

Elaboración de una Metodología para el Diseño y Modelado Hidrodinámico de  
Desarenadores empleando Herramientas CFD. (Computational Fluid Dynamics)

María Fernanda Jiménez Mozo

Universidad de Boyacá  
Facultad de Ciencias e Ingeniería  
Ingeniería Sanitaria  
Tunja  
2022

Elaboración de una Metodología para el Diseño y Modelado Hidrodinámico de Desarenadores  
empleando Herramientas CFD. (Computational Fluid Dynamics)

María Fernanda Jiménez Mozo

Trabajo de Grado para optar al título de  
Ingeniera Sanitaria

Director

MSc. Jaime Díaz Gómez

Ingeniero Sanitario

Codirector

Sergio David Torres Piraquive

Ingeniero Ambiental y Sanitario

Universidad de Boyacá

Facultad de Ciencias e Ingeniería

Ingeniería Sanitaria

Tunja

2022

**Nota de Aceptacion:**

---

---

---

---

---

---

---

**Firma Presidente de Jurados**

---

**Firma de Jurado**

---

**Firma de Jurado**

“Únicamente el Graduando es responsable de las ideas expuestas en el presente trabajo”.  
(Universidad de Boyacá. Acuerdo 958 del 30 de marzo de 2017, Artículo décimo primero).

Este trabajo va dedicado a mi madre, a mi padre y a mi hermano por ser los principales impulsores de mis sueños, por confiar y creer en mis expectativas, por el apoyo brindado, sus consejos, esfuerzo y dedicación puestas en el transcurso de mi formación profesional para que este logro fuera hoy posible y ver las metas que algún día me planteo cumplidas.

A Dios, por permitirme culminar satisfactoriamente la carrera de Ingeniería Sanitaria, por los conocimientos y experiencias adquiridos en el transcurso de esta y por otorgarme la sabiduría y fortaleza necesaria para alcanzar este objetivo.

A mis amigas, quienes me brindaron su ayuda de forma desinteresada y aportaron a mi vida no solo profesionalmente sino también personalmente, en especial a Yury Alejandra quien fue mi apoyo incondicional e impulso durante gran parte de la carrera.

### **Agradecimientos**

Agradezco a la Universidad de Boyacá, a toda la facultad de Ciencias e Ingeniería, a gran parte de mis profesores quienes me brindaron valiosos conocimientos e hicieron crecer día a día como profesional, gracias por su paciencia y dedicación.

Finalmente, agradezco a mis asesores de trabajo de grado, el Ingeniero Jaime Díaz Gómez, quien con su apoyo incondicional y vocación a la docencia me forjó como persona íntegra, respetuosa y con amor a la labor. Al el Ingeniero Sergio David Torres Piraquive principal colaborador durante todo este proceso y quien, con su dirección, conocimiento, enseñanza y colaboración permitió el desarrollo de este proyecto, forjando en mí un espíritu investigativo y aportando un nivel de conocimiento complementario al adquirido en el transcurso de la carrera.

## Contenido

	Pàg.
Introducción.....	18
1. Planteamiento del Problema.....	20
2. Objetivos.....	21
2.1. General.....	21
2.2. Específicos.....	21
3. Metodología.....	22
3.1. Elaboración de una guía metodológica para el diseño de las estructuras hidráulicas.....	22
3.2. Elaboración de las estructuras hidráulicas en un software tipo CAD (Computer Aided Design).....	23
3.3. Modelación hidrodinámica de las estructuras hidráulicas en una herramienta CFD. ....	23
4. Descripción de las herramientas y metodologías de diseño .....	24
4.1. Metodología de López Cualla para dimensionamiento de desarenadores.....	24
4.1.1. Especificaciones de diseño. ....	24
4.1.1.1. Relación longitud a ancho. ....	24
4.1.1.2. Profundidades mínima y máxima. ....	24
4.1.1.3. Profundidad de almacenamiento de lodos y pendientes de la placa de fondo. ....	24
4.1.1.4. Período de retención hidráulico.....	24
4.1.1.5. Carga hidráulica superficial.....	24
4.1.2. Teoría de la sedimentación.....	25
4.2. Medidores de Régimen Critico – Medidores Parshall, Azevedo & Acosta .....	31
4.2.1. Dimensiones. ....	31
4.2.2. Condiciones de descarga. ....	33
4.2.3. Selección del tamaño. ....	34
4.2.4. Formulas y tablas.....	35
4.3. Autodesk – AutoCAD .....	36

4.3.1.	Interfaz del programa.....	37
4.3.2.	Unidades. ....	38
4.3.3.	Acotar. ....	38
4.3.4.	Comando “CONVASUPERF”. ....	39
4.3.5.	Comando “_SUBTRACT”. ....	39
4.3.6.	Formato de archivos IGES. ....	40
4.3.6.1.	Exportación de archivos IGES. ....	40
4.4.	Herramienta CFD .....	41
4.4.1.	Pre – procesamiento.....	41
4.4.2.	Solucionador.....	42
4.4.3.	Post – procesamiento.....	42
4.4.4.	ANSYS FLUENT.....	43
4.4.4.1.	Ecuación de conservación de masa. ....	44
4.4.4.2.	Ecuaciones de conservación del momento. ....	44
4.4.4.3.	Ecuaciones de conservación de la energía.....	45
4.4.4.4.	Ecuación de fracción de volumen.....	46
4.4.4.5.	Modelo VOF.....	47
4.4.4.5.1.	cálculos de VOF de estado estacionario y transitorio.....	47
4.4.4.6.	Modelo de turbulencia. ....	48
4.4.4.7.	Viscosidad. ....	50
4.4.4.8.	Métodos de solución.....	50
4.4.4.8.1.	acoplamiento de presión - velocidad. ....	50
4.4.4.8.1.1.	algoritmo SIMPLE. ....	51
4.4.4.8.2.	gradiente. ....	52
4.4.4.8.2.1.	evaluación de gradiente Least Squares Cell-Based.....	52
4.4.4.8.3.	presión.....	54
4.4.4.8.3.1.	PRESTO!.....	54
4.4.4.8.4.	momentum. ....	54
4.4.4.9.	Técnicas gráficas utilizadas en CFD. ....	55
4.4.4.9.1.	gráficos de contorno. ....	55
4.4.4.9.2.	graficas XY de datos de solución .....	55

4.4.4.10. Mallado.....	56
5. Aplicación al caso de estudio .....	59
6. Guía metodológica.....	64
6.1. Predimensionamientos.....	64
6.1.1. Desarenador.....	64
6.1.2. Canaleta parshall.....	76
6.2. Diseño en AutoCAD.....	83
6.3. Simulación en ANSYS FLUENT.....	87
7. Conclusiones.....	97
Referencias .....	98
Anexos .....	102

### Lista de Figuras

	Pàg.
Figura 1. Flujo grama de la estructura metodológica .....	22
Figura 2. Trayectoria de partículas en el sedimentador.....	27
Figura 3. Dimensiones del medidor Parshall .....	31
Figura 4. Partes del medidor Parshall .....	33
Figura 5. Interfaz del programa AutoCAD .....	37
Figura 6. Cuadro de unidades en AutoCAD .....	38
Figura 7. Ejemplo comando "CONVASUPERF" de AutoCAD .....	39
Figura 8. Ejemplo comando "SUBTRACT" de AutoCAD .....	40
Figura 9. Notificación de exportación a archivo IGES .....	41
Figura 10. Flujo laminar, transitorio y turbulento .....	49
Figura 11. Evaluación del centroide de la celda .....	53
Figura 12. El cuadro de diálogo Gráfico de solución XY .....	56
Figura 13. Relación de aspecto y expansión de la celda .....	57
Figura 14. Formas de elementos disponibles en Ansys Meshing .....	58
Figura 15. Localización del municipio de Paipa .....	59
Figura 16. Proyección de Población Municipio de Paipa 2005-2020 .....	60
Figura 17. Distribución geopolítica del Municipio de Paipa Área Rural .....	61
Figura 18. Distribución geopolítica del Municipio de Paipa Área Urbana .....	62
Figura 19. Hoja de cálculo, condiciones de diseño, apartado "Desarenador" .....	73
Figura 20. Hoja de cálculo, cálculo de dimensiones, apartado "Desarenador" .....	74
Figura 21. Hoja de cálculo, cálculo de cotas, apartado "Desarenador" .....	75
Figura 22. Hoja de cálculo, cuadro resumen de dimensiones, apartado "Desarenador".....	75
Figura 23. Hoja de cálculo, apartado "Desarenador" .....	76
Figura 24. Hoja de cálculo, condiciones de entrada, apartado "Canaleta Parshall".....	81
Figura 25. Hoja de cálculo, cálculo de dimensiones, apartado "Canaleta Parshall" .....	81
Figura 26. Hoja de cálculo, requisitos y cuadro resumen de dimensiones, apartado "Canaleta Parshall" .....	82
Figura 27. Hoja de cálculo, apartado "Canaleta Parshall" .....	82

Figura 28. Pasos en la fase de “diseño en AutoCAD” .....	84
Figura 29. Corte longitudinal A-A de las estructuras hidráulicas .....	85
Figura 30. Vista en planta de las estructuras hidráulicas .....	85
Figura 31. Corte longitudinal B-B de las estructuras hidráulicas .....	86
Figura 32. Detalle Vertedero de salida y Canaleta (corte) .....	86
Figura 33. Detalle Cámara de quietamiento (corte) .....	87
Figura 34. Pasos para la simulación CFD de las estructuras hidráulicas .....	88
Figura 35. Velocidad horizontal en el desarenador .....	89
Figura 36. Velocidad en el la cresta del vertedero de salida .....	90
Figura 37. Velocidad antes del resalto en la canaleta .....	91
Figura 38. Velocidad en el resalto de la canaleta .....	92
Figura 39. Velocidad en la sección de salida de la canaleta .....	93
Figura 40. Presión dinámica en el desarenador .....	94
Figura 41. Presión dinámica en la canaleta .....	94
Figura 42. Presión estática en la canaleta .....	94
Figura 43. Presión estática en el desarenador .....	95
Figura 44. Líneas de flujo de las estructuras hidráulicas diseñadas en la etapa de llenado .....	95
Figura 45. Líneas de flujo de las estructuras hidráulicas diseñadas en estado estacionario .....	96
Figura 46. Llenado de las estructuras hidráulicas diseñadas .....	96

**Lista de Tablas**

	Pàg.
Tabla 1. Viscosidad cinemática del agua según la temperatura. ....	26
Tabla 2. Numero de Hazen ( $V_s/V_o$ ). ....	30
Tabla 3. Dimensiones típicas de medidores Parshall (cm). ....	32
Tabla 4. Límites de aplicación Medidores Parshall. ....	35
Tabla 5. Valores de los exponentes n y del coeficiente k. ....	36
Tabla 6. Tipos de flujo según el número de Reynolds. ....	49
Tabla 7. Proyección de Población Municipio de Paipa 2005 – 2020. ....	80
Tabla 8. Datos para diseño de estructuras hidráulicas. ....	60
Tabla 9. Valores de $\gamma/\mu$ . ....	63

**Anexos**

	Pàg.
Anexo A. Anteproyecto. ....	103
Anexo B. Hoja de cálculo en Excel de la fase de predimensionamiento. (Adjunto CD ROM)	
Anexo C. Plano de las estructuras hidráulicas diseñadas en formato pdf. (Adjunto CD ROM)	
Anexo D. Archivo en formato IGES de las estructuras hidráulicas diseñadas. (Adjunto CD ROM)	
Anexo E. Ejecutable Simulación CFD de las estructuras hidráulicas. (Adjunto CD ROM)	

## Glosario

**ANSYS FLUENT:** ANSYS FLUENT es un software de simulación fluido para análisis de CFD con preprocesamiento rápido y tiempos de resolución más rápidos.

**AutoCAD:** AutoCAD es un software de diseño asistido por computadora (CAD) que se utiliza para dibujar, diseñar y modelar en 2D y 3D de forma precisa.

**Cámara de quietamiento:** Es aquella estructura que permite mejorar las condiciones hidráulicas, logrando reducir velocidades del flujo de entrada, además permite un aforo inicial de caudal

**Canaleta Parshall:** La canaleta Parshall es una estructura hidráulica utilizada comúnmente para la medición del caudal en canales abiertos y para la mezcla rápida de sustancias.

**Caudal Máximo Diario (QMD):** Consumo máximo durante veinticuatro horas, observado en un período de un año, sin tener en cuenta las demandas contra incendio que se hayan presentado.

**CFD:** La CFD se define como la técnica informática que busca la simulación del movimiento de los fluidos.

**Desarenador:** Un desarenador convencional es un tanque construido con el propósito de sedimentar partículas en suspensión por la acción de la gravedad. Este elemento constituye un tratamiento primario.

**Estructura hidráulica:** estructuras artificiales que sirven para desviar, restringir, detener o controlar de alguna otra forma el flujo natural del agua.

**Hidrodinámica:** Estudia el comportamiento del movimiento de los fluidos, se fundamenta principalmente en los fluidos incompresibles es decir los líquidos.

***Mallado:*** Una malla generada numéricamente es pensada como el conjunto organizado de puntos formados por las intersecciones de las líneas de un sistema de coordenadas.

***Peso específico:*** El peso específico es la relación existente entre el peso y el volumen que ocupa una sustancia en el espacio.

***Vertedero hidráulico:*** es el nombre de una estructura hidráulica cuya finalidad es la de permitir que pase el agua a los escurrimientos superficiales.

***Viscosidad ( $\mu$ ):*** La viscosidad se refiere a la resistencia que poseen algunos líquidos durante su fluidez y deformación.

## Resumen

Jiménez Mozo, María Fernanda

Elaboración de una Metodología para el Diseño y Modelado Hidrodinámico de Desarenadores empleando Herramientas CFD. (Computational Fluid Dynamics). / María Fernanda Jiménez Mozo. - - Tunja : Universidad de Boyacá, Facultad de Ciencias e Ingeniería, 2022.

131 h. : il., + 1 CD ROM. - - (Trabajos de Grado UB, Ingeniería Sanitaria; n°. )

Trabajos de Grado (Ingeniería Sanitaria). - - Universidad de Boyacá, 2022

El estudio se enfocó en el predimensionamiento de un desarenador y una canaleta Parshall, por medio de la metodología expuesta por López Cualla y Azevedo & Acosta, correspondientemente. Conjunto a esta fase se diseñó una hoja de cálculo en Excel, la cual, por medio de datos ingresados calcula los valores de las variables y dimensiones de las estructuras mencionadas, facilitando en alto porcentaje esta fase.

Seguido de la fase de predimensionamiento se diseñan las estructuras hidráulicas en AutoCAD, obteniendo los cortes y vista de estas, además de un archivo en formato IGES, implementado posteriormente en la fase de simulación.

Por último, se realiza una simulación CFD de las estructuras, con ayuda del software ANSYS FLUENT y el archivo de diseño en formato IGES aludido anteriormente.

Adicionalmente, se realizó una guía metodológica, mostrando la secuencia de pasos a seguir en cada una de las fases del proyecto, facilitando la comprensión del procedimiento por parte del lector.

Palabras clave: Desarenador, Canaleta Parshall, Predimensionamiento, Modelación, CFD.

### Abstract

Jiménez Mozo, María Fernanda.

Elaboration of a Methodology for the Design and Hydrodynamic Modeling of Desanders using CFD Tools (Computational Fluid Dynamics) / María Fernanda Jiménez Mozo. - Tunja: University of Boyacá, Faculty of Science and Engineering, 2022.

131 h. : illus., + 1 CD ROM. - (Undergraduate Works UB, Sanitary Engineering; no. ).

Degree Works (Sanitary Engineering). - University of Boyacá, 2022

The study focused on the pre-dimensioning of a sand trap and a Parshall flume, using the methodology presented by López Cualla and Azevedo & Acosta, correspondingly. In conjunction with this phase, an Excel spreadsheet was designed, which calculates the values of the variables and dimensions of the aforementioned structures by means of entered data, thus facilitating this phase to a great extent.

Following the pre-dimensioning phase, the hydraulic structures are designed in AutoCAD, obtaining the cuts and views of these, in addition to a file in IGES format, later implemented in the simulation phase.

Finally, a CFD simulation of the structures is carried out with the help of ANSYS FLUENT software and the design file in IGES format mentioned above.

Additionally, a methodological guide was prepared, showing the sequence of steps to be followed in each of the project phases, facilitating the reader's understanding of the procedure.

Key words: Desander, Parshall flume, Pre-sizing, Modeling, CFD.

## Introducción

La dinámica de fluidos computacional (CFD) es uno de los campos de las ciencias aplicadas que está emergiendo rápidamente. Cuando los ordenadores no estaban suficientemente maduros para resolver grandes problemas numéricos, se utilizaban dos métodos para resolver problemas de dinámica de fluidos: el analítico y el experimental. Los métodos analíticos se limitaban a casos simplificados, como la resolución de geometrías unidimensionales. Sin embargo, los métodos experimentales exigían muchos recursos, como electricidad, equipos costosos, control de datos y posprocesamiento de los mismos. A veces, para los trabajos de análisis de ingeniería, no está dentro del presupuesto de una organización pequeña establecer una instalación de este tipo. Sin embargo, con la llegada de los modernos ordenadores y superordenadores, la vida se ha vuelto mucho más fácil. Con el paso del tiempo, los métodos numéricos han madurado y ahora se utilizan para resolver problemas complejos de dinámica de fluidos en poco tiempo. (Jamshed, 2015).

La simulación en CFD es una herramienta de gran importancia, que permite comprender fenómenos, implementar y analizar mejoras y realizar pruebas de diferentes estructuras sin la necesidad de hacer experimentos con modelos físicos o estructuras reales. Los modelos en CFD resuelven las ecuaciones que describen el movimiento de los fluidos en un sistema (Ecuaciones de Navier-Stokes) junto con las ecuaciones de conservación de energía y de masa. (Blazek, 2001).

La implementación de procesos de tratamiento de agua potable es fundamental para la sociedad, asegurando la calidad del agua suministrada y la salud de los consumidores. Ante las crecientes necesidades de innovación en los procesos de tratamiento de agua y la constante investigación en el tema, resulta fundamental tener la posibilidad de predecir los resultados que va a tener una estructura hidráulica al momento de su implementación. (Betancourt, 2015). La Mecánica de Fluidos Computacional (CFD, por sus siglas en inglés – Computational Fluid Dynamics) es una herramienta adecuada, ya que permite obtener resultados preliminares a partir de simulaciones en computador; puede utilizarse para una amplia gama de problemas de flujo de fluidos, diseño y optimización de estructuras hidráulicas, comprendiendo los fenómenos que ocurren en el interior de las mismas. (Naess, 2020) En este trabajo se utilizará la CFD para

soportar, analizar y validar las características de un desarenador seguido de una canaleta parshall, no evidenciadas bajo los lineamientos teóricos en la fase de predimensionamiento.

## 1. Planteamiento del Problema

Existen numerosas aplicaciones de la CFD en diversos campos, como los procesos industriales, la aerodinámica de vehículos o la ingeniería. Dado que el diseño de estructuras hidráulicas, se basa tradicionalmente en modelos físicos de laboratorio, el uso de modelos numéricos en este ámbito se ha abordado con recelo durante mucho tiempo. Aunque los fundamentos teóricos de la mecánica de fluidos se obtuvieron hace mucho tiempo, comenzando con las leyes de flotabilidad como primera contribución teórica conocida en la mecánica de fluidos, postulada por Arquímedes (285-212 a.C.), las técnicas CFD se han utilizado ampliamente en el diseño de estructuras hidráulicas desde principios del siglo XXI. (Aydin, 2015).

El uso de la CFD tiene muchas ventajas. Por ejemplo, las simulaciones CFD son relativamente más baratas, más rápidas y más flexibles que los experimentos y pruebas físicas. En tal caso se contempla como problemática a resolver para el proyecto en curso el hecho de que algunos resultados específicos no pueden ser observados mediante la parte experimental, pero si por medio del uso de análisis CFD. Las soluciones CFD proporcionan la capacidad de simular teóricamente cualquier condición física. De tal forma, se puede afirmar que, si las simulaciones CFD se utilizan correctamente, pueden ser una buena opción para el diseño, análisis y validación de estructuras hidráulicas. (Aydin, 2015).

En el caso específico del modelado de un desarenador con una herramienta CFD, es preciso contemplar la importancia de la relación entre los cambios del lecho y la estructura hidráulica, además del cambio de geometría y el campo de flujo, al momento de deposición de los sedimentos, comprobando hasta qué punto el modelo CFD podría predecir los cambios de lecho en un desarenador. (Olsen, 2001). Cabe resaltar que las soluciones CFD deben ser verificadas y calibradas con modelos físicos reales o prototipos. Así, la precisión de las soluciones CFD puede basarse en los resultados de los modelos físicos. (Aydin, 2015).

## **2. Objetivos**

### **2.1. General**

Elaborar una guía metodológica con su respectiva interfaz gráfica y modelado hidrodinámico de un desarenador empleando herramientas CFD.

### **2.2. Específicos**

Desarrollar una interfaz gráfica en ambiente tipo Excel para efectuar el predimensionamiento de un desarenador seguido de una canaleta Parshall.

Diseñar la estructura hidráulica (desarenador+canaleta Parshall), en un software tipo CAD (Computer Aided Design).

Modelar hidrodinámicamente las estructuras hidráulicas haciendo uso del software ANSYS FLUENT como herramienta CFD.

### 3. Metodología

La presente investigación, comprende como estructura metodológica la implementación de diversas fases comprendidas cronológicamente y expuestas a continuación en el diagrama de flujo presentado como Figura 1.

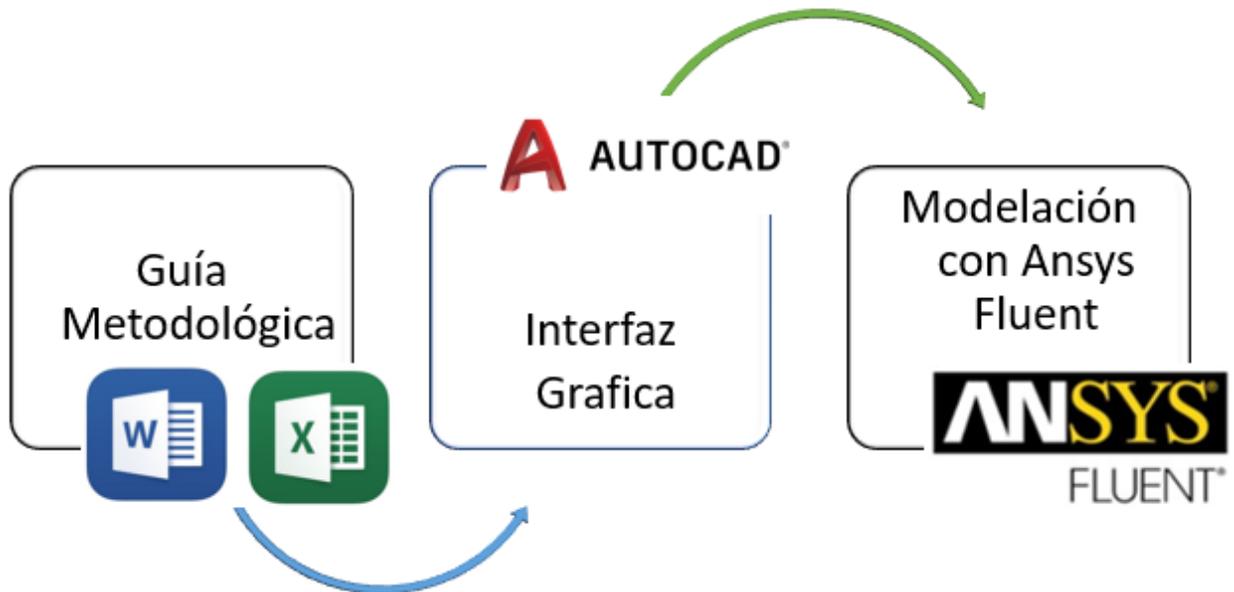


Figura 1. Flujo grama de la estructura metodológica, elaborado por autor.

#### 3.1. Elaboración de una Guía Metodológica para el Diseño de las Estructuras Hidráulicas

En esta fase se realizará una guía metodológica que contenga el paso a paso del diseño de un desarenador y una canaleta Parshall empleando las metodologías previstas en los libros titulados “Elementos de diseño para acueductos y alcantarillados” de López Cualla y Azevedo & Acosta. Adicionalmente, se elaborará una interfaz gráfica en Excel la cual contará con diversas alternativas para el diseño automatizado de las estructuras, a fin de hacer más dinámica la interacción con el usuario y de esta manera poder ejecutar los predimensionamientos.

### **3.2. Elaboración de las Estructuras Hidráulicas en un Software Tipo CAD (Computer Aided Design)**

En esta fase se llevará a cabo la elaboración del diseño bidimensional y posterior exportación hacia la herramienta CFD de las estructuras hidráulicas en un software tipo CAD a la vanguardia y con altos estándares de calidad, teniendo en cuenta los valores obtenidos en la fase anterior.

### **3.3. Modelación Hidrodinámica de las Estructuras Hidráulicas en una Herramienta CFD**

En esta fase se llevará a cabo la modelación CFD de las estructuras teniendo en cuenta el predimensionamiento anterior. La modelación será sometida a una condición de caudal de diseño, con la cual será posible observar el funcionamiento hidrodinámico de estas, la forma de transporte del flujo y algunas características como las condiciones de contorno y los vectores de desplazamiento. Cabe resaltar que no se podrá validar teóricamente los resultados, puesto que no se tienen datos empíricos de las estructuras; sin embargo, esto podría ser objeto de estudio en posteriores investigaciones.

#### 4. Descripción de las Herramientas y Metodologías de Diseño

##### 4.1. Metodología de López Cualla para Dimensionamiento de Desarenadores

###### 4.1.1. Especificaciones de diseño.

**4.1.1.1. Relación longitud a ancho.** Con el fin de aproximarse lo más posible al flujo en pistón, se recomienda un tanque rectangular con una relación de longitud a ancho (L/B) entre 3/1 v 5/1.

**4.1.1.2. Profundidades mínima y máxima.** La profundidad mínima especificada es de 1,50 m y la máxima, de 4,50 m.

**4.1.1.3. Profundidad de almacenamiento de lodos y pendientes de la placa de fondo.** Se recomienda una relación longitud a profundidad de almacenamiento de lodos de aproximadamente 10/1. La profundidad de lodos típica está comprendida entre 0.75 m y 1.50 m y llega a un máximo del 100% del valor de la profundidad útil de sedimentación. Las pendientes de fondo deben estar comprendidas entre 5 y 8%. con el fin de que los lodos rueden fácilmente hacia la tubería de desagüe y la labor de limpieza manual sea segura para los operarios.

**4.1.1.4. Período de retención hidráulico.** El tiempo que tarde una partícula de agua en entrar y salir del tanque debe fluctuar entre 30 minutos y cuatro horas. Al final del horizonte de diseño, el período de retención hidráulico debe tender a ser corto, mientras que al comienzo del período éste tiende a ser largo.

**4.1.1.5. Carga hidráulica superficial.** Esta carga, definida como el caudal puesto por unidad de área superficial, debe estar entre 15 y 80 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>-d. Al final del periodo de diseño, la carga hidráulica superficial será alta y al comienzo tenderá al límite inferior.

#### 4.1.2. Teoría de la sedimentación.

Esta teoría fue desarrollada por Hazen y Stokes. Su modelo de sedimentación de partículas se resume en la siguiente ecuación, de donde se concluye que la velocidad de sedimentación de una partícula es directamente proporcional al cuadrado del diámetro de ésta.

$$V_s = \frac{g}{18} * \frac{(\rho_s - \rho)}{\mu} * d^2 = K * d^2$$

en dónde.  $V$  = velocidad de sedimentación de la partícula (cm/s)

$g$  = aceleración de la gravedad (981 cm/s<sup>2</sup>)

$\rho_s$  = peso específico de la partícula (arenas = 2.65)

$\rho$  = peso específico del fluido (agua = 1)

$\mu$  = Viscosidad cinemática del fluido (cm<sup>2</sup>/s)

Tabla 1

*Viscosidad cinemática del agua según la temperatura.*

Temperatura (°C)	Viscosidad cinemática (cm <sup>2</sup> /s)	Temperatura (°C)	Viscosidad cinemática (cm <sup>2</sup> /s)
0	0.001792	19	0.001028
1	0.001731	20	0.001003
2	0.001674	21	0.000979
3	0.001620	22	0.000955
4	0.001569	23	0.000933
5	0.00152	24	0.000911
6	0.001473	25	0.000891
7	0.001429	26	0.000871
8	0.001386	27	0.000852
9	0.001346	28	0.000833
10	0.001308	29	0.000815
11	0.001271	30	0.000798
12	0.001236	31	0.000781
13	0.001202	32	0.000765
14	0.00117	33	0.000749
15	0.001139	34	0.000734
16	0.001109	35	0.00072
17	0.001081	36	0.000705
18	0.001054	37	0.000692

Fuente: Vaxasoftware. (2010). *Viscosidad dinámica del agua líquida a varias temperaturas*. Recuperado de [http://www.vaxasoftware.com/doc\\_edu/qui/viscoh2o.pdf](http://www.vaxasoftware.com/doc_edu/qui/viscoh2o.pdf)

En el estudio de sedimentación se hacen las siguientes suposiciones teóricas:

- El flujo se reparte uniformemente a través de la sección transversal (W).
- El agua se desplaza con velocidad uniforme a lo largo del tanque.
- Toda partícula que toque el fondo antes de llegar a la salida será removida.

Adicionalmente, se desarrolla el estudio suponiendo que se ha de remover una partícula cuyo diámetro es  $d$ ; para ello se analizará la trayectoria de dicha partícula a lo largo del tanque.

Como se observa en la figura 2, la partícula de diámetro  $d$  más crítica es aquella que entra por la parte superior del tanque, debido a que tendrá que recorrer una altura,  $H$ , y una longitud,  $L$ , más desfavorable antes de ser removida. Esta trayectoria crítica se indica en la figura 2

(trayectoria 1). Dicha partícula tiene un componente de velocidad horizontal,  $V_h$ , y velocidad vertical,  $V_o$ , haciendo su recorrido en un tiempo,  $t$ .

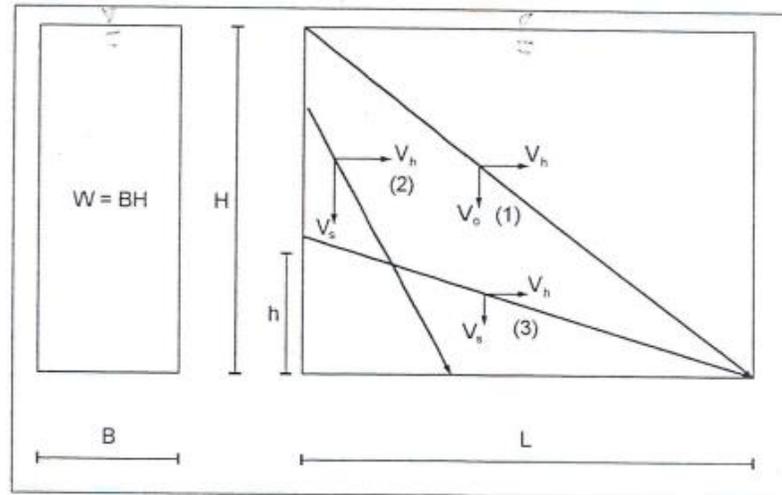


Figura 2. Trayectoria de partículas en el sedimentador, tomada de Cualla, L. (1995). *Elementos de diseño para acueductos y alcantarillados. (2ª ed)*. Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería.

En primer lugar, se removerán todas las partículas con igual componente de velocidad vertical,  $V_h$ , sin importar su punto de entrada. Igualmente, se removerán todas las partículas con velocidad de sedimentación,  $V_s$ , mayor que  $V_o$ . Las partículas con  $V_s$ , menor que  $V_o$  podrán removerse dependiendo de su nivel de entrada al tanque,  $h$ .

Por semejanza de triángulos, se tiene

$$\frac{L}{V_h} = \frac{H}{V_o} \rightarrow \frac{L * W}{V_h * W} = \frac{H}{V_o} \rightarrow \frac{V}{Q} = \frac{H}{V_o}$$

siendo  $V$  = volumen del tanque y  $Q$  = caudal. La velocidad de la partícula crítica,  $V_o$ , será:

$$V_o = \frac{H * Q}{V} \rightarrow V_o = \frac{Q}{As}$$

siendo  $A$  = área superficial =  $B * L$

Según la ecuación de Stokes:

$$V_o = \frac{g}{18} * \frac{(\rho_s - \rho)}{\mu} * d^2 = K * d^2$$

Remplazando la velocidad de la partícula crítica en la ecuación de Stokes, se tiene:

$$V_o = K * d^2 = \frac{Q}{A} \longrightarrow d = \sqrt{\frac{Q}{K * A}}$$

Al analizar la ecuación se encuentra que, para un caudal dado, el diámetro de la partícula que ha de removerse es función del área superficial del tanque.

La remoción de partículas es también función de la profundidad del tanque, ya que si ésta se disminuye se retendrá la partícula con diámetro  $d$  en un tiempo menor, lo que equivale a decir que se retendrá un número mayor de partículas con  $V_s$ , menor que  $V_o$ .

La relación  $Q/A$  se denomina “carga hidráulica superficial ( $q$ )” y es igual a la velocidad de sedimentación de la partícula crítica,  $V_o$ .

Por otra parte, la relación  $V/Q$  es llamada “período de retención hidráulico”, y  $H/V_o$  es el tiempo que tarda la partícula crítica en ser removida ( $t$ ). En teoría, para remover esta partícula se debe cumplir que:

$$\frac{V}{\frac{Q}{H}} = 1$$

En la realidad, el flujo no se distribuye uniformemente debido a la limitación de las pantallas difusoras, a que las velocidades no son constantes porque existen corrientes térmicas y zonas muertas, a que el viento crea contracorrientes en la superficie y, finalmente, a que existe la resuspensión de partículas que han llegado al fondo. Debido a que no se cumplen las

suposiciones iniciales del desarrollo de la teoría, habrá partículas removidas con  $V_s$  menores que  $V_o$ .

Se adopta entonces un factor de seguridad en función de:

1. Porcentaje de remoción de partículas con  $V_s < V_o$ :

$$\% \text{ remociòn} = \frac{N^\circ \text{ de partículas con } V_s < V_o}{N^\circ \text{ de partículas con } V_s \geq V_o} * 100$$

2. Grado del desarenador (n):

La calificación de la eficiencia de las pantallas deflectoras se hace a través del grado (n) del desarenador.

- n = 1 : deflectores deficientes o ausencia de ellos
- n = 2 : deflectores regulares
- n = 3 : deflectores buenos
- n = 5 a 8 : deflectores muy buenos
- n  $\geq \infty$  : caso teórico g

La igualdad anterior queda así:

$$\frac{\theta}{t} = \frac{V}{\frac{Q}{H}} = \frac{V_s * V}{H * Q} = V_s * \frac{A}{Q} = \frac{V_s}{\frac{Q}{A}} = \frac{V_s}{V_o}$$

Siendo:  $V_s$  = velocidad de sedimentación efectiva

$V_o$  = velocidad de sedimentación teórica =  $Q/A$

$\frac{V_s}{V_o}$  = número de Hazen =  $\Theta/t$

El factor  $\Theta/t$  o número de Hazen se determina por medio de la Tabla 2.

Con el fin de operar adecuadamente el desarenador, se hacen las siguientes recomendaciones:

1.  $V_h < 20V_s$
2.  $9 < \frac{V_s}{V_o} < 15$
3. La velocidad horizontal debe ser menor que la velocidad de arrastre de las partículas, con el propósito de evitar la resuspensión del sedimento.

$$V_h < V_r = \sqrt{\frac{8k}{f} * g * (\rho_s - \rho) * d}$$

Para el caso de sedimentación de arenas, el valor de k es igual a 0,04. mientras que para sedimentación por la simple acción de la gravedad (no hay coagulación) el valor de f es igual a 0,03 (todos los demás términos quedan como se definieron en la ecuación de velocidad de sedimentación de una partícula).

Tabla 2  
Numero de Hazen (Vs/Vo).

Condiciones	Remoción (%)							
	87.5	80	75	70	65	60	55	50
n = 1	7	4	3	2.3	1.8	1.5	1.3	1
n = 3	2.75		1.66					0.76
n = 4	2.37		1.52					0.73
Máximo teórico	0.88		0.75					0.5

Fuente: Cualla, L. (1995). *Elementos de diseño para acueductos y alcantarillados*. (2ª ed). Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería.

## 4.2. Medidores de Régimen Crítico – Medidores Parshall, Azevedo & Acosta

### 4.2.1. Dimensiones.

Es un medidor que se incluye entre los de régimen crítico, consiste en una sección convergente, una sección de paredes verticales paralelas llamada garganta y una sección divergente, dispuestas en planta, como muestra la Figura 3.

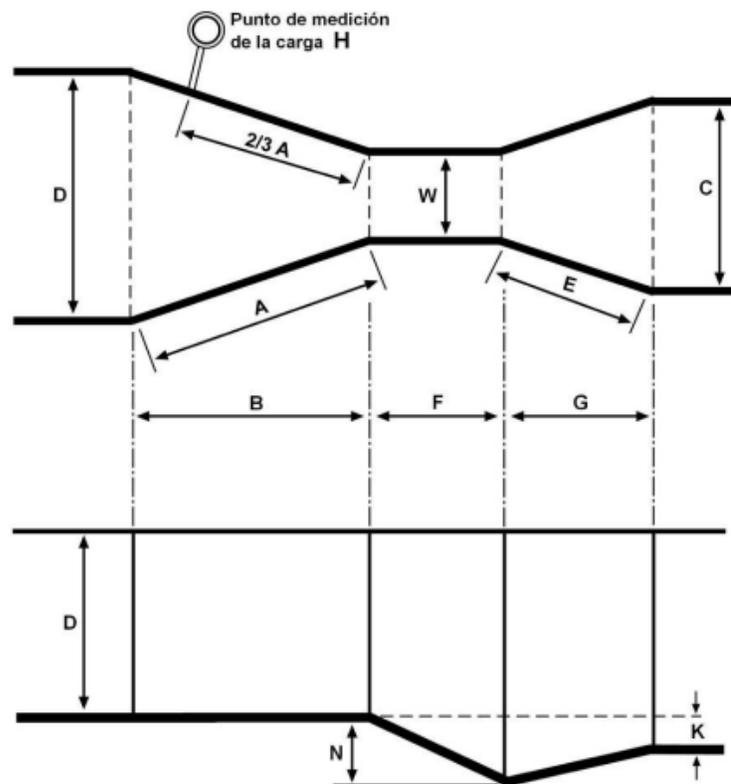


Figura 3. Dimensiones del medidor Parshall, tomado de Azevedo, J., & Acosta, G. (1976). *Manual de Hidráulica*. (1ª ed). Mexico: HARLA S.A.

El fondo a nivel en la primera sección, es inclinado en la garganta con un declive de 9 vertical: 24 horizontal, cualquiera que sea su tamaño.

En la sección divergente, el fondo es ascendente a razón de 1 vertical: 6 horizontal en el caso de los medidores de 1 a 8 pies. Para esos medidores, la diferencia de nivel entre aguas arriba y el extremo aguas abajo es de 3 pulgadas (7,6 cm).

Las dimensiones aproximadas para los medidores Parshall de 1 a 8 pies pueden ser determinadas como siguen.

$$F = 0,610 \text{ m}$$

$$G = 0,915$$

$$B = 0,49W + 1,194 \text{ (m)}$$

$$C = W + 0,305$$

$$D = 1,196W + 0,479$$

La Tabla 3 incluye las dimensiones típicas para los medidores hasta de 10 pies.

Tabla 3

*Dimensiones típicas de medidores Parshall (cm).*

W	Pulgadas	cm	A	B	C	D	E	F	G	K	N
1 "	1	2.5	36.3	35.6	9.3	16.8	22.9	7.6	20.3	1.9	2.9
3 "	3	7.6	46.6	45.7	17.8	25.9	38.1	15.2	30.5	2.5	5.7
6 "	6	15.2	62.1	61	39.4	40.3	45.7	30.5	61	7.6	11.4
9 "	9	22.9	88	86.4	38	57.5	61	30.5	45.7	7.6	11.4
1 '	12	30.5	137.2	134.4	61	84.5	91.5	61	91.5	7.6	22.9
1.5	18	45.7	144.9	142	76.2	102.6	91.5	61	91.5	7.6	22.9
2 '	24	61	152.5	149.6	91.5	120.7	91.5	61	91.5	7.6	22.9
3 '	36	91.5	167.7	164.5	122	157.2	91.5	61	91.5	7.6	22.9
4 '	48	122	183	179.5	152.5	193.8	91.5	61	91.5	7.6	22.9
5 '	60	152.5	198.3	194.1	183	230.3	91.5	61	91.5	7.6	22.9
6 '	72	183	213.5	209	213.5	266.7	91.5	61	91.5	7.6	22.9
7 '	84	213.5	228.8	224	244	303	91.5	61	91.5	7.6	22.9
8 '	96	244	244	239.2	274.5	340	91.5	61	91.5	7.6	22.9
10 '	120	305	274.5	427	366	475.9	122	91.5	183	15.3	34.3

Fuente: Azevedo, J., & Acosta, G. (1976). *Manual de Hidráulica*. (1ª ed). México: HARLA S.A.

#### 4.2.2. Condiciones de descarga.

El flujo a través de un medidor Parshall se puede verificar en dos condiciones diferentes, que corresponden a dos regímenes distintos:

- flujo o descarga libre
- ahogamiento o sumersión.

En el primer caso, la descarga se hace libremente como en los vertedores, en que la vena vertiente es independiente de las condiciones de aguas abajo.

El segundo caso ocurre, cuando el nivel de aguas abajo es suficientemente elevado para influir y retardar el flujo a través del medidor: es el régimen comúnmente señalado como descarga sumergida, de características diferentes de aquellas que se emplean para los vertedores.

El ahogamiento es causado por condiciones de aguas abajo, obstáculos existentes, falta de declive o niveles obligados en tramos o unidades subsecuentes.

En el caso de flujo libre es suficiente medir la carga  $H$  para determinarse el caudal (Figura 4). Si el medidor es ahogado, será necesario medirse también, una segunda carga  $H_2$ , en un punto próximo a la sección final de la garganta (Figura 4).

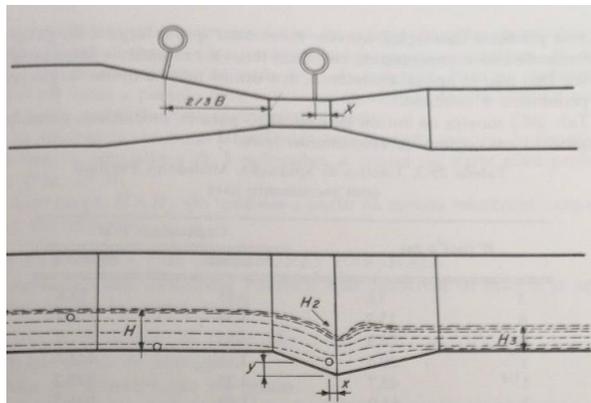


Figura 4. Partes del medidor Parshall, tomado de Azevedo, J., & Acosta, G. (1976). *Manual de Hidráulica*. (1ª ed). México: HARLA S.A.

La relación  $H_2/H$  constituye la razón de sumersión o la sumergencia. Si el valor de  $H_2/H$  es igual o inferior a 0,60 (60%) para los Parshall de 3,6 a 9 pulgadas, o, entonces, igual o inferior a 0,70 (70%) para los medidores de 1 a 8 pies, la descarga será libre. Si estos límites se exceden, habrá alargamiento y el gasto será reducido. Como ya se dijo, será entonces necesario, medir las dos alturas para calcular el caudal. La descarga real será inferior a la obtenida por la formula, siendo indispensable aplicar una corrección negativa. Cuando el Parshall es seguido de un canal o de una unidad de tratamiento en que se conoce el nivel del agua, la verificación del régimen de flujo en el medidor es inmediata, bastando calcular la sumergencia (razón  $H_2/H$ ).

En la práctica, siempre que sea posible se tratará de tener la descarga libre, por el hecho de quedar restringido a una medición de carga única. A veces esa conducción no puede ser conseguida o establecida, debido a circunstancias locales o a limitaciones impuestas. De cualquier manera, mientras tanto, la sumergencia nunca deberá exceder el límite práctico de 95% pues arriba de este valor, no se puede contar con la precisión deseable.

#### **4.2.3. Selección del tamaño.**

Para la fijación de las dimensiones definitivas, se puede partir de un tamaño elegido inicialmente realizándose para el mismo y para otros tamaños próximos, los cálculos y verificaciones por las fórmulas y diagramas.

Como primera indicación, conviene mencionar que el ancho de la garganta ( $W$ ), frecuentemente, está comprendido entre un tercio y la mitad del ancho de los canales existentes. Esto, sin embargo, no se aplica, a los canales con tirantes bajos o a los muy profundos o estrechos.

Si bien las sumergencias límites para el flujo libre sean de 60% para los medidores menores de 1 pie, y de 70% para los mayores se recomiendan como valores prácticos máximos, respectivamente 50% y 60%, dejándose así, un margen para posibles variaciones de caudal, garantizándose un punto único de medición de carga.

Al seleccionar un medidor para condiciones y caudales determinados, se verifica que para los valores menores de  $W$ , corresponden mayores pérdidas de carga, consideradas siempre las sumergencias máximas.

Tabla 4

*Límites de aplicación Medidores Parshall.*

	w cm	Capacidad (L/s)	
		Mínima	Máxima
3"	7.6	0.85	53.8
6"	15.2	1.52	110.4
9"	22.9	2.55	251.9
1'	30.5	3.11	455.6
1 1/2 '	45.7	4.25	696.2
2'	61	11.89	936.7
3'	91.5	17.26	1426.3
4'	122	36.79	1921.5
5'	152.5	62.8	2422
6'	183	74.4	2929
7'	213.5	115.4	3440
8'	244	130.7	3950
10'	305	200	5660

Fuente: Azevedo, J., & Acosta, G. (1976). *Manual de Hidráulica*. (1ª ed). México: HARLA S.A.**4.2.4. Formulas y tablas.**

Los numerosos experimentos y observaciones hechos con medidores Parshall llevaron a resultados que corresponden a expresiones del tipo

$$Q = K * H^n$$

Siendo, sin embargo, los valores de n ligeramente diversos a 3/2.

La Tabla 5 incluye los valores del coeficiente K, tanto para el sistema métrico, como para el sistema inglés de unidades. La misma tabla presenta los valores del exponente n.

Tabla 5

Valores de los exponentes  $n$  y del coeficiente  $k$ .

	W		n	k
	Pulgadas	m		Unidades métricas
3 "	3	0.076	1.547	0.176
6 "	6	0.152	1.58	0.381
9 "	9	0.229	1.53	0.535
1 '	12	0.305	1.522	0.69
1.5	18	0.457	1.538	1.054
2 '	24	0.61	1.55	1.426
3 '	36	0.915	1.566	2.182
4 '	48	1.22	1.578	2.935
5 '	60	1.525	1.587	3.728
6 '	72	1.83	1.595	4.515
7 '	84	2.135	1.601	5.306
8 '	96	2.44	1.606	6.101

Fuente: Azevedo, J., & Acosta, G. (1976). *Manual de Hidráulica*. (1ª ed). México: HARLA S.A.

### 4.3. Autodesk – AutoCAD

Autodesk AutoCAD es un programa informático de dibujo asistido por ordenador, para dibujo en dos y tres dimensiones. Utilizado desde su primera aparición en 1982 en COMDEX (Computer Dealers' Exhibition), hasta la actualidad como un software reconocido internacionalmente por su capacidad de edición. (Aguilar, 2020). Gestiona una base de datos de entidades geométricas (puntos, líneas, arcos, etc.) con la que se puede operar a través de una pantalla gráfica en la que se muestran éstas; es el llamado editor de dibujo. La interacción del usuario se realiza a través de comandos, de edición o dibujo, desde la línea de órdenes o barra de comandos, a la que el programa está fundamentalmente orientado. Sin embargo, también existen barras de herramientas localizadas en menús desplegables, donde podemos encontrar las órdenes de manera más visual e intuitiva. (Ángel & Porcel, 2011).

AutoCAD, utiliza el concepto de espacio modelo y espacio papel para separar las fases dibujo en 2D y 3D de las específicas para obtener planos trazados en papel a su correspondiente escala. (Ángel & Porcel, 2011).

Hace posible dibujar y anotar geometrías 2D y modelos 3D con sólidos, superficies y objetos de malla. (Pérez, 2012).

#### 4.3.1. Interfaz del programa.

La pantalla de AutoCAD se divide en varias partes claramente diferenciadas: (Alfonso et al., 2017).

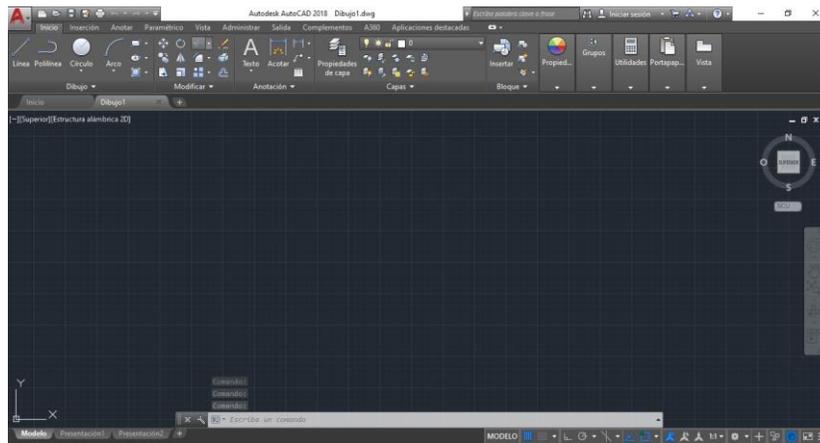


Figura 5. Interfaz del programa AutoCAD, tomada de Software AutoCAD

- Área Grafica: donde se dibuja (negro)
- Cinta de Opciones: agrupación de iconos dinámica con las órdenes más importantes de cada entorno de trabajo
  - Barra de Menús Desplegables: (opcional) Archivo, Edición, Ver, Insertar ...
  - Barras o cajas de herramientas: Tienen nombre propio (Zoom, Modificar, Estándar, Propiedades, etc.) Se pueden personalizar y también anclar a cualquiera de los cuatro lados del Área grafica o bien dejarlas flotantes. En principio son incompatibles con la cinta de opciones.
    - Barra de Presentaciones de espacio Modelo, y de espacio Papel (Presentación 1, Presentación 2, etc.)
- Ventana de Línea de Comando (Comando:) donde se dan las órdenes escritas.
- Barra de estado: coordenadas y Botones de control de rejilla, modo Orto, etc.
- Barras de desplazamiento: (opcionales) similares al estándar de Windows.

- Cuadros o letreros de diálogo: Matizan aspectos de una orden en curso (en el ejemplo, cuadro de diálogo de Insertar).

#### 4.3.2. Unidades.

AutoCAD permite definir el tipo de unidades y la precisión de las medidas de longitud y ángulo. Inicialmente, las unidades de longitud están en el sistema decimal con una precisión de 4 cifras decimales y el ángulo en grados decimales sin cifras decimales. (Martín et al., 2017). Cabe resaltar la importancia de este comando, si se pretende importar el diseño con fines de modelación.

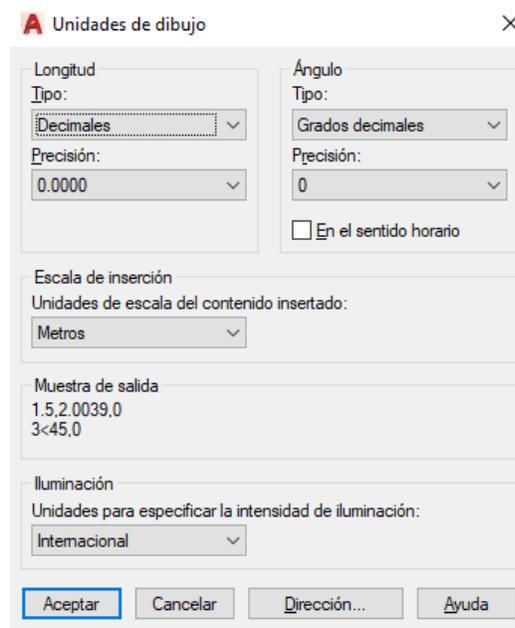


Figura 6. Cuadro de unidades en AutoCAD, tomada de Software AutoCAD

#### 4.3.3. Acotar.

Las cotas indican medidas geométricas de objetos, distancias o ángulos entre objetos o las coordenadas X e Y de alguna característica de un objeto. AutoCAD proporciona tres tipos básicos de acotación: lineal, radial y angular. Una cota lineal puede ser horizontal, vertical, alineada, girada, de coordenadas, de línea de base y continua. (Ángel & Porcel, 2011).

Con AutoCAD, es muy sencillo manejar la acotación mediante los estilos de acotación, ya que contienen todos los parámetros que definen el aspecto de una cota, como son tamaño de texto, tamaño de flechas, posición relativa de los textos respecto a la línea de cota y un largo, etc. (Ángel & Porcel, 2011).

#### 4.3.4. Comando “CONVASUPERF”.

Al convertir objetos en superficies, se puede especificar si el objeto resultante se suavizará o facetará. Al convertir una malla, la variable de sistema SMOOTHMESHCONVERT se encarga de controlar el suavizado y el número de caras de la superficie resultante. (Autodesk, 2021).

Mediante el comando CONVASUPERF, se pueden convertir los siguientes objetos en superficies: sólidos 2D, 3D (sólidos), Regiones, Polilíneas abiertas de anchura cero con altura, Líneas con altura, Arcos con altura, Objetos de malla, Caras 3D planas. (Autodesk, 2021).

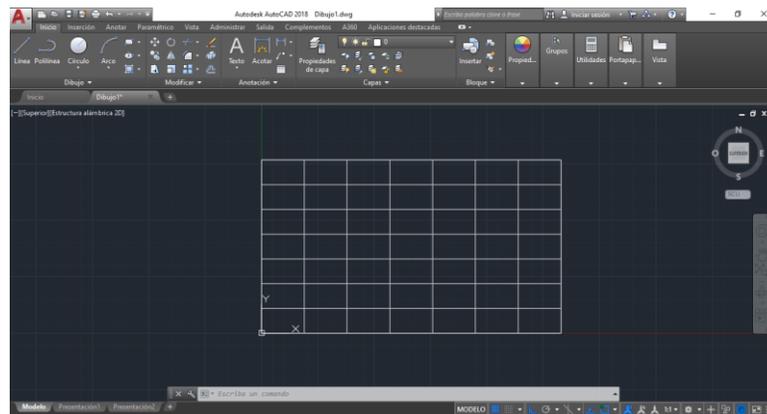


Figura 7. Ejemplo comando "CONVASUPERF" de AutoCAD, tomada de Software AutoCAD

#### 4.3.5. Comando “\_SUBTRACT”.

Con el comando SUBTRACT, se puede quitar el área común de un conjunto de sólidos de otro sólido. Por ejemplo, utilizando este comando se pueden adicionar huecos a una pieza mecánica sustrayendo cilindros del objeto que la representa. (Osorio, 2021).

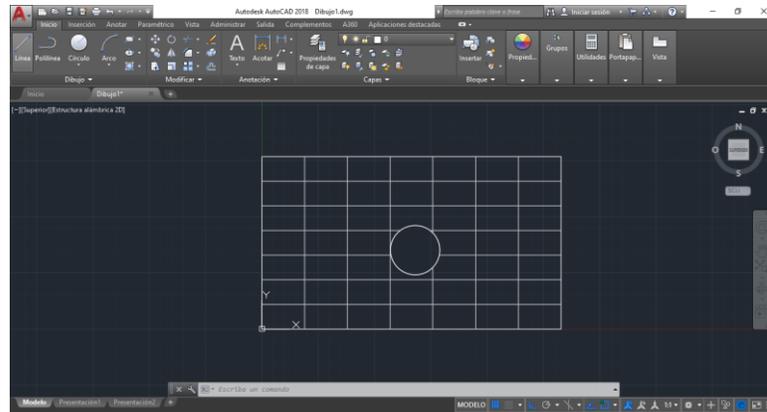


Figura 8. Ejemplo comando "SUBTRACT" de AutoCAD, tomada de Software AutoCAD

#### 4.3.6. Formato de archivos IGES.

IGES (Initial Graphics Exchange Specification) es un formato de archivo neutro concebido para transferir datos de dibujo 2D y 3D entre distintos sistemas de CAD, o incluso de fabricación (FAO). (Ediciones ENI, 2013).

El formato IGES (o IGS) correspondiente a una geometría 3D tiene la particularidad de mostrar modelos de superficie. Al contrario de lo que ocurre con los objetos volumétricos, estas superficies simples o complejas representan la envoltura (o piel) de los modelos. Así, incluso cuando los modelos originales son volumétricos, la restitución de un formato IGES es forzosamente de superficie. (Ediciones ENI, 2013).

##### 4.3.6.1. Exportación de archivos IGES.

- En el Menú de la aplicación, escoja Exportar y luego Otros formatos.
- En el cuadro de diálogo Exportar datos, escoja el tipo de archivo IGES (o IGS), y aplique un nombre al archivo antes de hacer clic en Guardar.
- AutoCAD le invita a seleccionar los objetos que desea exportar y luego a validar.

El procedimiento de exportación se inicia y, cuando finaliza la exportación, aparece una notificación en la barra de tareas. (Ediciones ENI, 2013).

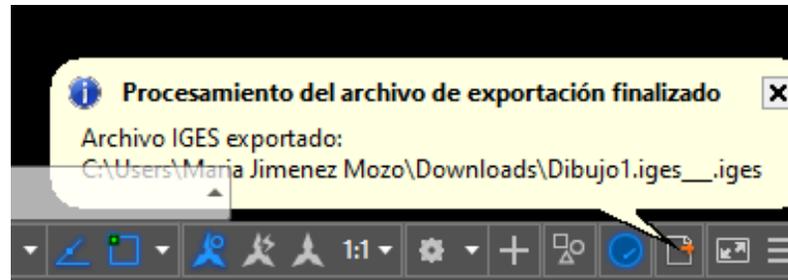


Figura 9. Notificación de exportación a archivo IGES, tomada de Software AutoCAD

#### 4.4. Herramienta CFD

Hasta ahora, los problemas hidráulicos se resolvían a menudo mediante el uso de modelos físicos. Se trata de un método de investigación que requiere mucho tiempo, y los modelos físicos se reducen a escala debido a las limitaciones de coste y espacio del laboratorio. La reducción de escala de un sistema hidráulico está asociada a los efectos de escala, lo que da lugar a relaciones de fuerza no idénticas entre el prototipo y el modelo. Los problemas de escala se producen, entre otros, al simular partículas muy pequeñas. En cambio, la modelización CFD permite simular problemas complejos de flujo de fluidos sin reducir la escala. (Naess, 2020).

Los códigos CFD se estructuran en torno a los algoritmos numéricos que pueden abordar los problemas de flujo de fluidos. Para facilitar el acceso a su capacidad de resolución, todos los paquetes comerciales de CFD incluyen sofisticadas interfaces de usuario para introducir los parámetros del problema y examinar los resultados. Por lo tanto, todos los códigos contienen tres elementos principales (i) un preprocesador, (ii) un solucionador y (iii) un postprocesador. (Salcedo et al., 2017).

##### 4.4.1. Pre – procesamiento.

El preprocesamiento consiste en la introducción de un problema de flujo en un programa CFD por medio de una interfaz de fácil manejo y la posterior transformación de esta entrada en una forma adecuada para su uso por el solucionador. Las actividades del usuario en la fase de preprocesamiento son las siguientes: (Salcedo et al., 2017).

- Definición de la geometría de la región de interés: el dominio computacional

- Generación de la malla - la subdivisión del dominio en un número de subdominios más pequeños y no superpuestos: una rejilla (o malla) de celdas (o volúmenes o elementos de control)
- Selección de los fenómenos físicos y químicos que deben ser modelar
- Definición de las propiedades de los fluidos
- Especificación de las condiciones de contorno adecuadas en las celdas que coinciden con el límite del dominio o que lo tocan

#### **4.4.2. Solucionador.**

Existen tres corrientes distintas de técnicas de solución numérica: métodos de diferencias finitas, de elementos finitos y espectrales. Nos ocuparemos únicamente del método de volúmenes finitos, una formulación especial de diferencias finitas que es fundamental para los códigos CFD más consolidados: CFX/ANSYS, FLUENT, PHOENICS y STAR-CD. A grandes rasgos, el algoritmo numérico consta de los siguientes pasos. (Salcedo et al., 2017).

- Integración de las ecuaciones de gobierno del flujo de fluidos sobre todos los volúmenes de control (finitos) del dominio
- Discretización - conversión de las ecuaciones integrales resultantes en un sistema de ecuaciones algebraicas
- Solución de las ecuaciones algebraicas mediante un método iterativo

#### **4.4.3. Post – procesamiento.**

Al igual que en el preprocesamiento, recientemente se ha llevado a cabo una gran cantidad de trabajo de desarrollo en el campo del postprocesamiento. Debido a la creciente popularidad de las estaciones de trabajo de ingeniería, muchas de las cuales tienen excelentes capacidades gráficas, los principales paquetes de CFD están ahora equipados con versátiles herramientas de visualización de datos. Entre ellas se encuentran las siguientes. (Salcedo et al., 2017).

- Visualización de la geometría del dominio y de la malla

- Gráficos vectoriales
- Gráficos de líneas y contornos sombreados
- Gráficos de superficie en 2D y 3D
- Seguimiento de partículas
- Manipulación de vistas (traslación, rotación, escalado, etc.)
- Salida PostScript en color

Más recientemente, estas instalaciones pueden incluir también la animación para la visualización dinámica de los resultados y, además de los gráficos, todos los códigos producen una salida alfanumérica fiable y tienen instalaciones de exportación de datos para su posterior manipulación externa al código. (Salcedo et al., 2017).

#### **4.4.4. ANSYS FLUENT.**

ANSYS FLUENT proporciona capacidades de modelado integrales para una amplia gama de problemas de flujo de fluidos incompresibles y compresibles, laminares y turbulentos. Se pueden realizar análisis de estado estacionario o transitorio. En ANSYS FLUENT, se combina una amplia gama de modelos matemáticos para fenómenos de transporte (como transferencia de calor y reacciones químicas) con la capacidad de modelar geometrías complejas. (ANSYS Inc, 2013).

Un grupo de modelos muy útil en ANSYS FLUENT es el conjunto de modelos de superficie libre y de flujo multifásico. Estos se pueden utilizar para el análisis de flujos de gas-líquido, gas-sólido, líquido-sólido y gas-líquido-sólido. Para este tipo de problemas, ANSYS FLUENT proporciona los modelos de volumen de fluido (VOF), mezcla y euleriano, así como el modelo de fase discreta (DPM). (ANSYS Inc, 2013).

Los modelos de turbulencia robustos y precisos son un componente vital del conjunto de modelos ANSYS FLUENT. Los modelos de turbulencia proporcionados tienen una amplia gama de aplicabilidad e incluyen los efectos de otros fenómenos físicos, como la flotabilidad y la compresibilidad. (ANSYS Inc, 2013).

Para todos los flujos, ANSYS FLUENT resuelve las ecuaciones de conservación de la masa y el momento. Se presentan las ecuaciones de conservación para el flujo laminar en un marco de referencia inercial (sin aceleración). (ANSYS Inc, 2013).

**4.4.4.1. Ecuación de conservación de masa.** La ecuación para la conservación de la masa, o ecuación de continuidad, se puede escribir de la siguiente manera: (ANSYS Inc, 2013).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \nabla * (\rho \vec{v}) = Sm$$

La ecuación anterior es la forma general de la ecuación de conservación de la masa y es válida tanto para flujos compresibles como incompresibles. La fuente Sm es la masa añadida a la fase continua desde la segunda fase dispersa. (ANSYS Inc, 2013).

Para geometrías axisimétricas 2D, la ecuación de continuidad viene dada por:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} * (\rho v_x) + \frac{\partial}{\partial r} * (\rho v_r) + \frac{\rho v_r}{r} = Sm$$

donde x es la coordenada axial, r es la coordenada radial, Vx es la velocidad axial y Vr es la velocidad radial.

**4.4.4.2. Ecuaciones de conservación del momento.**

$$\frac{\partial}{\partial t} * (\rho \vec{v}) + \nabla * (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla * (\bar{\bar{T}}) + \rho \vec{g} + \vec{F}$$

donde p es la presión estática,  $\bar{\bar{T}}$ , es el tensor de tensión (descrito a continuación) y  $\rho \vec{g}$  y  $\vec{F}$  son la fuerza del cuerpo gravitatorio y las fuerzas del cuerpo externo (p. ej., que surgen de la interacción con la fase dispersa), respectivamente.  $\vec{F}$  también contiene otros términos fuente dependientes del modelo, como medios porosos y fuentes definidas por el usuario. (ANSYS Inc, 2013).

El tensor de tensión  $\bar{\bar{T}}$  está dado por

$$\bar{T} = \mu \left[ (\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla * \vec{v} I \right]$$

Donde  $\mu$  es la viscosidad molecular,  $I$  es el tensor unitario y el segundo término del lado derecho es el efecto de la dilatación del volumen.

Para geometrías axisimétricas 2D, las ecuaciones de conservación del momento axial y radial están dadas por: (ANSYS Inc, 2013).

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho v_x) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x}(r \rho v_x v_x) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v_r v_x) \\ = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} \left[ r \mu \left( 2 * \frac{\partial v_x}{\partial x} - \frac{2}{3} (\nabla * \vec{v}) \right) \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \mu \left( \frac{\partial v_x}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial x} \right) \right] + F_x \end{aligned}$$

y

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho v_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x}(r \rho v_x v_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v_r v_r) \\ = -\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} \left[ r \mu \left( \frac{\partial v_r}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial r} \right) \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \mu \left( 2 * \frac{\partial v_r}{\partial r} - \frac{2}{3} (\nabla * \vec{v}) \right) \right] - 2\mu \frac{v_r}{r^2} \\ + \frac{2\mu}{3r} (\nabla * \vec{v}) + \rho \frac{v_z^2}{r} + F_r \end{aligned}$$

Donde

$$\nabla * \vec{v} = \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_r}{r}$$

**4.4.4.3. Ecuaciones de conservación de la energía.** Para describir la conservación de la energía en aplicaciones multifásicas eulerianas, se puede escribir una ecuación de entalpía separada para cada fase:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q h_q) + \nabla * (\alpha_q \rho_q \vec{u}_q h_q) = \alpha_q \frac{\partial p_q}{\partial t} + \bar{T}_q$$

$$: \nabla \vec{u}_q - \nabla \vec{q}_q + S_q + \sum_{p=1}^n (Q_{pq} + \dot{m}_{pq} h_{pq} - \dot{m}_{qp} h_{qp})$$

Donde  $h_q$  es la entalpía específica de la fase  $q^{\text{th}}$ ,  $\vec{q}_q$  es el flujo de calor,  $S_q$  es un término de fuente que incluye fuentes de entalpía (p. ej., debido a una reacción química o radiación),  $Q_{pq}$  es la intensidad del intercambio de calor entre las fases  $p^{\text{th}}$  y  $q^{\text{th}}$ , y  $h_{pq}$  es la entalpía interfásica (p. ej., la entalpía del vapor a la temperatura de las gotas, en el caso de la evaporación). El intercambio de calor entre fases debe cumplir las condiciones de equilibrio local  $Q_{pq} = -Q_{qp}$  y  $Q_{qq} = 0$ . (ANSYS Inc, 2013).

**4.4.4.4. Ecuación de fracción de volumen.** La descripción del flujo multifásico como continuo interpenetrante incorpora el concepto de fracciones de volumen fásico, denotado aquí por  $\alpha_q$ . Las fracciones de volumen representan el espacio ocupado por cada fase, y cada fase cumple las leyes de conservación de la masa y el momento individualmente. La derivación de las ecuaciones de conservación se puede realizar promediando en conjunto el equilibrio instantáneo local para cada una de las fases o utilizando el enfoque de la teoría de la mezcla. (ANSYS Inc, 2009).

El volumen de la fase  $q$ ,  $V_q$ , está definido por

$$V_q = \int_V \alpha_q dV$$

Donde

$$\sum_{q=1}^n \alpha_q = 1$$

La densidad efectiva de fase  $q$  es

$$\hat{\rho}_q = \alpha_q \rho_q$$

Donde  $\rho_q$  es la densidad física de la fase q.

La ecuación de fracción de volumen se puede resolver mediante discretización de tiempo implícita o explícita. (ANSYS Inc, 2013).

**4.4.4.5. Modelo VOF.** El modelo VOF es una técnica de seguimiento de superficie aplicada a una malla Euleriana fija. Está diseñado para dos o más fluidos inmiscibles donde la posición de la interfaz entre los fluidos es de interés. En el modelo VOF, los fluidos comparten un solo conjunto de ecuaciones de momento, y la fracción de volumen de cada uno de los fluidos en cada celda computacional se rastrea en todo el dominio. Las aplicaciones del modelo VOF incluyen flujos estratificados, flujos de superficie libre, llenado, chapoteo, el movimiento de grandes burbujas en un líquido, el movimiento de un líquido después de la ruptura de una represa, la predicción de la ruptura de un chorro (tensión superficial), y el seguimiento constante o transitorio de cualquier interfaz líquido-gas. (ANSYS Inc, 2013).

**4.4.4.5.1. Cálculos de VOF de estado estacionario y transitorio.** La formulación VOF en ANSYS FLUENT generalmente se usa para calcular una solución dependiente del tiempo, pero para problemas en los que solo se preocupa por una solución de estado estacionario, es posible realizar un cálculo de estado estacionario. Un cálculo VOF de estado estacionario es sensato solo cuando su solución es independiente de las condiciones iniciales y existen límites de flujo de entrada distintos para las fases individuales.

La formulación VOF se basa en el hecho de que dos o más fluidos (o fases) no se interpenetran. Para cada fase adicional que agrega a su modelo, se introduce una variable: la fracción de volumen de la fase en la celda computacional. En cada volumen de control, las fracciones de volumen de todas las fases suman la unidad. Los campos para todas las variables y propiedades son compartidos por las fases y representan valores promedio de volumen, siempre que se conozca la fracción de volumen de cada una de las fases en cada ubicación. Por lo tanto, las variables y propiedades en cualquier celda dada son puramente representativas de una de las fases o representativas de una mezcla de fases, según los valores de la fracción de

volumen. En otras palabras, si la  $q^{\text{th}}$  fracción de volumen del fluido en la celda se denota como  $\alpha_q$ , entonces son posibles las siguientes tres condiciones:

- $\alpha_q = 0$ : La celda está vacía (del  $q^{\text{th}}$  fluido).
- $\alpha_q = 1$ : La celda está llena (del  $q^{\text{th}}$  líquido).
- $0 < \alpha_q < 1$ : La celda contiene la interfaz entre el  $q^{\text{th}}$  fluido y uno o más fluidos.

Según el valor local de  $\alpha_q$ , se asignarán las propiedades y variables apropiadas a cada volumen de control dentro del dominio.

**4.4.4.6. Modelo de turbulencia.** Los modelos de turbulencia son comúnmente usados en la predicción de los efectos causados por la turbulencia en un flujo, sin que sea necesaria la resolución de escalas de fluctuaciones pequeñas. (Cedillo Sarmiento & Marín Lazo, 2015).

El flujo en un conducto puede clasificarse en las dos categorías principales de flujo laminar y flujo turbulento, así como una transición entre ellas. El flujo laminar se produce a una velocidad de flujo relativamente baja, y se contempla como un flujo en capas a través de una trayectoria suave sin interrupción entre las capas adyacentes. Cuando la velocidad del flujo supera un determinado valor límite, el flujo laminar se vuelve inestable. El flujo turbulento se caracteriza por fluir a través de una trayectoria irregular y caótica que comprende remolinos, torbellinos e inestabilidades de flujo. La figura 10 ilustra la diferencia entre el flujo laminar, de transición y turbulento. (Naess, 2020).

El número de Reynolds se utiliza para determinar si el flujo es laminar o turbulento, es un valor adimensional dado por la relación entre las fuerzas internas y las fuerzas viscosas:

$$Re = \frac{\text{Fuerza inercial}}{\text{Fuerza viscosa}} = \frac{\rho u d}{\mu} = \frac{u d}{\nu}$$

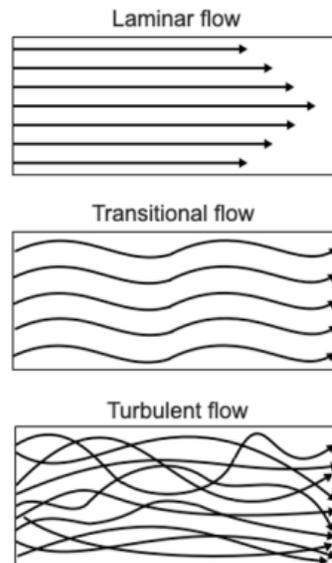


Figura 10. Flujo laminar, transitorio y turbulento, tomado de Naess, R. (2020, junio). *CFD Simulations of Open and Closed Sand Trap Design for Tonstad Hydropower Plant*. Noruega: Norwegian University of Science and Technology.

Si las fuerzas viscosas son dominantes, lo que corresponde a un número de Reynolds bajo, el flujo es laminar. Por el contrario, si las fuerzas de inercia son dominantes, el flujo es turbulento con rápidos cambios de velocidad en el tiempo y el espacio. En la Tabla 6 se ofrece una clasificación del flujo en un conducto cerrado basada en el número de Reynolds. (Naess, 2020).

Tabla 6

*Tipos de flujo según el número de Reynolds.*

Flow type	Reynolds number
Laminar flow	$Re \leq 2300$
Transitional flow	$2300 \leq Re \leq 4000$
Turbulent flow	$Re \geq 4000$

Fuente: Naess, R. (2020, junio). *CFD Simulations of Open and Closed Sand Trap Design for Tonstad Hydropower Plant*. Noruega: Norwegian University of Science and Technology.

Los modelos de turbulencia son descripciones más simplificadas de la turbulencia que son menos exigentes desde el punto de vista computacional, pero también reducen la precisión. (Naess, 2020).

**4.4.4.7. Viscosidad.** La viscosidad del fluido tiene un efecto muy importante en el rendimiento del desarenador. (Linkedin, 2018). la resistencia al flujo de un fluido y la resistencia al movimiento de un objeto a través de un fluido generalmente se expresan en términos de la viscosidad del fluido. Experimentalmente, bajo condiciones de flujo laminar, la fuerza requerida para mover una placa a velocidad constante contra la resistencia de un fluido es proporcional al área de la placa y al gradiente de velocidad perpendicular a la placa. La constante de proporcionalidad se llama viscosidad. (Quora, 2021).

- Cuando las fuerzas viscosas son dominantes (flujo lento, bajo Re), son suficientes para mantener alineadas todas las partículas del fluido, entonces el flujo es laminar. (Quora, 2021).
- Cuando las fuerzas de inercia dominan sobre las fuerzas viscosas (cuando el fluido fluye más rápido y Re es más grande), el flujo es turbulento. (Quora, 2021).

**4.4.4.8. Métodos de solución.** La página de tareas “Métodos de solución” de ANSYS FLUENT, permite especificar varios parámetros asociados con el método de solución que se usará en el cálculo. (ANSYS Inc, 2009).

**4.4.4.8.1. Acoplamiento de presión - velocidad.** El acoplamiento presión-velocidad se logra utilizando la Ecuación

$$J_f = \rho_f \frac{a_{p,c0}u_{n,c0} + a_{p,c1}u_{n,c1}}{a_{p,c0} + a_{p,c1}} + d_f((p_{c0} + (\nabla p)_{c0} * \vec{r}_0) - (p_{c1} + (\nabla p)_{c1} * \vec{r}_1))$$

$$= \hat{J}_f + d_f(p_{c0} - p_{c1})$$

para derivar una condición adicional para la presión reformateando la ecuación de continuidad. El solucionador basado en la presión le permite resolver su problema de flujo de

forma separada o acoplada. ANSYS FLUENT brinda la opción de elegir entre cinco algoritmos de acoplamiento de presión-velocidad: SIMPLE, SIMPLEC, PISO, acoplado y (para flujos inestables que utilizan el esquema de avance de tiempo no iterativo (NITA)) paso fraccional (FSM). Todos los esquemas mencionados, excepto el esquema "acoplado", se basan en el enfoque predictor-corrector. (ANSYS Inc, 2009).

*4.4.4.8.1.1. Algoritmo SIMPLE.* El algoritmo SIMPLE utiliza una relación entre las correcciones de velocidad y presión para imponer la conservación de la masa y obtener el campo de presión. Si la ecuación de cantidad de movimiento se resuelve con un campo de presión estimado  $P^*$ , el flujo de cara resultante  $J_f^*$ . (ANSYS Inc, 2009).

$$J_f^* = \hat{J}_f^* + d_f(p_{c0}^* - p_{c1}^*)$$

no satisface la ecuación de continuidad. En consecuencia, se agrega una corrección  $J'_f$  al flujo de cara  $J_f^*$  para que el flujo de cara corregido,  $J_f$ . (ANSYS Inc, 2009).

$$J_f = J_f^* + J'_f$$

satisface la ecuación de continuidad. El algoritmo SIMPLE postula que  $J'_f$  se escribe como

$$J'_f = d_f(p'_{c0} - p'_{c1})$$

Donde  $p'$  es la corrección de la presión de la celda. (ANSYS Inc, 2009).

El algoritmo SIMPLE sustituye las ecuaciones de corrección de flujo en la ecuación de continuidad discreta para obtener una ecuación discreta para la corrección de presión  $p'$  en la celda: (ANSYS Inc, 2009).

$$ap p' = \sum_{nb} a_{nb} p'_{nb} + b$$

Donde el término fuente  $b$  es el caudal neto en la celda:

$$b = \sum_f^{N_{faces}} J_f^* A_f$$

La ecuación de corrección de presión se puede resolver usando el método algebraico de redes múltiples (AMG). Una vez que se obtiene una solución, la presión de la celda y el flujo de cara se corrigen usando. (ANSYS Inc, 2009).

$$p = p^* + \alpha_p p'$$

$$J_f = J_f^* + d_f(p'_{c0} - p'_{c1})$$

Aquí  $\alpha_p$  es el factor sub-relajación para la presión. El flujo de cara corregido,  $J_f$ , satisface la ecuación de continuidad discreta de manera idéntica durante cada iteración. (ANSYS Inc, 2009).

**4.4.4.8.2. Gradiente.** Los gradientes son necesarios no solo para construir valores de un escalar en las caras de las celdas, sino también para calcular términos de difusión secundaria y derivadas de velocidad. El gradiente  $\nabla_{\phi}$  de una variable dada  $\phi$  se usa para discretizar los términos de convección y difusión en las ecuaciones de conservación del flujo. Los gradientes se calculan en ANSYS FLUENT de acuerdo con los siguientes métodos: (ANSYS Inc, 2009).

- Green-Gauss Cell-Based
- Green-Gauss Node-Based
- Least Squares Cell-Based

4.4.4.8.2.1. *Evaluación de gradiente Least Squares Cell-Based.* En este método se supone que la solución varía linealmente. En la Figura 11, el cambio en los valores de celda entre celda  $c_0$  y  $c_i$  a lo largo del vector  $\delta_{ri}$  desde el centroide de celda  $c_0$  a celda  $c_i$  se puede expresar como: (ANSYS Inc, 2009).

$$(\nabla_{\phi})_{c_0} * \Delta_{ri} = (\phi_{c_i} - \phi_{c_0})$$

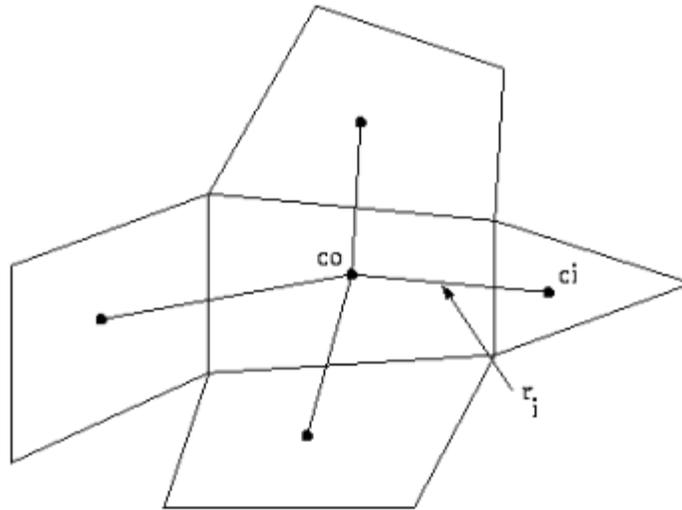


Figura 11. Evaluación del centroide de la celda, tomada de ANSYS. Inc. (2009, enero). *Guía del usuario de ANSYS FLUENT 12.0\_ Evaluation of Gradients and Derivatives*. Recuperado de <https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/node368.htm#sec-eval-derivatives>

Si escribimos ecuaciones similares para cada celda que rodea a la celda  $c_0$ , obtenemos el siguiente sistema escrito en forma compacta:

$$[J](\nabla_{\phi})_{c_0} = \Delta_{\phi}$$

Donde  $[J]$  es la matriz de coeficientes que es puramente una función de la geometría.

El objetivo aquí es determinar el gradiente de celda ( $\nabla_{\phi_0} = \phi_x \hat{i} + \phi_y \hat{j} + \phi_z \hat{k}$ ) resolviendo el problema de minimización para el sistema de la matriz de coeficientes no cuadrados en un sentido de mínimos cuadrados.

El sistema de ecuación lineal anterior está sobre-determinado y se puede resolver descomponiendo la matriz de coeficientes utilizando el proceso de Gram-Schmidt. Esta descomposición produce una matriz de pesos para cada celda. Así, para nuestro esquema centrado en la celda, esto significa que los tres componentes de los pesos ( $W^x_{i_0}, W^y_{i_0}, W^z_{i_0}$ ) se producen para cada una de las caras de la celda  $c_0$ .

Por lo tanto, el gradiente en el centro de la celda se puede calcular multiplicando los factores de peso por el vector de diferencia ( $\nabla_{\phi} = (\phi_{c1} - \phi_{c0})$ )

$$(\phi_x)_{c0} = \sum_{i=1}^n W^x_{i0} * (\phi_{ci} - \phi_{c0})$$

$$(\phi_y)_{c0} = \sum_{i=1}^n W^y_{i0} * (\phi_{ci} - \phi_{c0})$$

$$(\phi_z)_{c0} = \sum_{i=1}^n W^z_{i0} * (\phi_{ci} - \phi_{c0})$$

**4.4.4.8.3. Presión.** ANSYS FLUENT ofrece las siguientes opciones para interpolar los valores de presión en las caras: estándar, PRESTO!, lineal, de segundo orden y ponderado por fuerza corporal. Por defecto se utiliza el esquema de segundo orden, excepto en el caso de simulaciones de mezcla o multifase VOF, en cuyo caso PRESTO! es el predeterminado. (ANSYS, 2013).

**4.4.4.8.3.1. PRESTO!.** El esquema PRESTO! (PREssure STaggering Option) utiliza el balance de continuidad discreto para un volumen de control "escalonado" alrededor de la cara para calcular la presión "escalonada" (es decir, la cara). Este procedimiento es similar en espíritu a los esquemas de malla escalonada utilizados con mallas estructuradas. El esquema PRESTO! está disponible para todas las mallas. (ANSYS Inc, 2013).

**4.4.4.8.4. Momentum.** Son los nombres de las otras ecuaciones de convección-difusión que se resuelven. ANSYS FLUENT ofrece una lista desplegable junto a cada ecuación, donde es posible seleccionar First Order Upwind, Second Order Upwind, Power Law, QUICK, or Third-Order MUSCL discretization scheme for that equation. (ANSYS Inc, 2009).

**4.4.4.9. Técnicas gráficas utilizadas en CFD.** La infografía y la visualización del flujo computacional son medios para mostrar los resultados de un cálculo CFD. Dentro de las técnicas gráficas esenciales utilizadas frecuentemente para la presentación de datos CFD esta: (Naess, 2020).

**4.4.4.9.1. Gráficos de contorno.** Los gráficos de contorno son uno de los métodos más utilizados para la representación gráfica de datos en CFD. A diferencia de los gráficos X-Y, los gráficos de contorno proporcionan una descripción global del flujo de fluidos en una sola vista. Una línea de contorno es una curva a lo largo de la cual alguna propiedad es constante en el espacio. Las curvas de nivel se trazan de forma que la diferencia entre el valor numérico de la variable dependiente de una línea de nivel a otra adyacente se mantiene constante. Si la variable dependiente cambia lentamente en el espacio, las curvas de nivel adyacentes están muy juntas. Por el contrario, las curvas de nivel están muy espaciadas si la variable dependiente cambia rápidamente en el espacio. Un gráfico de contorno también puede presentarse como un contorno inundado, lo que significa que las regiones entre las líneas de contorno se llenan de color. La intensidad del sombreado del color denota el valor de la propiedad del campo de flujo.

**4.4.4.9.2. Gráficas XY de datos de solución.** Permite producir un gráfico XY muy sofisticado utilizando datos de varias zonas, superficies o archivos y modificando los atributos del eje y la curva. Con la capacidad de cargar archivos de datos externos, puede crear gráficos que comparen los resultados de ANSYS FLUENT con datos de otras fuentes. (ANSYS Inc, 2009).

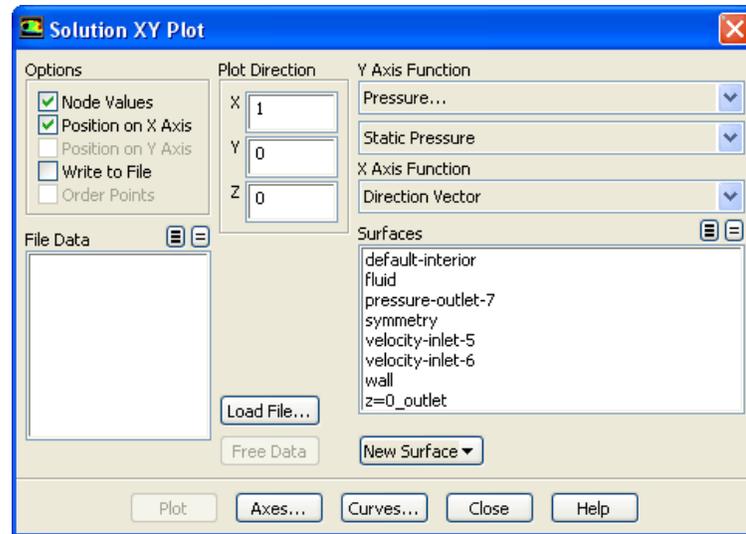


Figura 12. El cuadro de diálogo Gráfico de solución XY, tomada de ANSYS. Inc. (2009). *Guía del usuario de ANSYS FLUENT 12.0 - 29.9.2. Gráficas XY de datos de soluciones*. Recuperado de <https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/ug/node933.htm>

**4.4.4.10. Mallado.** Un concepto básico de la CFD es dividir la geometría del fluido en elementos o celdas, y luego resolver una ecuación para cada celda. (Olsen, 2017).

En CFD, una malla se forma cuando el dominio del fluido se divide en subdominios más pequeños, llamados celdas o elementos. Una malla, o una rejilla, es una representación discreta del dominio y las ecuaciones de las variables desconocidas se resuelven para cada celda. La precisión y la convergencia de una simulación CFD dependen del número de elementos y de la calidad de la malla. El aumento del número de elementos puede dar lugar a una mayor precisión, pero a expensas de un mayor coste computacional. Una parte esencial del proceso de mallado es, por tanto, encontrar el equilibrio entre la precisión de la solución requerida y los recursos computacionales disponibles. (Naess, 2020).

La calidad puede evaluarse en función de la ortogonalidad y la relación de aspecto y expansión. La ortogonalidad se refiere a la proximidad del ángulo entre las caras de los elementos adyacentes al ángulo óptimo. El ángulo óptimo es de  $90^\circ$  para las caras cuadrilaterales y de  $60^\circ$  para las caras triangulares. En el caso de las mallas no ortogonales, las líneas de la malla no deben cruzarse en ángulos inferiores a  $45^\circ$  o superiores a  $135^\circ$ . Es preferible una baja no ortogonalidad debido a una convergencia más rápida y, en algunos casos, una mayor precisión. La medida de ortogonalidad va de 0 a 1, donde 1 implica una buena calidad. La figura

12 muestra dos celdas de la cuadrícula, A y B, a partir de las cuales la relación de aspecto y la relación de expansión pueden describirse. (Naess, 2020).

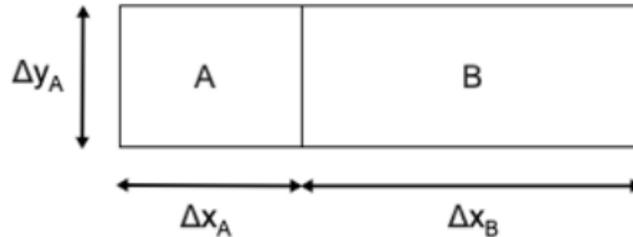
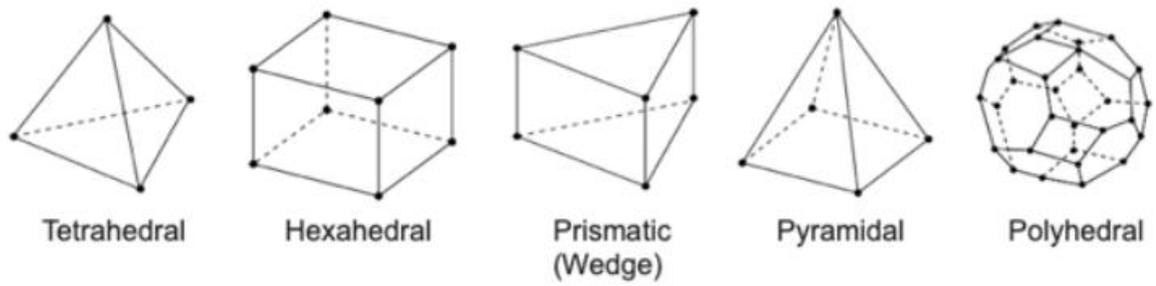


Figura 13. Relación de aspecto y expansión de la celda, tomada de Naess, R. (2020, junio). *CFD Simulations of Open and Closed Sand Trap Design for Tonstad Hydropower Plant*. Noruega: Norwegian University of Science and Technology..

La relación de aspecto es una medida del estiramiento de un elemento. Se define como la relación entre el ancho de la celda y su altura,  $\Delta x_A/\Delta y_A$ . La relación de aspecto es igual a 1 para un elemento equilátero, y no debe exceder de 40 para los elementos tetraédricos. La relación de expansión, también llamada suavidad, se define como  $\Delta x_A/\Delta x_B$ . Lo ideal es que la relación de expansión no sea superior a 1,2, aproximadamente, para garantizar un cambio gradual en el tamaño de los elementos y evitar así problemas en el cálculo del flujo de agua. (Naess, 2020).

Otra medida de la calidad de la malla es la relación de asimetría de los elementos. La asimetría determina lo cerca que está el elemento del ideal. Los elementos sesgados pueden disminuir la precisión y desestabilizar la solución. La relación de asimetría va de 0 a 1, donde 1 indica una celda completamente degenerada. Un valor de skewness de 0 es ideal. (Naess, 2020).

Los elementos de una malla pueden tener varias formas. La elección depende del problema, la precisión requerida y las capacidades del solucionador. Las diferentes formas de elementos de malla disponibles en Ansys Meshing se ilustran en la Figura 13. El uso de elementos hexaédricos proporciona una malla uniforme y requiere menos elementos para obtener el mismo nivel de precisión en comparación con las mallas tetraédricas. Los elementos tetraédricos pueden aplicarse para geometrías complejas y la generación de una malla tetraédrica puede hacerse automáticamente.



*Figura 14.* Formas de elementos disponibles en Ansys Meshing, tomado de Naess, R. (2020, junio). *CFD Simulations of Open and Closed Sand Trap Design for Tonstad Hydropower Plant.* Noruega: Norwegian University of Science and Technology.

## 5. Aplicación al Caso de Estudio

El municipio de Paipa está localizado en el valle de Sogamoso, uno de los valles internos más importantes de la región andina, en la parte centro oriental del País y noroccidental del departamento de Boyacá a 2525 m.s.n.m; dista aproximadamente 184 Km de Santafé de Bogotá y 40 Km de Tunja. Su cabecera municipal se encuentra a los 5°47' de latitud norte y 73° 06' de longitud oeste. Presenta una temperatura promedio de 13°C. Abarca una extensión de 30.592,41 hectáreas aproximadamente. (Concejo municipal de Paipa, 2000).

Paipa pertenece a la provincia de Tundama y forma parte del corredor industrial de Boyacá. Limita por el norte con el departamento de Santander, por el oriente con los municipios Tibasosa y Duitama; por el sur con Firavitoba y por el occidente con Sotaquirá y Tuta. (Concejo municipal de Paipa, 2000).

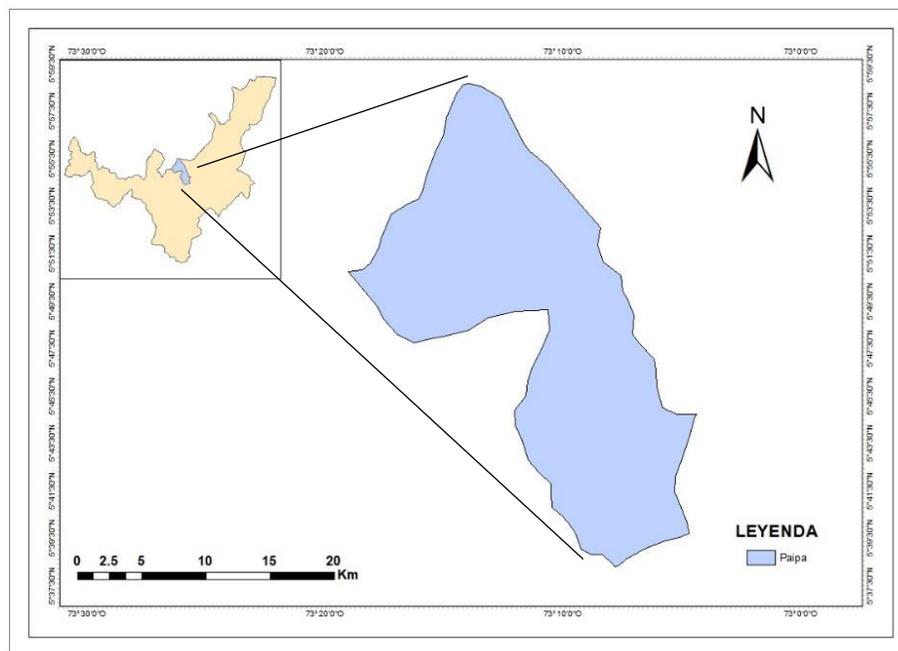


Figura 15. Localización del municipio de Paipa, elaborado por autor

La población del Municipio de Paipa según el municipio de Paipa Censo 2005 para el año 2013 es de 30.176 habitantes. En la siguiente tabla de acuerdo a la información suministrada por el DANE se presenta la proyección de población del municipio de Paipa desde el año 2005 al 2020. (Departamento de Boyacá, 2013).

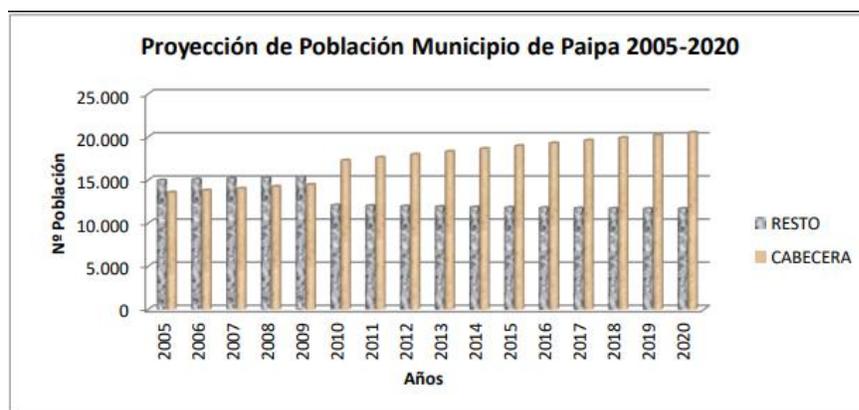
Tabla 7

*Proyección de Población Municipio de Paipa 2005 – 2020.*

Año	Resto	Cabecera	Total
2005	12.338	15.428	27.766
2006	12.276	15.807	28.083
2007	12.220	16.181	28.401
2008	12.166	16.548	28.714
2009	12.103	16.909	29.012
2010	12.054	17.264	29.318
2011	11.994	17.612	29.606
2012	11.936	17.954	29.890
2013	11.885	18.291	30.176
2014	11.830	18.623	30.453
2015	11.790	18.950	30.740
2016	11.749	19.272	31.021
2017	11.710	19.587	31.297
2018	11.685	19.897	31.582
2019	11.666	20.202	31.868
2020	11.664	2.500	32.164

Fuente: Departamento de Boyacà. (2013). *Plan Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres*. Recuperado de [https://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/bitstream/handle/20.500.11762/28456/PMGRD%20\\_Paipa\\_Boyaca.pdf?sequence=2&isAllowed=y](https://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/bitstream/handle/20.500.11762/28456/PMGRD%20_Paipa_Boyaca.pdf?sequence=2&isAllowed=y)

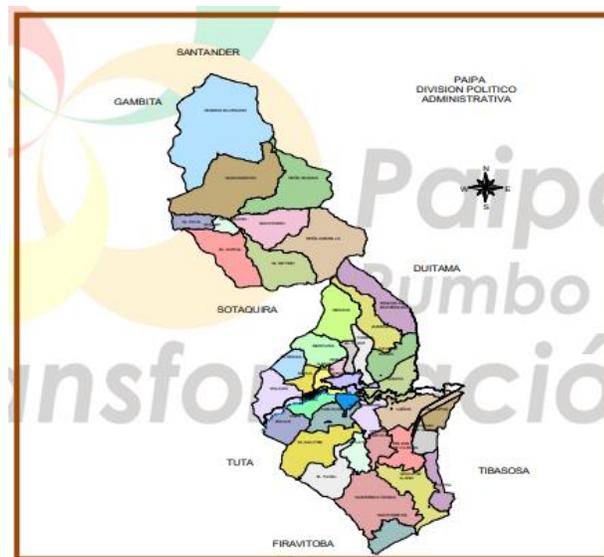
La figura 16 registra el crecimiento poblacional del año 2005 al 2020.



*Figura 16.* Proyección de Población Municipio de Paipa 2005-2020, tomado de Departamento de Boyacà. (2013). *Plan Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres*. Recuperado de [https://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/bitstream/handle/20.500.11762/28456/PMGRD%20\\_Paipa\\_Boyaca.pdf?sequence=2&isAllowed=y](https://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/bitstream/handle/20.500.11762/28456/PMGRD%20_Paipa_Boyaca.pdf?sequence=2&isAllowed=y)

El municipio presenta como divisiones administrativas el sector urbano determinado por el perímetro urbano (acuerdo municipal No. 064 de 1995) y el sector rural el cual está conformado por treinta y ocho veredas comunales (acuerdo municipal No. 058 de 1995) y los corregimientos de Palermo. La zona rural del municipio corresponde al 98% de total del territorio. (Concejo municipal de Paipa, 2000).

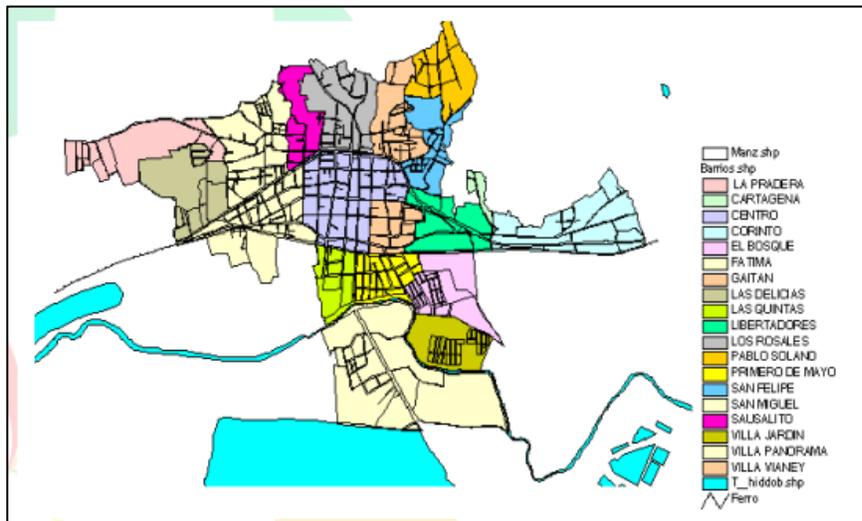
El sector rural incluyendo el Corregimiento de Palermo, comprende las siguientes veredas: El Venado, Peña Blanca, Guacamayas, Peña Amarilla, San Pedro, El Fical, Palermo Centro, El Curial, El Retiro (las anteriores en el Corregimiento de Palermo); Rincón de Españoles, Jazminal, Medios, Toibita, Marcura. Cruz de Bonzo, el Tejar, la Bolsa, Romita, el Rosal, Sátiva, Llano Grande, volcán, Caños, Varguitas, Miraban, la Esperanza, Canocas, Río Arriba, Rincón de Vargas, Pantano de Vargas, El Salitre, Cruz de Murcia, La Playa, El Tunal, El Chital, Venta de Llano, Quebrada Honda, y Pastoreros. (Departamento de Boyacá, 2013).



*Figura 17.* Distribución geopolítica del Municipio de Paipa Área Rural, tomado de Departamento de Boyacá. (2013). *Plan Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres*. Recuperado de [https://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/bitstream/handle/20.500.11762/28456/PMGRD%20\\_Paipa\\_Boyaca.pdf?sequence=2&isAllowed=y](https://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/bitstream/handle/20.500.11762/28456/PMGRD%20_Paipa_Boyaca.pdf?sequence=2&isAllowed=y)

El sector urbano del Municipio comprende los siguientes barrios; Pablo Solano, Villa Vianey, Los Rosales, Saulalito. Fátima, San Felipe, La pradera, Centro, Corinto, Cartagena, San

Miguel, Libertadores, Gaitán, Las Quintas, El bosque, Las Delicias, Villa Jardín, Villa Panorama.



*Figura 18.* Distribución geopolítica del Municipio de Paipa Área Urbana, tomado de Departamento de Boyacà. (2013). *Plan Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres.* Recuperado de [https://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/bitstream/handle/20.500.11762/28456/PMGRD%20\\_Paipa\\_Boyaca.pdf?sequence=2&isAllowed=y](https://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/bitstream/handle/20.500.11762/28456/PMGRD%20_Paipa_Boyaca.pdf?sequence=2&isAllowed=y)

En el año 2019, La Alcaldía de Paipa en alianza con la empresa de Servicios Públicos Red vital y el acueducto de la vereda el Tunal, construyó e instaló la planta de tratamiento de agua potable San Felipe. Con esta planta, se hace el tratamiento del agua que reciben los hogares de veredas como El Tunal, un sector de Salitre y un sector La Playa, para suministrar agua de mejor calidad. (Quora, 2021).

A causa de las recientes problemáticas presentadas en la planta de tratamiento de agua potable situada en el municipio de Paipa, en el presente trabajo se toman como referencia algunos datos del municipio de Paipa, Boyacá, con el fin de diseñar dos estructuras hidráulicas (desarenador + canaleta Parshall) relevantes en la línea de aducción a la planta de potabilización; a finalidad de observar el comportamiento de estas estructuras por medio de una simulación CFD que soportaría la fase de predimensionamiento y de esta manera verificar algunas características de las estructuras no evidenciadas en esta fase. Cabe resaltar que no se

poseen los datos de diseño de las estructuras mencionadas, por lo cual no se podrán validar teóricamente los resultados; sin embargo, esto podría ser objeto de estudio en posteriores investigaciones.

Estas estructuras fueron diseñadas con un periodo de diseño de 25 años, estipulado en la Resolución 0330 de 2017 y un QMD (caudal máximo diario).

Para la proyección de población, necesaria para el cálculo del QMD, se implementó el método Exponencial de proyección de población, dando así un total de 43235 habitantes para el año 2047.

El QMD fue calculado asumiendo un porcentaje de pérdidas máximas admisibles del 25%, una demanda neta de 120 L/hab\*d y un coeficiente k1 de 1.2, resultando un valor de 96.08 L/s para este parámetro. Lo mencionado anteriormente se soporta en la siguiente tabla.

Tabla 8

*Datos para diseño de estructuras hidráulicas.*

<b>DATOS</b>	<b>VALORES</b>
dbruta (L/hab*d)	160
Qmd (L/s)	80.06
QMD (L/s)	96.08
QMH (L/s)	120.10
Población	43235
Altitud (m.s.n.m)	2525
%Perdidas	0.25

## 6. Guía Metodológica

A continuación, se presenta el paso a paso de la metodología empleada para el diseño y modelado CFD de un desarenador seguido de una canaleta Parshall.

### 6.1. Predimensionamientos

En la fase de predimensionamiento, se indica la secuencia de pasos para la obtención de los valores de dimensionamiento de las estructuras hidráulicas de acuerdo a las metodologías aludidas, basado en una hoja de cálculo diseñada en Excel, de la cual se anexan recortes al final.

#### 6.1.1. Desarenador.

1. Abrir la hoja de cálculo (Anexo B) y situarse en el apartado denominado “Desarenador”
2. Ingresar los datos de las celdas resaltadas en color rojo
3. A partir de los datos ingresados, la hoja de Excel, calcula los valores de las variables y dimensiones del desarenador según la metodología de López Cualla, presentando un resumen de las dimensiones de la estructura hidráulica en la parte superior derecha.

A continuación, se presentan detalladamente las ecuaciones de las variables y dimensiones calculadas; expuestas y vinculadas correspondientemente por medio de comentarios al apartado denominado “Tablas y ecuaciones referencia” de la hoja de Excel.

- a) Velocidad de sedimentación de la partícula

$$V_s = \frac{g * (\rho_s - \rho)}{18\mu} * d^2$$

- b) Relación  $\Theta/t$

Determinada de acuerdo a la Tabla 2, para el caso en cuestión

$$\frac{\theta}{t} = 3$$

c) Tiempo de sedimentación de la partícula

$$t = \frac{H}{V_s}$$

d) Periodo de retención hidráulico

Valor que se encuentra comprendido entre 0.5h y 4h

$$\frac{\theta}{t} = 3$$

$$\theta = t * 3$$

e) Volumen del tanque

$$V = \theta * Q$$

f) Área superficial del tanque

$$A_s = \frac{V}{H}$$

g) Dimensiones del tanque

Tomando una relación Longitud: Anchó entre 3:1 y 5:1, para el caso en cuestión de 4:1

$$B = \sqrt{\frac{A_s}{4}}$$

$$L = 4 * B$$

h) Carga Hidráulica superficial

Valor que se encuentra comprendido entre 15 y 80 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>\*d

$$q = \frac{Q}{A_s}$$

i) Velocidad de sedimentación teórica

$$V_0 = q$$

j) Diámetro de partícula teórico

En condiciones teóricas la remoción se podría dar con partículas hasta de  $d_0$ , pero en condiciones reales se podrían remover partículas con el diámetro mínimo ingresado en el paso 2 de la presente guía.

$$d_0 = \sqrt{\frac{V_0 * 18 * \mu}{g * (\rho_s - \rho)}}$$

k) Relación de tiempos y relación de velocidades

$$\frac{\theta}{t} = \frac{V_s}{V_0}$$

l) Velocidad Horizontal

$$V_h = \frac{Q}{W} = \frac{V_0 L}{H}$$

m) Velocidad horizontal máxima

$$V_{h \max} = 20 V_s$$

n) Velocidad de resuspensión máxima

Requisito:  $V_h < V_r$

$$V_r = \sqrt{\frac{8k}{f} * g * (\rho_s - \rho) * d}$$

### Valores para vertedero de salida

o) Altura lámina de agua

$$H_v = \left( \frac{Q}{1.84 * B} \right)^{\frac{2}{3}}$$

p) Velocidad sobre la cresta del vertedero

Requisito: > 0.3 m/s

$$V_v = \frac{Q}{B * H_v}$$

q) Alcance horizontal

$$X_s = 0.36 (V_v)^{\frac{2}{3}} + 0.6 (H_v)^{\frac{4}{7}}$$

### Pantalla de salida

r) Profundidad

$$Profundidad = \frac{H}{2}$$

s) Distancia vertedero

$$Distancia\ vertedero = 15H_v$$

### Pantalla de entrada

t) Profundidad

$$\text{Profundidad} = \frac{H}{2}$$

u) Distancia a la cámara de quietamiento

$$\text{Distancia a la cámara de quietamiento} = \frac{L}{4}$$

### Almacenamiento de lodos

Se contempla una relación Longitud: profundidad de 1:10

v) Profundidad máxima

$$\text{Profundidad máxima} = \frac{L}{10}$$

w) Distancia punto de salida a la cámara de quietamiento

$$\text{Distancia. pto. de salida a la cámara de quiete.} = \frac{L}{3}$$

x) Distancia punto de salida al vertedero salida

$$\text{Distancia. pto. de salida al vertedero salida} = \frac{2L}{3}$$

y) Pendiente transversal

Requerimiento: pendientes con valores entre 1% y 8%

Se asumen: Profundidad máxima adoptada

Profundidad mínima adoptada

$$\text{Pendiente transversal} = \frac{P_{max}a - P_{min}a}{B} * 100$$

z) Pendiente longitudinal (en L/3)

$$\text{Pendiente longitudinal (en } \frac{L}{3}) = \frac{P_{max}a - P_{min}a}{L/3} * 100$$

aa) Pendiente longitudinal (en  $2L/3$ )

$$\text{Pendiente longitudinal (en } \frac{2L}{3}) = \frac{P_{max}a - P_{min}a}{2L/3} * 100$$

### **Cámara de quietamiento**

bb) Profundidad cámara

$$\text{Profundidad camara} = \frac{H}{3}$$

cc) Ancho cámara

$$\text{Ancho camara} = \frac{B}{3}$$

Rebose de la cámara de quietamiento

Se tienen en cuenta los datos de condiciones de tubería de entrada ingresados en el paso 2

dd) Caudal de exceso

$$Q_{exceso} = Q_0 - Q$$

ee) Altura de exceso

$$H_e = \left( \frac{Q_{exceso}}{1.84 * L_e} \right)^{\frac{2}{3}}$$

ff) Velocidad de exceso

$$V_e = \frac{Q_{exceso}}{H_e * L_e}$$

gg) Alcance horizontal

$$X_s = 0.36 * (V_e)^{\frac{2}{3}} + 0.6 * (H_e)^{\frac{4}{7}}$$

### **Perfil hidráulico**

El perfil hidráulico se establece para las condiciones de funcionamiento con un módulo que trabaja con el caudal máximo diario más las necesidades de la planta de purificación.

hh) Caudal del perfil hidráulico

$$Q_{ph} = QMD + Q_{requerimiento}$$

ii) Velocidad 2

$$V_2 = \frac{Q_{ph}}{Pc * Ac}$$

jj) Perdidas a la entrada de la cámara de quietamiento

Tomando:  $K=0.2$ , debido a la disminución de velocidad.

$V_1$  = valor ingresado en las condiciones de tubería de entrada, paso 2

$$h_m = k\Delta * \frac{(V_1 - V_2)^2}{2g}$$

kk) Perdidas a la entrada de la zona de sedimentación

Tomando:  $K = 0.1$

$V_1$  = Valor de  $V_2$  calculado

$V_2 = V_h$

$$h_m = k\Delta * \frac{(V_1 - V_2)^2}{2g}$$

ll) Perdidas por las pantallas inicial y final

$$A_0 = B * \text{profundidad pantalla}$$

$$H = \left(\frac{1}{2g}\right) * \left(\frac{Q_{ph}}{C_d * A_0}\right)^2$$

### Cálculo en la tubería de excesos y lavado

mm)

Donde L.E son las pérdidas de accesorios en la conducción

$$J = \frac{\text{Altura disponible}}{L.E.}$$

nn) Caudal inicial

$$Q_{inicial} = 0.2785 * CD^{2.63} * J^{0.54}$$

oo) Velocidad

$$V = \frac{Q_{inicial} * 4}{\pi * (\Phi_{real})^2}$$

pp) Cabeza de velocidad

$$\left(\frac{V^2}{2g}\right)$$

qq) Coeficiente Cd

$$C_d = \frac{Q}{A_0 \sqrt{2gH}}$$

rr) Tiempo de vaciado

$$A_0 = \text{Cota de lamina de agua sobre la tubería} \\ - \text{Cota entrega del desague de lavado}$$

$$t = \frac{2A_s}{C_d A_0 \sqrt{2g}} \text{Altura disponible}^{\frac{1}{2}}$$

Finalmente se calculan las cotas de diferentes puntos del desarenador.

<b>Condiciones de diseño</b>		
		Unidades
Qmd (2047)	80.06	Lts
QMD (2047)	96.08	Lts
QMD (2047)	0.09608	m <sup>3</sup> /s
Periodo de diseño	25	Años
Numero de módulos	1	
Caudal de requerimiento PTAP	1.1	Lts
Diámetro de las partículas a remover	0.005	cm
Porcentaje de remoción	75	%
Temperatura	13	°C
Viscosidad cinemática ( $\mu$ )	0.01202	cm <sup>2</sup> /s
Grado de desarenador (n)	1	
Peso específico de partícula ( $\rho_s$ )	2.65	g/cm <sup>3</sup>
Peso específico del líquido ( $\rho$ )	1	g/cm <sup>3</sup>
Altura Útil (H)	1.8	m
Relación Longitud:Ancho	4:1	
Borde Libre	0.3	m
Aceleración de la Gravedad (g)	981	cm/s <sup>2</sup>
Longitud de conducción	70	m
Perdidas por accesorios conducción	93.50	m
Cota lamina de tubería entrada	98.87	m.s.n.m
Cota batea tubería de entrada	98.74	m.s.n.m
Cota de la corona de muros	99.17	m.s.n.m
Cota entrega del desague de lavado	95.05	m.s.n.m

<b>Condiciones de la tubería de entrada</b>		
Qo	0.0162	m <sup>3</sup> /s
Vo	0.5	m/s
d	0.203(8")	m
Q	0.0101	m <sup>3</sup> /s
V	0.3	m/s
D	0.203(8")	m

<b>Valores Adoptados</b>		
Longitud de vertedero (Lv)	0.5	m
Profundidad máxima adoptada	1.2	m
Profundidad mínima adoptada	0.71	m
Largo cámara (Lc)	1	m
Diámetro nominal tubería de exceso	0.16828	m
Diámetro real tubería de exceso	0.16086	m
C	150	

Figura 19. Hoja de cálculo, condiciones de diseño, apartado "Desarenador", tomada de Software Excel.

Cálculo de los parámetros de Sedimentación.		
Vs	0.19	cm/s
$\theta/3$	3	
t	962.40	s
$\theta$	2887.21	s
	0.80	h
		Cumple
V	277.40	m <sup>3</sup>
A <sub>s</sub>	154.11	m <sup>2</sup>
B	6.21	m
L	24.83	m
q	0.0006	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> s
	53.87	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> d
		Cumple
V <sub>s</sub>	0.0006	m/s
	0.06	cm/s
d <sub>s</sub>	0.0029	cm
	0.03	mm
V <sub>s</sub> /V <sub>s</sub>	3	
		Cumple
V <sub>s</sub>	0.009	m/s
	0.86	cm/s

V <sub>1,000</sub>	3.74	cm/s
V <sub>s</sub>	9.29	cm/s
		Cumple
Cálculo de los elementos del desarenador		
Vertedero de salida		
H <sub>s</sub>	0.041	m
V <sub>s</sub>	0.37	m/s
		Cumple
X <sub>s</sub>	0.28	m
Pantalla de salida		
Profundidad	0.9	m
Distancia vertedero	0.62	m
Pantalla de entrada		
Profundidad	0.9	m
Distancia a la cámara de aquietamiento	6.21	m
Almacenamiento de lodo		
Relación longitud: profundidad	10	
Profundidad máxima	2.48	m
Distancia,pto.de salida a la cámara de aquiet.	8.28	m

Distancia,pto.de salida al vertedero salida	16.55	m
Pendiente transversal	7.89	%
		Cumple
Pendiente longitudinal en L/3	5.92	%
		Cumple
Pendiente longitudinal en 2L/3	2.96	%
		Cumple
Cámara de aquietamiento		
Profundidad cámara	0.60	m
Ancho cámara (Ac)	2.07	m
Rebose de la cámara de aquietamiento		
Q <sub>rebose</sub>	0.0061	m <sup>3</sup> /s
H <sub>s</sub>	0.022	m
V <sub>s</sub>	0.27	m/s
X <sub>s</sub>	0.22	m
L <sub>s</sub>	2.07	m
Perfil hidráulico		
Q <sub>s</sub>	0.097	m <sup>3</sup> /s
Perdidas a la entrada de la cámara de aqui		
V <sub>s</sub>	0.078	m/s

h <sub>s</sub>	5.01E-04	m
Perdidas a la entrada de la zona de sedime		
h <sub>s</sub>	2.5E-05	m
Perdidas por las pantallas inicial y final		
A <sub>s</sub>	5.59	m
H	0.0000	m
Cálculo de diámetros de la tubería de excesos y		
Cota de lamina de agua sobre la tubería	98.87	m.s.n.m
Altura disponible	3.82	m
J	0.041	m/m
Q <sub>rebose</sub>	0.061	m <sup>3</sup> /s
V	2.99	m/s
$\left(\frac{V^2}{2g}\right)$	0.46	m
Cd	0.39	
t <sub>rebose</sub>	3874.03	s
	64.57	min

Figura 20. Hoja de cálculo, cálculo de dimensiones, apartado "Desarenador", tomada de Software Excel.

Cota de batea de la tubería de entrada	98.74
Cota de la lámina de agua a la entrada	98.87
Cota de la lámina de agua en la cámara de aquietamiento	98.87
Cota de la cresta del vertedero cámara de aquietamiento	98.85
Cota fondo de la cámara de aquietamiento	98.27
Cota lamina de agua en la zona de sedimentación	98.87
Cota de la corona de los muros del desarenador	99.17
Cota inferior de pantallas de entrada y salida	97.97
Cota del fondo de profundidad útil de sedimentación	97.07
Cota placa fondo a la entrada y salida del desarenador	96.36
Cota placa fondo en punto de desagüe	95.87
Cota de batea de la tubería de lavado	95.87
Cota clave de la tubería de lavado	96.36
Cota cresta del vertedero de salida	98.83
Cota lámina de agua de la cámara de recolección	97.97
Cota fondo de la cámara de recolección (supuesta)	97.67

Figura 21. Hoja de cálculo, cálculo de cotas, apartado "Desarenador", tomada de Software Excel.

Dimensiones del Desarenador		Unidades
Ancho (B)	6.21	m
Largo (L)	24.83	m
Altura útil (H)	1.8	m
Borde Libre (BL)	0.3	m
Altura total (HT)	2.1	m
Cámara de aquietamiento		
Profundidad (Po) (H/3)	0.60	m
Ancho (Ac) (B/3)	2.07	m
Largo cámara (Lc)	1	m
Largo rebose de la cámara (Lre)	2.07	m
Pantalla de entrada		
Profundidad (H/2)	0.9	m
Distancia a la cámara de aquietamiento	6.21	m
Almacenamiento de lodos		
Dist. pto de salida a la cámara de aquiet. (L/3)	8.28	m
Dist. pto de salida al vertedero salida (2L/3)	16.55	m
Pendiente transversal	7.89	%
Pendiente Longitudinal en L/3	5.92	%
Pendiente Longitudinal en 2L/3	2.96	%
Pantalla de salida		
Profundidad (H/2)	0.9	m
Distancia al vertedero de salida 15Hv	0.62	m
Vertedero de salida		
Longitud vertedero (Lv)	0.5	m
Altura lamina de agua (Hv)	0.041	m
Alcance horizontal (Xs)	0.28	m

Figura 22. Hoja de cálculo, cuadro resumen de dimensiones, apartado "Desarenador", tomada de Software Excel.

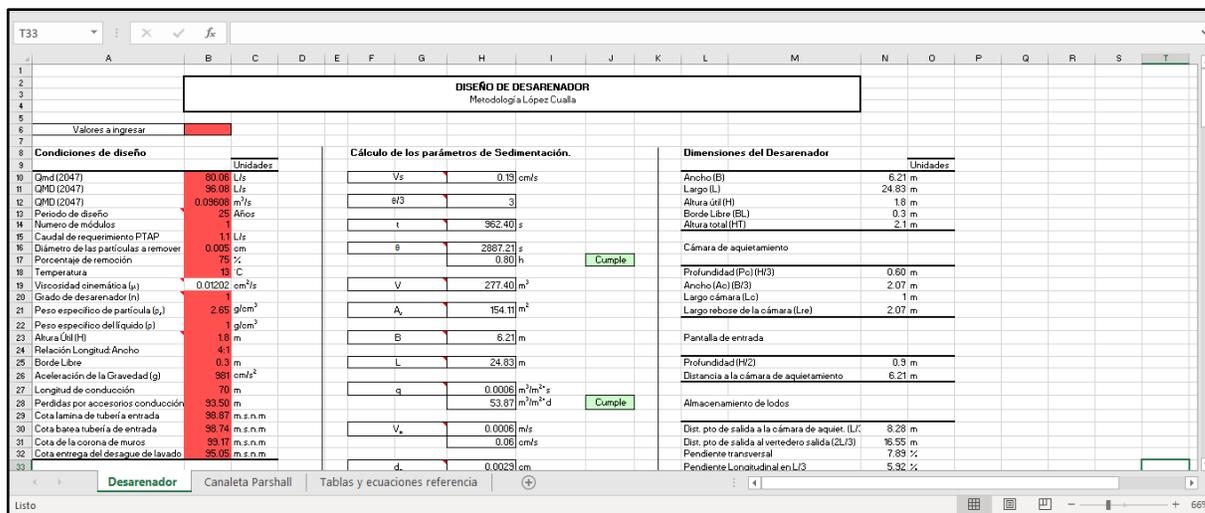


Figura 23. Hoja de cálculo, apartado "Desarenador", tomada de Software Excel.

### 6.1.2. Canaleta Parshall.

1. Abrir la hoja de cálculo (Anexo B) y situarse en el apartado denominado “Canaleta Parshall”
2. Ingresar los datos de las celdas resaltadas en color rojo
3. Elegir un ancho de garganta (W) según el caudal requerido y basado en la Tabla 4
4. A partir de los datos ingresados y el ancho de garganta seleccionado, la hoja de Excel, calcula los valores de las variables y dimensiones de la Canaleta Parshall basada en (Azevedo y Acosta) y (Espinosa Salgado & Olano Gaitán, 2018), presentando un resumen de las dimensiones de la estructura hidráulica en la parte superior derecha.

A continuación, se presentan detalladamente las ecuaciones de las variables y dimensiones calculadas; expuestas y vinculadas correspondientemente por medio de comentarios al apartado denominado “Tablas y ecuaciones referencia” de la hoja de Excel.

#### a) Lámina de agua

El valor del coeficiente k y el exponente n se toman de la Tabla 5, según el ancho de garganta definido

$$ha = \left(\frac{Q}{k}\right)^{\frac{1}{n}}$$

b) Ancho de la canaleta en la sección de medida

El valor de D se toma de la Tabla 3, según el ancho de garganta definido

$$D' = \frac{2}{3}(D - W) + W$$

c) Velocidad en la sección de medida

$$Va = \frac{Q}{Wa * ha}$$

d) Energía total disponible

El valor de N se toma de la Tabla 3, según el ancho de garganta definido

$$E1 = \frac{(Va)^2}{2 * g} + ha + N$$

e) Caudal específico en la garganta de la canaleta

$$q = \frac{Q}{W}$$

f) Angulo  $\theta$

$$\theta = \text{Cos}^{-1} \left( \frac{-q * g}{\left(\frac{2}{3} * g * E1\right)^{1.5}} \right)$$

g) velocidad antes del resalto

$$V1 = 2 * \text{Cos} \left( \frac{\theta}{3} \right) * \left( \frac{2 * g * E1}{3} \right)^{0.5}$$

h) Altura de agua antes del resalto

$$h_2 = \frac{q}{V_1}$$

i) Número de Froude

$$Fr = \frac{V_1}{\sqrt{g * h_2}}$$

j) Altura del resalto

$$h_3 = \frac{h_2}{2} * (\sqrt{1 + 8 * Fr^2} - 1)$$

k) Velocidad en el resalto

$$V_2 = \frac{Q}{W * h_2}$$

l) Altura en la sección de la salida de la canaleta

Los valores de N y K' se toma de la Tabla 3, según el ancho de garganta definido

$$h_4 = h_3 - (N - K')$$

m) Velocidad en la sección de salida

El valor de C se toma de la Tabla 3, según el ancho de garganta definido

$$V_3 = \frac{Q}{C * h_4}$$

n) Pérdida de carga en el resalto

El valor de  $N$  se toma de la Tabla 3, según el ancho de garganta definido

$$hp = ha + N - h3$$

o) Tiempo de mezcla

El valor de  $G$  se toma de la Tabla 3, según el ancho de garganta definido

$$Tr = \frac{2G}{(V1 + V3)}$$

p) Gradiente de velocidad

El valor de  $\sqrt{\frac{\gamma}{\mu}}$  se toma de la Tabla 7

$$G = \sqrt{\frac{\gamma}{\mu} \frac{hp}{Tr}}$$

Tabla 9

Valores de  $\sqrt{\frac{\gamma}{\mu}}$ .

Temperatura (°C)	$\sqrt{\frac{\gamma}{\mu}}$	Temperatura (°C)	$\sqrt{\frac{\gamma}{\mu}}$
0	2335.90	15	2925.94
1	2377.85	16	2961.95
2	2419.42	17	2997.88
3	2460.62	18	3033.44
4	2501.44	19	3068.62
5	2541.88	20	3103.42
6	2581.95	21	3137.85
7	2621.64	22	3171.90
8	2660.96	23	3205.58
9	2699.90	24	3238.88
10	2738.46	25	3271.80
11	2776.65	26	3304.35
12	2814.46	27	3336.52
13	2851.90	28	3368.52
14	2888.96	29	3399.74

Fuente: Espinosa Salgado, S., & Olano Gaitan, D. A. (2018). *Desarrollo De Software Para El Diseño Hidráulico De Canaleta Parshall Como Estructura Para Mezcla Rápida En El Tratamiento Del Agua – Caso Aplicativo En Municipios De La Provincia Del Alto Magdalena*. Recuperado de <http://repository.unipiloto.edu.co/bitstream/handle/20.500.12277/5751/TESIS%20CANALETA%20PARSHALL.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Condiciones de diseño		Unidades
QMD (2047)	96.08	L/s
QMD (2047)	0.09608	m <sup>3</sup> /s
W	9	Pulgadas
W	0.229	m
Temperatura	15	°C
Aceleración de la Gravedad (g)	9.81	m/s <sup>2</sup>
$\sqrt{\gamma/\mu}$	2925.94	N/m <sup>3</sup>
k	0.535	
n	1.53	
D	0.575	m
N	0.114	m
G	0.457	m
C	0.38	m
K'	0.076	m

Figura 24. Hoja de cálculo, condiciones de entrada, apartado "Canaleta Parshall", tomada de Software Excel.

Determinación del ancho de garganta		
ha	0.33	m
D'	0.46	m
Va	0.64	m/s
E1	0.46	m
q	0.42	m <sup>3</sup> /s
o	2.48	
v1	2.35	m/s
h2	0.18	m
Fr	1.78	
h3	0.37	m
V2	2.35	m/s
h4	0.33	m
V3	0.77	m/s
hp	0.07	m
Tr	0.29	s
G	1442.72	s <sup>-1</sup>

Figura 25. Hoja de cálculo, cálculo de dimensiones, apartado "Canaleta Parshall", tomada de Software Excel.

Requisitos		Dimensiones de la Canaleta Parshall	
			Unidades
$\frac{h2}{ha}$	0.55	W	9 Pulgadas
		W	0.229 m
Fr	1.78	A	0.88 m
		B	0.864 m
		C	0.38 m
Tr	0.29	D	0.575 m
		E	0.61 m
G	1442.72	F	0.305 m
		G	0.457 m
		K	0.076 m
		N	0.114 m

Figura 26. Hoja de cálculo, requisitos y cuadro resumen de dimensiones, apartado "Canaleta Parshall", tomada de Software Excel.

Condiciones de diseño		Cálculo de los parámetros de Sedimentación.		Dimensiones del Desarenador	
	Unidades				Unidades
10 Qmd (2047)	80.08 L/s	$V_s$	0.13 cm/s	Ancho (B)	6.21 m
11 QMD (2047)	36.08 L/s	$\theta$	3	Largo (L)	24.83 m
12 QMD (2047)	0.09068 m <sup>3</sup> /s	$t$	3083.34 s	Altura útil (H)	2 m
13 Periodo de diseño	25 Años	$\theta$	3208.01 s	Borde Libre (BL)	0.3 m
14 Numero de módulos		$\theta$	0.83 h	Altura total (HT)	2.3 m
15 Caudal de requerimiento PTAP	1 L/s	$V$	308.23 m <sup>3</sup>	Cámara de aquietamiento	
16 Diámetro de las partículas a remover	0.005 cm	$A_v$	154.11 m <sup>2</sup>	Profundidad (Po) (H3)	0.67 m
17 Porcentaje de remoción	75 %	L	24.83 m	Ancho (Ao) (E3)	2.07 m
18 Temperatura	18 °C	$q$	0.0006 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> ·s	Largo cámara (Lc)	1 m
19 Viscosidad cinemática ( $\mu$ )	0.01202 cm <sup>2</sup> /s	$q$	53.87 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> ·d	Largo reboso de la cámara (Lre)	2.07 m
20 Grado de desarenador (n)		$V_s$	0.0006 m/s	Pantalla de entrada	
21 Peso específico de partícula ( $\rho_s$ )	2.65 g/cm <sup>3</sup>	$d$	0.0623 cm	Profundidad (H2)	1 m
22 Peso específico del líquido ( $\rho$ )	1 g/cm <sup>3</sup>			Distancia a la cámara de aquietamiento	6.21 m
23 Altura útil (H)	4.1 m			Almacenamiento de lodos	
24 Relación Longitud Ancho	4:1			Dist. pto de salida a la cámara de aquiet. (L1)	8.28 m
25 Borde Libre	0.3 m			Dist. pto de salida al vertedero salida (2L/3)	16.55 m
26 Aceleración de la Gravedad (g)	980 cm/s <sup>2</sup>			Pendiente transversal	7.98 %
27 Longitud de conducción	70 m			Pendiente Longitudinal en L3	5.92 %
28 Perdidas por accesorios conducción	33.50 m.s.n.m				
29 Cota lamina de tubería entrada	38.87 m.s.n.m				
30 Cota barea tubería de entrada	38.74 m.s.n.m				
31 Cota de la corona de muros	39.17 m.s.n.m				
32 Cota entrega del desagüe de lavado	35.00 m.s.n.m				

Figura 27. Hoja de cálculo, apartado "Canaleta Parshall", tomada de Software Excel.

## 6.2. Diseño en AutoCAD

En esta fase, se indica la secuencia de pasos implementados para la obtención del archivo de diseño de las estructuras hidráulicas en el software AutoCAD, a fin de impórtalo en el software de modelación CFD. Asimismo, se presentan los cortes y vistas de estas estructuras.

1. Diseño de las estructuras en el software tipo CAD
2. Uso de la función CONVASUPERF, para convertir los sólidos en superficie
3. Uso de la función \_SUBTRACT, para sustraer el área común de un conjunto de sólidos de otro sólido
4. Exportar el archivo en formato IGES

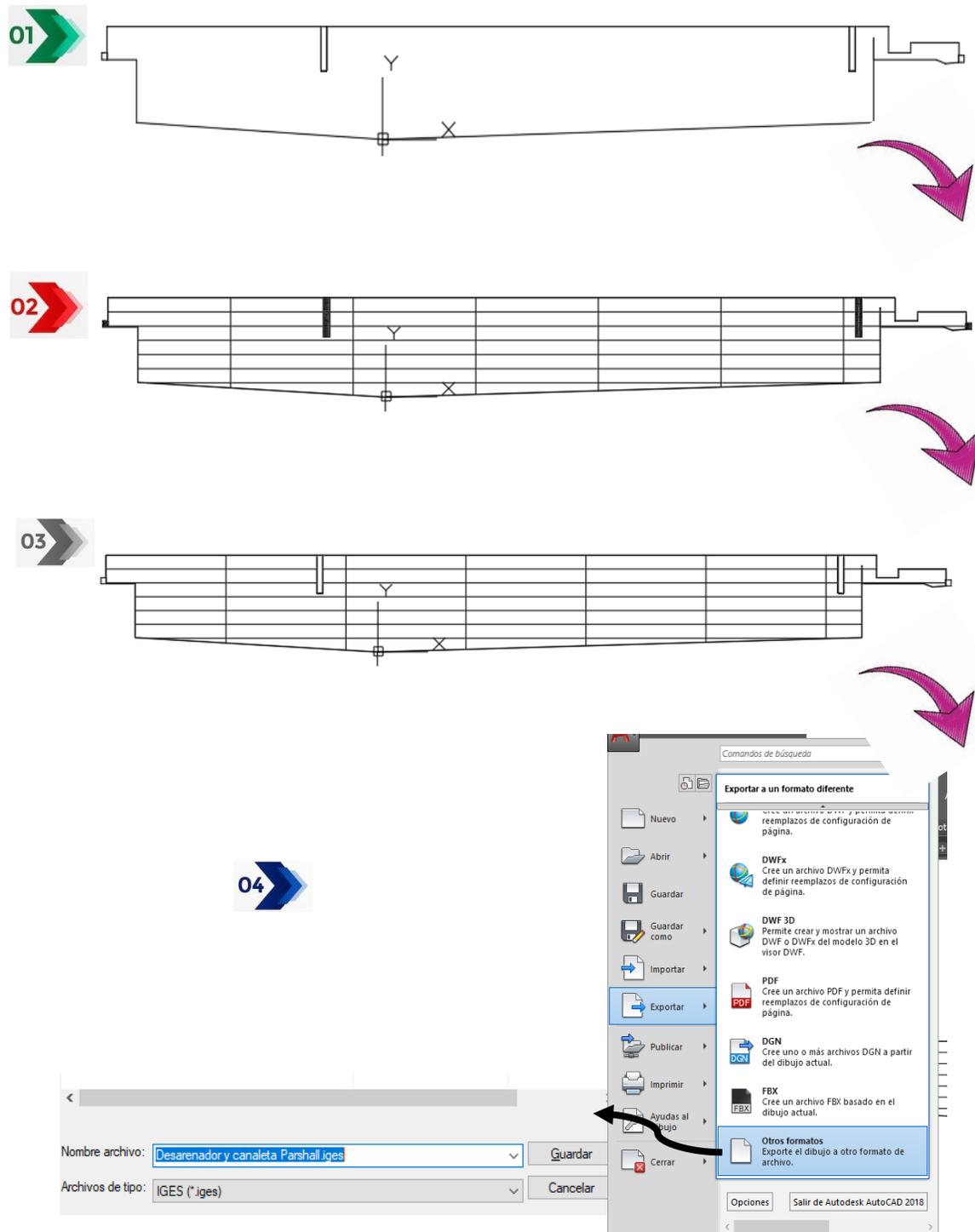


Figura 28. Pasos en la fase de “diseño en AutoCAD”, elaborado por autor

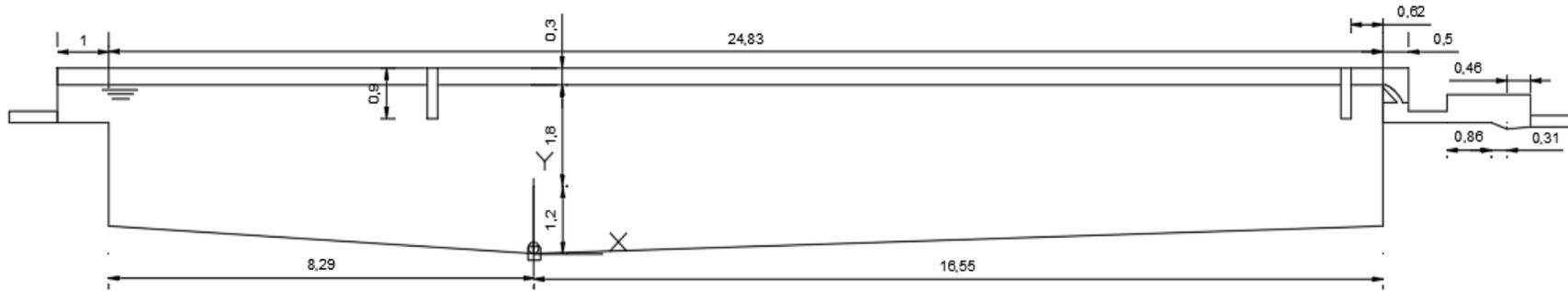


Figura 29. Corte longitudinal A-A de las estructuras hidráulicas, tomada de software AutoCAD.

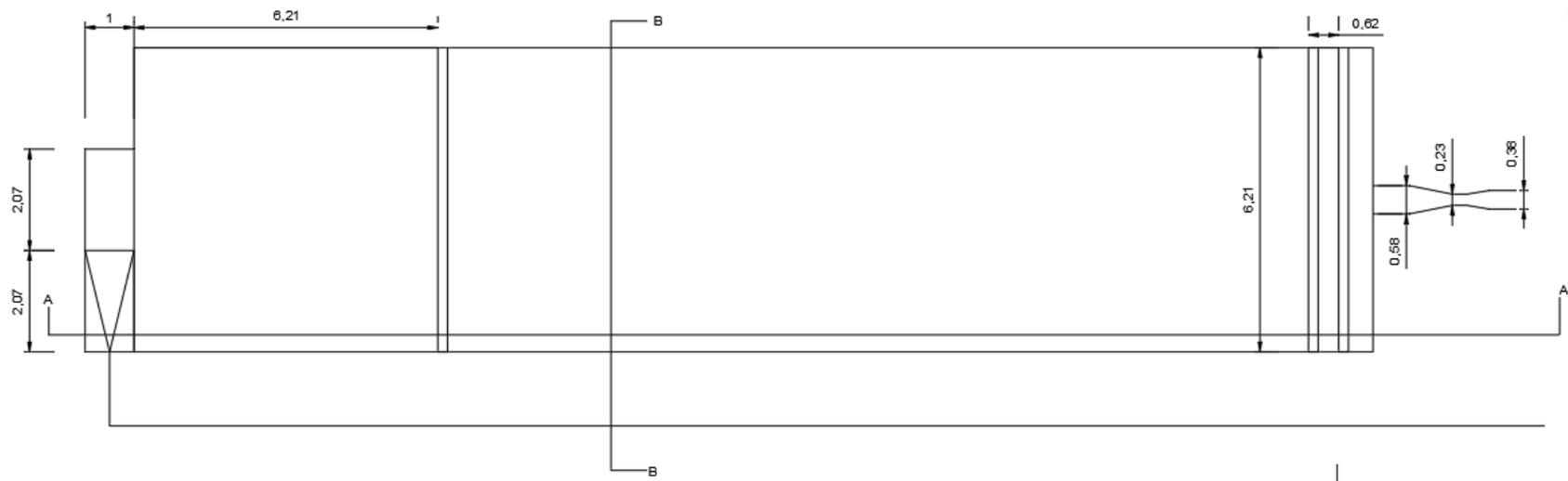


Figura 30. Vista en planta de las estructuras hidráulicas, tomada de software AutoCAD.

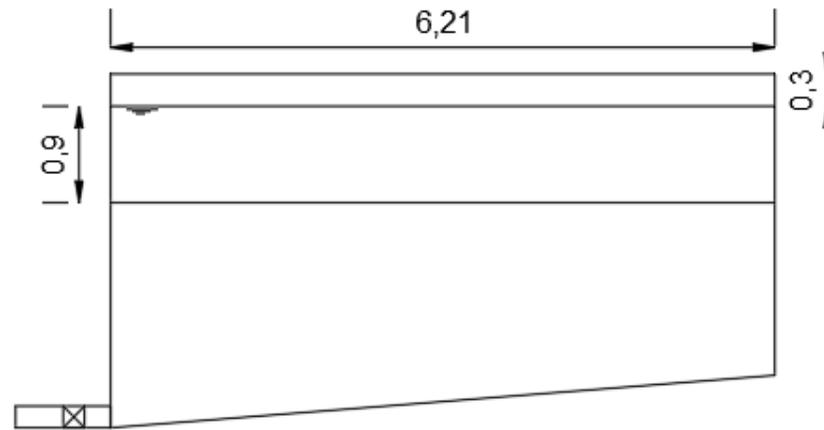


Figura 31. Corte longitudinal B-B de las estructuras hidráulicas, tomada de software AutoCAD.

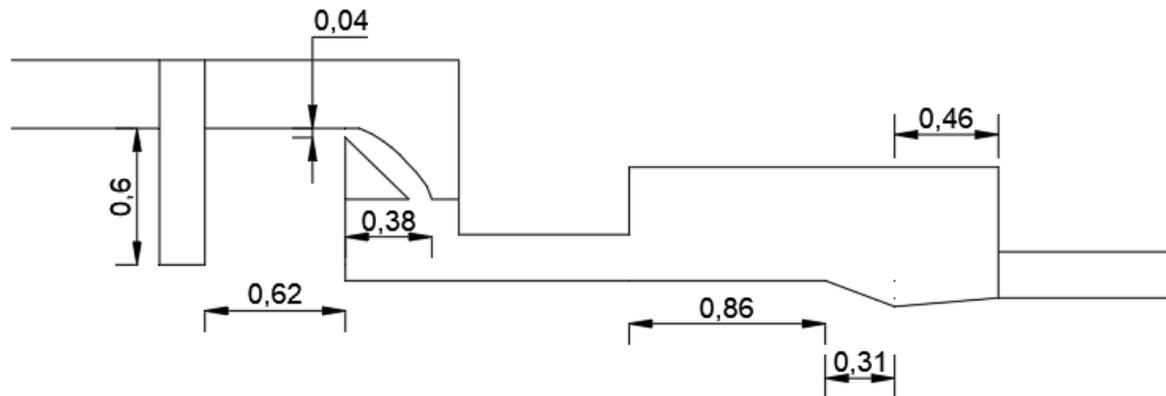


Figura 32. Detalle Vertedero de salida y Canaleta (corte), tomada de software AutoCAD.

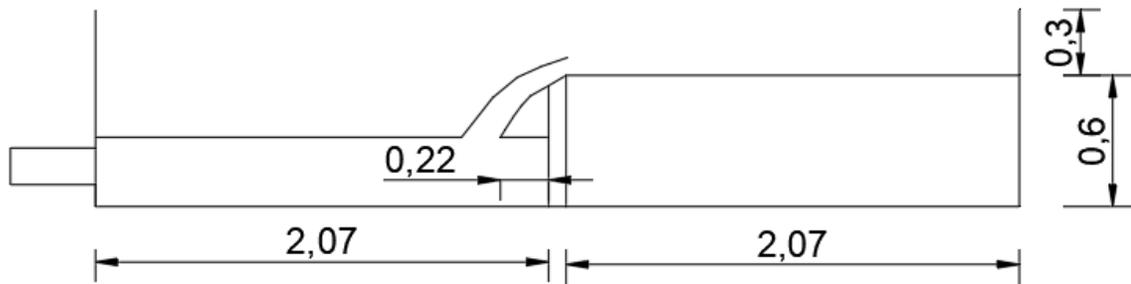
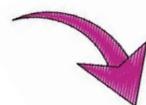
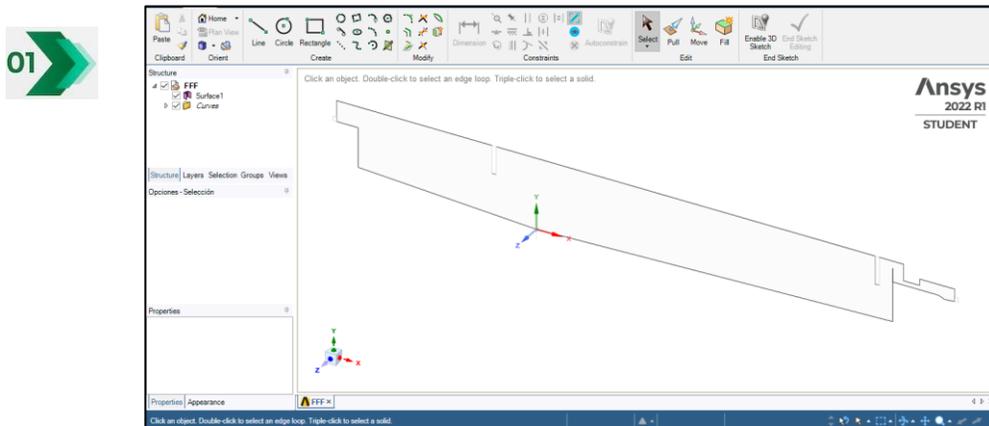


Figura 33. Detalle Cámara de aquietamiento (corte), tomada de software AutoCAD.

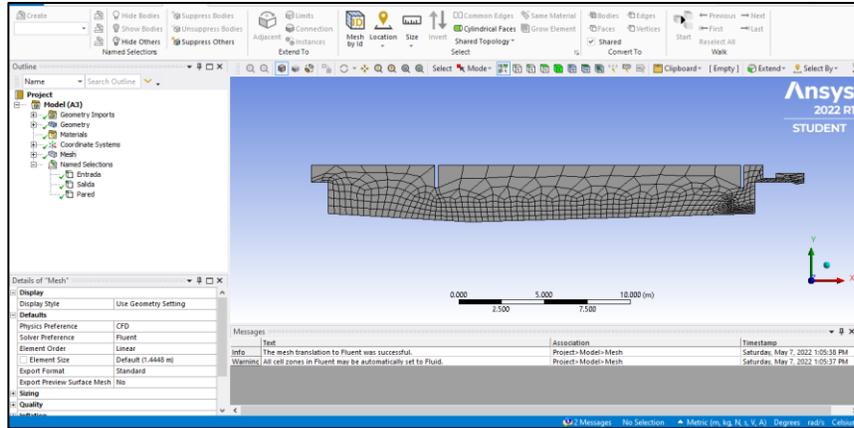
### 6.3. Simulación en ANSYS FLUENT

En esta fase, se indica la secuencia de pasos implementados para la simulación de las estructuras hidráulicas en la herramienta CFD.

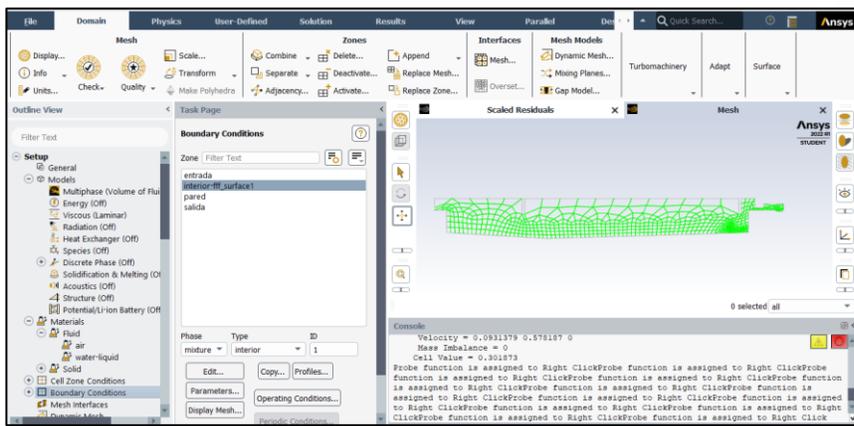
1. Insertar el archivo de formato IGES antes diseñado en el apartado denominado Geometry.
2. Asignar las condiciones de entrada y un mallado adecuado para las estructuras en el apartado denominado Mesh.
3. Marcar los recuadros correspondientes en el apartado Setup.
4. Asignar las características y valores correspondientes para la simulación en el apartado Solution.
5. Generar y analizar los resultados.



02



03



04

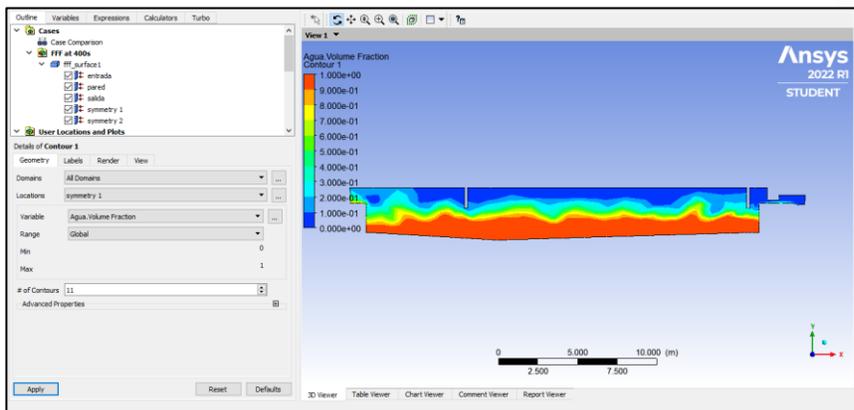


Figura 34. Pasos para la simulación CFD de las estructuras hidráulicas, tomada de software ANSYS FLUENT.

A continuación, se muestran los resultados gráficos de la simulación CFD de las estructuras hidráulicas

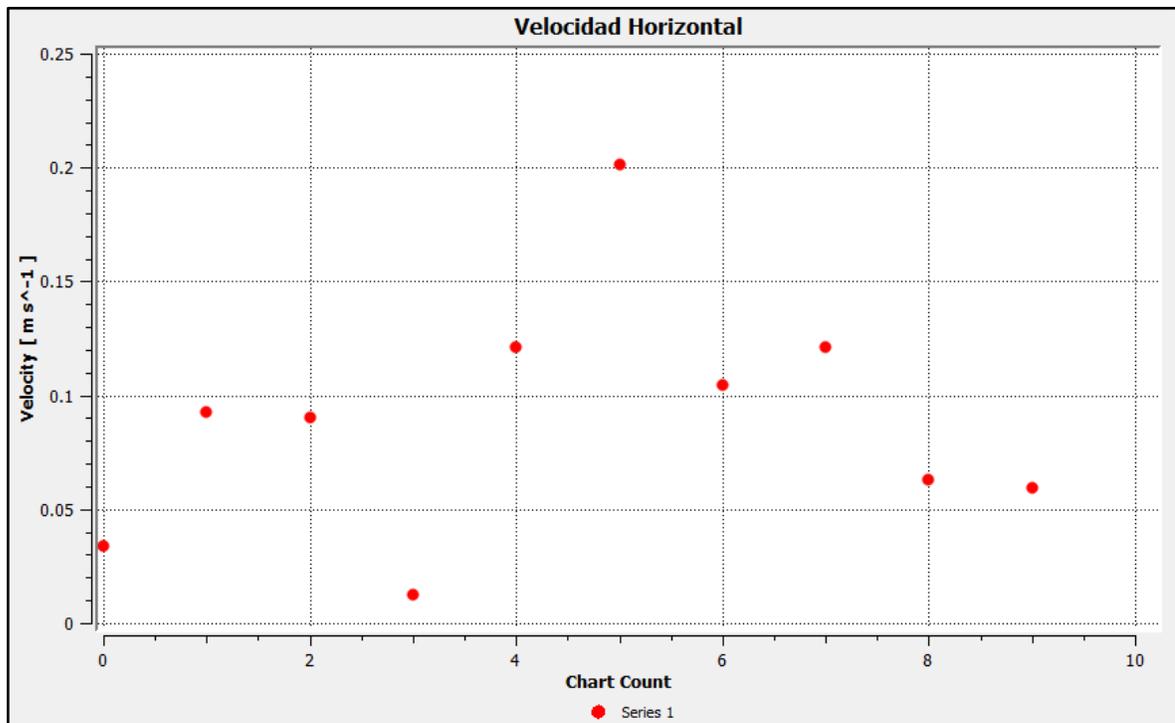


Figura 35. Velocidad horizontal en el desarenador, tomada de software ANSYS FLUENT.

En la figura 35, se observan los datos correspondientes a la velocidad horizontal tomada en el interior del desarenador, cuyo valor reiterativo es de 0.1 m/s, aproximadamente. Así mismo, el valor calculado por la hoja de Excel elaborada y aludida anteriormente para este parámetro es de 0.01 m/s; dejando una diferencia de 0.09 m/s entre los valores calculados. Esta diferencia podría deberse a la simulación bidimensional en ANSYS FLUENT, dando lugar al estudio en posteriores investigaciones de una posible corroboración y soporte de los resultados calculados mediante las metodologías expuestas para las estructuras diseñadas, mediante una simulación 3D, otorgando mayor exactitud a los resultados del modelo. Adicionalmente, se resalta la importancia de adquirir la licencia completa del software ya que la versión para estudiantes tiene bastantes limitantes, generando cálculos con menor certeza y disminuyendo la eficiencia de simulación.

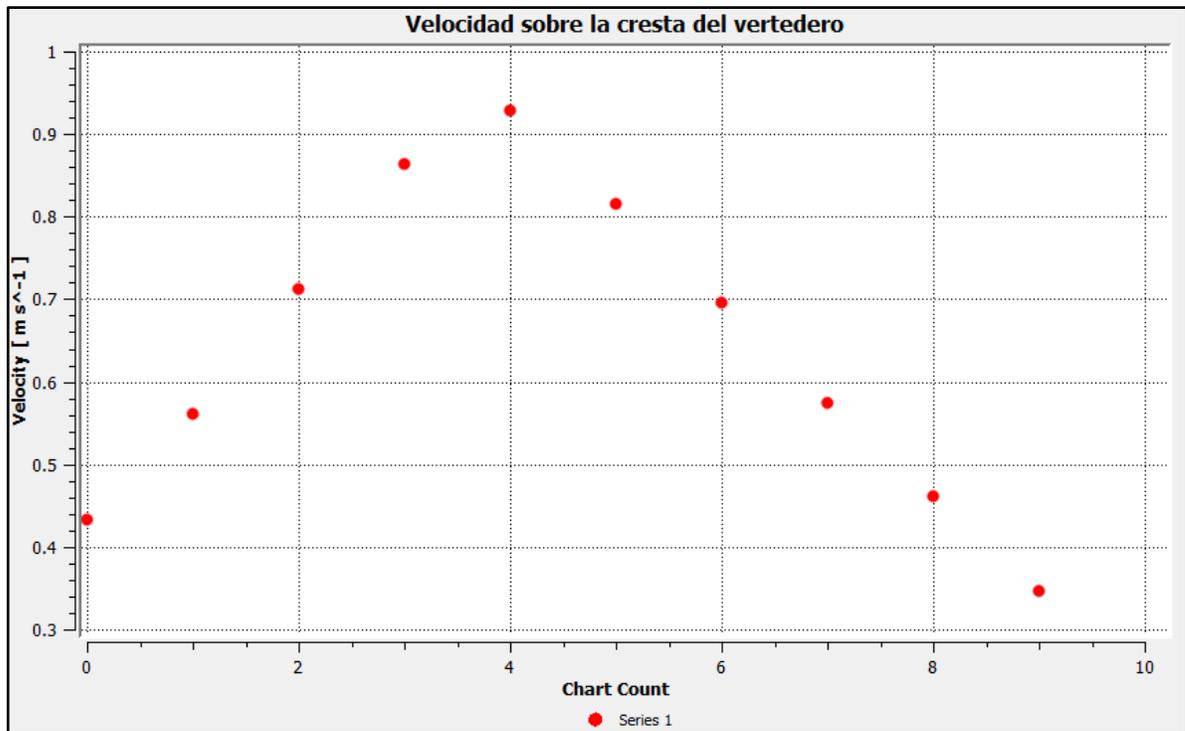


Figura 36. Velocidad en el la cresta del vertedero de salida, tomada de software ANSYS FLUENT.

En la figura 36, se observan los datos correspondientes a la velocidad sobre la cresta del vertedero, los cuales son superiores a 0.3 m/s, dando cumplimiento al requerimiento asignado por la metodología de López Cualla para este parámetro.

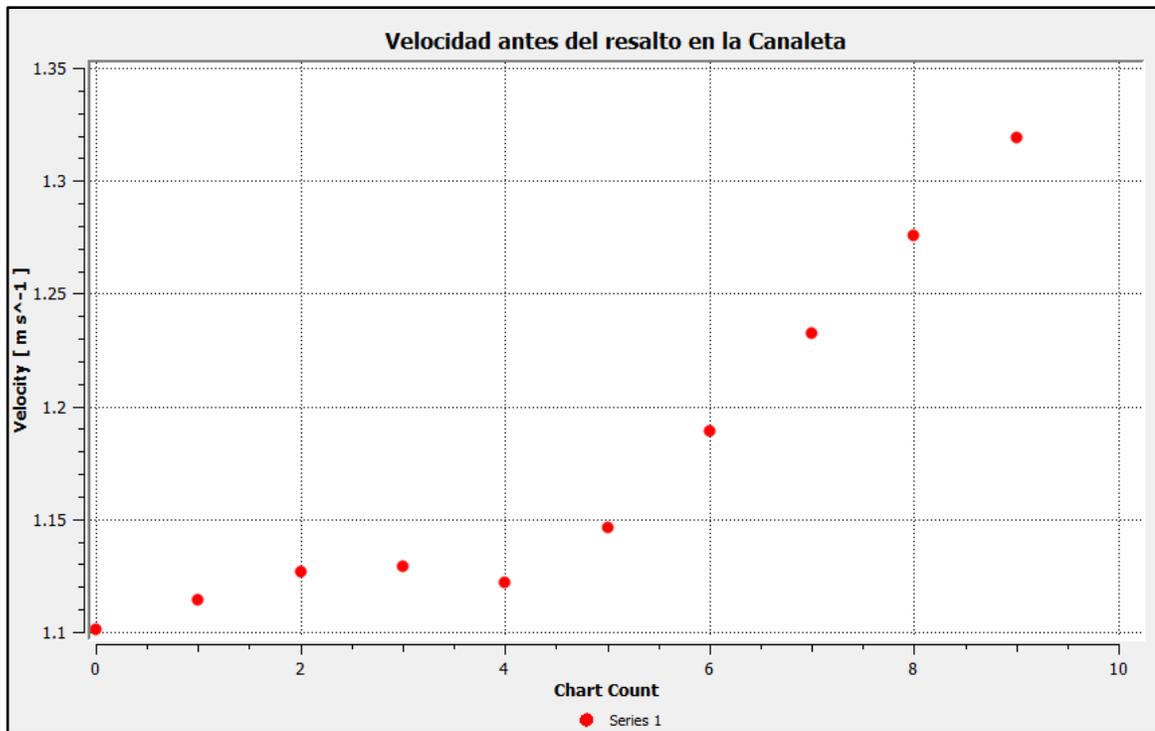


Figura 37. Velocidad antes del resalto en la canaleta, tomada de software ANSYS FLUENT.

En la figura 37, se observan los datos correspondientes a la velocidad antes del resalto en la canaleta, cuyo valor medio es de 1.2 m/s, aproximadamente. Así mismo, el valor calculado por la hoja de Excel elaborada y aludida anteriormente para este parámetro es de 2.35 m/s; dejando una diferencia de 1.15 m/s entre los valores calculados. Esta diferencia puede deberse, además de lo mencionado anteriormente a que el valor propuesto en la metodología es de un solo punto, por lo tanto, podría tener variaciones en la simulación.

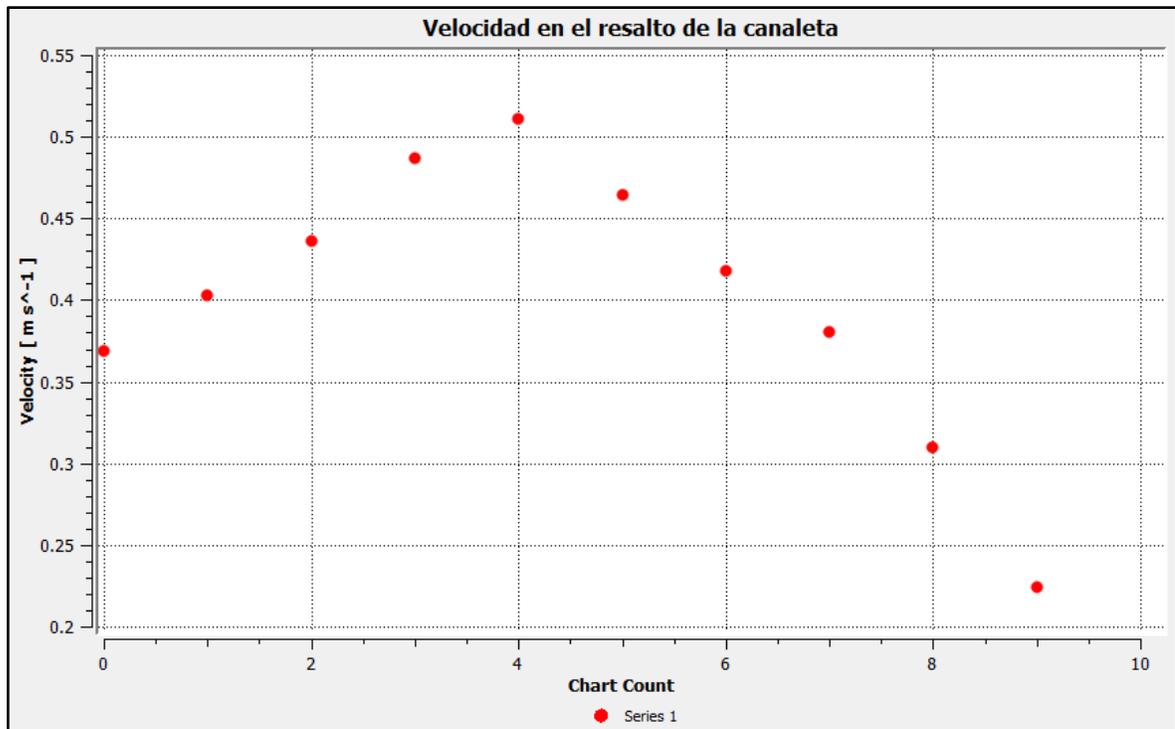


Figura 38. Velocidad en el resalto de la canaleta, tomada de software ANSYS FLUENT.

En la figura 38, se observan los datos correspondientes a la velocidad en el resalto de la canaleta, cuyo valor máximo es de 0.52 m/s, aproximadamente. Así mismo, el valor calculado por la hoja de Excel elaborada y aludida anteriormente para este parámetro es de 2.35 m/s; dejando una diferencia de 1.83 m/s entre los valores calculados. Esta diferencia podría deberse a lo mencionado anteriormente.

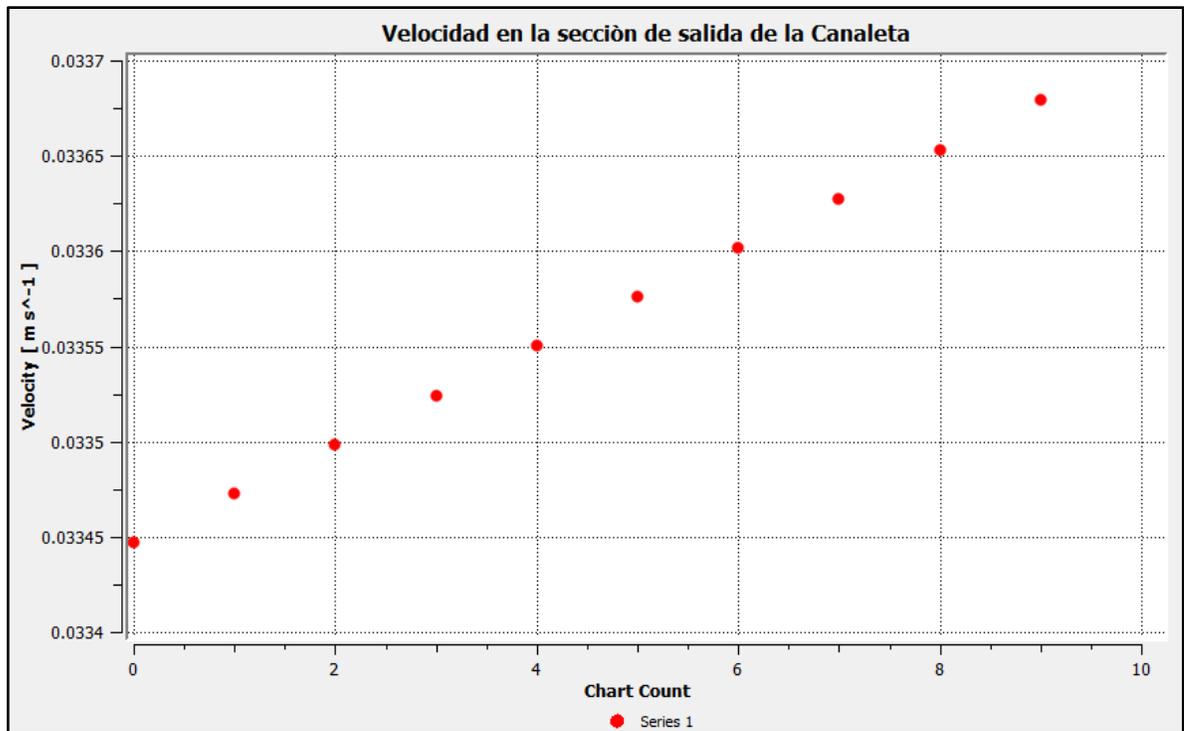


Figura 39. Velocidad en la sección de salida de la canaleta, tomada de software ANSYS FLUENT.

En la figura 39, se observan los datos correspondientes a la velocidad en la sección de salida de la canaleta, cuyo valor medio es de 0.18 m/s, aproximadamente. Así mismo, el valor calculado por la hoja de Excel elaborada y aludida anteriormente para este parámetro es de 0.77 m/s; dejando una diferencia de 0.59 m/s entre los valores calculados. Esta diferencia podría deberse a lo mencionado anteriormente.

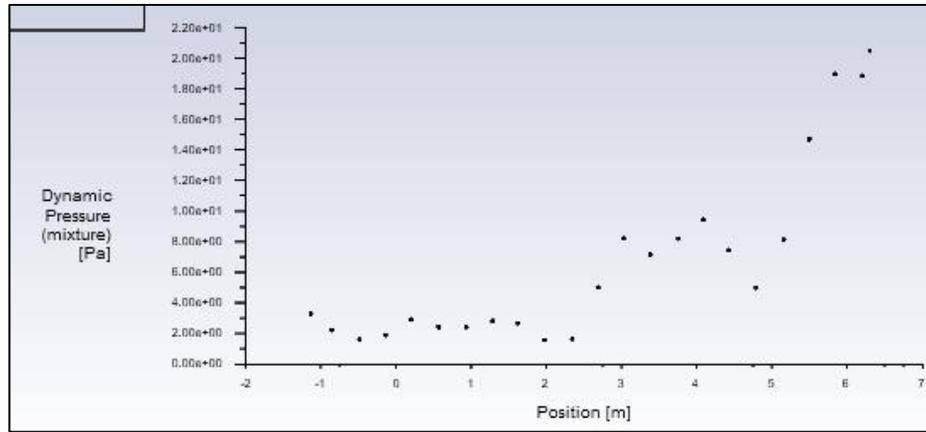


Figura 40. Presión dinámica en el desarenador, tomada de software ANSYS FLUENT.

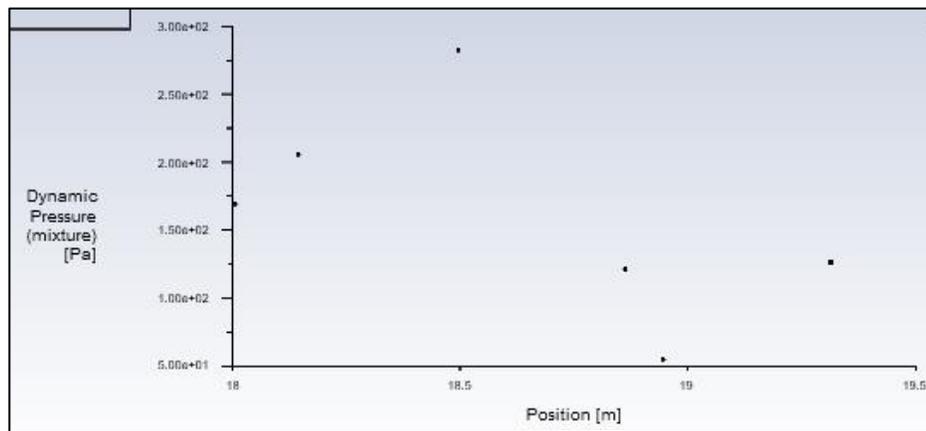


Figura 41. Presión dinámica en la canaleta, tomada de software ANSYS FLUENT.

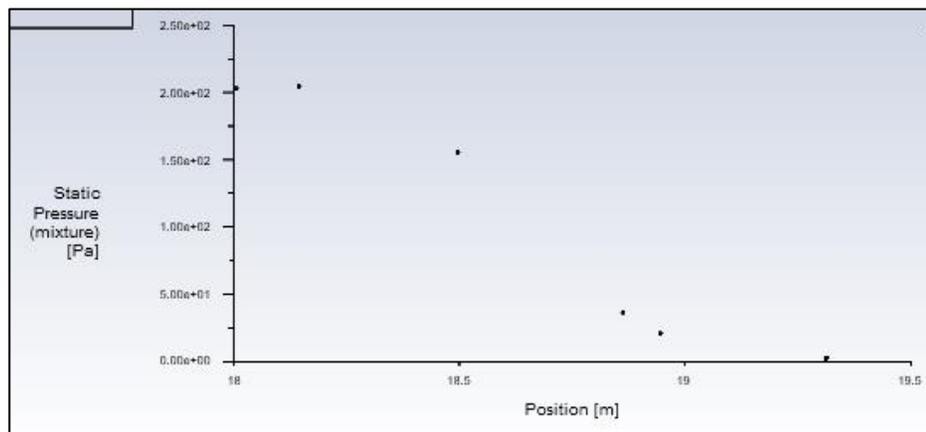


Figura 42. Presión estática en la canaleta, tomada de software ANSYS FLUENT.

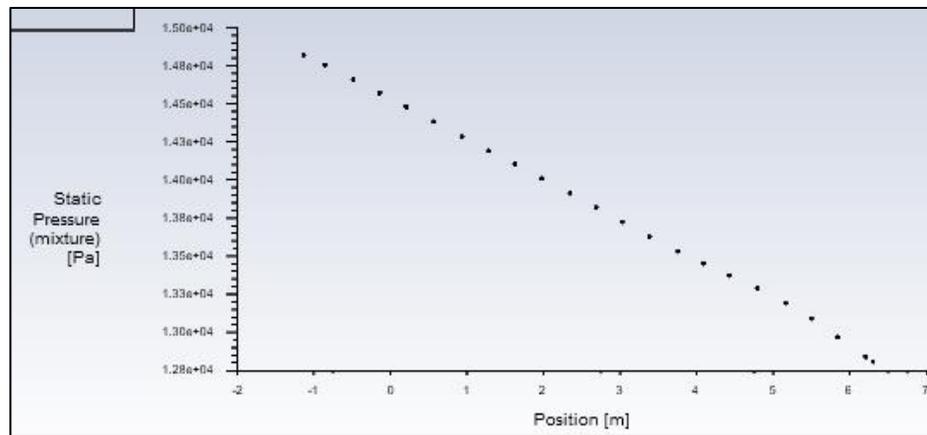


Figura 43. Presión estática en el desarenador, tomada de software ANSYS FLUENT.

En las figuras 40 a 43, se observan los datos correspondientes a las presiones estáticas y dinámicas tomadas en el interior de las estructuras diseñadas; resaltando la posibilidad de adquirir valores de parámetros adicionales a los enunciados por las metodologías expuestas para las estructuras diseñadas, en cualquier punto de las estructuras, importantes en la rectificación del funcionamiento y eficiencia de las mismas.

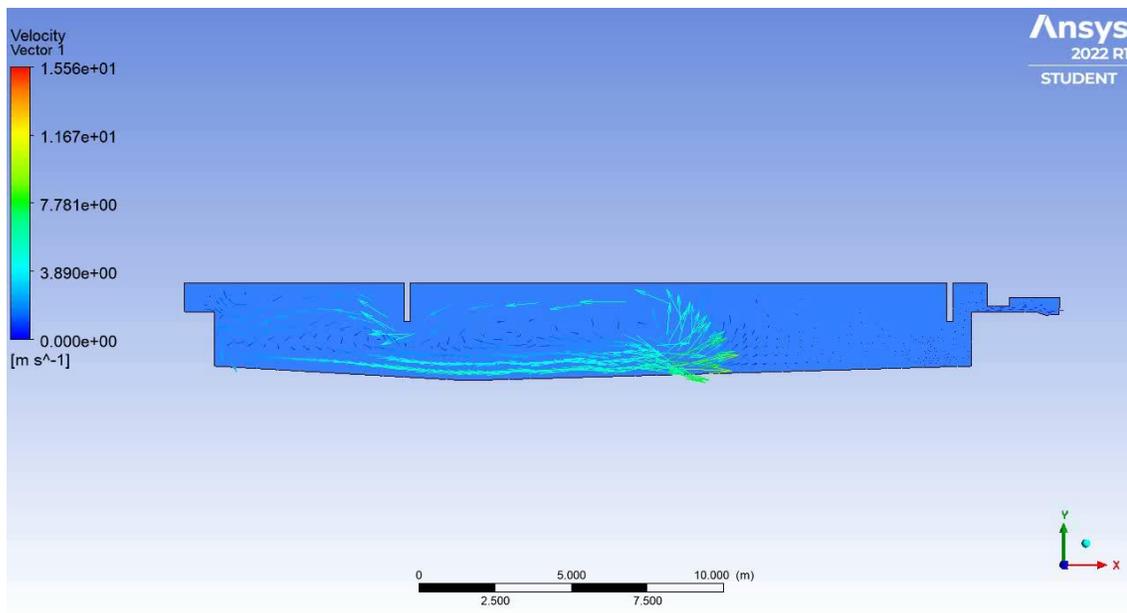


Figura 44. Líneas de flujo de las estructuras hidráulicas diseñadas en la etapa de llenado, tomada de software ANSYS FLUENT.

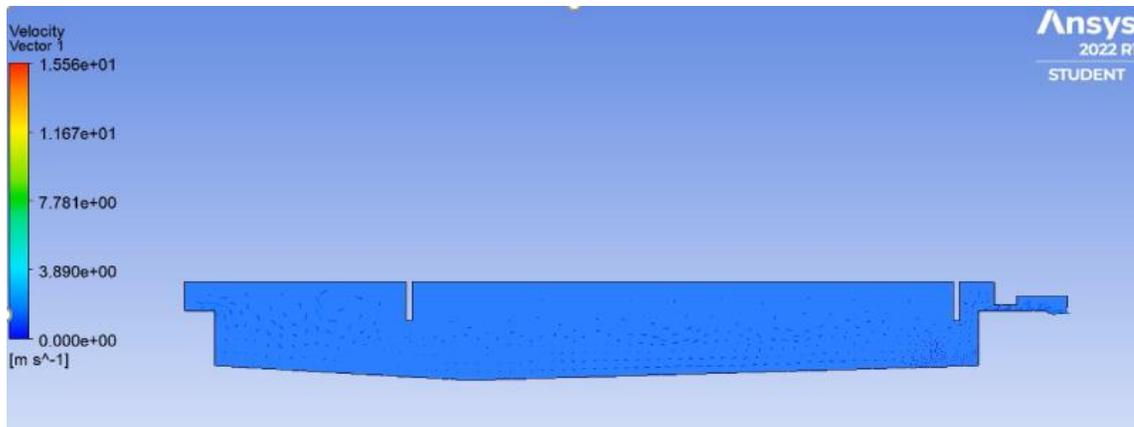


Figura 45. Líneas de flujo de las estructuras hidráulicas diseñadas en estado estacionario, tomada de software ANSYS FLUENT.

Por último, en las figuras 44 y 45, se evidencian las líneas de flujo de las estructuras diseñadas en la etapa de llenado y al momento en el que se llega a estado estacionario; para lo cual, se infiere una velocidad de resuspensión baja, en la zona de almacenamiento de lodos y por ende la no resuspensión de las partículas.

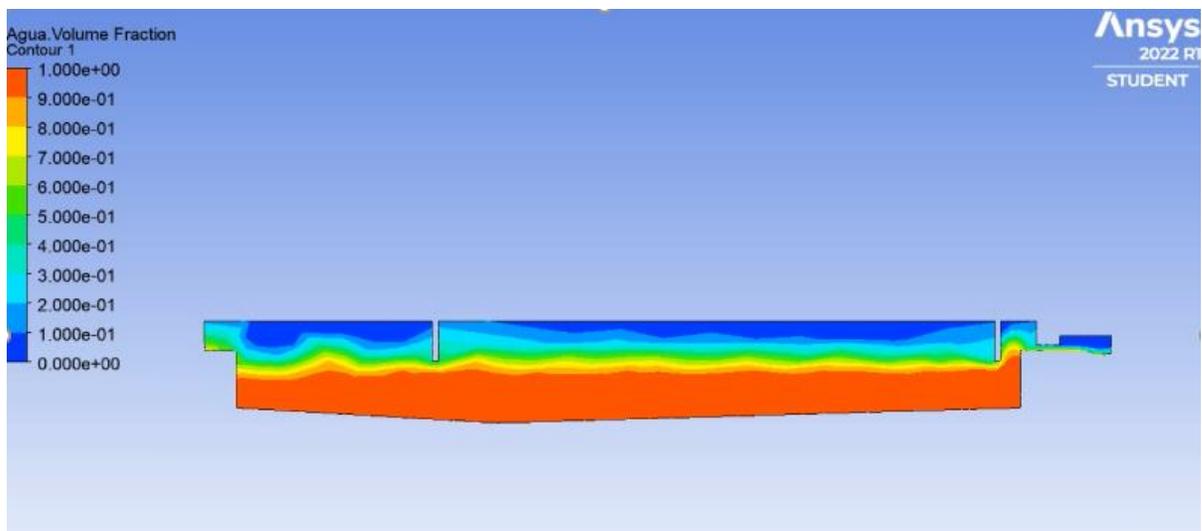


Figura 46. Llenado de las estructuras hidráulicas diseñadas, tomada de software ANSYS FLUENT.

## 7. Conclusiones

El presente trabajo de investigación se enfocó en el predimensionamiento, diseño y simulación CFD de un desarenador seguido de una canaleta Parshall, implementada como método de aforo. A fin de verificar si una simulación CFD serviría como soporte a la fase de predimensionamiento de las estructuras hidráulicas, y de esta manera facilitar la construcción y verificación de parámetros de las estructuras en campo.

Ante lo expuesto anteriormente, el predimensionamiento y resultados de la simulación CFD de las estructuras, es posible concluir que aunque se encuentra un contraste en los valores determinados en la fase de predimensionamiento y los calculados en la simulación CFD, para la velocidad horizontal en el desarenador, la velocidad sobre la cresta del vertedero de salida, la velocidad antes del resalto hidráulico de la canaleta, la velocidad en el resalto hidráulico de la canaleta y la velocidad en la sección de salida de la canaleta, se sugiere tener en cuenta ambos valores y analizar el caso específico de funcionamiento de las estructuras, ya que esto podría ayudar en la futura eficiencia de estas. Adicionalmente, se alude como posible causante del contraste entre los valores de los parámetros calculados a la simulación bidimensional en ANSYS FLUENT, dando lugar al estudio en posteriores investigaciones de una posible corroboración y soporte de los resultados calculados mediante las metodologías expuestas para las estructuras diseñadas, mediante una simulación 3D, otorgando mayor exactitud a los resultados del modelo. Así mismo, se resalta la importancia de adquirir la licencia completa del software ya que la versión para estudiantes tiene bastantes limitantes, generando cálculos con menor certeza y disminuyendo la eficiencia de simulación.

Así mismo, cabe resaltar que el requerimiento asignado por la metodología de López Cualla para la velocidad en la cresta del vertedero de salida ( $>0.3$  m/s) también se cumple con los valores calculados en la simulación CFD, expuestos en la figura 22.

Por otro lado, se resalta la posibilidad de obtener resultados de parámetros relevantes en puntos asignados de las estructuras hidráulicas en tiempo real; como lo son la presión dinámica y la presión estática

### Referencias

- ANSYS Inc. (2013). *Ansyst Fluent Theory Guide*. Recuperado de [https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/main\\_pre.htm](https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/main_pre.htm)
- ANSYS Inc. (2009). *Guía del usuario de ANSYS FLUENT 12.0\_ Evaluation of Gradients and Derivatives*. Recuperado de <https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/node368.htm#sec-eval-derivatives>
- ANSYS Inc. (2009). *Guía teórica de ANSYS FLUENT 12.0\_Ecuación de fracción de volumen*. Recuperado de <https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/node321.htm>
- ANSYS Inc. (2009). *Guía teórica de ANSYS FLUENT 12.0\_Pressure-Velocity Coupling*. Recuperado de <https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/node373.htm#sec-unsolve-pv>
- ANSYS Inc. (2009). *Guía del usuario de ANSYS FLUENT 12.0\_Página de tareas de métodos de solución*. Recuperado de <https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/ug/node1148.htm>
- ANSYS Inc. (2009). *Guía del usuario de ANSYS FLUENT 12.0 - 29.9.2. Gráficas XY de datos de soluciones*. Recuperado de <https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/ug/node933.htm>
- Autodesk. (2021). *CONVASUPERF (comando) | AutoCAD | Autodesk Knowledge Network*. Recuperado de <https://knowledge.autodesk.com/es/support/autocad/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2018/ESP/AutoCAD-Core/files/GUID-7AF911DF-986F-4897-8651-921BE8710B14-htm.html>
- Alfonso, D., Sánchez, M., Luis, J., Mustelie, C., Lázaro, A. M., & León Sánchez, A. (2017). *Curso Básico de Dibujo con Autocad*. Recuperado de [https://oa.upm.es/50865/1/Curso\\_AutoCAD.pdf](https://oa.upm.es/50865/1/Curso_AutoCAD.pdf)
- Aydin, M. (2015). *Using CFD in Hydraulic Structures*. Recuperado de <https://www.iiste.org/Journals/index.php/JSTR/article/viewFile/23703/24274>
- Angel, M., & Porcel, C. (2011). Introducción a AutoCAD y 2D. *Revista Buenísima*, 1–34.

- Arqhys. (2012). *Vertederos Hidraulicos*. Recuperado de <https://www.arqhys.com/construccion/vertederos-hidraulicos.html>.
- Azevedo, J., & Acosta, G. (1976). *Manual de Hidráulica*. (1ª ed). México: HARLA S.A.
- Aguilar, O. (2020). *Diseño Asistido por Computadora, AUTOCAD*. Recuperado de [http://olimpia.cuautitlan2.unam.mx/pagina\\_ingenieria/mecanica/mat/mat\\_mec/m9/Manual\\_DE\\_AUTOCAD\\_V2020.pdf](http://olimpia.cuautitlan2.unam.mx/pagina_ingenieria/mecanica/mat/mat_mec/m9/Manual_DE_AUTOCAD_V2020.pdf)
- Aponte Castillo, C. D. (2019). *Diseño y Construcción de una Canaleta Parshall para el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Santo Tomás Sede Central*. (Proyecto de Grado). Universidad Santo Tomas, Bogota. Recuperado de <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/30431/2020carlosaponte.pdf?sequence=6&isAllowed=y>
- Becerra, L. (2018). *Aquietamiento y Canales de Entrada*. Recuperado de <https://prezi.com/p/jeqn2aiid22f/aquietamiento-y-canales-de-entrada/>
- Betancourt, J. (2015). Simulación en CFD de un Tanque de Sedimentación Secundaria con la Implementación de un Modelo de Balance Poblacional (PBM). Recuperado de <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/16897/u703175.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Boletinagrario.com. (2022). *Estructuras Hidraulicas - ¿Qué es estructuras hidráulicas?*. Recuperado de <https://boletinagrario.com/ap-6,estructuras+hidraulicas,2489.html>
- Blazek, J. (2001). *Computational Fluid Dynamics: Principles and Applications*. Recuperado de [https://d1.amobbs.com/bbs\\_upload782111/files\\_46/ourdev\\_680516HBAK3D.pdf](https://d1.amobbs.com/bbs_upload782111/files_46/ourdev_680516HBAK3D.pdf)
- Cualla, L. (1995). *Elementos de diseño para acueductos y alcantarillados*. (2ª ed). Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Cedillo Sarmiento, J. A., & Marin Lazo, J. P. (2015). *Estudio experimental y computacional mediante CFD ANSYS del flujo de aire a traves de techos de edificaciones usando un tunel de viento*. (Tesis). Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador. Recuperado de <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/7958/1/UPS-CT004821.pdf>
- Concejo Municipal de Paipa. (2000). *Plan de ordenamiento territorial*. Recuperado de <https://repositoriocdim.esap.edu.co/bitstream/handle/123456789/9867/3223-7.pdf?sequence=6&isAllowed=y>
- Departamento de Boyacá. (2013). *Plan Municipal de gestión del riesgo de desastres*.

- Recuperado de [https://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/bitstream/handle/20.500.11762/28456/PMGRD%20\\_Paipa\\_Boyaca.pdf?sequence=2&isAllowed=y](https://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/bitstream/handle/20.500.11762/28456/PMGRD%20_Paipa_Boyaca.pdf?sequence=2&isAllowed=y)
- Editiones ENI. (2013). *Exportación/importación de Archivos IGES*. Recuperado de <https://www.ediciones-eni.com/open/mediabook.aspx?idR=cf84dd487053cb78383490a52f4cb749>
- Espinosa Salgado, S., & Olano Gaitan, D. A. (2018). *Desarrollo de Software para el Diseño Hidráulico de Canaleta Parshall como Estructura para Mezcla Rápida en el Tratamiento del Agua – Caso Aplicativo en Municipios de la Provincia del Alto Magdalena*. Recuperado de <http://repository.unipiloto.edu.co/bitstream/handle/20.500.12277/5751/TESIS%20CANALETA%20PARSHALL.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Ingenierodelacrisis. (2012). *Técnicas de Mallado de Modelos para el Análisis por M.E.F.* <https://ingenierodelacrisis.wordpress.com/2012/08/28/tecnicas-de-mallado-de-modelos-para-el-analisis-por-m-e-f/>
- Jamshed, S. (2015). *Introduction to CFD*. Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128015674000015?via%3Dihub>
- LinkedIn. (2018). *Liquid Desander –Correction for Density and Viscosity*. Recuperado de <https://www.linkedin.com/pulse/liquid-desander-correction-density-viscosity-eprocess-technologies>
- Martín, D. A., Costafreda, J. L., Lázaro, A. M., & León Sánchez, A. (2017). *Curso Básico de Dibujo con Autocad*. Recuperado de [https://oa.upm.es/50865/1/Curso\\_AutoCAD.pdf](https://oa.upm.es/50865/1/Curso_AutoCAD.pdf)
- Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio. (2017). *Resolución número 0330*. Recuperado de <https://minvivienda.gov.co/sites/default/files/normativa/resolucion-0330-2017.pdf>
- Naess, R. (2020). *CFD Simulations of Open and Closed Sand Trap Design for Tonstad Hydropower Plant*. Noruega: Norwegian University of Science and Technology.
- Nuclear-power. (2020). *Laminar Flow—Viscous Flow \_ Definition & Characteristics*. *Nuclear Power*. Recuperado de <https://www.nuclear-power.com/nuclear-engineering/fluid-dynamics/laminar-flow-viscous/>
- Olmo, M. (2022). *Calor Específico*. Recuperado de <http://hyperphysics.phy->

- astr.gsu.edu/hbasees/thermo/spht.html
- Osorio, O. (2021). *Union y sustraccion de volúmenes solid*. Recuperado de <https://es.scribd.com/doc/73423319/Union-y-Sustraccion-de-Volumenes-Solid-Edit>
- Olsen, B. (2001). *CFD Modelling for hydraulic structures*. Recuperado de <https://folk.ntnu.no/nilsol/cfd/cfdstr.pdf>
- Olsen, B. (2017). *Numerical modelling and hydraulics*. Recuperado de <https://folk.ntnu.no/nilsol/tvm4155/flures6.pdf>
- Pèrez, C. (2012). *Curso de Inicicaci3n al Autocad*. Recuperado de <http://unionuniversitaria.uji.es/wp-content/uploads/2012/01/CURSO-DE-iniciaci%C3%B3n-autocad.pdf>
- Quora. (2021). *Viscosity and laminar flow*. Recuperado de <https://www.quora.com/What-is-viscosity-and-laminar-flow>
- Rodríguez, P. (2008). *Hidráulica II. Hidráulica de Canales*. Recuperado de [https://carlosquispeanccasi.files.wordpress.com/2011/12/hidraulica\\_ruiz.pdf](https://carlosquispeanccasi.files.wordpress.com/2011/12/hidraulica_ruiz.pdf)
- Significados. (2013). *Significado de viscosidad*. Recuperado de <https://www.significados.com/viscosidad/>
- Salcedo, R., Bay3n, A., & Chueca, P. (2017). *Introduciendo la dinámica de fluidos computacional en el análisis de flujos en medio poroso*. Recuperado de <https://doi.org/10.4995/msel.2017.6700>
- Vaxasoftware. (2010). *Viscosidad dinámica del agua líquida a varias temperaturas*. Recuperado de [http://www.vaxasoftware.com/doc\\_edu/qui/viscoh2o.pdf](http://www.vaxasoftware.com/doc_edu/qui/viscoh2o.pdf)