar de k-ω es un modelo empírico basado en ecuaciones de transporte modelo para la energía cinética de turbulencia (k) y la tasa de disipación específica (ω), que también se puede considerar como la relación de ε a k.

A medida que el modelo k-ω se ha modificado a lo largo de los años, los términos de producción se han agregado a las ecuaciones k-ω, que han mejorado la precisión del modelo para predecir los flujos de corte libre (Fluent Inc., 2006).

- **SST (Shear Stress Transport)**

El modelo SST o Shear Stress Transport, fue diseñado para sobreponerse a las deficiencias de los otros modelos de dos ecuaciones. Es un modelo que resulta tener características combinadas de los modelos k-ε y k-ω para diferentes partes del flujo. En la capa límite interna se desarrolla mediante k-ω mientras que en la región fuera de la capa límite se maneja como k-ε (Fluent Inc., 2006).

8.1.1.2 Non-linear eddy-viscosity models (NLEVM)

Esta es una clase de modelos de turbulencia para las ecuaciones RANS en las que se utiliza un coeficiente de viscosidad de Foucault para relacionar el campo de turbulencia media con el campo de velocidad media, sin embargo, en una relación no lineal (Non linear eddy viscosity models, s.f).

8.1.1.3 RSM (Reynolds Stress Model)

El modelo de tensión de Reynolds (RSM) es el modelo de turbulencia más elaborado. Abandonando la hipótesis de la turbulencia isotrópica, el RSM cierra las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas por Reynolds resolviendo las ecuaciones de transporte para las tensiones de Reynolds, junto con una ecuación para la tasa de disipación. Esto significa que se requieren cinco ecuaciones de

transporte adicionales en flujos 2D y siete ecuaciones de transporte adicionales se deben resolver en 3D. El uso del RSM es imprescindible cuando las características de flujo de interés son el resultado de la anisotropía en las tensiones de Reynolds. Entre los ejemplos se encuentran los flujos de ciclones, Flujos altamente turbulentos en cámaras de combustión, pasos de flujo giratorios, y los flujos secundarios inducidos por el estrés en los conductos (Fluent Inc., 2006).

8.1.2 DNS (Direct Numerical Simulation)

La simulación numérica directa (DNS) es la rama de CFD dedicada a la solución de alta fidelidad de flujos turbulentos. El DNS difiere del CFD convencional en que la turbulencia se resuelve explícitamente, en lugar de ser modelado por un cierre Navier-Stokes (RANS) promediado por Reynolds. Su gran fortaleza es la capacidad de proporcionar un conocimiento completo, no se ve afectado por aproximaciones, en todos los puntos dentro del flujo, en todo momento dentro de la simulación. Por lo tanto, el DNS es ideal para abordar preguntas de investigación básicas sobre turbulencia física y modelización. Sin embargo, esta capacidad tiene un precio alto, lo que evita que el DNS sea utilizado como una herramienta de diseño de propósito general (Coleman y Sandberg 2010).

Algunas de las razones por las cuales el modelo DNS no es muy popular en comparación con los modelos RANS se deben a su altísimo costo computacional y a su limitada aplicación ya que solo es apropiado con números Reynolds relativamente bajos.

8.1.3 SRS (Scale Resolving Simulation)

Los métodos de simulación de resolución de escalas son modelos que tienen la capacidad de estudiar todo el espectro de turbulencia en un flujo hidráulico a diferencia de los modelos RANS que realizan un promedio de las variables.

“Los modelos SRS destacan en comparación de los modelos más utilizados (RANS) principalmente por dos razones. La primera razón para usar los modelos SRS es la necesidad de información adicional que no se puede obtener. De las simulaciones de RANS. Ejemplos de ello son las simulaciones acústicas donde se genera la turbulencia. Fuentes de ruido, que no se pueden extraer con precisión de las simulaciones de RANS. Otros ejemplos son cargas térmicas inestables en zonas de mezcla inestables de flujos de flujo a diferentes temperaturas, que puede conducir a fallas materiales, o efectos multifísicos como la cavitación de vórtice, donde el campo de presión de turbulencia inestable es la causa de la cavitación. La segunda razón para usar los modelos SRS está relacionada con la precisión” (Menter, 2012).

A continuación, los modelos SRS más destacables:

8.1.3.1 LES (Large Eddy Simulation)

Los flujos turbulentos se caracterizan por remolinos con una amplia gama de escalas de longitud y tiempo. Los remolinos más grandes son típicamente de tamaño comparable a la longitud característica del flujo medio. Las escalas más pequeñas son responsables de la disipación de la energía cinética de turbulencia.

En teoría, es posible resolver directamente todo el espectro de escalas turbulentas utilizando un enfoque conocido como simulación numérica directa (DNS). No se requiere modelado en DNS. Sin embargo, el DNS no es factible para problemas prácticos de ingeniería que involucran altos flujos de números de Reynolds. El costo requerido para que DNS resuelva el rango completo de escalas es proporcional a, donde está el número turbulento de Reynolds. Claramente, para altos números de Reynolds, el costo se vuelve prohibitivo. En LES, los grandes remolinos se resuelven directamente, mientras que los pequeños remolinos se modelan. La gran simulación de Eddy (LES) cae entre DNS y RANS en términos de la fracción de las escalas resueltas.

Resolver solo los remolinos grandes permite usar una malla mucho más gruesa y tamaños de pasos de tiempo más grandes en LES que en DNS. Sin embargo, él LES aún requiere mallas sustancialmente más finas que las que se utilizan normalmente para los cálculos de RANS. Además, LES debe ejecutarse durante un tiempo de flujo suficientemente largo para obtener estadísticas estables del flujo que se está modelando. Como resultado, el costo computacional involucrado con LES es normalmente órdenes de magnitudes más altas que para los cálculos de RANS constantes en términos de memoria (RAM) y tiempo de CPU. Por lo tanto, la computación de alto rendimiento (por ejemplo, computación paralela) es una necesidad para LES, especialmente para aplicaciones industriales. (Fluent Inc., 2006).

En resumen, el modelo LES es el más preciso de todos los modelos de turbulencia, sin embargo, el costo computacional que involucra hacer una simulación con este modelo es bastante alto y representa una cantidad de tiempo mucho más alta llegar a su solución, en la siguiente imagen se puede observar una comparación entre un modelo RANS y un modelo LES.

Figura 27.Comparación entre modelo LES y RAMS (Menter, 2012)

Method	Cells	Time steps	Inner loops per time step	Ratio to RANS
RANS	$\sim 10^6$	$\sim 10^2$	1	1
LES	$\sim 10^8$-10^9	$\sim 10^4$-10^5	10	10^5-10^7

8.1.3.2 DES (Detached Eddy Simulation)

En el enfoque de DES, los modelos RANS inestables se emplean en las regiones cercanas a la pared, mientras que las versiones filtradas de los mismos modelos se utilizan en las regiones alejadas de la pared cercana. La región LES se asocia normalmente con la región turbulenta del núcleo donde las escalas de turbulencia grandes desempeñan un papel dominante. En esta región, los modelos DES recuperan los respectivos modelos de subgrid. En la región cercana al muro, se recuperan los respectivos modelos RANS.

Sin embargo, la aplicación de DES puede requerir recursos de CPU significativos y, por lo tanto, como una guía general, se recomienda que los modelos de turbulencia convencionales que emplean el método de Reynolds promediados se utilicen para cálculos prácticos.

Los modelos DES, a menudo denominados modelos híbridos LES / RANS, combinan el modelado RANS con LES para aplicaciones tales como simulaciones de aerodinámica externa (Fluent Inc., 2006).

8.2 SELECCIÓN DEL MODELO DE TURBULENCIA

Las opciones de modelos de turbulencia que el software Ansys 19.2 nos ofrecía se limitaban a modelos de categoría RAMS: k-ε, SST (Shear Stress Transport) y RMS (Reynolds Stress Model), sin embargo, de estar disponibles modelos como LES o DES no hubieran sido tenidos en cuenta debido al altísimo costo computacional y a la gran cantidad de tiempo que requerían para simular.

El modelo elegido entonces para el desarrollo de las simulaciones del proyecto fue un Reynolds Stress Model debido a que el software recomienda enfáticamente el uso de este modelo para la simulación de fluidos en rotación como ciclones y vórtices, donde modelos como k-ε no eran muy precisos para la simulación de fluidos en rotación.

9. METODOLOGÍA

Metodología de trabajo en Ansys CFX para la simulación de cuenca de una turbina de vórtice

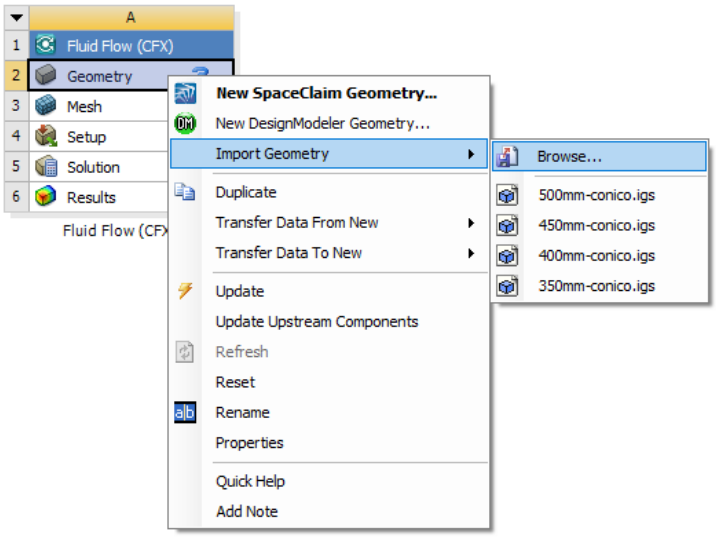
9.1 DEFINICIÓN DE GEOMETRÍA

9.2 DEFINICIÓN DE PARÁMETROS

9.2.1 Celda Geometry:

La importación de la geometría que será estudiada se realiza en la celda *Geometry* de Ansys Workbench seleccionando el archivo CAD. Ansys puede importar geometrías directamente de software CAD tales como NX, SolidWorks o si prefiere desde cualquier extensión de dibujo neutra como. IGES o. Step

Figura 28.Metodología: Importación de Geometría. (Elaboración propia)



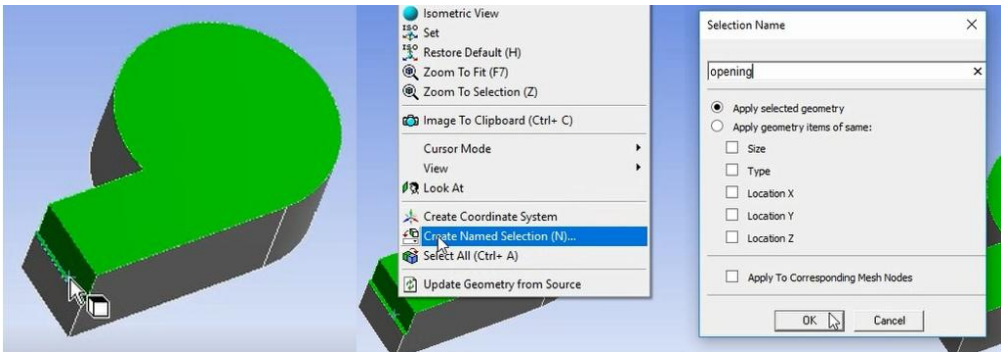
9.2.2 Celda Mesh

En la celda Mesh el usuario debe hacer división de la geometría en pequeños subdominios que son requisito para llevar a cabo la simulación. Allí dentro de la celda Mesh tendrá la tarea de asignar un nombre a las caras o lados principales de la cuenca, generar la malla y verificar su calidad

9.2.2.1 Asignación de nombres a las caras principales

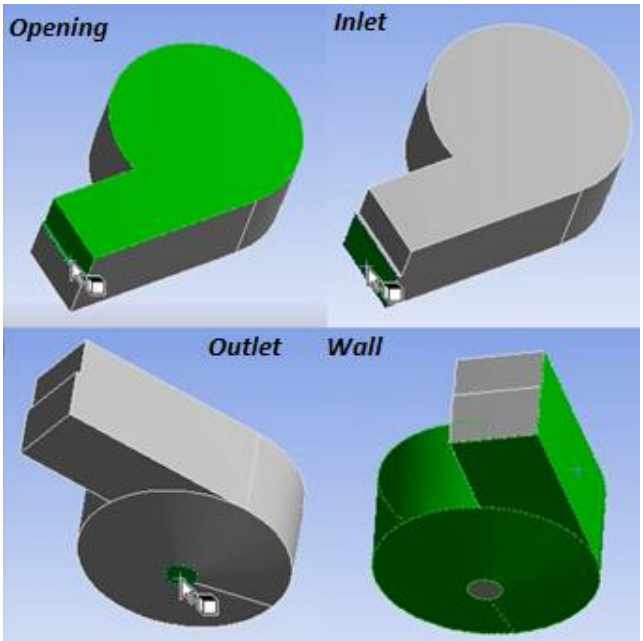
La asignación de nombre se hace con el objetivo de que en la celda *Setup* le sirvan como referencia al usuario como a Ansys para plantear rápidamente el sistema. La asignación de nombre se realiza seleccionando las caras, luego con click derecho seleccionar la opción *Created named selection* y finalmente el usuario debe elegir un nombre a su gusto para los lados seleccionados.

Figura 29. Metodología: Asignación de nombres. (Elaboración propia)



A continuación, se presentan los lados principales de la cuenca de una turbina de vórtice que el usuario debe bautizar. Es importe no dejar caras sin nombre, ya que en los pasos posteriores ello puede ser causal de un error en la simulación.

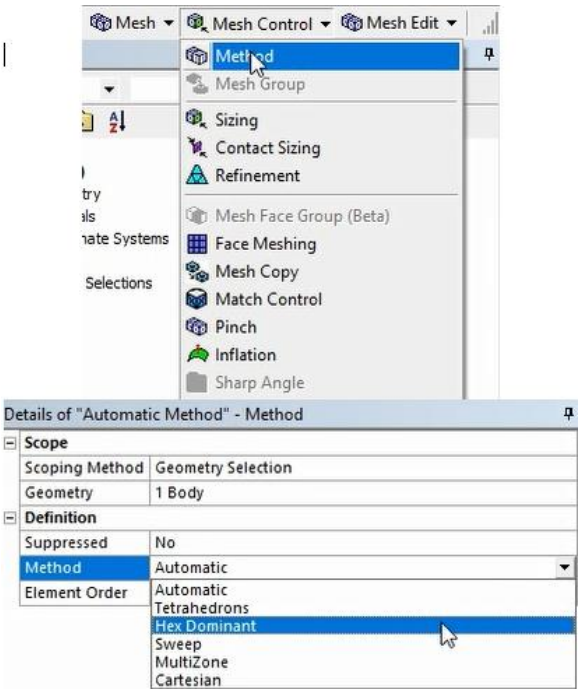
Figura 30.Metodología: Lados principales. (Elaboración propia)



9.2.2.2 Generación de malla

Ansys por defecto utiliza principalmente tetraedros, ya que ellos se suelen adaptar mejor a las geometrías que usuario proponga, pero con el inconveniente que genera demasiados elementos innecesarios, elementos que el usuario se puede ahorrar sin bajar la calidad de la malla, esto si define otro método de mallado. Es necesario recordar que a mayor número de elementos la simulación tardara más en converger.
El primer paso consiste en definición de un método de mallado. Dada la forma regular de la cuenca es conveniente utilizar como método hexaedros principalmente y en las zonas donde le sea difícil imitar a los hexaedros la geometría se utilizará tetraedros.
El usuario debe dirigirse a la pestaña Method, cuando lo haga se habilitará una nueva ventana en la parte inferior izquierda de la pantalla, donde puede seleccionar el método.

Figura 31.Metodología: Selección de método. (Elaboración propia)

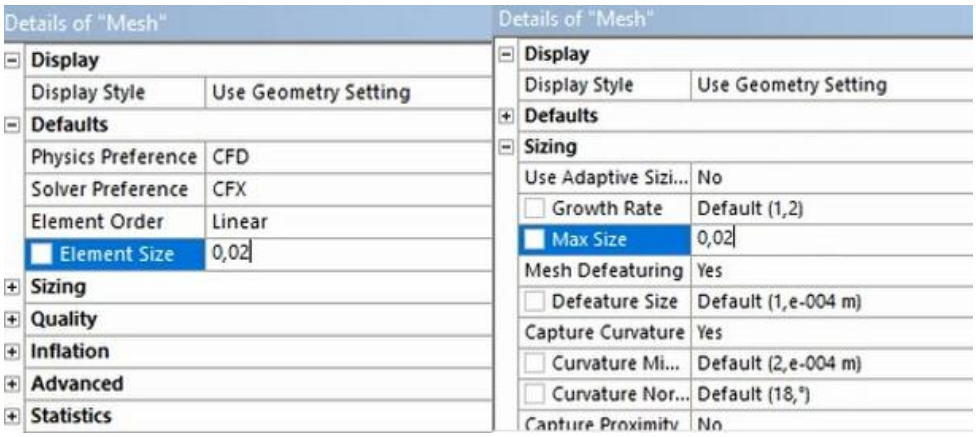


Lo segundo que debe realizar el usuario es definir el tamaño del elemento. Para esta geometría se planteó un tamaño de subdominio de 2mm, pero el usuario es libre de elegir el tamaño del subdominio, decisión que la hará más fina o gruesa.

Se debe dirigir a la casilla *Mesh* en la parte izquierda, inmediatamente se habilitará una ventará en la parte inferior izquierda de la pantalla. Allí en la sección *Defaults* debe hacer click en la casilla que se encuentra a la derecha de *Element size* para definir un tamaño de elemento por defecto. Luego en la sección *Sizing en* la casilla

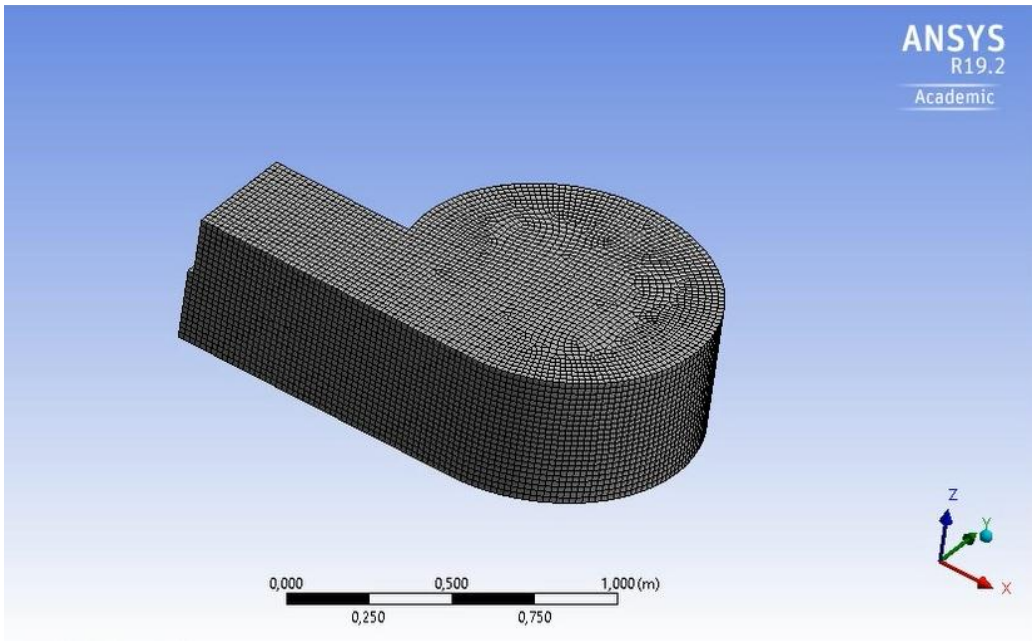
derecha de *MaxSize* se define el tamaño máximo de cada subdominio. Nuevamente se dimensiona a 2 mm, pero está a criterio del usuario.

Figura 32.Metodología: Tamaño de elemento. (Elaboración propia)



Luego de realizado lo anterior en la casilla *Mesh* hace click derecho, luego se desplegará una ventana con opciones, allí deberá seleccionar *Generate Mesh* y espera que el software realice el proceso de construcción de la malla. Esto puede tardar algunos minutos dependiendo de las capacidades tecnológicas del ordenador del usuario.

Figura 33.Metodología: Malla generada. (Elaboración propia)



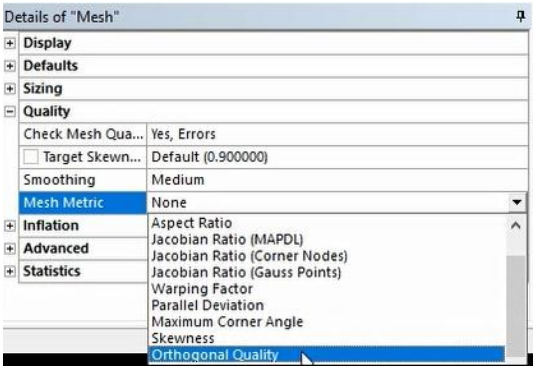
9.2.2.3 Calidad de malla

La calidad de la malla debe ser revisada para asegurarse de que los resultados que se pretende obtener sean resultados confiables. Para hacer la revisión Ansys posee varias herramientas de evaluación de malla.

- **Criterio de ortogonalidad**

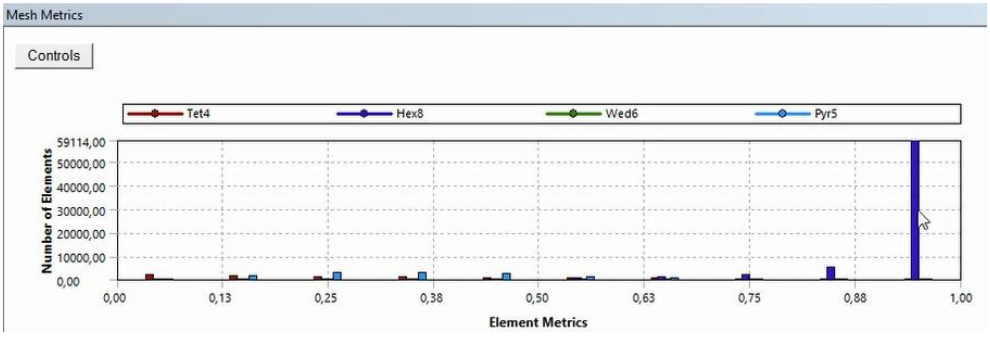
El usuario se debe dirigir a la casilla *Mesh* en la parte izquierda, inmediatamente se habilitará una ventana en la parte inferior izquierda de la pantalla. Allí en la sección *Quality* debe hacer click en la casilla *Mesh Metric y seleccionar Orthogonal Quality.*

Figura 34.Metodología: Orthogonal Quality. (Elaboración propia)



Inmediatamente en la parte inferior derecha de la pantalla se podrá visualizar una tabla de barras con la información de la malla bajo el criterio de ortogonalidad

Figura 35.Metodología: Tabla de calidad de malla bajo criterio de ortogonalidad. (Elaboración propia)

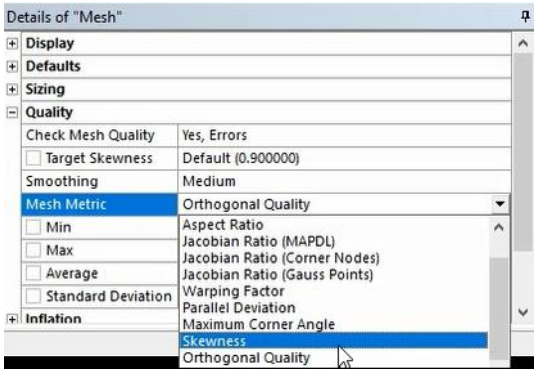


La figura 22 debe ser utilizada por el usuario para determinar la calidad de la malla según ese criterio

- **Criterio de oblicuidad**

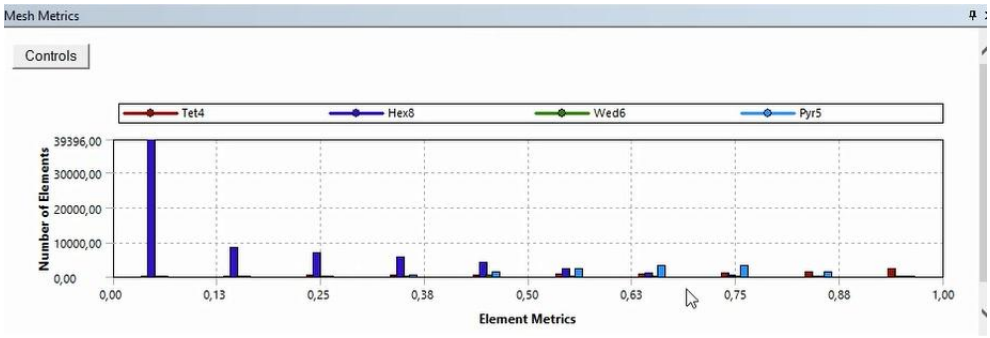
El usuario se debe dirigir a la casilla *Mesh* en la parte izquierda, inmediatamente se habilitará una ventana en la parte inferior izquierda de la pantalla. Allí en la sección *Quality* debe hacer click en la casilla *Mesh Metric y seleccionar Skewness*

Figura 36.Metodología: Skewness. (Elaboración propia)



Inmediatamente en la parte inferior derecha de la pantalla se podrá visualizar una tabla de barras con la información de la malla bajo el criterio de oblicuidad

Figura 37.Metodología: Tabla de calidad de malla bajo criterio de oblicuidad. (Elaboración propia)

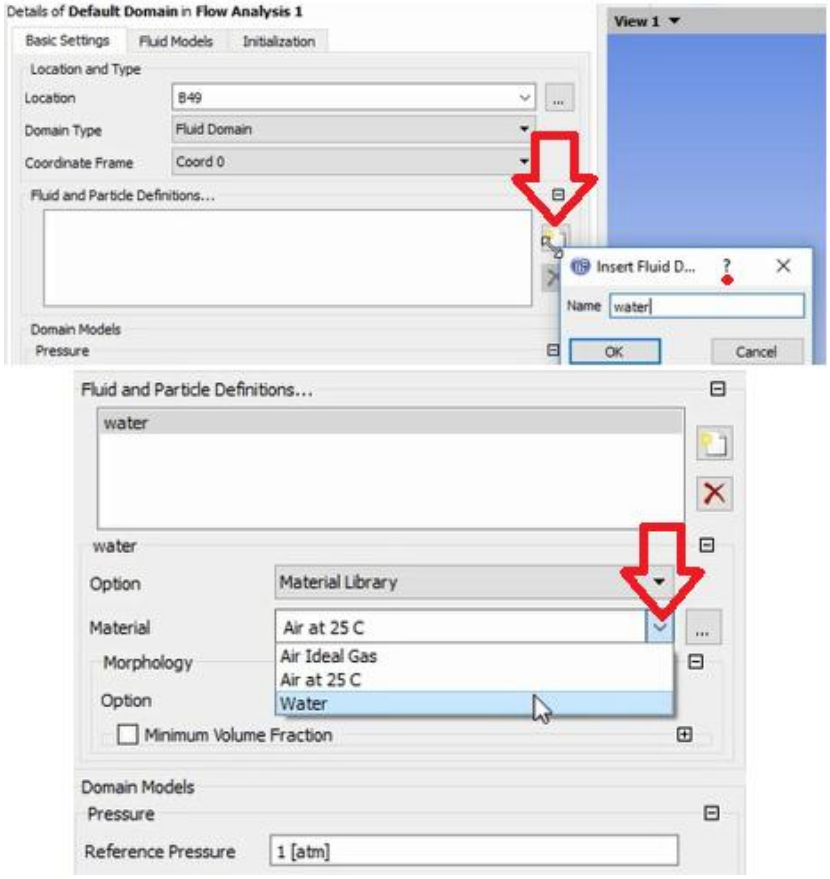


La figura 22 debe ser utilizada por el usuario para determinar la calidad de la malla según ese criterio

9.2.3 Celda Setup:

En la celda Setup el usuario debe plantear las condiciones del sistema.
Lo primero que el usuario debe definir son los fluidos que intervienen dentro del fenómeno, en el caso de las cuencas de las turbinas de vórtice será agua y aire. Los fluidos se agregan en la casilla *Default Domain.* Allí se le debe asignar un nombre al fluido a criterio del usuario y relacionar el fluido creado con uno existente en la biblioteca de fluidos de Ansys CFX. Cuando hace esto el fluido adquiere todas las propiedades físicas necesarias para la convergencia del estudio.
Ansys CFX usa una presión de referencia será de una atmosfera, se le deja tal cual

Figura 38.Metodología: Definición de fluidos. (Elaboración propia)



Después en la sección *Buoyonant Model* en la parte derecha *Option* se debe abrir la ventana para habilitar la opción *Buoyonant,* se selecciona y aparece inmediatamente aparecen nuevas opciones bajo la casilla. En estas casillas se debe especificar la fuerza de gravedad, teniendo mucho cuidado en seleccionar el eje de coordenadas correcto para incluir la especificar esta fuerza. Como último paso a

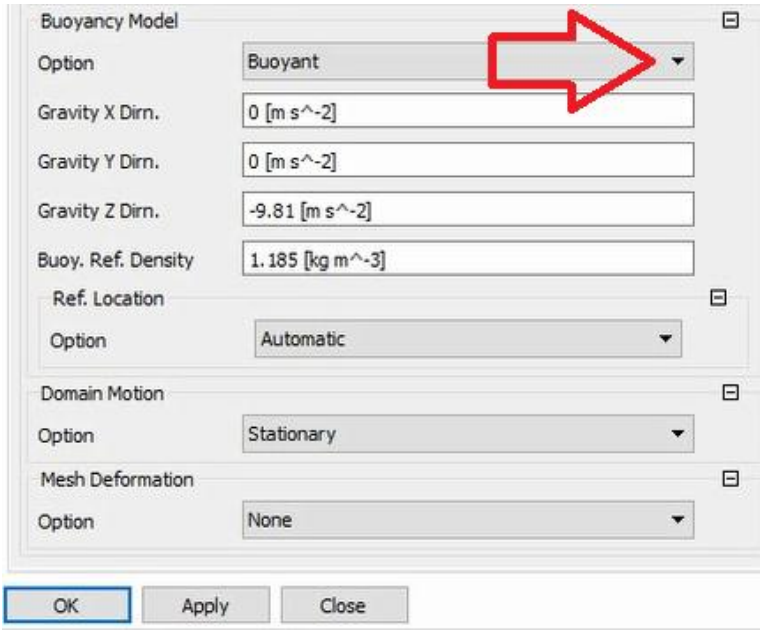
seguir se debe indicar un valor de densidad de referencia de flotabilidad, en este caso la densidad del aire, se debe tener en cuenta que este valor cambia en función de la temperatura y la altura sobre el nivel del mar donde hipotéticamente se instalaría el sistema, para este caso particular se tomó un valor suponiendo 25°C (1.185kg/m^3).

A continuación, una tabla con valores de densidad del aire en función de la temperatura:

Tabla 2.Densidad del aire en función de la temperatura (Engineers edge, 2019)

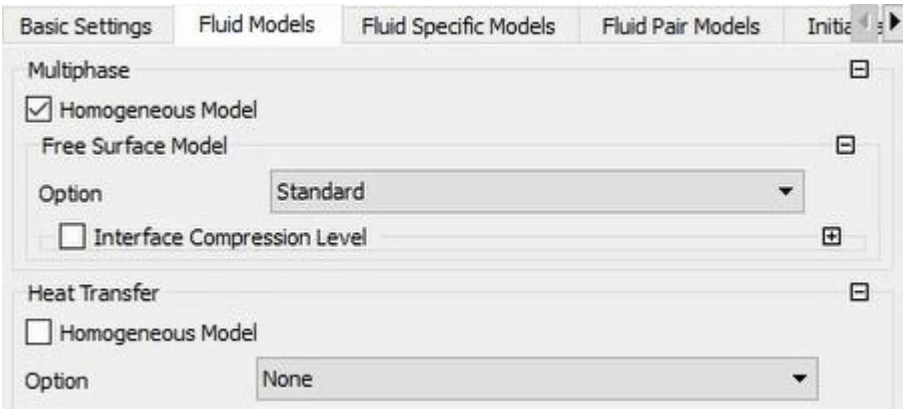
Temperature °C	Density kg/m^3	Specific Weight N/m^3
-40	1.514	14.85
-20	1.395	13.68
0	1.293	12.67
5	1.269	12.45
10	1.247	12.23
15	1.225	12.01
20	1.204	11.81
25	1.184	11.61
30	1.165	11.43
40	1.127	11.05
50	1.109	10.88
60	1.060	10.40
70	1.029	10.09
80	0.9996	9.803
90	0.9721	9.533
100	0.9461	9.278
200	0.7461	7.317
300	0.6159	6.040
400	0.5243	5.142
500	0.4565	4.477
1000	0.2772	2.719

Figura 39.Metodología: Buoyonant. (Elaboración propia)



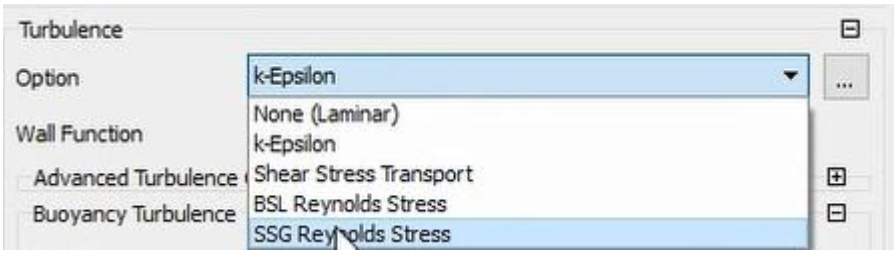
Posteriormente se selecciona la casilla *Homogeneus model* de esta forma podremos seleccionar el modelo de turbulencia a utilizar para la simulación de no seleccionarse el software tomara el modelo como si fuera un flujo laminar.

Figura 40.Metodología: Homogeneous model. (Elaboración propia)



El siguiente paso es seleccionar un modelo de turbulencia pertinente con el fenómeno, se ubica el modelo de turbulencia *SSG Reynolds Stress* ya que es el modelo más adecuado para simular la cuenca de una turbina de vórtice

Figura 41.Metodología: Modelos de turbulencia. (Elaboración propia)



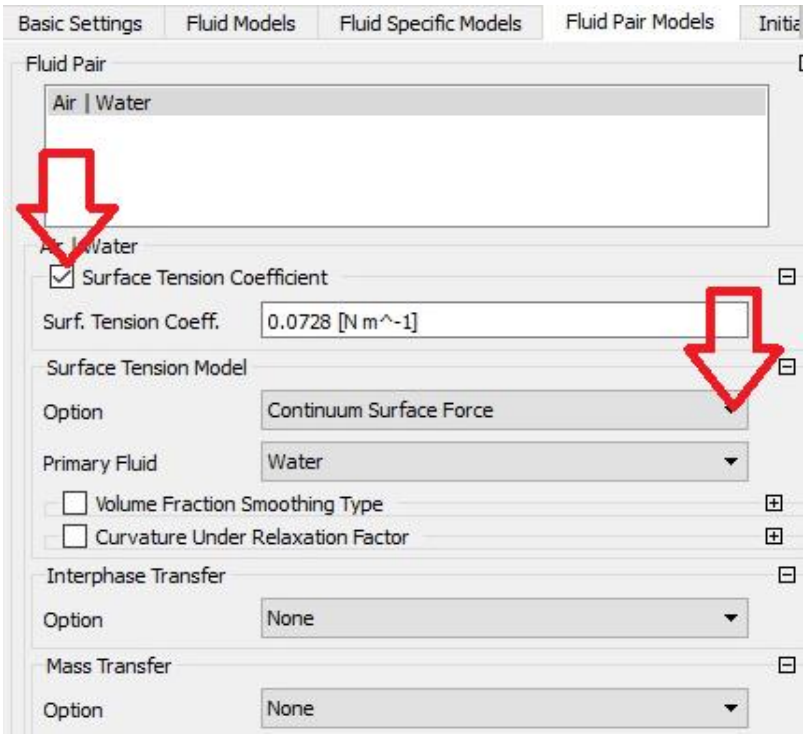
Siguiente, en la pestaña *Fluid Pair Models* el usuario debe indicar la tensión superficial del agua, esto lo consigue habilitando la pestaña *Surface Tension Coefficient*. Es necesario recordar que al incluir aire como nuevo fluido en el estudio el usuario seleccionó aire a una temperatura de *20ºC,* así que para simplificar la simulación se asume que el agua está a la misma temperatura. El agua posee distintos valores de tensión superficial dependiendo de la temperatura que posea, como se aprecia a continuación:

Tabla 3.Tabla de tensión superficial del agua. (Mott, R.L., 2006)

Temperatura (°F)	Tensión superficial (mlb/pie)	Temperatura (°C)	Tensión superficial (mN/m)
32	5.18	0	75.6
40	5.13	5	74.9
50	5.09	10	74.2
60	5.03	20	72.8
70	4.97	30	71.2
80	4.91	40	69.6
90	4.86	50	67.9
100	4.79	60	66.2
120	4.67	70	64.5
140	4.53	80	62.7
160	4.40	90	60.8
180	4.26	100	58.9
200	4.12		
212	4.04		

Luego en la sección *Surface Tension* en la parte derecha de la casilla Option, el usuario debe abrir la ventana y seleccionar *Continium Surface Force*, inmediatamente en la parte de abajo se habilitará la casilla *Primary Fluid*, allí debe especificar el agua como fluido primario

Figura 42.Metodología: Fluid Pair Models. (Elaboración propia)



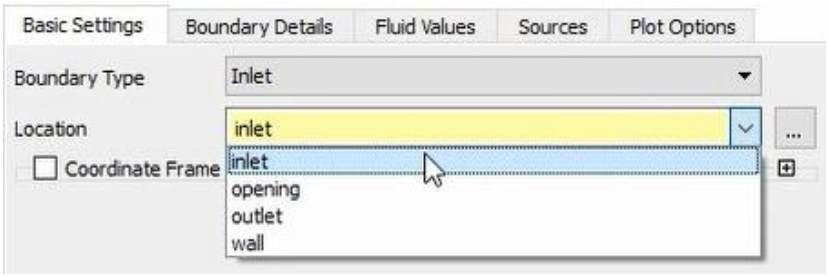
Una vez configuradas las generalidades del sistema en el paso anterior, el siguiente paso es la definición de los límites o *Boundary*, para el ello el usuario tiene que fijar una entrada, frontera o pared, una salida y una tapa al aire o apertura.

Para dar inicio a la asignación de los límites el usuario debe dar Click en la pestaña Boundary y darle un nombre. Inmediatamente emergerá una pestaña nueva en la parte derecha de la pantalla. Una vez allí encontrara entre sus opciones la pestaña *Boundary Type,* allí puede escoger el tipo de limite, entre las opciones se encuentran: *Inlet, Wall, Outlet, Opening* y en la pestaña *Location* observara el grupo de caras principales creadas (Ver figura 28), grupo que le ayudara a definir los limites.

- **Entrada**

El usuario para asignar una entrada debe en la pestaña *Boundary Type* seleccionar *Inlet* y como localización de seleccionar dentro del grupo de caras principales la opción *Inlet.*

Figura 43.Metodología: Basic Settings Inlet. (Elaboración propia)



Luego debe de pasar a la sección *Boundary Details*, allí debe especificar la velocidad con la cual ingresa el agua a la cuenca, para ello tiene varias opciones para plantearlo: Velocidad normal, Velocidad en componentes cartesianas, Velocidad en componentes cilíndricas, Flujo másico, Presión total y Presión estática.

Debido a conocemos todas las cotas de la cuenca es conveniente plantear la entrada en velocidad normal, ya que si el usuario desea conocer el caudal solo debe multiplicar el área *Inlet* de su grupo de lados principales por la velocidad ingresada.

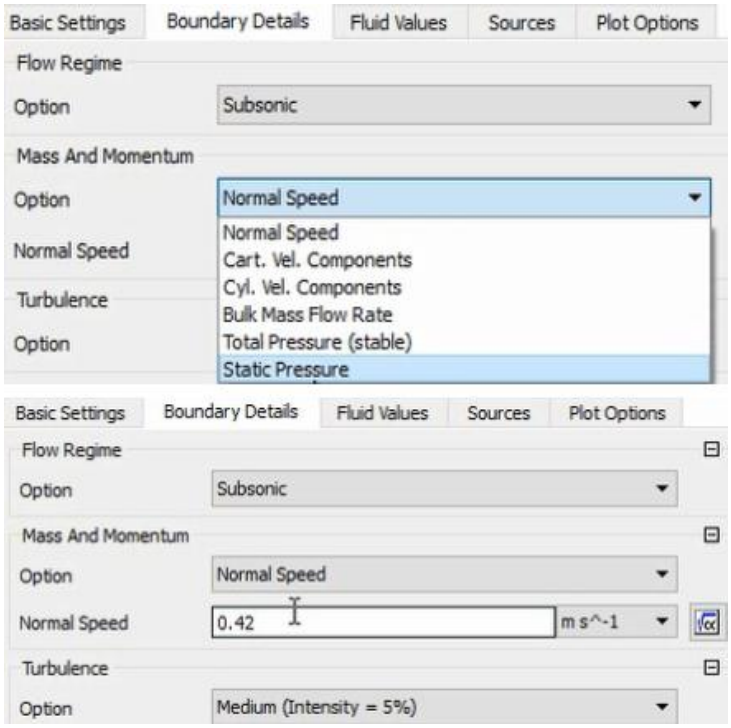
Basados en el trabajo “Validación de CFD para un eficiente sistema de agrupación de vórtices gravitacionales” (Shabara et al., 2015), trabajo de donde se obtuvo el modelo de cuenca de referencia se tomó un valor de velocidad de la siguiente tabla:

Tabla 4.Velocidad de entrada recomendada. (Shabara et al., 2015)

Water depth in mm	Inlet Velocity (m/s)
100	0.27
150	0.31
200	0.20
250	0.53
300	0.42

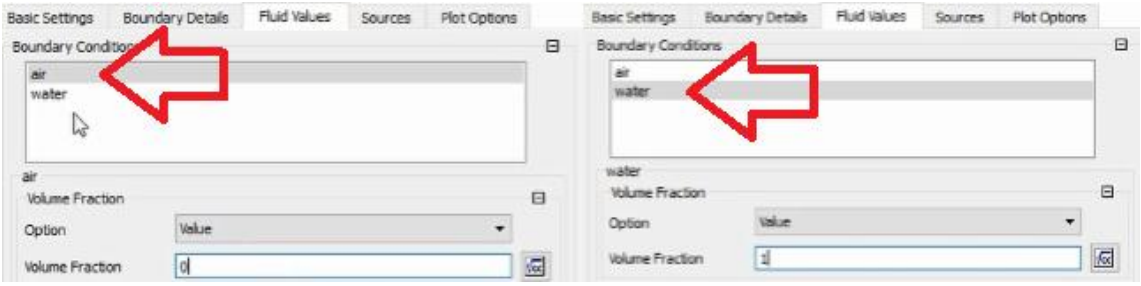
El modelo seleccionado para este trabajo cuenta con una altura de 300mm por lo que basados en la tabla anterior se tomó un valor de velocidad de entrada de 0.42 m/s.

Figura 44.Boundary Details Inlet. (Elaboración propia)



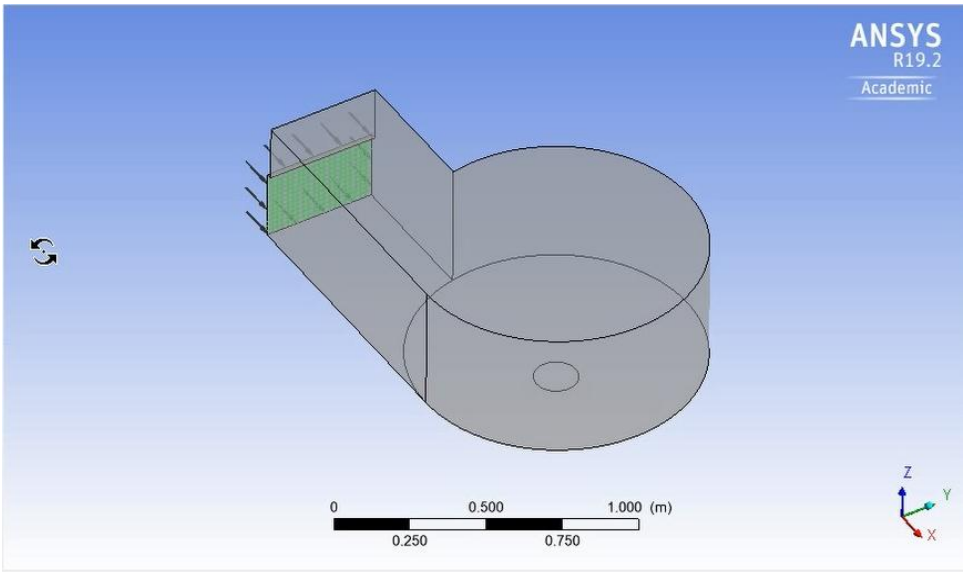
El paso siguiente es pasar a la sección Fluid Values, allí debe especificar el porcentaje de fluido en la entrada. Sera de 0% de aire y 100% de agua

Figura 45.Metodología: Fluid Values Inlet. (Elaboración propia)



Con esto dará por terminada la parte de entrada, cuando acepte todos los cambios hechos, inmediatamente aparecerá un grupo de vectores o flechas que simbolizan el fluido que entrando a la cuenca

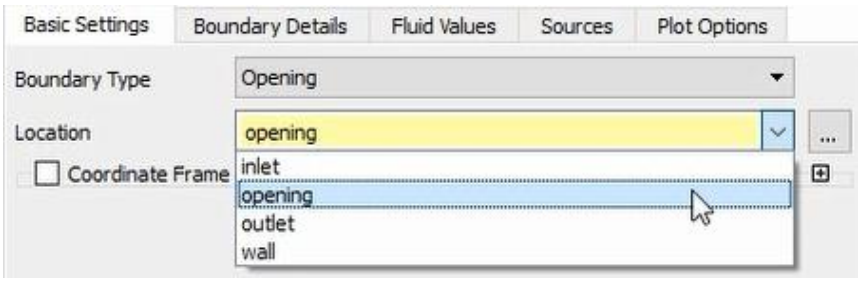
Figura 46.Metodología: Visualización de Inlet. (Elaboración propia)



- **Apertura**

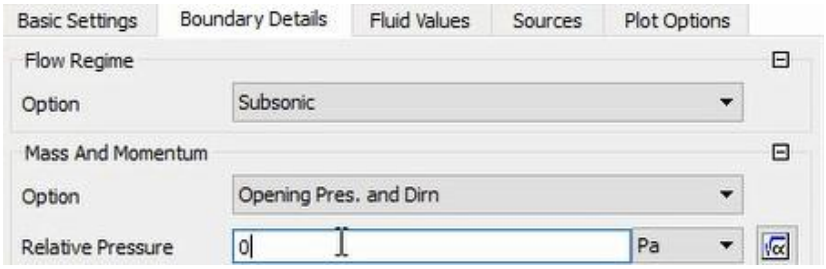
El usuario para asignar una entrada debe en la pestaña *Boundary Type* seleccionar *Opening* y como localización de seleccionar dentro del grupo de caras principales la opción *Opening.*

Figura 47.Metodología: Basic Settings Opening. (Elaboración propia)



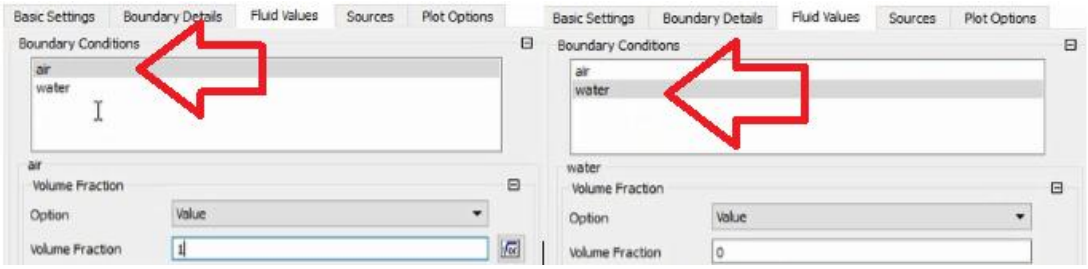
Luego debe de pasar a la sección *Boundary Details,* allí debe especificar la presión relativa del grupo de caras llamadas *Opening*, dado que esta sección se encuentra expuesta a la presión atmosférica la presión relativa que se debe indicar es cero

Figura 48.Metodologia: Boundary Details Opening. (Elaboración propia)



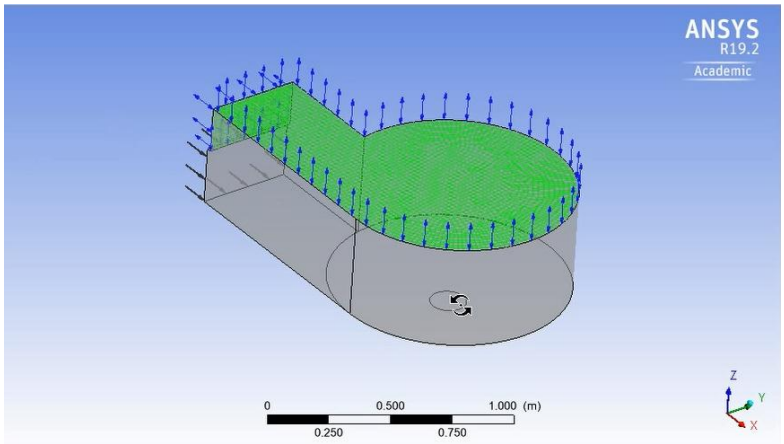
El paso siguiente es pasar a la sección Fluid Values, allí debe especificar el porcentaje de fluido en la entrada. Sera de 100% de aire y 0% de agua

Figura 49.Metodología: Fluid Values Opening. (Elaboración propia)



Con esto dará por terminada la parte de apertura, cuando acepte todos los cambios hechos, inmediatamente aparecerá un grupo de vectores o flechas en color azul en ambas direcciones que simbolizan que el fluido puede entrar y salir del sistema

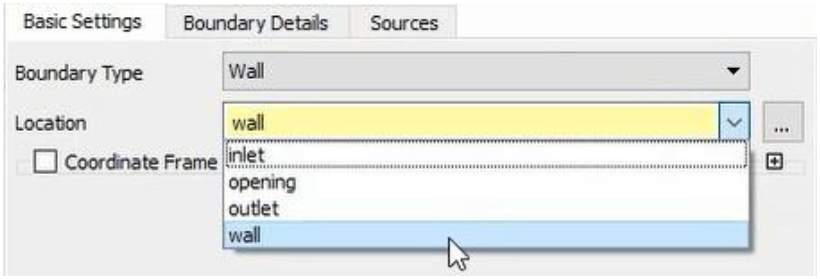
Figura 50.Metodología: Visualización de Opening. (Elaboración propia)



- **Pared**

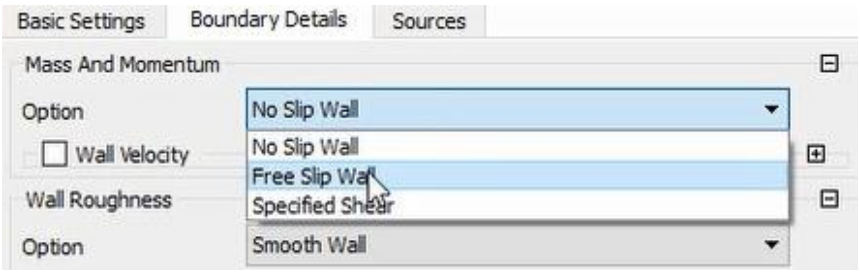
El usuario para asignar una entrada debe en la pestaña *Boundary Type* seleccionar *Wall* y como localización de seleccionar dentro del grupo de caras principales la opción *Wall.*

Figura 51.Metodología: Basic Settings Wall. (Elaboración propia)



Luego debe de pasar a la sección *Boundary Details*, allí debe especificar *Free Slip Wall* en las paredes de la cuenca, esto implica que en las paredes no va a existir fricción, así que se desprecian las pérdidas que produce.

Figura 52.Metodología: Boundary Details Wall. (Elaboración propia)

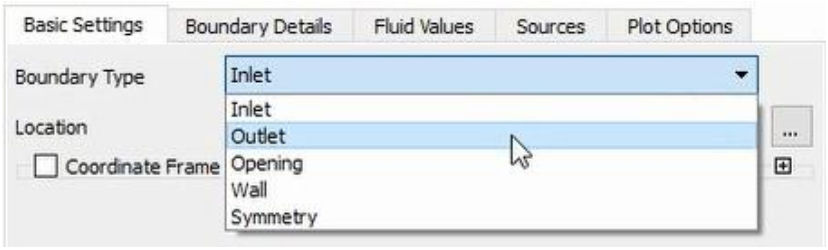


Con esto se dará por terminada la sección Wall, en este caso no aparecerán vectores o algo que indique que el cambio fue realizado

- **Salida**

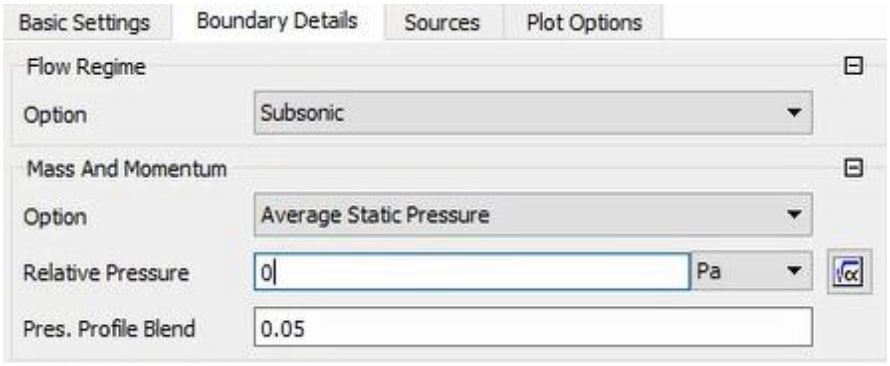
El usuario para asignar una entrada debe en la pestaña *Boundary Type* seleccionar *Outlet* y como localización de seleccionar dentro del grupo de caras principales la opción *Outlet.*

Figura 53.Metodología: Basic Settings Outlet. (Elaboración propia)



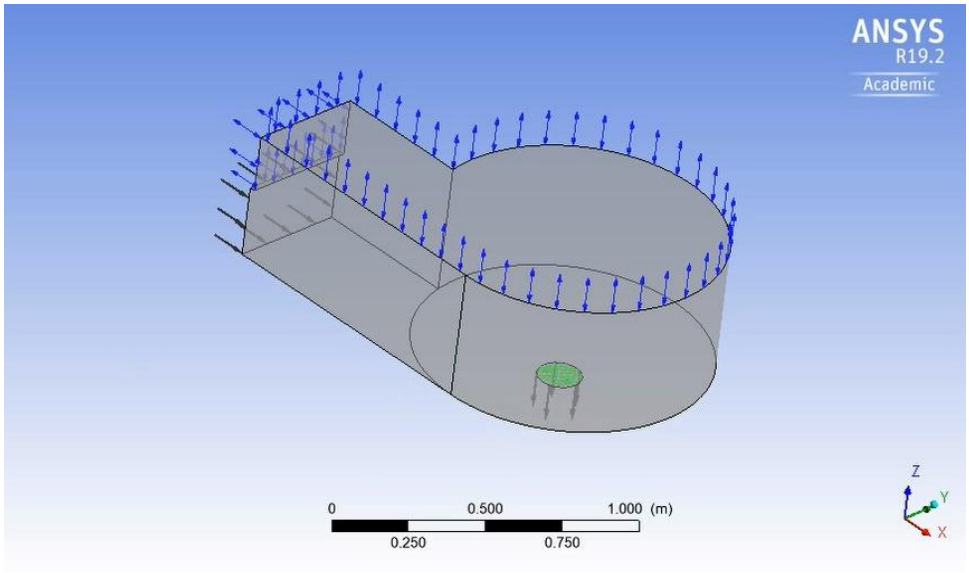
Luego debe de pasar a la sección *Boundary Details*, allí debe especificar en la pestaña Average Static Pressure, allí incluirá presión estática promedio con la cual saldrá el agua a la cuenca. Allí indicara una presión de cero

Figura 54.Metodología: Boundary Details Wall. (Elaboración propia)



Con esto dará por terminada la parte de entrada, cuando acepte todos los cambios hechos, inmediatamente aparecerá un grupo de vectores o flechas que simbolizan el fluido que sale de la cuenca

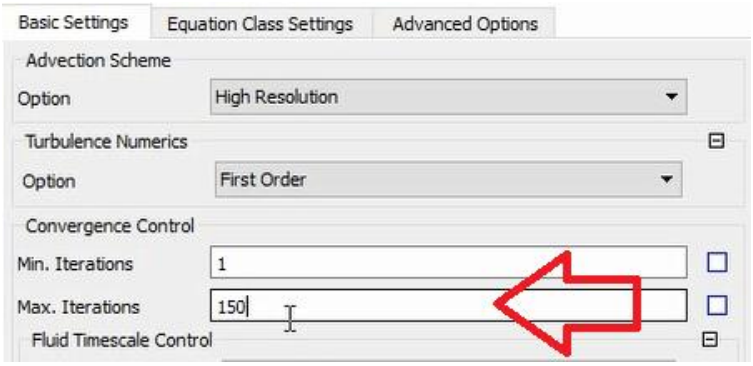
Figura 55.Metodología: Visualización de Outlet. (Elaboración propia)



Las iteraciones se pueden entender como dividir el fenómeno en pequeños instantes y estos instantes serán evaluados según las condiciones expresadas en los pasos anteriores, luego el instante siguiente y al final Ansys recogerá toda la información y la presentará en su matriz gráfica.
Ansys por lo general trabaja con 100 iteraciones para dar solución al problema. A mayor número de iteraciones más preciso será el estudio, ya que el fenómeno será dividido en muchos más instantes de evaluación.
Si el usuario desea cambiar el número de iteraciones para que su estudio, debe dirigirse a la pestaña *Solver Control*, allí podrá asignar el número máximo de iteraciones en la sección *Convergence Control* en la opción *Max. Iterations.*

Ciento cincuenta iteraciones es un numero aceptable de iteraciones, ya que el problema se aborda un poco más pausadamente que con cien y el tiempo de espera oscila alrededor de veinte minutos aproximadamente lo que no es demasiado.

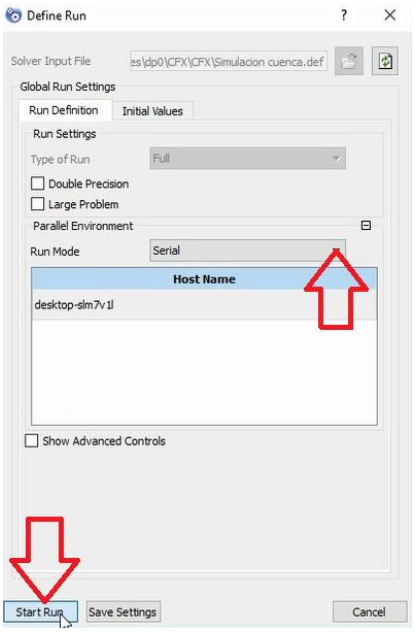
Figura 56.Metodología: Solver Control. (Elaboración propia)



9.2.4 Celda Solver:

En Ansys Workbench el usuario debe ingresar a la celda *solver*. Cuando ingrese debe asegurarse que en *Run Mode* este seleccionada la opción Serial y finalizar haciendo Click en *Start Run.*

Figura 57.Metodología: Define Run. (Elaboración propia)



Inmediatamente Ansys comenzara a realizar una evaluación de los pasos anteriores en busca de algún error que haga que la simulación no pueda converger. Si no hay ningún inconveniente en la pantalla emergerá una tabla que indicará los resultados obtenidos

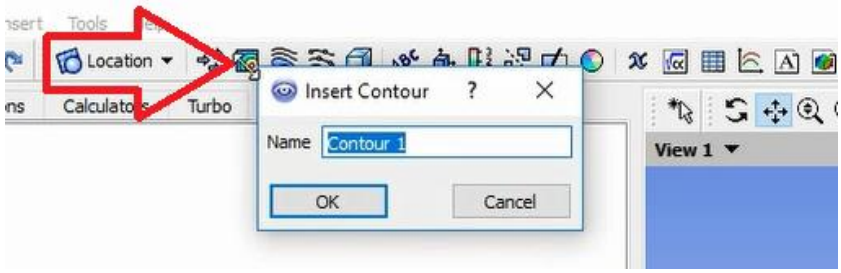
9.2.5 Celda Results:

En la celda *Results* de Ansys Workbench el usuario podrá interactuar con los resultados obtenidos luego de que la simulación haya convergido. Esta sección ofrece una variedad de formas de expresar la información gracias a la matriz grafica de Ansys, matriz que le provee al usuario una forma de entender mucho mejor el fenómeno. Entre las principales se encuentra: Contour, Isosurface, Streamline, Plane, Volume Redering

9.2.5.1 <u>Contour</u>

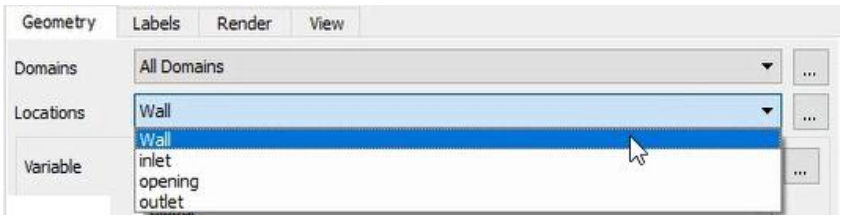
La herramienta de contorno es utilizada para determinar los valores de determinada variable en cualquier región del sólido, tanto la variable como la región de interés son determinadas por el usuario.
La herramienta contorno se encuentra en la barra de tareas en la parte superior de la pantalla, el usuario luego de seleccionada la opción debe asignarle un nombre a su criterio.

Figura 58.Metodología: Ubicación de herramienta Contour. (Elaboración propia)



Inmediatamente en la pantalla en la parte inferior izquierda aparecerá una ventana, en ella el usuario debe definir *Location* y *Variable.*
Location es la ubicación de la pared o lado de la cuenca que el usuario desea evaluar, al abrir la pestaña *Location* encontrara en su interior los lados principales de la cuenca (Ver figura 28)

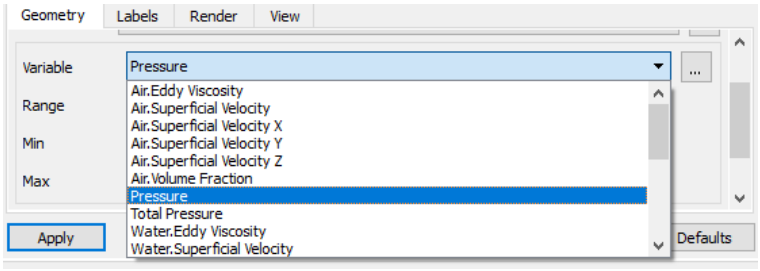
Figura 59.Metodología: Ubicación de Contour. (Elaboración propia)



El paso siguiente en la selección de la variable, en la pestaña *Variable* en su interior encontrara el usuario una lista con distintas variables que se pueden plasmar en la región anteriormente escogida. Las variables que se suelen revisar en las cuencas

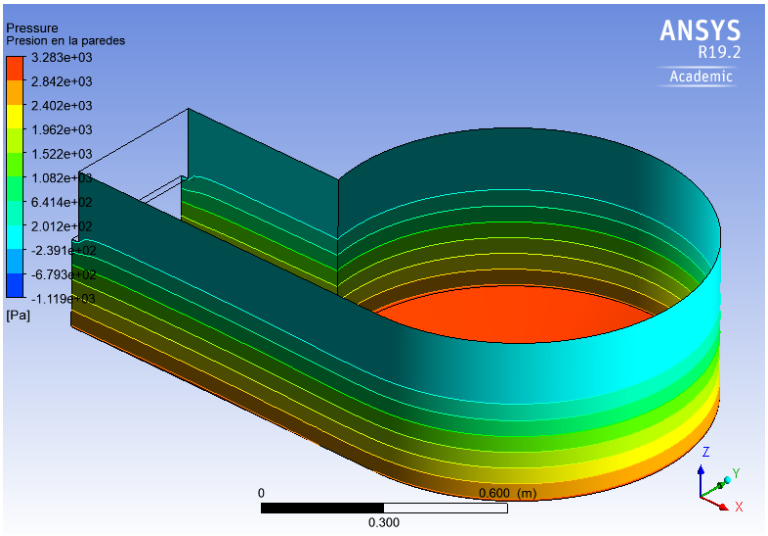
de turbinas de vórtice gravitacional son la velocidad superficial del agua y la presión en las paredes de la cuenca, sin embargo, el usuario es libre de revisar todos los datos que desee.

Figura 60.Metodología: Definición de variable de Contour. (Elaboración propia)



Ansys dibujara dentro del solido un diagrama de fases con la información que el solucionador recolecto en el proceso de solución. La información presentada debe relacionarse al instante con la tabla de valores al lado izquierdo de la figura.

Figura 61.Metodología: Visualización de Contour. (Elaboración propia)

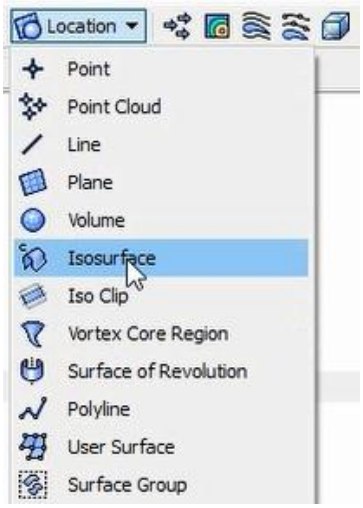


9.2.5.2 Isosurface

La herramienta *Isosurface* es utilizada visualizar superficies de interés en el fluido que atraviesa la cuenca, además permite observar una variable en función de otra variable. Actividad útil para entender el comportamiento del vórtice que se presenta en la cuenca.

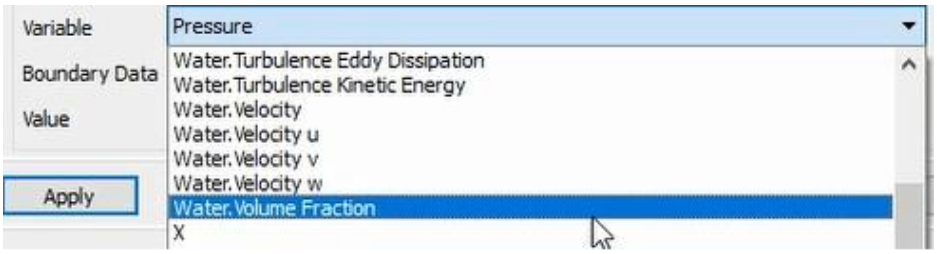
Para visualizar la velocidad superficial del agua en función de la fracción de volumen del fluido el usuario debe dirigirse a la barra de tareas ubicada en la parte superior de la pantalla, abrir la pestaña *Location* y seleccionar la opción *Isorsuface,* el usuario luego de seleccionada la opción debe asignarle un nombre a su criterio.

Figura 62.Metodología: Ubicación de herramienta Isosurface. (Elaboración propia)



Inmediatamente en la pantalla en la parte inferior izquierda aparecerá una ventana, en ella el usuario debe definir la variable principal de trabajo. En la pestaña *Variable* debe buscar y seleccionar la opción *Water Volume Fraction*

Figura 63.Metodología: Definición de variable principal Isosurface. (Elaboración propia)



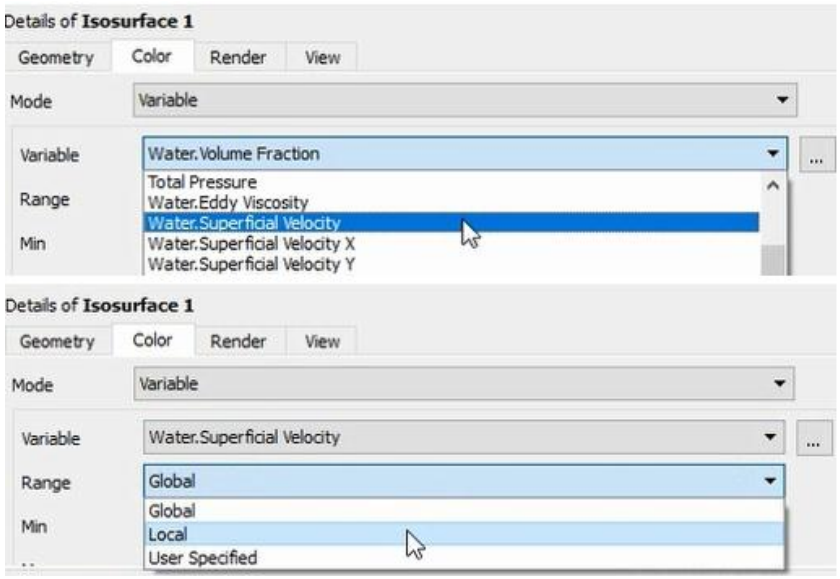
Luego en la pestaña *Color* ubicada al lado izquierdo de *Geometry*, el usuario podrá determinar la variable secundaria. En la pestaña *mode* debe seleccionar la opción Variable, ello habilitara una variable secundaria. Pondrá a la variable principal en función de la variable secundaria que se elija

Figura 64.Metodología: Habilitación de variable secundaria Isosurface. (Elaboración propia)



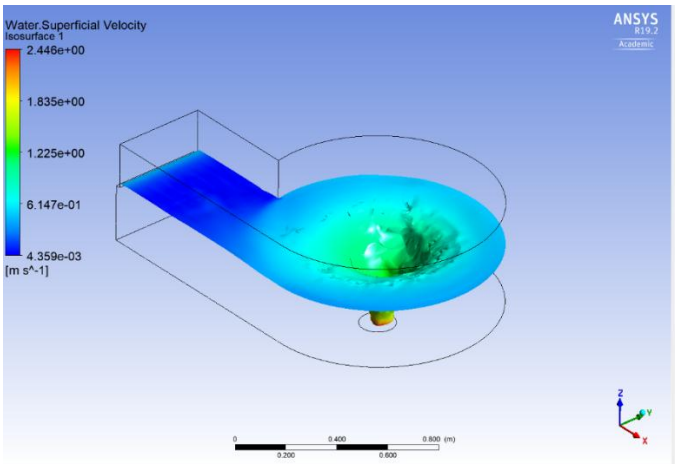
Para determinar la variable secundaria el usuario debe ubicar la pestaña variable y buscar en su interior Water Superficial Velocity. Luego buscar la pestaña *Range* y elegir Local. La diferencia entre rango Local y Global es que el usuario al elegir un rango global, lo que se graficará en la cuenca tendrá magnitudes a escala de todo el fenómeno y en rango local lo valores presentados estarán en un marco más reducido, un marco donde los cambios en la variable se pueden apreciar mejor. Sin embargo, si el usuario desea compararlos concluirá tienen la misma magnitud.

Figura 65.Metodología: Definición de variable secundaria Isosurface. (Elaboración propia)



Se aceptan los cambios e instantáneamente aparecerá dentro la cuenca una superficie en función de la velocidad superficial del agua.

Figura 66.Metodología: Visualización de Isorsuface. (Elaboración propia)



9.2.5.3 Streamline

La herramienta Streamline o línea de corriente es utilizada visualizar el comportamiento de una o varias partículas de fluido a través de la cuenca en forma de línea o hilo, cambiando su color conforme la magnitud velocidad vaya cambiando a través de la cuenca.

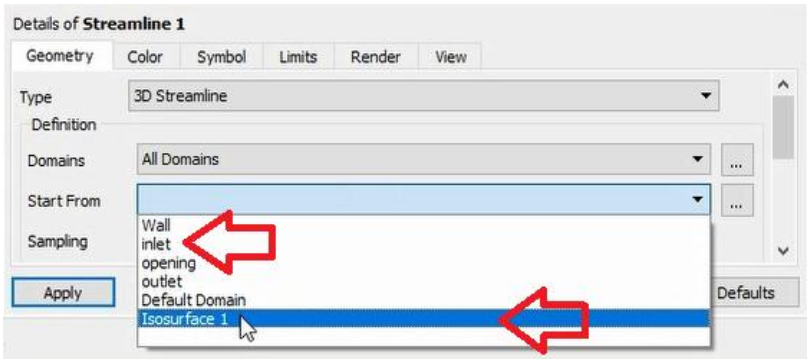
La herramienta *Streamline* se encuentra en la barra de tareas en la parte superior de la pantalla, el usuario luego de seleccionada la opción debe asignarle un nombre a su criterio.

Figura 67.Metodología: Ubicación de herramienta Contour. (Elaboración propia)



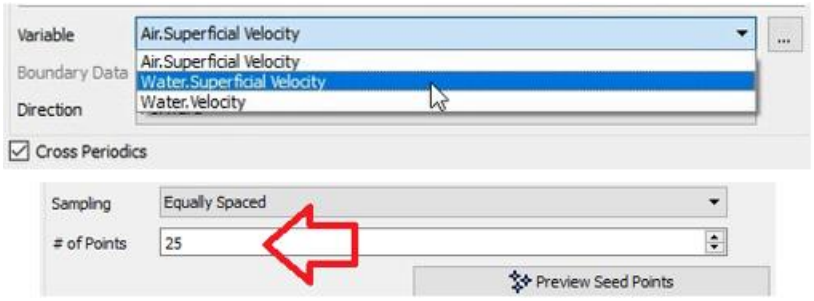
Inmediatamente en la pantalla en la parte inferior izquierda aparecerá una ventana, en ella el usuario debe definir desde donde se comenzará a graficar la corriente de agua, allí tiene dos opciones, pueden iniciar su estudio desde donde ingresa el fluido a la cuenca o tomar como punto de referencia la superficie del paso anterior

Figura 68.Metodología: Selección punto de inicio Streamline. (Elaboración propia)



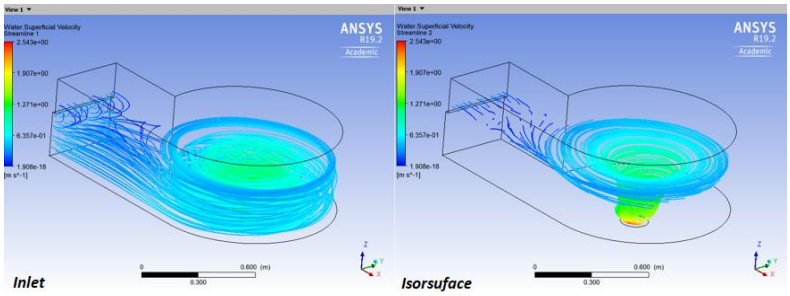
El paso siguiente es la selección de la variable, el usuario debe seleccionar *Water Superficial Velocity*, seguido debe indicar el número de elementos que tendrá la gráfica, a mayor cantidad de elementos más tardará el ordenador en completar la tarea.

Figura 69.Metodología: Definición de variable Streamline y número de elementos. (Elaboración propia)



Finalmente se aceptan los cambios, en pantalla aparecerá el recorrido del agua dentro de la cuenca. A continuación, se presentará la diferencia entre utilizar *Inlet* e Isosurface como punto de inicio

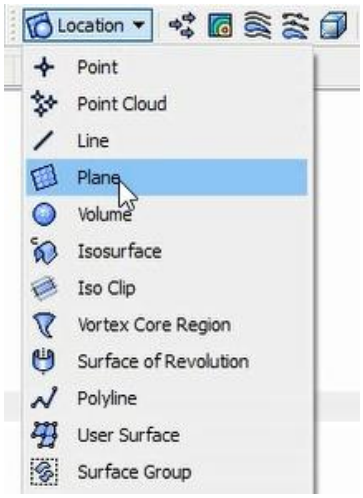
Figura 70.Metodología: Visualización de Streamline. (Elaboración propia)



9.2.5.4 Plane

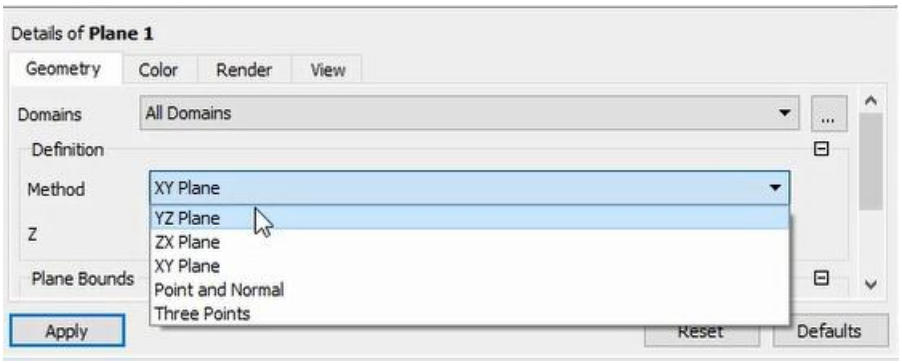
La herramienta *Plane* es utilizada visualizar los resultados obtenidos respecto una variable en una vista de corte a través de la cuenca.
Plane se encuentra en la barra de tareas ubicada en la parte superior de la pantalla, abrir la pestaña *Location* y seleccionar la opción *Plane,* el usuario luego de seleccionada la opción debe asignarle un nombre a su criterio.

Figura 71.Metodología: Ubicación de herramienta Plane. (Elaboración propia)



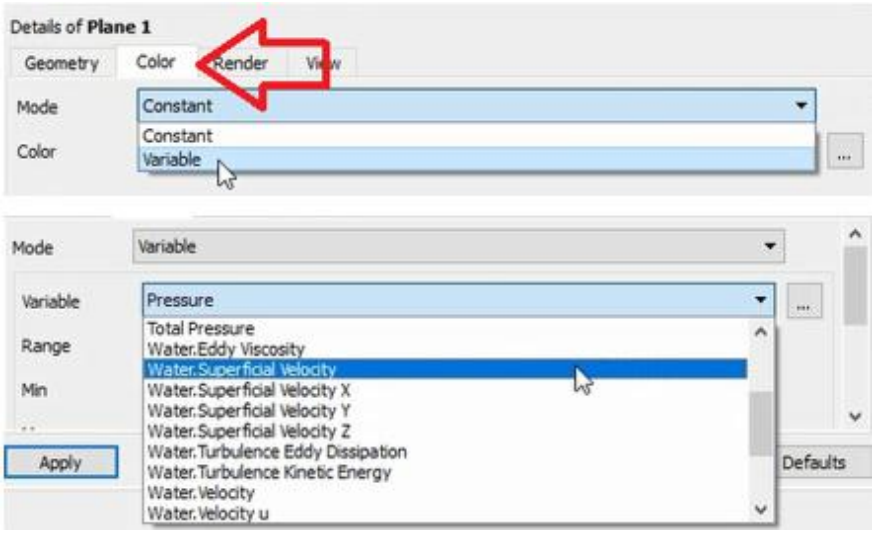
Luego el usuario debe definir el plano en el cual desea representar la variable, para realizarlo debe dirigirse a la sección *Geometry* y buscar la pestaña *Method*, allí ubicara el plano YZ, plano YZ es ideal para visualizar los datos, ya que divide el vórtice a la mitad

Figura 72.Metodología selección de plano. (Elaboración propia)



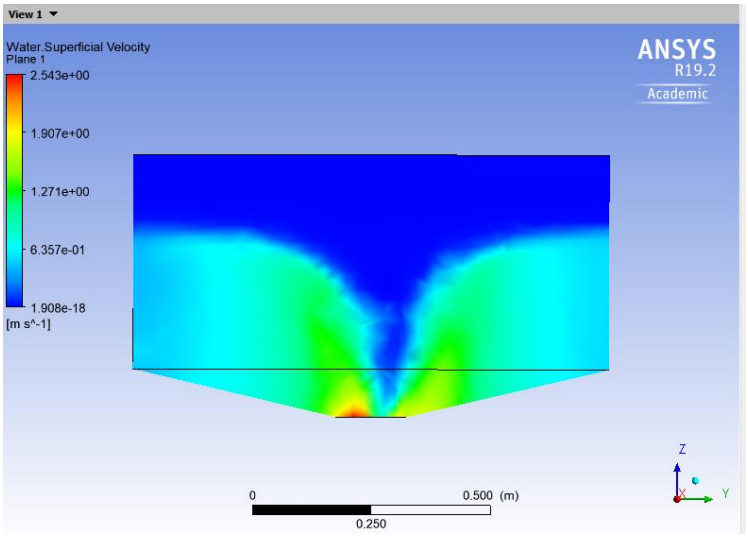
Después en la pestaña *Mode* ubicada al lado izquierdo de *Geometry*, el usuario podrá determinar la variable secundaria. En la pestaña *mode* debe seleccionar la opción Variable, ello habilitara una poder representar una variable en el plano, por último, se debe especificar la variable a representar. En la pestaña *variable* el usuario encontrara una lista de opciones de variables que puede utilizar.

Figura 73.Metodología: Habilitación y definición de variable Plane. (Elaboración propia)



Finalmente se aceptan los cambios, en pantalla aparecerá un plano con la información de la variable seleccionada anteriormente, se acomodará la vista para poder ver el plano en verdadera magnitud

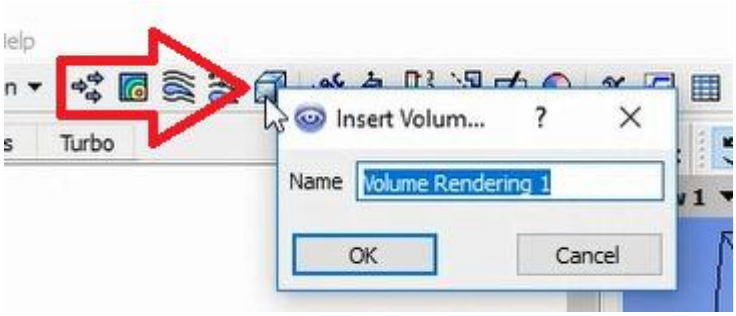
Figura 74.Metodología: Visualización de Plane. (Elaboración propia)



9.2.5.5 Volume Redering

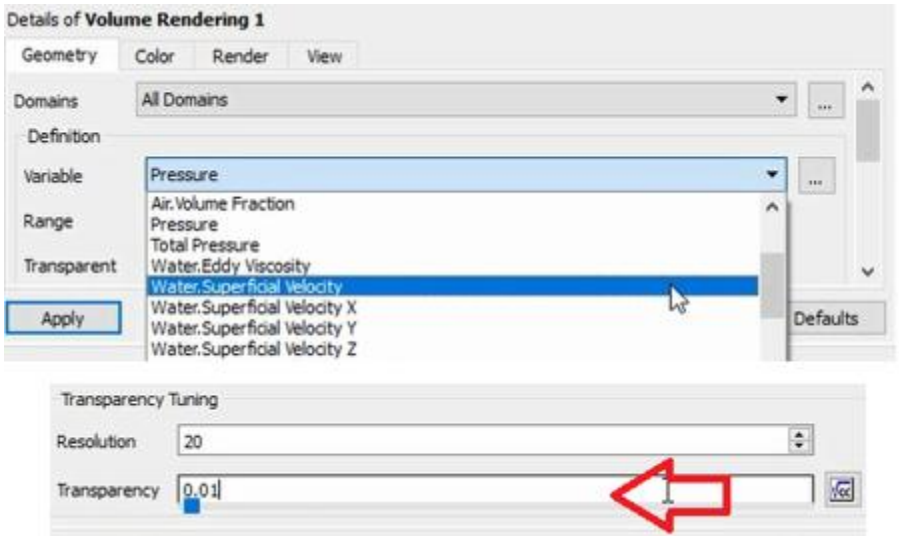
La herramienta Volume Rendering es utilizada para de ver el volumen de agua dentro de la cuenca, una vista general de todo el fenómeno.
La herramienta *Volume Rendering* se encuentra en la barra de tareas en la parte superior de la pantalla, el usuario luego de seleccionada la opción debe asignarle un nombre a su criterio.

Figura 75.Metodología: Ubicación de herramienta Volume Rendering. (Elaboración propia)



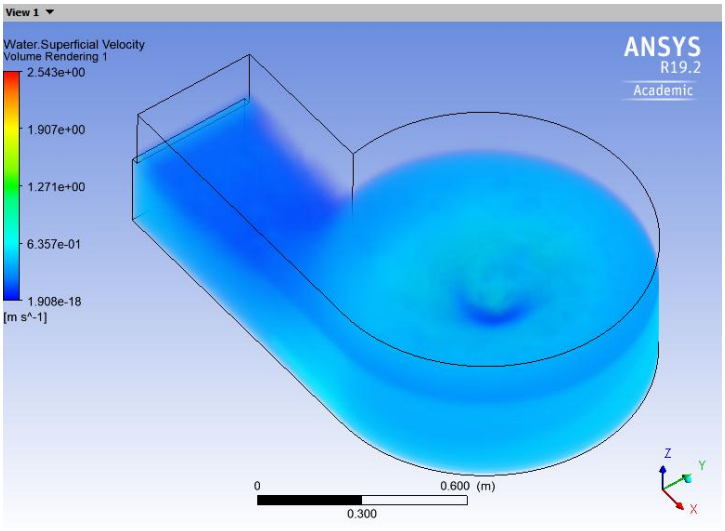
Inmediatamente en la pantalla en la parte inferior izquierda aparecerá una ventana, en ella el usuario debe definir la variable de trabajo. En la pestaña *Variable* debe buscar y seleccionar la opción *Water Superficial Velocity* y ajustar la transparencia de la gráfica, si el usuario indica una transparencia baja y una resolución por encima de 50 le será fácil poder ver el fenómeno

Figura 76.Metodología: Definición de variable y transparencia Volumen Rendering. (Elaboración propia)



Finalmente se aceptan los cambios, en pantalla aparecerá dentro de la cuenca el volumen de agua, allí se puede apreciar las magnitudes de las variables seleccionada en una escala de colores

Figura 77.Visualización de Volumen Rendering. (Elaboración propia)

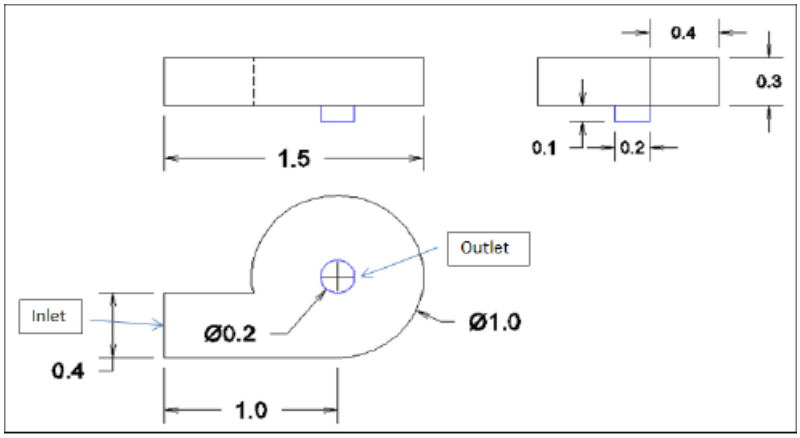


10. DESARROLLO DE LA PROPUESTA

10.1 SELECCIÓN DEL MODELO DE REFERENCIA Y VALIDACIÓN

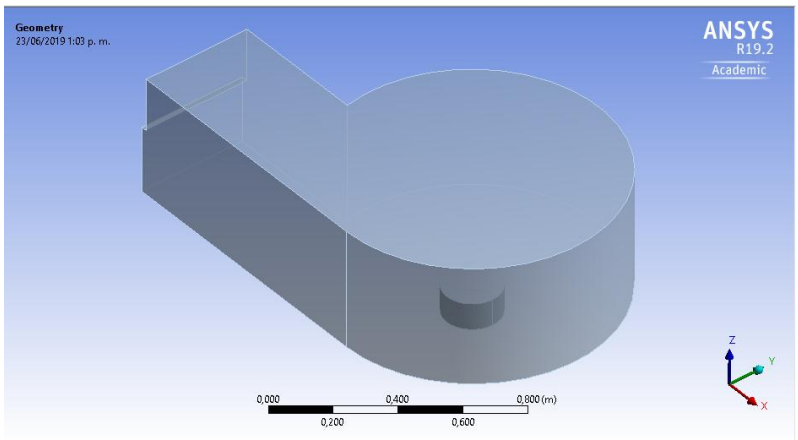
Para la selección del modelo de canal inicial se decidió tomar una geometría previamente diseñada, ya que el diseño de esta no pertenece a los objetivos del proyecto. Con la información recopilada en la fase de investigación previa se encontraron varias opciones, sin embargo, no todas proporcionaban información en cuanto a que valores de velocidad de entrada o caudal eran apropiados para el modelo, a excepción del modelo utilizado en el trabajo citado anteriormente “CFD Validation for Effcient Gravitational Vortex Pool System” (Validación CFD para un eficiente sistema de agrupación de vórtices gravitacionales). Este fue el modelo elegido para el desarrollo del trabajo.

Figura 78.plano del modelo de referencia. (Shabara et al., 2015)



A partir de este plano se realizó el modelo en software CAD

Figura 79 Modelo CAD de referencia. (Elaboración propia)



La concordancia de los datos obtenidos en la simulación con respecto a la información entregada por el trabajo *CFD Validation for Effcient Gravitational Vortex Pool System* es indispensable para tener una base sólida para empezar a variar características geométricas del diseño original

Para desarrollar la verificación fue necesario imitar las condiciones expuestas en el informe, de tal forma que los resultados sean similares. El informe consiste un estudio en el que se busca averiguar cuál es la altura de agua o nivel de agua más óptimo para que el vórtice desarrollado en el interior de la cuenca genere la máxima velocidad de salida. Para ello tomaron cinco niveles de referencia. 100mm, 150mm, 200mm, 250mm y 300mm.

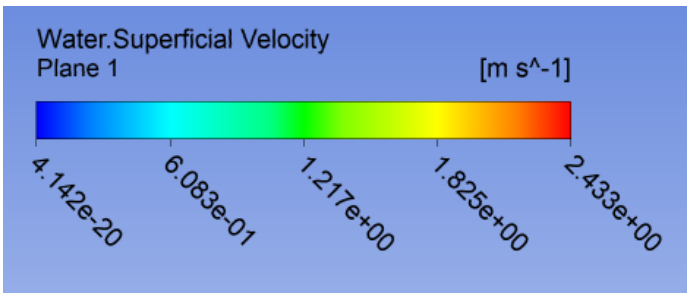
El estudio determinó que un nivel de agua de 300mm produce que el fluido a la salida de la cuenca genere 2,67 m/s en la simulación y 2,62 m/s experimental, la mayor velocidad de salida entre todas las posibles alturas contempladas. Para la altura de 300mm la velocidad de entrada a la geometría fue de 0,42m/s según indica el informe y finalmente expresa que el diámetro de salida utilizado para realizar las simulaciones fue de 100mm. A continuación, los resultados obtenidos:

Tabla 5.Velocidades de salida del Informe. (Shabara et al., 2015)

Water depth in mm	Inlet Velocity (m/s)	Fluent outlet Velocity (m/s)	Experimental Outlet Velocity (m/s)	% difference
100	0.27	1.91	2.06	7%
150	0.31	2.12	2.22	4%
200	0.20	2.45	2.56	4%
250	0.53	2.32	2.33	0%
300	0.42	2.67	2.62	-2%

La metodología utilizada para realizar las simulaciones fue explicada en el capítulo anterior de este trabajo. La simulación arrojo los siguientes resultados de velocidad:

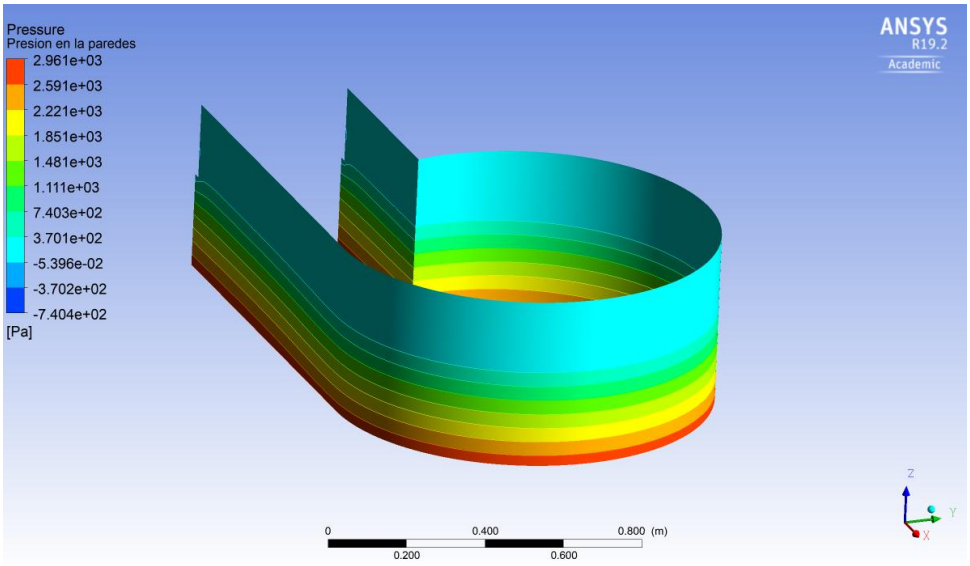
Figura 80 Validación de resultados. (Elaboración propia)



La velocidad máxima se registró en la salida de la cuenca con un valor de 2.433m/s, a partir de ello se puede validar que efectivamente los datos obtenidos en la simulación son bastantes similares al valor experimental obtenido por los ingenieros que fue de 2.62m/s lo que representa un porcentaje de error del 7.1%. De esta forma se corrobora que la simulación arroja resultados consistentes, sin embargo, la simulación permite observar aspectos destacables en la dinámica del fluido que el lector en el informe original no permite ver por ejemplo la distribución de la presión.

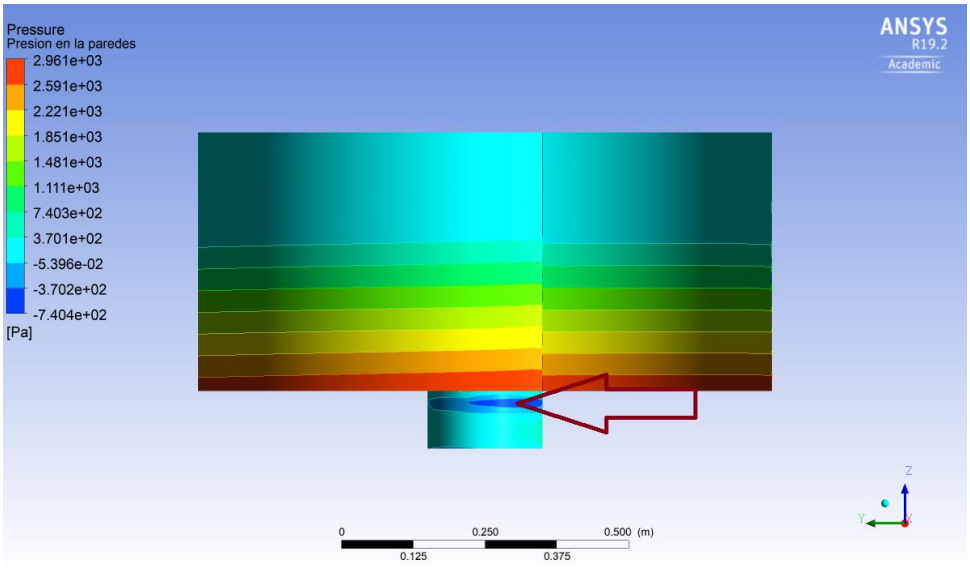
El diagrama de presiones expresa los valores en las paredes de la cuenca, en el fondo se localizan las presiones máximas con un valor de 2961Pascales y a medida que nos desplazamos verticalmente se puede observar que va disminuyendo la magnitud de la presión hasta igualar la presión atmosférica

Figura 81. Distribución de la presión en el sistema. (Elaboración propia)



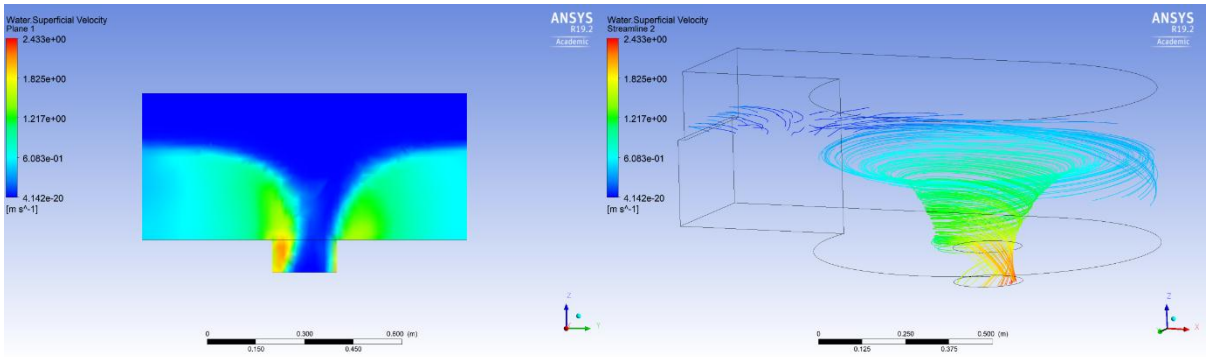
Un hecho destacable es que la presión cerca del agujero de descarga tiende a bajar hasta un valor mínimo de -740 Pascales, ya que fluido aumenta su velocidad. Tiene sentido de acuerdo a la Ecuación 4, donde la velocidad angular del vórtice estará en función de la distancia que tenga con su eje de rotación. La siguiente figura permite visualizar la ubicación de la zona con valor mínimo y máximo de presión

Figura 82 Vista de perfil de la distribución de la presión. (Elaboración propia)



En la vista en corte se aprecia que el eje de rotación del vórtice no pasa por el centro del agujero de salida, se evidencia que mucha de la energía que llevaba el fluido se pierde, ya que este se estrella con el fondo de la cuenca, generando una distribución desigual de la energía cinética. Es necesario que la velocidad del fluido se distribuya simétricamente alrededor de la salida para obtener un mejor rendimiento de la turbina

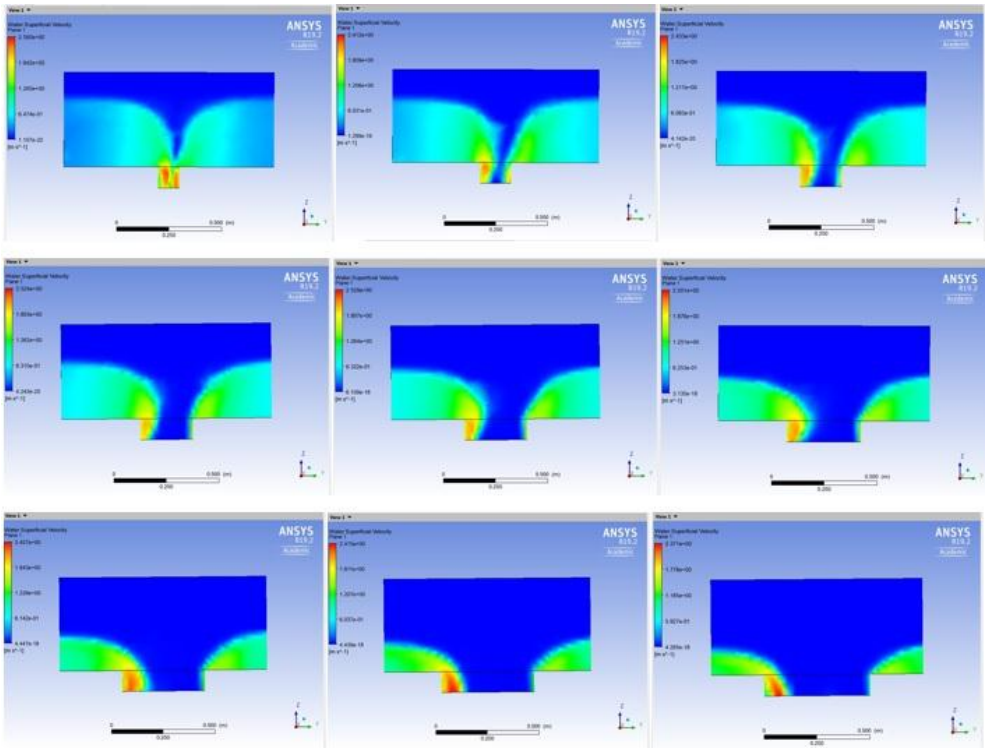
Figura 83.Vista en corte (izquierda) y Streamline (derecha) del vórtice. (Elaboración propia)



10.2 VARIACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS: CAMBIO DE DIAMETRO

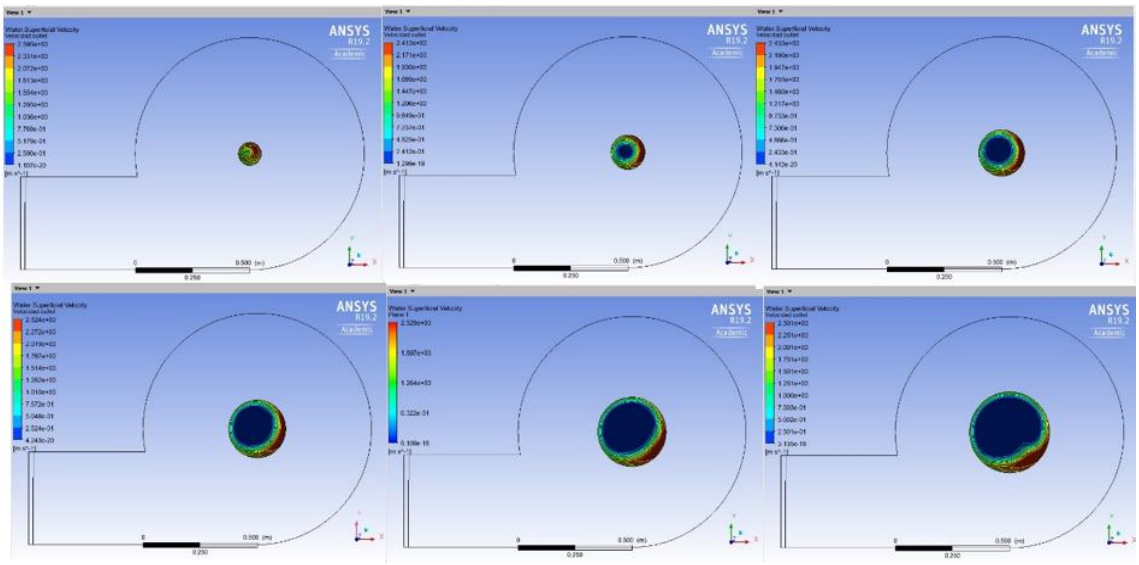
Para el desarrollo del proyecto inicialmente se dibujaron nueve modelos CAD variando el diámetro de descarga desde 100mm a 500mm con intervalos de 50mm cada uno, para poder estudiar el comportamiento del vórtice. A continuación, se presentan los resultados de velocidad del agua en vista de corte

Figura 84 Distribución de velocidades en vista de corte fondo plano. (Elaboración propia)



Se puede observar que existe una relación entre el diámetro de descarga y el núcleo de aire que experimenta el vórtice, en otras palabras, si el agujero de salida crece así mismo se hará mayor el núcleo de aire. No es conveniente que el núcleo de aire aumente su diámetro, porque le resta espacio al agua para impulsar los alabes de la turbina ubicada a la salida de la cuenca. Por otro lado, la excentricidad del vórtice persiste. A continuación, se presenta un diagrama de fases en la salida de cuenca usando como variable la velocidad del agua.

Figura 85 Distribución de velocidades en vista superior fondo plano. (Elaboración propia)



La figura 82 corresponde a diámetros de salida entre 100mm hasta 350mm, dicha figura ratifica la sentencia de que el diseño no permite una distribución simétrica de las velocidades en la salida de la cuenca.
Con respecto a las magnitudes de velocidad, la siguiente tabla presenta los valores máximos en el agujero de descarga.

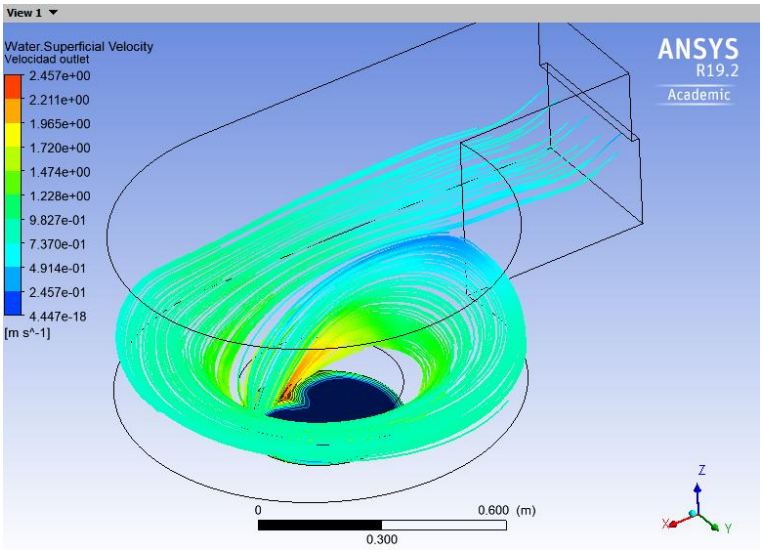
Tabla 6.Velocidades máximas a la salida modelos fondo plano. (Elaboración propia)

Diámetro de agujero de descarga (mm)	Velocidad máxima (m/s)
100	2,59
150	2,412
200	2.431
250	2,524
300	2,529

El valor más alto de velocidad se obtiene con un diámetro de 100mm, pero los diámetros que le siguen no poseen una diferencia considerable en magnitud, sin embargo, siendo reiterativos la cantidad de masa de agua que golpea los alabes de la turbina no es demasiada, dado que el diámetro del núcleo de aire abarca gran parte del área del agujero de descarga.

Diseños con diámetro de salida de 350mm o superiores, ni siquiera permiten la generación de un estado de vórtice completo, ya que fluido solo da una vuelta por el perímetro de la cuenca y sale de ella como se ve a continuación:

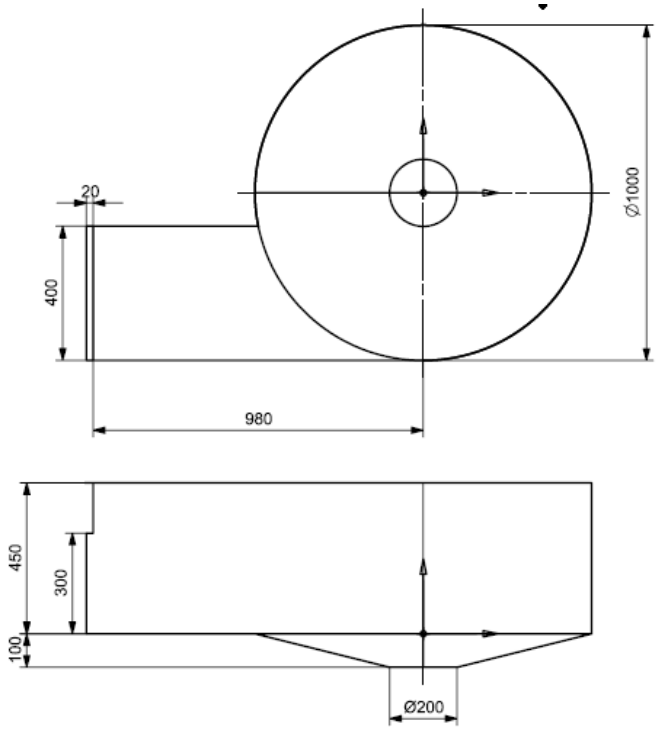
Figura 86 Streamline cuenca de 350mm. (Elaboración propia)



10.3 VARIACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS: CAMBIO DE FONDO

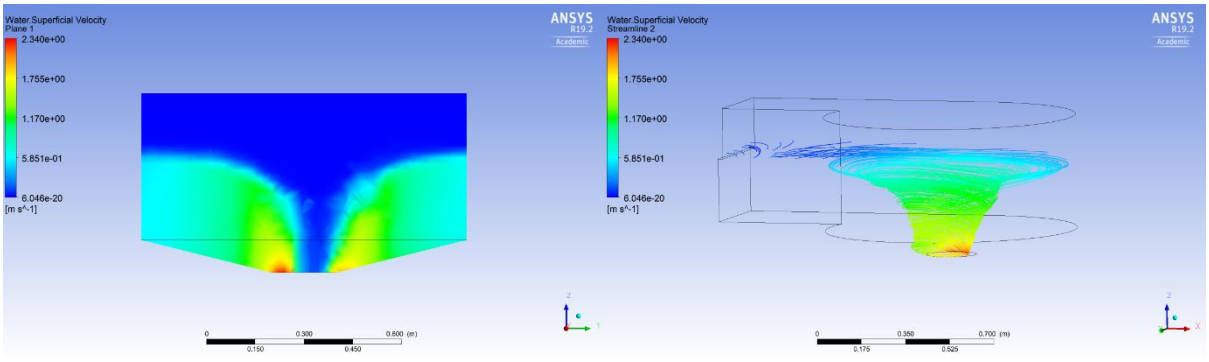
A partir de los datos anteriores surgió la necesidad de modificar el diseño original de la cuenca en busca de mejorar la dinámica del fluido. Un diseño que consiguiera suavizar el paso del vórtice cerca del fondo de la cuenca y brindar resultados más simétricos a la salida de la cuenca.
Se sugirió cambiar el fondo plano del diseño original por un fondo cónico en forma de cono, la conicidad se construye uniendo agujero de descarga con el diámetro mayor.

Figura 87. Diseño modificado. (Elaboración propia)



Para corroborar la viabilidad del diseño se planteó una nueva simulación con utilizando el diseño de cuenca de fondo cónico con diámetro de 100mm de salida y revisar su comportamiento en comparación a la simulación original del informe: “CFD Validation for Effcient Gravitational Vortex Pool System”.

Figura 88 Vista en corte (izquierda) y Streamline (derecha) del vórtice de cuenca de fondo cónico. (Elaboración propia)

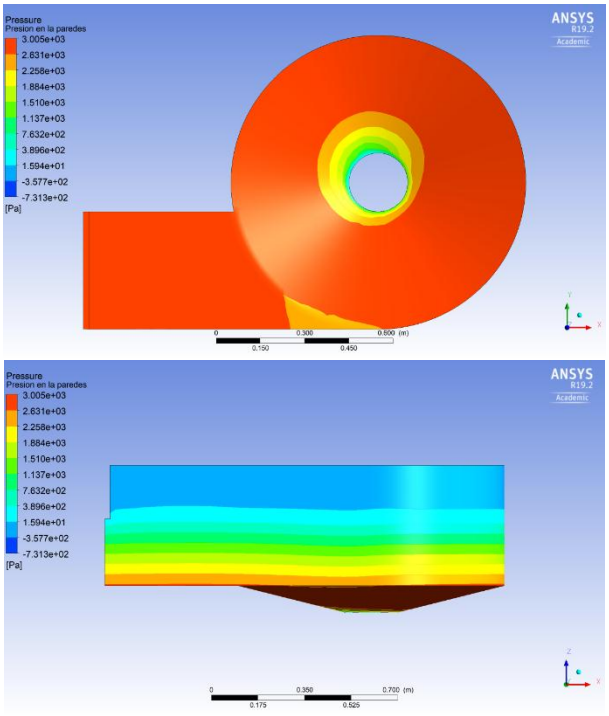


El primer hecho destacable es que la velocidad del agua a la salida de la cuenca disminuyó a un valor de 2.34m/s, ya que en la simulación original registro un valor de 2.43m/s, lo que implica un decrecimiento del 3.7% en la velocidad. La

excentricidad del vórtice persiste, pero la conicidad del nuevo diseño genera que el choque con el fondo no sea tan agresivo y redirija el flujo de agua hacia la salida, esto se puede corroborar en la vista del corte de la figura 91, en ella se puede observar como la región aledaña a la salida la velocidad es máxima y está totalmente concentrada

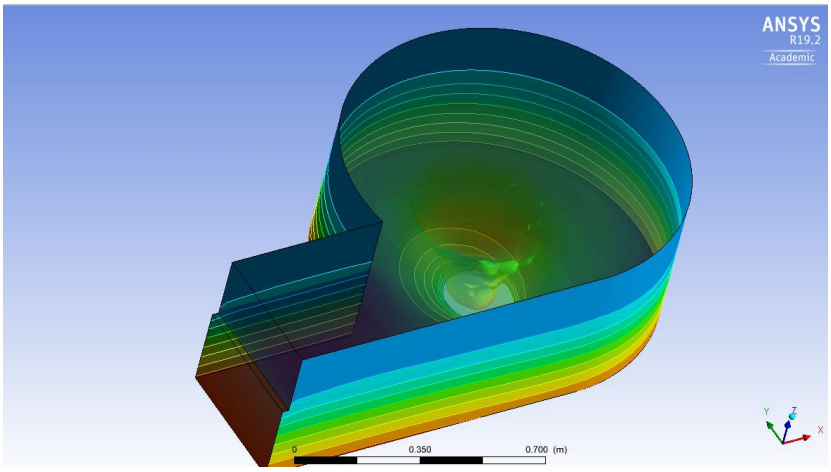
Con respecto a las presiones, el reparto de ellas parece ser más uniforme como se aprecia en la siguiente figura,

Figura 89. Distribución de la presión cuneca fondo cónico. (Elaboración propia)



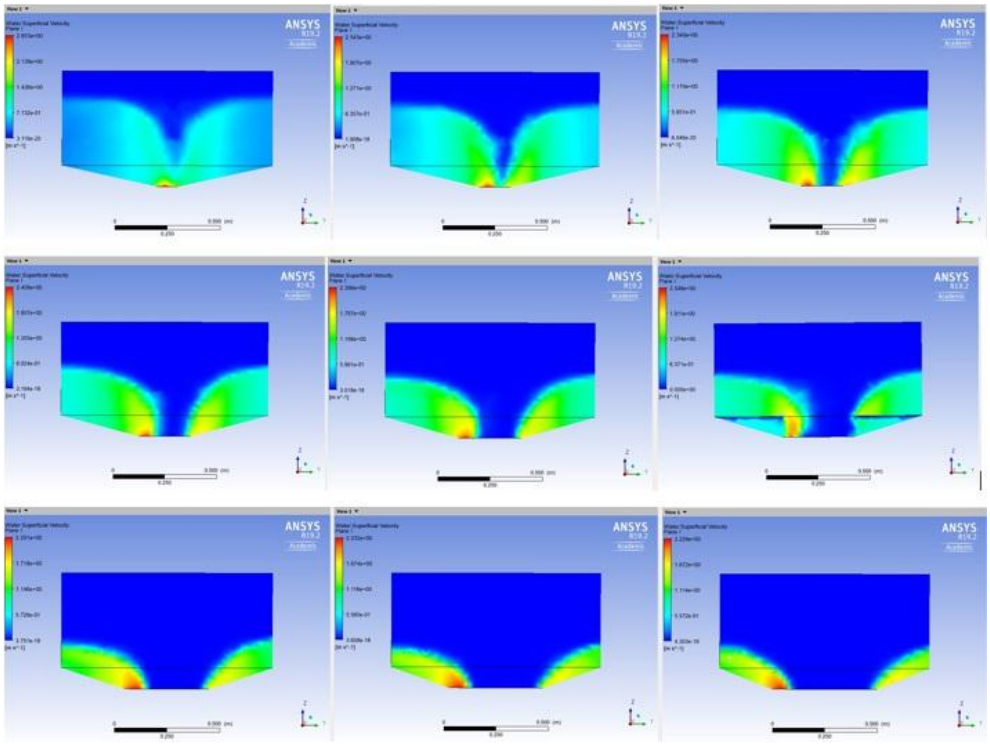
Tal simetría es producto de la inclusión de la conicidad al diseño, ya que el fluido se desliza a lo largo de la superficie hasta encontrar la salida, conforme se acerca al agujero de salida aumentara la presión en dicha región hasta un valor máximo de 3005 Pascales (región roja). La región con la presión máxima posee una sección con una presión un poco más baja, debido a la excentricidad que posee el vórtice.

Figura 90Excentricidad del vórtice con respecto al centro del desagüe. (Elaboración propia)



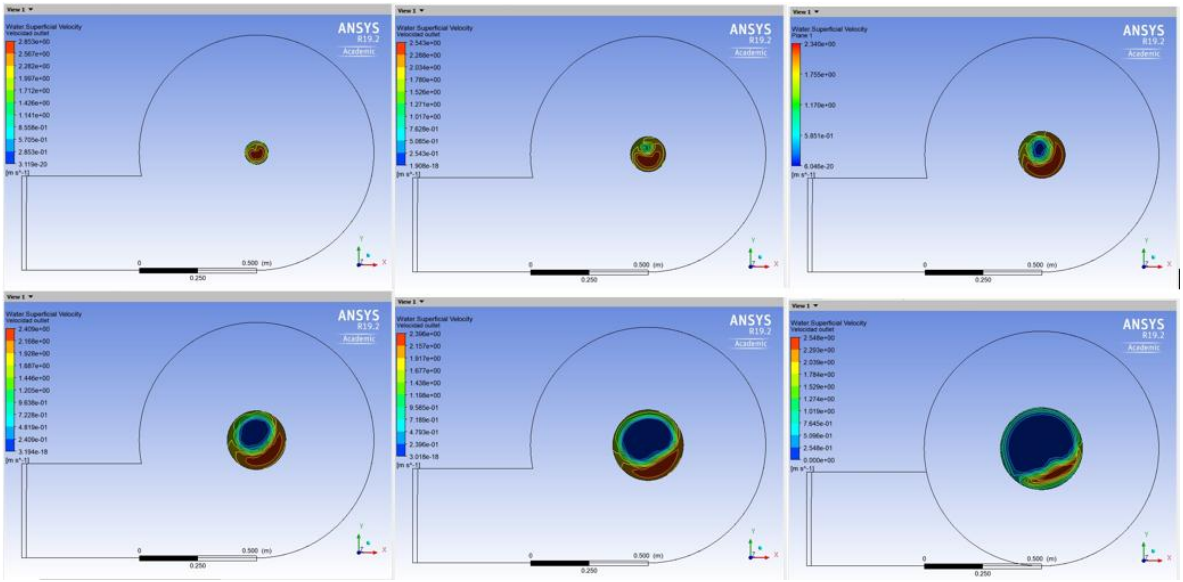
Luego de observar el desempeño del nuevo diseño, la metodología de trabajo consistió en repetir el proceso de cambio diámetros de salida y observar el comportamiento del fluido. Se dibujaron nueve modelos CAD con el fondo cónico, utilizando el mismo rango de 100mm a 500mm espaciados en intervalos de 50mm. A continuación, los resultados obtenidos en vista de corte

Figura 91. Distribución de velocidades en vista de corte fondo cónico. (Elaboración propia)



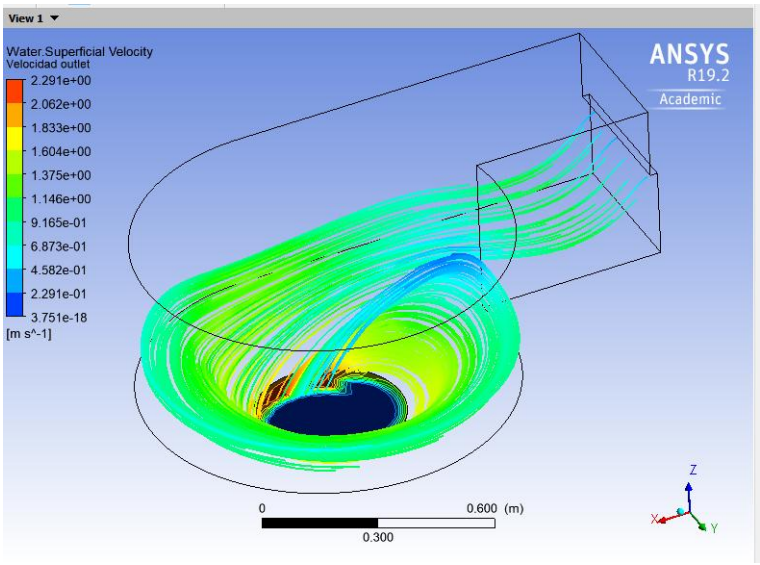
El diagrama en corte de velocidades revela una nueva distribución, dicha distribución es más simétrica a lo que respecta la dinámica del fluido, probablemente debido a que la conicidad ayuda al fluido a encontrar el camino a la salida de cuenca, por otro lado, se observa una disminución en el diámetro del núcleo de aire
A continuación, se presenta un diagrama de fases en la salida de cuenca usando como variable la velocidad del agua.

Figura 92.Distribución de velocidades en vista superior fondo cónico. (Elaboración propia)



La distribución de velocidades a la salida en el nuevo diseño toma la forma de anillo para los diámetros de descarga entre 100mm a 350mm, además las áreas marcadas con altas en velocidades cubren gran parte del área del círculo de salida, particularidad que no ocurría en el diseño original, pero para diseños de 350 en adelante la vorticidad no se completa, así que se vuelve deficiente su implementación

Figura 93 Streamline cuenca de 350mm. . (Elaboración propia)



Con respecto a las magnitudes de velocidad, la siguiente tabla presenta los valores máximos en el agujero de descarga

Tabla 7.Velocidades máximas salida modelo de fondo cónico. (Elaboración propia)

Diámetro de agujero de descarga (mm)	Velocidad máxima (m/s)
100	2,853
150	2,543
200	2,34
250	2,409
300	2,39

Se debe decir que la magnitud de velocidad debe de ir de la mano con la forma en se distribuye la velocidad en el agüero de descarga, ya que velocidades altas sin una buena dinámica no permite extraer todo el potencial que las turbinas de vórtice pueden ofrecer

10.4 ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS

Para este trabajo las variables de interés son la velocidad y la presión ya que influyen directamente en la formación y el comportamiento del vórtice.

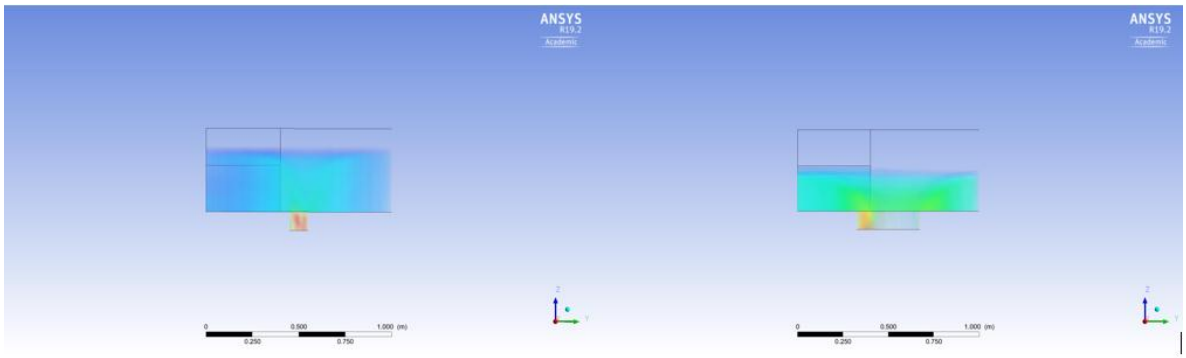
Inicialmente se analizan los resultados del modelo de referencia inicial y se observa que los valores de velocidad y presión obtenidos son bastante cercanos a los

expuestos en el trabajo citado, por lo que se infiere que la metodología empleada para realizar las simulaciones es correcta.

Inicialmente se pudo observar que se presentaban algunos patrones de comportamiento del fluido comunes en todos los modelos simulados. El primero de estos es el aumento del tamaño del núcleo del vórtice a la par del aumento del diámetro de desagüe (aplica para las cuencas de fondo cónico) como se puede observar en las figuras 84 y 91 con este comportamiento se pudo inferir que el diámetro de desagüe es un factor geométrico delimitante en la cuenca ya que de aumentarse el diámetro lo suficiente el núcleo de aire cubriría un gran porcentaje de la turbina y por ende esta no recibiría suficiente energía cinética.

La altura total del vórtice fue otra de las dimensiones que se alteraron con el cambio de diámetro de desagüe se pudo evidenciar que la relación entre la magnitud del diámetro de desagüe y la altura del vórtice es inversamente proporcional, al aumentar el diámetro de desagüe la altura del vórtice se disminuye esto se puede apreciar en las figuras 84 y 91, sin embargo, Ansys nos proporciona una herramienta de visualización llamada “Volumen Rendering” que nos permite observar el volumen de agua presente lo que nos permite comparar las alturas de vórtice de una forma más clara:

Figura 94 Altura vórtice diámetro 100mm (izquierda) y 350mm (derecha). (Elaboración propia)



Es evidente que para la cuenca con desagüe de 100mm tiene una altura mayor a la cuenca que cuenta con un desagüe de 350mm.

9.4.1 Cuenca de fondo plano:

Como se mencionó anteriormente existe una pérdida de energía cinética debido al choque directo del flujo con las paredes del desagüe, casualmente estos valores corresponden a los valores máximos de velocidad en la salida obtenidos por el software, sin embargo, estos valores no son aprovechados por la turbina. Continuando con la observación de resultados se pudo notar que al aumentar el diámetro de desagüe este porcentaje del fluido que choca empieza a tener una tendencia a rotar parcialmente como se puede observar en las siguientes imágenes:

Figura 95 Rotación del fluido de choque diámetro 150mm. . (Elaboración propia)

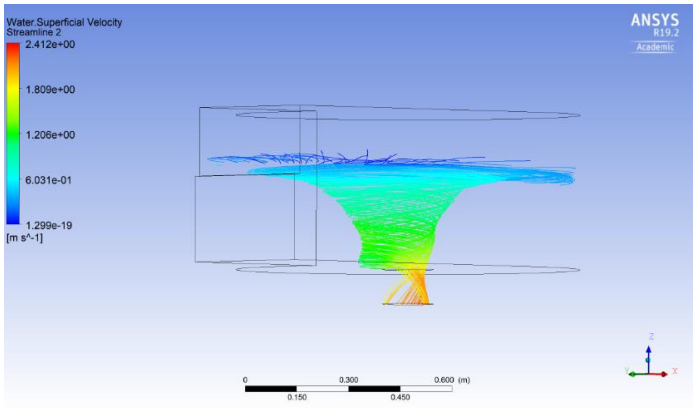
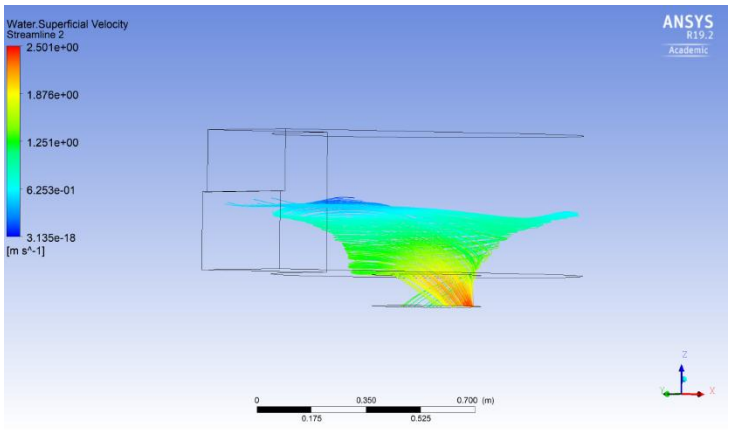
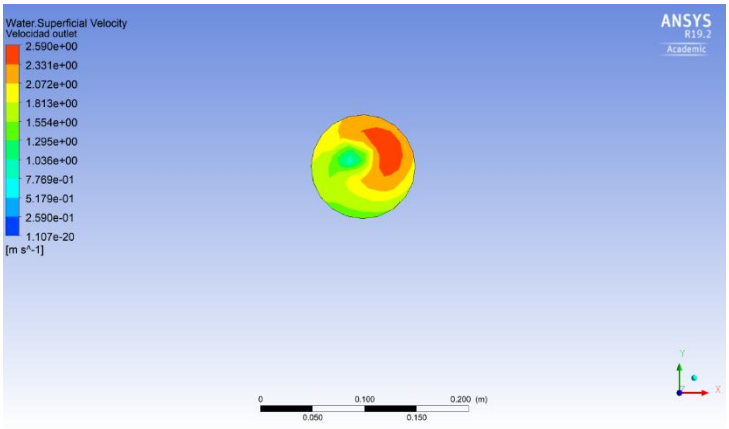


Figura 96 Rotación del fluido de choque diámetro 350mm. (Elaboración propia)



Como se puede ver el flujo que choca contra el desagüe tiende a rotar parcialmente al borde del desagüe lo que explica la distribución inesperada de las velocidades a la salida del desagüe:

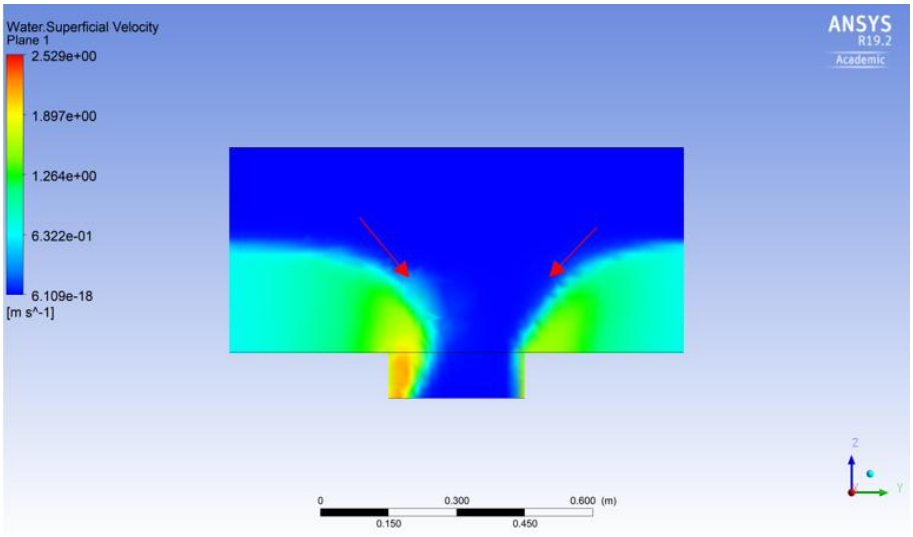
Figura 97 Distribución de la velocidad en la salida (100mm). (Elaboración propia)



Inicialmente se esperaba que la distribución de la velocidad a la salida describiera un patrón similar a la de varios anillos concéntricos de diferente diámetro donde los valores máximos de velocidad se presentarían en los anillos exteriores y se llegó a la conclusión de que irregularidad en la distribución de las velocidades se debían al choque anteriormente mencionado.

Como se dijo anteriormente las velocidades máximas que se observaban en los resultados no pertenecían a las magnitudes que realmente aprovecharía la turbina puesto que esta estaría ubicada en el fondo, es decir; encima del desagüe, si no que se encuentran un poco más arriba donde las velocidades son ligeramente menores:

Figura 98 Velocidades de trabajo de turbina (300mm). (Elaboración propia)



En la figura 98 se puede observar claramente que la velocidad máxima registrada corresponde a un valor de 2.529 m/s, pero realmente las velocidades de interés corresponden a las velocidades ubicadas alrededor del núcleo justo antes de entrar al desagüe. Tomando los valores de velocidad ubicados en esta región del vórtice para todos los modelos se realizó la siguiente tabla:

Tabla 8.velocidades de trabajo modelo de fondo plano. (Elaboración propia)

Velocidad de trabajo (m/s)	Diámetro de desagüe (mm)
1.295	100
1.206	150
1.217	200
1.262	250
1.897	300
1.87	350
1.84	400
1.81	450
1.77	500

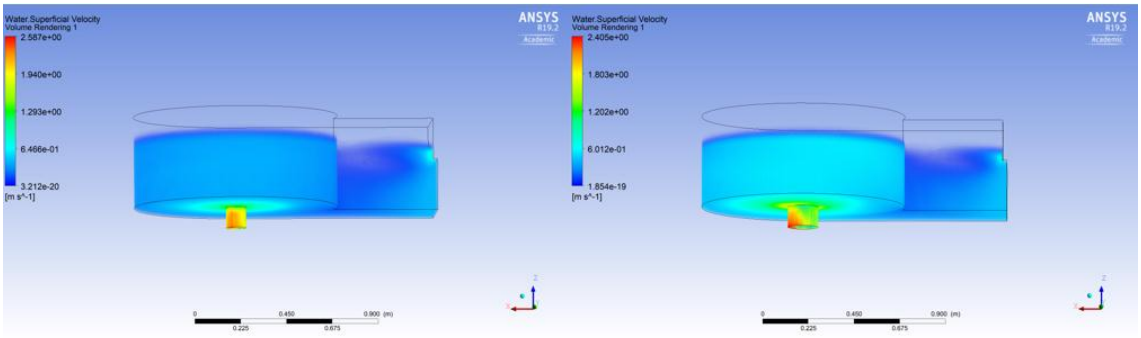
Basados en los datos de la tabla se pudo deducir que inicialmente los valores de velocidades en estas zonas iban en aumento conforme aumenta el diámetro de desagüe hasta un valor máximo de 1.897 m/s correspondiente a la cuenca con diámetro de 300mm y posteriormente se inicia un deceso en la magnitud de estas velocidades. Este descenso de velocidades se puede explicar acudiendo al hecho de que a partir de estos diámetros el fluido empieza a perder vorticidad, es decir, se reduce el número de revoluciones que da el fluido y eventualmente no se alcanzaría

a formar un vórtice como se observó en la figura 89 donde se observó que el fluido apenas da una vuelta y cae directamente al desagüe.

Estos aumentos de velocidad en función del incremento del diámetro no son únicamente propios de las zonas de velocidad de la turbina, sino que también aumenta la velocidad de todo el volumen de agua en su totalidad como se puede ver en las siguientes imágenes:

Figura 99 Velocidad del agua (100mm-izquierda) y

Velocidad del agua (150mm-derecha). (Elaboración propia)

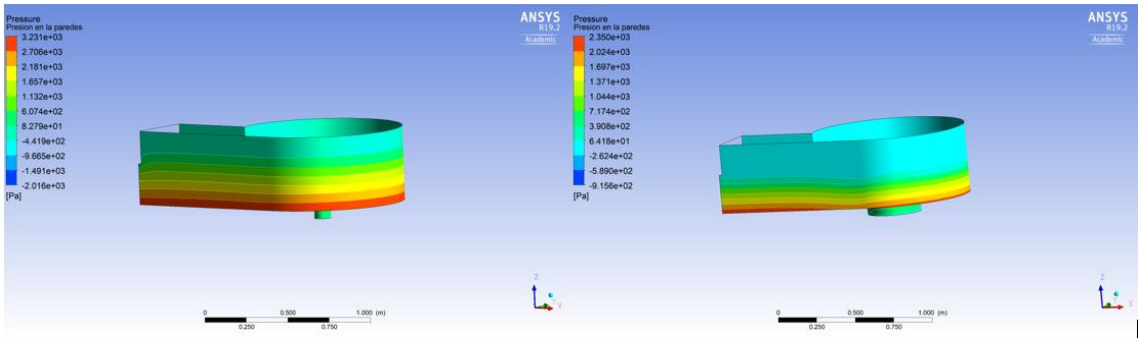


Nótese el cambio del tono del color conforme se presentan las imágenes correspondientes a 100 mm y 150 mm, inicialmente con un color azul predominante en la primera cuenca hasta cambiar a un tono mucho más claro y aparición de tonos verdes y amarillos en la segunda cuenca lo que demuestra el aumento de velocidad.

En cuanto al comportamiento y variación de la presión cabe mencionar que existen dos zonas críticas donde la presión varia más bruscamente que son el fondo del canal donde se espera las presiones máximas debido a que sobre este se ubica la totalidad del volumen de agua y la salida del desagüe donde se supone que esta el núcleo de aire y las presiones son mínimas. A continuación, se muestra la distribución de la presión en las paredes de varios canales:

Figura 100 Distribución de la presión (100mm) y

Distribución de la presión (350mm). (Elaboración propia)



Lo primero que se puede notar es la variación de la altura de la franja de presión superior, esto se debe a que como se dijo anteriormente la altura del vórtice de agua disminuye con el aumento del diámetro de desagüe por lo que el fluido que reemplaza al agua en esa zona es el aire y se mide la presión que ejerce el aire sobre esta zona

De estas imágenes de distribución de presión se pudo deducir que existe un patrón de disminución de la presión en el fondo del canal (donde se presentan las presiones máximas) a medida que el desagüe incrementaba su tamaño, con los valores arrojados por las imágenes se realizó la siguiente tabla:

Tabla 9.Valores de presión fondo modelo fondo plano. (Elaboración propia)

Presión en el fondo (KPa)	Diámetro de desagüe (mm)
3.23	100
3.094	150
2.96	200
2.8	250
2.61	300
2.35	350
2.095	400
1.902	450
1.74	500

Se puede observar que la presión en el fondo varía desde 3.23 KPa para el desagüe de 100mm hasta una presión de 1.74KPa para el desagüe de 500mm.

Por otro lado, el comportamiento de la presión en el desagüe es semejante, con el aumento del diámetro de desagüe se reduce la presión en la salida:

Figura 101 Distribución de la presión en el desagüe (100mm). (Elaboración propia)

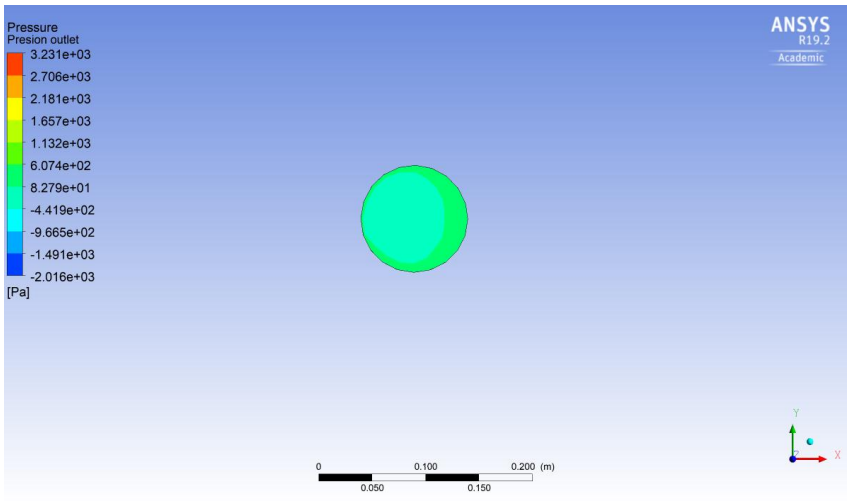
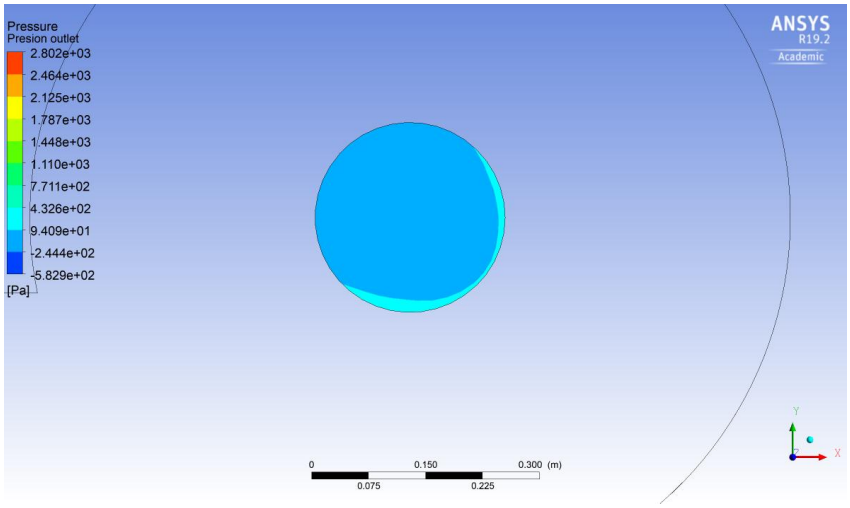


Figura 102 Distribución de la presión en el desagüe (250mm). (Elaboración propia)



Finalmente se pudo concluir que la presión es otra variable delimitante debido a que a magnitudes muy altas o muy bajas de presión posiblemente el canal y la turbina no puedan trabajar en estas condiciones, aunque el estudio de esto no pertenece a los objetivos del trabajo.

9.4.2 Cuenca de fondo cónico:

Una de las principales desventajas del modelo de fondo plano es lo que se denominó choque del fluido con las paredes del desagüe en la sección anterior, esta geometría con fondo cónico se pensó para suavizar la magnitud de este impacto estos fueron los resultados:

Figura 103 Vórtice en cuenca con fondo cónico (150mm). (Elaboración propia)

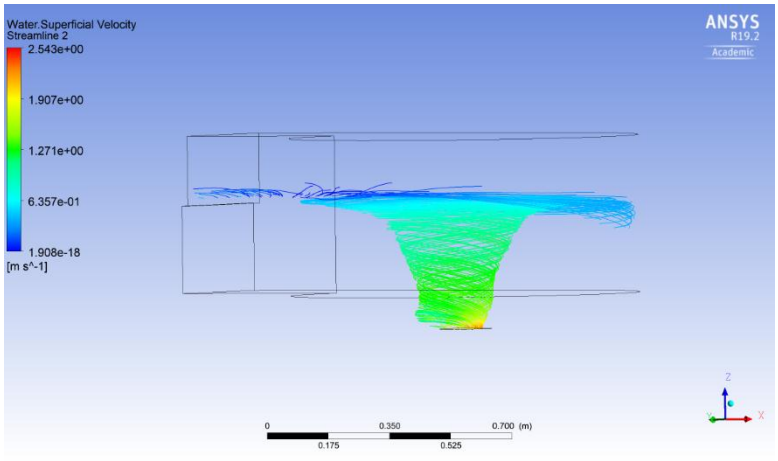
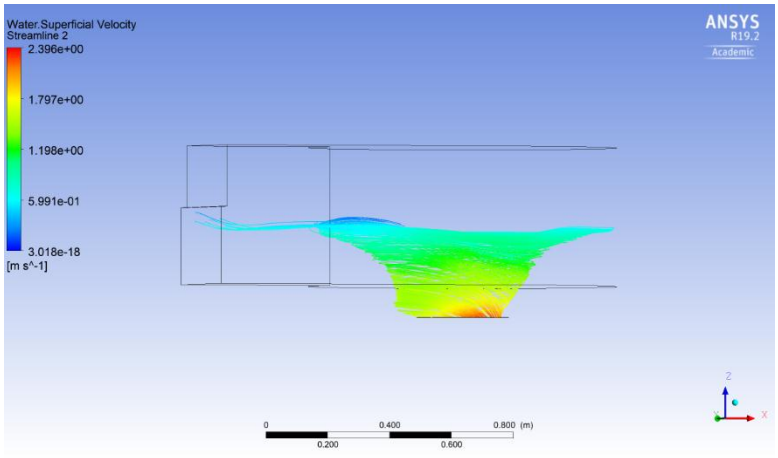


Figura 104 Vórtice en cuenca con fondo cónico (300mm). (Elaboración propia)

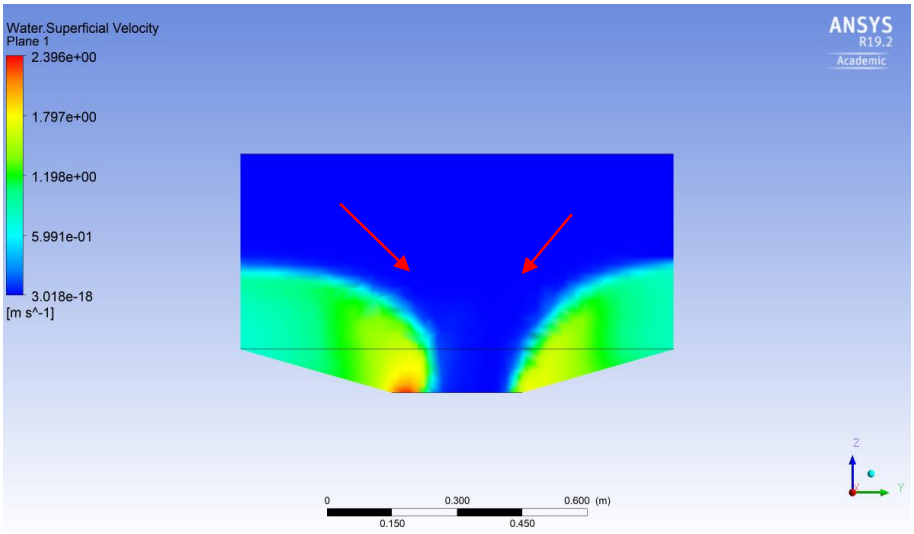


Lo primero que se pudo notar es que para la geometría con fondo cónico no presenta el choque propio de la geometría plana y se puede observar que se consolida un vórtice completo hasta la salida del desagüe. También cabe recalcar un detalle muy importante en cuanto a la distribución de la velocidad en el vórtice en el modelo anterior de fondo plano se podía observar que las velocidades más altas se presentaban solamente en la zona inferior, sin embargo, para esta geometría de fondo cónico este rango de velocidades abarca una zona más amplia

del vórtice, esto se denota por el rango de colores en el vórtice donde se observan tonos amarillos y verdes en la mayor parte del núcleo, por el contrario para geometrías de fondo plano se observan estos tonos solo en la parte inferior.

Como se había dicho en la sección anterior los valores máximos registrados de velocidad se debían a los choques del fluido con las paredes del desagüe donde estos valores de velocidad no eran realmente a los que trabajaba la turbina. Para el caso de la cuenca de fondo cónico este rango de velocidades de trabajo es ligeramente más amplio en comparación:

Figura 105 Velocidad de trabajo cuenca fondo cónico (250mm). (Elaboración propia)



Análogamente con las geometrías de fondo cónico se realizó una tabla con los resultados obtenidos de estas velocidades de trabajo para los modelos de fondo cónico, estos fueron los resultados:

Tabla 10.Velocidades de trabajo modelo fondo cónico. (Elaboración propia)

Velocidad de trabajo (m/s)	Diámetro de desagüe (mm)
1.426	100
1.271	150
1.755	200
1.807	250
1.797	300
1.911	350
1.718	400
1.674	450
1.672	500

Comparando ambas geometrías de cuenca se encuentra que la geometría de fondo plano en promedio cuenta con mayores velocidades de trabajo, sin embargo, la geometría de fondo cónico cuenta con una mejor distribución de la velocidad en el vórtice.

Al igual que las cuencas de fondo plano el comportamiento de la velocidad en el volumen de agua se mantiene, es decir, al aumentar el diámetro de desagüe la velocidad en todo el volumen de agua dentro del vórtice también aumentará. A continuación, algunas imágenes que lo ilustran:

Figura 106 Velocidad del agua fondo cónico (100mm). (Elaboración propia)

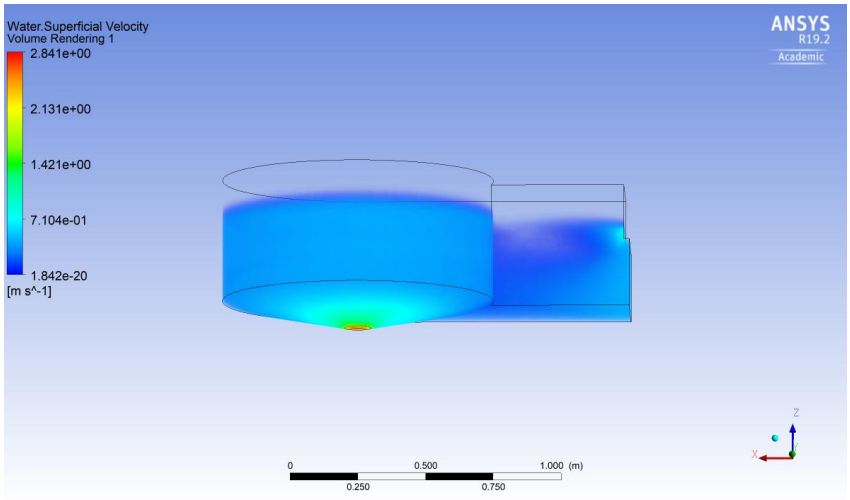
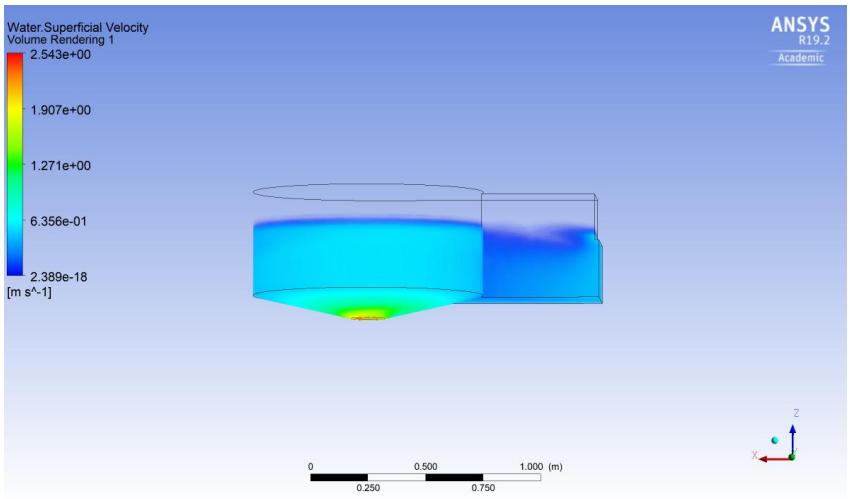


Figura 107 Velocidad del agua fondo cónico (150mm). (Elaboración propia)



Se puede observar que para un diámetro de desagüe de 100mm se muestra un tono de azul más oscuro que para la cuenca otra cuenca (150mm) lo que representa lo anteriormente dicho.

El comportamiento de la presión en este modelo de cuenca tuvo un comportamiento equivalente al de la geometría analizada en la sección anterior con disminuciones de la presión en función del aumento del tamaño del desagüe:

Figura 108. Distribución de la presión en las paredes fondo cónico (100mm). (Elaboración propia)

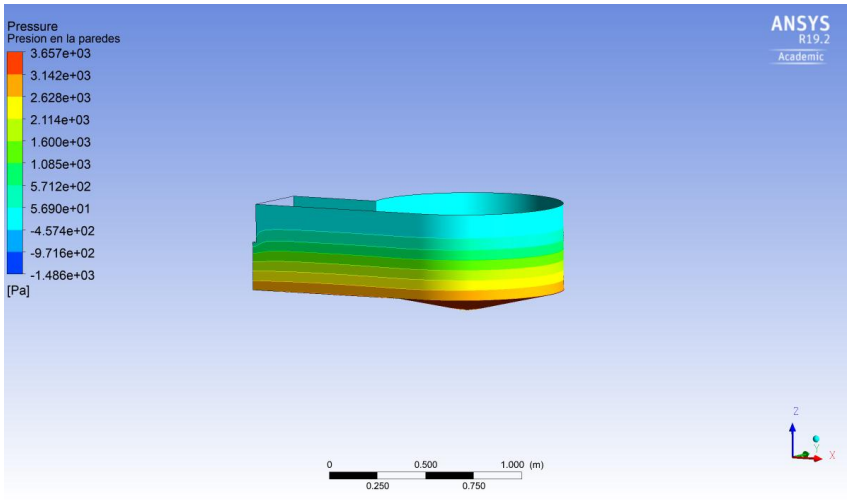
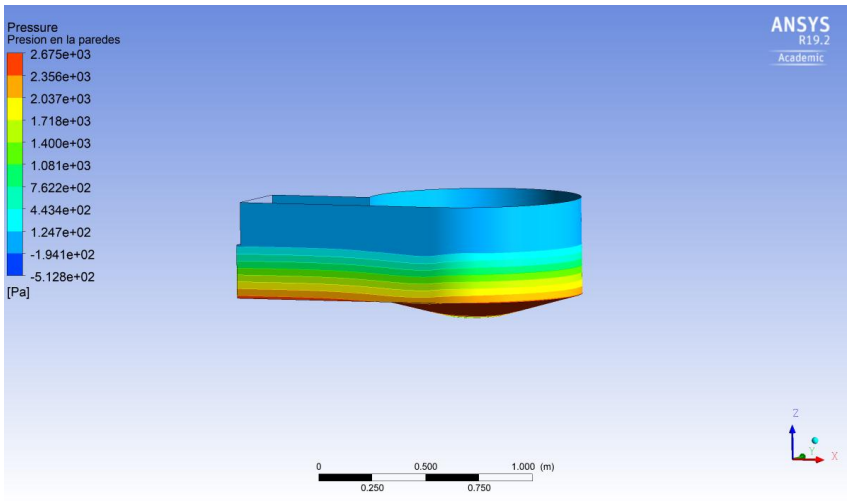


Figura 109 Distribución de la presión en las paredes fondo cónico (250mm). (Elaboración propia)



Al igual que con la geometría analizada anteriormente la disminución de la altura del vórtice da cabida a la presencia de aire en la parte superior del canal lo que como consecuencia produce el aumento de la altura de la franja superior de presión debida al aire. A continuación, los valores de presión en el fondo para todos los modelos de fondo cónico

Tabla 11.Presiones en el fondo modelos de fondo cónico. (Elaboración propia)

Presión en el fondo (KPa)	Diámetro de desagüe (mm)
3.657	100
3.283	150
3.005	200
2.675	250
2.318	300
2.355	350
1.767	400
1.547	450
1.5	500

Una pequeña diferencia encontrada entre los dos modelos fueron las caídas de presión en la salida del modelo de fondo cónico ya que se presentaron presiones más bajas en comparación con las presiones obtenidas para el modelo anterior y la distribución de estas presiones también fue un poco más simétrica ya que podía observarse claramente la zona de vacío donde se presentaban las presiones más bajas:

Figura 110 Distribución de la presión en la salida fondo cónico (100mm). (Elaboración propia)

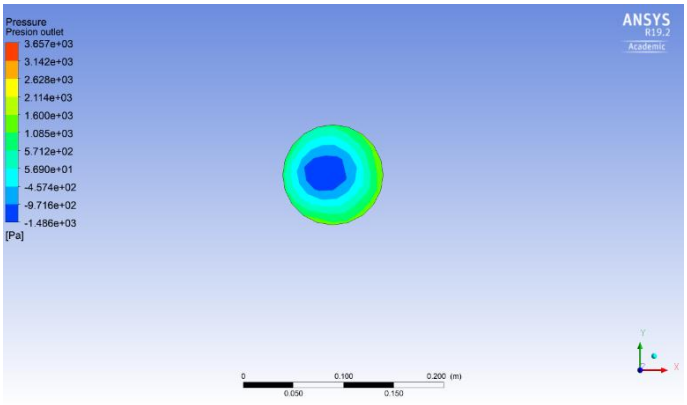
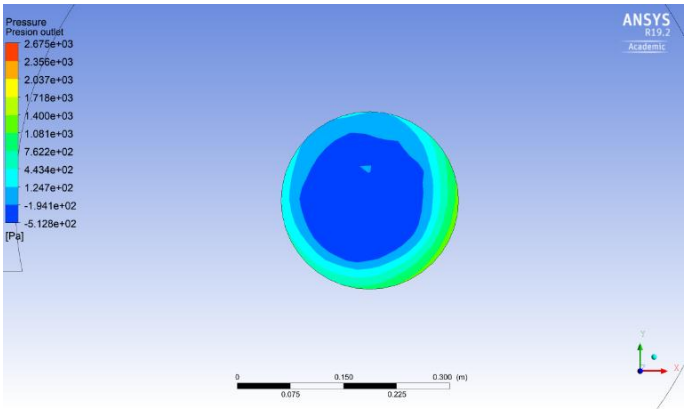


Figura 111 Distribución de la presión en la salida fondo cónico (250mm). (Elaboración propia)

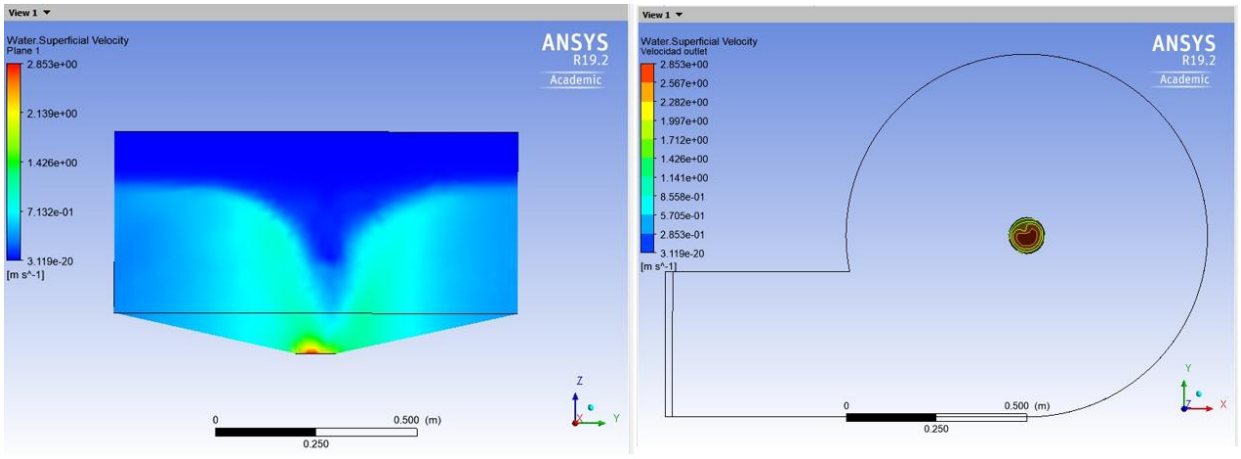


Una vez identificados aspectos referentes a la dinámica del fluido es necesario vincular los resultados obtenidos con el tipo de turbina que será instalada en la sección circular de la cuenca, si hablamos de una turbina de flujo axial o de flujo tangencial, su posición y diseño implica detalles a tener en cuenta para poder sacar el mejor provecho de cada una de ellas.

Las turbinas de flujo axial para su óptimo funcionamiento requieren que la magnitud de velocidad del agua a la salida de la cuenca sea lo más alta posible y simétrica.

El diseño modificado de cuenca de fondo cónico demuestra tener mejores resultados que su contraparte de fondo plano, específicamente el diseño con diámetro de salida de 100mm. Dicho se posiciona como el mejor, ya obtuvo un valor máximo de velocidad de 2.853m/s a la salida y una distribución de velocidad simétrica que abarcada la mayor parte del área de descarga.

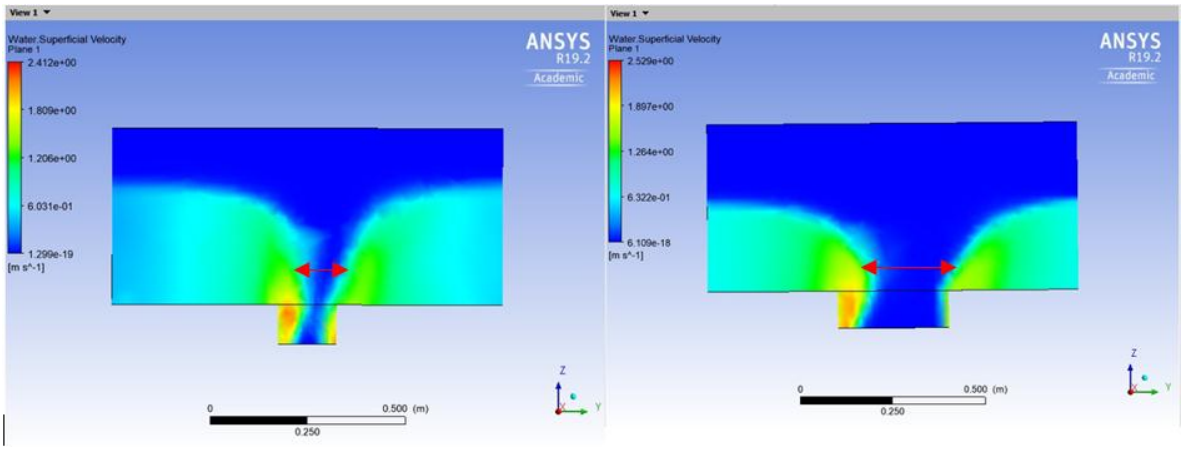
Figura 112 Dinámica de cuenca de fondo cónico 100mm (Elaboración propia)



Las turbinas de flujo tangencial van ubicadas cerca de la altura media de la cuenca en la sección circular, para su óptimo funcionamiento la turbina requiere que la velocidad en las paredes del vórtice en el núcleo de aire sean lo más altas posibles con el objeto de que puedan ejercer fuerzas de empuje en la turbina y generen rotación. En este tipo de turbinas la excentricidad del vórtice no es un factor a tener en cuenta

Los diseños de cuenca de fondo plano poseen magnitudes de velocidad similares, valores de 1,8 m/s en promedio se pueden observar sin importar el diámetro de descarga, pero como se dijo anteriormente, al aumentar el diámetro de salida implica también un aumento en el diámetro del núcleo de aire, por ende, la turbina de flujo tangencial tendría que ser cada vez más grande y pesada.

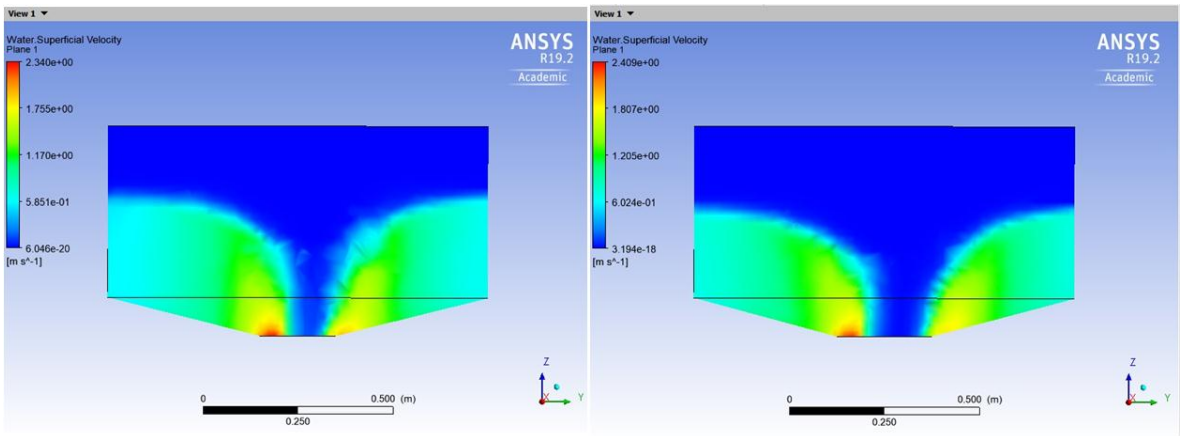
Figura 113 Comparación cuenca de fondo plano 100mm y 300mm (Elaboración propia)



Los diseños de cuenca de fondo cónico en las regiones útiles poseen en promedio casi la misma velocidad que los explicados anteriormente, sin embargo, la velocidad en las cuencas cónicas se propaga mejor por la sección circular, lo que sugiere que el nuevo diseño hace rotar mayor volumen de agua.

El diseño con diámetro de descarga de 250mm obtuvo el mejor desempeño, ya que la magnitud de velocidad en las paredes del núcleo de aire fue la mayor y también fue la propuesta que genero mayor región útil que puede ser aprovechada por la turbina. Cabe aclarar que diseños con diámetros cercanos también obtuvieron resultados similares.

Figura 114 Comparación cuenca de fondo cónico 200mm y 250mm (Elaboración propia)



11. CONCLUSIONES

El software de simulación Ansys CFX demostró ser una herramienta muy poderosa capaz de suministrar una amplia gama de resultados de utilidad para el desarrollo de este proyecto, sin embargo, se requiere de una de una considerable cantidad de estudio, investigación y práctica el utilizarlo de forma apropiada.

No existe una forma o una metodología absoluta para realizar este tipo de simulaciones, las consideraciones y las condiciones iniciales contempladas varían dependiendo de las necesidades del sujeto y se ha podido ver que en materia de CFD este trabajo abordo una parte muy pequeña.

En cuanto a los resultados obtenidos es preciso asegurar que efectivamente la variación de las características geométricas propuestas en este trabajo puede llegar a provocar cambios sustanciales en el resultado final del vórtice a tal punto de obtener un sistema ineficaz o directamente disfuncional como por ejemplo: el aumento del diámetro de desagüe tiene una relación directa con la formación del vórtice ya que para diámetros de desagüe superiores a 300 mm en el caso del modelo de fondo plano y diámetros de desagüe superiores a 350mm en el caso del prototipo de fondo cónico el fluido deja de comportarse como un vórtice por lo que los valores de energía cinética que podrían obtenerse en esos escenarios es muy inferior en comparación a cuencas de desagües inferiores, ciertamente esto representa un factor delimitante ya que con estos resultados se puede trabajar en torno a evitar superar estos valores de diámetro.

Otro fenómeno dependiente de las dimensiones del desagüe es la tendencia del núcleo de aire a aumentar su tamaño en sincronía con el aumento del diámetro de salida lo que involucra que en configuraciones donde se ubique la turbina en el fondo de la cuenca se reduzca el área de contacto entre los alabes y el fluido, lo que llevaría a un desaprovechamiento de la energía cinética generada, sin embargo, se pudo observar que la cuenca de fondo cónico es ligeramente superior al otro modelo en este entorno ya que como consecuencia de las pérdidas de energía cinética originada de los choque del fluido con las paredes del desagüe se pensó en el modelo de fondo cónico y se pudo observar una distribución más uniforme de la velocidad lo que por un lado resulta oportuno ya que la energía máxima no se concentra en un punto de difícil acceso como era el caso de la cuenca de fondo plano.

La distribución de la velocidad en las cuencas de tipo cónico ha demostrado ser más adecuado dado comportamiento en forma de anillo en la salida, fenómeno que no ocurría en el diseño original. Las velocidades abarcan la mayor parte del área de salida y el núcleo de aire bajo su tamaño fenómeno indispensable para las turbinas

de flujo axial, además se pudo observar que el nuevo diseño genera la rotación de una mayor cantidad de volumen de agua, ello lo convierte en un diseño más conveniente para la implementación de turbinas de flujo tangencial en comparación con su homónimo en diámetro del diseño original, lo que parece sugerir que la inclusión de una conicidad a este diseño fue acertada.

Si el diámetro de descarga supera el 35% del diámetro exterior de la cuenca, la vorticidad empieza a presentar problemas para llegar un estado estable. La vorticidad necesita que el fluido rote alrededor de un eje fijo, lo que implica que el fluido de algunas vueltas por el perímetro de la cuenca, pero al ser tan grande el diámetro del agujero de descarga, este sale directamente luego de dar solo una vuelta. La anterior afirmación es válida para ambos diseños. El diámetro de descarga en ambos diseños obtuvo su mejor rendimiento en términos de distribución y velocidad entre el 10% y 20% del diámetro exterior de la cuenca.

La excentricidad del vórtice en la salida sigue siendo un problema persistente, la conicidad mejoro la dinámica del fluido ya que vórtice cuando llega al fondo de la cuenca el choque no es tan agresivo como en el diseño original, pero es necesario revisar bibliografía acerca de diseño de volutas para encontrar alternativas geométricas que corrijan la desviación del vórtice

Finalmente, la noción que deja la comparación de los resultados obtenidos en este trabajo es que la configuración de cuenca con fondo cónico demuestra ser superior al prototipo original de fondo plano.

12. RECOMENDACIONES

Ansys se ha destacado en los últimos años por ser uno del mejor software de simulación de ingeniería del mundo. Utilizado significativamente en el ámbito académico e industrial para hallar compresión fenómenos y solución a problemas, Ansys parece proyectarse como una herramienta indispensable para todo tecnólogo mecánico para agilizar los análisis de fenómenos e implementar tecnología con confianza, así que la enseñanza de este tipo de disciplinas en la universidad puede ser muy enriquecedor para los estudiantes, ya que Ansys Workbench además de incluir la extensión de CFX, también posee módulos para trabajar análisis estático, optimización topológica, análisis térmicos

Es importante tener en cuenta la relación precisión - costo computacional que involucra una labor de ingeniería asistida por computador, ya algunos análisis pueden tardan varios días e incluso días si no se es cuidadoso en el proceso de malla o parámetros, ya que las modificaciones correctas pueden rebajar el tiempo de solución significativamente. Si el usuario desea disminuir el tiempo de convergencia de su estudio también debe invertir en un equipo de trabajo con mejores características dependiendo del tipo de simulaciones que desarrolle

13. BIBLIOGRAFÍA

ANSYS academic. (2013). ANSYS CFX Introduction. Recuperado de: https://itrss.mst.edu/media/informationtechnology/itrss/documents/ansysdocs/ANSYS%20CFX%20Introduction.pdf

ANSYS Inc. (2006). Detached Eddy Simulation (DES) Model Theory ANSYS Fluent User's Guide. Manual publicado por la corporación ANSYS Inc. Recuperado de: https://www.sharcnet.ca/Software/Fluent6/html/ug/node501.htm

ANSYS Inc. (2006). Large Eddy Simulation (LES) Model Theory. ANSYS Fluent User's Guide. Manual publicado por la corporación ANSYS Inc. Recuperado de: https://www.sharcnet.ca/Software/Fluent6/html/ug/node506.htm

ANSYS Inc. (2006). Realizable k-ε Model. ANSYS Fluent User's Guide. Manual publicado por la corporación ANSYS Inc. Recuperado de: https://www.sharcnet.ca/Software/Fluent6/html/ug/node480.htm

ANSYS Inc. (2006). Reynolds Stress Model (RSM) Theory. ANSYS Fluent User's Guide. Manual publicado por la corporación ANSYS Inc. Recuperado de: https://www.sharcnet.ca/Software/Fluent6/html/ug/node491.htm

ANSYS Inc. (2006). RNG k-ε Model. ANSYS Fluent User's Guide. Manual publicado por la corporación ANSYS Inc. Recuperado de: https://www.sharcnet.ca/Software/Fluent6/html/ug/node479.htm

ANSYS Inc. (2006). Shear-Stress Transport (SST) Model. ANSYS Fluent User's Guide. Manual publicado por la corporación ANSYS Inc. Recuperado de: https://www.sharcnet.ca/Software/Fluent6/html/ug/node487.htm

ANSYS Inc. (2006). Spalart-Allmaras Model Theory. ANSYS Fluent User's Guide. Manual publicado por la corporación ANSYS Inc. Recuperado de: https://www.sharcnet.ca/Software/Fluent6/html/ug/node469.htm

ANSYS Inc. (2006). Standard k-ε Model. ANSYS Fluent User's Guide. Manual publicado por la corporación ANSYS Inc. Recuperado de: https://www.sharcnet.ca/Software/Fluent6/html/ug/node478.htm

ANSYS Inc. (2006). Standard k-ω Model. ANSYS Fluent User's Guide. Manual publicado por la corporación ANSYS Inc. Recuperado de: https://www.sharcnet.ca/Software/Fluent6/html/ug/node486.htm

ANSYS Inc. (2018). Introduction to ANSYS Workbench. USA.

Ballesteros, R. (2004). *Turbulencia.* Universidad de Oviedo. Recuperado de: http://kimerius.com/app/download/5782492050/Turbulencia.pdf

Chattha, J., Cheema, T., & Khan, N. (2015). *Numerical investigation of basin geometries for vortex generation in a gravitational water vortex power plant.* IEEE Xplore Digital Library. Recuperado de: https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7926028

Coleman, G., & Sandberg, R. (2010). *A Primer on Direct Numerical Simulation of Turbulence –Methods, Procedures and Guidelines.* Research Gate. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/266335164_A_Primer_on_Direct_Numerical_Simulation_of_Turbulence_-_Methods_Procedures_and_Guidelines

Dhakal, R., Bajracharya, T. R., Shakya, S. R, Kumal, B., Khanal K., Williamson, S. J., Gautam, S., & Ghale, D. P. (2017). *Computational and Experimental Investigation of Runner for Gravitational Water Vortex Power Plant.* IEEE Xplore Digital Library. Recuperado de: https://ieeexplore.ieee.org/document/8191087

Dhakal, S. Timilsina, A., Dhakal, R., Fuyal, D., Bajracharya, T., Pandit, H., Amatya, N., & Nakarmi, A. (2015). *Comparison of cylindrical and conical basins with optimum position of runner: Gravitational wáter vortex power plant*. Science Direct. Recuperado de: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115003007

Gardea, H. (2001). *Conceptos básicos sobre la formación y teoría de los vórtices*. Ingeniería Investigación y Tecnología. Recuperado de: http://www.revistaingenieria.unam.mx/numeros/v02n2-04.php

Haro, J., & Sanaguano, E. (2016). *Estudio del comportamiento de fluidos de una micro central hidroeléctrica gravitacional de vórtice, mediante la dinámica computacional de fluidos de alto rendimiento, para la generación de energía eléctrica y la implementación de un prototipo.* (Tesis de pregrado). Universidad de las fuerzas armadas. Recuperado de: https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/11960/1/T-ESPEL-EMI-0322.pdf

Hongqing, F., Long, c., Nkosinathi, D. & Zuyi, S. (2008). *Basic Modeling and Simulation Tool for Analysis of Hydraulic Transients in Hydroelectric Power Plants*. IEEE Xplore Digital Library. Recuperado de: https://ieeexplore.ieee.org/document/4548418

Khan, M. J., Iqbal, M. T., & Quaicoe, J. E. (2007) *A technology review and simulation based performance analysis of river current turbine systems.* IEEE Xplore Digital Library, Recuperado de: https://ieeexplore.ieee.org/document/4055045

Manjón, F.J., Villalba, J.M., Arribas, E., Nájera, A., Beléndez, A., Monsoriu, J.A. (2013). Vórtices no estacionarios en un vaso de agua. Scielo. Recuperado de: http://www.scielo.br/pdf/rbef/v35n3/a04v35n3.pdf

Margiantono, A., Nurhayati, T. (2017). *Simulation model of darrieus turbine using software CFD (Computating Fluid Dinamyc) in Bedono Village of Demak district*. Iopscience Journal of Physics: Conference Series. Recuperado de: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1025/1/012018

Menter, F.R. (2012). *Best Practice: Scale-Resolving Simulations in ANSYS CFD.* Ansys Inc. Recuperado de: https://cfd.grs.de/downloads/best-practice_srs_menter-2012.pdf

Nonlinear eddy viscosity models. (s.f). En CDF Online. Recuperado el 19 de mayo de 2019 de: https://www.cfd-online.com/Wiki/Nonlinear_eddy_viscosity_models

Organización meteorológica mundial. (2017). *La Organización Meteorológica Mundial confirma que 2016 es el año más caluroso jamás registrado, con una temperatura media superior en aproximadamente 1,1 °C a la de la era preindustrial*. ORGANIZACION METEOROLÓGICA MUNDIAL. Recuperado de: https://public.wmo.int/es/media/comunicados-de-prensa/la-organizaci%C3%B3n-meteorol%C3%B3gica-mundial-confirma-que-2016-es-el-a%C3%B1o-m%C3%A1s

Robles, A. Maquinas hidráulicas y problemas. Cartagena: Crai UPTC ediciones, 2016. Pág. 5.

Robles, A. Maquinas hidráulicas y problemas. Cartagena: Crai UPTC ediciones, 2016. Pág. 5.

Shabara, H. M., Yaakob, O. B., Ahmed, Y.M., Elbatran, A. H., & Faddir, M. S. (2015). *CFD Validation for Efficient Gravitational Vortex Pool System.* Research Gate. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/277307345_CFD_Validation_for_Efficient_Gravitational_Vortex_Pool_System

Sodja, J. (2007). *Turbulence models in CFD.* Universidad de Ljubljana. Facultad de matemáticas y física. Recuperado de: http://mafija.fmf.uni-lj.si/seminar/files/2006_2007/Turbulence_models_in_CFD.pdf

Viscosity. (s.f). En Wikipedia. Recuperado el 19 de mayo de 2019 de: https://en.wikipedia.org/wiki/Viscosity

Wanchat, S., & Suntivarakor, R. (2010). *Preliminary Design of a Vortex Pool for Electrical Generation.* Research Gate. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/215988700_Preliminary_Design_of_a_Vortex_Pool_for_Electrical_Generation

Zotlöterer, F. (fecha). *Gravitation Water Vortex Power Plants*. ZOTLÖTERER. Recuperado de: http://www.zotloeterer.com/welcome/gravitation-water-vortex-power-plants/

13.1 REFERENCIAS FIGURAS

Figura 1. Margiantono, A., Nurhayati, T. (2017). *Results on Post CFD* [Figura]. Recuperado de: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1025/1/012018/pdf

Figura 2. Dhakal, R., Bajracharya, T. R., Shakya, S. R, Kumal, B., Khanal K., Williamson, S. J., Gautam, S., & Ghale, D. P. (2017). *Streamline flow in the stationary domain, with runner in the optimum position.* Recuperado de: https://ieeexplore.ieee.org/document/8191087

Figura 3. Wanchat, S., & Suntivarakor, R. (2010). *Horizontal direction in case study 2*. [Figura] Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/215988700_Preliminary_Design_of_a_Vortex_Pool_for_Electrical_Generation

Figura 4. Wanchat, S., & Suntivarakor, R. (2010). *Horizontal direction in case study 3*. [Figura] Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/215988700_Preliminary_Design_of_a_Vortex_Pool_for_Electrical_Generation

Figura 5. Shabara, H. M., Yaakob, O. B., Ahmed, Y.M., Elbatran, A. H., & Faddir, M. S. (2015). *Velocity Profile through the pool*. [Figura]. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/277307345_CFD_Validation_for_Efficient_Gravitational_Vortex_Pool_System

Figura 6. Chattha, J., Cheema, T., & Khan, N. (2015). *Velocity streamlines and vortex formed in the optimized basin*. [Figura]. Recuperado de: https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7926028

Figura 7. Dhakal, S. Timilsina, A., Dhakal, R., Fuyal, D., Bajracharya, T., Pandit, H., Amatya, N., & Nakarmi, A. (2015). *Flow simulation of cylindrical basin*. [Figura]. Recuperado de: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115003007

Figura 8. Dhakal, S. Timilsina, A, Dhakal, R, Fuyal, D, Bajracharya, T, Pandit, H, Amatya, N, & Nakarmi, A. (2015). *Flow simulation of conical basin*. [Figura]. Recuperado de:
https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115003007

Figura 9. Dhakal, R., Bajracharya, T. R., Shakya, S. R, Kumal, B., Khanal K., Williamson, S. J., Gautam, S., & Ghale, D. P. (2017). *Micro hydro turbine classification.* [Figura]. Recuperado de:
https://ieeexplore.ieee.org/document/8191087

Figura10.TURBULENT. (2017).Technology.[Figura]. Recuperado de: https://www.turbulent.be/

Figura11.TURBULENT. (2017).Technology.[Figura]. Recuperado de: https://www.turbulent.be/

Figura 12. ZOTLÖTERER, F. (2014). [Figura]. Recuperado de:
http://www.zotloeterer.com/

Figura 13. Gardea, H. (2001). Conceptos básicos sobre la formación y teoría de los vórtices [Figura].
Recuperado de: http://www.revistaingenieria.unam.mx/numeros/2001/v02n2-04.pdf

Figura 14. Gardea, H. (2001). Conceptos básicos sobre la formación y teoría de los vórtices [Figura].
Recuperado de: http://www.revistaingenieria.unam.mx/numeros/2001/v02n2-04.pdf

Figura 15. Arrigada, P. (2014). Estudio de la formación de vórtices. [Figura]. Recuperado de:
https://www.ucursos.cl/usuario/c1f33623c53cd7f58fd77ef459693d6c/mi_blog/r/Estudio_de_la_formacion_de_vortices.pdf

Figura 16. ANSYS, Inc. (2015). ANSYS CFX Introduction. [Figura]. Recuperado de: https://itrss.mst.edu/media/informationtechnology/itrss/documents/ansysdocs/ANSYS%20CFX%20Introduction.pdf

Figura 17. ANSYS, Inc. (2015). ANSYS CFX Introduction. [Figura]. Recuperado de: https://itrss.mst.edu/media/informationtechnology/itrss/documents/ansysdocs/ANSYS%20CFX%20Introduction.pdf

Figura 18. ANSYS, Inc. (2016).Introduction to ANSYS Workbench. [Figura]. Recuperado de:
https://www.fluidcodes.com/archives/products/1489306139Introduction%20to%20ANSYS%20Workbench.pdf

Figura 19. ANSYS Inc. (2018). Introduction to ANSYS Workbench. USA.

Figura 20. ANSYS, Inc. (2015). Introduction to ANSYS Meshing. [Figura]. Recuperado de: https://www.academia.edu/16969921/introduction_to_ansys_meshing_16.0

Figura 22. OZEN ENGINEERING, Inc. (2014). Meshing workshop. [Figura]. Recuperado de: https://www.ozeninc.com/

Figura 24. ANSYS, Inc. (2015). Introduction to ANSYS Meshing. [Figura]. Recuperado de: https://www.academia.edu/16969921/introduction_to_ansys_meshing_16.0

Figura 25. Fluid Codes FZ LLE. (2014). Using ANSYS Workbench as a Project Schematic. [Figura]. Recuperado de: https://www.hpc.kaust.edu.sa/sites/default/files/files/public/ANSYS_Workshop/2017/2.ANSYS-Workbench.pdf

Figura 26. Ozen engineering Inc. (2014). Meshing workshop. [Figura]. Recuperado de: https://www.ozeninc.com/

Figura 27. Fluid Codes FZ LLE. (2014). Using ANSYS Workbench as a Project Schematic. [Figura]. Recuperado de: https://www.hpc.kaust.edu.sa/sites/default/files/files/public/ANSYS_Workshop/2017/2.ANSYS-Workbench.pdf

Figura 28. Menter, F.R. (2012). *Computing power estimate for a single turbomachinery blade with end-walls.* [Figura].Recuperado de: https://cfd.grs.de/downloads/best-practice_srs_menter-2012.pdf

Tabla 1. Benedicto, N. Ronnie, O. Lean Karlo, S. (2015). IoT-based Pico-Hydro Power Generation System using Pelton Turbine. [Figure]. Recuperado de: https://www.researchgate.net/profile/Lean_Karlo_Tolentino/publication/32410272_IoT-based_Pico Hydro_Power_Generation_System_using_Pelton_Turbine/links/5abd94dc0f7e9bfc0457bd1e/IoT-based-Pico-Hydro-Power-Generation-System-using-Pelton-Turbine.pdf

Tabla 2. Engineers edge. (2019).*Specific weight and density of air at standard atmospheric pressure.* [Figura].Recuperado de: https://www.engineersedge.com/calculators/air-density.htm

Tabla 3. Mott, R.L. (2006). *Mecánica de fluidos.* México, Pearson education. Pág.20

Tabla 4 y 5. Shabara, H. M., Yaakob, O. B., Ahmed, Y.M., Elbatran, A. H., & Faddir, M. S. (2015). Test cases of the gravitational vortex pool system. [Figura]. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/277307345_CFD_Validation_for_Efficient_Gravitational_Vortex_Pool_System