



REDISEÑO Y SIMULACIÓN COMPUTACIONAL DE LA RED HIDRÁULICA  
PARA EL APROVECHAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN UN CENTRO  
COMERCIAL

**Álvaro Javier Valderrama Serrano**  
**Danilo Esteban Vega Sánchez**

Universidad E.C.C.I.  
Facultad de Ingeniería  
Tesis para optar a título de Profesional de Ingeniería Mecánica  
Bogotá D.C., Colombia  
2022

REDISEÑO Y SIMULACIÓN COMPUTACIONAL DE LA RED HIDRÁULICA  
PARA EL APROVECHAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN UN CENTRO  
COMERCIAL

**Álvaro Javier Valderrama Serrano**  
**Danilo Esteban Vega Sánchez**

Trabajo de grado presentado como requisito para optar por el título de:  
**Profesional en Ingeniería Mecánica**

Director:  
**PhD. Juan Guillermo García Navarro**

Universidad E.C.C.I  
Facultad de Ingeniería  
Tesis para optar a título de Profesional de Ingeniería Mecánica  
Bogotá D.C., Colombia

2022

## **Resumen**

Este proyecto tiene como finalidad proponer un rediseño y modificación técnica en las redes hidráulicas en PVC de la PTAR de un centro comercial en Bogotá, con el fin de generar ahorro asociado al consumo de agua potable, ya que se reutilizará parte del vertimiento de agua proveniente de los locales de carácter gastronómico del establecimiento.

Para la ejecución del proyecto se debe valorar el estado actual de la planta y posteriormente modelar en CAD la geometría de la red hidráulica propuesta. Con la ayuda de la herramienta de ANSYS y con la aplicación de simulaciones CFD y FSI se procede a modelar computacionalmente el comportamiento del fluido y la estructura, para así obtener resultados cuantificables.

Por medio del análisis de resultados de ANSYS se evidencia que es viable la implementación del proyecto en el centro comercial, ya que los valores numéricos obtenidos están dentro del rango permisible de falla y además se confirma el ahorro económico por la estimación financiera presentada.

**Palabras clave: fluido, ANSYS, tubería.**

# CONTENIDO

RESUMEN .....	3
CONTENIDO .....	4
Lista de figuras .....	6
Lista de tablas.....	8
1. CAPÍTULO: GENERALIDADES	
INTRODUCCIÓN .....	9
1.1 Objetivos.....	10
1.1.1 Objetivo general .....	10
1.1.2 Objetivos específicos.....	10
1.2 Marco de referencia .....	11
1.3 Estado actual PTAR .....	14
2. CAPÍTULO: ANÁLISIS FLUIDODINÁMICA Y FINANCIERO	
2.1 Introducción .....	19
2.2 Análisis de fluidodinámica .....	19
2.3 Cálculo financiero de ahorro agua .....	24
3. CAPÍTULO: EVALUACIÓN POR FLUIDODINÁMICA COMPUTACIONAL	
3.1 Introducción .....	27
3.2 Teoría de volúmenes finitos.....	27
3.3 Ecuaciones gobernantes de la mecánica de fluidos .....	28
3.4 Metodología de simulación .....	29
3.4.1 Geometría .....	29
3.4.2 Selección de mallado .....	30
4. CAPÍTULO: DESARROLLO SIMULACIÓN FLUIDO ESTRUCTURA	
4.1 Introducción .....	36
4.2 Teoría de análisis multi físicos, fluido estructura y elementos finitos .....	36
4.3 Análisis CFD de la red hidráulica diseñada.....	36

4.4	Resultados de la simulación por CFD.....	38
4.5	Interacción fluido estructura.....	41
4.6	Resultados simulación FSI.....	44
4.7	Evaluación de consideraciones por fuera del diseño .....	48
5. CONCLUSIONES		
6. BIBLIOGRAFÍA		

## Lista de figuras

1.1. Metodología simulación CFD.....	12
1.2. Fases del tratamiento de agua residual.....	15
1.3. Bloque 1, proceso de tratamiento de agua.....	16
1.4. Bloque 2, proceso de tratamiento de agua.....	17
1.5. Bloque 3, proceso de tratamiento de agua.....	18
2.1. Cotas de alturas red tubería.....	20
2.2. Curva bomba sumergible pozo eyector.....	21
2.3. Diagrama de Moody.....	22
2.4. Esquema de llegada y recolección de agua tratada (PTALL).....	25
3.1. Geometría inicial de la tubería.....	29
3.2. Puntos de referencia para estudio de malla.....	30
3.3. Gráfica de velocidad punto 1.....	31
3.4. Gráfica de velocidad punto 2.....	31
3.5. Gráfica de Y+.....	32
4.1. Localización velocidad de entrada.....	37
4.2. Esquema salida de flujo en la tubería.....	37
4.3. Condiciones de frontera CFD.....	38
4.4. Perfiles de velocidad en primera sección tubería.....	38
4.5. Perfiles de presión en primera sección tubería.....	39
4.6. Perfiles de velocidad en segunda sección tubería.....	39
4.7. Perfiles de presión en segunda sección tubería.....	40
4.8. Perfiles de velocidad en tercera sección tubería.....	40
4.9. Perfiles de presión en tercera sección tubería.....	41
4.10. Localización de la presión en el modelo CFD .....	42
4.11. Interacción del fluido con la pared interna del PVC.....	43

4.12. Ubicación de soportes fijos en la tubería.....	43
4.13. Localización de puntos fijos para simulación FSI.....	44
4.14. Propiedades del PVC biblioteca ANSYS.....	44
4.15. Deformaciones equivalentes en la primera sección.....	45
4.16. Esfuerzos equivalentes en la primera sección.....	45
4.17. Deformaciones equivalentes en la segunda sección.....	46
4.18. Esfuerzos equivalentes en la segunda sección.....	46
4.19. Deformaciones equivalentes en la tercera sección.....	46
4.20. Esfuerzos equivalentes en la tercera sección.....	47

## Lista de tablas

2.1. Consideraciones iniciales para cálculos fluidodinámica.....	21
2.2. Variable cálculo viabilidad económica.....	24
3.1. Resultados de error mallado.....	33
4.1. Valores de condiciones de frontera en simulación.....	36
4.2. Resultados estudio de convergencia.....	45
4.3. Valores de esfuerzos y deformaciones.....	47



## 1. Capítulo

# GENERALIDADES

## INTRODUCCIÓN

Este trabajo de investigación busca diseñar y simular mediante herramientas computacionales una red hidráulica incorporada en una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) de un centro comercial ubicado en la ciudad de Bogotá. Se busca aumentar la cantidad de agua tratada de manera directa por medio de modificaciones técnicas a la infraestructura hidráulica, posterior al diseño se pretende realizar una evaluación fluidodinámica por medio de herramientas computacionales para verificar el comportamiento del flujo al interior de la tubería y la respuesta estructural de misma a las cargas del fluido. Este proyecto permite recuperar parte de la inversión por operación en la planta de tratamiento asociado al consumo de agua potable del establecimiento en general.

En la actualidad las fronteras de la problemática asociadas al proyecto planteado es el empleo de energía y mano de obra para la operación de la PTAR, el cual genera una cantidad de agua residual producto del proceso de locales comerciales de carácter gastronómico. La PTAR del inmueble citado está operativa en la actualidad, ya que el funcionamiento de los locales es constante y extenso por lo que se tiene que hacer tratamiento al agua desechada. En una posible auditoría de los organismos de control ambiental o saneamiento, es indispensable mantener las recamaras y tuberías de entrega de agua a la red pública en condiciones normales. La actual operatividad de la planta satisface lo anteriormente descrito por lo que acarrea una serie de gastos que asume la administración del centro comercial, como insumos, químicos, mano de obra por operación, mantenimiento y servicios públicos (agua y energía).

## CAPÍTULO 1: GENERALIDADES

Así que el hecho de estructurar un rediseño a la PTAR se fundamenta en aprovechar de una u otra manera los gastos por operación de la planta, en el aprovechamiento del agua grasa tratada para otras actividades operacionales del establecimiento, en este caso es utilizarla para funcionamiento de baterías sanitarias, piletas de aseo y riego. La idea del proyecto es recircular el caudal producto de la PTAR para almacenarla en la infraestructura de aguas lluvias, que llevaría a darle un uso aprovechable al agua grasa tratada. Y para ello se plantea el desarrollo técnico y constructivo de una red hidráulica para la evacuación y transporte de dicha agua.

De esta manera la administración del establecimiento se liberaría de gastos por operación, ya que no solo se aprovecharía agua desde la Planta de Tratamiento de Aguas Lluvias (PTALL), sino también entraría con su aporte la PTAR, siempre y cuando se mantenga constante la operación de los restaurantes y a la vez este en óptimas condiciones técnicas en cuanto sus equipos, tanques e infraestructura general.

### **1.1 Objetivos**

#### **1.1.1 Objetivo general**

Diseñar y simular computacionalmente una red hidráulica en la salida de la PTAR del centro comercial para darle un uso final y aprovechamiento del agua residual tratada.

#### **1.1.2 Objetivos específicos**

- ✓ Realizar un diagnóstico técnico del estado actual de la planta PTAR para comparar los valores iniciales con los resultados de la investigación en cantidad de agua tratada.
- ✓ Plantear un diseño de la red periférica de la planta basado en la teoría de mecánica de fluidos.

## CAPÍTULO 1: GENERALIDADES

- ✓ Desarrollar una metodología que permita la evaluación computacional fluidodinámica en la red de tubería mediante el método de volúmenes finitos.
- ✓ Desarrollar una metodología que permita el análisis de la interacción fluido estructura en una sola vía.
- ✓ Realizar el análisis de la tubería mediante herramientas de dinámica de fluidos computacionales que permita verificar la viabilidad del diseño planteado.

### 1.2 Marco de referencia

Para este proyecto se va analizar el comportamiento de un fluido al interior de una tubería. Por lo tanto se asocia el concepto de flujo interno, en las condiciones físicas del sistema (Martín, R. Salcedo, 2011). También simular mediante dinámica de fluidos computacional (CFD por sus siglas en inglés), ya que desempeña un papel importante en la investigación de los efectos de las propiedades de los fluidos que van a ser transportados a través de tuberías en distintas distancias y condiciones de funcionamiento (Ordoñez-Viñán, Aquino-Aroba, Orozco-Cantos, Pozo-Safla, & Jácome-Domínguez, 2018).

El análisis fluido dinámico que se desarrollará con ayuda de herramientas computacionales simulará el comportamiento del flujo a través de la tubería asumiendo un estado estacionario. También por medio de una simulación de interacción fluido estructura en una vía se analizará el comportamiento estructural, teniendo en cuenta cargas ocasionadas por campo del fluido. La estrategia que se utilizó en este trabajo ya viene aplicada a nivel mundial en distintos proyectos enfocados en simulaciones de fluidos, utilizando programas computacionales, todo con el fin de buscar soluciones a problemáticas de ingeniería.

En el trabajo presentado por (Ordoñez-Viñán et al., 2018) se desarrolló un modelo CFD para el análisis y simulación de los perfiles de velocidad en una tubería PVC verificando los resultados en un banco de pérdidas de laboratorio. Para la solución de este modelo intervinieron ecuaciones fluidodinámicas las cuales fueron solucionadas mediante *ANSYS CFX* basado en etapas: la primera comprende el estudio del modelo

## CAPÍTULO 1: GENERALIDADES

físico y la definición de las variables que intervienen en el análisis con la finalidad de una simulación lo más próxima a la realidad. En la siguiente etapa se generan resultados del comportamiento de flujo del fluido en estado estacionario mediante CFD. La validación de resultados se realizó con el cálculo analítico de los perfiles de velocidades mediante los datos adquiridos en el banco de pruebas. En la figura 1.1 se muestra la metodología utilizada para la simulación CFD.

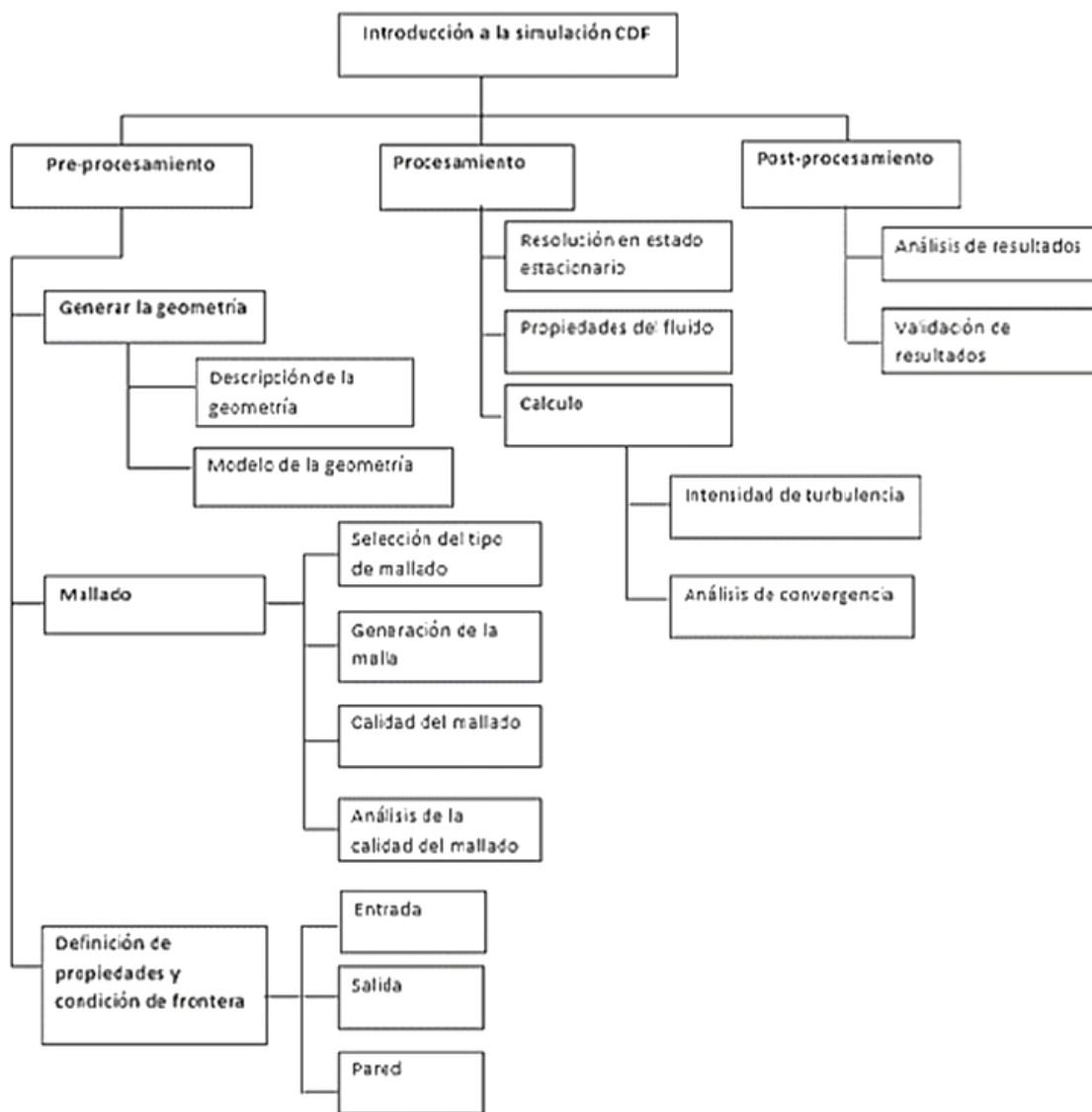


Figura 1.1: Metodología simulación CFD (Ordoñez-Viñán et al., 2018).

## CAPÍTULO 1: GENERALIDADES

Con los resultados obtenidos en el análisis experimental y la simulación numérica CFD se concluye que la metodología computacional simula de manera correcta los perfiles de velocidad (Ordoñez-Viñán et al., 2018).

Se concluye de esta investigación que los resultados obtenidos fueron satisfactorios dado que los resultados en el banco de prueba se asemejan a los valores de la simulación, el máximo error fue el 5%. Este trabajo se puede tomar como referencia para el desarrollo CFD considerando la metodología utilizada. También según los resultados, se puede considerar que las simulaciones realizadas mediante la herramienta *ANSYS* bajo parámetros correctos se acercan al comportamiento real del fluido en tuberías.

El siguiente proyecto que se expone se llama “Simulación aplicada para el análisis previo del comportamiento del flujo, durante su transporte en líneas de tubería”. Este busca modelar el comportamiento de los fluidos al transportarse por los sistemas de tuberías con el uso de herramientas CFD en el programa *ANSYS*, con el fin de contribuir al proceso de optimización y diseño de productos (Pinto, 2020). La simulación en *ANSYS Fluent* está precedida de varias etapas que harán que el sistema converja y permita mostrar los resultados del análisis en todas las secciones de la tubería. La metodología utilizada para el modelamiento computacional fue la siguiente: Desarrollar una geometría en un CAD en 3D y exportarlo en *ANSYS*. Posteriormente realizar un mallado de la geometría, definir las áreas de trabajo y las superficies donde aplican las condiciones de frontera para el modelo, para este caso una velocidad de entrada, una presión de salida y la interacción entre la pared de la tubería y el fluido. El estudio computacional estableció modelos matemáticos que resuelven las ecuaciones de turbulencia de un flujo en estado estacionario, los resultados se obtienen hasta que las iteraciones se resuelvan y las variables convergen de forma correcta.

Los resultados obtenidos de la simulación fueron el comportamiento del flujo a lo largo de la tubería analizando las siguientes variables: patrones de flujo según la densidad, distribución de la velocidad y caída de la presión en función de la altura. El

## CAPÍTULO 1: GENERALIDADES

proyecto evaluó la simulación para considerar los distintos escenarios posibles, que ayuden a predecir los riesgos que pueden ser ocasionados en las tuberías y optimizar el diseño, sin el coste ni el riesgo de llevarlo a cabo. Promoviendo que se mejore el diseño y se reduzca la brecha que existe entre las operaciones reales y las condiciones de simulación (Pinto, 2020). Se referencia este trabajo por el modelo matemático desarrollado mediante CFD, las ecuaciones utilizadas aplican para la simulación de este proyecto. Así mismo, los resultados, el cambio de presión a lo largo de tubería es un comportamiento que se debe obtener y analizar para desarrollar de la simulación fluido estructura. Los resultados obtenidos de la simulación fluidodinámica a lo largo de la tubería hidráulica periférica se exportan hacia el solucionador estructural, por lo tanto, solo se tendrá en cuenta las cargas del fluido y las consecuencias directas de estas en el análisis de la estructura. La simulación estructural se evalúa para verificar el diseño de la tubería, evitando riesgos que puedan ser ocasionados en la misma, sin inversión económica, ni riesgo de llevarla a cabo (Pinto, 2020).

Otras investigaciones basadas en modelización con dinámica de fluidos computacional CFD, analizan el comportamiento de otros escenarios, en este caso medios porosos (vegetación), donde se ajusta la resistencia a la porosidad por el paso de corrientes de aire. Al ajuste del escenario inercial adecuado, se comparan las velocidades obtenidas en cada simulación, resaltando la importancia de usar los criterios y parámetros adecuados con la configuración de cada modelo CFD. (Salcedo, Bayón, & Chueca, 2017).

### **1.3 Estado actual PTAR**

La PTAR citada en este trabajo se encuentra operativa actualmente, se compone principalmente de tuberías, equipos de bombeo, tanques de almacenamiento y mecanismos automáticos de control los cuales son necesarios para cada fase del tratamiento físico - químico del agua proveniente de los restaurantes del centro comercial, haciendo que el establecimiento esté alineado con la normativa vigente de

## CAPÍTULO 1: GENERALIDADES

caracterización y vertimiento de agua residual (Sostenible, 2015). En la figura 1.2 se muestra el proceso de tratamiento del agua en cada una de sus fases.

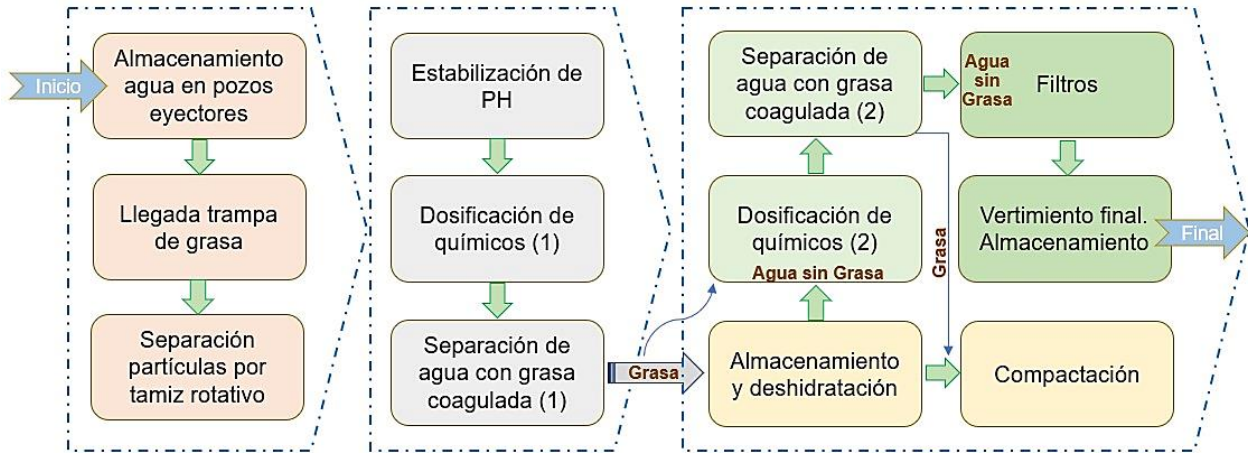


Figura 1.2: Fases del tratamiento de agua residual (autores).

De tal manera se contextualiza ilustrativamente el proceso técnico de tratamiento de la PTAR en tres bloques responsables de garantizar la clarificación y entrega final del líquido conducido al reservorio de almacenamiento de agua reutilizada en las diferentes instalaciones sanitarias, previamente transportado por la red hidráulica en análisis.

El primer bloque planifica la etapa más importante de alistamiento y tratamiento del agua contaminada, por medio del almacenamiento, separación de partículas sólidas grandes, estabilización de PH y primera fase fisicoquímica de rompimiento de cadenas de grasa suspendidas en el líquido (Schleicher, 2007). En la figura 1.3 se muestra el bloque 1 del tratamiento, también información técnica del proceso y de los componentes de la planta.

## CAPÍTULO 1: GENERALIDADES

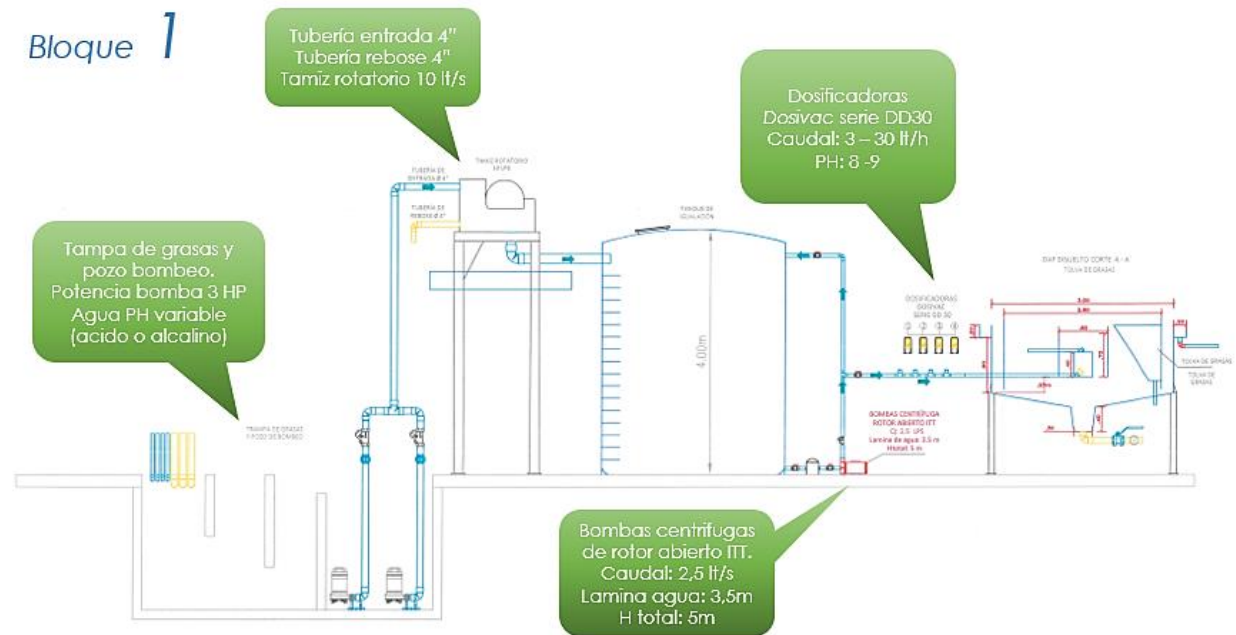


Figura 1.3: Bloque 1, proceso de tratamiento de agua (autores).

El segundo bloque se ilustra en la figura 1.4 este modelo la fase intermedia de separación y almacenamiento de grasa retirada al agua por medios químicos. Dicho sólido retirado del agua pasa a un subproceso de deshidratación y disposición final. Luego el agua en tratamiento es direccionada a la etapa final de recuperación.



Bloque 2

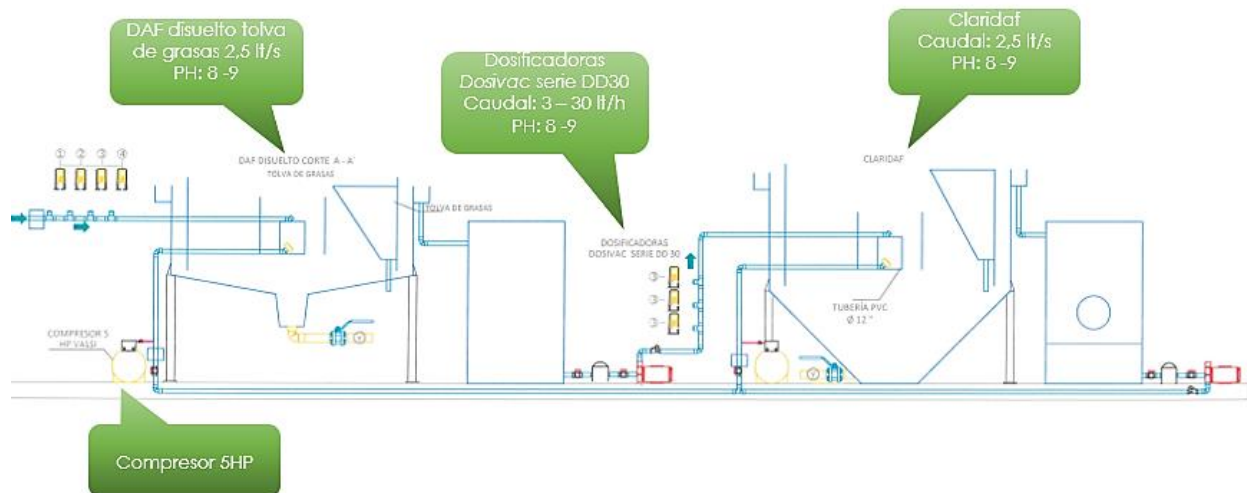


Figura 1.4: Bloque 2, proceso de tratamiento de agua (autores).

Finalmente, el tercer bloque muestra la precisión de separación de partículas del agua por medio de filtros correctores en carbón activado con buena capacidad de absorción (Hamerlinck, 1994), garantizando agua en condiciones estables de claridad, olor y turbidez. Esta fase incluye el transporte del producto final a la recámara de almacenamiento para previo bombeo y transporte de vertimiento hacia las redes domésticas de alcantarillado o a su previa reutilización en el inmueble. En la figura 1.5 se observa el bloque 3.

# CAPÍTULO 1: GENERALIDADES

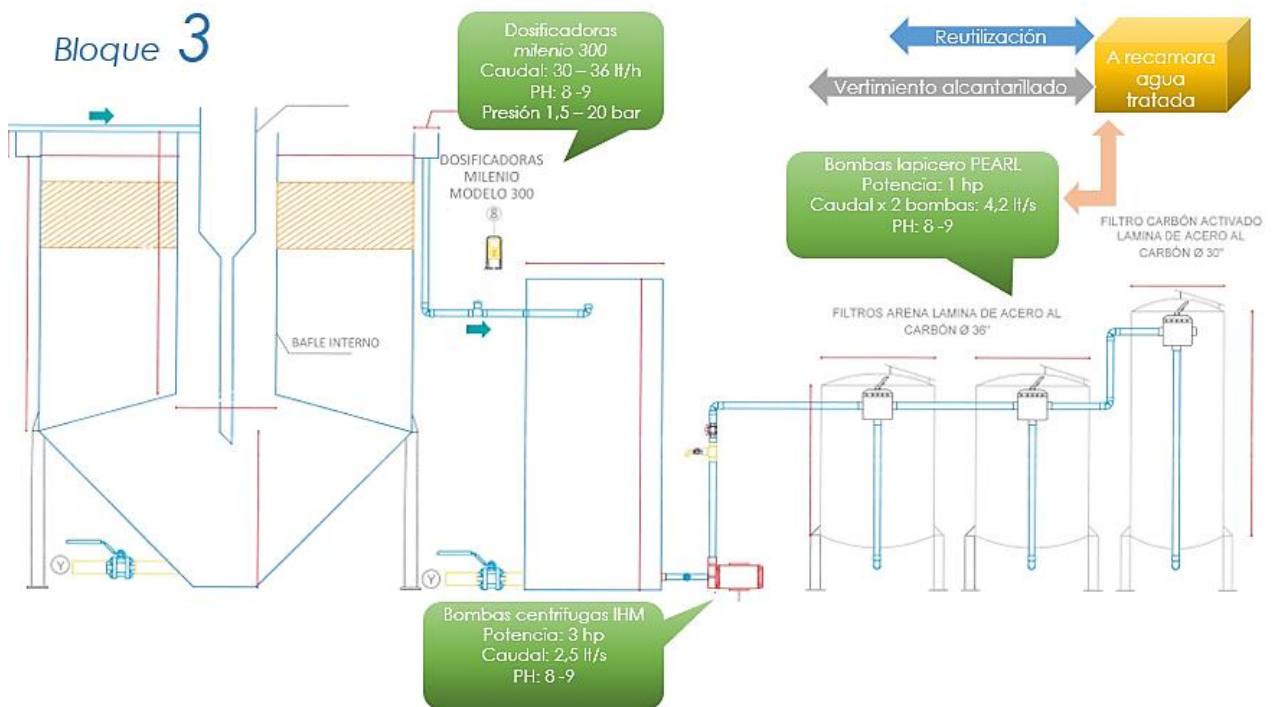


Figura 1.5: Bloque 3, proceso de tratamiento de agua (autores).

## 2. Capítulo

# ANÁLISIS FLUIDODINÁMICA Y FINANCIERO

## 2.1 Introducción

En este capítulo se va a realizar la evaluación fluidodinámica en la red de tubería la cual transporta el líquido tratado para fines de reutilización. Teniendo en cuenta parámetros iniciales del sistema, se halla el factor de pérdidas por fricción, la velocidad del flujo y la presión de descarga del sistema de bombeo del reservorio de agua tratada de la PTAR. Este dato de presión es importante para tenerlo como referente en los análisis del capítulo 4 donde se aborda en detalle los resultados del análisis computacional por CFD. Por último, se realiza una estimación económica en beneficio a la operación del establecimiento, debido a la reutilización del agua tratada.

## 2.2 Análisis de fluidodinámica

El fluido luego de salir de tratamiento y estar en el reservorio final es conducido por 3 bombas sumergibles para lodos por un tramo de 28,7 m de longitud y 5,70 m de elevación en tubería PVC SCH40 de 3" instalada y acoplada de acuerdo a la norma de fontanería (Icontec, 2004) hasta el punto de ramificación a la conexión de transporte para reutilización, así que este estudio se centra en analizar el fluido desde que sale de las bombas hasta que llega a la conexión de la PTALL, ver figura 2.1.

- ✓  $Z_1 = 0 \rightarrow$  altura de referencia montaje bomba
- ✓  $V_1 = 0 \rightarrow$  fluido en reposo
- ✓  $h_A = 0 \rightarrow$  sistema sin bomba
- ✓  $h_r = 0 \rightarrow$  sistema sin turbina

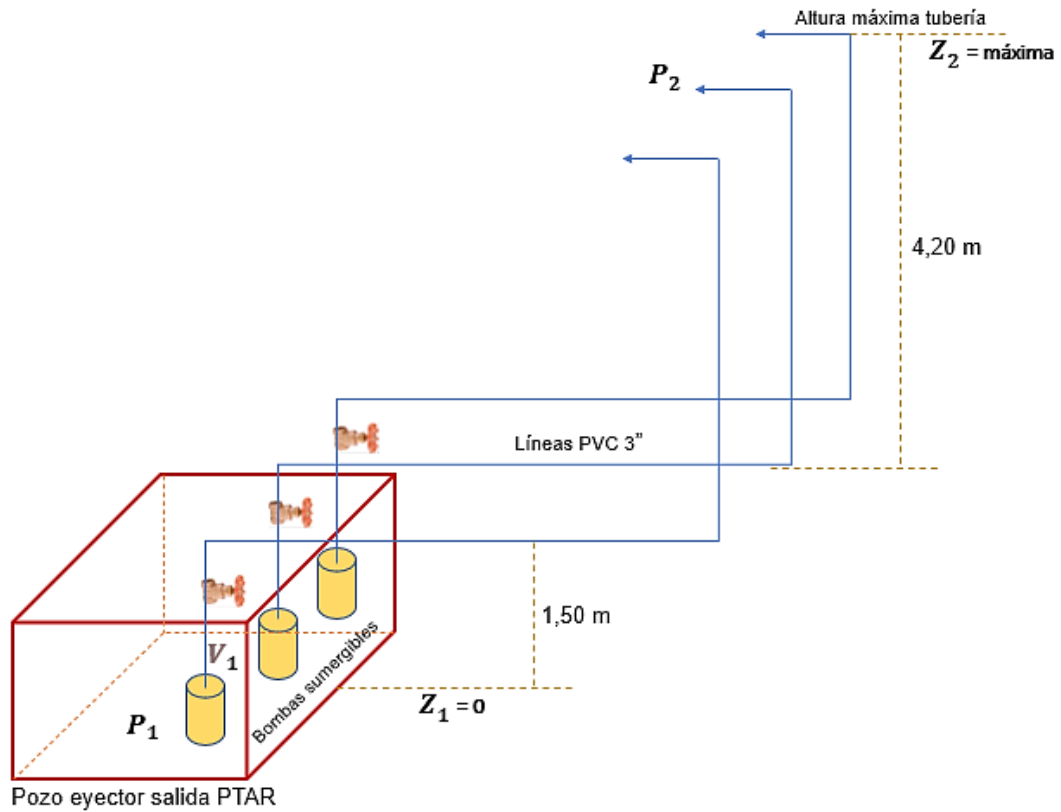


Figura 2.1: Consideraciones generales de la red (autores).

Para iniciar el análisis de fluidodinámica en la red de transporte del agua tratada producto de la PTAR de análisis, se parte de la Ecuación de Bernoulli (pp. 198). (Mott, 2006):

$$\frac{P_1}{\gamma} + Z_1 + \frac{V_1^2}{2g} + h_A - h_\alpha - h_r = \frac{P_2}{\gamma} + Z_2 + \frac{V_2^2}{2g} \quad (2.1)$$

Considerando el caudal de diseño de la planta de tratamiento, se halla la presión de descarga del manual técnico de la bomba sumergible, se considera la longitud total de la red desde el acople de descarga en la bomba al punto de ramificación, el valor de longitud del punto más alto de la tubería, el diámetro interno del PVC de la conducción, junto con la viscosidad y densidad estándar del agua. Por tanto, en la tabla 2.1 se presentan las propiedades del fluido.

CAPÍTULO 2: ANÁLISIS FLUIDODINÁMICA Y FINANCIERO

$P_1 \rightarrow$ tomado de curva de la bomba	13,5 psi = 93079,22 Pa
$Z_2 \rightarrow$ cota altura máxima	1,5 m + 4,2 m = 5,7 m
Longitud total red tubería	28,7 m
$\gamma_{H_2O} \rightarrow$ peso específico del agua	9800 N/m <sup>3</sup>
$Q \rightarrow$ caudal de diseño PTAR	2,5 lt/s = 0,002508 m <sup>3</sup> /s
$\rho_{H_2O} \rightarrow$ densidad del agua	1000 kg/m <sup>3</sup>
$\mu_{H_2O} \rightarrow$ viscosidad dinámica del agua	1,003 * 10 <sup>-3</sup> kg/ms $\rightarrow$ 20°C
$D \rightarrow$ diámetro interno tubería análisis (3")	0,08042 m

Tabla 2.1: Consideraciones iniciales para cálculos fluidodinámica (autores).

De la figura 2.2, transponiendo las respectivas abscisas con el caudal de la PTAR se encuentra la presión en el punto de descarga de la bomba sumergible ( $P_1$ ).

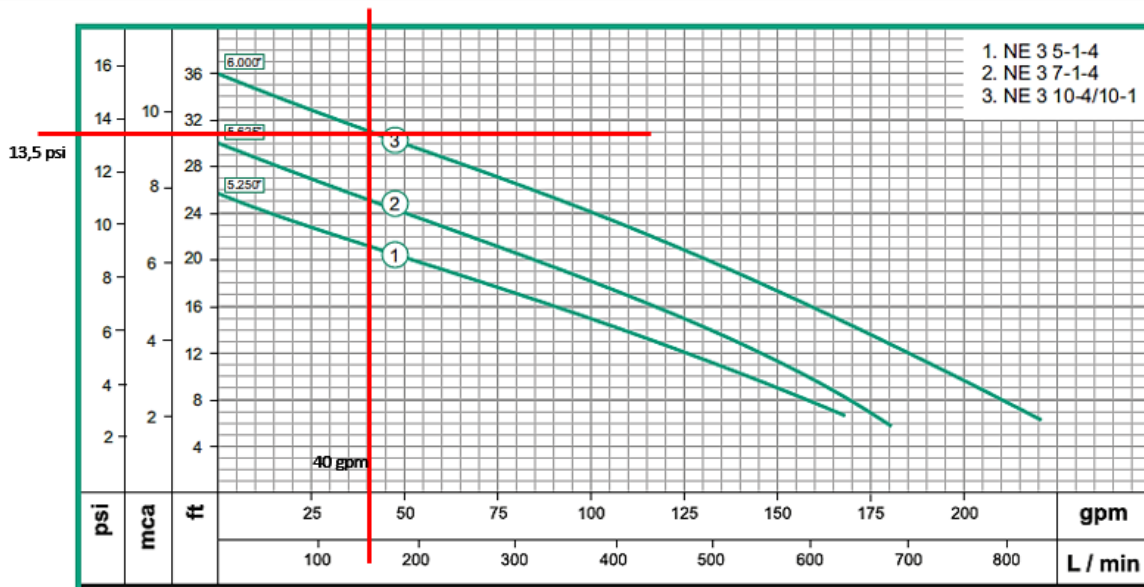


Figura 2.2: Curva bomba sumergible pozo eyector (Barnes de Colombia, 2000).

Teniendo en cuenta las consideraciones anteriores, se modifica la ecuación de Bernoulli (2.1), quedando de la siguiente manera:

$$\frac{P_1}{\gamma} - h_\alpha = \frac{P_2}{\gamma} + Z_2 + \frac{V_2^2}{2g} \quad (2.2)$$

## CAPÍTULO 2: ANÁLISIS FLUIDODINÁMICA Y FINANCIERO

Haciendo el respectivo despeje de la presión al inicio de la sección de análisis ( $P_2$ ) de la expresión (2) se tiene:

$$P_2 = \left( \frac{P_1}{\gamma} - h_\alpha - Z_2 - \frac{V_2^2}{2g} \right) * \gamma \quad (2.3)$$

Por tanto, se realiza el cálculo del factor de pérdidas en la tubería por fricción ( $h_\alpha$ ) de la siguiente manera:

$$h_\alpha = f \frac{L}{D} * \frac{V^2}{2g} \quad (2.4)$$

$f$ : factor de pérdidas por fricción (gráfica de Moody)

Luego, se hallan los valores de (a) factor de pérdidas por fricción y (b) la velocidad de flujo para obtener ( $h_\alpha$ ). (a). Factor de pérdida por fricción: Así que el cálculo de la rugosidad relativa ( $\epsilon/D$ ) se tiene:

$$\epsilon = \text{rugosidad relativa PVC} = 0,0015 \text{ mm}$$

Es decir; dado que la tubería empleada es PVC, se tiene el valor de rugosidad relativa con su respectivo diámetro interno (80,42 mm) (Pavco, 2020) para encontrar el valor del factor de pérdidas por fricción del siguiente diagrama.

$$\frac{\epsilon}{D} = \frac{0,0015 \text{ mm}}{80,42 \text{ mm}} = 0,0000186$$

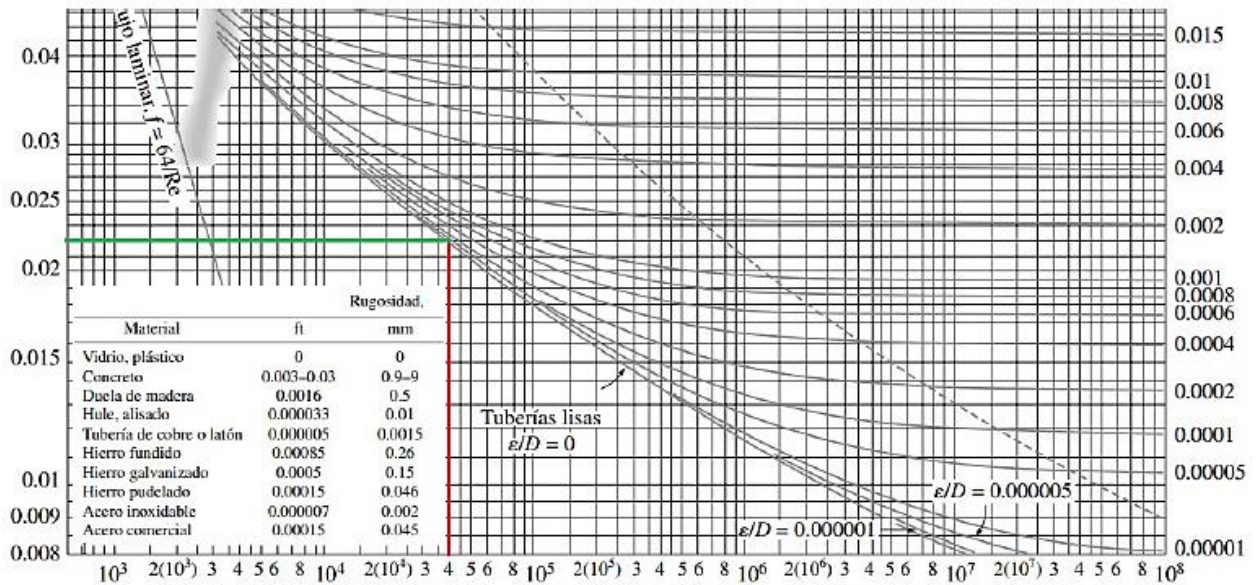


Figura 2.3: Diagrama de Moody (pp. 236 – 237) (Mott, 2006).

## CAPÍTULO 2: ANÁLISIS FLUIDODINÁMICA Y FINANCIERO

Por tanto, transponiendo el número de Reynold del fluido con la rugosidad relativa del material, se tiene:  $f = \mathbf{0,022}$ , ver figura 2.3. (b) Velocidad de flujo: relacionando el caudal de trabajo de la PTAR y al área de la sección transversal de la tubería en análisis se tiene:

$$A_{st} = \pi * r^2 \quad (2.5)$$

$$A_{st} = \pi * \left(\frac{0,08042 \text{ m}}{2}\right)^2 = 5,079 * 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$Q = V_2 * A_{st} \quad (2.6)$$

$$V_2 = \frac{Q}{A_{st}} = \frac{0,002508 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{5,079 * 10^{-3} \text{ m}^2} = \mathbf{0,4937 \text{ m/s}}$$

Teniendo estos datos, se reemplaza en (2.4) de la siguiente manera:

$$h_\alpha = f \frac{L}{D} * \frac{V_2^2}{2g} = 0,022 * \left(\frac{28,7 \text{ m}}{0,08042 \text{ m}}\right) * \left(\frac{(0,4937 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2}{2 * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}\right) = \mathbf{0,09755 \text{ m}}$$

De igual manera se determina el número de Reynolds (pp. 230).(Mott, 2006):

$$R_e = \frac{\rho * V * D}{\mu_{H2O}} \quad (2.7)$$

$$R_e = \frac{(1000 \text{ kg/m}^3)(0,4937 \text{ m/s})(0,08042 \text{ m})}{1,003 * 10^{-3} \text{ kg/ms}} = \mathbf{39588,83}$$

Finalmente, con los valores hallados del factor de pérdidas en la tubería por fricción ( $h_\alpha$ ) se reemplaza en (2.3), para obtener la presión a la salida de la red de tubería en análisis:

$$P_2 = \left( \left( \frac{93079,22 \text{ N/m}^2}{9800 \text{ N/m}^3} \right) - (0,09755 \text{ m}) - (5,7 \text{ m}) - \frac{(0,4937 \text{ m/s})^2}{(2 * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2})} \right) * \left( 9800 \frac{\text{N}}{\text{m}^3} \right)$$

$$P_2 = 36016,53 \text{ Pa} = \mathbf{5,22 \text{ psi}}$$

Por tanto, el análisis de fluidodinámica muestra que entre el punto de descarga de la bomba sumergible y el punto inicial de la red hidráulica en análisis computacional existe una caída de presión aproximada de 8 psi,  $(P_1 - P_2) = 13,5 \text{ psi} - 5,22 \text{ psi}$ .

### 2.3 Cálculo financiero de ahorro agua

La siguiente estimación financiera por concepto de ahorro en agua potable justifica la inversión del proyecto planteado, ya que debido al reúso del líquido tratado de la PTAR se amortigua el gasto en el servicio público de agua potable requerido para la operación. Con el caudal de diseño de la PTAR, para el fundamento teórico inicial el cual plantea y demuestra de manera sistemática el ahorro por concepto de reutilización de agua del tratamiento final. Es importante recordar que el sitio donde llegará el agua tratada es la PTALL del establecimiento, siendo este el sitio de almacenamiento y empleo final del caudal total, siendo aprovechada para uso en baterías sanitarias, piletas de aseo y riego de jardines (Acecolombia, 2017). El volumen total del tanque de reserva de la PTALL tiene una autonomía de 20 a 21 horas en operación regulada (40% - 60% de ocupación) de visitantes, así que entre más se opere el centro comercial con agua de este tanque producto de la lluvia o de agua tratada de la PTAR, mayor es la rentabilidad económica y ahorro en operación del inmueble.

Capacidad tanque de reserva PTALL	136 m <sup>3</sup>
Valor comercial m <sup>3</sup> acueducto Bogotá	\$9,100 sin tarifa aseo
Caudal de diseño PTAR	2,5 lt/s

Tabla 2.2: Variable cálculo viabilidad económica (autores).

$$136 \text{ m}^3 * \$9,100 = \$1'237,600 \text{ pesos}$$

Luego, este valor multiplicado por un periodo mensual (30 días):

$$\$1'237,600 \text{ pesos} * 30 \text{ dias} = \$37'128,000 \text{ pesos}$$

Este es el costo que paga mensualmente en promedio la administración para mantener el tanque de reserva de agua lluvia tratada en la operación constante del edificio, teniendo en cuenta temporada seca (sin lluvias).

El siguiente cálculo sustenta la viabilidad de la modificación técnica planteada a las instalaciones hidráulicas y demuestra el ahorro económico mensual en gasto de agua por reutilización de agua residual.



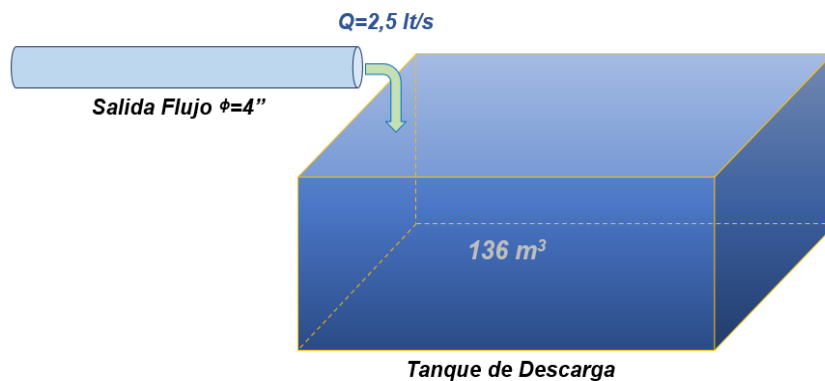


Figura 2.4: Esquema de llegada y recolección de agua tratada PTALL (autores).

$$Q = \frac{\text{volumen}}{\text{tiempo}} \quad (2.8)$$

Para tener en cuenta la capacidad de reutilización mensual (30 días) en agua tratada producto de la PTAR, en relación con el caudal de diseño (2,5 lt/s) de la planta se tiene:

$$\text{periodo: } 30 \text{ dias} * \left(\frac{24 \text{ horas}}{1 \text{ dia}}\right) * \left(\frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ hora}}\right) = 2,592 * 10^6 \text{ segundos}$$

$$\text{caudal: } 2,5 \frac{\text{lt}}{\text{s}} * \left(\frac{1 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{1000 \frac{\text{lt}}{\text{s}}}\right) = 0,0025 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

De (2.8) se tiene el volumen como:

$$\text{volumen} = Q * \text{tiempo} = \left(0,0025 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}\right) * (2,592 * 10^6 \text{ s}) = \mathbf{6480 \text{ m}^3}$$

Y con la capacidad del tanque de reserva final (figura 2.4) de agua tratada se obtiene:

$$t_{\text{llenado}} = \frac{\text{volumen}}{Q} = \frac{136 \text{ m}^3}{0,0025 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}} = 54400 \text{ segundos}$$

$$t_{\text{llenado}} = 54400 \text{ s} * \left(\frac{1 \text{ hora}}{3600 \text{ s}}\right) = \mathbf{15,11 \text{ horas}}$$

Lo cual indica que, en condición estable y constante de operación en la PTAR, se requieren 15 horas para llenar el tanque de reserva de la PTALL, lo que es favorable y viable ya que en la franja horaria de 22:00 a 6:00 es posible realizar este llenado sin afectar la operación y aprovechando la jornada nocturna del establecimiento, donde solo se emplea consumo de agua para operaciones de aseo. Esto siempre y cuando se

## CAPÍTULO 2: ANÁLISIS FLUIDODINÁMICA Y FINANCIERO

mantengan las condiciones técnicas, recepción y entrega de señales asociadas a la operación de la PTAR (Vilanova, Santín, & Pedret, 2017). En lapsos de parada por mantenimiento de la planta, es obligatorio llenar el tanque de reserva con agua potable suministrada por la empresa de servicios públicos. Por otra parte, se demuestra que, con la implementación del proyecto, la capacidad mensual de almacenamiento de agua para fines de reutilización y ahorro sería  $6480 \text{ m}^3$  al mes, siendo positiva la cifra en comparación con el consumo de agua ( $2357 \text{ m}^3$ ) para el periodo noviembre – diciembre del año 2021, que es época de alto número de visitantes al establecimiento.

### **3. CAPÍTULO**

# **EVALUACIÓN POR FLUIDODINÁMICA COMPUTACIONAL**

## **3.1 Introducción**

En este capítulo se desarrolla una evaluación fluido dinámica computacional por medio del método de volúmenes finitos que permite analizar el comportamiento del fluido a lo largo de la tubería diseñada, teniendo como objetivo enfocarse en los campos de velocidad y presión. El análisis se realiza en estado estacionario sin tener en cuenta las bombas y las válvulas, partiendo de la geometría diseñada para el transporte del fluido entre la planta PTAR y la PTALL.

Inicialmente, se plantea la validación de la metodología de simulación mediante el análisis de la primera sección de la tubería, donde se encuentra la entrada del fluido y el cambio de geometría más notable, ya que después de esta sección los cambios en la tubería son menores, por lo tanto, es válido analizar la primera sección por optimización de tiempo y gasto computacional, lo cual no afectará en la simulación de la geometría completa.

En esta sección primero se dará una introducción al método de volúmenes finitos, luego se va a mencionar las ecuaciones gobernantes del flujo que se analizará y finalmente se presentarán los resultados de la validación y el estudio de la malla que garantizan la fiabilidad de los resultados.

## **3.2 Teoría de volúmenes finitos**

La Fluido dinámica Computacional (CFD por sus siglas en inglés), es el área del conocimiento que trata la simulación numérica de flujos, transferencia de calor y fenómenos relacionados, como reacciones químicas, combustión, aero acústica, entre

otros. El fenómeno CFD se origina en la combinación de dos disciplinas: la mecánica de fluidos y el cálculo numérico (Tu, Yeoh, & Liu, 2018). CFD es una rama de la mecánica de fluidos que se encarga de resolver numéricamente las ecuaciones que gobiernan el comportamiento del flujo de un fluido. Es decir, las ecuaciones de Navier-Stokes y modelos de turbulencia que implican los principios de conservación de masa, momento y energía. Esto permite predecir el comportamiento de los fluidos (Ordoñez-Viñán et al., 2018).

CFD es una herramienta que proporciona soluciones rápidas evitando costos en experimentación, permite estudiar un sistema detalladamente y su fiabilidad de resultados es alta, por ello mediante estos se pretende mejorar y optimizar diseñar para garantizar eficiencia en el sistema (Prado, Pinilla, & González, 2018).

### **3.3 Ecuaciones gobernantes de la mecánica de fluidos**

La red de tubería a la que se le ejecutó simulación trabaja con agua en un valor de número de Reynolds equivalente a 39588 (2.7) por lo que se considera un fluido turbulento. Por tanto, para el modelamiento computacional del flujo del fluido no es completamente descrito por las ecuaciones de Navier-Stokes que rigen la física básica de este fenómeno, sino también se necesitan las ecuaciones de turbulencia asociada a este sistema. La turbulencia tiene una alta influencia en los fenómenos de transporte (masa, momentum, calor); por lo tanto, modelar adecuadamente es necesario para una predicción acertada de los fenómenos de fluidos. Entre los modelos de turbulencia que han sido desarrollados se tienen los modelos RANS (Reynolds Average Navier-Stokes) (Idelsohn, Oñate, Del Pin, & Calvo, 2006), que hacen una aproximación del campo del fluido mediante un promedio de las fluctuaciones de las variables del flujo, entre estos modelos se encuentran el modelo Spalart – Almaras (SA), k-e, k-w SST (Shear Stress Transport) (Ma, Barakos, & Zhao, 2021).

El modelo k-w SST tiene las características que combina los modelos k-w y k-e para solucionar la zona cerca a la pared y el interior del flujo libre respectivamente. Este modelo de mediana precisión ha sido exitosamente usado en diferentes aplicaciones

encaminadas a simulaciones CFD. Por lo tanto, para la simulación se trabajó con este modelo (Garzón, 2014).

### 3.4 Metodología de simulación

A continuación, se describirán los pasos desarrollados para ejecutar la simulación fluidodinámica de la red hidráulica diseñada y el mallado elaborado para garantizar que los resultados sean confiables. La red de tubería se planteó en 3 secciones para la ejecución en la simulación. Se inició con la primera fase de la tubería teniendo en cuenta como condiciones de frontera; velocidad de entrada, presión de salida y condición de pared.

#### 3.4.1 Geometría

La geometría del diseño de la tubería propuesta se realizó en el programa SolidWorks, a partir de los planos de fabricación del establecimiento comercial, los cuales cuentan con la separación dimensional entre la PTAR y la PTALL, cambios de diámetros y de direcciones. En la figura 3.1 se presenta la primera sección de la tubería, la cual no presenta cambios relevantes en el desarrollo completo de la misma. Por medio de los complementos del programa ANSYS se importó la geometría para su posterior análisis de volúmenes finitos.

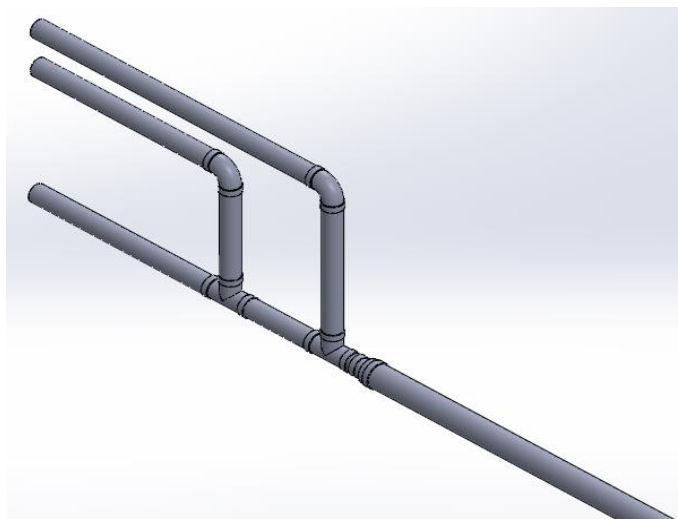


Figura 3.1: Geometría inicial de la tubería (autores).

### 3.4.2 Selección de mallado

El tipo de mallado es considerado una de las partes más importantes para el análisis CFD, por tanto, se debe construir cuidando que la misma no afecte los resultados de la simulación. Para tal fin se realizó un estudio de malla, partiendo desde un mallado fino que se compone de muchos elementos hasta un mallado grueso que contiene pocos elementos.

#### 3.4.2.1 Estudio de mallado

Con este estudio se buscó seleccionar un mallado óptimo para que la simulación cumpla con un número de elementos ideal en cuanto a carga computacional y tiempo estimado de la simulación. También, tener la garantía de que los resultados en cuanto al comportamiento del fluido sean precisos y se acerquen a lo que va a suceder en la realidad.

En el estudio se tuvo en cuenta cuatro tipos de mallas: Fina, intermedia, media y robusta. Se tabularon los valores de las velocidades con respecto al eje Y en dos puntos específicos de las cuatro mallas nombradas anteriormente. Para la verificación del mallado se realizó por medio gráfico y cuantitativo mediante una ecuación del error. En primer lugar, se realiza la simulación en la sección inicial de la tubería como se muestra en la figura 3.1 se obtienen valores de velocidad en 2 puntos de análisis, en el punto 1 el cambio de velocidad es notorio respecto al eje paralelo y en el punto 2 la velocidad se puede considerar constante.



Figura 3.2: Puntos de referencia para estudio de malla (autores).

### CAPÍTULO 3: EVALUACIÓN POR FLUIDODINÁMICA COMPUTACIONAL

En la figura 3.3 se muestra la gráfica de la velocidad contra el eje Y para el punto uno aplicándolo en los cuatro tipos de mallas.

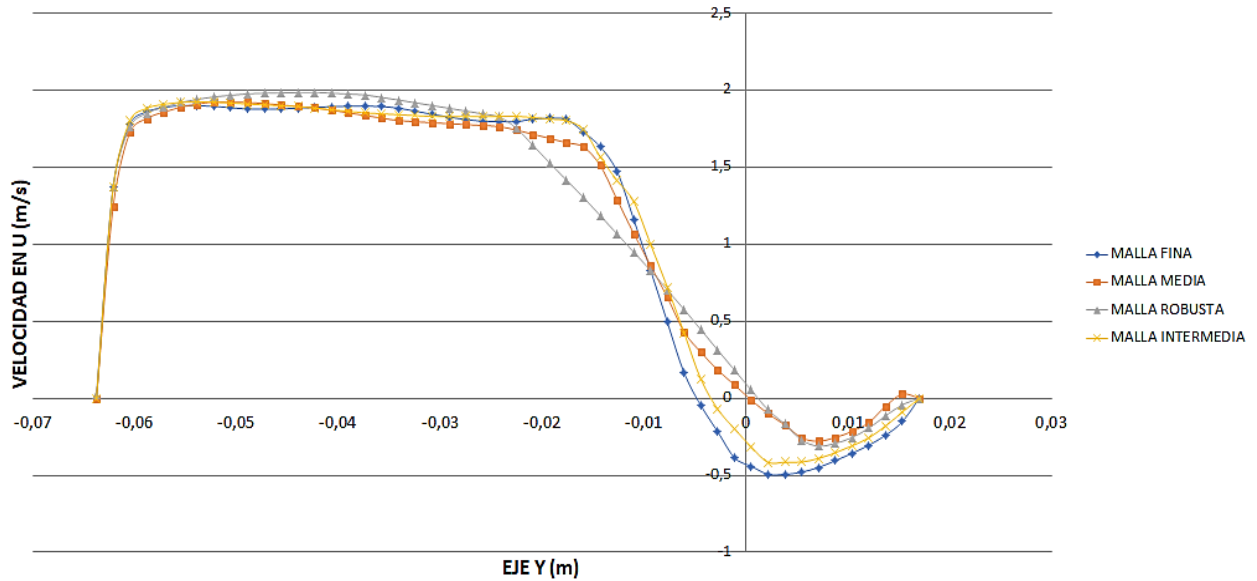


Figura 3.3: Gráfica de velocidad punto 1 (autores).

De la misma forma se graficaron los valores del punto 2 teniendo en cuenta los mismos parámetros que del primer punto, así como se observa en la figura 3.4.

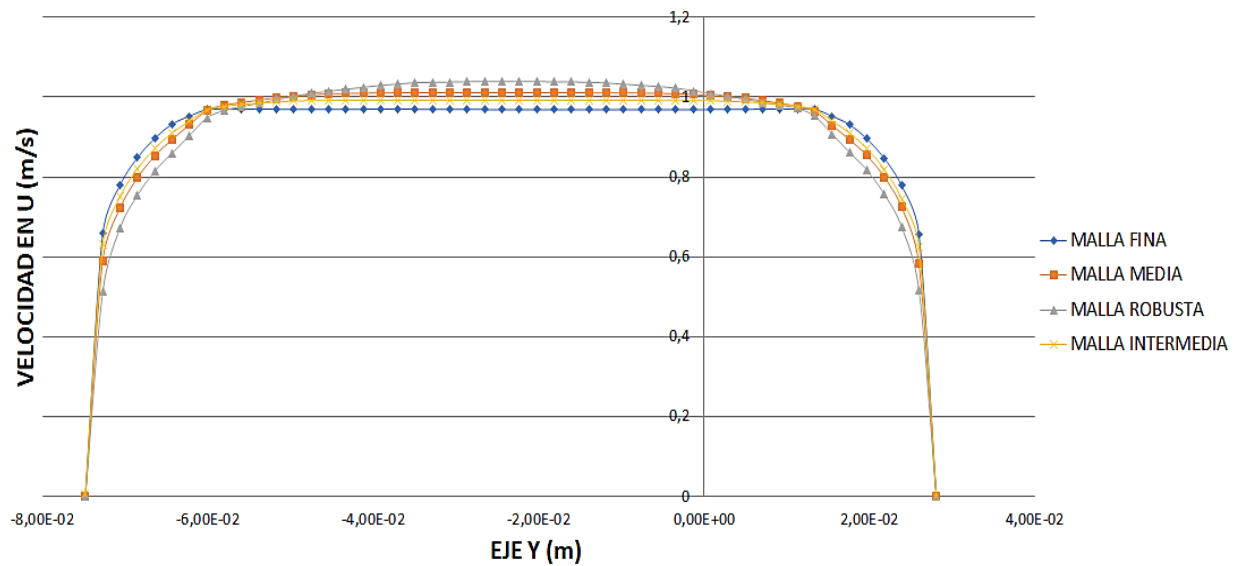


Figura 3.4: Gráfica de velocidad punto 2 (autores).

### CAPÍTULO 3: EVALUACIÓN POR FLUIDODINÁMICA COMPUTACIONAL

Para garantizar que los resultados de la simulación sean confiables se recurre a evaluar el valor  $Y^+$  para validar que la zona de capa límite (cercana a la pared) sea correctamente solucionada. Esta variable relaciona la velocidad cercana a la pared y la altura de los elementos de la malla colindante a la pared. En este caso se utilizó la metodología de función de pared que realiza una aproximación semiempírica del perfil de velocidad y tracciones cercanas a la pared. Para esta metodología el valor calculado en los elementos colindantes a la pared debe estar entre 30 y 300 para que los resultados sean confiables. En la figura 3.5 se presenta la gráfica  $Y^+$  donde se muestra que efectivamente la mayoría de estos resultados están dentro del rango esperado.

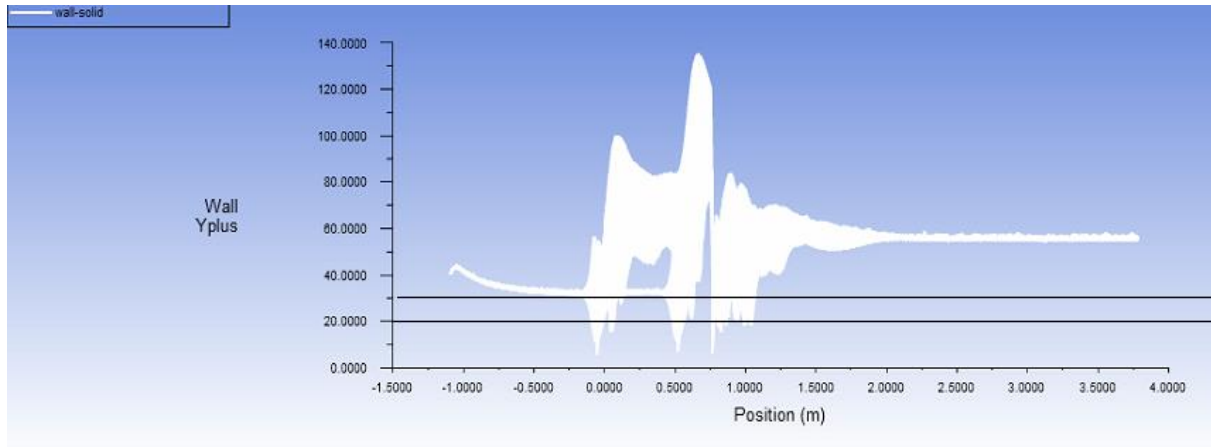


Figura 3.5: Gráfica de  $Y^+$  (autores).

La validación cuantitativa se halló mediante (3.1). Se considera que el valor verdadero son los valores de la malla fina, con esta expresión matemática se pretende encontrar el valor de error mínimo entre las mallas intermedia, media y gruesa para cada uno de los puntos tabulados en las gráficas anteriormente mostradas.

$$Error = \sum_n^N |U_{0_n} - U_{1_n}| \quad (3.1)$$

Dónde:

$N = 50$ ,  $n = 1$ ,  $U_{0_n} = Valor\ verdadero$ ,  $U_{1_n} = Valor\ aproximado$

Con esta expresión se obtuvieron los valores numéricos entre la interacción de una malla refinada y una robusta, logrando mallas intermedias que cumplan con el



### CAPÍTULO 3: EVALUACIÓN POR FLUIDODINÁMICA COMPUTACIONAL

número de elementos requeridos para la simulación. Donde los resultados de errores de muestran en la siguiente tabla:

TIPO DE MALLADO	PUNTO 1	PUNTO 2
<b>Fino-robusto</b>	8,16	2,74
<b>Fino-intermedio</b>	2,74	1,00
<b>Fino-medio</b>	5,95	1,76

Tabla 3.1: Resultados de error mallado (autores).

Con las gráficas y la ecuación del error se espera obtener el valor mínimo en los puntos de interés 1 y 2 de la geometría, para la elección entre mallado fino, grueso e intermedio. Los resultados obtenidos en el estudio de mallado presentados en la tabla 3.1 se considera que el valor mínimo de error entre la interacción de mallas es fino-intermedio y con las gráficas desarrolladas se justifica que la malla cumple adecuadamente con el número de elementos. Por tanto, el tipo de mallado seleccionado para la simulación que comprende la geometría de la tubería es fino – intermedio.

## 4. CAPÍTULO

# DESARROLLO SIMULACIÓN FLUIDO ESTRUCTURA

### 4.1 Introducción

En este capítulo se desarrollará una simulación fluido dinámica total de la red de tubería diseñada por medio de volúmenes finitos, teniendo en cuenta los resultados obtenidos en el estudio de malla realizado en la sección anterior. Del mismo modo, se realizará una evaluación numérica de la interacción fluido estructura FSI (Fluid-Structure Interaction) en una sola vía donde se evalúa la respuesta de la estructura de la tubería con las cargas fluido dinámicas generadas por el fluido en la simulación CFD.

Por medio de la simulación FSI se analiza el comportamiento estructural del modelo mediante el solucionador estructural estático, donde se evalúan las máximas deformaciones y esfuerzos producidos por las cargas en secciones específicas de la tubería. Este tipo de simulaciones permiten justificar la confiabilidad del diseño estructural y de los materiales empleados adquiriendo un factor de seguridad permisible.

En ese apartado inicialmente se va a realizar una introducción sobre análisis multi físicos y fluido estructura después de explicar las consideraciones y condiciones de frontera que se tuvieron en cuenta para cada una de las simulaciones (CFD y FSI). Finalmente se presentan los resultados obtenidos de manera gráfica, dado que la tubería es extensa en longitud se presentan tres secciones donde se destacan los valores más relevantes.

## 4.2 Teoría de análisis multi físicos, fluido estructura y elementos finitos.

Los análisis multi físicos se basan en la evaluación de diferentes condiciones físicas de forma simultánea para predecir el comportamiento y reacción de un determinado diseño, este tipo de análisis es importante para predecir el desempeño de un modelo a la hora de su funcionamiento. Estos análisis multi físicos permiten evaluar fenómenos que no se pueden analizar de forma aislada permitiendo obtener mejoras en los diseños. Los análisis multi físicos más utilizados en la ingeniería son: Fluido-estructura, Fluido-térmico, Estructura-acústico, Movimiento-estructura (Ferrás, Manso, Schleiss, & Covas, 2018).

La Interacción Fluido-Estructura (FSI) puede involucrar el acople de diferentes campos físicos como; transferencia de calor, movimiento, transporte de fluidos y los impactos que estos generan en la dinámica estructural. Las interacciones más utilizadas son los análisis de fluidodinámica con mecánica estructural, ya que el objetivo de este es considerar las consecuencias directas de las cargas ocasionadas por el fluido en el análisis estructural (Tijsseling, 1996).

Los análisis fluido-estructura se pueden desarrollar de dos maneras: una vía y dos vías.

- ✓ Fluido-estructura en una vía: este tipo de análisis es comúnmente utilizado para considerar las cargas del fluido en el análisis estático sin tener en cuenta cómo afecta la deformación de la estructura en los campos del fluido.
- ✓ Fluido-estructura en dos vías: en este estudio se consideran las cargas del fluido en la estructura y también como las deformaciones alteran el campo del fluido en su trayectoria a lo largo de la geometría de forma cíclica.

En las simulaciones relacionadas con fluidos se utiliza aproximaciones como volúmenes finitos, mientras que para el análisis estructural es ampliamente utilizado el Método por Elementos Finitos (FEM por sus siglas en inglés). Este método numérico permite predecir el rendimiento de un objeto o diseño que está sometido a fuerzas,

presiones, vibraciones, temperatura o interacción con fluidos. Con este tipo de análisis se busca estudiar el comportamiento físico mecánico de los materiales que componen el modelo, entre los más comunes están: las deformaciones estructurales, esfuerzos mecánicos, fatiga, puntos de ruptura y factor de seguridad. La aplicación de FEM en la ciencia e ingeniería es de amplia gama, ya que por medio de métodos numéricos computacionales se pueden modelar y solucionar ecuaciones matemáticas estructurales complejas de desarrollar (Nikishkov G.P, IZUMI, & SONOHARA, 2008).

### 4.3 Análisis CFD de la red hidráulica diseñada

Las condiciones de frontera del dominio del fluido nombradas en el apartado 3.4 del capítulo 3, se presentan en la siguiente tabla.

VARIABLE	ENTRADA	SALIDA
<b>Velocidad (m/s)</b>	0.486	-----
<b>Presión manométrica (Pa)</b>	-----	0
<b>Temperatura (°C)</b>	18	18
<b>Fluido</b>	Agua	

Tabla 4.1: Valores de condiciones de frontera en simulación (autores).

Teniendo en cuenta la validación de malla y su justificación, se ejecutó un análisis fluido dinámico a lo largo de toda la geometría del modelo. El objetivo final de esta simulación es conocer y precisar el comportamiento del fluido en referente a velocidad y presión.

Para esta simulación se tuvo en cuenta condiciones de frontera en la entrada y en la salida del modelo diseñado, además se trabajó con 2 '713.698 de elementos. En la entrada se consideró la velocidad calculada con la expresión (2.6) (ver capítulo 2) esta fue aplicada en las tres ramificaciones de entrada de flujo interno de la tubería, ver figura 4.1.

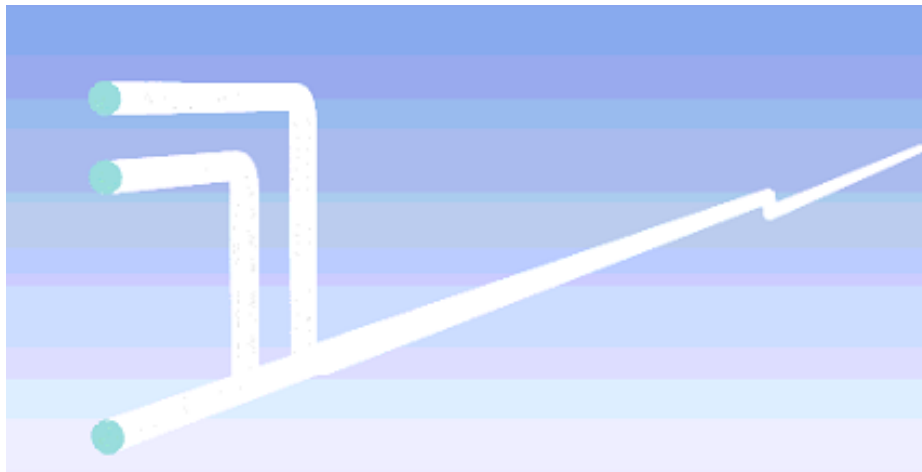


Figura 4.1: Localización velocidad de entrada (autores).

La condición de salida asumida para la simulación fue la presión atmosférica, debido a que la trayectoria del flujo termina en un tanque de descarga el cual se encuentra despresurizado con respecto a la presión interna de la tubería, ver figura 4.2.

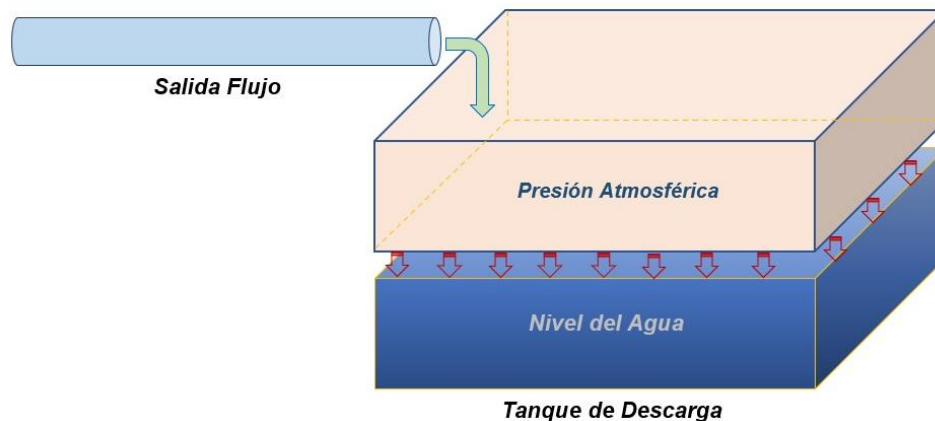


Figura 4.2: Esquema salida de flujo en la tubería (autores).

Luego se puede observar la velocidad de entrada, la presión de salida y la condición de pared, ver figura 4.3.

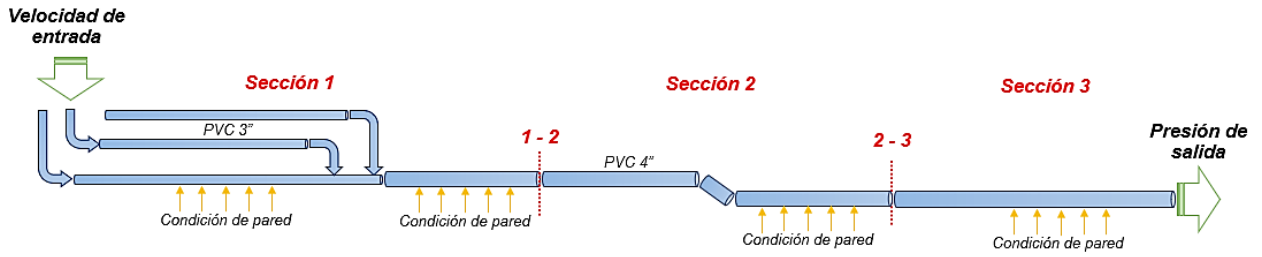


Figura 4.3: Condiciones de frontera CFD (autores).

#### 4.4 Resultados de la simulación por CFD

Los resultados obtenidos alusivos a la velocidad y presión a lo largo del modelo se presentan en tres secciones de interés en la tubería, precisamente donde las 2 variables (velocidad y presión) se mantienen constantes y presentan cambios relevantes. En las figuras 4.4 y 4.5 se muestra que los resultados de velocidad y presión son consistentes con la realidad, ya que donde se unen las 3 tuberías se presenta aceleración del fluido y caída de presión sostenida a lo largo de la tubería.

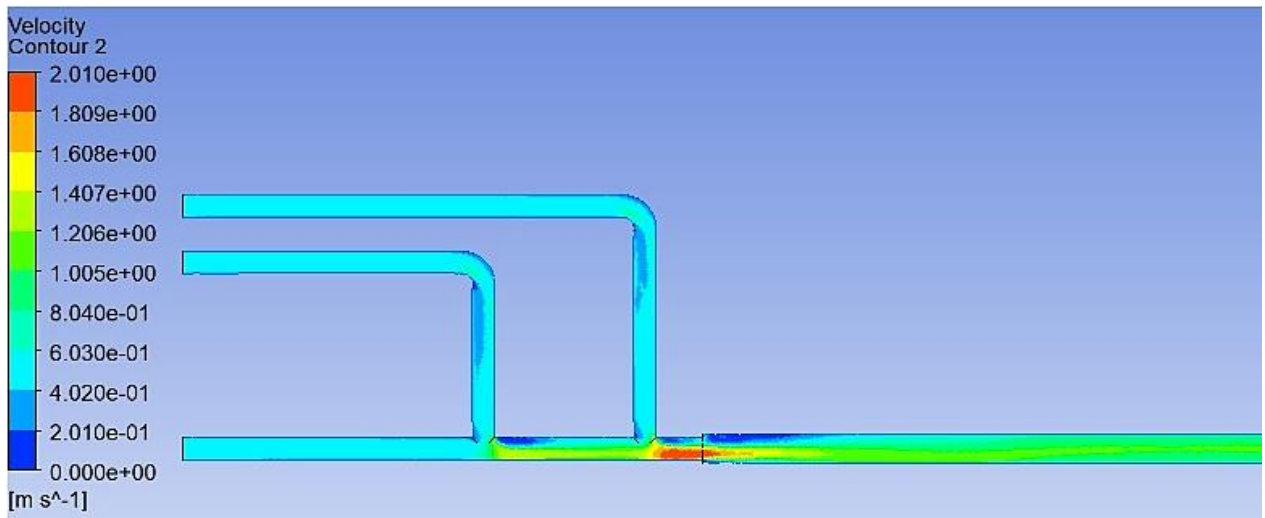


Figura 4.4: Perfiles de velocidad en primera sección tubería (autores).

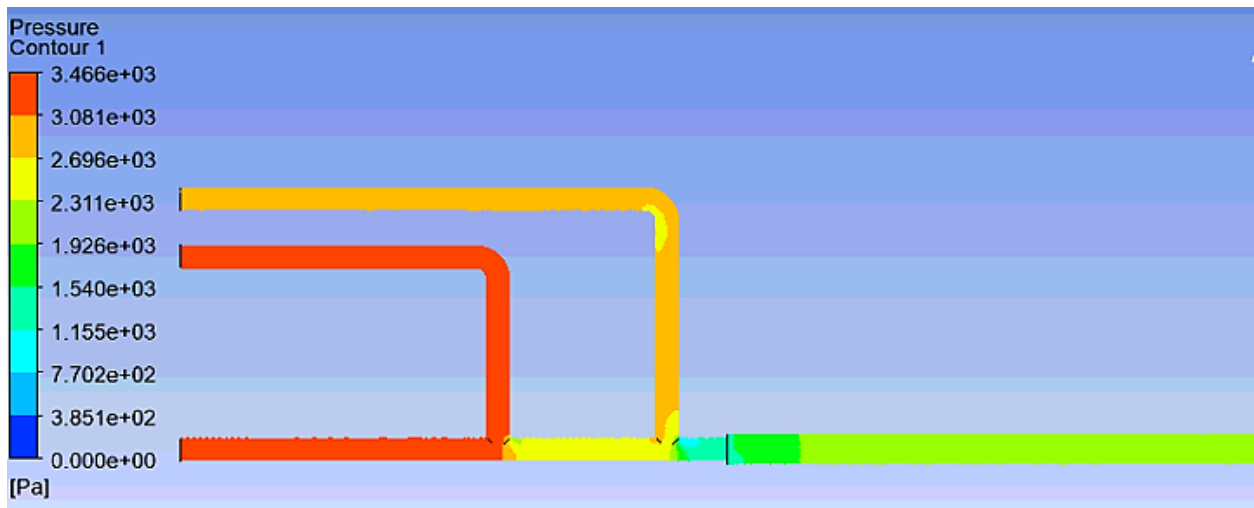


Figura 4.5: Perfiles de presión en primera sección tubería (autores).

La segunda sección es donde se evidencia cambio de dirección en la geometría, en la figura 4.6 y 4.7 se observan igualmente caída de presión y constancia en la velocidad a lo largo de la tubería.

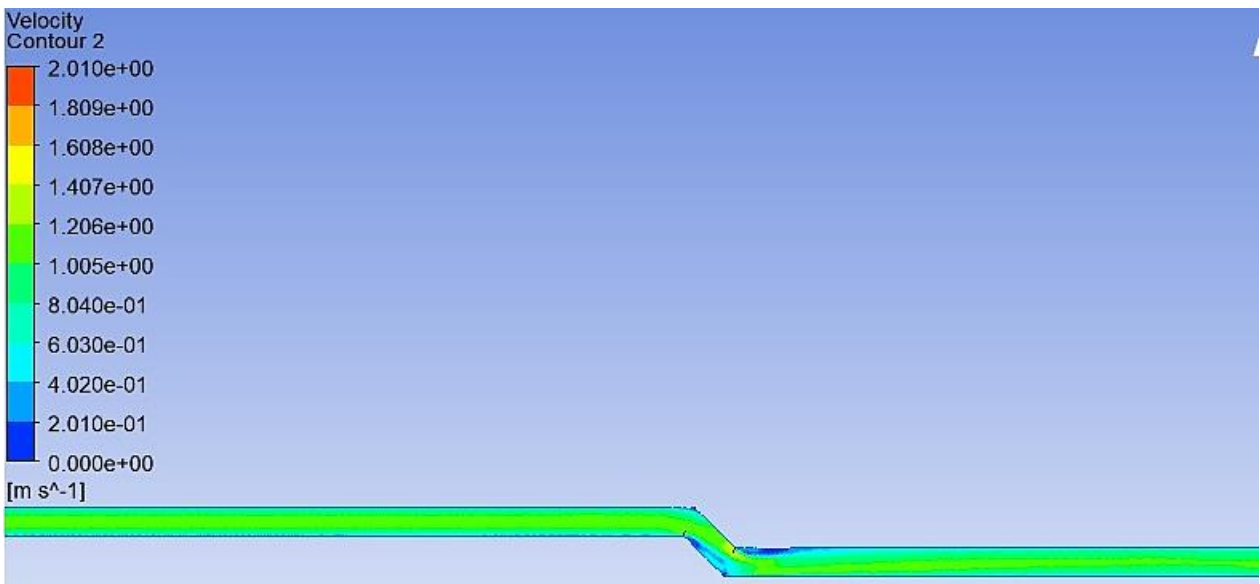


Figura 4.6: Perfiles de velocidad en segunda sección tubería (autores).

## CAPÍTULO 4: DESARROLLO SIMULACIÓN FLUIDO ESTRUCTURA

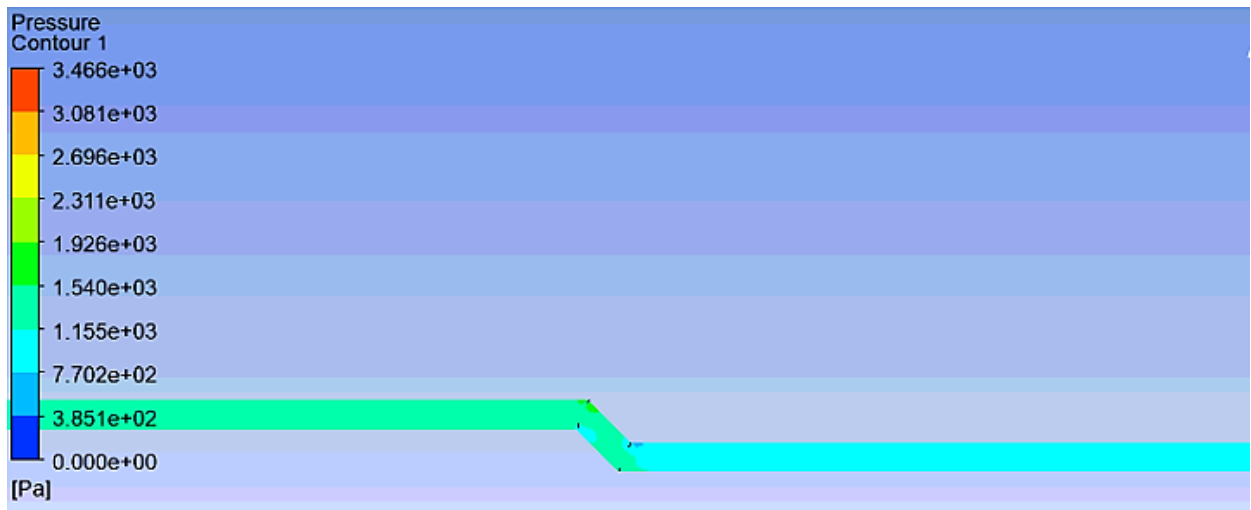


Figura 4.7: Perfiles de presión en segunda sección tubería (autores).

Y por último se muestran los resultados de la última sección en las imágenes 4.8 y 4.9.



Figura 4.8: Perfiles de velocidad en tercera sección tubería (autores).



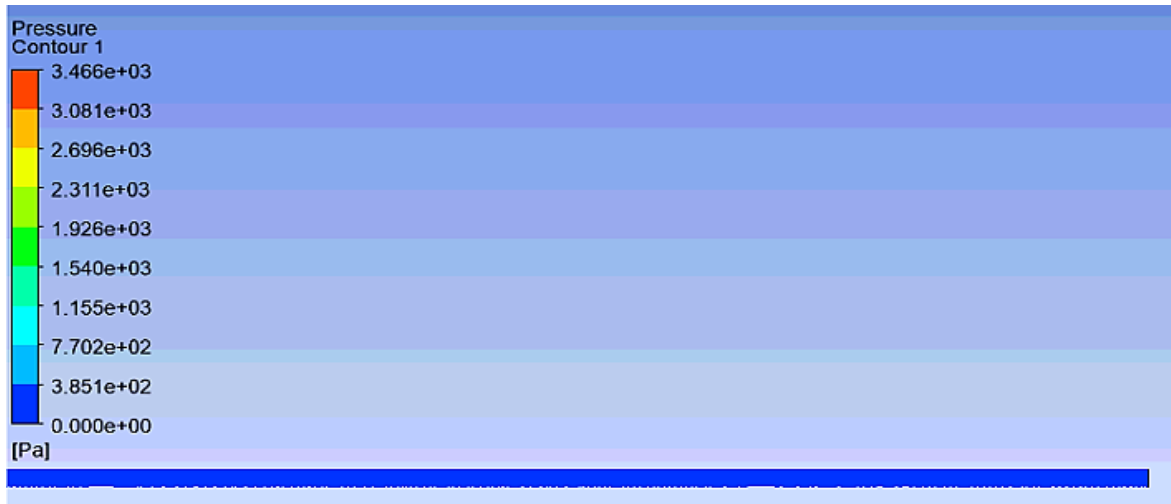


Figura 4.9: Perfiles de presión en tercera sección tubería (autores).

Basado en los resultados del análisis CFD (velocidad y presión) se deduce que la presión que ejerce el fluido a las paredes internas de la tubería en PVC es baja (3466 Pa) por la extensa longitud en la red y presencia de presión atmosférica al final de la tubería. En cuanto a las condiciones de transporte del flujo al interior de la red, se incrementa la velocidad del líquido, debido al paso por las ramificaciones de la primera sección y la integración de los flujos al llegar a la sección de mayor diámetro, donde se mantiene constante dicha velocidad a lo largo del tramo restante.

#### 4.5 Interacción fluido estructura

Con el desarrollo y resultado del apartado anterior se evalúa el comportamiento exterior de la estructura en la red hidráulica mediante análisis estático, relacionándolas con las propiedades físico-mecánicas del PVC extruido por ser el material empleado en la tubería de la red. Finalmente se hallan los esfuerzos, deformaciones y factor de seguridad aceptable asociado al diseño.

En la expresión (4.1) se definen las condiciones en la interacción fluido sólido. Donde ( $\sigma$ ) es el tensor de esfuerzos de *Cauchy* (Barulich, Godoy, & Dardati, 2018), que corresponden a los esfuerzos del fluido e involucra la presión y el gradiente de la velocidad. Luego P son las tracciones que se imprimen sobre el sólido. Adicionalmente,

## CAPÍTULO 4: DESARROLLO SIMULACIÓN FLUIDO ESTRUCTURA

se tiene  $n^f$  y  $n^s$  que son las normales a las superficies de la interfaz del fluido y el sólido respectivamente.

$$\sigma^f * n^f + P * n^s = 0 \quad (4.1)$$

Este modelo matemático ilustra las condiciones de interacción fluido sólido de esta aplicación, es decir que los esfuerzos del fluido que pasan por el conducto interno se transmiten a la tubería por medio de la interacción entre el agua y la pared de la tubería de PVC.

Por tanto, para obtener la condición de esfuerzos sobre la tubería en el análisis FSI, se deben exportar los resultados de los campos de presión obtenidos en la simulación CFD anteriormente mostrada, al solucionador estructural de *ANSYS*.

Una de las condiciones iniciales consideradas para desarrollar el análisis multi físico fue la presión obtenida en los resultados de la simulación CFD, esta se encuentra localizada en las paredes internas donde interactúa el flujo con la parte rígida de la tubería. En la figura 4.10 se muestra de color azul la localización de las cargas dinámicas en el modelo.

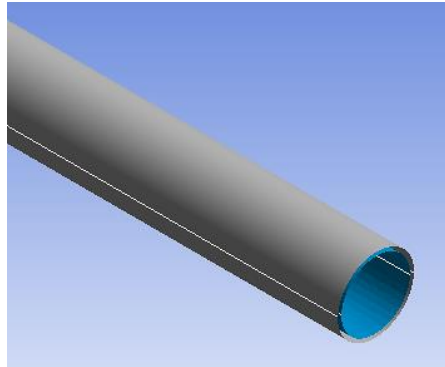


Figura 4.10: Localización de la presión en el modelo CFD (autores).

La interacción entre la presión del fluido y la geometría estructural de todas las secciones de la tubería causan tensiones contenidas en el interior de las paredes a lo largo del transporte del fluido, en la figura 4.11 se muestra gráficamente esta interacción.

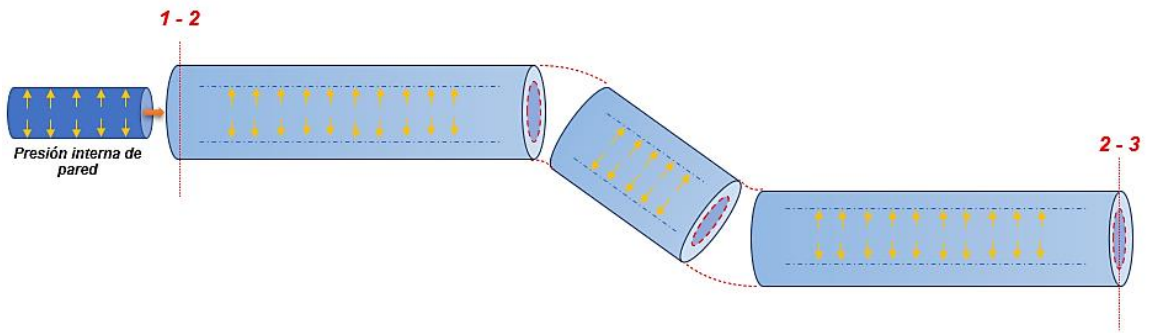


Figura 4.11: Interacción del fluido con la pared interna del PVC (autores).

La segunda condición de frontera tenida en cuenta son los soportes fijos, estos restringen en su totalidad el movimiento de la tubería en X, Y y Z, se encuentran ubicados en las tres entradas del flujo y en la salida de este. En la figura 4.12 se muestra la ubicación de dichos soportes.

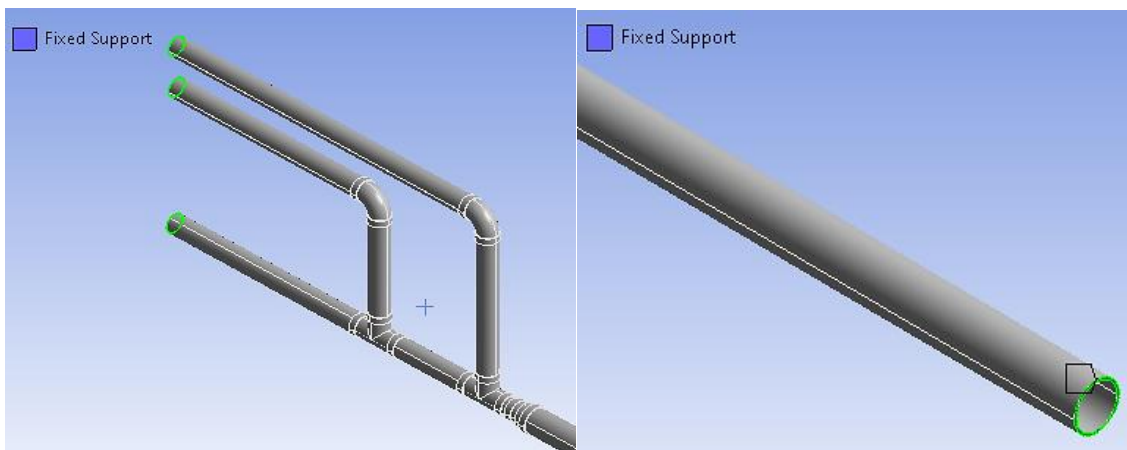


Figura 4.12: Ubicación de soportes fijos en la tubería (autores).

Estos soportes fijos se asumen de tal manera que al inicio de la tubería (sección 1) y al punto de descarga (sección 3) se encuentra anclada la geometría de la red hidráulica en análisis. Por lo tanto, se tomó esta condición inicial para restringir el movimiento de la tubería en los tres ejes coordenados, por tanto, no se tienen en cuenta las cargas hidrostáticas y no se analizan los anclajes reales de la tubería. ver figura 4.13.

## CAPÍTULO 4: DESARROLLO SIMULACIÓN FLUIDO ESTRUCTURA

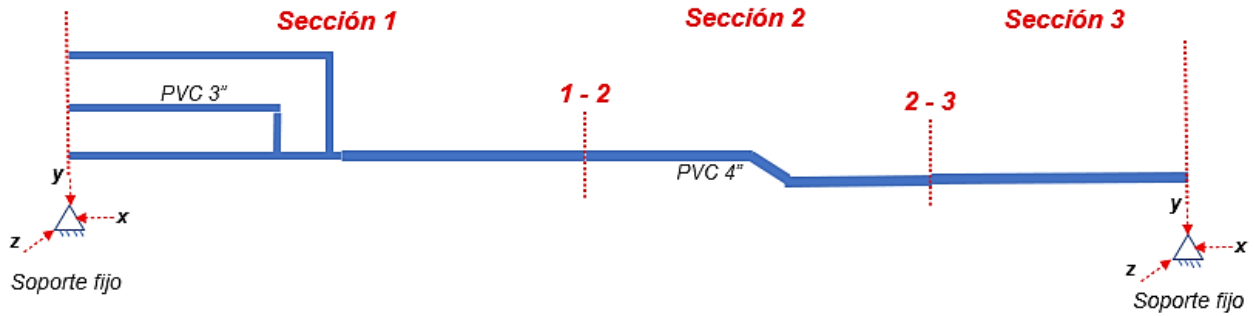


Figura 4.13: Localización de puntos fijos para simulación FSI (autores).

Otra consideración tenida en cuenta a la ejecución de la simulación FSI de la red hidráulica en análisis, son las propiedades físico-mecánicas de material PVC extruido rígido, tomadas de la biblioteca de materiales de ANSYS. En la figura 4.14 se presentan las propiedades del material tomado del programa.

Properties of Outline Row 3: PVC / uPVC (unplasticized, rigid)			
	A	B	C
1	Property	Value	Unit
2	Density	1,39E-06	kg mm <sup>-3</sup>
3	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion		
4	Coefficient of Thermal Expansion	0,000127	C <sup>-1</sup>
5	Isotropic Elasticity		
6	Derive from	Young's Modul...	
7	Young's Modulus	2860	MPa
8	Poisson's Ratio	0,4	
9	Bulk Modulus	4766,7	MPa
10	Shear Modulus	1021,4	MPa
11	Tensile Yield Strength	46,7	MPa
12	Tensile Ultimate Strength	46,7	MPa
13	Isotropic Thermal Conductivity	0,000175	W mm <sup>-1</sup> C <sup>-1</sup>
14	Specific Heat, C <sub>p</sub>	1,05E+06	mJ kg <sup>-1</sup> C <sup>-1</sup>
15	Isotropic Resistivity	1E+16	ohm mm

Figura 4.14: Propiedades del PVC biblioteca software (ANSYS).

### 4.6 Resultados simulación FSI

Los resultados del modelo se presentan de la misma manera que en el análisis CFD, precisando las secciones de interés, también se presentan un análisis de convergencia,

## CAPÍTULO 4: DESARROLLO SIMULACIÓN FLUIDO ESTRUCTURA

que indican la discrepancia entre los resultados obtenidos con 4 tipos de mallas modificando el número de elementos, ver tabla 4.2 donde se puede apreciar que la diferencia numérica y porcentual entre la malla fina e intermedia no es significativo respecto a las magnitudes del modelo analizado, siendo el mallado fino el ideal. En las figuras 4.15 y 4.16 se muestran las deformaciones y esfuerzos presentados en la primera sección de la geometría.

Tipo de malla	Número de elementos	Desplazamientos en Y (mm)	% error	Desplazamientos en X (mm)	% error	Esfuerzos (Mpa)	% error
FINO	2043186	7,35		0,037		0,118	
INTERMEDIO	965605	7,03	4,35%	0,036	2,70%	0,103	12,71%
MEDIO	444863	5,98	18,64%	0,032	13,51%	0,068	42,37%
GRUESO	243479	4,49	38,91%	0,029	21,62%	0,062	47,46%

Tabla 4.2: Resultados del estudio de convergencia. (autores)

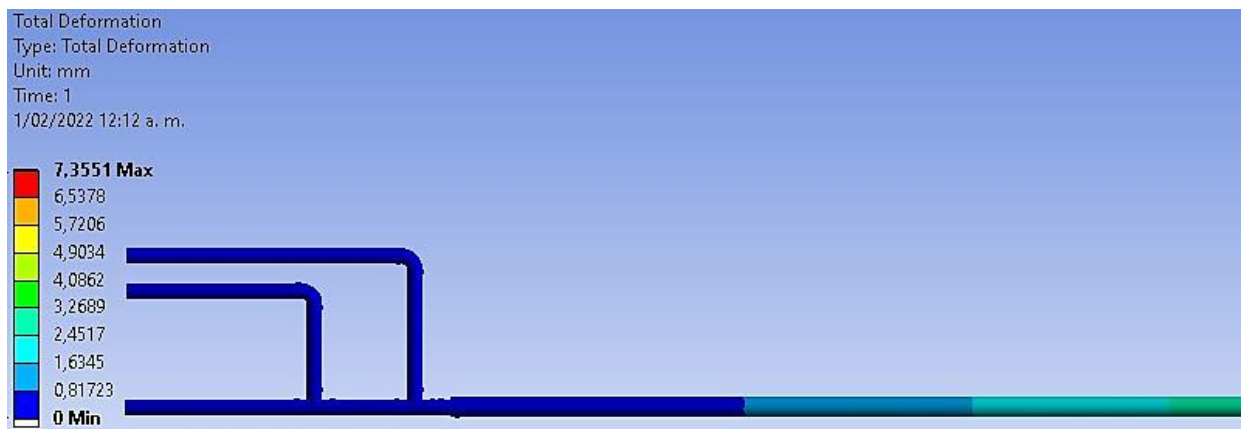


Figura 4.15: Deformaciones equivalentes en la primera sección (autores).

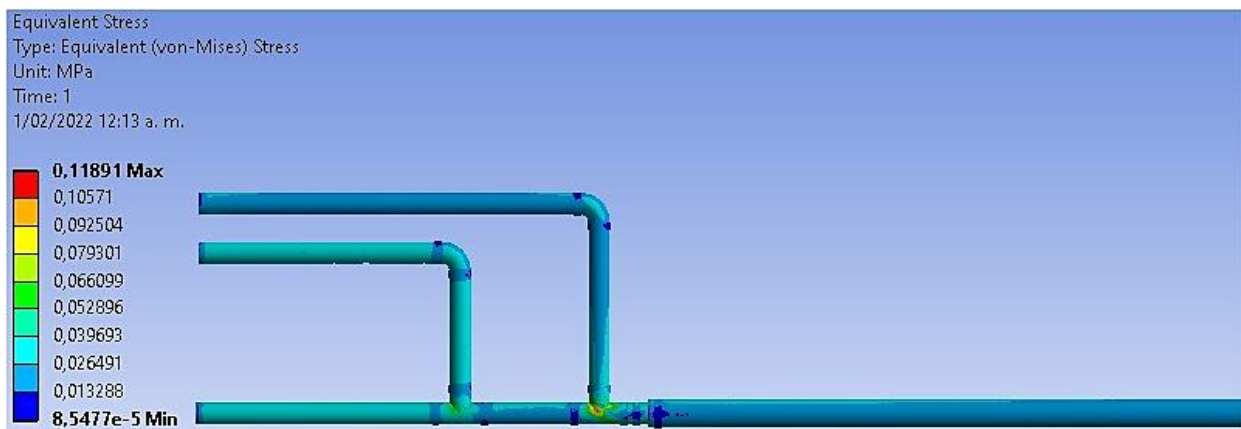


Figura 4.16: Esfuerzos equivalentes en la primera sección (autores).

## CAPÍTULO 4: DESARROLLO SIMULACIÓN FLUIDO ESTRUCTURA

En las figuras 4.17 y 4.18 se muestran los resultados de la segunda sección de interés en la simulación.



Figura 4.17: Deformaciones equivalentes en la segunda sección (autores).

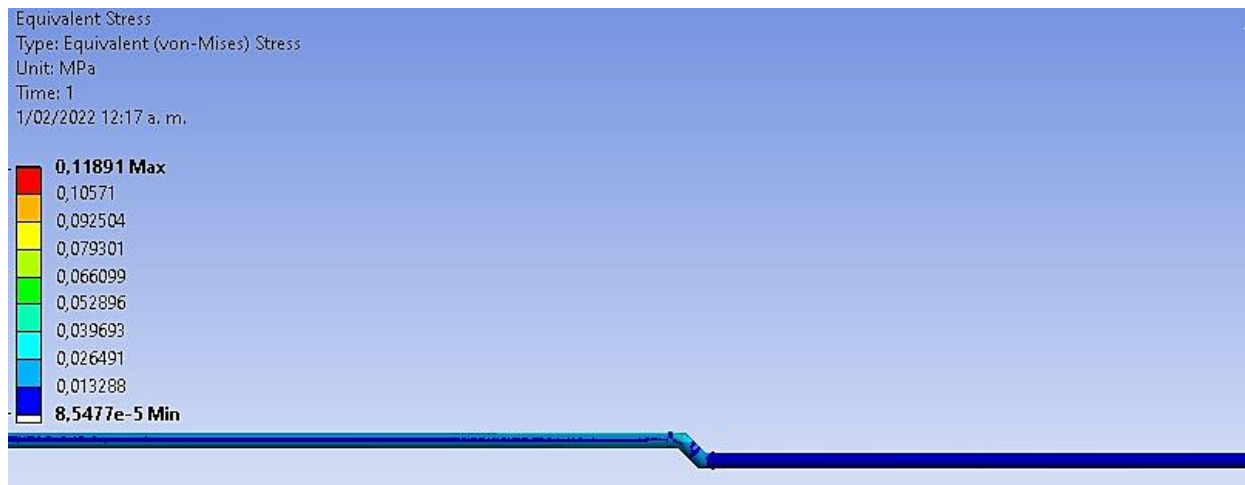


Figura 4.18: Esfuerzos equivalentes en la segunda sección (autores).

Por último, se presentan las variables obtenidas en la última sección de la red, ver figuras 4.19 y 4.20.

## CAPÍTULO 4: DESARROLLO SIMULACIÓN FLUIDO ESTRUCTURA



Figura 4.19: Deformaciones equivalentes en la tercera sección (autores).



Figura 4.20: Esfuerzos equivalentes en la tercera sección (autores).

Por lo tanto, se ejecutó la simulación FSI con tipo de malla fino (2 '043,186) elementos. Luego, se presentan los rangos numéricos en los esfuerzos y deformaciones de la simulación, ver tabla 4.3.

RANGOS	ESFUERZOS (Pa)	DEFORMACIONES (mm)
<b>Mínimos</b>	85,47	0
<b>Máximos</b>	118000	7,35

Tabla 4.3: Valores de esfuerzos y deformaciones (autores).

## CAPÍTULO 4: DESARROLLO SIMULACIÓN FLUIDO ESTRUCTURA

En la tabla 4.3 se muestran los valores máximos y mínimos obtenidos en la simulación FSI, a partir de estos se puede considerar que la deformación máxima es irrelevante con respecto a las dimensiones de la tubería y no causa ningún efecto de ruptura o plasticidad en la tubería PVC. El mayor esfuerzo equivalente se encuentra por debajo del límite de fluencia del material, por lo tanto, el diseño cuenta con un factor de seguridad elevado y confiable.

### 4.7 Evaluación de consideraciones por fuera del diseño

Considerar los anteriores análisis y resultados asociados a la simulación de la red, en caso de que se quisiera implementar una posible ampliación de baja proporción en la capacidad del caudal nominal de la planta de tratamiento. Debido a que el factor de seguridad (F.S), de la primera simulación fue 15. Teniendo en cuenta el límite de fluencia del material (S) empleado en el diseño y los esfuerzos máximos admisibles ( $\sigma$ ) obtenidos del análisis computacional, de acuerdo con la definición del factor de seguridad (4.2) y la teoría de falla de *Von Mises* (pp. 179-181) (Norton, 2011) se da elevado este valor. Así que se pueden considerar nuevas condiciones físicas de mayor magnitud al entorno del modelo planteado.

$$F.S = \frac{S_{\text{límite}}}{\sigma_e} \quad (4.2)$$



## 5. CONCLUSIONES

Se ejecutó el respectivo diseño y simulación computacional por el método de volúmenes finitos en interacción de fluido estructura de una sola vía a la red hidráulica de transporte del agua tratada de la PTAR, donde se obtuvieron resultados favorables que confirman la viabilidad del diseño y argumentan la inversión por su implementación y puesta en marcha hacia los propietarios del centro comercial, en relación con el diagnóstico técnico hecho a cada una de las fases de tratamiento de la planta. Se demuestra el ahorro económico que puede tener la administración del establecimiento por ahorro en agua potable que suministra la empresa de servicios públicos y a su vez se efectuó la estimación del tiempo requerido para llenar el tanque de destino final donde se reutiliza el agua, siendo favorable el resultado en torno con la operación y consumo de agua promedio del inmueble. Con la implementación del proyecto el centro comercial estaría en la capacidad de ahorrar agua suficiente para su operación incluso en temporadas altas, ya que las cifras de consumo inicial del inmueble son menores en comparación con las cifras de ahorro de la investigación, todo lo anterior centrado al correcto funcionamiento de la PTAR.

Se llegó a una metodología de evaluación por medio de CFD para el análisis de tuberías y se logró validar los resultados por medio de selección y estudio de mallado, definiendo la geometría del modelo de la red en PVC. En la interacción fluido estructura, la red de tubería en análisis puede soportar cargas mayores debido a los resultados obtenidos y en relación con el factor de seguridad.

CFD es una herramienta que proporciona resultados y análisis precisos, por tanto, se pueden evaluar otras herramientas para el procesamiento más eficiente en cuanto a tiempo se refiere de los resultados.

Basado en los resultados obtenidos por el análisis de CFD en velocidad y presión, se concluye que la presión que ejerce el fluido en movimiento al interior de la tubería de PVC es baja por la extensión en longitud y la acción de la presión atmosférica al final

## CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES

de la red en análisis. Por tanto, se confirma que la red de tubería analizada puede llegar a operar en condiciones fuera del diseño o por una modificación en la ampliación de la capacidad nominal de caudal en agua tratada de la PTAR.

Es posible comparar y comprobar los resultados por métodos de teorías experimentales de toma de presiones y caudales en la tubería real de la planta citada, por medio de instrumentación certificada (manómetro y caudalímetro).

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- Acecolombia. (2017). Nuevos conceptos en el shopping. *Revista Punto Comercial*, 30 edición, 82.
- Barnes de Colombia, W. P. (2000). *Ficha Técnica Bombas sumergibles para aguas residuales*. 1–9.
- Barulich, N. D., Godoy, L. A., & Dardati, P. M. (2018). A simple procedure to evaluate Cauchy stress tensor at the macro level based on computational micromechanics under general finite strain states. *Mechanics of Materials*, 117, 73–80. <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2017.10.008>
- Ferras, D., Manso, P. A., Schleiss, A. J., & Covas, D. I. C. (2018). One dimensional fluid-structure Interaction models in pressurized fluid-filled pipes: A review. *Applied Sciences (Switzerland)*, 8(10), 1–33. <https://doi.org/10.3390/app8101844>
- Garzón, S. (2014). Modelación en CFD de un tramo del río Arzobispo (Bogotá D.C). *Pontificia Universidad Javeriana*, 5–19.
- Hamerlinck, Y. (1994). Purification of Industrial Effluent Using Granular Activated Carbon and Reactivation. *Industrial Effluent Purification*.
- Icontec. (2004). *Norma Técnica Colombiana NTC1500. E: Colombian pipework code (I.C.S.: 91.140.60)*, 85.
- Idelsohn, S. R., Oñate, E., Del Pin, F., & Calvo, N. (2006). Fluid-structure interaction using the particle finite element method. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 195(17–18), 2100–2123. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2005.02.026>
- Ma, L., Barakos, G. N., & Zhao, Q. (2021). A 3D implicit structured multi-block grid finite volume method for computational structural dynamics. *m*. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2021.106980>
- Martín, R. Salcedo, R. F. (2011). MECÁNICA DE FLUIDOS Tema3. Medida de caudales. *Universidad de Alicante*, 1–21.
- Mott, R. L. (2006). *Mecánica de Fluidos - Sexta edición* (p. 644). p. 644.

## BIBLIOGRAFÍA

- <https://doi.org/970-26-0805-8>
- Nikishkov G.P, IZUMI, M., & SONOHARA, M. (2008). Introduction to the Finite Element Method. *University of Aizu, Aizu-Wakamatsu Igaku Toshokan*, 55(3), 211–211. <https://doi.org/10.7142/igakutoshokan.55.211>
- Norton, R. L. (2011). *Diseño de Máquinas. Un enfoque integrado* (4 edición). Mexico: Pearson Prentice Hall.
- Ordoñez-Viñán, M. A., Aquino-Arroba, S. M., Orozco-Cantos, L. S., Pozo-Safla, E. R., & Jácome-Domínguez, E. Á. (2018). Modelización CFD para determinar el comportamiento del fluido en tuberías de PVC. *Dominio de Las Ciencias*, 4(1), 434. <https://doi.org/10.23857/dc.v4i1.754>
- Pavco, W. (2020). Manual Técnico Tubosistemas Presión PVC. *Orbia Advancing Life Together*, 2, 22.
- Pinto, R. L. M. (2020). SIMULACIÓN APLICADA PARA EL ANÁLISIS PREVIO DEL COMPORTAMIENTO DEL FLUJO, DURANTE SU TRANSPORTE EN LÍNEAS DE TUBERIA. *Universidad Estatal Peninsula de Santa Elena*.
- Prado, L. P. M., Pinilla, L. I. D., & González, G. (2018). Dinámica de fluidos computacional en el análisis de intercambiadores de calor de coraza y tubos. *Revista UIS Ingenierías*, 18(2), 237–244. <https://doi.org/10.18273/revuin.v18n2-2019022>
- Salcedo, R., Bayón, A., & Chueca, P. (2017). Introduciendo la dinámica de fluidos computacional en el análisis de flujos en medio poroso. *Modelling in Science Education and Learning*, 10(1), 261. <https://doi.org/10.4995/msel.2017.6700>
- Schleicher, J. (2007). *Information on pH measurement* (4 edition; Jumo, Ed.). Retrieved from FAS622
- Sostenible, ministerio de ambiente y desarrollo. (2015). *Resolucion 0631 - 17 de marzo 2015* (p. 62). p. 62.
- Tijsseling, A. S. (1996). Fluid-structure interaction in liquid-filled pipe systems: A review. *Journal of Fluids and Structures*, 10(2), 109–146. <https://doi.org/10.1006/jfls.1996.0009>

## BIBLIOGRAFÍA

Tu, J., Yeoh, G.-H., & Liu, C. (2018). Chapter 1. Introduction - What is the computational fluid dynamics. In *Computational Fluid Dynamics*.

<https://doi.org/10.1016/b978-0-08-101127-0.00001-5>

Vilanova, R., Santín, I., & Pedret, C. (2017). Control en Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales: Estado actual y perspectivas. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 14(4), 329–345.

<https://doi.org/10.1016/j.riai.2017.09.001>