



**UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA**  
*La Universidad Católica de Loja*

**ÁREA TÉCNICA**

TITULACIÓN DE INGENIERO CIVIL

**“Simulación numérica del funcionamiento hidráulico de una rejilla de efecto Coanda  
utilizando metodología CFD”**

TRABAJO DE FIN DE TITULACIÓN

**AUTOR:** Samaniego Burneo Santiago Germán

**DIRECTOR:** Carrión Coronel Eduardo Fernando, Mg.Sc.

LOJA – ECUADOR

2015

---

**APROBACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE FIN DE TITULACIÓN**

Máster.

Eduardo Carrión Coronel

**DOCENTE DE TITULACIÓN**

De mi consideración:

El presente trabajo de fin de titulación: **“Simulación numérica del funcionamiento hidráulico de una rejilla de efecto Coanda utilizando metodología CFD”**, realizado por Santiago Germán Samaniego Burneo, ha sido orientado y revisado durante su ejecución, por cuanto se aprueba la presentación del mismo.

Loja, enero de 2015

f).....

Mg.Sc. Eduardo Carrión Coronel

---

## DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS

Yo, Santiago Germán Samaniego Burneo declaro ser autor del presente trabajo de fin de titulación: “**Simulación numérica del funcionamiento hidráulico de una rejilla de efecto Coanda utilizando metodología CFD**”, de la Titulación de Ingeniería Civil, siendo Eduardo Carrión Coronel director del presente trabajo; y eximo expresamente a la Universidad Técnica Particular de Loja y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales. Además certifico que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de mi exclusiva responsabilidad.

Adicionalmente declaro conocer y aceptar la disposición del Art. 67 del Estatuto Orgánico de la Universidad Técnica Particular de Loja que en su parte pertinente textualmente dice: “Forman parte del patrimonio de la Universidad la propiedad intelectual de investigaciones, trabajos científicos o técnicos y tesis de grado que se realicen a través, o con el apoyo financiero, académico o institucional (operativo) de la Universidad”

f).....

Autor: Santiago Samaniego Burneo

Cédula: 1104830813

---

## DEDICATORIA

*A mis padres, Renato y Judith,*

*A mis hermanos, Renato, Fabiana, Juan Pablo, José Elías y María Judith,*

*A mis dos pequeños sobrinos, Renato Nicolás y Joaquín.*

*A mi novia, María Eliza.*

---

## AGRADECIMIENTO

*A Dios, Gran Arquitecto y regulador del Universo, inicio y fin de mi existencia. Por regalarme los mejores padres para mi formación espiritual, personal y académica, y por darme una familia realmente hermosa.*

*A mis padres, por su incondicional apoyo y formación durante todos los años de mi vida, por su ejemplo de humildad, honradez, perseverancia y gratitud.*

*A mis hermanos, por su constante apoyo y ejemplo con cada una de sus virtudes.*

*A mi novia, María Eliza por su incondicional amor y constante apoyo y comprensión durante todo este tiempo de mi formación personal y académica.*

*A Roger Iván Ponce Segovia, Ingeniero Mecánico de Fluidos de la empresa MWH GLOBAL en Lima-Perú; por su constante apoyo durante todo el desarrollo del presente trabajo, por compartir conmigo sus extensos conocimientos y responder a cada una de mis dudas con respecto a la Dinámica Computacional de Fluidos y al manejo del software ANSYS CFX.*

*Al Ingeniero Eduardo Carrión Coronel por ayudarme a desarrollar mis capacidades a través de la investigación durante los dos últimos años de mi carrera profesional. Por enseñarme y transmitirme todos sus conocimientos. Por su motivación, enseñanzas y confianza durante todo este trabajo.*

---

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

APROBACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE FIN DE TITULACIÓN .....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS.....	II
DEDICATORIA .....	III
AGRADECIMIENTO .....	IV
ÍNDICE DE CONTENIDOS .....	V
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VII
ÍNDICE DE TABLAS .....	X
RESUMEN.....	1
ABSTRACT.....	2
CAPITULO I.....	3
1. INTRODUCCIÓN. ....	4
1.1. Antecedentes.....	4
1.2. Objetivos. ....	5
1.2.1. General.....	5
1.2.2. Específicos. ....	5
1.3. Metodología de la tesis. ....	5
1.4. Fundamentación teórica.....	6
1.4.1. El Efecto Coanda. ....	6
1.4.2. Captaciones a base de pantallas de Efecto Coanda.....	7
1.4.3. Capacidad de las rejillas. ....	9
1.4.4. Definiciones básicas de los elementos de la obra captación tipo Coanda. ....	10
1.4.5. Parámetros de Diseño. ....	11
1.4.6. Ecuaciones de Diseño. ....	13
1.4.7. Rendimiento de la estructura.....	19
1.4.8. Fundamentos de la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD). ....	20
CAPITULO II.....	39
2. MATERIALES Y MÉTODOS. ....	40
2.1. Diseño de la captación.....	40
2.2. Hardware y software. ....	49
2.3. Introducción a la simulación CFD.....	49
2.4. Geometría del problema. ....	49
2.4.1. Descripción de la geometría.....	50
2.4.2. Modelo tridimensional de la geometría. ....	51
2.5. Mallado.....	54
2.5.1. Selección del tipo de mallado.....	54
2.5.2. Mallado del modelo.....	57
2.5.3. Análisis de la calidad del mallado.....	60

---

2.6.	Configuración de la simulación.....	68
2.6.1.	Tipo de simulación.....	68
2.6.2.	Propiedades del dominio.....	68
2.6.3.	Condiciones de frontera.....	69
2.6.4.	Inicialización global.....	75
2.6.5.	Modelo de turbulencia.....	76
2.6.6.	Controles de solución.....	76
2.6.7.	Monitores de convergencia.....	77
CAPITULO III.....		81
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	82
3.1.	Análisis de resultados del software HPCES.....	82
3.2.	Análisis de resultados CFD.....	84
3.2.1.	Simulación con Caudal Unitario.....	87
CAPITULO IV.....		90
CONCLUSIONES.....		91
RECOMENDACIONES.....		93
BIBLIOGRAFÍA.....		94
ANEXOS.....		96
ANEXO I: MALLADO PARA EL ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD.....		97
ANEXO II: RESULTADOS GRÁFICOS DE LAS SIMULACIONES EN ANSYS CFX.....		102

---

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Efecto de un sólido y un líquido al tocar un superficie curva .....	6
Figura 1.2: Esquema de rejilla basada en efecto Coanda .....	8
Figura 1.3: Inclinación y separación de los alambres .....	10
Figura 1.4: Características, disposición típica, y parámetros de diseño para rejillas de efecto Coanda.....	12
Figura 1.5: Vista de cerca de los alambres y sus parámetros .....	13
Figura 1.6: Geometría y volumen de control para el análisis del flujo en pantallas de alambre inclinado .....	14
Figura 1.7: Flujo idealizado sobre una ranura de la pantalla .....	17
Figura 1.8: Valores predichos de $C_{cv}$ versus valores observados de $C_{cv}$ .....	18
Figura 1.9: Condiciones de Borde.....	24
Figura 1.10: Tipos de flujos multifásicos .....	25
Figura 1.11: Interfaz de superficie libre .....	30
Figura 1.12: Tipologías de elementos. a) Hexaédrico; b) prisma; c) pirámides; d) tetraedro.	33
Figura 1.13: Geometría con mallado estructurado .....	35
Figura 1.14: Geometría con mallado no estructurado .....	36
Figura 1.15: Geometría con mallado híbrido .....	36
Figura 1.16: Triángulos y cuadriláteros ideales y oblicuos .....	37
Figura 2.1: Datos en la pestaña estructura .....	41
Figura 2.2: Datos en la pestaña placa de aceleración.....	42
Figura 2.3: Datos en la pestaña pantalla.....	42
Figura 2.4: Datos en la pestaña condiciones de flujo .....	42
Figura 2.5: Forma del perfil del vertedero y placa de aceleración .....	48
Figura 2.6: Vista frontal del dominio en el plano XY y sus dimensiones en cm. ....	51
Figura 2.7: Dimensiones de la rejilla Coanda .....	52
Figura 2.8: Vista Isométrica del dominio en 3D y dimensiones .....	52
Figura 2.9: Geometría representada en el Desing Modeler.....	53
Figura 2.10: Características de Geometría del Modelo .....	53
Figura 2.11: Detalle general del mallado.....	55
Figura 2.12: Detalle del refinamiento del mallado usando la opción " <i>Face Sizing</i> " .....	56
Figura 2.13: Selección de elementos a ser divididos.....	56
Figura 2.14: Numero de nudos y elementos del mallado.....	57
Figura 2.15: Mallado del dominio .....	57
Figura 2.16: Vista frontal del mallado .....	58
Figura 2.17: Vista frontal en el rejilla de la captación .....	58
Figura 2.18: Corte interno del mallado del dominio .....	59

---

Figura 2.19: Corte interno del mallado en la rejilla .....	59
Figura 2.20: Corte interno en los alambres de la captación.....	60
Figura 2.21: Detalle de la calidad del mallado.....	60
Figura 2.22: Calidad del mallado vs número de elementos .....	61
Figura 2.23: Calidad del mallado vs porcentaje de elementos .....	62
Figura 2.24: Porcentaje de elementos con oblicuidad <0.047 .....	63
Figura 2.25: Porcentaje de elementos con oblicuidad <0.14 .....	63
Figura 2.26: Porcentaje de elementos con oblicuidad <0.24 .....	64
Figura 2.27: Porcentaje de elementos con oblicuidad <0.33 .....	64
Figura 2.28: Porcentaje de elementos con oblicuidad <0.42 .....	65
Figura 2.29: Porcentaje de elementos con oblicuidad <0.50 .....	65
Figura 2.30: Porcentaje de elementos con oblicuidad <0.61 .....	66
Figura 2.31: Porcentaje de elementos con oblicuidad <0.70 .....	66
Figura 2.32: Porcentaje de elementos con oblicuidad <0.80 .....	67
Figura 2.33: Porcentaje de elementos con oblicuidad <0.89 .....	67
Figura 2.34: Etiquetas creadas con la opción “Named Selection” en el dominio .....	69
Figura 2.35: Etiquetas del dominio para designar las condiciones de frontera .....	70
Figura 2.36: Ubicación de la condición de borde tipo entrada (Inlet) .....	71
Figura 2.37: Ubicación de la condición de borde tipo superficie libre (Opening).....	72
Figura 2.38: Ubicación de la condición de borde tipo pared (Wall) .....	73
Figura 2.39: Ubicación de la salida Qbypass .....	74
Figura 2.40: Ubicación de la salida Qcaptado .....	75
Figura 2.41: Valor residual en función del número de iteraciones para la ecuaciones de cantidad de movimiento y masa.....	78
Figura 2.42: Valor residual en función del número de iteraciones para la ecuaciones turbulencia.....	79
Figura 2.43: Valor residual en función del número de iteraciones para la fracción de volumen.....	80
Figura 3.1: Resultados arrojados por el software HPCES con el modelo matemático del 2001 de Tony Wahl para la captación propuesta en este trabajo.....	83
Figura 3.2: Resultados arrojados por el software HPCES con el modelo matemático del 2013 de Tony Wahl para la captación propuesta en este trabajo.....	84
Figura 3.3: Expresiones y resultados del caudal de entrada, captado y derivado de la simulación No. 3. ....	85
Figura 3.4: Caudal Captado en función del mallado.....	86
Figura 3.5: Caudal derivado en función del número de elementos.....	87
Figura 3.6: Dominio fluido de la captación reducida .....	88
Figura 3.7: Vista isométrica del mallado de la simulación 1 .....	97
Figura 3.8: Mallado en el rejilla de la simulación 1 .....	98

---

---

Figura 3.9: Vista isométrica del mallado de la simulación 2 .....	98
Figura 3.10: Mallado en el rejilla de la simulación 2 .....	99
Figura 3.11: Vista isométrica del mallado de la simulación 3 .....	99
Figura 3.12: Mallado en el rejilla de la simulación 3 .....	100
Figura 3.13: Vista isométrica del mallado de la simulación con caudal unitario .....	100
Figura 3.14: Mallado en el rejilla de la simulación unitaria.....	101
Figura 3.15: Fracción de volumen de agua de la simulación 1. ....	102
Figura 3.16: Fracción de volumen de agua de la simulación 2. ....	102
Figura 3.17: Fracción de volumen de agua de la simulación 3. ....	103
Figura 3.18: Fracción de volumen de agua de la simulación unitaria (SU). ....	103
Figura 3.19: Fracción de volumen de agua al principio de la rejilla .....	104
Figura 3.20: Fracción de volumen de agua al final de la rejilla .....	105
Figura 3.21: Disposición de las líneas de corriente en la rejilla de la captación.....	105
Figura 3.22: Efecto de corte en las líneas de corriente producido por los alambres de la rejilla.....	106

---

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1: Dimensiones de la pantalla de la prueba para determinar Ccv .....	15
Tabla 1.2: Parámetros de las líneas de mejor ajuste para predecir Ccv.....	17
Tabla 1.3: Tipos de elementos y cantidad de nodos .....	34
Tabla 1.4: Valores de oblicuidad y calidad de elementos .....	38
Tabla 2.1: Parámetros para el diseño de la captación.....	41
Tabla 2.2: Parámetros calculados por el software HPCES.....	43
Tabla 2.3: Resultados del perfil del vertedero y placa de aceleración .....	44
Tabla 2.4: Coordenadas del Radio 1 .....	44
Tabla 2.5: Coordenadas del Radio 2.....	45
Tabla 2.6: Coordenadas de la placa de aceleración.....	46
Tabla 2.7: Resumen de los parámetros de la captación de efecto Coanda .....	50
Tabla 2.8: Detalles del dominio .....	68
Tabla 2.9: Detalles de la condición de borde tipo entrada. ....	70
Tabla 2.10: Detalles de la condición de borde tipo superficie libre (Opening).....	71
Tabla 2.11: Detalles de la condición de borde tipo pared .....	72
Tabla 2.12: Detalles de las condiciones de borde tipo salida .....	74
Tabla 2.13: Detalles de la Inicialización global .....	76
Tabla 2.14: Detalle del control del solucionador .....	77
Tabla 3.1: Resultados del programa HPCES .....	82
Tabla 3.2: Resultados de las simulaciones en ANSYS CFX .....	85
Tabla 3.3: Análisis de resultados .....	86
Tabla 3.4: Resultados con caudal unitaria .....	89

---

## RESUMEN

Según estudios hidráulicos de alto rendimiento, se ha demostrado que la utilización de rejillas basadas en el efecto Coanda en el diseño de obras de captaciones, son muy eficientes y confiables debido a la gran cantidad de ventajas que estas tienen con respecto a las rejillas convencionales. En el presente trabajo de fin de titulación se tuvo como objetivo el análisis de los resultados de caudal captado y caudal derivado de una captación de Efecto Coanda, obtenidos de una simulación numérica utilizando la metodología de CFD, y se validó estos resultados con los modelos matemáticos propuestos por Tony Wahl en los años 2001 y 2013. Para la simulación CFD se usó el software ANSYS versión 14.5 el cual incluye el módulo CFX para solución de flujos de fluidos. Los resultados teóricos fueron obtenidos usando el software Hydraulic Performance of Coanda Effect Screens, realizado por el Wahl. Se comprobó que los resultados obtenidos de la simulación fueron satisfactorios con respecto a los resultados teóricos. El presente estudio es uno de los primeros proyectos CFD en la Universidad Técnica Particular de Loja.

PALABRAS CLAVES: Dinámica computacional de fluidos, CFD, Ansys CFX, Captaciones de Efecto Coanda.

---

## ABSTRACT

According to hydraulic high throughput studies, it has been demonstrated that the use of Coanda-Effect Screens in intake works, are extremely reliable and efficient, due to numerous advantages that these has over conventional grids. The present work aims at the analysis of the results of captured flow and flow derived from an intake works using Coanda-Effect Screens, obtained from a numerical simulation methodology using CFD (Computational Fluid Dynamics). These results were validated with the mathematical models proposed by Tony Wahl in 2001 and 2013. For the CFD simulation the 14.5 version ANSYS software was used, which includes the CFX module for solving fluid systems. The theoretical results were obtained using the Hydraulic Performance of Coanda Effect Screens software, made by Wahl. It was proved that the results of the simulation were satisfactory regarding the theoretical results. This study is one of the first CFD projects at the Universidad Técnica Particular de Loja.

KEYWORDS: Computational Fluid Dynamics, CFD, Ansys CFX, Coanda-Effect Screens, Intakes.

## **CAPITULO I**

---

## **1. INTRODUCCIÓN.**

### **1.1. Antecedentes.**

“La mayor parte del agua consumida por el hombre es extraída de los ríos, aprovechando la fuerza de la gravedad por medio de captaciones ubicadas a suficiente altura sobre el sitio de consumo, para que el agua corra por su propio peso.” (García Velez)

En nuestro país, la mayor cantidad de captaciones han sido diseñadas y construidas utilizando rejillas convencionales, las cuales pueden llegar a resultar demasiado costosas; debido a la necesidad de mantenimiento continuo por la facilidad con que se obstruyen y además permiten el ingreso de arenas y todo tipo de partículas; lo que obliga a construir grandes obras complementarias como decantadores o desarenadores.

Según los estudios hidráulicos de alto rendimiento presentados por el Bureau of Reclamation, se ha demostrado que la utilización de rejillas basadas en el efecto Coanda, en el diseño de obras de captaciones, son muy eficientes y confiables debido a la gran cantidad de ventajas que estas tienen con respecto a las rejillas convencionales. Entre las que se puede destacar son: la reducción de costos en obras complementarias, bajos costos de manutención, reduce drásticamente las partículas en suspensión mayores a 0.5 mm y en consecuencia reduce el desgaste de turbinas o bombas, etc.

A pesar de las grandes ventajas que presentan las rejillas Coanda, su uso en el Ecuador no es muy frecuente, esto se debe a la falta de información técnica sobre el dimensionamiento y funcionamiento hidráulico de las rejillas.

Las estructuras hidráulicas y sus componentes comúnmente son evaluados mediante modelos físicos en laboratorios, sin embargo estos modelos pueden llegar a resultar muy costosos, es por ello que en la actualidad y gracias a los avances tecnológicos se cuenta con computadores de grandes capacidades y rendimientos, facilitando así el uso de modelos matemáticos.

Para estudiar y comprender el funcionamiento hidráulico de las rejillas en mención, en el presente proyecto se evaluó el funcionamiento hidráulico de una rejilla Coanda a través de la metodología de Dinámica Computacional de Fluidos (CFD).

Para la elaboración del modelo se utilizó un software de Dinámica computacional de fluidos. Existen muchos software en el mercado que aplican la dinámica computacional de fluidos, para el presente proyecto se utilizó el programa ANSYS, debido a que la Universidad

---

Técnica Particular de Loja (UTPL) cuenta con la licencia académica para realizar investigaciones de este tipo.

Los programas de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) utilizan procedimientos numéricos por ordenador para resolver las ecuaciones gobernantes de flujos de Navier-Stokes, las cuales permiten simular la interacción entre distintos fluidos, como es el caso de los flujos bifásicos agua-aire o agua con distintas densidades, resolviendo los problemas de mecánica de fluidos dentro de cualquier configuración geométrica.

El presente estudio busca validar los resultados del modelo CFD, aplicado a este tipo de captaciones y comparar estos resultados con datos derivados del modelo matemático presentado por Tony L. Wahl en el software Hydraulic Performance of Coanda-Effect Screens (HPCES).

## **1.2. Objetivos.**

### **1.2.1. General.**

Realizar una simulación numérica que permita evaluar el funcionamiento hidráulico de una rejilla de efecto Coanda utilizando metodología CFD mediante el programa ANSYS CFX.

### **1.2.2. Específicos.**

- Estudiar el estado del arte de la dinámica computacional de fluidos
- Estudiar el estado del arte de las rejillas Coanda
- Aprender el manejo del software ANSYS CFX
- Modelar la rejilla Coanda en el software ANSYS CFX
- Simular el funcionamiento hidráulico de la rejilla en el software ANSYS CFX
- Comparar los resultados de caudal captado y derivado obtenidos por el modelo de Tony Wahl en el software Hydraulic Performance of Coanda-Effect Screens versión 0.6.0 y los resultados obtenidos de la simulación CFD.

## **1.3. Metodología de la tesis.**

La secuencia metodológica utilizada para la modelación y simulación es la siguiente:

- Se utilizó el software CFX 14.5, parte de la suite ANSYS.
- Se generó un modelo computacional de una rejilla de efecto Coanda; utilizando dimensiones impuestas por el autor del presente trabajo.
- Se definió el dominio de flujo de la estructura de captación con respecto a las dimensiones impuestas previamente.

- 
- Para definir el mallado, se realizó un análisis de sensibilidad, que consiste en simulaciones utilizando agua como fluido de prueba, refinando el mallado hasta que la solución varíe de manera despreciable con respecto al refinamiento.
  - La modelación se realizó de manera estática
  - Ya definido el modelo y la malla, se procedió con las simulaciones. Se utilizó como fluidos el agua y el aire a temperatura ambiente con las propiedades que se encuentran almacenados en la biblioteca del programa.
  - Luego de haber completado las simulaciones, se llevó a cabo el análisis de los datos obtenidos, poniendo énfasis en la variable de caudal captado por la rejilla Coanda y el caudal derivado por la estructura.
  - Finalmente, se validó los resultados respecto a la variable del caudal captado por la captación de rejilla Coanda y caudal derivado del modelo realizado en el presente trabajo y los resultados teóricos obtenidos por el programa Hydraulic Performance of Coanda-Effect Screens de Tony L. Wahl.

#### 1.4. Fundamentación teórica.

##### 1.4.1. El Efecto Coanda.

El efecto Coanda es el fenómeno físico producido en mecánica de fluidos en el cual una corriente de fluido sea gaseosa o líquida tiende a ser atraída por una superficie sólida cercana al mismo. El ingeniero aeronáutico Henri Coanda fue quien descubrió el efecto en su prototipo de un avión de reacción.

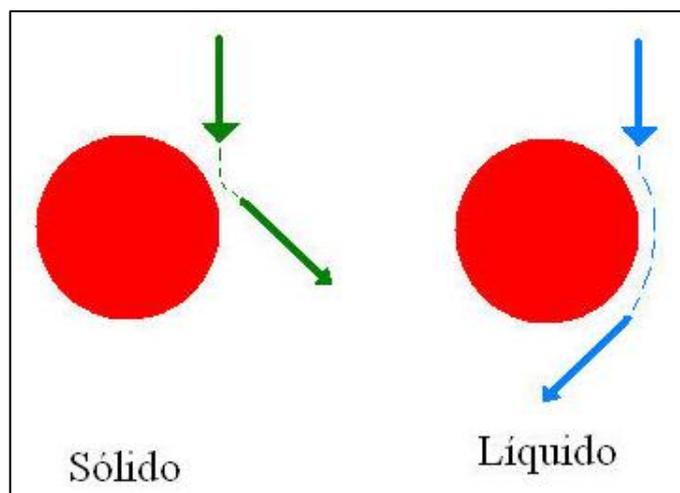


Figura 1.1: Efecto de un sólido y un líquido al tocar un superficie curva

Fuente: <http://goo.gl/OQojwJ>

---

Cuando un sólido impacta sobre una superficie curva este rebotará y saldrá despedido por el efecto de acción y reacción. Pero si se trata de un fluido, este tenderá a adherirse a la superficie y se desviará en sentido opuesto, esto se debe al efecto Coanda.

#### **1.4.2. Captaciones a base de pantallas de Efecto Coanda.**

Las rejillas con efecto Coanda, también conocida como tamiz hidráulico, o reja estática autolimpiante, fueron desarrolladas originalmente en la década de 1950 para la minería, especialmente para el procedimiento de minerales y deshidratación de lodos minerales. Desde entonces, estas rejillas han sido utilizadas para separar líquido y sólidos de una forma muy efectiva, lo que ha extendido su uso en otras aplicaciones como: procesamiento de alimentos, tratamiento de aguas residuales, captaciones de aguas superficiales, tomas para centrales hidroeléctricas. (Carrión , 2012)

Las rejillas basadas en el efecto Coanda son capaces de remover sólidos en flujos supercríticos. La pantalla está instalada en la cara aguas abajo de un muro de rebose. El flujo pasa por encima de la cresta del vertedero, a través de una placa de aceleración sólida que tiene como función proporcionar un aceleración suave al flujo y entregarlo tangente a la superficie de la pantalla en el borde aguas arriba, y luego a través del panel de la pantalla, que se construye con alambres tipo cuña orientados horizontalmente, perpendicular al flujo a través de la pantalla. Los alambres individualmente tienen una inclinación que permite producir un efecto de corte en las láminas delgadas del flujo. El agua que ingresa por la pantalla es recogida en un canal de conducción debajo de la pantalla. El resto de flujo con peces, basura y sedimentos, pasa sobre la pantalla y es vertido de nuevo al cause (Wahl, 2013)

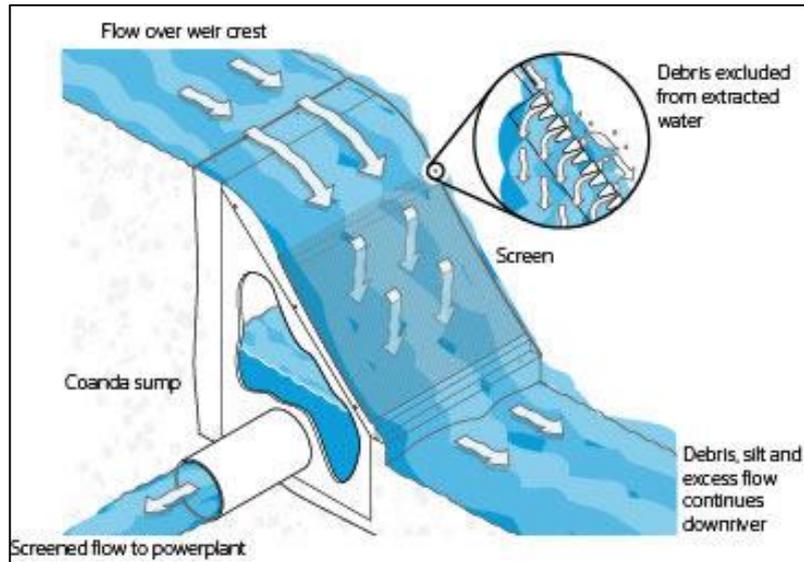


Figura 1.2: Esquema de rejilla basada en efecto Coanda

Fuente: <http://www.aquashear.com/>

Las pantallas de efecto Coanda con este típico diseño se han aplicado en un número de sitios para la remoción de partículas pequeñas, en proyectos de hidroeléctricas (Strong y Ott, 1988), y la exclusión de peces y otros organismos (Strong 1989).

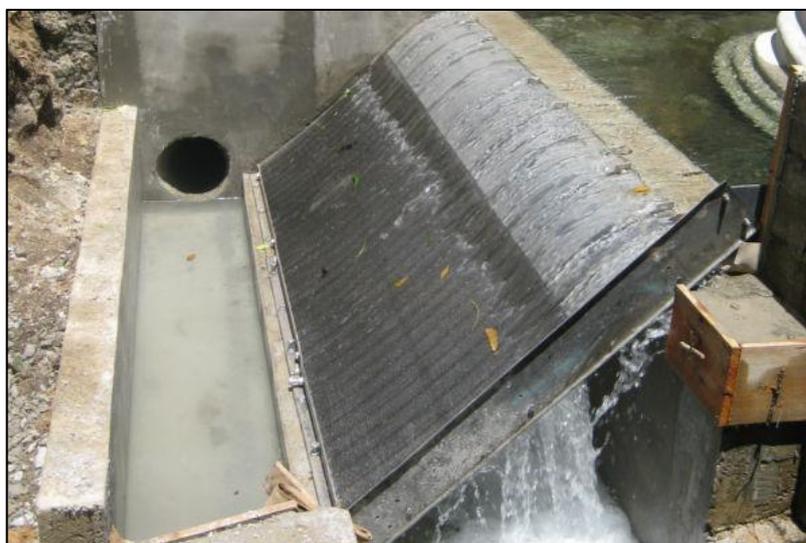


Foto 1-1: Rejilla Coanda en Guatemala

Fuente: <http://waterscreen.com/>

Las rejillas de efecto Coanda están disponibles comercialmente, y los fabricantes han citado las capacidades de la rejilla de  $0.09\text{-}0.14 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$  ( $1.0\text{-}1.5 \text{ ft}^3/\text{s}/\text{ft}$ ) de longitud del vertedero, pero capacidades mucho más altas se han observado en algunas instalaciones prototipo.

---

Las velocidades de flujo a través de la pantalla son normalmente de 2 a 3 m/s (6.5 a 10 pies/s), y aumentan al pie de la pantalla. Los números de Froude a través de la superficie de la pantalla pueden variar de 1.2 a 10, los mayores números de Froude son obtenidos cuando el caudal de derivación es mínimo (Caudal bypass). (Wahl, 2001)

#### **1.4.3. Capacidad de las rejillas.**

La capacidad de la pantalla de efecto Coanda se expresa como descarga (volumen / tiempo) que pasa a través de la superficie de la pantalla por unidad de anchura de la pantalla o de la cresta, o la descarga de la unidad. Hay tres descargas de unidad de interés, el flujo de entrada a la pantalla (flujo sobre la cresta), el flujo a través de la pantalla, y el flujo de derivación sobre la pantalla ( $q_{\text{bypass}}$ ) que se descarga fuera de la punta aguas abajo. En muy bajas tasas de flujo de entrada, todo el flujo pasa a través de la pantalla y no hay flujo de derivación; una porción del extremo de aguas abajo de la pantalla es seco. A medida que aumenta el flujo de entrada, la longitud humedecida de la pantalla también aumenta hasta que la pantalla está completamente humedecida, y es en donde comienza haber un flujo de derivación. A medida que aumenta aún más el flujo de entrada, el flujo a través de la pantalla y el flujo de derivación aumentan, y la profundidad de flujo sobre la pantalla también aumenta. (Wahl, 2003)

El Caudal captado pasa a través de la pantalla por una combinación de dos mecanismos. En primer lugar, los alambres inclinados desprenden capas delgadas del flujo desde la parte inferior de la columna de agua y entran a través de la pantalla. En segundo lugar, la presión del agua contra la pantalla causa que el flujo que pasa a través de las ranuras, ingrese como si se tratara de orificios simples. (Wahl, 2003)

Ambos fenómenos actúan simultáneamente en diversos grados, dependiendo de las propiedades de la superficie de la pantalla y las características del flujo sobre la pantalla. La acción de corte está relacionada principalmente con la inclinación de los alambres y la velocidad del flujo a través de la pantalla. A medida que aumenta la velocidad, la acción de corte se hace más dominante. El comportamiento de orificio está principalmente relacionada con la porosidad ( $p = s/s+w$ ), o el porcentaje de área de la pantalla abierta (es decir, la anchura de la ranura ( $s$ ) en relación con el espesor de alambre ( $w$ )), y la presión contra la superficie de la pantalla, que es proporcional a la profundidad de flujo. (Wahl, 2003)

Para las pantallas curvadas, la presión también se incrementa por la fuerza radial ejercida sobre el flujo para hacer que se siga la superficie curvada (suponiendo una pantalla cóncava). Esta fuerza radial es proporcional a la profundidad de flujo, el cuadrado de la velocidad de flujo, y el grado de curvatura. Existen otros factores que tienen una menor

---

influencia sobre la capacidad de la pantalla (por ejemplo, efectos de número de Reynolds). Unos parámetros adimensionales importantes que describen la influencia relativa de los componentes de corte y de orificio son las relaciones de  $F^2 / (2+F^2)$  y  $2/(2+F^2)$ , respectivamente, donde F es el número de Froude del flujo (Wahl, 2001)

#### **1.4.4. Definiciones básicas de los elementos de la obra captación tipo Coanda.**

##### **1.4.4.1. Placa de aceleración.**

La cresta del azud y la placa de aceleración pueden ser un perfil en forma de arco ojival o un simple arco circular; el objetivo principal es proporcionar una suave aceleración del flujo a medida que cae encima de la cresta, y para entregar la tangente de flujo a la superficie de la pantalla en su borde de aguas arriba.

##### **1.4.4.2. Pantalla de efecto Coanda.**

La inclinación de los alambres juega un papel esencial para la capacidad de la rejilla. Cada alambre está inclinado ligeramente en la dirección aguas abajo, de modo que el borde delantero de siguiente alambre produzca un efecto de corte a una capa delgada del flujo. El ángulo de inclinación más usado es de 5°, pero ángulos de 3 a 6° están también disponibles en el mercado. La separación entre alambre puede ser de 1 mm o menos, la Figura 1.3 muestra la configuración de los alambres de la rejilla. (Wahl, 2001)

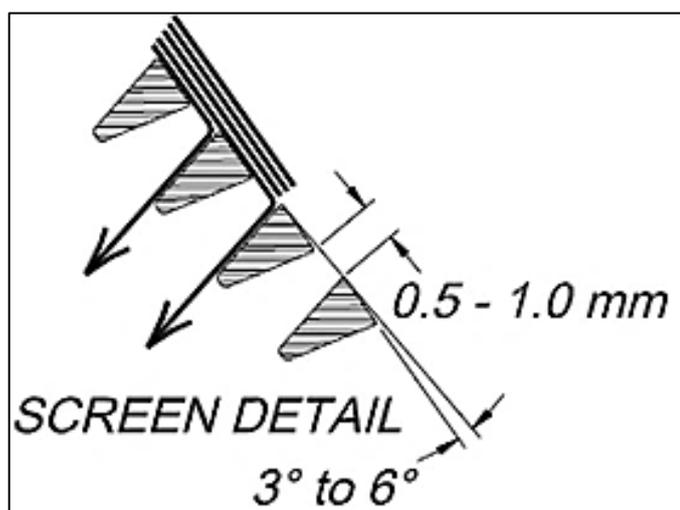


Figura 1.3: Inclinación y separación de los alambres  
Fuente: Wahl, 2001

---

#### **1.4.4.3. Curvatura y radio del arco de la pantalla.**

Normalmente la rejilla es un arco cóncavo con un radio aproximadamente de 3 m, aunque pantallas planas también pueden ser utilizadas. La inclinación de las pantallas que generalmente se encuentran en el mercado son de  $60^\circ$  con respecto a la horizontal en el borde aguas arriba

#### **1.4.5. Parámetros de Diseño.**

Algunos de los parámetros de diseño que afectan la capacidad de una captación con rejillas de efecto Coanda están relacionados con la estructura de contención, los materiales de la pantalla y las condiciones de operación de flujo.

Los parámetros que se relacionan principalmente con la estructura son:

- Desnivel de la placa de aceleración, medida desde la cresta del vertedero a la parte superior de la pantalla (**H<sub>a</sub>**)
- Altura medida desde el nivel del embalse aguas arriba (upstream pool) de la parte superior de la pantalla (**H<sub>s</sub>**)
- Ángulo de inclinación desde el borde superior de la pantalla ( **$\theta_0$** )
- Curvatura de la pantalla ( **$\theta_s$** ) y radio del arco (**r**) o ancho de rejilla si es plana
- Longitud de la cresta del vertedero (**L**)

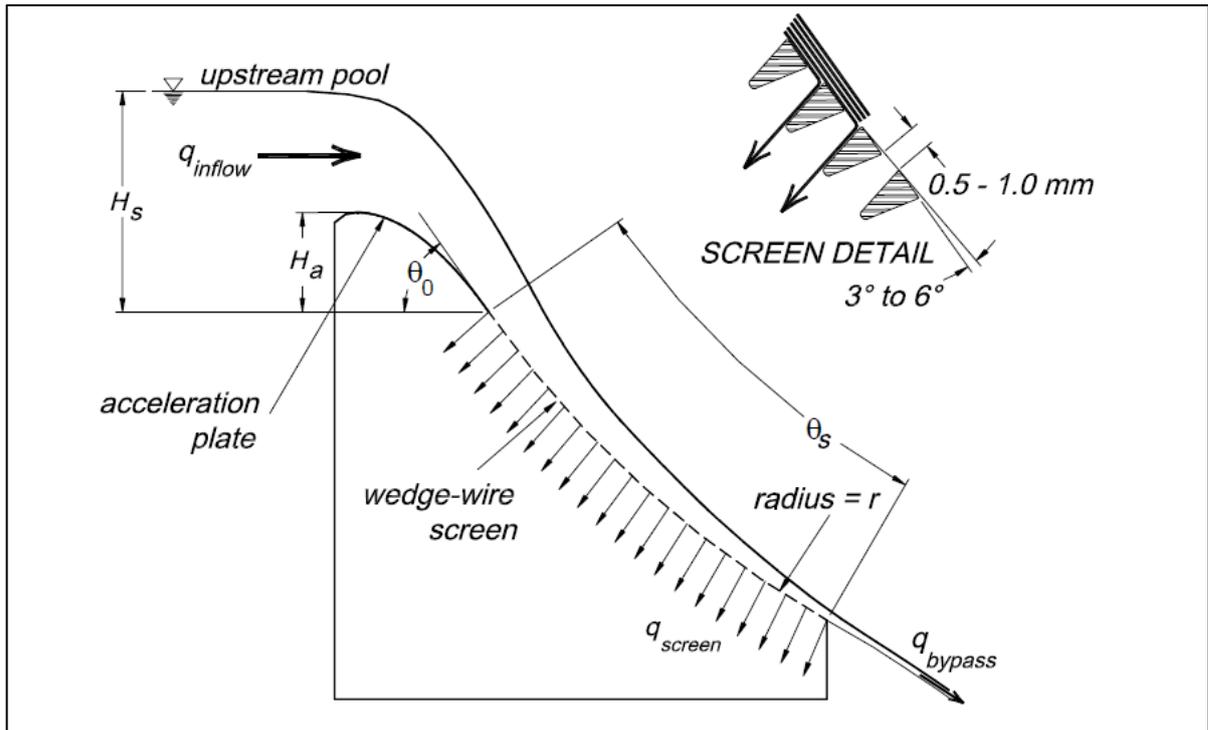


Figura 1.4: Características, disposición típica, y parámetros de diseño para rejillas de efecto Coanda

Fuente: Wahl, 2001

Otros son propiedades del material de la pantalla:

- Separación entre alambre ( $s$ )
- Ancho de alambre ( $w$ )
- Ángulo de inclinación del alambre ( $\phi$ )
- Desplazamiento creado por el ángulo de inclinación de los alambres ( $y_{off}$ )
- Ángulo de rebajo o relieve ( $\lambda$ )

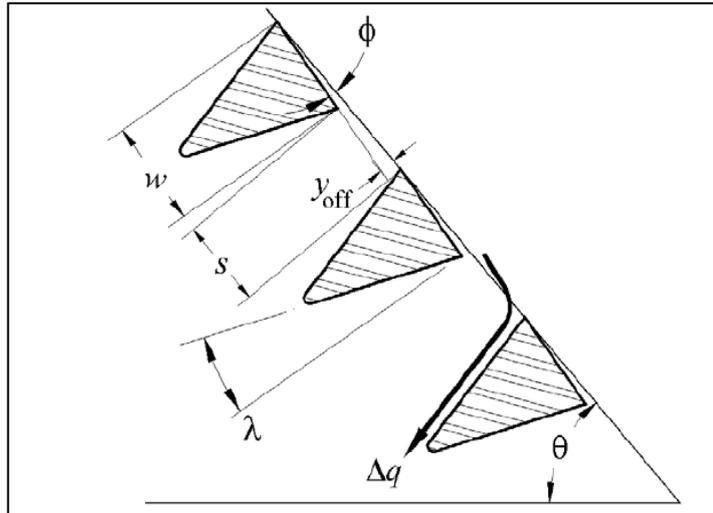


Figura 1.5: Vista de cerca de los alambres y sus parámetros

Fuente: Wahl, 2013

Finalmente, las condiciones de operación hidráulicas que afectan el flujo a través de la pantalla son:

- Unidad de descarga en la parte superior de la pantalla ( $q_{inflow}$ )
- Unidad de descarga en el pie de la pantalla ( $q_{bypass}$ )
- Unidad de descarga en la superficie de la pantalla ( $q_{screen}$ )
- Descarga unitaria a través de la ranura (s) de la pantalla ( $\Delta q$ )

#### 1.4.6. Ecuaciones de Diseño.

##### 1.4.6.1. Altura efectiva compensada.

Es la altura efectiva que se produce al final de cada alambre con respecto a su inmediato anterior, esta está en función del ángulo  $\phi$  de inclinación de cada alambre, generalmente entre 3 y 6 °, el espesor del alambre (s) y su espaciamento (w).

$$y_{off} = (s + w \cos \phi) \sin \phi \quad (1)$$

(Wahl, 2001)

También podría ser el 1% de la siguiente relación:

$$(w + s)\phi \quad (2)$$

(Wahl, 2001)

Esta relación es válida cuando el ángulo de inclinación de los alambres está en el rango ( $\phi \leq 7^\circ$ ). (Wahl, 2001)

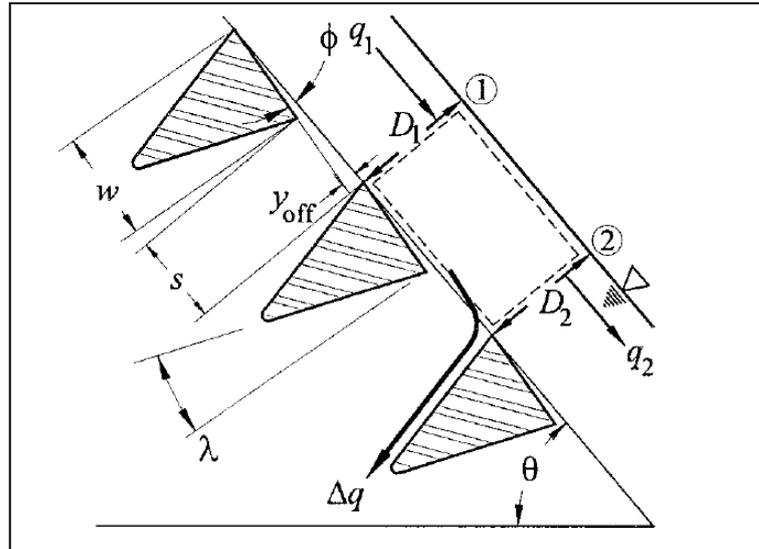


Figura 1.6: Geometría y volumen de control para el análisis del flujo en pantallas de alambre inclinado

Fuente: Wahl, 2001

#### 1.4.6.2. Consideraciones de la rejilla.

#### 1.4.6.3. Radio de la rejilla.

Para pantallas cóncavas el radio puede estar entre **3** y **4m**, y la longitud del arco se expresara en grados, este último no es más que el largo de la reja.

#### 1.4.6.4. Coeficientes de diseño.

##### 1.4.6.4.1. Capacidad de descarga de un vertedero.

La capacidad de descarga en un vertedero de cresta delgada se expresa así:

$$C = 3.27 + 0.40 \frac{H}{h} \quad (3)$$

(Chow, 1994)

Esta ecuación es conservadora para relaciones de **H/h=5**, e incluso hasta **H/h=10**. Cuando estas relaciones son mayores que 15, el vertedero se convierte en un umbral y el caudal se controla mediante una sección crítica inmediatamente aguas arriba del umbral. De esta manera el coeficiente de descarga será:

$$C = 5.68 \left( 1 + \left( \frac{h}{H} \right) \right)^{1.5} \quad (4)$$

(Chow, 1994)

En este caso la profundidad crítica es aproximadamente igual a  $H+h$ , donde  $h$  es la altura del paramento, vertedero, y  $H$  es el tirante de agua sobre la cresta, sin tomar en cuenta la altura de velocidad. (Chow, 1994)

#### 1.4.6.4.2. Coeficiente $C_{cv}$ .

Es el coeficiente combinado de contracción y velocidad, tiene en cuenta el efecto de la contracción del flujo cuando pasa por las ranuras, considera también que las velocidades no se distribuyen uniformemente y otros efectos del fluido. Wahl en el año 2001 estudio el comportamiento de varios tipos de rejillas como se muestra en la Tabla 1.1, como resultado de este estudio planteo la siguiente ecuación para determinar los valores de  $C_{cv}$ .

$$C_{cv} = 0.210 + 0.0109 \left( \frac{R}{W} \right) + 0.00803 (F) \quad (5)$$

(Wahl, 2001)

Tabla 1.1: Dimensiones de la pantalla de la prueba para determinar  $C_{cv}$

Screen number	Screen description	WIRE WIDTH $w$ (mm)		SLOT WIDTH $s$ (mm)		TILT ANGLE $\phi$		Screen porosity $s/(s+w)$	Support rod spacing (mm)
		Variability		Variability		Variability			
		Mean	Uncertainty of mean	Mean	Uncertainty of mean	Mean (deg)	Uncertainty of mean (deg)		
1	2.38 mm (3/32 in.) wire, 1 mm slots, 7.7 cm $\times$ 9.2 cm	2.390	$\pm 0.015$ $\pm 0.003$	1.021	$\pm 0.094$ $\pm 0.019$	3.82	$\pm 0.63$ $\pm 0.08$	0.299	70
2	1.52 mm (0.060 in.) wire, 1 mm slots, 10.4 cm $\times$ 7.2 cm	1.549	$\pm 0.010$ $\pm 0.001$	0.993	$\pm 0.035$ $\pm 0.006$	3.37	$\pm 1.39$ $\pm 0.14$	0.390	19
3	1.52 mm (0.060 in.) wire, 0.5 mm slots, 7.4 cm $\times$ 8.7 cm	1.496	$\pm 0.015$ $\pm 0.003$	0.467	$\pm 0.034$ $\pm 0.006$	6.88	$\pm 0.99$ $\pm 0.13$	0.238	14

Fuente: Wahl 2001

Donde  $C_{cv}$  es una función del número de Froude ( $F$ ), número de Reynolds ( $R$ ) y del número de Weber ( $W$ ).

$$C_{cv} = f(F, R, W) \quad (6)$$

En este estudio Wahl determinó el número de Reynolds usando la velocidad tangencial, medida en el tubo Pitot, considerando el espaciamiento de cada alambre de la rejilla, y para el número de Weber considero la superficie de tensión constante de 0.073 N/m.

$$Re = Vs/v \quad (7)$$

$$We = \rho V^2 s / \sigma \quad (8)$$

(Wahl, 2001)

---

Siendo:

**Re**: número de Reynolds

**V**: la velocidad tangente a la superficie de la pantalla

**s**: separación entre alambres

**$\nu$** : viscosidad cinemática

**$\rho$** : densidad del fluido

**$\sigma$** : fuerza de tensión de superficie por unidad de longitud (0.073 N/m)

El Bureau of Reclamation a través de Tony Wahl, presentó una nueva investigación realizada en el año 2013 para HydroVision International, aquí evaluó la Ecuación 5 de Wahl planteada en el 2001, donde se determinó que esta ecuación, no puede modelar con precisión los casos en los que los valores observados de **C<sub>cv</sub>** eran o muy bajo o muy altos, todo esto cuando las condiciones del flujo cambian, así se tuvo que las desviaciones estándar de los errores relativos, calculados vs observados, estuvieron en un 16.5 %.

El Bureau of Reclamation estando como líder del proyecto Tony Wahl en el año 2013, estimó la siguiente ecuación para calcular el valor de **C<sub>cv</sub>**.

$$C_{cv} = m_2(\delta + \psi)^2 + m_1(\delta + \psi) + b \quad (9)$$

(Wahl, 2013)

Siendo:

**$\delta$** : ángulo de desviación del vector de velocidad que se aproxima a la ranura de la pantalla.

**$\psi$** : ángulo entre la superficie de la pantalla y la línea ( $\overline{AB}$  ver figura 1.7) que conecta la parte inferior del alambre aguas arriba con la parte superior del alambre aguas abajo.

**$m_2$ ,  $m_1$ ,  $b$** : coeficientes de la línea de mejor ajuste expuestos en la tabla 1.2

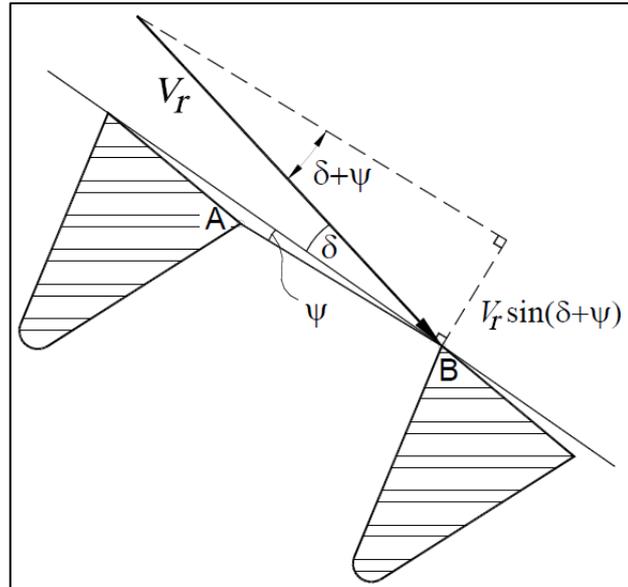


Figura 1.7: Flujo idealizado sobre una ranura de la pantalla

Fuente: Wahl, 2013

En la figura anterior se observa ver que el vector de flujo de aproximación  $V_r$  representa la resultante de la velocidad a través de la cara de la pantalla y la velocidad perpendicular a la cara de la pantalla que se obtendría mediante la conversión de la cabeza de presión asociada con la profundidad de la corriente en cabeza de velocidad, y  $\delta + \psi$  es el ángulo entre  $V_r$  y la ranura, dependerá del ángulo de inclinación del alambre.

Tabla 1.2: Parámetros de las líneas de mejor ajuste para predecir  $C_{cv}$ .

Parameters of $C_{cv} = m_2(\delta + \psi)^2 + m_1(\delta + \psi) + b$	Range of supporting data					
	Screens	$m_2$	$m_1$	$b$	$\delta + \psi$	<b>Fr</b>
A-5 and A-8	0.000933	-0.0641	1.615	19° – 34°	12.8 – 4.0	1.6 – 2.54
B-1 and B-2	0.000990	-0.0641	1.648	16° – 32°	12.3 – 4.1	1.56 – 2.55
A-5, A-8, B-1 and B-2	0.000945	-0.0655	1.678	16° – 34°	12.8 – 4.0	1.56 – 2.55
Validation data set, A-5 on 30° slope, bottom position				18° – 23°	14.2 – 7.8	2.34 – 2.69
A-5 and A-8, including validation data	0.000965	-0.0665	1.657	18° – 34°	14.2 – 4.0	1.6 – 2.69
All data from A- and B-series screens (including validation data)	0.000906	-0.0631	1.642	16° – 34°	14.2 – 4.0	1.56 – 2.69
#1	0.002283	-0.1148	1.995	16° – 28°	10.7 – 4.0	1.63 – 2.53
#3	0.001493	-0.0986	2.301	16° – 34°	13.8 – 4.1	1.57 – 2.53

Fuente: (Wahl, 2013)

---

Las filas sombreadas de la tabla 1.2 son los parámetros para las curvas que se muestran en la Figura 1.8. Los números más bajos de Froude se obtuvieron a partir de ensayos en la capacidad de flujo máxima de la zona de ensayo. Los altos números de Froude se obtuvieron a caudales bajos que apenas mantienen una condición mojada en la última ranura de las pantallas de prueba.

Estas relaciones estiman que cada alambre de la rejilla muestra una curva de rendimiento único, es decir cada alambre actúa de manera independiente con respecto del otro. La nueva ecuación puede estimar con mayor exactitud un valor más conservador de **C<sub>cv</sub>**.

La siguiente figura muestra la ecuación de Wahl 2001 y la nueva ecuación que muestra las relaciones estimadas por el Bureau of Reclamation 2013.

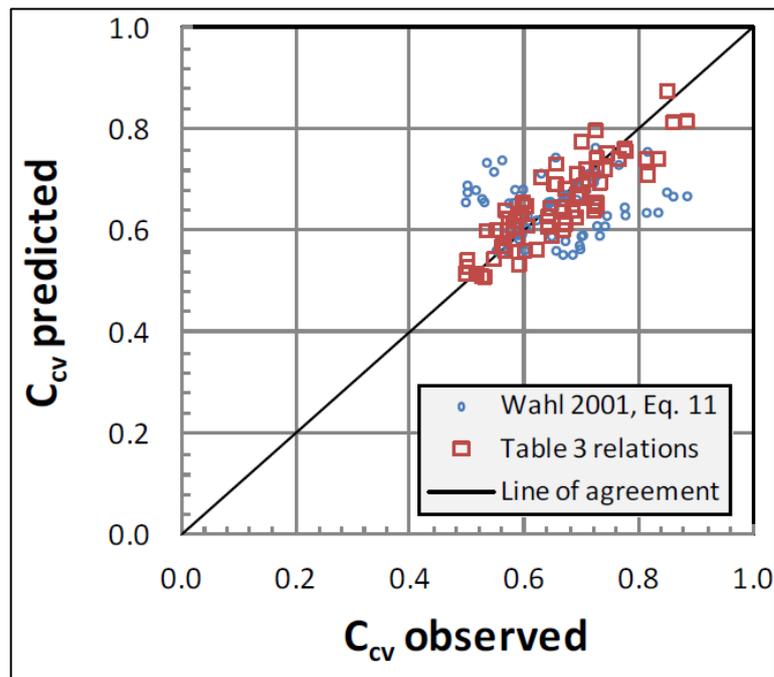


Figura 1.8: Valores predichos de  $C_{cv}$  versus valores observados de  $C_{cv}$

Fuente: Wahl, 2013

Se observa que la ecuación del Bureau of Reclamation 2013 presenta menos dispersión de los resultados con respecto a la ecuación de Wahl 2001. Con la nueva ecuación las desviaciones estándar de los errores relativos es tan solo del 7%, lo que dará más fiabilidad en el diseño. (Wahl, 2013)

---

#### 1.4.7. Rendimiento de la estructura.

##### 1.4.7.1. Caudal de entrada.

Para estimar el caudal de entrada sobre la cresta basta con aplicar la ecuación:

$$q = C H^{1.5} \quad (10)$$

(Chow, 1994)

Esta expresión es para el flujo ideal sobre la cabeza de la presa de ancho infinito ( $L \rightarrow \infty$ ),  $q$  es el caudal o unidad de descarga,  $C$  es el coeficiente de descarga y  $H$  es el tirante de agua sobre la cresta. La ecuación anterior no es más que la ecuación de Francis.

$$q = CLH^{1.5} \quad (11)$$

(Chow, 1994)

##### 1.4.7.2. Caudal captado por cada alambre de la rejilla.

Cuando el flujo se aproxima a la rejilla la unidad de descarga,  $q$ , que cada alambre de la rejilla capta está representada por la siguiente ecuación:

$$q = C_{a,Total}(s + y_{off})\sqrt{2gE} \quad (12)$$

(Wahl, 2001)

La energía específica,  $E$ , está expresada en términos de la presión hidrostática y del vector de velocidad en cada barrote, esto cuando la rejilla es plana. (Wahl, 2001)

$$E = D \cos \theta + \frac{v^2}{2g} \quad (13)$$

(Wahl, 2001)

Cuando la rejilla es cóncava o convexa de radio  $r$ , en este caso particular la energía específica describe la aceleración centrífuga del flujo, incrementándose a razón de:

$$\frac{DV^2}{g r} \quad (14)$$

(Wahl, 2001)

Por lo tanto la nueva ecuación de energía para este tipo de rejillas es:

---

$$E = \frac{\alpha V^2}{2g} + D \cos \theta + \frac{V^2 D}{g r} \quad (15)$$

(Wahl, 2001)

Siendo:

**q**: unidad de descarga

**C<sub>d,Total</sub>**: Coeficiente de contracción y velocidad

**s**: separación entre alambres

**y<sub>off</sub>**: desplazamiento creado por el ángulo de inclinación de los alambres

**E**: energía específica

**g**: fuerza de gravedad

**D**: profundidad del flujo

**r**: radio de la rejilla

**α**: coeficiente de energía

#### **1.4.8. Fundamentos de la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD).**

##### **1.4.8.1. Introducción a la Dinámica de Fluidos Computacional.**

La Dinámica de Fluidos Computacional o CFD por sus siglas en inglés (*Computational Fluid Dynamics*) consiste en el empleo de computadoras y métodos numéricos para resolver todos aquellos problemas físicos que están relacionados con el movimiento de los fluidos y, en ocasiones, de otros fenómenos asociados como la transferencia de calor, las reacciones químicas, el arrastre de sólidos, etc.

Para la aplicación de la metodología de CFD se utilizan varias ramas de la ciencia, entre las que cabe destacar a las matemáticas, la programación, las ciencias físicas y la ingeniería, que deben integrarse para dar lugar al desarrollo de un código que sea capaz de resolver las ecuaciones del flujo de manera satisfactoria.

El método matemático más utilizado en este tipo de software es el de volúmenes finitos, que consiste en discretizar el dominio fluido mediante un mallado, manteniendo las propiedades del fluido en cada uno de los volúmenes definidos. Cada volumen se construye de manera que no se traslape con los volúmenes vecinos, así el volumen total del fluido es igual a la suma de los volúmenes de control considerados. Luego se resuelven las ecuaciones de

---

continuidad y de conservación de momentum para cada volumen de control. (ANSYS CFX Release Notes for 14.5.)

Por tanto, el objetivo final es la creación de un software que proporcione el cálculo detallado del movimiento de los fluidos por medio del empleo del ordenador (capaz de ejecutar una gran cantidad de cálculos por unidad de tiempo) para la resolución de las ecuaciones matemáticas que expresan las leyes por las que se rigen los fluidos.

Debido a la complejidad de las ecuaciones y al grado de detalle que normalmente se desea obtener de las simulaciones, los ingenieros encargados en el desarrollo de estas técnicas CFD siempre han necesitado de las máquinas y supercomputadores más potentes del mundo. Por tanto, aunque se utilice un software comercial a nivel de usuario, siempre hay que recordar que estos códigos están basados en un conjunto de ecuaciones no lineales, muy complejas y acopladas entre sí, que se resuelven de forma iterativa mediante algoritmos muy específicos incluidos en el propio paquete (el solver). El objetivo que se persigue es que el usuario sea capaz de resolver cualquier flujo dentro de una geometría prefijada, que se limita con unas condiciones iniciales y de contorno, y para el que los fenómenos físicos implicados están identificados a priori. Los resultados del código CFD comercial pueden normalmente representarse gráficamente o como un mapa de distribuciones, tanto de variables escalares (contornos) como de variables vectoriales (mapa de vectores, líneas de corriente, etcétera). (Fernández Oro, 2012)

Las características físicas de cualquier situación de flujo de un fluido están regidas por tres principios fundamentales:

- La conservación de la masa.
- La conservación de la cantidad de movimiento.
- La conservación de la energía.

Cada una de éstas a su vez se expresa matemáticamente en su forma más general como ecuaciones diferenciales o también como ecuaciones integrales. En la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), se reemplazan estas ecuaciones por ecuaciones algebraicas aproximadas de un campo de flujo discretizado. Cuanto mayor sea el grado de discretización del campo de flujo, más aproximadas serán las ecuaciones algebraicas obtenidas en CFD. (Castillo Orozco, 2012)

En el caso de modelamientos de flujo a superficie libre, se trata de un sistema multifásico donde el aire corresponde a una fase y en el agua la otra fase. El término “fase” es utilizado en este lenguaje para denotar indistintamente tanto estados de la materia como elementos o

materiales con estructura y/o composición distinta. Para modelar este tipo de flujos se puede utilizar el modelo Euleriano-Euleriano que el ANSYS CFX cuenta.

#### **1.4.8.2. Ecuaciones básicas de flujo de fluidos.**

Las ecuaciones de gobernantes de la Mecánica de Fluidos quedaron definitivamente formuladas por Claude Navier (1785-1836) y George Stokes (1819-1903) cuando introdujeron los términos de transporte viscoso a las ecuaciones de Euler (1707-1783), dando lugar a las famosas ecuaciones de Navier-Stokes:

##### **Ecuación de la Continuidad:**

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

##### **Ecuación de cantidad de Movimiento:**

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{U})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \otimes \mathbf{U}) = -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + \mathbf{S}_M \quad (17)$$

##### **Ecuación de Energía:**

$$\frac{\partial(\rho h_{tot})}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} h_{tot}) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \nabla \cdot (\mathbf{U} \cdot \boldsymbol{\tau}) + \mathbf{U} \cdot \mathbf{S}_M + \mathbf{S}_E \quad (18)$$

donde

$$\boldsymbol{\tau} = \mu(\nabla \mathbf{U} + (\nabla \mathbf{U})^T - \frac{2}{3} \delta \nabla \cdot \mathbf{U}) \quad (19)$$

$$h_{tot} = h + \frac{1}{2} \mathbf{U}^2 \quad (20)$$

(Castillo Elsitdié & Carrillo Sánchez, 2011)

Siendo:

**p:** es la presión

**$\rho$ :** la densidad del fluido

**$\mathbf{U}$ :** el vector de velocidad

**$\boldsymbol{\tau}$ :** el tensor de tensiones turbulentas,

**$h$ :** la energía,

---

$S_M$ : el término de las fuerzas másicas

$S_E$ : el término fuente

$\lambda$ : la viscosidad volumétrica

$\mu$ : la viscosidad dinámica

$\delta$ : el delta de Kronecker.

Estas ecuaciones incluyen las leyes de conservación para la masa, la cantidad de movimiento y la energía de un flujo. Desgraciadamente, se constituyen en un sistema acoplado de ecuaciones, del que no es posible obtener una solución analítica única. Por esta razón, la experimentación y el análisis dimensional siempre acompañaron históricamente a la vía analítica, como dos herramientas esenciales en el estudio de la Mecánica de Fluidos, para validar y contrastar los limitados estudios teóricos. (Fernández Oro, 2012)

#### **1.4.8.3. Estrategia de utilización de CFD.**

La estrategia utilizada en el CFD es la de reemplazar un problema definido sobre un dominio continuo (hipótesis del continuo en mecánica de fluidos clásica) por un dominio discreto definido a partir de una malla. En el continuo, cada variable del flujo (presión, velocidad, temperatura) está definida en todos los puntos del espacio. Sin embargo en el dominio discreto, cada variable de flujo está definida únicamente en los puntos (nodos) que configuran la malla. A este proceso se le denomina discretización espacial, porque el espacio se “discretiza” en un número finito de puntos. (Fernández Oro, 2012)

#### **1.4.8.4. Condiciones de Borde o Frontera.**

Las condiciones de borde son un conjunto de propiedades o condiciones en las superficies de los dominios, y están obligados a definir completamente la simulación de flujo. El tipo de condición de frontera que se puede ajustar depende de la superficie de delimitación.

- Un límite de fluido es una superficie externa del dominio de fluido con excluyendo las superficies donde se encuentra con otros dominios.
- Un límite sólido es una superficie externa del dominio real excluyendo las superficies donde se encuentra con otros dominios.
- Una interfaz de fluido-fluido es la interfaz entre dos dominios de fluidos.

- Una interfaz de fluido-sólido es la interfaz entre un dominio sólido y líquido.
- Una interfaz sólido-sólido es la interfaz entre dos dominios sólidos.

#### 1.4.8.4.1. Límite de Fluidos.

Un límite de fluido es una superficie externa de un dominio de fluido y se dan las siguientes condiciones de borde:

- Entrada (Inlet) - El fluido predominantemente fluye hacia el dominio.
- Salida (Outlet) - El fluido predominantemente fluye fuera del dominio.
- Apertura (Opening) - El fluido puede fluir de forma simultánea tanto dentro como fuera del dominio.
- Pared (Wall) – Es el límite Impenetrable al flujo de fluido.
- Plano simétrico (Symmetry) – Es un plano simétrico de geometría y flujo

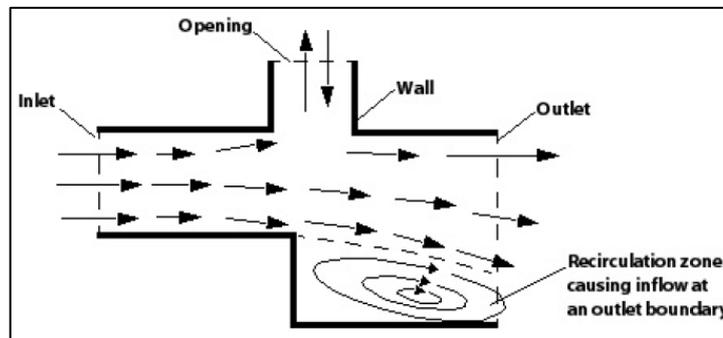


Figura 1.9: Condiciones de Borde

Fuente: (ANSYS, 2011)

#### 1.4.8.4.2. Límite de Sólidos.

Un límite sólido es una superficie externa del dominio sólido y se dan las siguientes condiciones de borde:

- Pared (Wall) - Es el límite Impenetrable al flujo de fluido.
- Plano simétrico (Symmetry) - Es un plano simétrico de geometría y flujo

#### 1.4.8.5. Flujos multifásicos.

En la naturaleza y en la industria hay un gran número de flujos que están compuestos macroscópicamente por una compleja mezcla de fases. Aunque el concepto de fase podría asimilarse al estado particular de la materia que se está analizando (esto es, sólido, líquido o gaseoso), lo cierto es que habitualmente el concepto de fase tiene un sentido más amplio. Así, cuando se habla de fluidos multifásicos, se define a cada fase como aquel tipo de material identificable, con una frontera bien definida (macroscópicamente) y que presenta una determinada respuesta o interacción con el flujo o dominio en el que este confinado. (Fernández Oro, 2012)

En este tipo de flujos, la fase primaria debe ser continua (fluida) y corresponde normalmente con la fase principal del flujo. El resto de fases, ya estén de forma dispersa, interpenetradas en la primaria o de forma continua, definiendo una clara interfaz de separación, se denominan fases secundarias.

La Figura 1.10 muestra un esquema con algunos de los flujos más característicos que se ajustan a la condición de multifásicos.

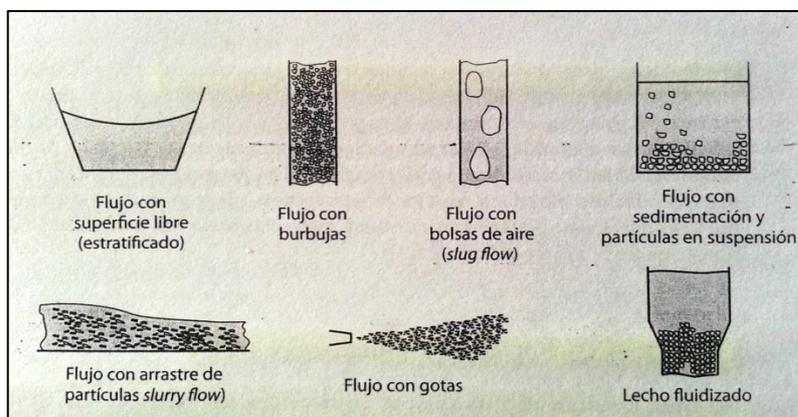


Figura 1.10: Tipos de flujos multifásicos

Fuente: (Fernández Oro, 2012)

Para el presente trabajo el tipo de flujo de interés es el flujo con superficie libre (estratificado). Que se trata de fluidos inmiscibles (que no se pueden mezclar) separados por una interfaz claramente definida, como la interfaz entre aceite y agua en un recipiente o la superficie libre del agua en un canal hidrodinámico.

---

#### **1.4.8.6. Modelos multifásicos.**

No existe ningún modelo multifásico capaz de predecir correctamente todas las situaciones mostradas en la Figura 1.10 debido a la gran diversidad de flujos y regímenes existentes. En su lugar se han ido desarrollando diferentes modelos que son, cada uno de ellos, apropiados para una situación concreta. La selección del modelo correcto debe tener en cuenta a priori alguna de las características fundamentales del flujo multifásico, como son el régimen la cantidad y dispersión de las fases secundarias o el número de Stokes de las partículas transportadas (si hubiese). (Fernández Oro, 2012)

En función del régimen, se distinguen dos tipos de comportamiento multifase. Por un lado, aquellos en los que la fase (o fases) secundaria se encuentra totalmente dispersa en el fluido primario. La segunda posibilidad es que la fase secundaria sea inamisible con la primera, estableciendo al menos una interfase entre los fluidos. Este comportamiento es típico de mezclas de líquidos o de un líquido con superficie libre. Respecto a la cantidad de fase secundaria presente en el flujo multifásico, se utiliza la fracción de volumen de dicha fase en el dominio como indicador de su importancia. Con respecto al número de Stokes, este nos permite decidir qué modelo es el más apropiado en función de la densidad de partículas arrastradas en la corriente primaria. (Fernández Oro, 2012)

Dos modelos diferentes de flujo multifásico, están disponibles en ANSYS CFX, un modelo multifásico Euleriano-Euleriano y un Lagrangiano (Lagrangian Particle Tracking). El modelo aplicado para este proyecto es el Euleriano.

##### **1.4.8.6.1. Modelo Euleriano-Euleriano.**

Dentro del modelo de Euleriano-Euleriano, ciertos términos de transferencia de interfase utilizados en movimiento, calor, y otros modelos de transferencia de interfase, pueden ser usados para modelar modelos de partículas, mezcla o el modelo de superficie libre. En particular, el cálculo de la densidad de área de interfase, que se utiliza para todos los modelos de transferencia no homogéneos para un par de fluido dado, se calcula de acuerdo a uno de estos modelos. El modelo utilizado para un determinado par de fases se establece en una pestaña del ANSYS CFX denominada pares de fluidos (Fluid pair).

##### **1.4.8.6.2. Transferencia de Interfase.**

El modelo Euleriano-Euleriano tiene dos submodelos diferentes: el modelo homogéneo y el modelo de transferencia de interfase o modelo inhomogéneo. En el modelo homogéneo todas las fases comparten los mismos campos de velocidad, turbulencia y temperatura, simplificando las ecuaciones, pero perdiendo precisión en predecir interfaces que no estén bien definidas. Para estos últimos casos, como por ejemplo cuando existe salpique o choque

---

de fluidos, es más acertado utilizar el modelo no-homogéneo. En este modelo cada fluido posee su propio campo de solución y estos interactúan mediante términos de transferencia de interfase, lo que por cierto aumenta los tiempos computacionales, ya que debe resolver ecuaciones adicionales para cada una de las fases, en vez de una para todas. (ANSYS, 2011)

Hay tres sub-modelos diferentes disponibles que difieren en la forma en que modelan la densidad de área interfacial y las condiciones de transferencia de interfase que son:

- **Modelo de partículas:** Este modelo está disponible cuando una de las fases es continua y la otra se dispersa. Las partículas de la fase dispersa se supone que son esféricas. Es apropiado para modelar flujos bifásicos dispersos, como por ejemplo; la dispersión de burbujas de gas en un líquido, gotas de líquido en un gas, líquidos inmiscibles, las partículas sólidas en un gas o en un líquido.
- **El modelo de mezcla:** Este es un modelo muy simple que trata ambas fases simétricamente. Puede ser apropiado como una primera aproximación o como la base de modelos de transferencia de interfaces suministrados por el usuario para un cálculo del flujo de dos fases líquido-líquido o gas-líquido no dispersa. Se requiere que ambas fases sean continuas. Se puede utilizar para modelar problemas de flujo multifásico más complejas, como por ejemplo; el flujo en bombas.
- **Modelo a superficie libre:** Este modelo es aplicable a los flujos de superficie libre. El modelo de partículas o modelo de mezcla también pueden ser utilizados para estos flujos si hay arrastre de una fase dentro de otro.

#### **1.4.8.6.3. Modelo Homogéneo.**

En el modelo homogéneo se puede ver como un caso límite euleriano-euleriano de flujo multifásico en el que la tasa de transferencia de interfase es muy grande. Esto da como resultado que todos los fluidos comparten un campo de flujo común, así como otros campos pertinentes, tales como la turbulencia. Es válida en los casos de flujo por gravedad, en donde las fases están completamente estratificadas, por ejemplo, un flujo de superficie libre, donde la interfaz está bien definida. En este caso, las fracciones de volumen de las fases son iguales a uno o cero en todas partes excepto en los límites de fase, y tiene sentido utilizar un único campo de velocidades.

---

Para un proceso de transporte dado, el modelo homogéneo asume que las cantidades transportadas (con la excepción de la fracción de volumen) para el proceso son los mismos para todas las fases, es decir,

$$\varphi_\alpha = \varphi \quad (21)$$

$$1 \leq \alpha \leq Np \quad (22)$$

(ANSYS, 2011)

Siendo:

$\varphi$  = Variable escalar general

$Np$  = Número total de fases

Las diferentes fases de fluidos son denotadas con letras griegas minúsculas como  $\alpha$ ,  $\beta$ , etc. En general, una cantidad con subíndice de cualquiera de estas letras se refiere al valor de la cantidad para esa fase particular.

Como las cantidades transportadas son compartidos en flujo multifásico homogéneo, es suficiente despejar los campos compartidos utilizando ecuaciones de transporte de masa en lugar de la solución de ecuaciones de transporte individual para cada fase.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varphi) + \nabla \cdot (\rho U \varphi - \Gamma \nabla \varphi) = S \quad (23)$$

Siendo:

$$\rho = \sum_{\alpha=1}^{Np} r_\alpha \rho_\alpha \quad (24)$$

$$U = \frac{1}{\rho} \sum_{\alpha=1}^{Np} r_\alpha \rho_\alpha U_\alpha \quad (25)$$

$$\Gamma = \sum_{\alpha=1}^{Np} r_\alpha \Gamma_\alpha \quad (26)$$

(ANSYS, 2011)

$\varphi$  = Variable escalar general

$\rho$  = Densidad de la fase  $\alpha$

---

$r_\alpha$  = Fracción volumétrica de la fase  $\alpha$

$\Gamma_\alpha$  = Difusividad de la fase  $\alpha$

$U$  = Vector de velocidad  $U_{x,y,z}$

$N_p$  = Número total de fases

#### **1.4.8.7. Flujo a superficie libre.**

Como se había dicho anteriormente el flujo a superficie libre se refiere a una situación de flujo multifásico donde las fases están separadas por una interfaz bien definida. Algunos ejemplos de flujos de superficie libre incluyen el flujo de canales abiertos, problemas de llenado de tanques, turbinas, bombas y muchos otros.

El modelo homogéneo se debe utilizar siempre que sea posible. El flujo de superficie libre con el modelo no homogéneo se puede utilizar para permitir que las dos fases se separen. Esto será necesario si se produce el arrastre de una fase dentro de otra y desea permitir que las fases se separen de nuevo. (ANSYS I. , 2011)

##### **1.4.8.7.1. Nivel de compresión de la interfase.**

Cada fase que se incorpora al modelo introduce su fracción de volumen al cálculo. La fracción de volumen de cada fase vale 0 en aquellas celdas en donde no hay presencia de esa fase, vale 1 en aquellas celdas llenas de dicha fase y solo puede variar de 0 a 1 en aquellas celdas donde precisamente se encuentra la interfase. De esta manera no puede haber celdas vacías que no estén ocupadas por alguna de las fases. (Fernández Oro, 2012)

##### **1.4.8.7.2. Tensión superficial.**

Según la teoría del *Solver Modeling Guide* de ANSYS, la tensión superficial es la fuerza que mantiene unida la interfaz. Si se corta una interfaz, la magnitud de la fuerza de la tensión superficial por unidad de longitud se llama coeficiente de tensión superficial  $\sigma$ . Tensión superficial tiene una serie de efectos físicos importantes, incluyendo:

- Si la interfaz es curva, induce una fuerza normal a la interfaz. Para una gota en reposo, esto induce un aumento de presión dentro de la gota de  $\Delta p = \sigma k$ , donde  $k$  es la curvatura de la gota.
- Cuando el coeficiente de tensión superficial no es constante, la fuerza de tensión superficial tiene una componente tangencial que tiende a mover el fluido a lo largo de

---

la interfaz hacia las regiones de alta superficie de coeficiente de tensión. Esto a menudo se llama Convección de Marangoni.

- Cuando la interfaz de un flujo a superficie libre toca una pared, la pared puede atraer el líquido (pared mojada) o repeler el líquido (pared no mojada). En una situación estática, el ángulo de contacto de la pared se puede medir. Este fenómeno, es conocido como la adhesión de la pared.

Para flujos de superficie libre, se tiene la opción de incluir los efectos de la tensión superficial. Cuando está activado, un coeficiente de tensión superficial debe ser especificado ( $\sigma$ ). Si el coeficiente de tensión superficial es variable, la fuerza de Marangoni se incluye automáticamente. Si se activa el modelo de la tensión superficial, el uso de doble precisión es a menudo necesario para evitar errores de redondeo en el cálculo curvatura. (ANSYS I. , 2011)

El modelo de la tensión superficial utilizado en CFX se basa en el modelo de la Fuerza Superficie Continuum de Brackbill. En este modelo, la fuerza de tensión superficial es como una fuerza volumen que se concentró en la interfaz, en lugar de una fuerza de superficie. Si se considera la interfaz de superficie libre se muestra en la siguiente figura:

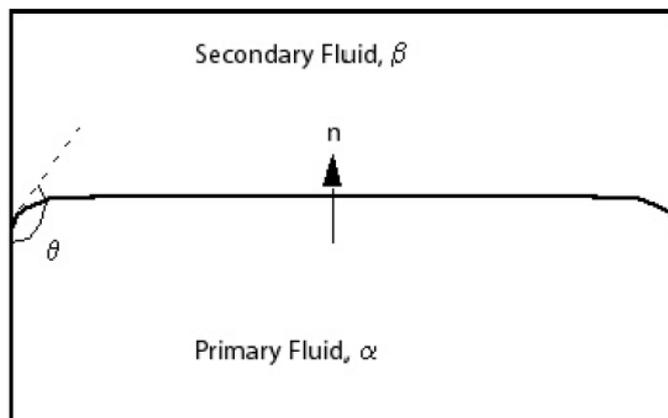


Figura 1.11: Interfaz de superficie libre  
Fuente: (ANSYS, 2011)

Si definimos el flujo Primario  $\alpha$  (fase líquida) y un fluido secundario  $\beta$  (normalmente una fase gaseosa). La fuerza de tensión superficial dada por el modelo de la Fuerza Superficie Continuum es:

---


$$F_{\alpha\beta} = \mathbf{f}_{\alpha\beta} \delta_{\alpha\beta} \quad (27)$$

Siendo:

$$\mathbf{f}_{\alpha\beta} = -\sigma_{\alpha\beta} k_{\alpha\beta} \mathbf{n}_{\alpha\beta} + \nabla_s \sigma \quad (28)$$

$$\delta_{\alpha\beta} = \left| \nabla_{r_{\alpha\beta}} \right| \quad (29)$$

(ANSYS I. , 2011)

Siendo:

$\sigma$ : es el coeficiente de tensión superficial

$\mathbf{n}_{\alpha\beta}$ : es el vector normal de interfaz que apunta desde el fluido primario al fluido secundario (calculado a partir del gradiente de una fracción de volumen de alisado)

$\nabla_s$ : es el operador gradiente en la interfaz

$r_{\alpha\beta}$ : es la fracción de volumen de la fase primaria y secundaria

$k$ : es la curvatura de la superficie definida por:

$$k_{\alpha\beta} = \nabla \cdot \mathbf{n}_{\alpha\beta} \quad (30)$$

Los dos términos resumidos en el lado derecho de la ecuación 28 reflejan las componentes normal y tangencial de la fuerza de tensión superficial, respectivamente. El componente normal surge de la curvatura de la interfase y el componente tangencial de las variaciones en el coeficiente de tensión superficial (el efecto Marangoni). El término  $\delta_{\alpha\beta}$  a menudo se llama la función delta de la interfaz; es cero fuera de la interfaz, garantizando así que la fuerza de tensión de la superficie sea activa sólo cerca de la interfaz. (ANSYS I. , 2011)

Cuando la interfaz entre los dos fluidos se cruza con una pared, es posible tener en cuenta la adhesión de la pared mediante la especificación del ángulo de contacto,  $\theta$ , que hace la interfaz con la pared a través del fluido primario. El vector normal de la interfaz utilizada para los cálculos tanto de la curvatura y la fuerza de tensión superficial debe satisfacer el ángulo de contacto de la pared. (ANSYS, 2011)

---

#### **1.4.8.8. Modelos de Turbulencia.**

En la simulación CFD se trata de considerar todas las variables posibles que se presentan en la realidad, entonces para la resolución adecuada de un problema o fenómeno real además de las ecuaciones gobernantes de flujo, se debe considerar la turbulencia, que casi siempre está presente en todas las condiciones de flujo de fluidos y transferencia de calor.

Si se considera un flujo turbulento, éste tiene pequeñas variaciones en sus propiedades a una frecuencia alta. La simulación numérica de estas variaciones sería extremadamente compleja, por lo cual las ecuaciones que se utilizan son promediadas en el tiempo para su análisis. También es importante mencionar que la turbulencia es un evento dinámico y caótico que no puede ser predicho fácilmente, por lo cual todos estos modelos existentes, son de tipo estadístico y semi-empíricos. (Castillo Orozco, 2012)

La turbulencia se compone de las fluctuaciones en el campo de flujo en tiempo y espacio. Se trata de un proceso complejo, sobre todo porque es tridimensional, inestable y se compone de muchas escalas. Puede tener un efecto significativo en las características del flujo. La turbulencia se produce cuando las fuerzas de inercia en el fluido se vuelven significativas en comparación con las fuerzas viscosas, y se caracteriza por un alto número de Reynolds. (ANSYS, 2011)

En principio, las ecuaciones de Navier-Stokes describían tanto el flujo laminar y turbulento y sin la necesidad de información adicional. Sin embargo, los flujos turbulentos en números de Reynolds realistas abarcan una amplia gama de escalas de longitud y de tiempo turbulentos, y que generalmente implican escalas de longitud mucho menor que la más pequeña malla de volumen finito, que se puede utilizar prácticamente en un análisis numérico. (ANSYS, 2011)

Los modelos de turbulencia más usados son los llamados “modelos de dos ecuaciones” debido a que ofrecen una buena relación entre costo computacional y precisión en los resultados. Estos modelos resuelven las escalas de longitud y de velocidad usando dos ecuaciones separadas, por eso su nombre.

Dentro de esta familia de modelos de turbulencia existen dos modelos principales: **k-ε** y **k-ω**. Ambos utilizan la hipótesis de un gradiente de difusión para relacionar los esfuerzos de Reynolds con los gradientes medios de velocidad y la viscosidad turbulenta. La viscosidad turbulenta es modelada como el producto entre la velocidad turbulenta y la escala de longitud turbulenta.

Uno de los principales problemas del modelamiento de turbulencia es lograr predecir con precisión el flujo al separarse de una superficie lisa. En general los modelos basados en ecuaciones “ $\epsilon$ ” predicen la aparición de la separación demasiado tarde y con poca precisión, por lo que no son recomendables para aplicaciones donde los desprendimientos sean importantes. Para resolver este problema se utiliza recurrentemente los modelos basados en las ecuaciones **k- $\omega$** . En particular, el modelo **SST** (Shear Stress Transport), basado en **k- $\omega$** , fue diseñado para entregar gran precisión en la aparición y cantidad de flujo de separación bajo gradientes de presión adversos, mediante la inclusión de efectos de transporte en la formulación de la viscosidad turbulenta o “Eddy”. Esto aumenta la precisión a la hora de predecir la separación, como ha sido demostrado en un gran número de estudios de validación. Un aspecto importante de destacar es que este modelo de turbulencia, **SST**, solo genera beneficios cuando se tiene una resolución de capa límite de por lo menos 10 puntos, en todo el resto del flujo es idéntico al modelo k- $\epsilon$ . (Facusse Saavedra, 2013)

#### 1.4.8.9. Mallado del Domino.

Como se ha explicado en puntos anteriores, se utilizará el método de volúmenes finitos (MVF) para resolver las ecuaciones involucradas en el modelo. Es por esto que el mallado resulta fundamental a la hora de resolver dichas ecuaciones y encontrar su equilibrio, tanto en la forma de los elemento como en su cantidad. En el proceso de discretización se convierte el dominio continuo en uno discretizado, para esto se requiere una división que se logra mediante la generación de una malla en el dominio. ANSYS CFX 14.5 ofrece la posibilidad de emplear diferentes tipos de elementos para realizar el mallado del dominio. La principal diferencia entre los distintos tipos de elemento radica en el número de nodos con el que se resuelven las ecuaciones dentro de cada volumen de control. Si el número de nodos por elemento es mayor, mayor será la precisión interna que se obtiene. La Tabla 1.3 muestra la cantidad de nodos que presenta cada tipo de elemento.

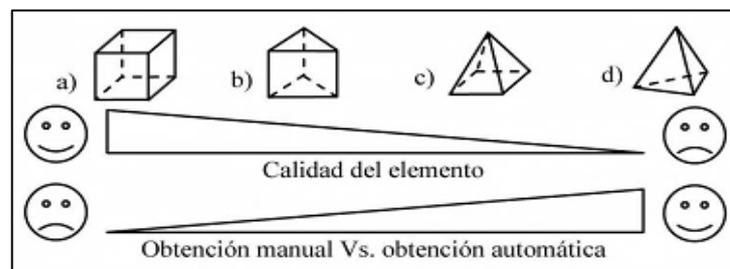


Figura 1.12: Tipologías de elementos. a) Hexaédrico; b) prisma; c) pirámides; d) tetraedro.

Fuente: (Castillo Elsitdié & Carrillo Sánchez, 2011)

---

Tabla 1.3: Tipos de elementos y cantidad de nodos

Forma de elemento	Nodos por elemento
<b>Tetraedro</b>	4
<b>Pirámide</b>	5
<b>Prisma</b>	6
<b>Hexaedro</b>	8

Fuente: El autor

Al usar mallados hexaédricos se tiene la ventaja de reducir el número de elementos del dominio fluido y mejorar la convergencia de la solución, lo que origina como consecuencia menores tiempos de ejecución.

Según Carrillo y Castillo se debe tener en cuenta a la hora de lanzar la simulación que una malla predominante tetraédrica requiere en torno a 1 GHz de memoria RAM por millón de elementos, mientras que la malla hexaédrica requiere aproximadamente 1 GHz por cada cien mil elementos.

Caracterizando al mallado por la conectividad de sus puntos existen tres tipos de malla:

- Malla estructurada
- Malla no estructurada
- Malla híbrida

Cabe señalar que los algoritmos de solución diseñados para mallado estructurado no pueden ser usados para resolver mallados no estructurados, mientras que los algoritmos de solución diseñado para resolución de problemas con malla no estructurada si pueden ser empleados para geometrías con malla regular.

#### **1.4.8.9.1. Mallado estructurado.**

Una malla estructurada se entiende toda discretización cuya conectividad sigue un patrón reticular. Por esta razón, en este tipo de mallas se utilizan fundamentalmente elementos cuadriláteros (2D), o hexaédricos (3D), aunque a partir de ellos, se pueden generar triángulos y tetraedros, respectivamente. La creación de esta retícula impone unas fuertes condiciones sobre el contorno del dominio, por lo que en muchos casos este tipo de discretización no es realizable o, siéndolo, presenta una baja calidad. (Díaz Morcillo, 2000) Un ejemplo de este tipo de mallado se puede observar en la Figura 1.13.

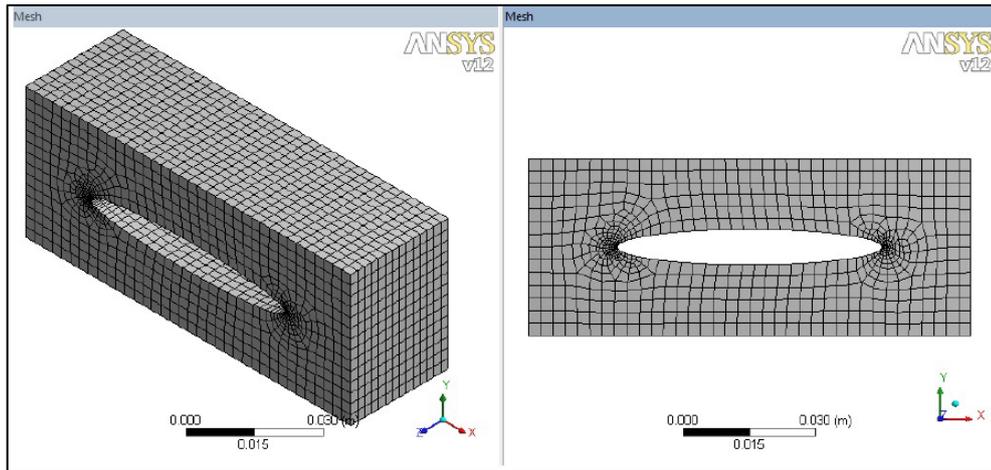


Figura 1.13: Geometría con mallado estructurado

Fuente: (Castillo Orozco, 2012)

#### **1.4.8.9.2. Mallado no estructurado.**

Las mallas no estructuradas, al contrario que las estructuradas, no presentan un patrón de conectividad predeterminado, pues ésta viene determinada por el contorno del problema, la situación de los nodos interiores y el método de discretización utilizado. Consustancial a este tipo de discretización es el elemento triangular (2D) o el tetraédrico (3D), aunque en los últimos años se han desarrollado técnicas de generación de malla no estructurada cuadrilátera o hexaédrica. Esta libertad en la conectividad hace posible la discretización de cualquier dominio a partir de una discretización del contorno arbitraria. Son, por tanto, de aplicación más general que las estructuradas, pero esto repercute en un mayor coste computacional. (Díaz Morcillo, 2000) En la Figura 1.14 se puede ver un ejemplo del mallado no estructurado.

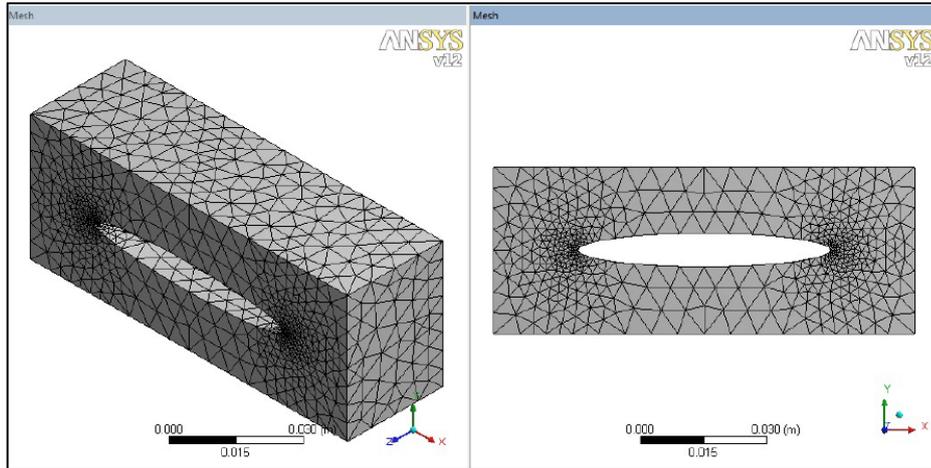


Figura 1.14: Geometría con mallado no estructurado  
Fuente: (Castillo Orozco, 2012)

#### 1.4.8.9.3. Mallado híbrido

El mallado híbrido es una combinación de mallas estructuradas y no estructuradas. En algunos casos, como por ejemplo para la modelación de flujo viscoso se necesita de un refinamiento para la capa límite, la cual puede ser malla estructurada y para el resto del dominio malla no estructurada. En la Figura 1.15 esta se ve un ejemplo de este tipo de mallado.

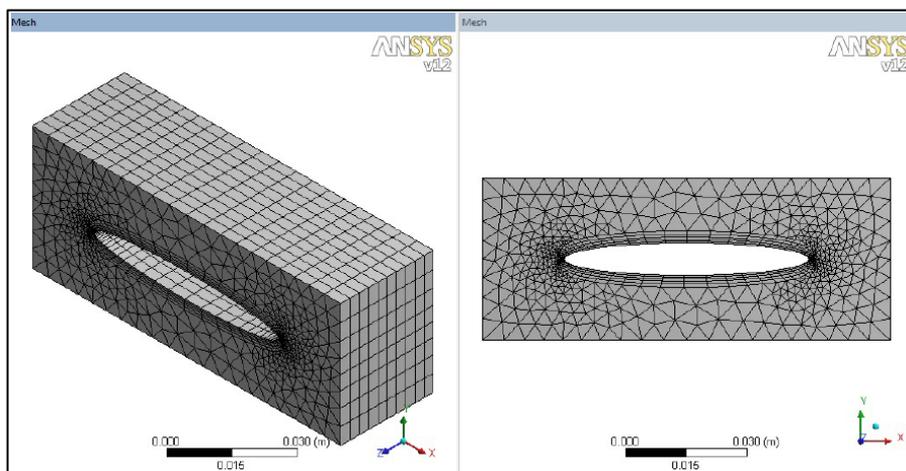


Figura 1.15: Geometría con mallado híbrido  
Fuente: (Castillo Orozco, 2012)

---

#### 1.4.8.9.4. Calidad del mallado.

La calidad del mallado según Castillo Orozco, se enfoca a la simetría de los elementos que conforman el dominio. Es preferible tener elementos lo más simétricos posibles. Por ejemplo, si es un elemento tipo hexaedro es mejor mientras más se aproxime a un cubo perfecto.

Para el mallado CFD, el software ANSYS-CFX usado en el presente trabajo, usa un criterio de revisión de forma basado en la relación de aspecto, volumen del elemento y ángulo de las caras. Éste recomienda como estándar usar el criterio de “oblicuidad” (skewness) para calificar la calidad del mallado. El criterio “oblicuidad” (skewness) es uno de los principales métodos para establecer la calidad de un mallado. Este cataloga la simetría y la oblicuidad de los elementos. En la Figura 1.16 se puede observar este criterio. (Castillo Orozco, 2012)

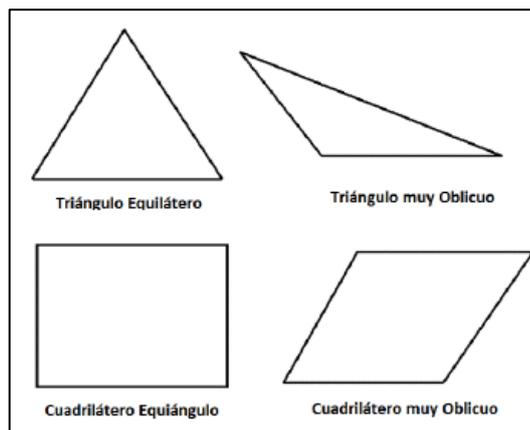


Figura 1.16: Triángulos y cuadriláteros ideales y oblicuos

Fuente: (Castillo Orozco, 2012)

La Tabla 1.4 muestra el rango de los valores de oblicuidad y su correspondiente interpretación de calidad del elemento. Considerando el concepto de oblicuidad, éste indica un valor de 0 para un elemento equilátero perfecto, y 1 para definir a un elemento completamente degenerado. Un elemento completamente degenerado se caracteriza por tener sus nodos muy cercas, es decir casi coplanares.

Tabla 1.4: Valores de oblicuidad y calidad de elementos

Valor de oblicuidad	Calidad del elemento
1	Degenerado
0.9 - <1	Muy malo
0.75 - 0.9	Pobre
0.5 - 0.75	Regular
0.25 - 0.5	Bueno
>0 - 0.25	Excelente
0	Equilátero perfecto

Fuente: (Bakker, 2012)

Para la medición de la oblicuidad se usan dos métodos:

- Método basado en volúmenes equiláteros que es aplicado solo en triángulos y tetraedros.
- Método basado en la desviación de un ángulo equilátero normalizado que se puede usar en todos los tipos de elementos, siempre usado en pirámides y prismas. (Bakker, 2012)

En el método basado en volúmenes equiláteros la oblicuidad se define como:

$$Oblicuidad = \frac{\text{tamaño óptimo de elemento} - \text{tamaño del elemneto}}{\text{tamaño óptimo de elemento}}$$

(Bakker, 2012)

Y el tamaño óptimo del elemento es el tamaño de un elemento equilátero con el mismo radio de circunscripción.

En el método de desviación de ángulo normalizado, la oblicuidad se define como:

$$Oblicuidad = \text{Maximo} \left[ \frac{\theta_{max} - 90}{90}, \frac{90 - \theta_{max}}{90} \right]$$

(Bakker, 2012)

Siendo:

$\theta_{max}$ : ángulo máximo del elemento a evaluar

## **CAPITULO II**

---

## **2. MATERIALES Y MÉTODOS.**

El objetivo principal del presente trabajo de fin de titulación, fue realizar una simulación numérica que permita evaluar el funcionamiento hidráulico de una rejilla de efecto Coanda utilizando la metodología CFD mediante el programa ANSYS CFX. En este capítulo se presenta el procedimiento llevado a cabo para simular esta estructura por medio del programa en mención, paquete de CFD basado en el método de volúmenes finitos.

En esta sección se presentan algunas consideraciones importantes que deben tenerse en cuenta al usar las herramientas que este método ofrece para la simulación del flujo de fluidos. Cabe recalcar que este modelo es una simulación bifásica de un dominio tridimensional impuesto por el autor con un previo diseño de la captación de efecto Coanda mediante el software Hydraulic Performance of Coanda-Effect Screens (HPCES) Versión 0.6.0 de Tony L. Wahl descargado de la página del Bureau of Reclamation: [http://www.usbr.gov/pmts/hydraulics\\_lab/twahl/coanda/coandadownload.html](http://www.usbr.gov/pmts/hydraulics_lab/twahl/coanda/coandadownload.html)

### **2.1. Diseño de la captación.**

Para el diseño de la captación se empleó el programa HPCES, este software permite el análisis de diferentes variables que son necesarias para el diseño físico del modelo planteado en este trabajo. Esta herramienta es un software libre creado por Tony Wahl ingeniero del Bureau of Reclamation del Departamento del Interior en Denver Colorado, USA. Una vez obtenidos los resultados arrojados por este programa se comparó los resultados obtenidos con la simulación CFD en el programa ANSYS CFX.

Para el diseño de la captación a ser simulada se utilizó algunos parámetros impuestos por el autor, tales como; la forma de la rejilla, el ancho y largo de la rejilla, el grado de inclinación de la pantalla, el caudal de entrada, la forma de la placa de aceleración, la separación, ancho y grado de inclinación de los alambres. En la Tabla 2.1 se puede observar todos los valores impuestos por el autor para el diseño de la captación.

Tabla 2.1: Parámetros para el diseño de la captación

Parámetros de la Estructura	Descripción
<b>Estructura</b>	
Forma de la rejilla	Plana
Largo del vertedero/Ancho de la rejilla	20 cm
Largo de la rejilla	10 cm
<b>Placa de Aceleración</b>	
Inclinación de la pantalla ( $\theta_0$ )	30 °
Caudal de Diseño (Q0)	0.011 m <sup>3</sup> /s
Forma de la cresta	Arco Ojival
<b>Rejilla</b>	
Separación de alambres (s)	1 mm
Ancho de los alambres (w)	2 mm
Inclinación de los alambres ( $\varphi$ )	5 °
<b>Condiciones de Flujo</b>	
Caudal de Entrada (Inflow)	0.011 m <sup>3</sup> /s

Fuente: El autor

En las Figura 2.1 a 2.4 se muestra los datos ingresados al software para el diseño de la captación de efecto Coanda con algunos de los resultados previos obtenidos como: el desnivel de la placa de aceleración ( $H_a$ ), la altura efectiva ( $y_{off}$ ), número de aberturas y la altura desde la placa de aceleración al nivel del agua ( $H_s$ ).

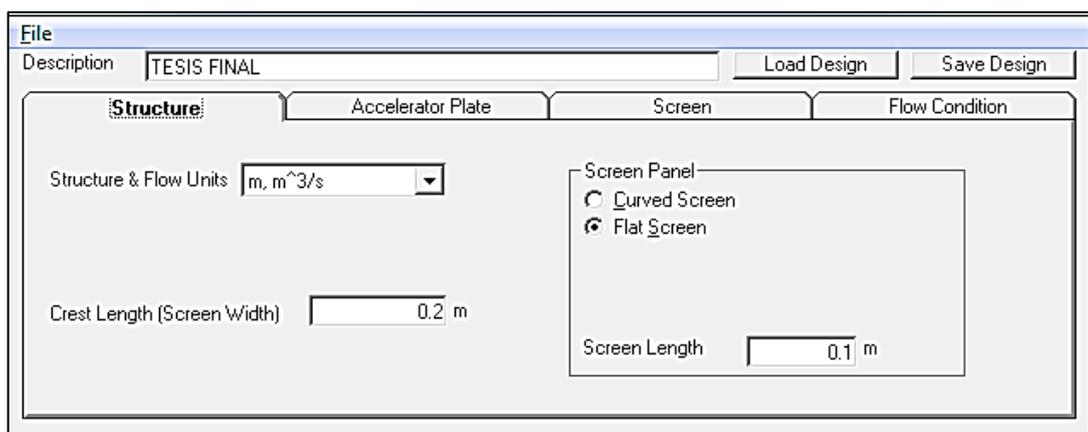


Figura 2.1: Datos en la pestaña estructura

Fuente: Software HPCES

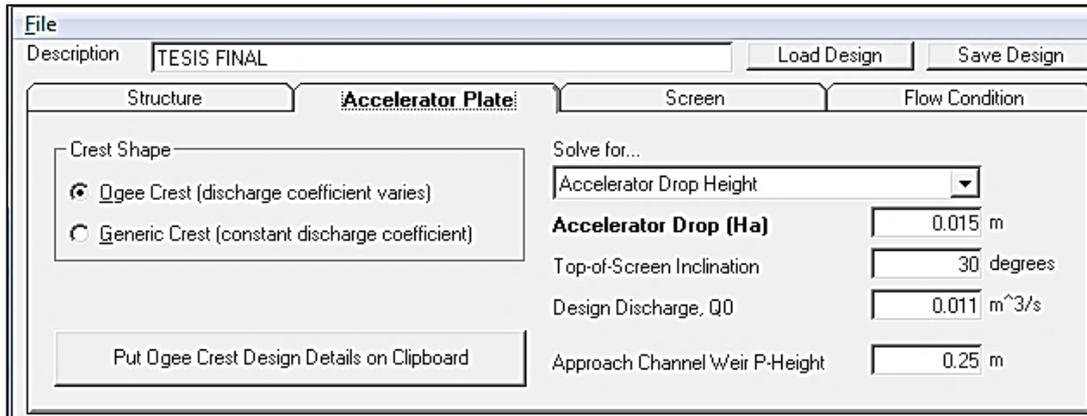


Figura 2.2: Datos en la pestaña placa de aceleración

Fuente: Software HPCES

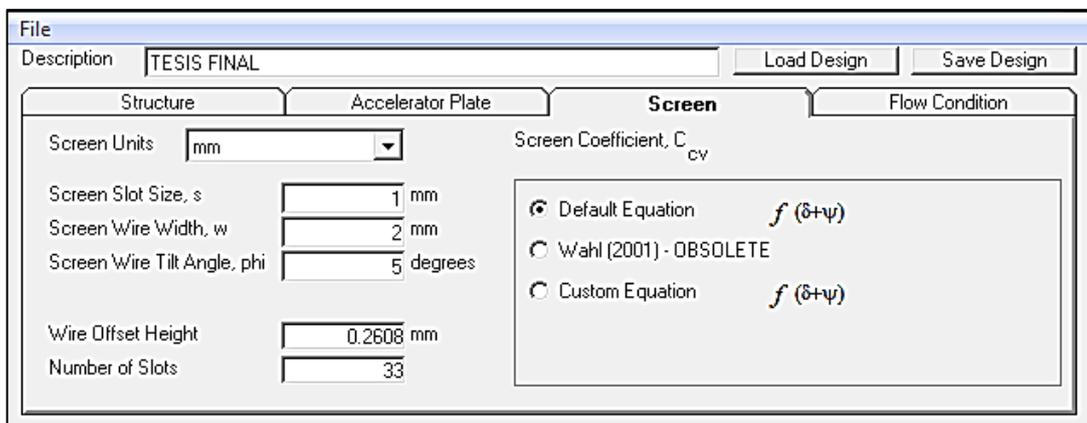


Figura 2.3: Datos en la pestaña pantalla

Fuente: Software HPCES

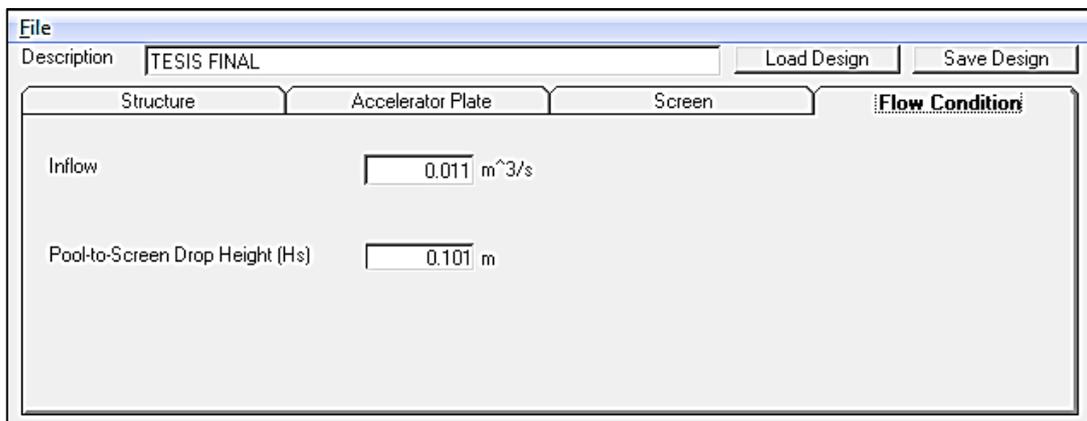


Figura 2.4: Datos en la pestaña condiciones de flujo

Fuente: Software HPCES

Para el perfil de la cresta del vertedero y la placa de aceleración se usó el software HPCES, mediante la pestaña “*Accelerator Plate*” (Placa de aceleración) y la opción “*Put Ogee Crest Design Details on Clipboard*” (poner el diseño de la cresta ojival en el portapapeles) si se desea un perfil ojival como es el caso de este trabajo. Como se ha mencionado anteriormente, la cresta del vertedero y la placa de aceleración pueden ser un perfil en forma de arco ojival o un perfil genérico (por ejemplo, un simple arco circular). Para las formas ojivales de la cresta el coeficiente de descarga será calculado por el programa, mientras que para crestas genéricas se puede incluir un coeficiente constante de descarga proporcionado por el usuario. El programa da una solución del perfil para tres tipos de situaciones: el desnivel de la placa de aceleración, para la inclinación de la pantalla y para diseñar la descarga. Para este trabajo se resolvió para el desnivel de la placa de aceleración con un perfil en forma de arco ojival ya que tenemos como datos impuestos de entrada el ángulo de inclinación de la pantalla y caudal de la descarga como se muestra en la Figura 2.2.

Como se había mencionado, el HPCES calcula algunos parámetros antes de la corrida final del programa que son muy importantes a la hora de la construcción del modelo en 3D de la captación a ser simulada con el ANSYS CFX. Estos parámetros se encuentran en la siguiente tabla.

Tabla 2.2: Parámetros calculados por el software HPCES

Parámetros Calculados	Descripción
<b>Placa de aceleración</b>	
Desnivel de la placa de aceleración (Ha)	0.015 m
<b>Rejilla</b>	
Altura efectiva ( $y_{off}$ )	0.2608 mm
Número de aberturas	33

Fuente: El autor

De la misma manera es importante conocer los resultados obtenidos para el perfil en forma de arco ojival propuesto para este trabajo y que han servido para realizar la geometría del modelo simulado en ANSYS CFX.

Tabla 2.3: Resultados del perfil del vertedero y placa de aceleración

<b>Parámetros Calculados para el perfil y placa de aceleración</b>	
<b>Placa de aceleración</b>	
Descarga unitaria de diseño	0.055 m <sup>3</sup> /s/m
Carga hidráulica de diseño (H0)	0.086 m
Coeficiente de descarga (C0)	2.18 m <sup>0.5</sup> /s
Radio 1 (R1)	0.1475 m
Radio 2 (R2)	0.0632 m
<b>Centro del Radio 2</b>	
Coordenada X	-0.0235
Coordenada Y	-0.0665

Fuente: El autor

El programa HPCES proporciona las coordenadas de los arcos R1 y R2 como se muestra en las Tabla 2.4 y 2.5.

Tabla 2.4: Coordenadas del Radio 1

<b>Coordenada X</b>	<b>Coordenada Y</b>
-0.0121	-0.0016
-0.0116	-0.0015
-0.0111	-0.0014
-0.0106	-0.0013
-0.0101	-0.0012
-0.0097	-0.001
-0.0092	-0.0009
-0.0087	-0.0008
-0.0082	-0.0008
-0.0077	-0.0007
-0.0072	-0.0006
-0.0068	-0.0005
-0.0063	-0.0004
-0.0058	-0.0004
-0.0053	-0.0003
-0.0048	-0.0003
-0.0043	-0.0002
-0.0039	-0.0002
-0.0034	-0.0001
-0.0029	-0.0001
-0.0024	-0.0001

---

-0.0019	0
-0.0014	0
-0.001	0
-0.0005	0
0	0

Fuente: El autor

Tabla 2.5: Coordenadas del Radio 2

Coordenada X	Coordenada Y
-0.0236	-0.0103
-0.0232	-0.0096
-0.0227	-0.0089
-0.0223	-0.0083
-0.0218	-0.0078
-0.0213	-0.0072
-0.0209	-0.0068
-0.0204	-0.0063
-0.0199	-0.0059
-0.0195	-0.0055
-0.019	-0.0051
-0.0186	-0.0047
-0.0181	-0.0044
-0.0176	-0.0041
-0.0172	-0.0038
-0.0167	-0.0035
-0.0162	-0.0033
-0.0158	-0.0031
-0.0153	-0.0028
-0.0148	-0.0026
-0.0144	-0.0024
-0.0139	-0.0022
-0.0135	-0.0021
-0.013	-0.0019
-0.0125	-0.0018
-0.0121	-0.0017

Fuente: El autor

La ecuación del perfil en forma de arco ojival de la placa de aceleración calculado del software HPCES es:

$$Y = -0.5023 X^{1.8633} \times 0.086^{-0.8633} \quad \text{Ec. (31)}$$

---

De la misma forma como los arcos, el programa determina las coordenadas de la placa de aceleración como se muestra en la siguiente Tabla:

Tabla 2.6: Coordenadas de la placa de aceleración

Coordenada X	Coordenada Y
0	0
0.0005	0
0.001	0
0.0015	0
0.002	0
0.0025	-0.0001
0.0029	-0.0001
0.0034	-0.0001
0.0039	-0.0001
0.0044	-0.0002
0.0049	-0.0002
0.0054	-0.0002
0.0059	-0.0003
0.0064	-0.0003
0.0069	-0.0004
0.0074	-0.0004
0.0079	-0.0005
0.0084	-0.0006
0.0088	-0.0006
0.0093	-0.0007
0.0098	-0.0008
0.0103	-0.0008
0.0108	-0.0009
0.0113	-0.001
0.0118	-0.0011
0.0123	-0.0012
0.0128	-0.0012
0.0133	-0.0013
0.0138	-0.0014
0.0143	-0.0015
0.0147	-0.0016
0.0152	-0.0017
0.0157	-0.0018
0.0162	-0.0019
0.0167	-0.002
0.0172	-0.0022
0.0177	-0.0023
0.0182	-0.0024

---

0.0187	-0.0025
0.0192	-0.0026
0.0197	-0.0028
0.0202	-0.0029
0.0206	-0.003
0.0211	-0.0032
0.0216	-0.0033
0.0221	-0.0034
0.0226	-0.0036
0.0231	-0.0037
0.0236	-0.0039
0.0241	-0.004
0.0246	-0.0042
0.0251	-0.0043
0.0256	-0.0045
0.0261	-0.0047
0.0265	-0.0048
0.027	-0.005
0.0275	-0.0052
0.028	-0.0053
0.0285	-0.0055
0.029	-0.0057
0.0295	-0.0059
0.03	-0.0061
0.0305	-0.0063
0.031	-0.0064
0.0315	-0.0066
0.032	-0.0068
0.0324	-0.007
0.0329	-0.0072
0.0334	-0.0074
0.0339	-0.0076
0.0344	-0.0078
0.0349	-0.008
0.0354	-0.0083
0.0359	-0.0085
0.0364	-0.0087
0.0369	-0.0089
0.0374	-0.0091
0.0379	-0.0094
0.0383	-0.0096
0.0388	-0.0098
0.0393	-0.0101

0.0398	-0.0103
0.0403	-0.0105
0.0408	-0.0108
0.0413	-0.011
0.0418	-0.0113
0.0423	-0.0115
0.0428	-0.0118
0.0433	-0.012
0.0438	-0.0123
0.0442	-0.0125
0.0447	-0.0128
0.0452	-0.013
0.0457	-0.0133
0.0462	-0.0136
0.0467	-0.0138
0.0472	-0.0141
0.0477	-0.0144
0.0482	-0.0147
0.0487	-0.0149
0.0492	-0.0152

Fuente: El autor

Mediante las 3 últimas tablas se ha construido el perfil del vertedero usado para la captación de efecto Coanda a simular, como se muestra en la siguiente figura.

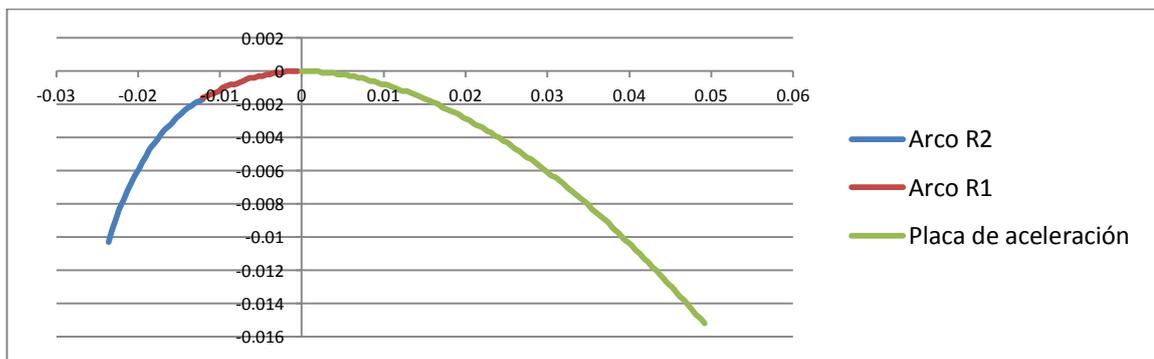


Figura 2.5: Forma del perfil del vertedero y placa de aceleración

Fuente: El autor

---

## **2.2. Hardware y software.**

Las simulaciones CFD se desarrollaron en un equipo Intel Core I7, con procesadores de 2.3 GHz de velocidad y 12 GB de memoria RAM. Se utilizó el software ANSYS Versión 14.5 con su módulo CFX.

## **2.3. Introducción a la simulación CFD.**

Antes de comenzar con cualquier simulación CFD se debe establecer qué tipo de problema se está analizando y además el método de solución a emplear. En las secciones 1.4.1 a 1.4.7 se describió que es el efecto Coanda, su aplicación a las captaciones de agua y los parámetros para el diseño de las mismas. Se simuló una captación con un ancho de base de 20 cm, por el cual fluye un caudal de diseño de 11.00 L/s, la rejilla de alambres inclinados tiene una dimensión de 20 cm de ancho por 10 cm de largo con una inclinación de 30 grados, la separación de los alambres es de 1 mm con un ancho de alambres de 2 mm y una inclinación de 5 grados, el perfil de la placa de aceleración y el vertedero donde se encuentra la rejilla fue determinado mediante el software HPCES. Lo que se quiere obtener es el caudal que es capaz de captar la rejilla y el caudal de derivación de la misma.

Considerando lo descrito anteriormente se puede realizar una simulación estacionaria de flujo multifásico agua-aire que logre calcular la capacidad de la rejilla impuesta (Caudal captado) y el caudal que pasa fuera de la captación (Caudal Bypass), para compararla con los resultados obtenidos mediante el modelo matemático de Tony L. Wahl implementado en el software HPCES. La simulación CFD se basa en las ecuaciones de Navier-Stokes, que se resuelven numéricamente por el método de volúmenes finitos.

Cabe indicar que se realizó varias simulaciones del problema aquí descrito, con diferentes números de elementos con respecto al mallado, para validar con los resultados del software HPCES.

En las siguientes secciones se dará una mayor descripción de cada uno de los aspectos considerados para llevar a cabo la solución numérica de este problema.

## **2.4. Geometría del problema.**

Como la simulación es a superficie libre, el modelo es multifásico, el primer paso es definir el dominio tridimensional por el cual el fluido primario circulará (en este caso el agua). Para esta simulación se ha tomado un dominio desde la entrada al vertedero de la captación con su respectiva altura de la lámina de agua sobre el vertedero (calculada previamente con el

software HPCES), hasta el final de la rejilla de efecto Coanda. Esto se hizo para evitar modelar el canal donde se encuentra la captación y así ahorrar tiempo computacional en la simulación.

#### 2.4.1. Descripción de la geometría.

La siguiente tabla muestra un resumen de los parámetros usados para la captación de efecto Coanda, además la altura del tirante de agua del vertedero es de 8.6 cm (altura sobre la cresta).

Tabla 2.7: Resumen de los parámetros de la captación de efecto Coanda

Parámetros de la Estructura	Descripción
<b>Estructura</b>	
Forma de la rejilla	Plana
Largo del vertedero/Ancho de la rejilla	20 cm
Largo de la rejilla	10 cm
<b>Placa de Aceleración</b>	
Inclinación de la pantalla ( $\theta_0$ )	30 °
Caudal de Diseño	0.011 m <sup>3</sup> /s
Forma de la cresta	Arco Ojival
Desnivel de la placa de aceleración (Ha) (Calculado)	0.015 m
<b>Rejilla</b>	
Separación de alambres (s)	1 mm
Ancho de los alambres (w)	2 mm
Inclinación de los alambres ( $\varphi$ )	5 °
Número de aberturas (Calculado)	33
Altura efectiva ( $y_{off}$ ) (Calculado)	0.2608 mm
<b>Condiciones de Flujo</b>	
Caudal de Entrada (Inflow)	0.011 m <sup>3</sup> /s
Altura desde la placa de aceleración al nivel del agua (Hs) (Calculado)	0.101 m

Fuente: El autor

#### 2.4.2. Modelo tridimensional de la geometría.

Para la construcción de la geometría en 3D de la captación de efecto Coanda se puede emplear cualquier programa de CAD que permita modelar sólidos y posteriormente exportar este archivo al ANSYS-CFX en un formato adecuado; sin embargo, este mismo programa cuenta con un módulo llamado DESIGN MODELER con el cual se puede modelar cualquier tipo de geometría. En el presente trabajo se empleó el software AutoCAD 2013 versión estudiantil y luego ha sido exportado al DESIGN MODELER.

Las siguientes figuras muestran las dimensiones de la geometría del modelo y su presentación en el DESIGN MODELER.

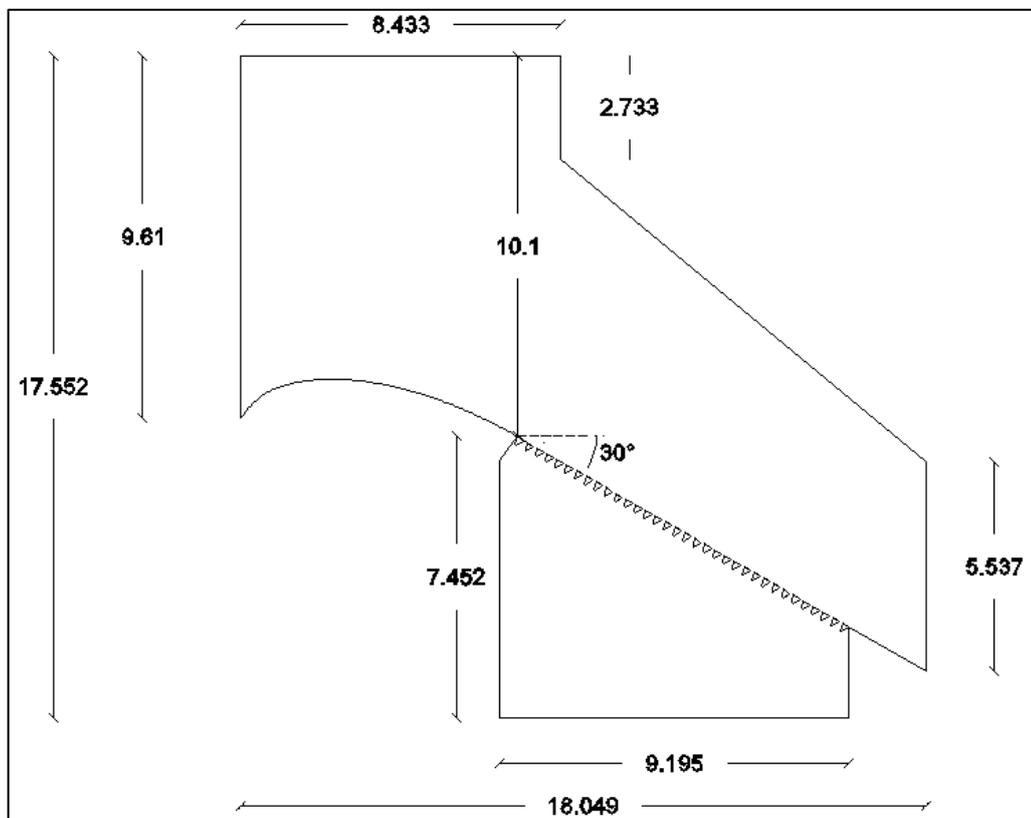


Figura 2.6: Vista frontal del dominio en el plano XY y sus dimensiones en cm.

Fuente: El autor

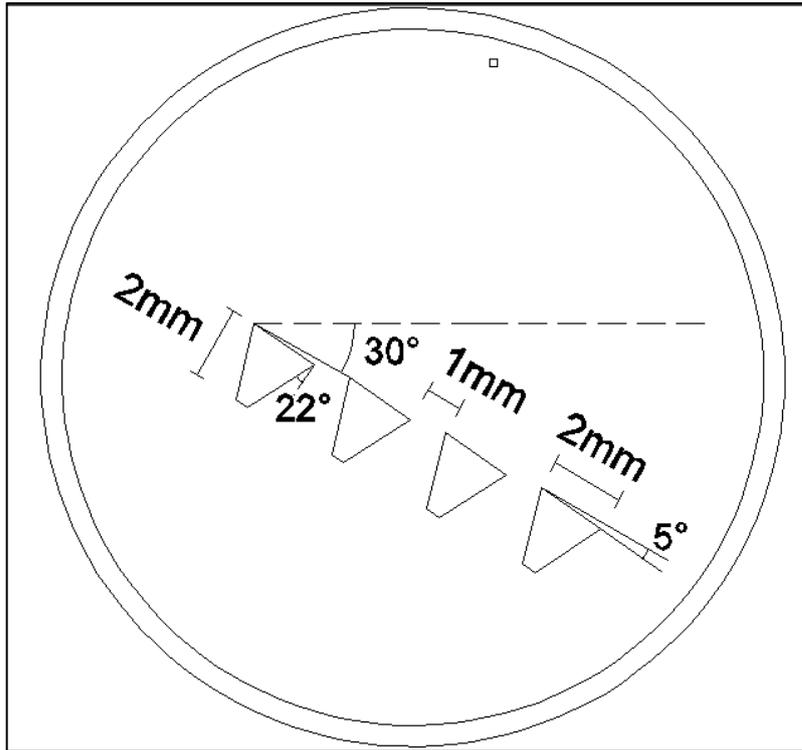


Figura 2.7: Dimensiones de la rejilla Coanda  
Fuente: El autor

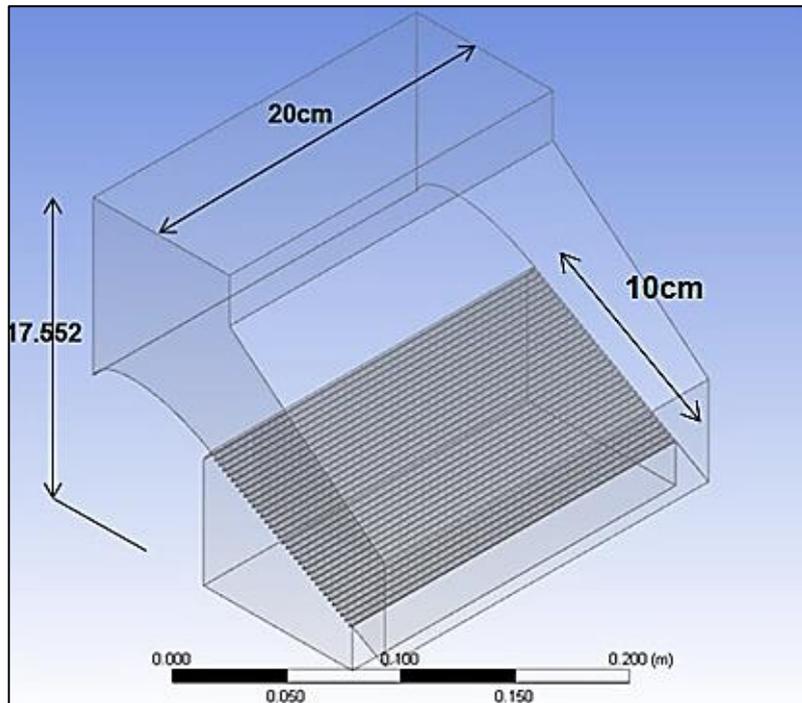


Figura 2.8: Vista Isométrica del dominio en 3D y dimensiones  
Fuente: Software ANSYS CFX

Como se explicó anteriormente el perfil del vertedero y la placa de aceleración fueron dibujados con los datos obtenidos en la sección 2.1. Algunas de las características obtenidas de la geometría se detallan en la Figura 2.10.

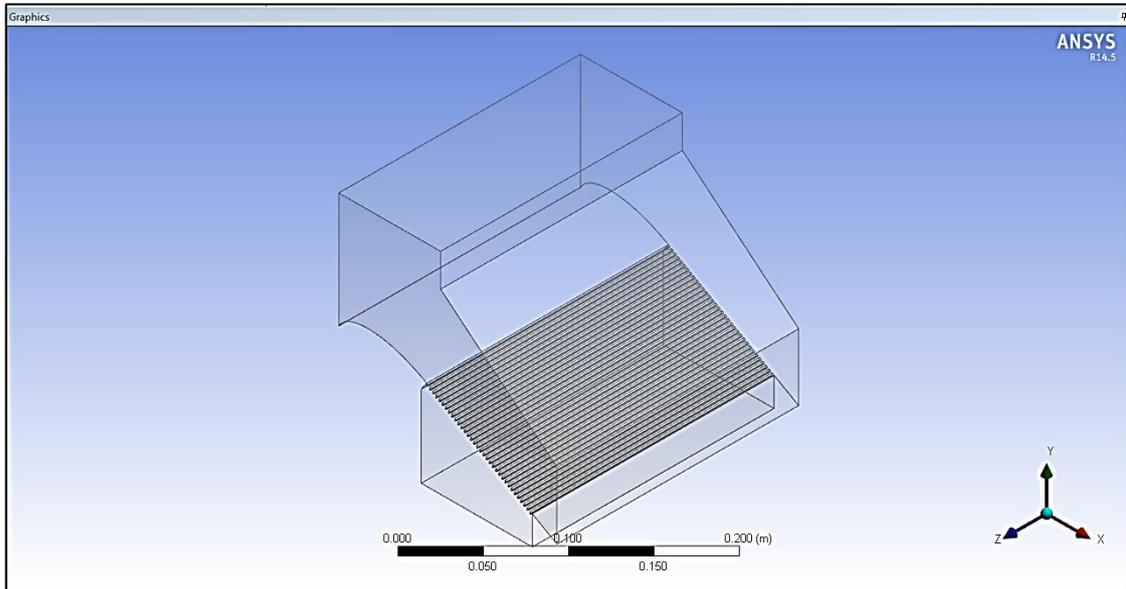


Figura 2.9: Geometría representada en el Desing Modeler

Fuente: Software ANSYS CFX

Sketching Modeling	
Details View	
<input checked="" type="checkbox"/> Details of Body	
Body	*Model_Space
Volume	0.0037712 m <sup>3</sup>
Surface Area	0.21989 m <sup>2</sup>
Faces	149
Edges	439
Vertices	290
Fluid/Solid	Fluid
Shared Topology Method	Automatic
Geometry Type	Workbench

Figura 2.10: Características de Geometría del Modelo

Fuente: Software ANSYS CFX

---

## **2.5. Mallado.**

Uno de los factores más importantes para obtener buenos resultados en CFD es tener un buen mallado del dominio, es por esto que es importante realizar algunas simulaciones previas al análisis de los resultados para ir refinando el mallado. Mientras más se refina el mallado se obtienen resultados cada vez más precisos y cercanos a la realidad, pero los tiempos de resolución aumentan considerablemente con el número de elementos de la malla. El análisis de sensibilidad se realiza con la finalidad de encontrar la malla a partir de la cual se obtengan los resultados con la mayor precisión. Esto se mide mediante un error máximo tolerado, que para este caso se fijará en 10% y a partir del cual los errores propios del mallado no se consideran influyentes en el resultado de las simulaciones. En esta sección se presenta el mallado final seleccionado después de haber hecho el análisis de sensibilidad, el resto de mallados y sus respectivos resultados se presentan en la sección de Resultados.

Como se ha explicado en la sección 1.4.8.9 el mallado de la geometría es de vital importancia para dividir el dominio completo en varios volúmenes de control y así la solución se obtiene en el centro de masa de estos volúmenes. Para la elaboración del mallado del presente modelo se usó el módulo CFX MESH incorporado en el ANSYS.

### **2.5.1. Selección del tipo de mallado.**

Antes de construir el mallado de una geometría es necesario definir qué tipo y métodos de mallado se van a emplear al modelo. El CFX MESH tiene varios métodos para el mallado. Los métodos disponibles son los siguientes:

- Automático (Automatic).
- Tetraédrico (Tetrahedrons).
- Hexaedros dominantes (Hex dominant).
- Barrido (Sweep).
- Multi zona (Multizone).
- Mallado CFX (CFX-Mesh).

Cada uno de estos métodos son aplicados para diferentes fines y es importante analizar cuál de estos métodos es el más conveniente para este modelo.

En este caso el método usado para este trabajo es el método automático CFX que genera una malla no estructurada con una predominancia de elementos tetraédricos por la complejidad del modelo, esta malla fue modificada con otras opciones disponibles en el

software para ir refinando el mallado. Para el dominio de flujo se definió un tamaño máximo de elemento de 8 mm con una relevancia alta.

Details of "Mesh"	
<b>Defaults</b>	
Physics Preference	CFD
Solver Preference	CFX
<input type="checkbox"/> Relevance	0
<b>Sizing</b>	
Use Advanced Size Function	On: Curvature
Relevance Center	Fine
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	Medium
Transition	Slow
Span Angle Center	Fine
<input type="checkbox"/> Curvature Normal Angle	Default (18.0 °)
<input type="checkbox"/> Min Size	Default (4.6939e-002 mm)
<input type="checkbox"/> Max Face Size	Default (4.69390 mm)
<input type="checkbox"/> Max Size	8.0 mm
<input type="checkbox"/> Growth Rate	Default (1.20 )
Minimum Edge Length	0.40 mm
<b>Inflation</b>	
Use Automatic Inflation	None
Inflation Option	Smooth Transition
<input type="checkbox"/> Transition Ratio	0.77
<input type="checkbox"/> Maximum Layers	5
<input type="checkbox"/> Growth Rate	1.2
Inflation Algorithm	Pre
View Advanced Options	No

Figura 2.11: Detalle general del mallado

Fuente: Software ANSYS CFX

Otra de las opciones usadas para refinar el mallado en la parte de la rejilla de la captación fue “Face Sizing” con un tamaño de los elementos (alambres) de 0.5 mm.

Mediante todas estas opciones se realizó los mallados anteriores en el análisis de sensibilidad.

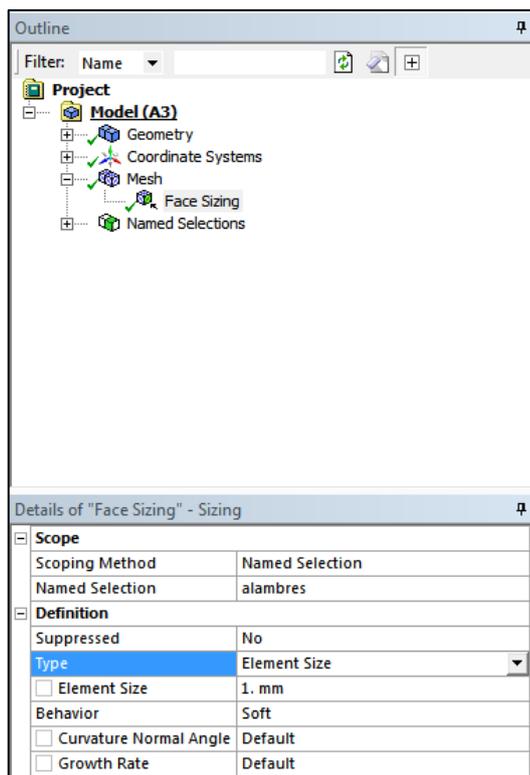


Figura 2.12: Detalle del refinamiento del mallado usando la opción "Face Sizing"

Fuente: Software ANSYS CFX

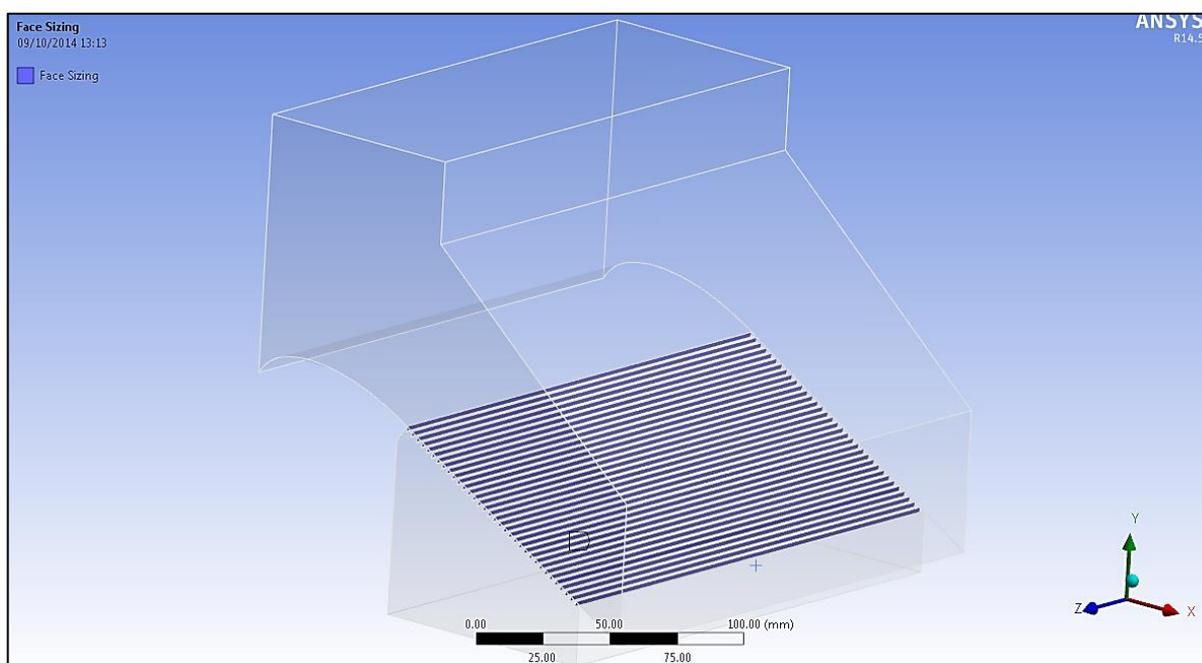


Figura 2.13: Selección de elementos a ser divididos

Fuente: Software ANSYS CFX

### 2.5.2. Mallado del modelo.

Una vez modificado todas las opciones del mallado, el software se encarga de realizar dicho mallado dando como resultado un mallado no estructurado con un total de 7'698'173.0 elementos como se ve en la siguiente figura.

Details of "Mesh"	
+	Defaults
+	Sizing
+	Inflation
+	Patch Conforming Options
+	Advanced
+	Defeaturing
-	Statistics
<input type="checkbox"/>	Nodes 1388080
<input type="checkbox"/>	Elements 7698173
	Mesh Metric None

Figura 2.14: Numero de nudos y elementos del mallado

Fuente: Software ANSYS CFX

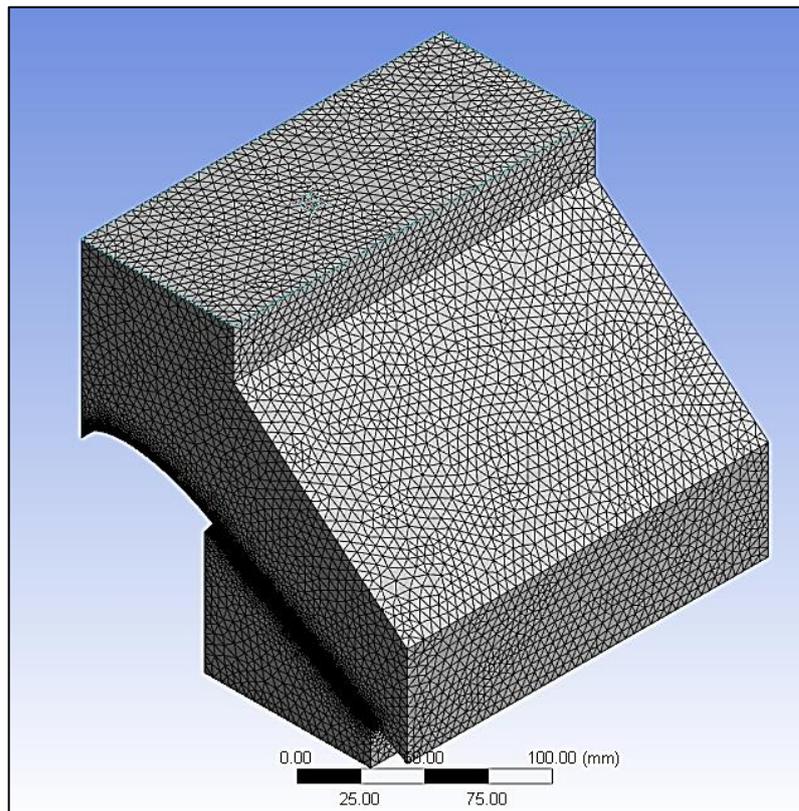


Figura 2.15: Mallado del dominio

Fuente: Software ANSYS CFX

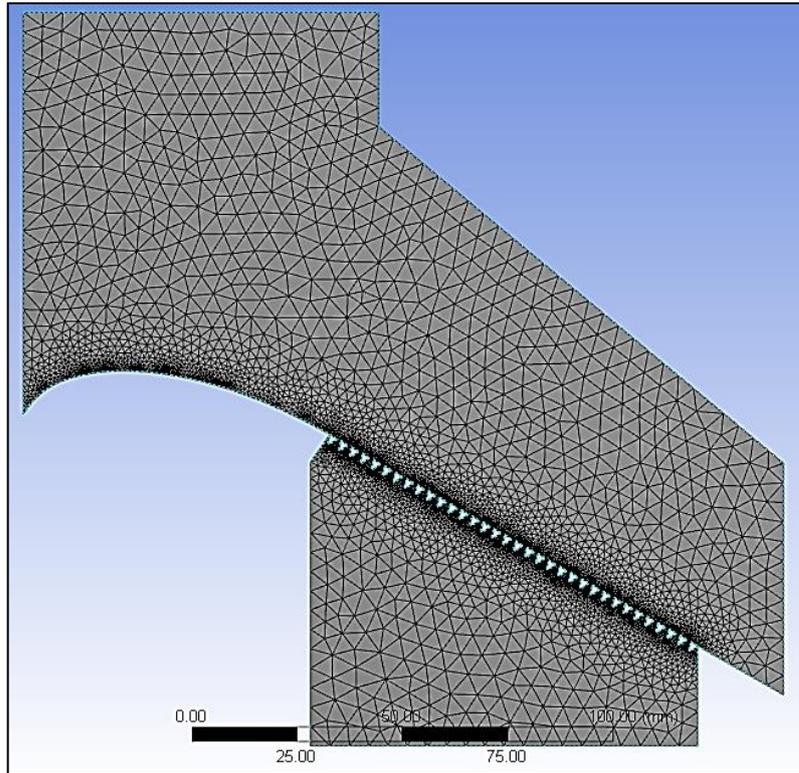


Figura 2.16: Vista frontal del mallado

Fuente: Software ANSYS CFX

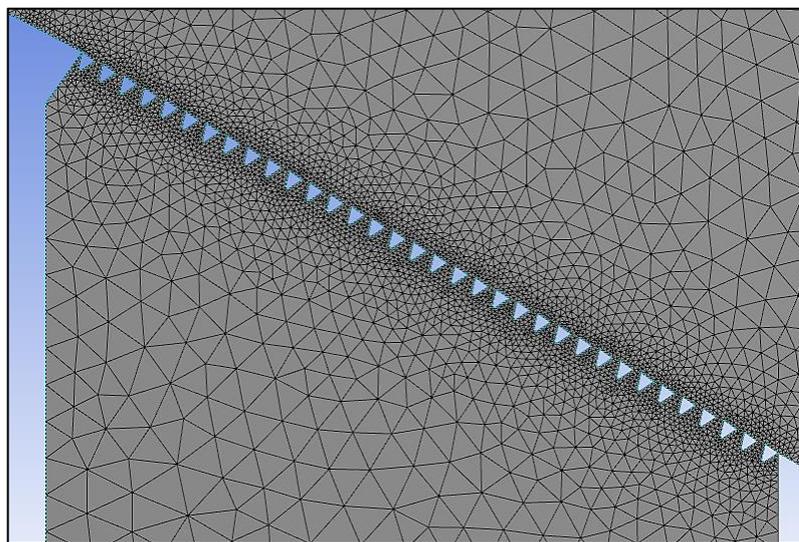


Figura 2.17: Vista frontal en el rejilla de la captación

Fuente: Software ANSYS CFX

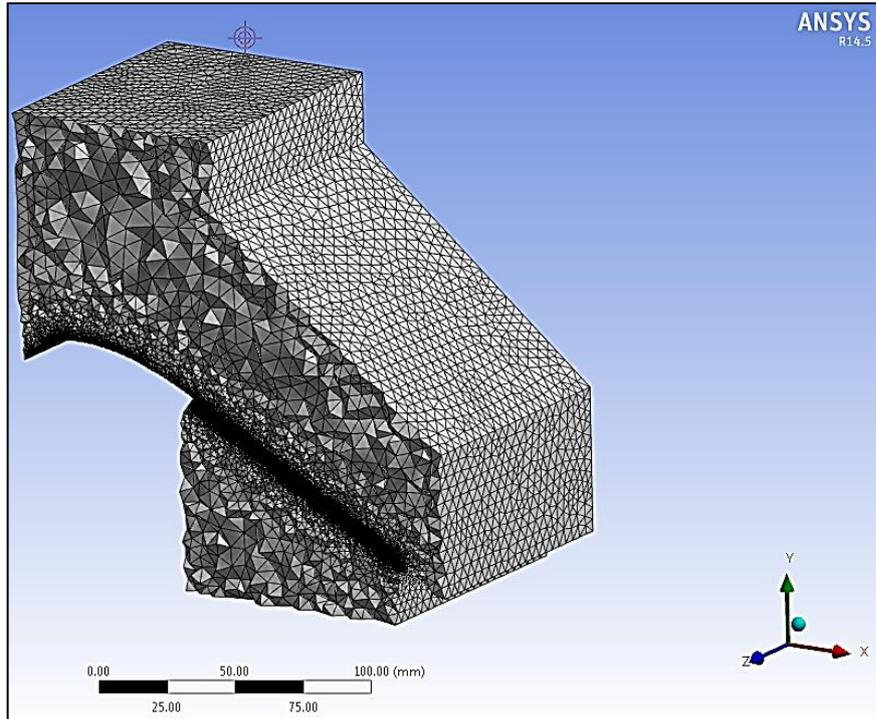


Figura 2.18: Corte interno del mallado del dominio

Fuente: Software ANSYS CFX

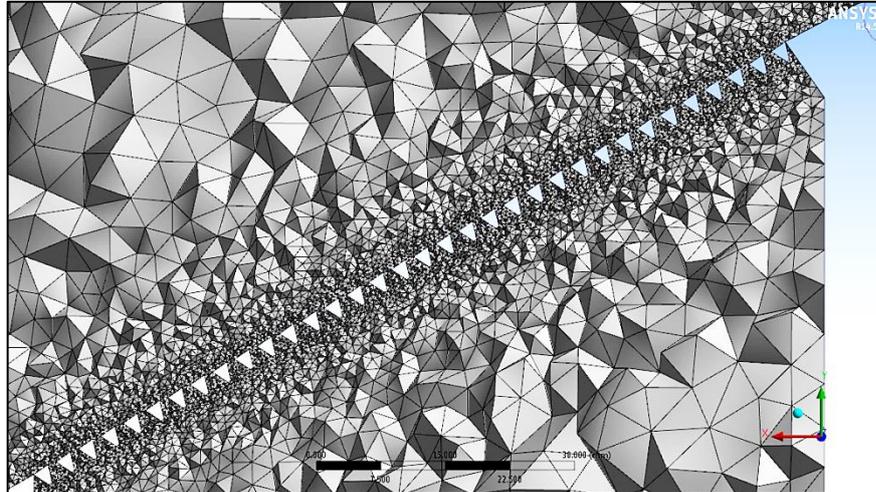


Figura 2.19: Corte interno del mallado en la rejilla

Fuente: Software ANSYS CFX

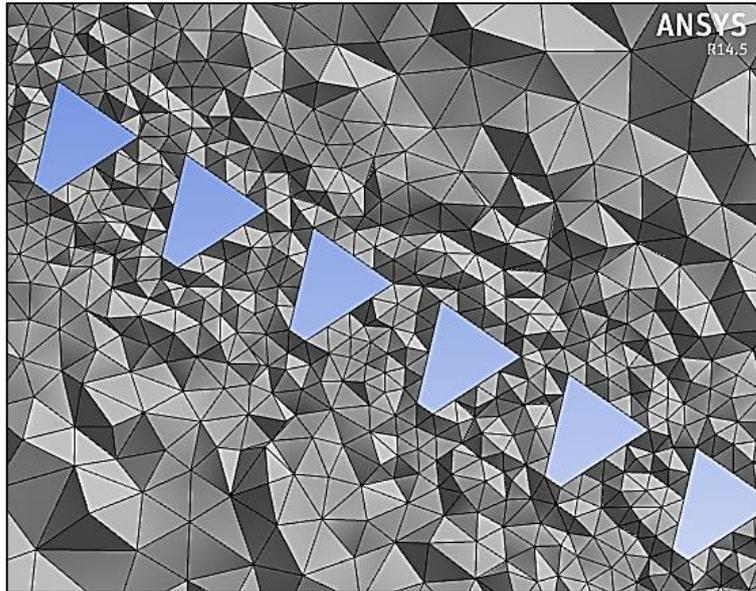


Figura 2.20: Corte interno en los alambres de la captación  
Fuente: Software ANSYS CFX

### 2.5.3. Análisis de la calidad del mallado.

El ANSYS-MESHING tiene la opción para revisar la calidad del mallado al ingresar a “Details of Mesh” (detalle del mallado). Con la opción “Mesh Metric” y el método de oblicuidad (Skewness) explicado anteriormente en la sección 1.4.8.9.4 Calidad del mallado.

Details of "Mesh"	
<input type="checkbox"/> Defaults	
<input type="checkbox"/> Sizing	
<input type="checkbox"/> Inflation	
<input type="checkbox"/> Patch Conforming Options	
<input type="checkbox"/> Advanced	
<input type="checkbox"/> Defeaturing	
<input checked="" type="checkbox"/> Statistics	
<input type="checkbox"/> Nodes	1388080
<input type="checkbox"/> Elements	7698173
Mesh Metric	Skewness
<input type="checkbox"/> Min	8.50316430177633E-05
<input type="checkbox"/> Max	0.939261951212993
<input checked="" type="checkbox"/> Average	0.227560524897176
<input type="checkbox"/> Standard Deviation	0.118173291124481

Figura 2.21: Detalle de la calidad del mallado  
Fuente: Software ANSYS CFX

Como podemos observar en la figura anterior el promedio de oblicuidad es de 0.22 resultando ser según la Tabla 1.4: Valores de oblicuidad y calidad de elementos un mallado de excelente calidad en promedio de todo el dominio. Se puede ver además, que el valor mínimo es de 0.000085, mientras que el valor máximo es de 0.93 el cual resulta ser

preocupante si se da en muchos lados del dominio y en especial donde el dominio va a ser de vital importancia como en la rejilla de la captación, es por esta razón que se analizará posteriormente donde se dan estos valores altos. La Figura 2.22 muestra un gráfico de barras donde se detallan los calores de calidad del mallado vs el número de elementos, y la Figura 2.23 se representa la calidad vs el porcentaje de elementos.

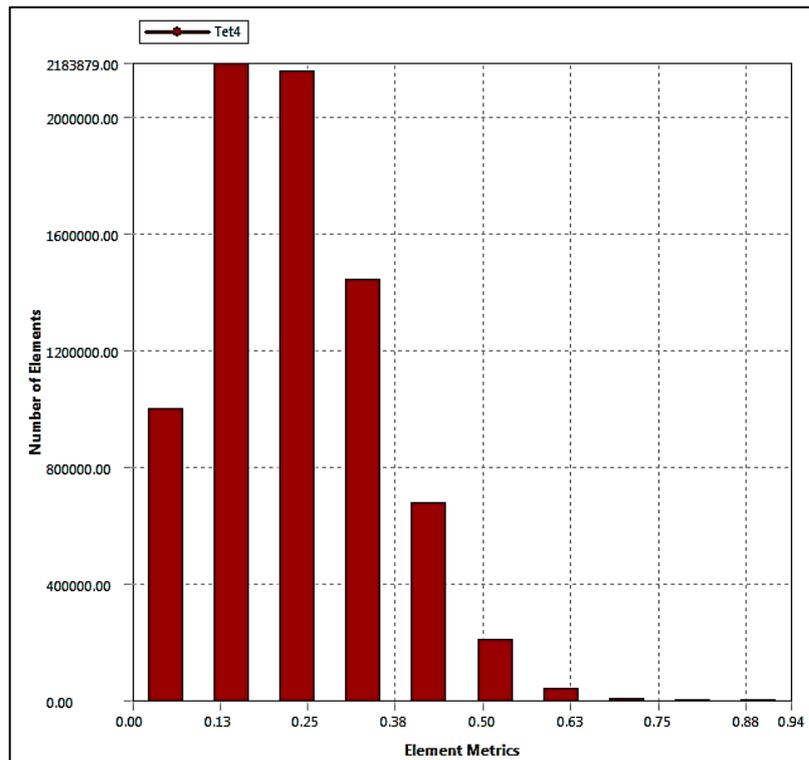


Figura 2.22: Calidad del mallado vs número de elementos

Fuente: Software ANSYS CFX

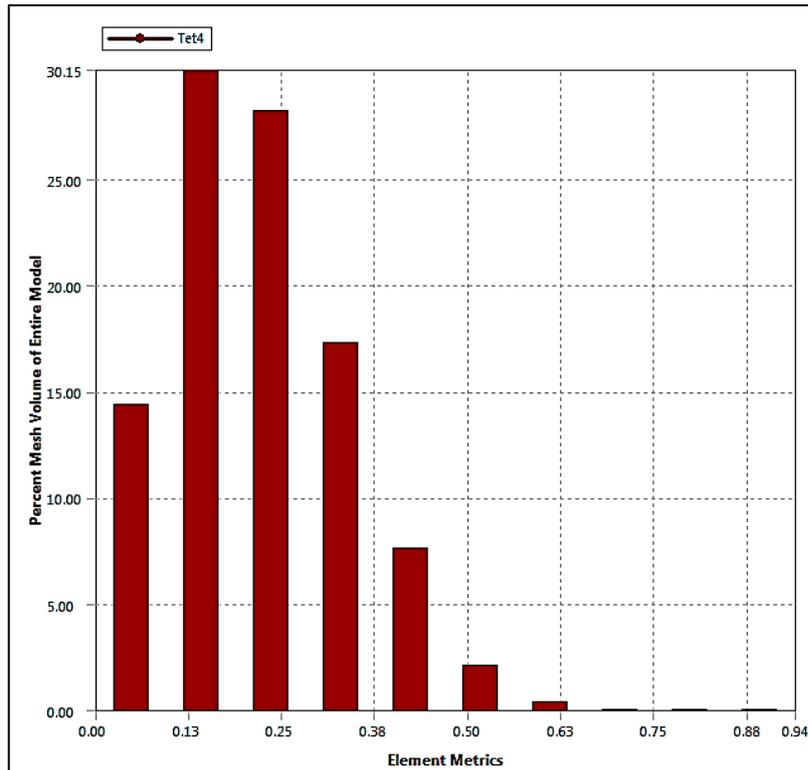


Figura 2.23: Calidad del mallado vs porcentaje de elementos

Fuente: Software ANSYS CFX

En las Figura 2.24 a la Figura 2.26 se puede observar que hay aproximadamente un 72.6% de elementos del mallado con una oblicuidad menor a 0.25 que tomando en referencia a la Tabla 1.4 es de excelente calidad.

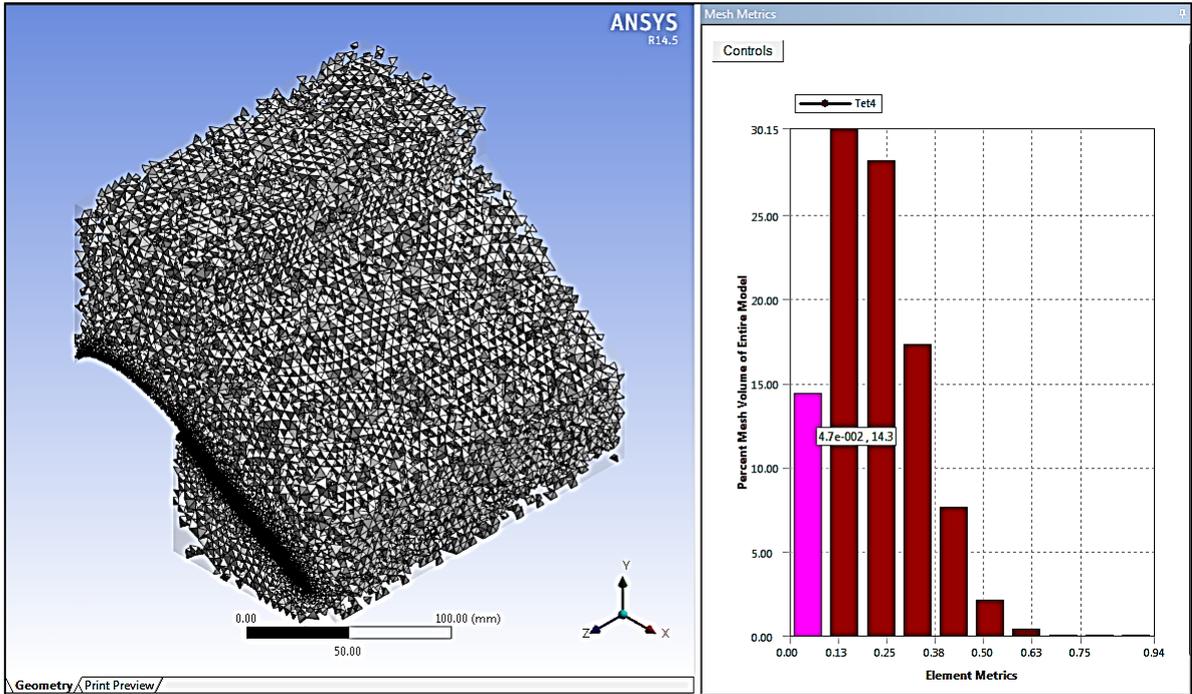


Figura 2.24: Porcentaje de elementos con oblicuidad  $<0.047$

Fuente: Software ANSYS CFX

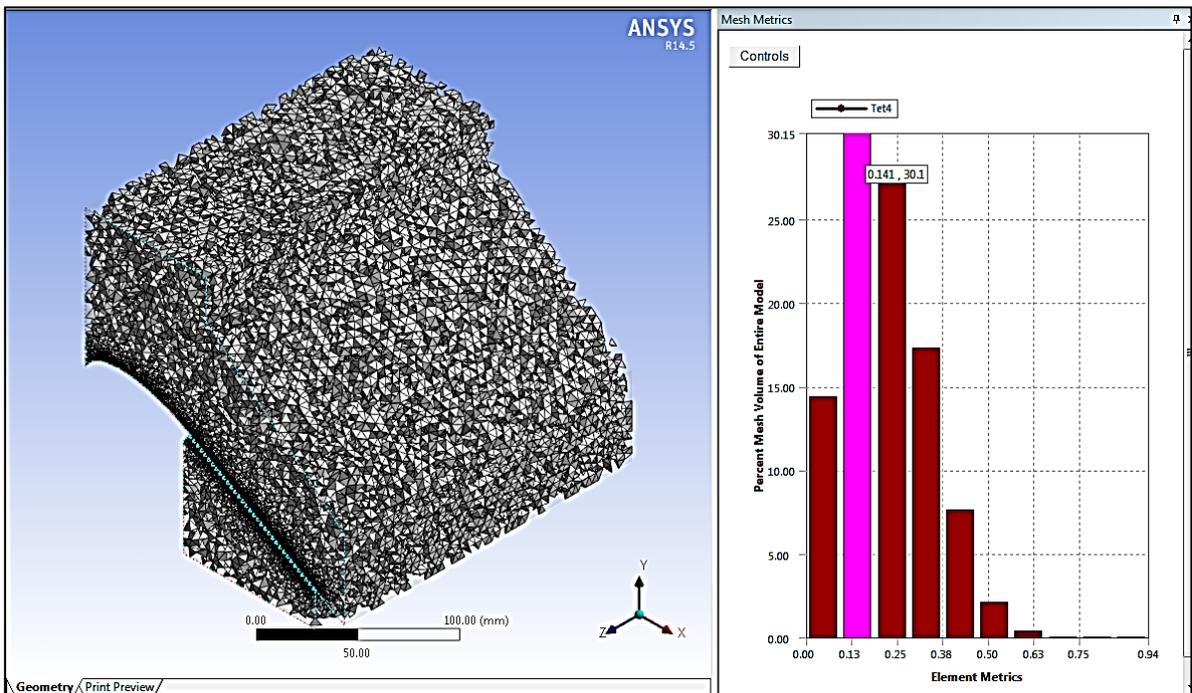


Figura 2.25: Porcentaje de elementos con oblicuidad  $<0.14$

Fuente: Software ANSYS CFX

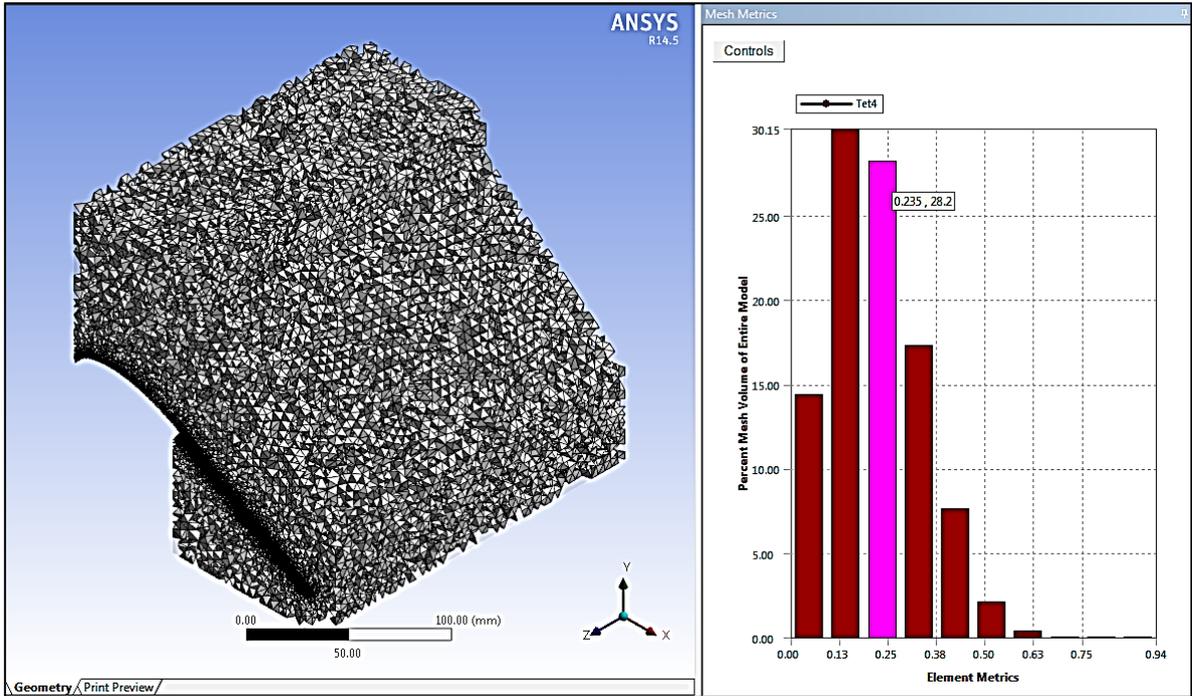


Figura 2.26: Porcentaje de elementos con oblicuidad  $<0.24$

Fuente: Software ANSYS CFX

En las Figura 2.27 a Figura 2.29 se ve que aproximadamente un 27% de los elementos tiene una oblicuidad menor a 0.50 resultando ser un mallado bueno.

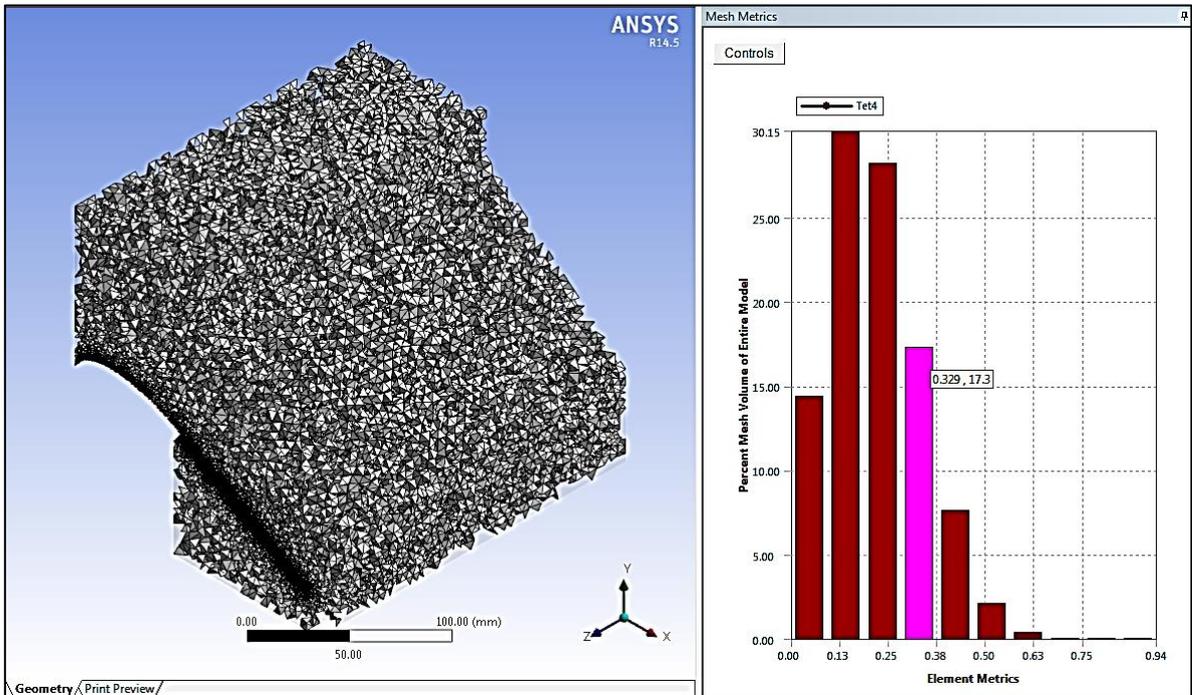


Figura 2.27: Porcentaje de elementos con oblicuidad  $<0.33$

Fuente: Software ANSYS CFX

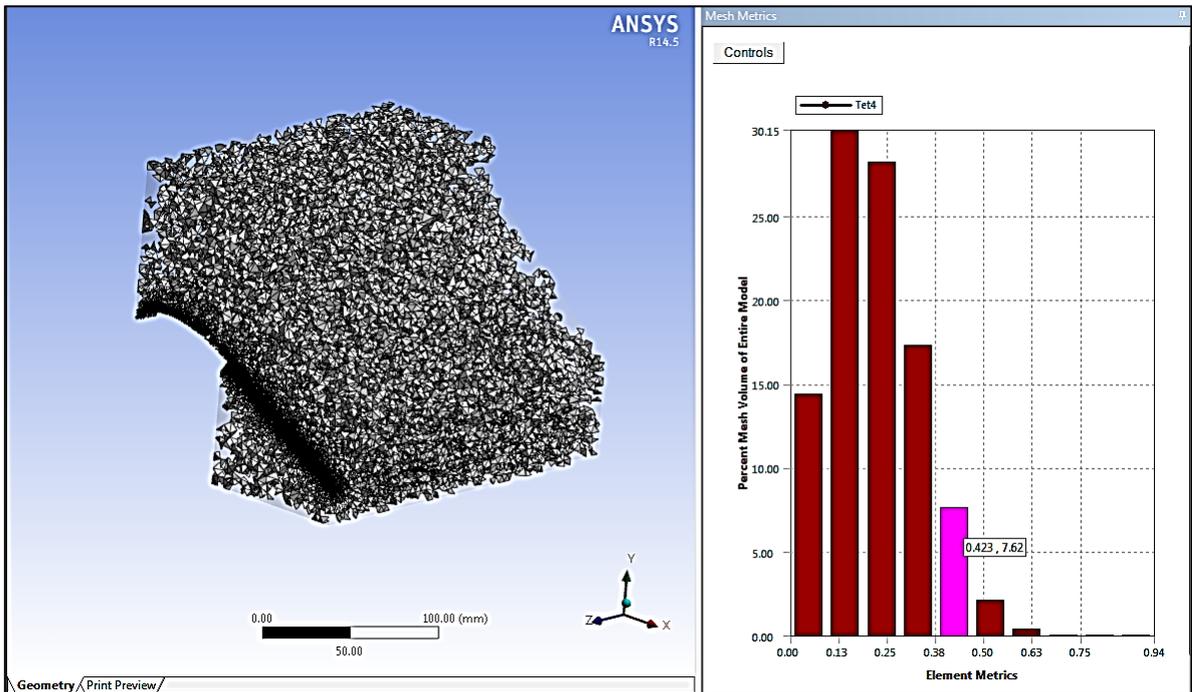


Figura 2.28: Porcentaje de elementos con oblicuidad <math><0.42</math>

Fuente: Software ANSYS CFX

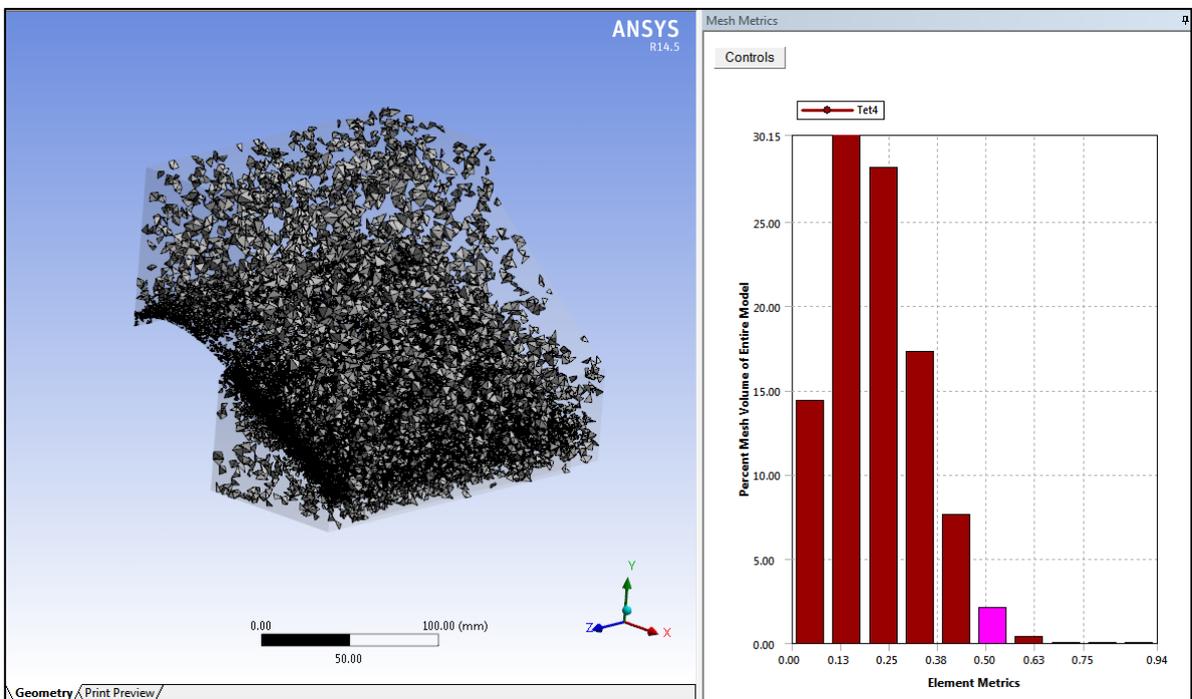


Figura 2.29: Porcentaje de elementos con oblicuidad <math><0.50</math>

Fuente: Software ANSYS CFX

En la Figura 2.30 y 2.31 se muestra que un 0.36% de los elementos presentan un mado regular.

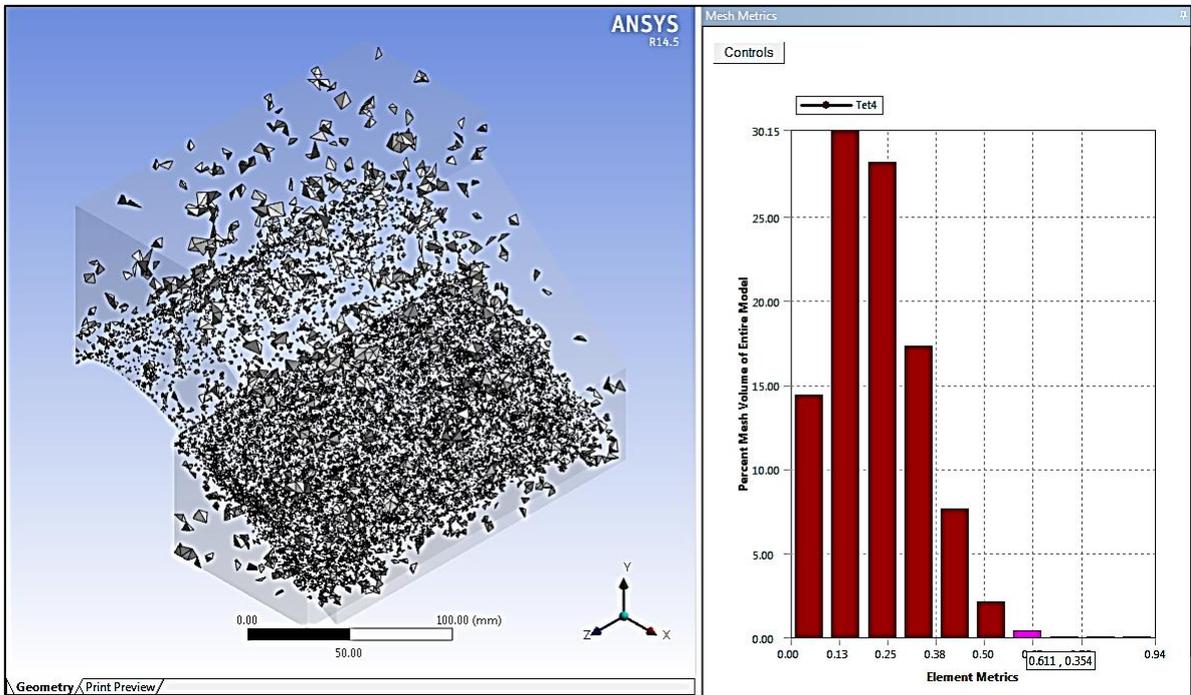


Figura 2.30: Porcentaje de elementos con oblicuidad <0.61

Fuente: Software ANSYS CFX

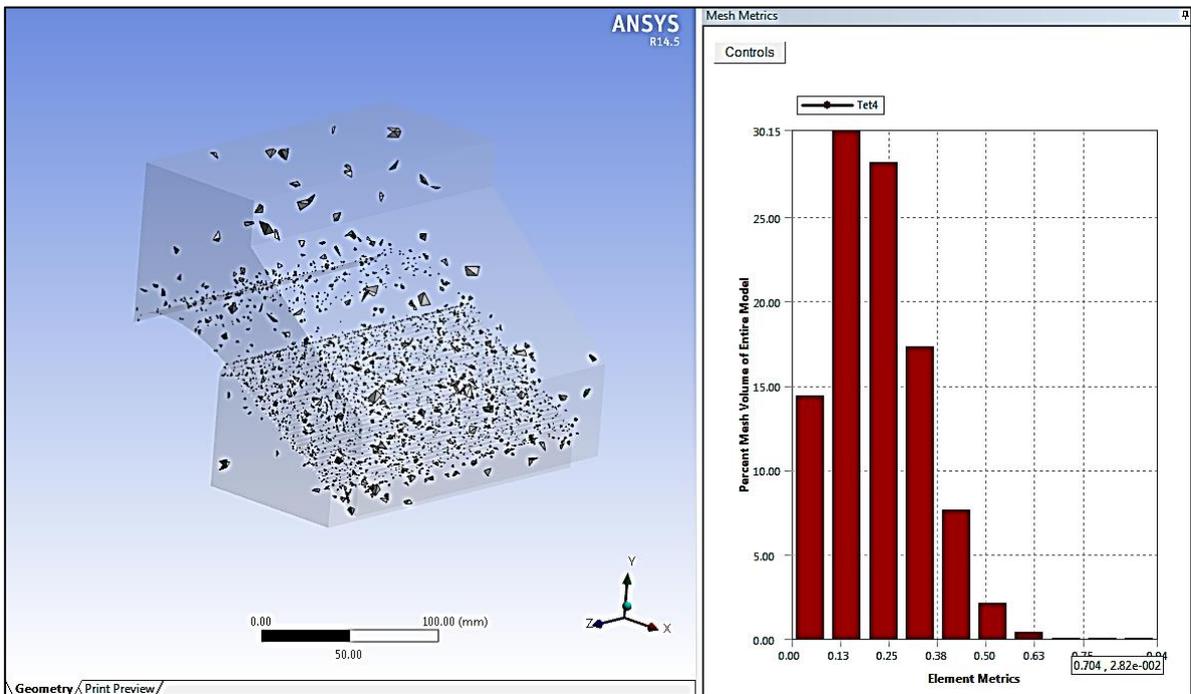


Figura 2.31: Porcentaje de elementos con oblicuidad <0.70

Fuente: Software ANSYS CFX

Finalmente la Figura 2.32: Porcentaje de elementos con oblicuidad  $<0.80$  y Figura 2.33: Porcentaje de elementos con oblicuidad  $<0.89$  con el restante del porcentaje tiene un mallado pobre, pero que no va a tener un mayor efecto en los resultados, ya que es un porcentaje muy pequeño de elementos dentro del dominio del flujo.

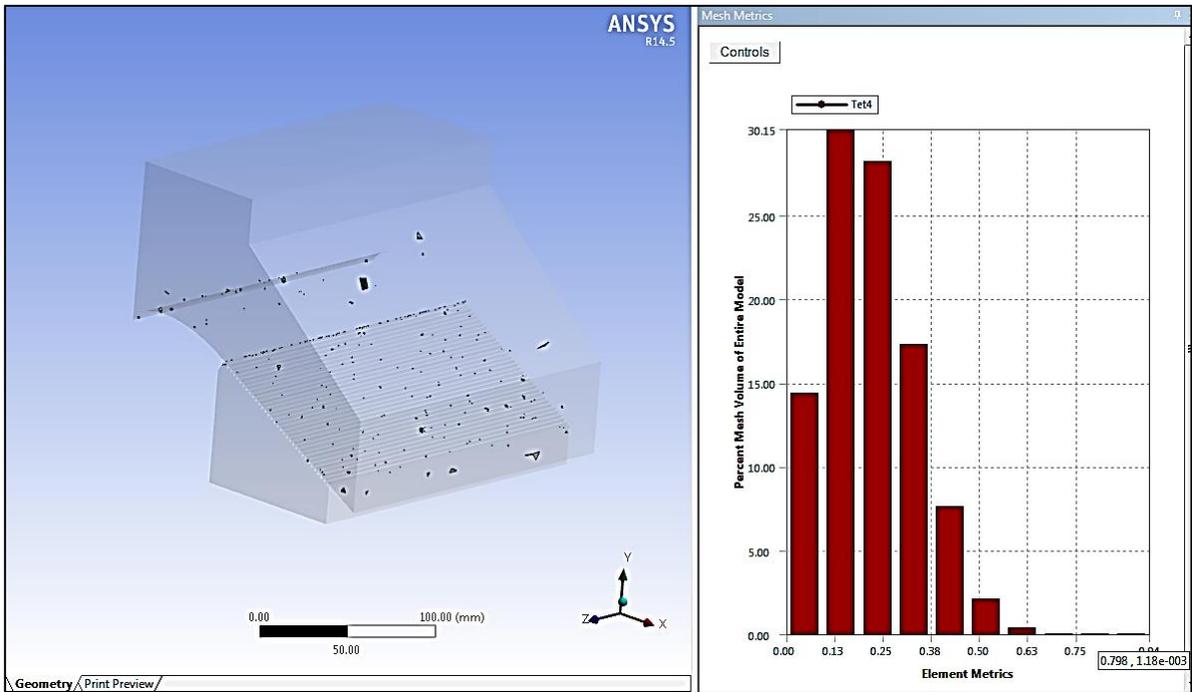


Figura 2.32: Porcentaje de elementos con oblicuidad  $<0.80$

Fuente: Software ANSYS CFX

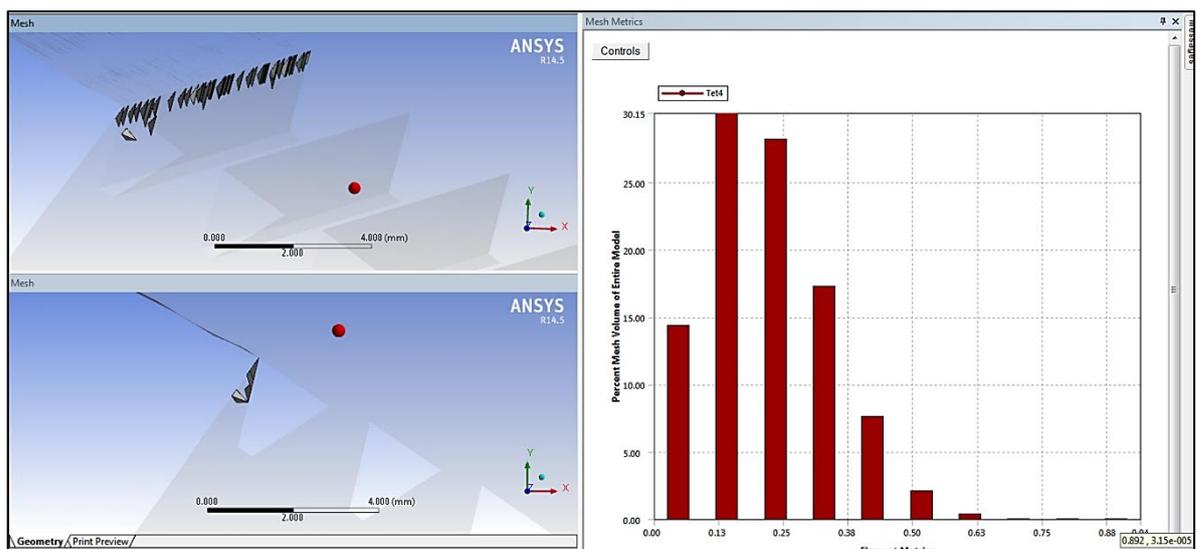


Figura 2.33: Porcentaje de elementos con oblicuidad  $<0.89$

Fuente: Software ANSYS CFX

## 2.6. Configuración de la simulación.

En esta sección se define el tipo de simulación, los fenómenos físicos que actúan, las condiciones de borde a considerar sobre los límites del dominio y la precisión requerida. El ambiente de trabajo para el usuario en esta etapa es el entorno gráfico de CFX-Pre. A continuación se describe la configuración.

### 2.6.1. Tipo de simulación.

El tipo de análisis estacionario nos permite observar el efecto Coanda en las rejillas de la captación y calcular sin ningún problema el caudal captado y derivado de la estructura en análisis.

### 2.6.2. Propiedades del dominio.

Dentro del entorno del CFX-Pre es necesario configurar algunos detalles del dominio para poder realizar la simulación multifásica a superficie libre deseada en este trabajo, estas configuraciones se detallan en la siguiente tabla.

Tabla 2.8: Detalles del dominio

<b>Condiciones básicas</b>	
Tipo de fluido	Dominio Fluido
Localización	Todo el dominio
<b>Materiales</b>	
<b>Aire (25° C)</b>	
Morfología	Fluido continuo
Modelo boyante de fluidos	Diferencia de densidad
Densidad	1.185 kg/m <sup>3</sup>
<b>Agua</b>	
Morfología	Fluido continuo
Modelo boyante de fluidos	Diferencia de densidad
Densidad	1000 kg/m <sup>3</sup>
<b>Modelos de los Fluidos</b>	
Presión de referencia	1 atm
Modelo de Flotabilidad	Buoyant
Gravedad en X	0
Gravedad en Y	-g
Gravedad en Z	0
Densidad de referencia de la flotabilidad	1.185 kg/m <sup>3</sup>
<b>Modelos de los Fluidos</b>	
Modelo multifásico	Homogéneo
Modelo de superficie libre	Estándar
Transferencia de calor	Deshabilitado
Turbulencia	Homogéneo
Modelo de turbulencias	K-épsilon
<b>Pares de fluidos</b>	

Aire-agua	
Coefficiente de tensión superficial	0.072 N/m
Modelo de tensión superficial	Fuerza de superficie continua
Fluido principal	Agua
Transferencia interfacial	Superficie libre

Fuente: El autor

### 2.6.3. Condiciones de frontera.

La geometría del modelo tiene 149 caras, de las cuales solamente 6 caras fueron definidas por el usuario para la simulación. Tres de estas caras representaran la atmósfera para la superficie libre, una para la entrada del agua, y dos salidas para poder calcular el caudal captado y el caudal derivado del vertedero, el resto de caras fueron definidas automáticamente por el programa como paredes, estas caras representan los alambres, la cresta del vertedero y la placa de aceleración de la captación de efecto Coanda.

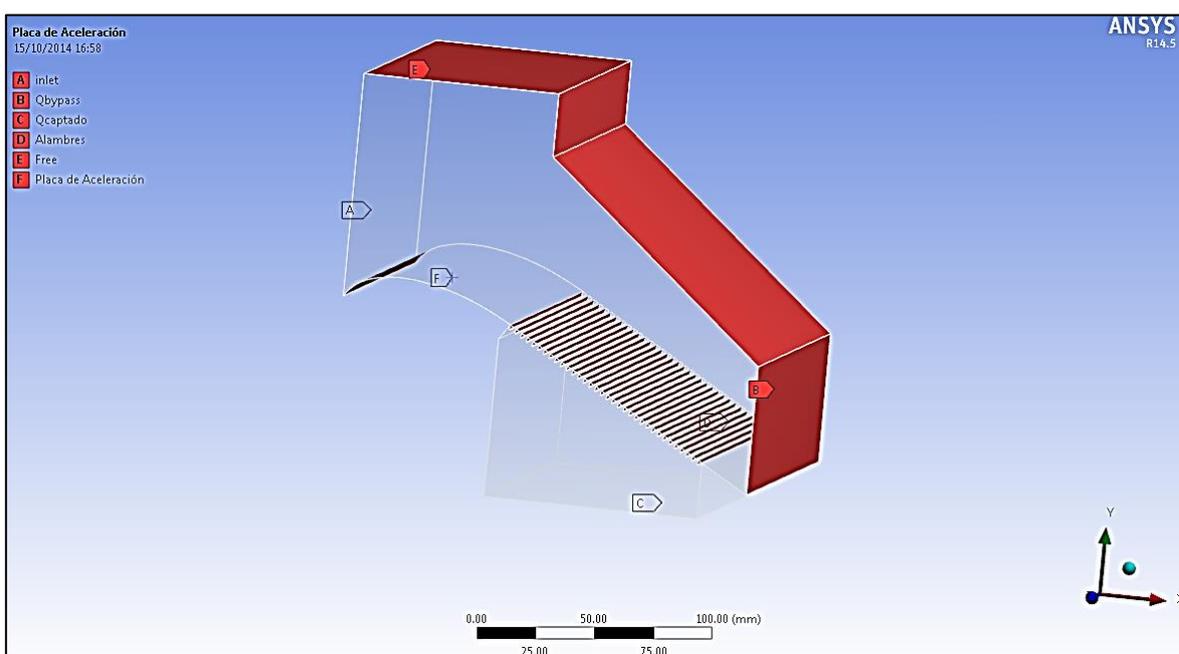


Figura 2.34: Etiquetas creadas con la opción “Named Selection” en el dominio

Fuente: Software ANSYS CFX

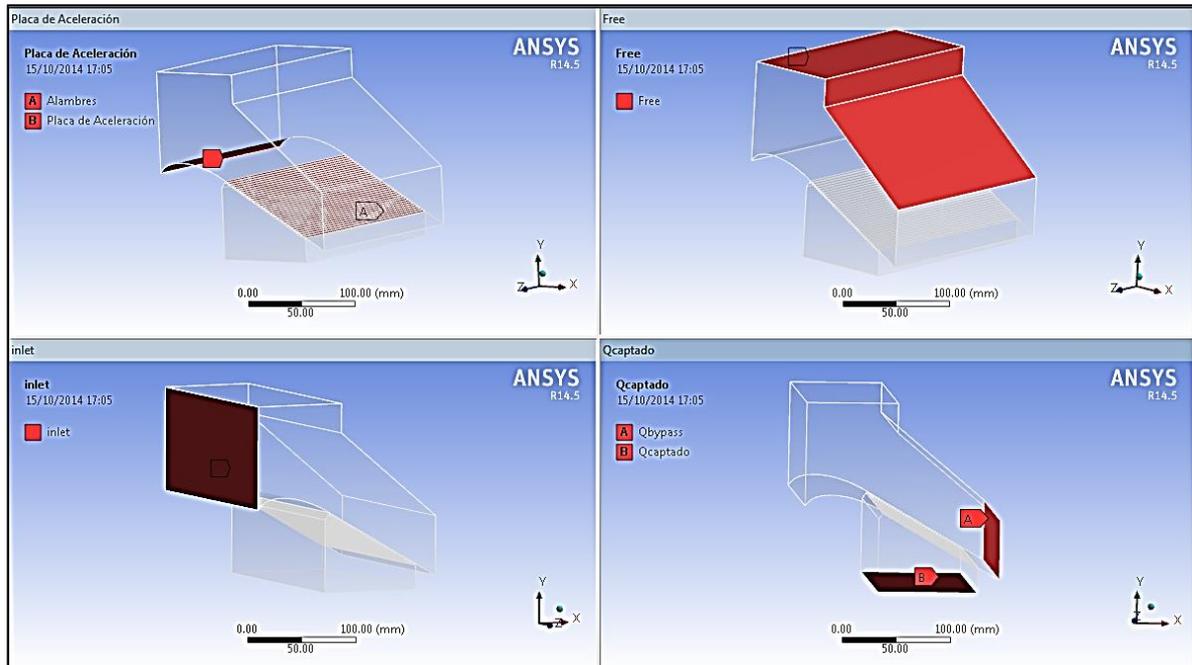


Figura 2.35: Etiquetas del dominio para designar las condiciones de frontera

Fuente: Software ANSYS CFX

### 2.6.3.1. Condición de Entrada.

La condición de borde tipo entrada (Inlet) se utilizó para definir la zona de entrada y las condiciones de entrada del flujo al dominio. El CFX-pre permite ingresar un condición de entrada como componente de velocidad, presión y por un caudal másico, este caudal puede calcularse multiplicando el caudal en metros cúbicos por la densidad del agua ( $997 \text{ kg/m}^3 \sim 1000 \text{ kg/m}^3$ ).

Tabla 2.9: Detalles de la condición de borde tipo entrada.

Entrada (Inlet)	
Tipo de condición de borde	Inlet
Régimen de flujo	Subsónico
Definición de la condición	Caudal Másico
Caudal másico	11 kg/s ( $0.011 \text{ m}^3/\text{s}$ )
Turbulencia	Intensidad media 5%
Fracción en volumen de aire	0
Fracción en volumen de agua	1

Fuente: El autor

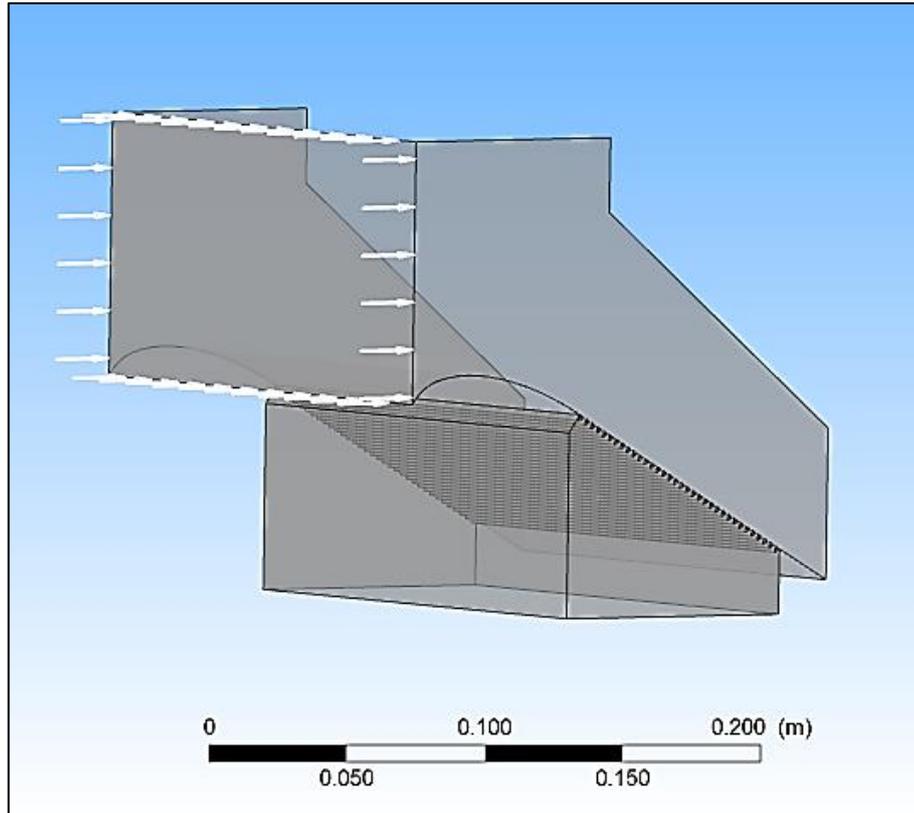


Figura 2.36: Ubicación de la condición de borde tipo entrada (Inlet)

Fuente: Software ANSYS CFX

### 2.6.3.2. Condición de atmósfera.

Para definir la zona de la superficie libre (Free) del dominio se usó la condición de borde tipo Abertura (Opening) incorporada en el ANSYS CFX, este tipo de condición es normalmente usada para simular flujos a superficie libre ya que permite el ingreso y salida de los fluidos que se dan en el dominio.

Tabla 2.10: Detalles de la condición de borde tipo superficie libre (Opening).

Superficie libre (Free)	
Tipo de condición de borde	Abertura (Opening)
Régimen de flujo	Subsónico
Opción de masa y momentum	Dirección y presión en la apertura
Dirección d flujo	Normal a la apertura
Presión relativa	0 Pa
Turbulencia	Intensidad media 5%
Fracción en volumen de aire	1
Fracción en volumen de agua	0

Fuente: El autor

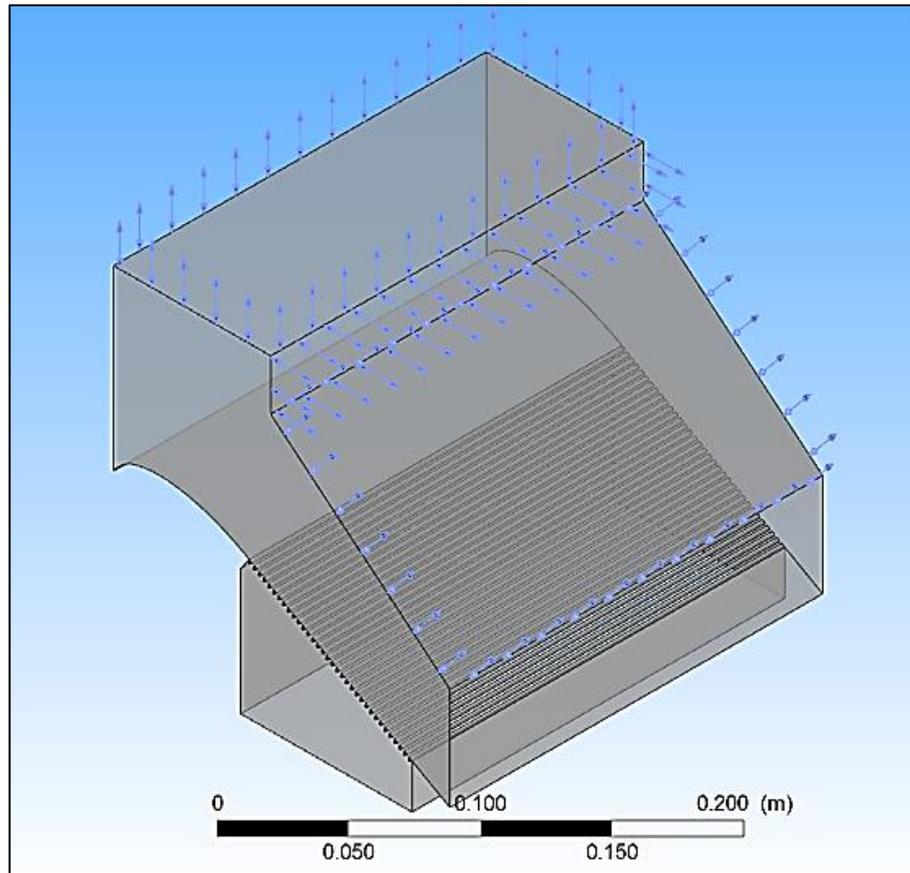


Figura 2.37: Ubicación de la condición de borde tipo superficie libre (Opening)

Fuente: Software ANSYS CFX

### 2.6.3.3. Condición de pared.

Como se ha mencionado anteriormente el ANSYS CFX define la condición de pared (Wall) automáticamente a todas las partes del dominio que no han sido definidas con alguna otra condición de borde. Cabe indicar que el usuario también puede ir definiendo cada parte sólida con sus respectivas propiedades. Para el presente trabajo se ha definido la condición de pared a los alambres y la placa de aceleración de la captación y el resto de paredes como el canal de captación y los límites del dominio han sido definidos automáticamente por el programa.

Tabla 2.11: Detalles de la condición de borde tipo pared

Pared	
Tipo de condición de borde	Pared (Wall)
Definición de la condición	Sin deslizamiento
Rugosidad de la paredes	Pared lisa
Pared de fluidos	Aire-Agua

Fuente: El autor

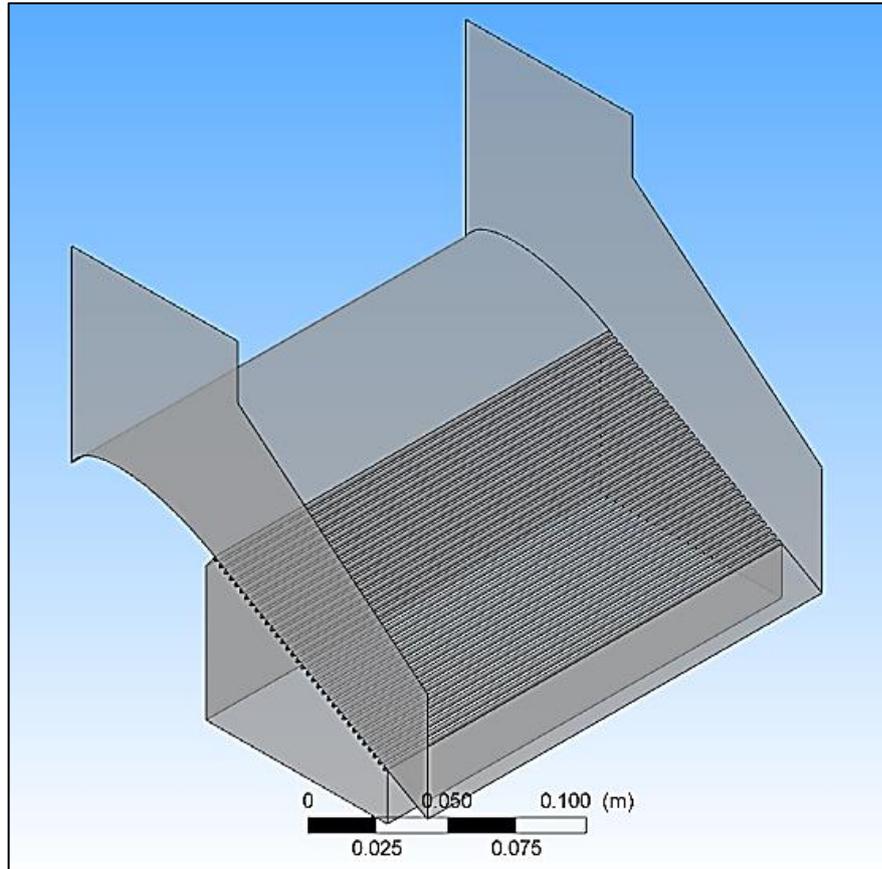


Figura 2.38: Ubicación de la condición de borde tipo pared (Wall)

Fuente: Software ANSYS CFX

#### **2.6.3.4. Condición de salida.**

Para esta simulación se tendrá dos salidas de interés, que han sido definidas como  $Q_{\text{captado}}$  y  $Q_{\text{bypass}}$ . La salida para el caudal captado ha sido ubicada directamente en la solera del canal de captación, mientras que la salida del caudal derivado del vertedero se ubicó al final de la rejilla de captación. Se utilizó la condición de borde tipo abertura (Opening) para definir estas salidas, ya que una vez que el flujo pase por estas irá a la atmósfera.

Tabla 2.12: Detalles de las condiciones de borde tipo salida

Salidas ( $Q_{\text{captado}}$ y $Q_{\text{bypass}}$ )	
Tipo de condición de borde	Abertura (Opening)
Régimen de flujo	Subsónico
Opción de masa y momentum	Dirección y presión en la apertura
Dirección d flujo	Normal a la apertura
Presión relativa	0 Pa
Turbulencia	Intensidad media 5%
Fracción en volumen de aire	1
Fracción en volumen de agua	0

Fuente: El autor

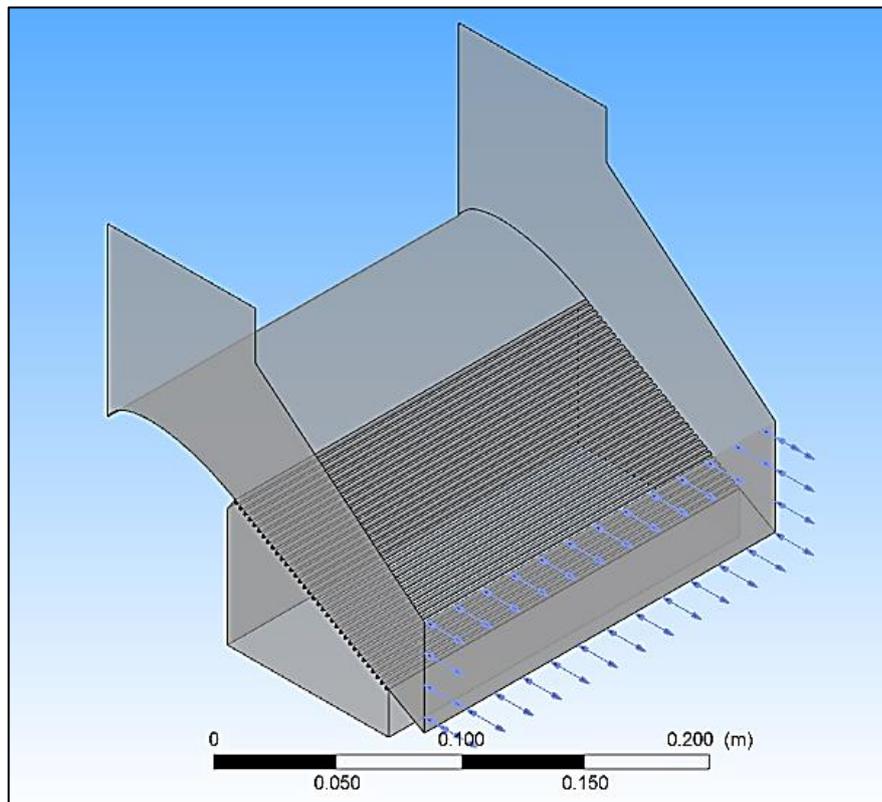


Figura 2.39: Ubicación de la salida  $Q_{\text{bypass}}$

Fuente: Software ANSYS CFX

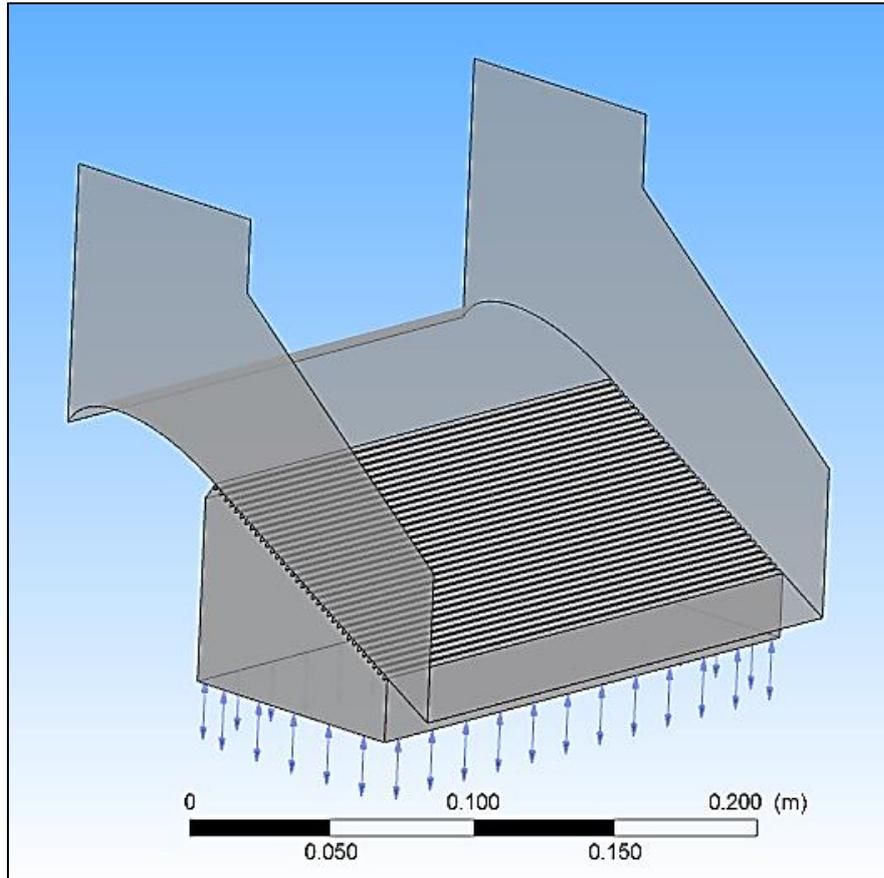


Figura 2.40: Ubicación de la salida Qcaptado

Fuente: Software ANSYS CFX

#### ***2.6.4. Inicialización global.***

La inicialización es el proceso por el cual todos los valores de campo no especificados en la solución se asignan al comienzo de una simulación. Estos valores se refieren comúnmente como valores iniciales. Para las simulaciones de estado estacionario, que pueden ser referidos colectivamente como una estimación inicial.

El ANSYS recomienda que para simulaciones de estado estacionario, los valores iniciales se pueden ajustar de forma automática si una buena suposición inicial no se conoce o no se requiere. Aunque los valores iniciales exactos no siempre pueden estar disponibles, una buena aproximación puede reducir el tiempo para resolver una simulación en estado estable y reducir la posibilidad de que la solución no converge debido a residuos divergentes. Para simulaciones transitorias, los valores iniciales se deben especificar para todas las variables, porque los datos describen el estado en el momento de inicio de la simulación.

Tabla 2.13: Detalles de la Inicialización global

Inicialización Global	
<b>Componentes cartesianos de velocidad</b>	
Definición de velocidad	Cartesiana
U	0 (m/s)
V	0 (m/s)
W	0 (m/s)
<b>Presión estática</b>	
Presión relativa	1 Pa
<b>Turbulencia</b>	
Turbulencia	Intensidad media 5%
<b>Condiciones iniciales de fluidos</b>	
Fracción en volumen de aire	1
Fracción en volumen de agua	0

Fuente: El autor

#### **2.6.5. Modelo de turbulencia.**

Para la resolución con *ANSYS CFX* se ha optado por el modelo de turbulencia SST "Shear Stress Transport", basado en el modelo  $k-\omega$ . Como se ha mencionado en la sección 1.4.8.8 este modelo fue diseñado para dar una elevada precisión del inicio y de la cantidad de flujo separado bajo gradientes de presión adversos, mediante la inclusión de los efectos de transporte en la formulación de la viscosidad de remolino, lo que se traduce en la mejor predicción de la separación del flujo. El elevado rendimiento de este modelo ha sido demostrado en un gran número de estudios de validación y uno de los más citados el de Bardina en 1997 (Turbulence Modeling Validation Testing and Development), por lo que está recomendado para las simulaciones de alta precisión de capa límite.

#### **2.6.6. Controles de solución.**

El control del solucionador se utiliza para ajustar los parámetros que controlan CFX-Solver durante la fase de solución. Los controles de la convergencia de la solución se hacen mediante las ecuaciones de continuidad, cantidad de movimiento, disipación turbulenta y de la energía cinética turbulenta. Para este caso no se considera la ecuación de conservación de la energía ya que no se necesita datos de transferencia de calor y no ha sido considerada.

Para obtener la solución se deben establecer ciertos controles y criterios de convergencia. Para esta simulación se escoge un máximo de 100 iteraciones con un control en la escala de tiempo automático (Timescale Control) y un valor medio residual (RMS) de  $1 \times 10^{-5}$ ,

cuando se determine valores menores el solucionador puede terminar y considerar los resultados aceptables.

Tabla 2.14: Detalle del control del solucionador

Control del solucionador	
Régimen de advección	Alta resolución
Turbulencia numérica	Primer orden
Mínimo número de iteraciones	1
Máximo número de iteraciones	100
Control de escala de tiempo	Automático
Criterio de convergencia	
Tipo de residual	RMS
Valor residual	1E-05

Fuente: El autor

### 2.6.7. Monitores de convergencia.

El CFX-Solver presenta gráficos que se actualizan en función del proceso iterativo para monitorear la convergencia. Estos gráficos se denominan monitores de convergencia. El solucionador resuelve todas las variables de todas las ecuaciones de transporte en el flujo. Este tiene una interfaz para que el usuario visualice el avance de la solución. Los residuos de las ecuaciones se presentan de una manera numérica y gráfica siendo esta la mejor manera de interpretar la solución. En esta sección se presentan las curvas de convergencia del dominio simulado, donde se pueden observar que los valores promedios residuales están debajo del objetivo de  $1 \times 10^{-5}$ , alcanzando así la estabilidad de las ecuaciones de flujo.

La Figura 2.41 muestran las curvas residuales en norma RMS para la cantidad de movimiento en U, V y W (x, y, z) y la masa obtenidos en el dominio. La gráfica muestra que la curva residual de cantidad de movimiento en U y V fueron las que requirieron mayor número de iteraciones para alcanzar el nivel de convergencia especificado, esto se da ya que son las componentes que sufren mayores agitaciones y cambios de dirección a lo largo de la estructura de captación. Mientras que la curva residual de volumen (RMS P-Vol) es la que alcanza el nivel de convergencia requerido en menor número de iteraciones. Adicionalmente se observa que en las tres curvas de cantidad de movimiento en las direcciones U, V y W, presentas pequeñas oscilaciones las primeras cincuenta (50) iteraciones, y luego se comporta de manera estable y descendente hasta llegar a la convergencia. Además se muestran las gráficas de convergencia de las ecuaciones de turbulencia, masa de agua (RMS Mass -Water) y de la convergencia de la escala de pared en las Figuras 2.42 a 2.43.

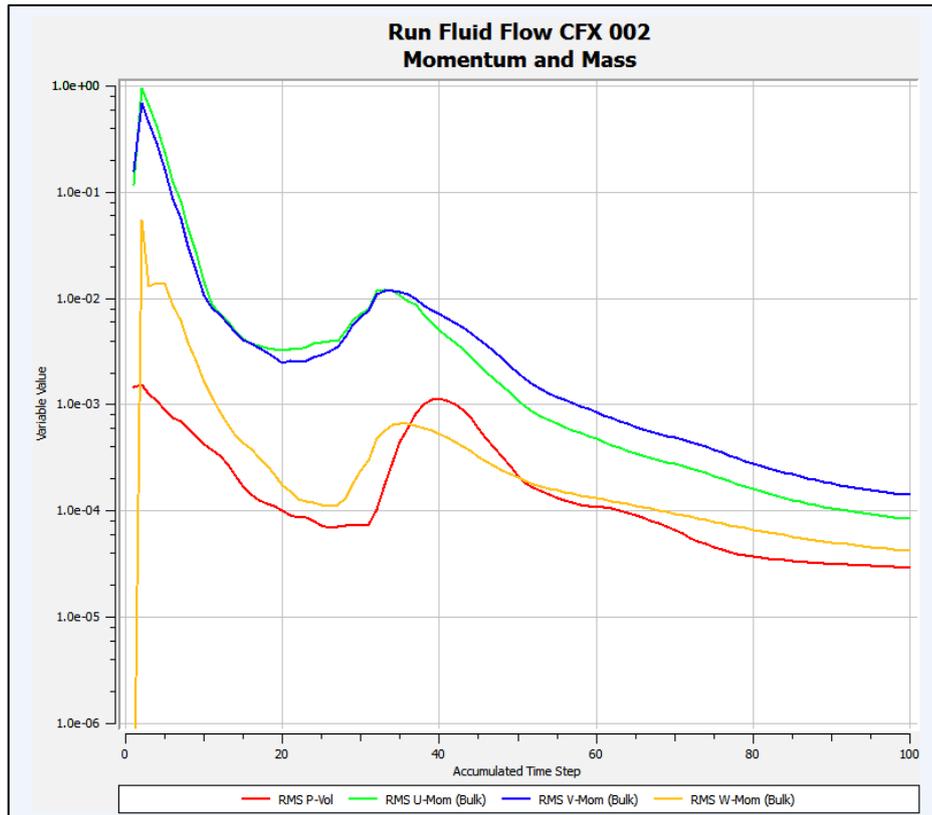


Figura 2.41: Valor residual en función del número de iteraciones para la ecuaciones de cantidad de movimiento y masa.

Fuente: Software ANSYS CFX

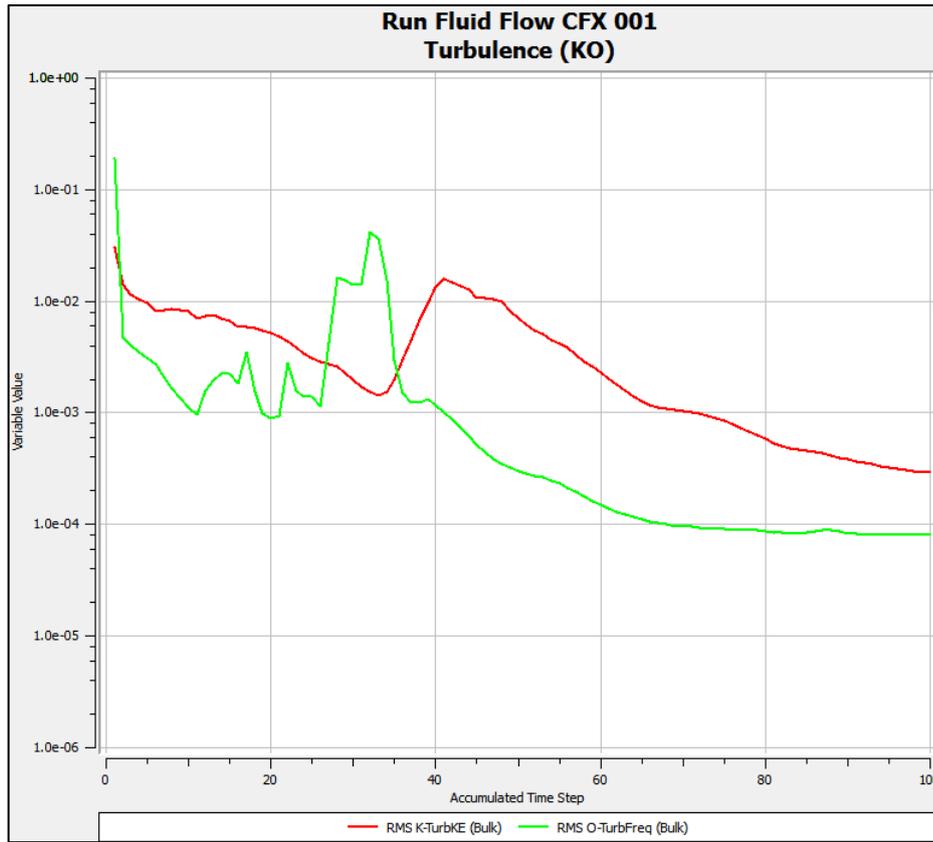


Figura 2.42: Valor residual en función del número de iteraciones para la ecuaciones turbulencia.

Fuente: Software ANSYS CFX

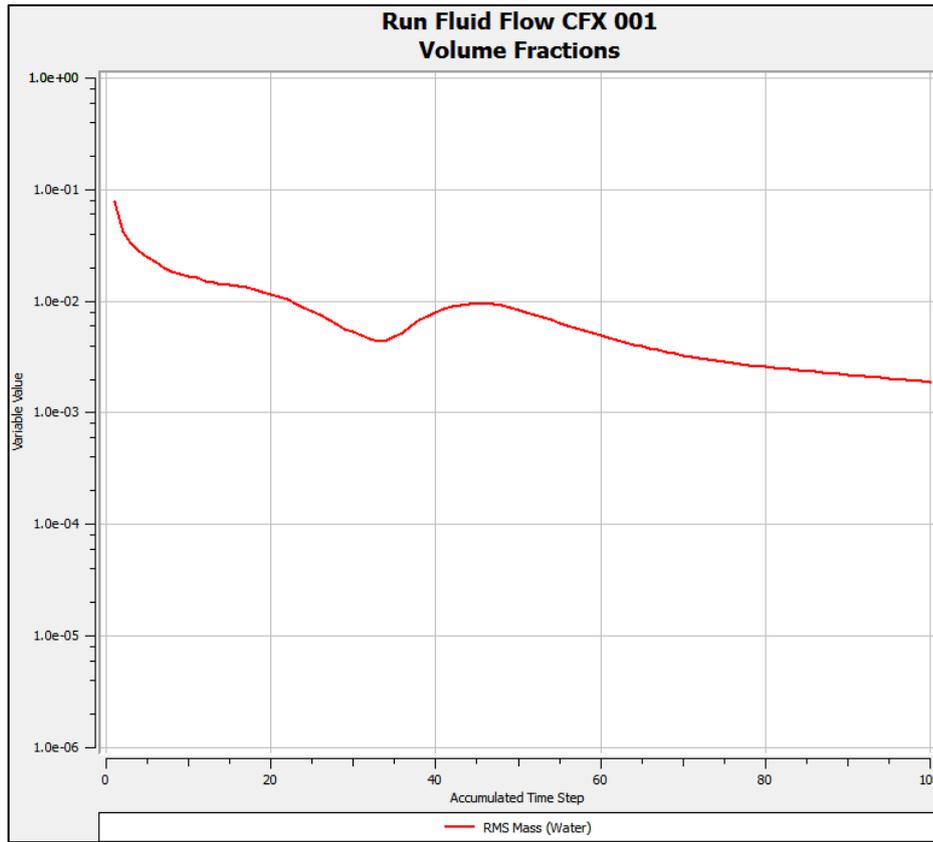


Figura 2.43: Valor residual en función del número de iteraciones para la fracción de volumen.

Fuente: Software ANSYS CFX

## **CAPITULO III**

---

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1. Análisis de resultados del software HPCES.

Después de introducir todas las variables expuestas en el capítulo anterior al programa HPCES se procede a su ejecución, para esto se tiene dos opciones; resolver para un perfil de flujo único para la descarga de entrada dada ( $Q = 0.011 \text{ m}^3/\text{s}$ ) con la opción “*Compute One Profile*” y la segunda opción para realizar el análisis es mediante “*Compute Multiple Profiles to Develop Rating Curve for this Screen*” esto hace que el programa calcule repetidamente perfiles que comienzan con una pequeña entrada de descarga y luego aumente la afluencia hasta una condición de derivación de flujo del 50%. Como tenemos un caudal fijo de 11 L/s usamos la primera opción. El software da varios resultados de los cuales los de interés para este trabajo son el caudal captado por la rejilla ( $Q$  Through Screen) y el caudal derivado ( $Q$  Bypass), los valores calculados por los modelos matemáticos de Tony Wahl del 2001 y 2013 se presentan a continuación en la siguiente tabla y se encuentra corroboradas en las figuras del programa.

Tabla 3.1: Resultados del programa HPCES

Método	Parámetro	$\text{m}^3/\text{s}$	$\text{kg/s}$
COANDA (Wahl 2001)	Qbypass	0.0060	5.98
	Qcaptado	0.0050	4.99
COANDA (Wahl 2013)	Qbypass	0.0071	7.08
	Qcaptado	0.0039	3.89

Fuente: El autor

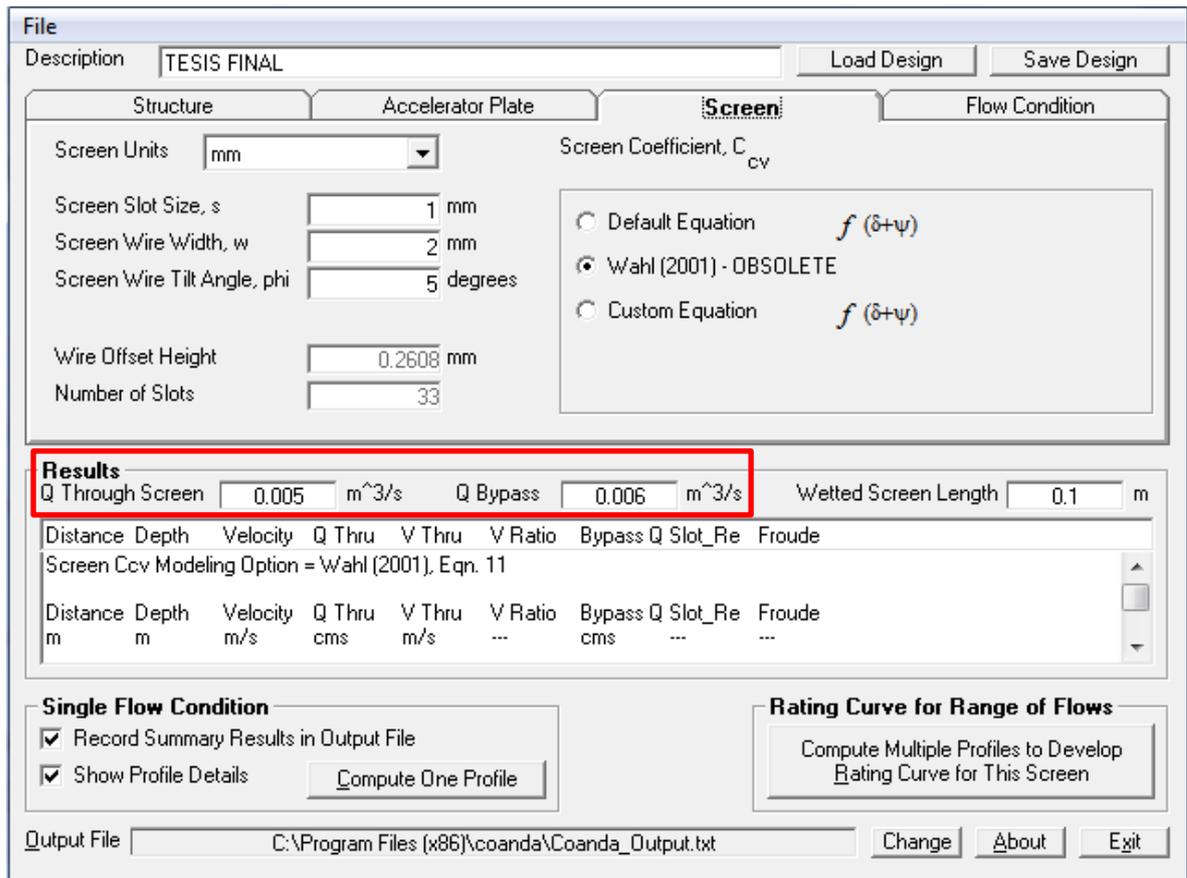


Figura 3.1: Resultados arrojados por el software HPCES con el modelo matemático del 2001 de Tony Wahl para la captación propuesta en este trabajo.

Fuente: Software HPCES

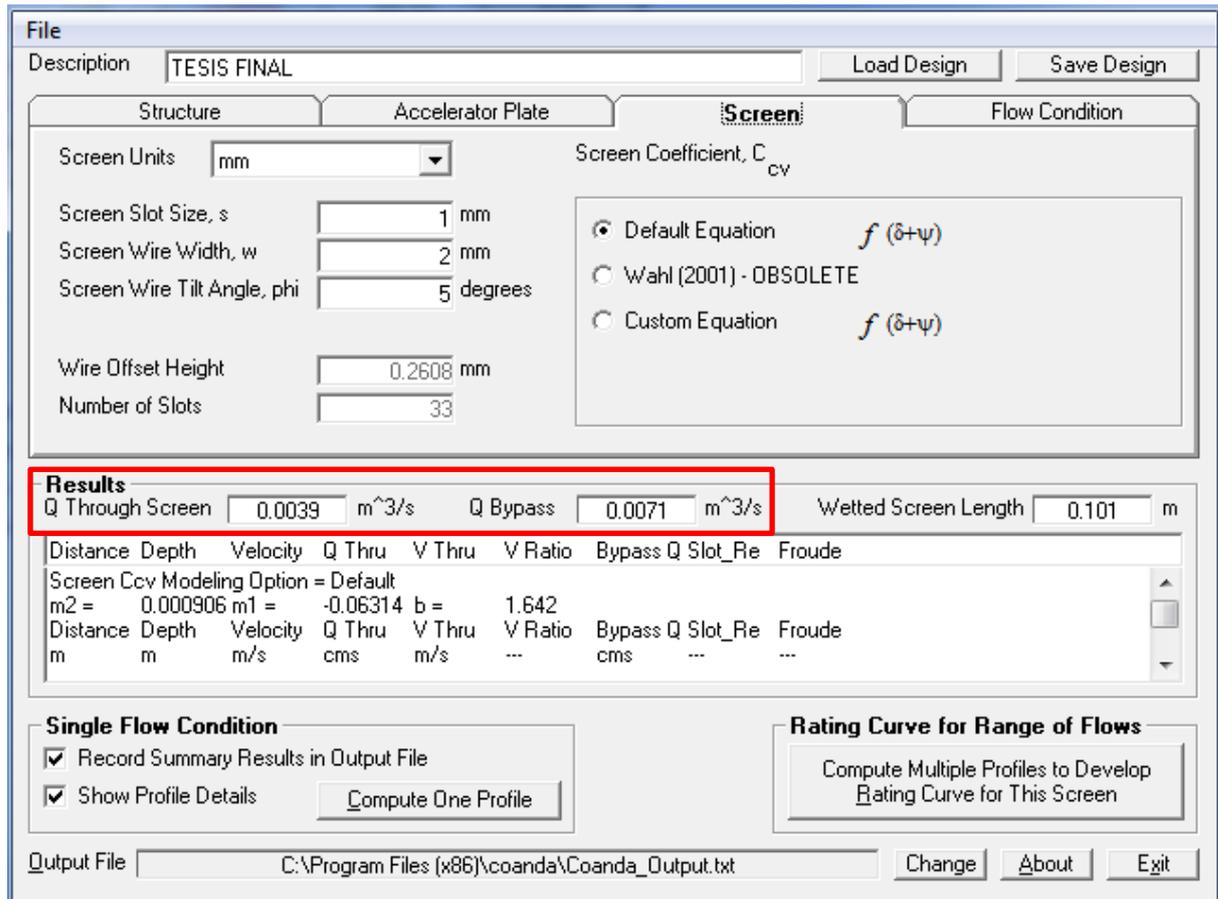


Figura 3.2: Resultados arrojados por el software HPCES con el modelo matemático del 2013 de Tony Wahl para la captación propuesta en este trabajo.

Fuente: Software HPCES

### 3.2. Análisis de resultados CFD.

En esta sección se muestra los resultados obtenidos de la simulación CFD. El software ANSYS CFX nos ofrece un post procesador llamado CFX Post, el cual está diseñado para la visualización gráfica o numérica de diferentes resultados que el usuario desee. Una vez analizados los resultados arrojados por el programa se comparará los mismos con los resultados del modelo matemático de Tony Wahl.

Puesto que el objetivo de este trabajo es validar los resultados de caudal captado y derivado se hace uso únicamente de la variable *massFlow* integrada en el programa; la cual nos arroja un resultados numérico del flujo de masa en un área del dominio definida con una condición de frontera ya sea entrada, salida o abertura. Para obtener este resultado se tiene dos opciones crear una expresión con esta variable antes de la corrida en el Setup de la simulación o directamente en el CFX Post creando una tabla e ingresando la expresión en

la misma. Las expresiones en este caso fueron ingresadas con la segunda opción y son las siguientes:

- *massFlow()@Qcaptado*
- *massFlow()@Qbypass*

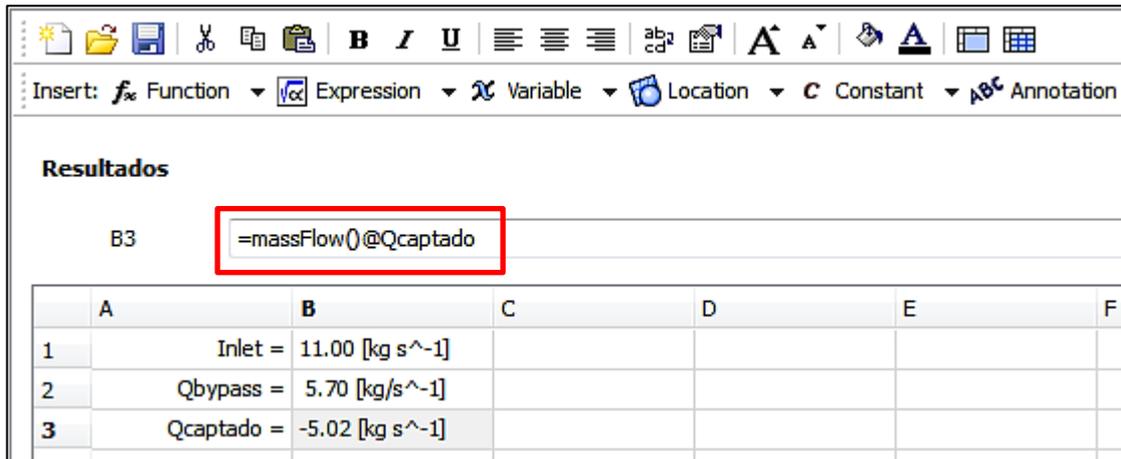


Figura 3.3: Expresiones y resultados del caudal de entrada, captado y derivado de la simulación No. 3.

Fuente: Software ANSYS CFX

Como se observa en la figura anterior los resultados arrojados por la simulación CDF están dados como una tasa de flujo másico (Bulk mass flow rate) en kilogramos por segundo (kg/s) para lo cual procedemos a pasarlos a metros cúbicos por segundo ( $m^3/s$ ) dividiendo por la densidad del agua con la que hemos estado trabajando ( $1000 \text{ kg}/m^3$ ).

Tabla 3.2: Resultados de las simulaciones en ANSYS CFX

No. Simulación	Mallado	Tiempo Resolución	Parámetro	Resultado ANSYS (kg/s)	Resultado ANSYS ( $m^3/s$ )
	No. Elementos				
1	780,647.00	11min	Qcaptado	6.94	0.0069
			Qbypass	4.05	0.0041
2	2,372,164.00	45min	Qcaptado	6.19	0.0062
			Qbypass	4.78	0.0048
3	7,698,173.00	2H35	Qcaptado	5.02	0.0050
			Qbypass	5.70	0.0057

Fuente: El autor

Gracias a esta herramienta es posible calcular los resultados para el análisis de sensibilidad del mallado y al final poder comparar y validar los resultados. Para el análisis de sensibilidad fue necesario realizar 3 simulaciones con distintos mallados con las cuales se pudo llegar a

obtener el porcentaje de error impuesto de 10% (este porcentaje de error es alto debido a la limitación de procesador del ordenador y la licencia del programa). Este error es calculado mediante la comparación de los resultados del caudal captado y derivado de los modelos de Tony Wahl y de la simulación CFD. Cabe indicar que todas las condiciones y configuraciones expuestas en el capítulo de Materiales y Métodos se mantienen menos el mallado. Para lo cual se presenta figuras de los resultados en función de cada mallado y los resultados obtenidos por los modelos de Tony Wahl (2001 y 2013). Además una tabla comparativa de resultados de las 3 simulaciones con sus respectivos números de elementos.

Tabla 3.3: Análisis de resultados

No. Simulación	Parámetro	Resultado ANSYS (m <sup>3</sup> /s)	Resultados del programa HPCES			
			Wahl 2001 (m <sup>3</sup> /s)	% Error	Wahl 2013 (m <sup>3</sup> /s)	% Error
1	Qcaptado	0.0069	0.0051	16.73	0.0039	27.64
	Qbypass	0.0041	0.0058	16.82	0.0071	27.73
2	Qcaptado	0.0062	0.0051	9.91	0.0039	20.82
	Qbypass	0.0048	0.0058	9.91	0.0071	20.82
3	Qcaptado	0.0050	0.0051	0.73	0.0039	10.18
	Qbypass	0.0057	0.0057	1.82	0.0071	12.73

Fuente: El autor

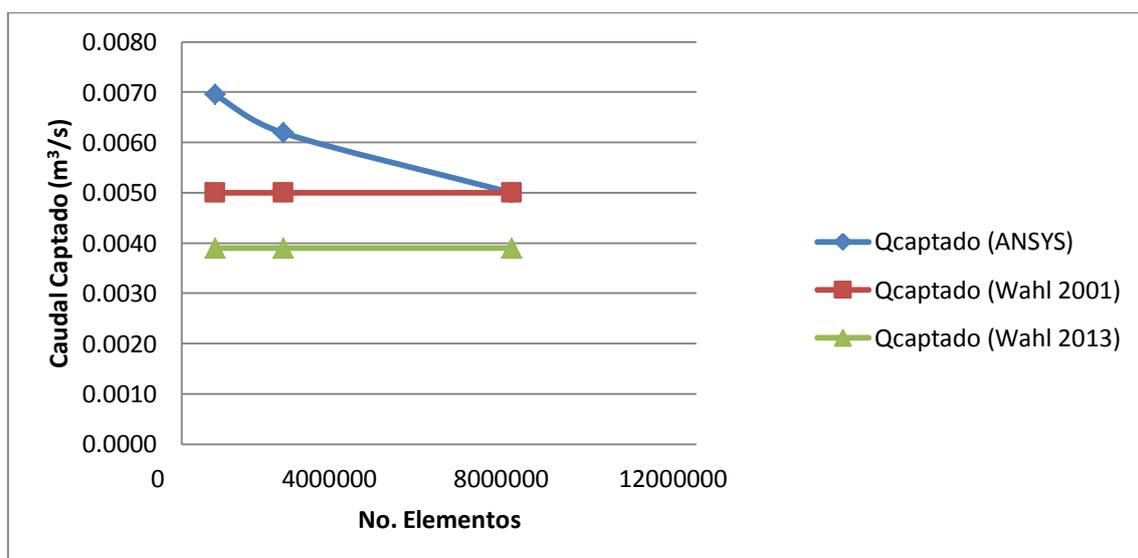


Figura 3.4: Caudal Captado en función del mallado

Fuente: El autor

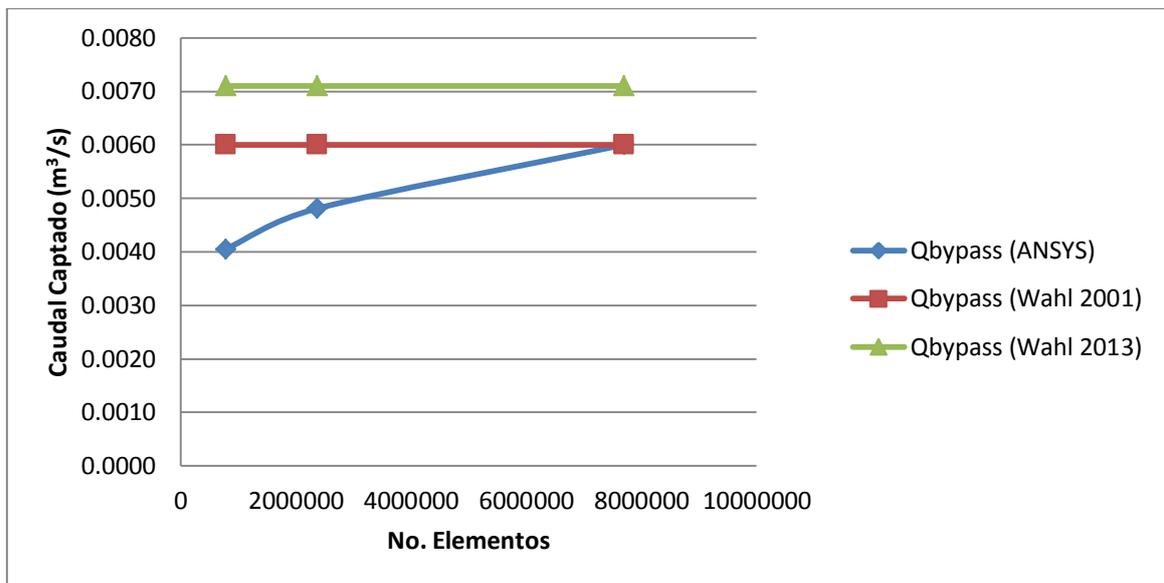


Figura 3.5: Caudal derivado en función del número de elementos

Fuente: El autor

Se observa que cuanto más se refina el mallado de la captación el caudal captado va disminuyendo notablemente mientras que el caudal derivado aumenta en comparación a los modelos propuestos en el 2001 y 2013 por Tony Wahl. Es importante recalcar que esto se debe al refinamiento general realizado en cada simulación siendo el más importante el realizado en la zona de mayor importancia de la captación; que son los alambres donde se produce los fenómenos de corte y orificio para la captación del agua los cuales tienen un ancho (2mm) y separación (1mm) muy pequeños. El porcentaje de error calculado para la tercera simulación con el último mallado realizado es de 0.73% a 1.82% para el caudal captado y derivado respectivamente en comparación al modelo teórico del 2001 y de la misma forma de 10.18% a 12.73% para el modelo del 2013 de Tony Wahl, los cuales están dentro del rango de error propuesto en el presente trabajo.

### 3.2.1. Simulación con Caudal Unitario.

Debido a la complejidad del dominio si se sigue refinando el mallado en la parte de la rejilla, el número de elementos crecería de manera exponencial y toda la RAM del equipo podría llegar a colapsar. Para evitar simular este dominio con un mallado más numeroso, se puede modelar esta captación usando la misma metodología explicada en la sección 2, pero reduciendo el dominio que tiene un ancho de 20 cm a un ancho de un centímetro (1 cm) y usando un caudal unitario para este espesor. Esto se puede realizar ya que se el sistema de captación trabaja de modo análogo a lo largo de todo el ancho de la rejilla, por lo que se

puede considerar que se presentan condiciones de simetría a lo largo de todo el plano del dominio fluido. Con lo cual podríamos obtener un mallado mucho más fino en el parte de los alambres pero con una cantidad de elementos menor a la presentada en la tercera simulación. Luego los resultados obtenidos de caudal captado ( $Q_{\text{captado}}$ ) y caudal derivado ( $Q_{\text{bypass}}$ ) se los multiplica para el ancho total de la captación y se validan los resultados. Los mallados se pueden ver en el ANEXO I.

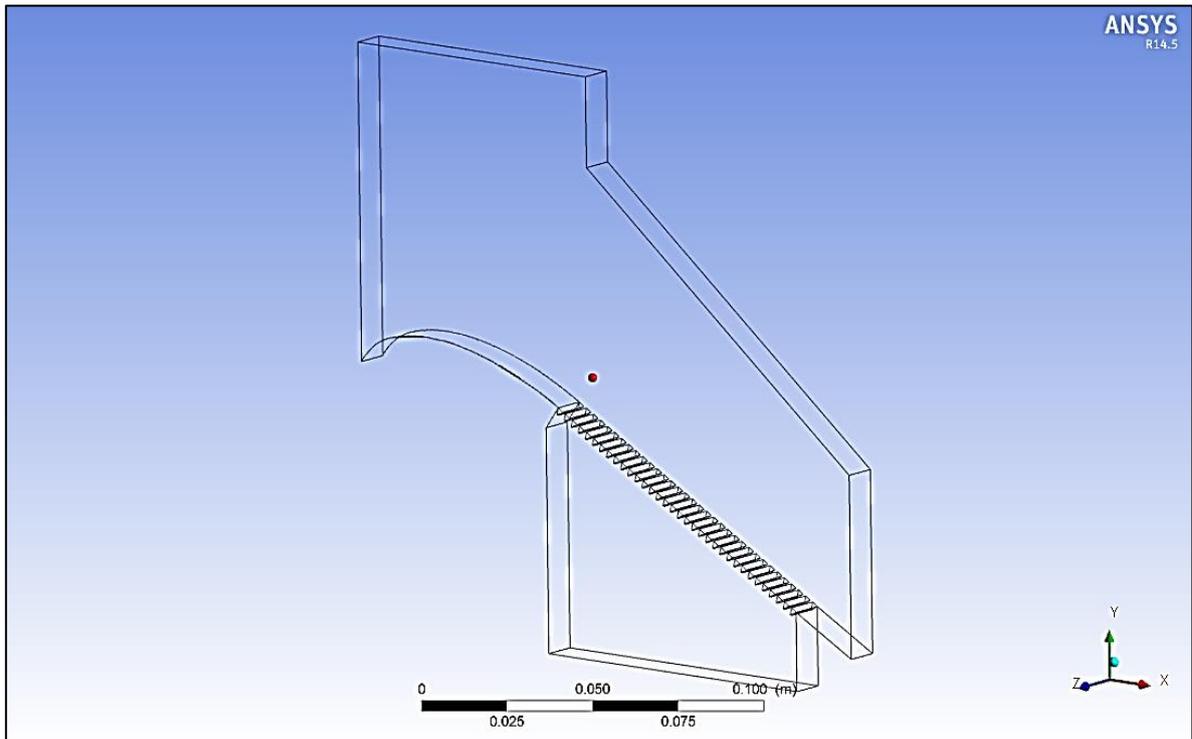


Figura 3.6: Dominio fluido de la captación reducida

Fuente: Software ANSYS CFX

El caudal unitario de entrada calculado para 1cm de ancho de vertedero se lo cálculo de la siguiente manera:

$$\text{Descarga unitaria de diseño} = 0.055 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$$

$$Q_u = 0.055 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m} \times 0.01 \text{ m}$$

$$Q_u = 0.00055 \text{ m}^3/\text{s}$$

Para ingresar al ANSYS este valor como caudal másico se multiplica por la densidad del agua ( $1000 \text{ kg}/\text{m}^3$ ) obteniendo un valor de:

$$Q_u = 0.55 \text{ kg}/\text{s}.$$

Para refinar el mallado en la rejilla se usó las mismas técnicas de refinamiento explicadas en la sección 2; se dividió los alambres a cada 0.2 mm de distancia y un tamaño máximo de elemento de 3 mm similar a la de la simulación 3. Con lo cual se pudo obtener un total de 2,513,871.00 de elementos.

Los resultados obtenidos después de la simulación son los presentados en la siguiente tabla:

Tabla 3.4: Resultados con caudal unitaria

No.	Mallado	Tiempo	Parámetro	ANSYS		COANDA SCREEN	
	No. Elementos			Resultado Unitario	Resultado Total	Wahl 2013 (m <sup>3</sup> /s)	% Error
1	2,513,871.00	45min	Qcaptado	0.00020	0.0040	0.0039	0.91
			Qbypass	0.00033	0.0066	0.0071	4.55

Fuente: El autor

Se observa claramente que el los resultados obtenido con un mallado más denso en el dominio fluido y especialmente en la parte de la rejilla son cada vez más cercanos al modelo de Tony Wahl presentado en el año 2013, obtenido un error de 0.91% para el caudal captado y 4.55% para el caudal derivado.

---

## **CAPITULO IV**

---

## CONCLUSIONES

El presente trabajo tuvo como meta realizar una simulación numérica del flujo de agua sobre una captación de efecto Coanda utilizando la metodología CFD mediante el software ANSYS CFX. Para validar los resultados del caudal captado y derivado de la captación; obtenidos de la simulación, se comparó y analizó con los resultados teóricos obtenidos de los modelos matemáticos de Tony Wahl expuestos en el 2001 y 2013 usando el programa Hydraulic Performance of Coanda-Effect Screens (HPCES). En base a esto se puede concluir lo siguiente:

- Se presenta un procedimiento válido para la simulación de una captación de efecto Coanda, con superficie libre y régimen estacionario usando el software ANSYS CFX versión 14.5.
- Fue necesario realizar tres simulaciones en el análisis de sensibilidad del mallado para obtener un mallado que satisfaga el error de 10% impuesto por el autor.
- La calidad del mallado de la simulación final se califica en promedio como excelente en todo el dominio de flujo obteniendo un valor de oblicuidad de 0.22, pero es importante indicar que en la zona de mayor importancia del dominio (los alambres) se tiene un 27% del mallado total con una oblicuidad del 0.50 que equivale a una calidad buena y un 0.36% del mallado con una calidad regular. Esto se debe a la pequeña separación y espesor de los alambres de la captación en comparación a todo el dominio.
- El caudal captado calculado por el ANSYS CFX de la tercera simulación es de  $0.0050 \text{ m}^3/\text{s}$ , mientras que el caudal derivado es de  $0.0057 \text{ m}^3/\text{s}$ .
- Al comparar los resultados obtenidos de la simulación CFD del caudal captado y derivado de la tercera simulación con el dominio completo del fluido y el modelo de Tony Wahl del 2001, se ha podido obtener un 0.73% y 1.85% de error siendo esta una excelente precisión comparándolo con el modelo teórico.
- Al comparar los resultados obtenidos de la simulación CFD del caudal captado y derivado de la tercera simulación con el dominio completo del fluido y el modelo de Tony Wahl del 2013 se ha podido obtener un 10.18% y 12.73% de error siendo este

---

mayor con respecto al máximo error impuesto para este modelo, por lo que se recurrió a la simulación de la captación con un dominio reducido.

- El caudal captado calculado por el ANSYS CFX de la última simulación con el dominio reducido del fluido es de  $0.0039 \text{ m}^3/\text{s}$ , mientras que el caudal derivado es de  $0.0071 \text{ m}^3/\text{s}$ .
- Al comparar los resultados obtenidos de la simulación CFD del caudal captado y derivado de la última simulación con el dominio reducido del fluido y el modelo de Tony Wahl del 2013 se ha podido obtener un 0.91% y 4.55% de error siendo este satisfactorio con respecto al máximo error impuesto para este modelo.
- Aunque el caudal captado y derivado del análisis CFD y el modelo teórico del 2013 de Wahl calculado por el software HPCES aun tengan una diferencia máxima de 4.55% de error, la tendencia de que estos resultados vayan aproximándose cada vez más, tiene que ver directamente con el refinamiento del mallado en la zona de los alambres de la captación, la cual resulta bastante compleja debido a la dimensión y separación que tiene estos elementos.
- Los cálculos efectuados mediante la metodología CFD usando el software ANSYS CFX demuestran la sensibilidad que tienen los resultados con el mallado que se le realice al dominio.
- De acuerdo a la comparación de los resultados que se obtuvieron de la simulación numérica CFD y de los modelos matemáticos de Tony Wahl, se concluye que el modelo CFD usando como herramienta el ANSYS CFX tiene una tendencia a predecir de una manera correcta el caudal captado y derivado de una captación de efecto Coanda.

---

## RECOMENDACIONES

El presente trabajo es una de las primeras investigaciones usando la metodología CFD en la Universidad Técnica Particular de Loja, y puede llegar a ser una base para futuras investigaciones de flujo de agua a superficie libre; como es el caso aquí presente de las captaciones de efecto Coanda. En base a los resultados obtenidos de la simulación CFD se puede recomendar lo siguiente:

- Realizar un mallado más fino del dominio de la captación, enfocando el refinamiento en la zona de los alambres de la captación, ya que es aquí donde se produce el efecto de corte y orificio de las láminas de agua. Además es siempre importante tener en cuenta la calidad del mallado del dominio.
- Ejecutar una simulación transitoria de este dominio y comparar los resultados obtenidos como los determinados en el presente trabajo.
- Seguir investigando las obras de captación de efecto Coanda, para que su aplicación en nuestro medio sea más regular y tenga bases investigativas en que sustentarse.
- Se recomienda realizar una investigación complementaria al presente trabajo, para calcular el caudal captado por cada orificio producido por los alambres de las captaciones de efecto Coanda.
- Realizar una validación de resultados con la metodología CDF y datos experimentales de una captación de efecto Coanda.
- Se recomienda que para futuras investigaciones, haciendo un análisis previo de simetría; realizar las simulaciones reduciendo los dominios fluidos. Para esto se usaría la condición de borde de simetría, con lo que se podría reducir el costo: computacional, de tiempo y con un mallado mucho más fino en la partes de mayor interés, lo cual daría resultados con muy poco error.

---

## BIBLIOGRAFÍA

- Norris Screen & Manufacturing . (s.f.). *Cook Legacy*. Recuperado el 30 de 04 de 2014, de <http://waterscreen.com/coanda-power-systems.html>
- ANSYS. (2011). *ANSYS CFX-Solver Modeling Guide*. Canonsburg.
- ANSYS CFX Release Notes for 14.5*. (s.f.).
- ANSYS, I. (2011). *ANSYS CFX-Solver Theory Guide*. Canonsburg.
- Aquashear. (s.f.). *Aquashear*. Recuperado el 30 de 04 de 2014, de <http://www.aquashear.com/>
- Bakker, A. (2012). *The Colorful Fluid Mixing Gallery*. Obtenido de <http://www.bakker.org/>
- Bardina, J. E., Huang, P. G., & Coakley, T. J. (1997). *Turbulence Modeling Validation Testing*. California.
- Carrión , E. (2012). Captación de agua superficial mediante rejillas basadas en el efecto COANDA. *Domus*, 28-29.
- casdas, a. (2010). *Casasaa*. Loja: asdasd.
- Castillo Elsitdié, L. G., & Carrillo Sánchez, J. M. (2011). Consideraciones del mallado aplicadas al cálculo de flujos bifásicos con las técnicas de dinámica de fluidos computacional. *IV Jornadas de Intruducción a la Investigación de la UPCT*.
- Castillo Orozco, E. A. (2012). Validación de un modelo CFD para análisis de golpe de ariete en. *Tesis de Grado*.
- Chow, V. T. (1994). *HIDRÁULICA DE CANALES ABIERTOS*. Bogotá: McGRAW-HILL INTERAMERICANA S.A.
- Díaz Morcillo, A. (2000). Métodos De Mallado Y Algoritmos Adaptativos En Dos Y Tres Dimensiones Para La Resolución De Problemas Electromagnéticos Cerrados Mediante El Método De Los Elementos Finitos. *Tesis Doctoral*. Valencia.
- Facusse Saavedra, J. A. (2013). ANÁLISIS MEDIANTE SIMULACIÓN FLUIDODINÁMICA COMPUTACIONAL DEL FLUJO DE RELAVES DE MINERÍA EN DESGASTE DE CAJONES DISIPADORES. *Tesis de Grado*.

---

Fernández Oro, J. M. (2012). *Técnicas numéricas en ingeniería de fluidos: Introducción a la dinámica de fluidos computacional (CFD) por el método de volúmenes finitos*. Barcelona, España: Reverté, S.A.

García Velez, J. L. (s.f.). *Diseño hidráulico de estructuras*.

NASA. (s.f.). ALLSTAR. Recuperado el 29 de 04 de 2014, de <http://www.allstar.fiu.edu/aero/coanda.htm>

Wahl, T. L. (2000). *Hydraulic Tests of Proposed Coanda-Effect Screens for Fulton Ditch: Phase I Test Results*. Denver, CO: U.S. Bureau of Reclamation.

Wahl, T. L. (2001). HYDRAULIC PERFORMANCE OF COANDA-EFFECT SCREENS. *Department of the Interior - Bureau of Reclamation.*, 1-8.

Wahl, T. L. (2003). *Design Guidance for Coanda-Effect Screens*. Bureau of Reclamation, Research Report R-03-03, U.S. Dept. of the Interior, Denver, CO.

Wahl, T. L. (2013). New Testing of Coanda-Effect screen capacities. *HydroVision International*, 6-13.

Wikipedia. (s.f.). *Wikipedia*. Recuperado el 29 de 04 de 2014, de <http://es.wikipedia.org>

## **ANEXOS**

---

## ANEXO I: MALLADO PARA EL ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

La primera simulación se la realizo con un mallado muy pobre usando el primer mallado automático sin ningún refinamiento que calcula el software ANSYS, el segundo mallado se hizo un refinamiento usando la herramienta *Face sizing* con una separación de los alambres de 1 mm y un tamaño máximo de elementos de 32 mm con una relevancia baja, y finalmente para la última simulación se usó una separación de 0.5 mm en los alambres y un tamaño máximo de elementos de 8 mm con una relevancia alta.

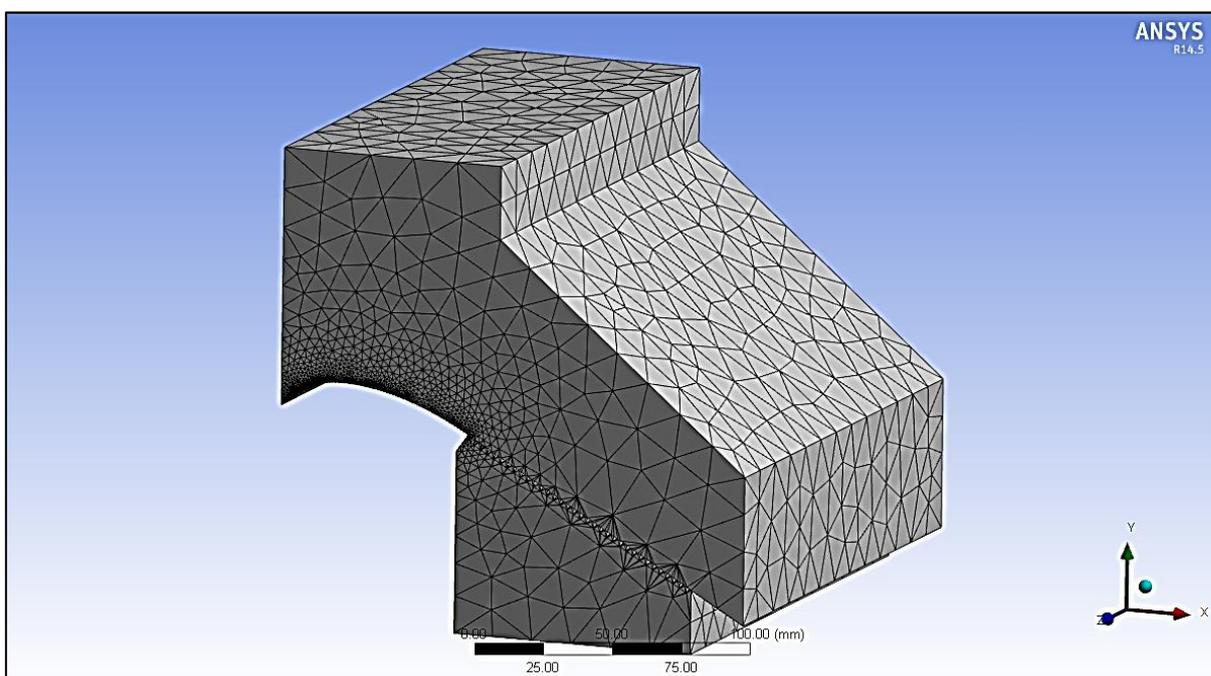


Figura 0.1: Vista isométrica del mallado de la simulación 1

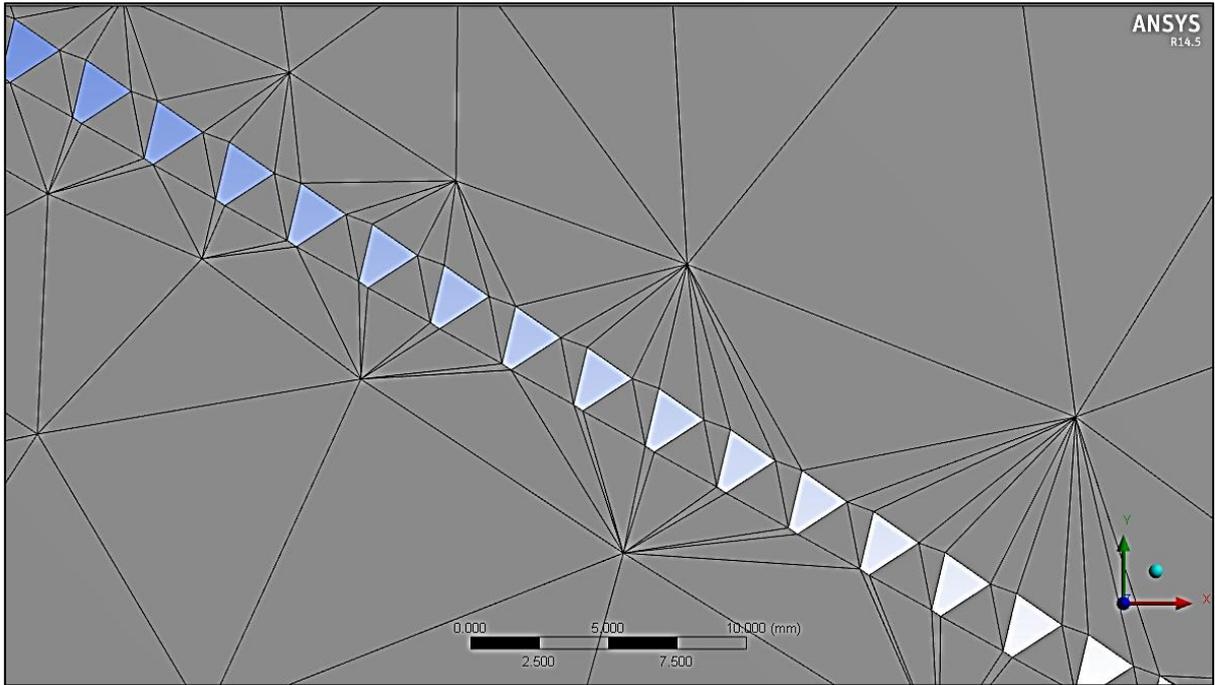


Figura 0.2: Mallado en el rejilla de la simulación 1

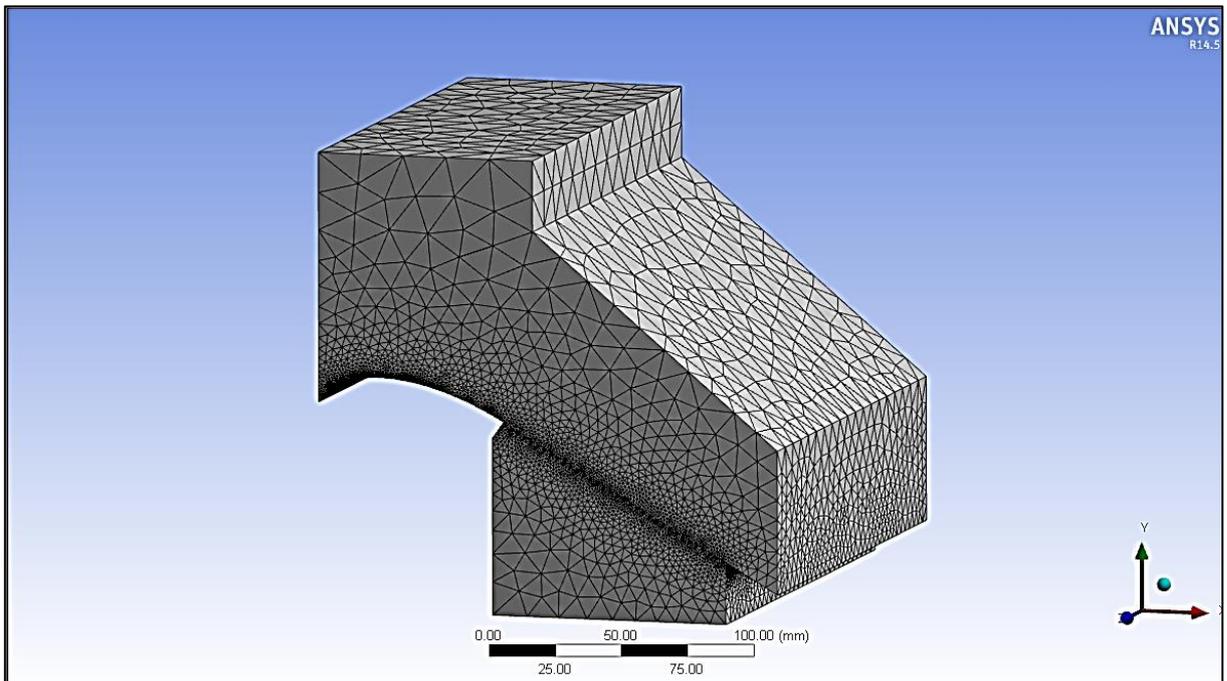


Figura 0.3: Vista isométrica del mallado de la simulación 2

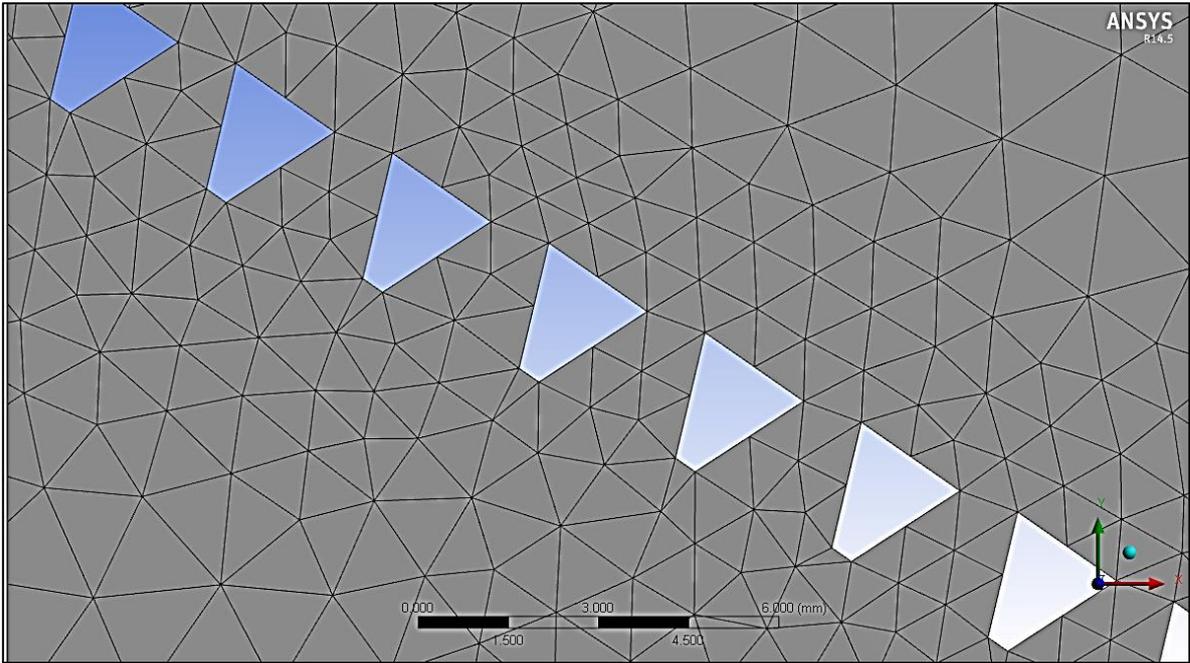


Figura 0.4: Mallado en el rejilla de la simulación 2

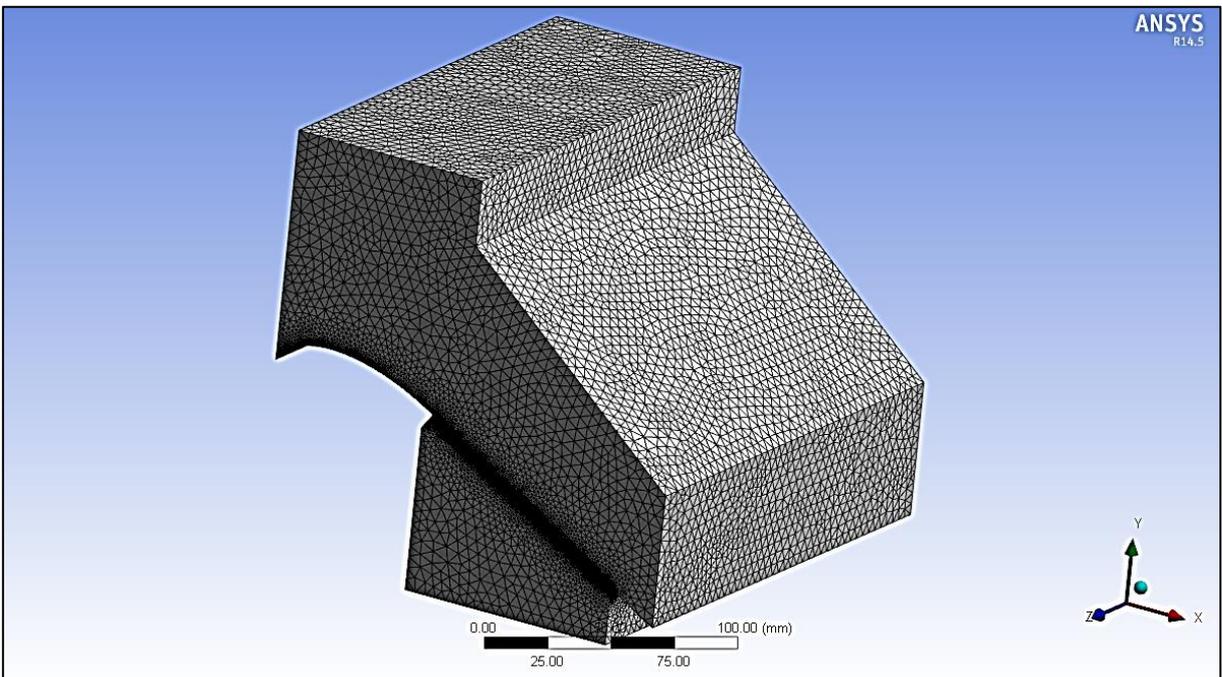


Figura 0.5: Vista isométrica del mallado de la simulación 3

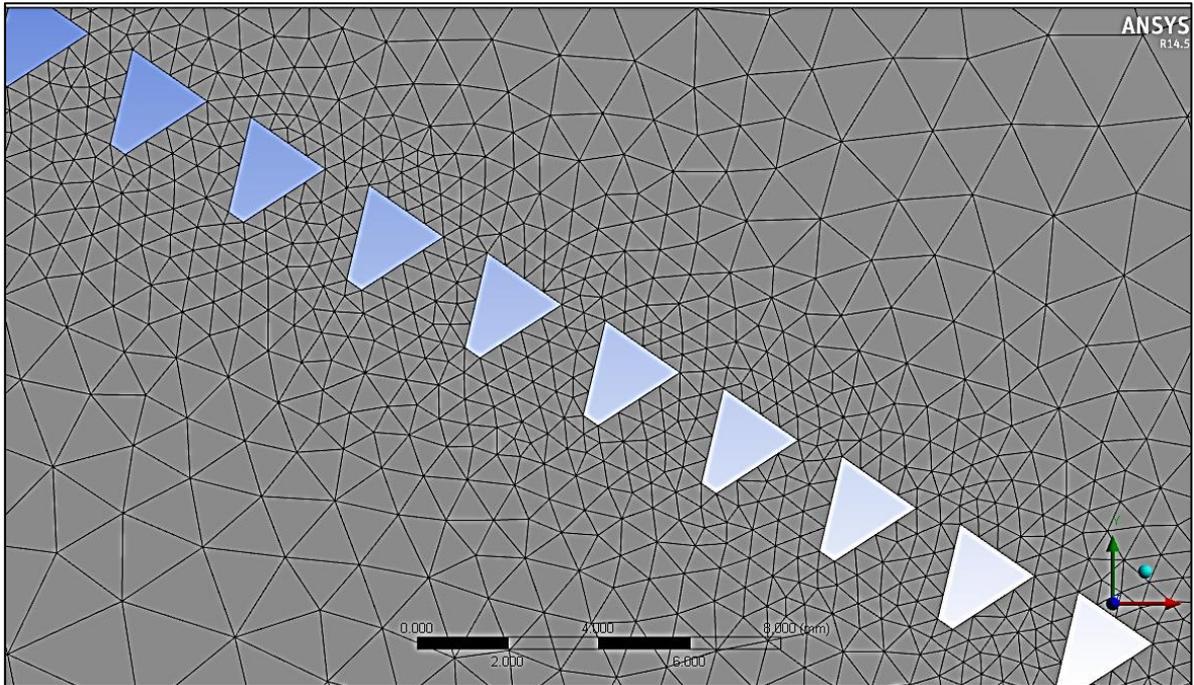


Figura 0.6: Mallado en el rejilla de la simulación 3

Para la simulación con el caudal unitario se usó una separación de 0.2 mm en los alambres y un tamaño máximo de elementos de 8 mm con una relevancia alta.

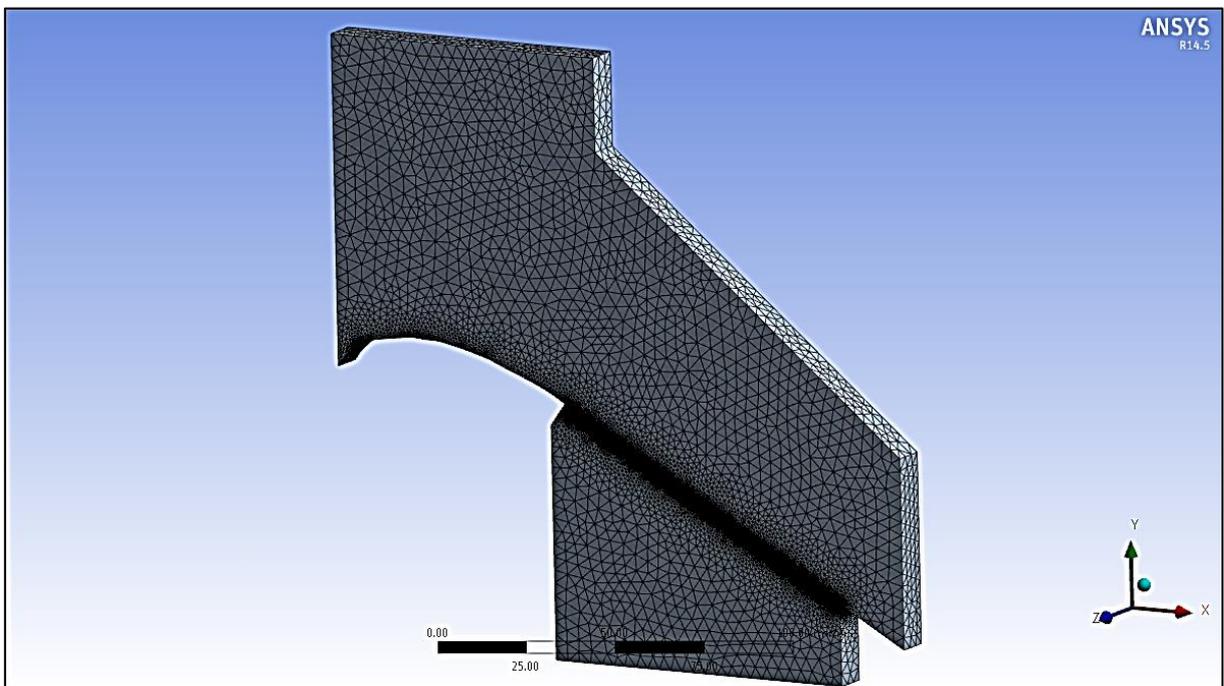


Figura 0.7: Vista isométrica del mallado de la simulación con caudal unitario

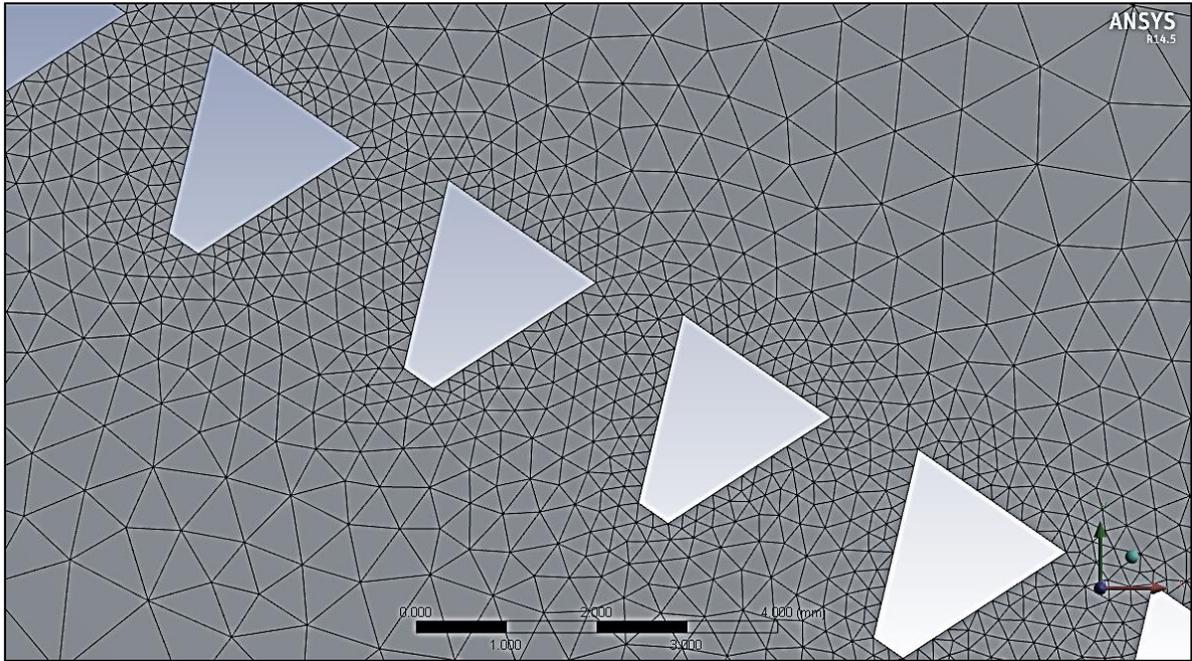


Figura 0.8: Mallado en el rejilla de la simulación unitaria

## ANEXO II: RESULTADOS GRÁFICOS DE LAS SIMULACIONES EN ANSYS CFX

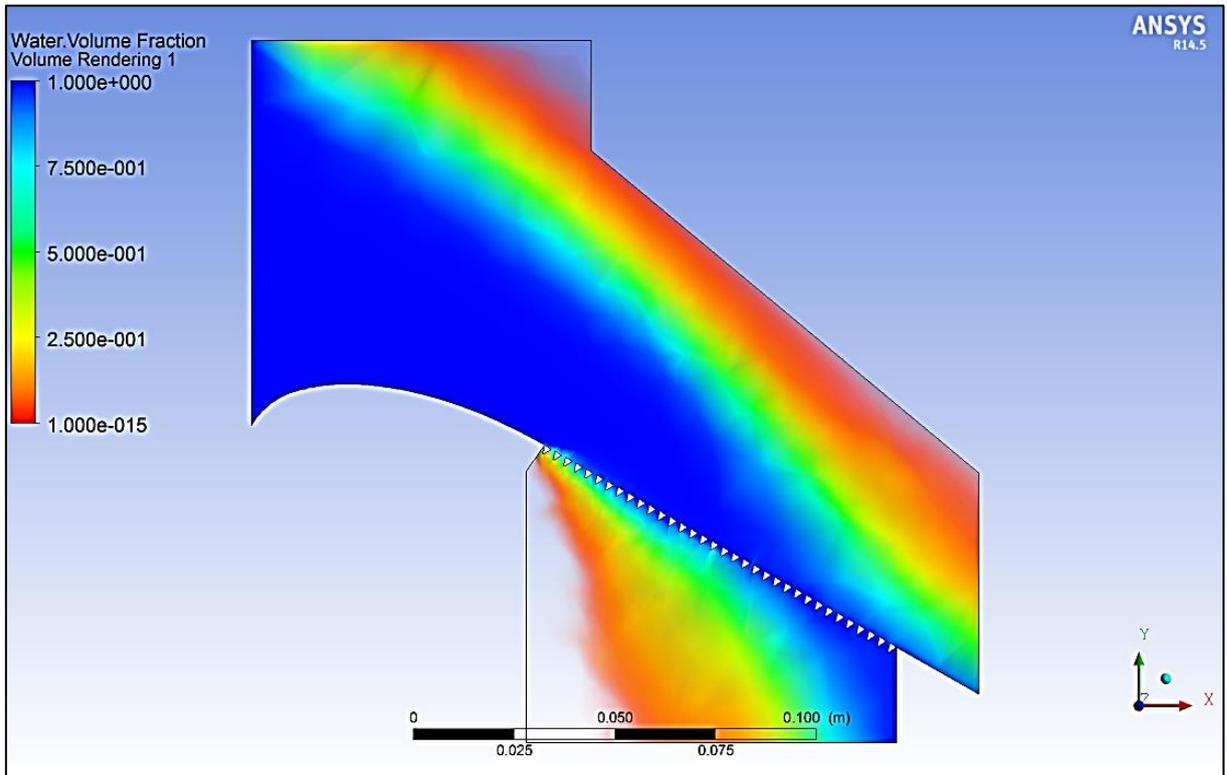


Figura 0.9: Fracción de volumen de agua de la simulación 1.

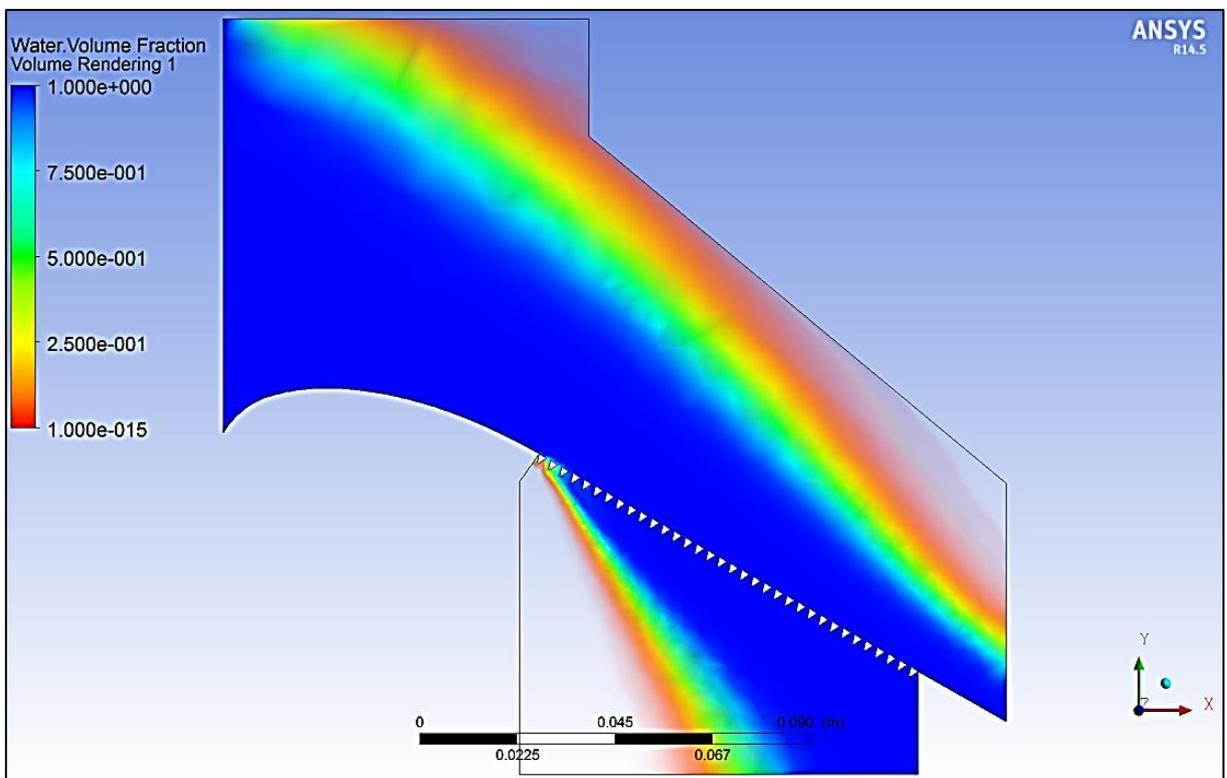


Figura 0.10: Fracción de volumen de agua de la simulación 2.

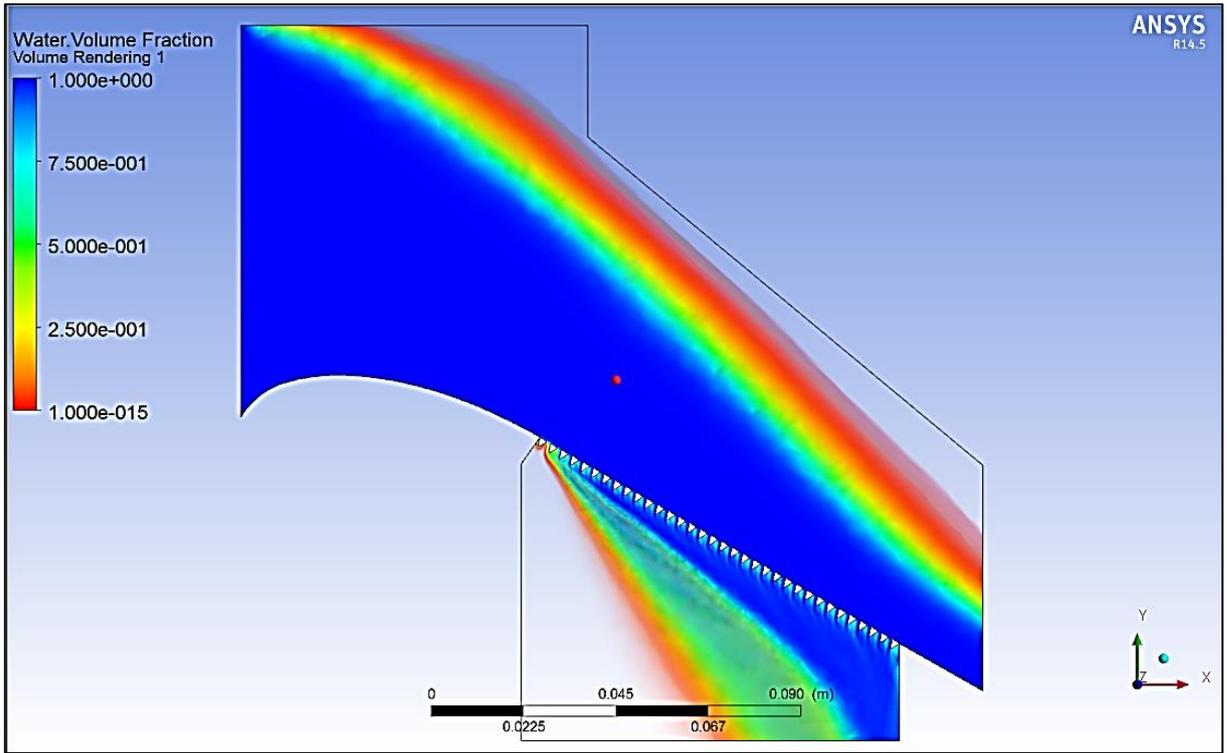


Figura 0.11: Fracción de volumen de agua de la simulación 3.

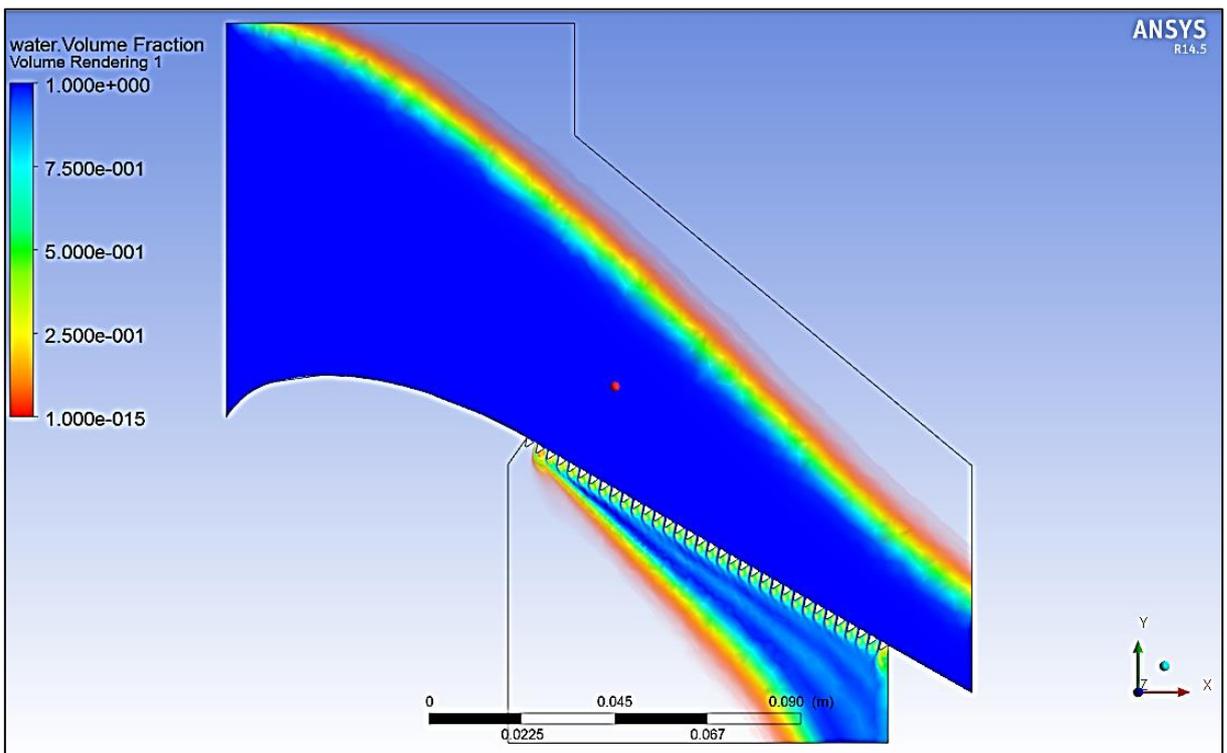


Figura 0.12: Fracción de volumen de agua de la simulación unitaria (SU).

---

Es claro que por el mallado pobre de la primera simulación afecta los resultados del problema, en esta última figura se observa claramente como no se puede diferenciar el efecto Coanda y de corte que producen los alambres; a diferencia del mallado más refinado de la simulación 3 y unitaria donde sí se puede observar este efecto.

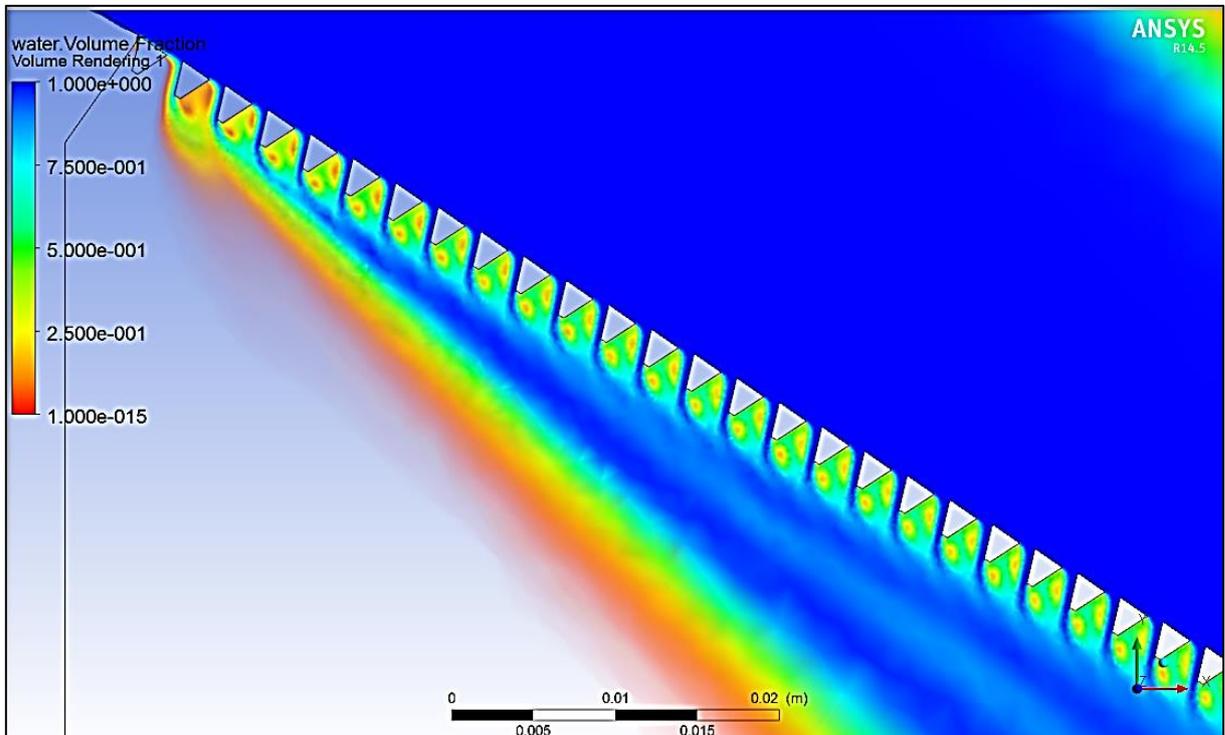


Figura 0.13: Fracción de volumen de agua al principio de la rejilla

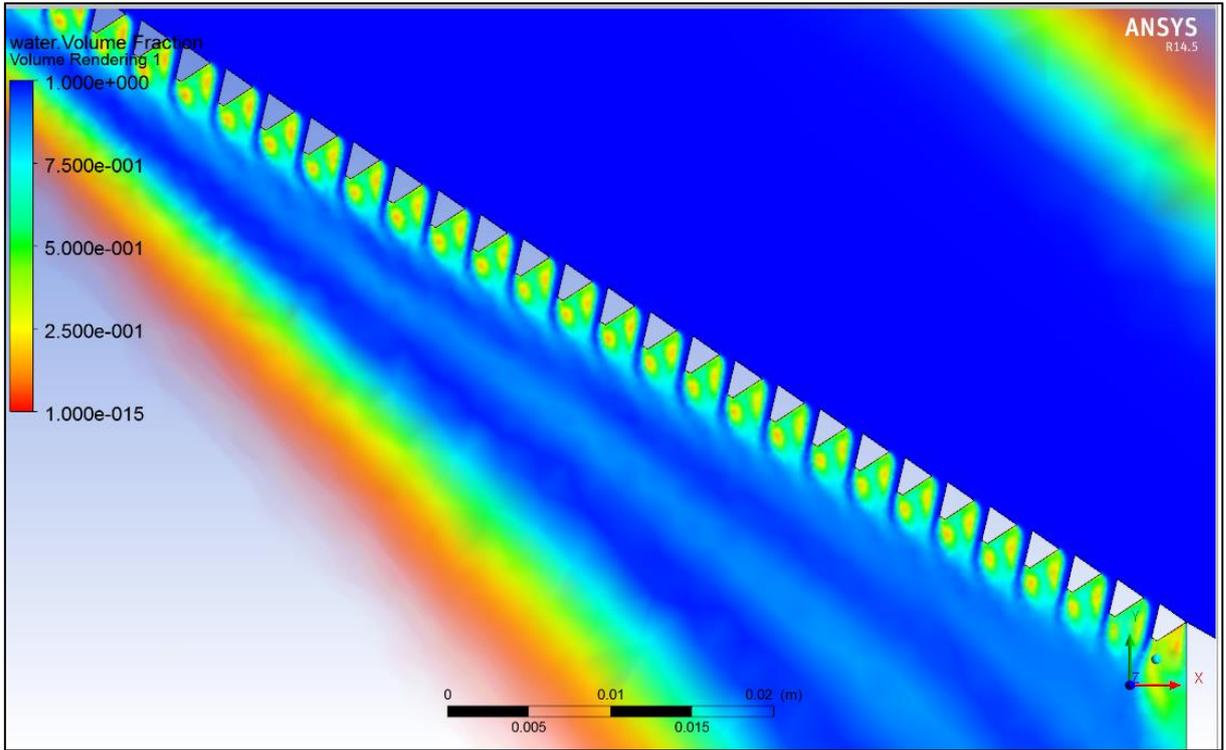


Figura 0.14: Fracción de volumen de agua al final de la rejilla

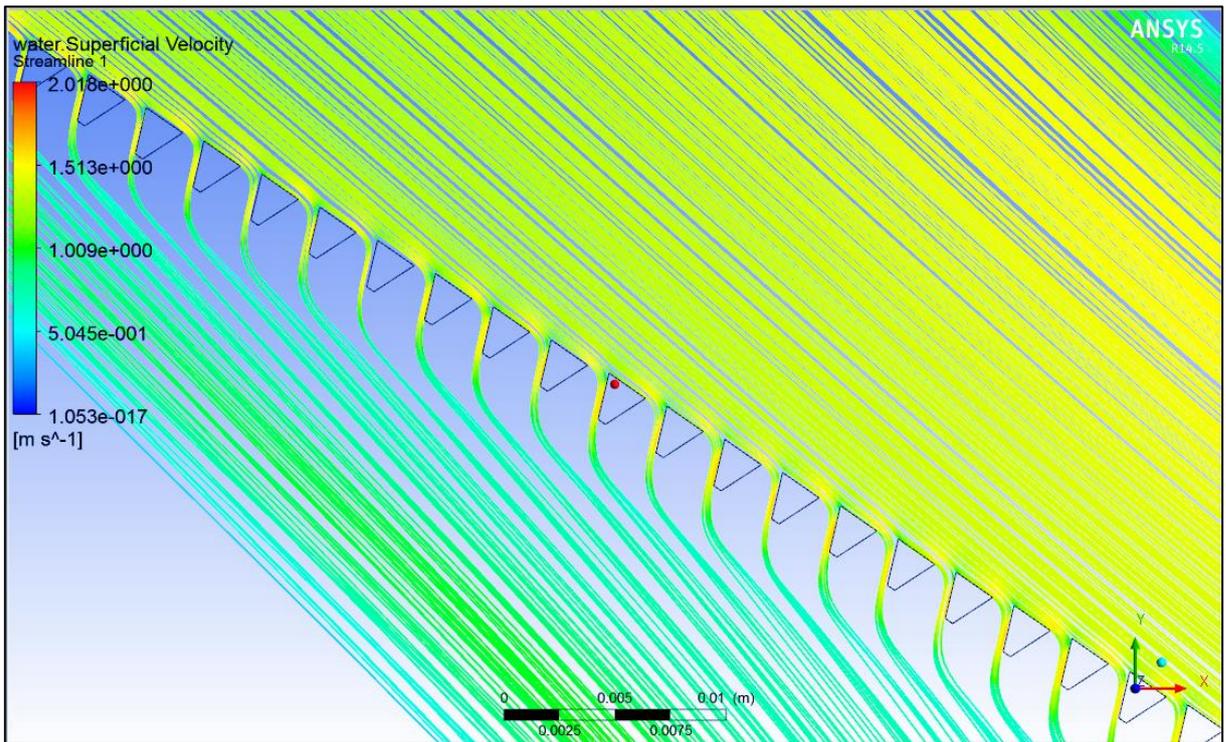


Figura 0.15: Disposición de las líneas de corriente en la rejilla de la captación.

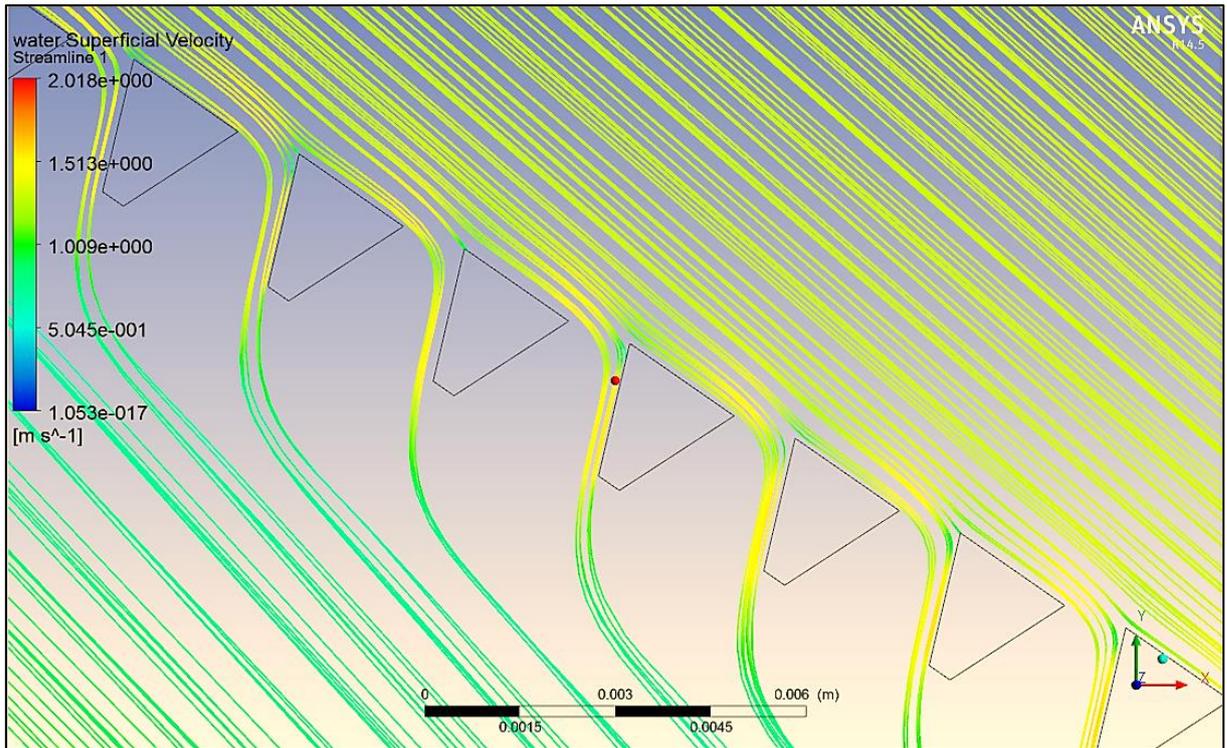


Figura 0.16: Efecto de corte en las líneas de corriente producido por los alambres de la rejilla.