UNIVERSIDAD DE PIURA

FACULTAD DE INGENIERÍA

Diseño y simulación de un módulo de laboratorio para el curso de Mecánica de Fluidos

Tesis para optar el Título de
Ingeniero Mecánico - Eléctrico

Luis Enrique Barreto Periche
Elias Castañeda Granda

Asesor:
Dr. Ing. Victor Manuel Lizana Bobadilla

Piura, marzo de 2021

UNIVERSITAS STUDIORUM PIURENSIS

Dedicatoria

El presente trabajo de investigación lo dedicamos principalmente a Dios por acompañarnos en este largo camino hacia cumplir la primera de las metas más deseadas que nos hemos trazado.

A nuestros padres y hermanos por su amor, comprensión y apoyo todos y cada uno de los días. Gracias a ustedes y su formación hemos logrado convertirnos en lo que somos y en lo que seremos.

A todas las personas que nos han apoyado, además de sus conocimientos, también con algunas palabras de aliento y motivación. Gracias por su tiempo.

UNIVERSITAS STUDIORUM PIURENSIS

Resumen Analítico-Informativo

Diseño y simulación de un módulo de laboratorio para el curso de Mecánica de Fluidos

Barreto Periche, Luis Enrique
Castañeda Granda, Elias
Asesor: Dr. Ing. Victor Manuel Lizana Bobadilla

Tesis.
Ingeniero Mecánico - Eléctrico
Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería.
Piura, marzo de 2021

Palabras claves: Flujo en tuberías / Tuberías conectadas en serie / Tuberías en paralelo / Pérdida de carga en tuberías / Simulink: *Simscape Fluids* / VBA en Excel.

Introducción:
La presente tesis, en la que se han desarrollado siete capítulos, se centra en el diseño de un módulo de laboratorio para la asignatura de Mecánica de Fluidos; éste será explicado detalladamente a través de cálculos, modelos y simulaciones.

Metodología:
El presente trabajo de investigación se desarrolló por etapas. Primero, se realizó una búsqueda bibliográfica de diversas fuentes como páginas web, papers, libros, etc. relacionadas con el tema a desarrollar. En este caso la tesis "Diseño y construcción de un módulo de ensayo para bombas centrífugas" fue la principal fuente, pues describe parte del objetivo que se desea alcanzar. Luego, se procedió al diseño del módulo de laboratorio planteado. Posteriormente, se procedió a la identificación de datos técnicos de los elementos utilizados en el módulo. En esta parte del estudio se reconocieron los materiales que se utilizarían en una futura fase experimental junto con sus datos técnicos y costos comerciales. Finalmente, se desarrollaron guías de laboratorio propuestas para el curso de Mecánica de Fluidos, estas se desarrollaron de tal manera que el alumno pueda entender con facilidad todo el proceso experimental que se llevará a cabo durante el laboratorio.

Resultados:
Los resultados obtenidos a partir de un análisis matemático y simulaciones en Simulink, enfocadas en el flujo en tuberías fueron el diseño de un módulo de laboratorio que cumple con las condiciones necesarias para realizar los laboratorios propuestos. Además, se tiene como resultado las guías correspondientes a estos laboratorios.

Conclusiones:

1. El análisis de tipo de flujo en una tubería es sumamente útil para observar el flujo turbulento ya que la mayoría de flujos son turbulentos. Además, dicho tipo de flujo siempre es estudiado de forma empírica debido a la complejidad de su comportamiento.

2. El módulo propuesto es versátil y puede ser utilizado para incorporar nuevas prácticas experimentales; por ejemplo, para determinar los valores críticos del número de Reynolds, los cuales indican cuando un flujo deja de ser laminar o turbulento. Éstos varían de acuerdo a las geometrías y condiciones de flujo distintas.

3. La similitud de resultados en los métodos existentes de solución para hallar la pérdida de carga en un sistema de tuberías conectadas en serie permite concluir que los métodos planteados en este trabajo de tesis son válidos y podrían replicarse en futuras aplicaciones lo que incentivaría al desarrollo de la creatividad e imaginación del estudiante.

Fecha de elaboración del resumen: marzo de 2021

Analytical-Informative Summary

Diseño y simulación de un módulo de laboratorio para el curso de Mecánica de Fluidos
Barreto Periche, Luis Enrique
Castañeda Granda, Elias
Asesor: Dr. Ing. Victor Manuel Lizana Bobadilla
Tesis.
Ingeniero Mecánico - Eléctrico
Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería.
Piura, marzo de 2021

Keywords: Flow in pipes / Serial pipes / Parallel pipes / Pressure drops in pipes / Simulink: *Simscape Fluids* / VBA in Excel.

Introduction:

This thesis, in which seven chapters have been developed, focuses on the design of a laboratory module for the Fluid Mechanics course that will be explained in detail through calculations, models and simulations.

Methodology:

The present research work was developed through some stages. First, a bibliographic search was carried out in which we investigated various sources such as web pages, papers, books, etc. that are related to the topic to be developed. In this case, the thesis "Design and construction of a test module for centrifugal pumps" was the main source, as it describes part of the objective to be fulfilled with this research work. The design of the proposed laboratory module was then carried out. Subsequently, the technical data of the elements used in the module were identified. In this part of the study, the materials that will be used for a future experimental phase were recognized, each material was described with its technical data and commercial costs. Finally, proposed laboratory guides were developed for the Fluid Mechanics course, these guides were developed in such a way that the student can easily understand the entire experimental process that will be carried out during the laboratory.

Results:

The results obtained from a mathematical analysis and simulations in Simulink, focused on the flow in pipes, were the design of a laboratory module that meets the necessary conditions to carry out the proposed laboratories. In addition, the guidelines corresponding to these laboratories are obtained.

Conclusions:

1. Flow type analysis in a pipeline is extremely useful for observing turbulent flow since most flows are turbulent and, in addition, this type of flow is always studied empirically due to the complexity of its behavior.

2. The proposed module is versatile and can be used to incorporate new experimental practices; for example, to determine the critical values of the Reynolds number, which indicate when a flow is no longer laminar or turbulent. These vary according to different flow conditions and geometries.

3. The similarity of results in the existing solution methods to find the pressure drop in a system of pipes connected in series allows to conclude that the methods proposed in this thesis work are valid and could be replicated in future applications, which would encourage development of the student's creativity and imagination.

Summary date: March, 2021

Prólogo

El Programa Académico de Ingeniería Mecánico-Eléctrica, de la Universidad de Piura, imparte la asignatura de "Mecánica de Fluidos" como parte de la formación académica del alumno. Dicha asignatura se desarrolla en forma teórico-práctica desde el semestre 2018 – II.

Uno de los temas de mayor importancia de la asignatura es el referido a la pérdida de carga. La importancia de éstas se debe a su uso frecuente para el diseño de sistemas de transporte de fluidos en el campo industrial, agrícola y doméstico. Por ello, el complemento de su conocimiento teórico con el desarrollo de prácticas de laboratorio es de mucho beneficio para la vida profesional de los alumnos.

En concreto, este trabajo de investigación tiene como objetivo dar un enfoque complementario, en la asignatura de Mecánica de Fluidos, a las clases teóricas con su desarrollo práctico y así permitir al alumno relacionarse de manera directa con algunos instrumentos, bombas, sensores, entre otros. También, se busca que este módulo sea multifuncional y aporte de la mejor manera al Área de conocimiento de Energía de la Universidad de Piura.

Al tener interés en el desarrollo de esta investigación se recurrió a la guía de nuestro asesor, el Ing. Víctor Manuel Lizana Bobadilla, quien nos recomendó y facilitó el uso de la tesis "Diseño y construcción de un módulo de ensayo para bombas centrífugas" de Severín Augusto Fahsbender Céspedes sobre la cual basamos nuestro primer enfoque. Posteriormente, éste se complementó progresivamente con nuestras ideas.

UNIVERSITAS STUDIORUM PIURENSIS

Tabla de contenido

Introducción 1
Capítulo 1 3
Marco teórico 3
1.1. El número de Reynolds 3
1.2. Tipo de flujo en tuberías 4
1.2.1. Flujo Laminar 5
1.2.2. Flujo turbulento 6
1.3. Pérdida de carga en tuberías 7
1.3.1. Tuberías conectadas en serie 8
1.3.2. Tuberías en paralelo 9
1.4. Cavitación 12
1.4.1. NPSH 12
Capítulo 2 15
Modelo en SolidWorks del módulo de laboratorio 15
2.1. Descripción del módulo de laboratorio dibujado en SolidWorks 16
2.1.1. Sistema de tuberías 16
2.1.2. Tanques de agua y recipiente de tinta 19
2.1.3. Estructura metálica 21
2.2. Modos de operación del módulo de laboratorio 21
2.2.1. Cavitación 23
2.2.2. Subsistema de visualización 25
2.2.3. Subsistema de tuberías conectadas en serie 25
2.2.4. Subsistema de tuberías en paralelo 26
2.2.5. Subsistema de diseño 26
2.3. Programación de sensores 27
2.3.1. Hardware 27
2.3.2. Software 27
2.4. Lista de materiales y costo total 29
2.5. Plan de construcción: Propuesta general 29
Capítulo 3 33
Datos técnicos de los elementos utilizados en el módulo para el sistema de tuberías 33
3.1. Bomba centrífuga 33
3.2. Sensor de presión 33
3.3. Sensor de flujo de agua 35
3.4. Válvulas de bola 35
3.5. Válvula antirretorno 37
3.6. Tuberías y accesorios 38
Capítulo 4 39
Guía de laboratorio para el curso de Mecánica de Fluidos. Matlab: Modelamiento y simulación de sistemas hidráulicos en Simulink con *Simscape Fluids* 39

4.1. Introducción 39
4.2. Marco teórico 39
4.3. Descripción de la interfaz y herramientas de *Simscape Fluids* 41
4.4. Ejemplo: Modelado y simulación 45
4.4.1. Tubería 46
4.4.2. Tuberías conectadas en serie 51
4.5. Trabajo: Modela y simula tuberías en paralelo en Simulink 54
4.5.1. Solucionario 54
Capítulo 5 61
Guía de laboratorio para el curso de Mecánica de Fluidos. Teorema de Reynolds: Visualización de Flujo laminar, turbulento y de transición y del fenómeno de cavitación 61
5.1. Introducción 61
5.2. Marco teórico 61
5.3. Número de Reynolds: Desarrollo del laboratorio 65
5.4. Cavitación: Desarrollo del laboratorio 67
5.5. Cálculos y resultados 68
5.5.1. Solucionario 69
5.6. Simulación en Simulink 70
5.6.1. Solucionario 71
5.7. Solucionario para el jefe laboratorio 71
5.8. Análisis de resultados 76
Capítulo 6 79
Guía de laboratorio para el curso de Mecánica de Fluidos. Pérdidas de carga en tuberías. 79
6.1. Introducción 79
6.2. Marco teórico 79
6.2.1. Pérdidas de carga en tuberías 79
6.2.2. Tipos de pérdidas de carga en tuberías 80
6.2.3. Fórmulas para simplificación de cálculos 81
6.2.4. Velocidad de flujo promedio 83
6.3. Tuberías conectadas en serie: Desarrollo del laboratorio 84
6.4. Tuberías conectadas en paralelo: Desarrollo del laboratorio 86
6.5. Cálculos y resultados 88
6.5.1. Cálculos y resultados: Tuberías conectadas en serie 88
6.5.1.1. Solucionario 89
6.5.2. Cálculos y resultados: Tuberías conectadas en paralelo 94
6.5.2.1. Solucionario 95
6.6. Simulación en Simulink 108
6.6.1. Solucionario 108
6.7. Solucionario 111
6.7.1. Interfaz en VBA en Excel para tuberías conectadas en serie 111
6.7.2. Interfaz en VBA en Excel para tuberías en paralelo 113
6.8. Análisis de resultados 118
6.8.1. Análisis de resultados: tuberías conectadas en serie 119
6.8.2. Análisis de resultados del sistema de tuberías en paralelo 121
Capítulo 7 125
Trabajo semestral para el curso de Mecánica de Fluidos: Diseño y prueba de un sistema de tuberías 125
7.1. Introducción 125

7.2. Explicación del trabajo 125
7.2.1. Desarrollo experimental 127
7.3. Simulación en Simulink 128
7.4. Cálculos y resultados 128
Conclusiones 131
Referencias bibliográficas 133
Anexos 136
Anexo 1. Módulo - Vista isométrica 137
Anexo 2. Módulo - Vista frontal y Perfil derecho 138
Anexo 3: Módulo - Vista superior 138
Anexo 4: Estructura metálica - Vista frontal, Perfil derecho e Inferior 139
Anexo 5: Sistema de tuberías - Vista frontal, Superior e Isométrica 140
Anexo 6. Nomenclatura 141
Anexo 7. Coeficientes de pérdida de carga en accesorios 142
Anexo 8. Simulación estática de la estructura metálica 143
Anexo 9. Código de Arduino para la configuración de los sensores de caudal y presión 146
Anexo 10. Especificaciones técnicas de elementos del módulo de laboratorio 148
Anexo 11. Código de Visual Basic en Excel para el laboratorio sobre el Teorema de Reynolds 150
Anexo 12. Código de Visual Basic en Excel para el laboratorio sobre las Pérdida de carga de un sistema de tuberías conectadas en serie 151
Anexo 13. Código de Visual Basic en Excel para el laboratorio sobre las Pérdida de carga de un sistema de tuberías en paralelo 155

UNIVERSITAS STUDIORUM PIURENSIS

Lista de figuras

Figura 1. Perfil de velocidad “u(r)” constante en un flujo laminar totalmente desarrollado 5
Figura 2. Perfil de velocidad “u(r)” en flujo turbulento 6
Figura 3. Sistema de tuberías en paralelo del módulo en solidworks. 10
Figura 4. Efectos de la cavitación. 13
Figura 5. Representación del módulo de laboratorio diseñado en solidworks. 15
Figura 6. Sistema de tuberías (unidades en centímetros). 17
Figura 7. Esquema del subsistema en serie. 16
Figura 8. Esquema del subsistema en paralelo. 18
Figura 9. Esquema del subsistema de visualización. 18
Figura 10. Tanques de agua y recipiente de tinta (unidades en centímetros). 20
Figura 11. Vista explosionada de la estructura metálica (unidades en centímetros). 22
Figura 12. Etiquetas de sensores y válvulas en el módulo. 23
Figura 13. "inyección" de tinta al agua proveniente de la bomba. 26
Figura 14. Esquema general del hardware a utilizar. 28
Figura 15. Electrobomba centrífuga werken 0.5 hp. 34
Figura 16. Sensor de presión hk3022 0.5mpa 34
Figura 17. Sensor de flujo de agua 1" fs400a 35
Figura 18. Tabla de coeficientes de pérdida de carga de accesorios. 36
Figura 19. Válvula de bola cromada de 1 pulgada. 37
Figura 20. Válvula antirretorno de 1 pulgada. 37
Figura 21. Abrir el entorno simulink. 41
Figura 22. Página inicial de simulink. 42
Figura 23. Entorno de simulink. 43
Figura 24. Simulink *library browser*. 43
Figura 25. *Configuration parameters*. 46
Figura 26. Tubería modelada. 47
Figura 27. Bloque de subsistema para calcular el número de reynolds. 47
Figura 28. Parámetros de los bloques *hydraulic fluid* y *solver configuration*. 48
Figura 29. Configuración del bloque *hydraulic pipe lp*. 49
Figura 30. Botón *run* para ejecutar la simulación. 49
Figura 31. Caudal, caída de presión y número de reynolds de una tubería. 50
Figura 32. Modelado del sistema en serie. 51
Figura 33. Configuración del bloque *gradual area change*. 52
Figura 34. Bloque de subsistema para calcular la velocidad del fluido. 52
Figura 35. *Signal selector*. 53
Figura 36. *Log selected signals*. 53
Figura 37. Sistema de tuberías en paralelo. 55
Figura 38. Caudales, velocidades y caídas de presión en sistema en serie. 56
Figura 39. Configuración del bloque *elbow*. 57
Figura 40. Configuración de elevación de tubería del ramal superior. 57

Figura 41. Caudales y caída de presión en sistema en paralelo. 58
Figura 42. Líneas de corriente en flujo laminar y turbulento. 62
Figura 43. Diagrama de moody. 64
Figura 44. Módulo con elementos a utilizar en el laboratorio de reynolds. 66
Figura 45. Módulo con elementos a utilizar en el laboratorio de cavitación. 67
Figura 46. Interfaz en visual basic de excel para laboratorio del número de reynolds. 71
Figura 47. Resultados de simulación de tubería de 1 pulgada con caudales de 1, 3 y 6 l/min. 72
Figura 48. Diagrama de flujo del código de visual basic de excel para laboratorio del número de reynolds. 73
Figura 49. Nombre del recuadro de entrada de datos 74
Figura 50. Celdas utilizadas para la función goalseek luego de ejecutar el código. 75
Figura 51. Nombre de recuadro de salida. 76
Figura 52. Resultados de la interfaz de excel con caudales de 1, 3 y 6 l/min. 77
Figura 53. Módulo con elementos a utilizar en el laboratorio en serie. 85
Figura 54. Módulo con elementos a utilizar en el laboratorio en paralelo. 87
Figura 55. Resultados de tuberías conectadas en serie con caudales de 15, 45 y 60 l/min. 109
Figura 56. Resultados de tuberías en paralelo con caudales de 15, 45 y 60 l/min. 110
Figura 57. Interfaz en visual basic de excel para laboratorio de cálculo de pérdidas en un sistema de tuberías conectadas en serie. 112
Figura 58. Diagrama de flujo del código de visual basic de excel para tuberías conectadas en serie. 112
Figura 59. Resultados de la interfaz de excel para tuberías conectadas en serie con caudales de 15, 45 y 60 l/min. 114
Figura 60. Interfaz en visual basic de excel para laboratorio de cálculo de pérdidas en un sistema de tuberías en paralelo. 115
Figura 61. Diagrama de flujo del código de visual basic de excel para tuberías en paralelo. 116
Figura 62. Resultados de la interfaz de excel para tuberías en paralelo con caudales de 15, 45 y 60 l/min sin pérdidas por accesorios. 118
Figura 63. Resultados de la interfaz de excel para tuberías en paralelo con caudales de 15, 45 y 60 l/min con pérdidas por accesorios. 119
Figura 64. Documentación del bloque gradual area change sobre el cálculo del coeficiente de pérdida de carga. 122
Figura 65. Módulo con elementos a utilizar en el laboratorio. 126
Figura 66. Simulación estática del desplazamiento en elementos de la estructura metálica. 144

Lista de tablas

Tabla 1. Presupuesto del proyecto. 30
Tabla 2. Elementos a utilizar en el modelado. 44
Tabla 3. Tabla de anotación de datos del experimento de reynolds. 68
Tabla 4. Comparativa de resultados entre el método analítico, simulación y excel. 76
Tabla 5. Datos del experimento de tuberías conectadas en serie. 86
Tabla 6. Datos del experimento de tuberías en paralelo. 88
Tabla 7. Datos obtenidos de cálculos analíticos de tuberías conectadas en serie. 88
Tabla 8. Coeficientes representativos de resistencia (k) para válvulas y accesorios. 94
Tabla 9. Datos de velocidad obtenidos de cálculos analíticos de tuberías en paralelo. 95
Tabla 10. Datos de caudal y caída de presión obtenidos de cálculos analíticos de tuberías en paralelo. 95
Tabla 11. Comparativa de resultados de tuberías conectadas en serie entre el método analítico, simulación y excel. 120
Tabla 12. Tabla de valores del coeficiente "k" para pérdidas de energía locales. 121
Tabla 13. Comparativa de resultados de tuberías conectadas en paralelo entre el método analítico, simulación y excel, sin considerar pérdidas por accesorios. 123
Tabla 14. Comparativa de resultados de tuberías conectadas en paralelo entre el método analítico, simulación y excel, considerando pérdidas por accesorios. 123
Tabla 15. Tabla de anotación de datos del experimento. 128
Tabla 16. Comparativa de pérdida de carga entre el método analítico, simulación y experimental. 128

UNIVERSITAS STUDIORUM PIURENSIS

Introducción

La presente tesis se centra en el diseño de un módulo de laboratorio para la asignatura de Mecánica de Fluidos, el cual se explicará detalladamente a través de cálculos, modelos y simulaciones divididas en siete capítulos para su mejor comprensión.

En el primer capítulo, se desarrolla el marco teórico, el cual abarca temas del sílabo de la asignatura; entre ellos, el Teorema del Transporte de Reynolds, el tipo y pérdidas de flujo en las tuberías conectadas en serie y en paralelo y el fenómeno de cavitación.

En el segundo capítulo, se proporcionan las características del diseño del módulo en el software SolidWorks y la programación necesaria para el funcionamiento de los sensores de flujo y presión que se utilizan. Además, se incluye la lista de materiales con sus respectivos costos y una propuesta de construcción general.

En el tercer capítulo se incluye las definiciones técnicas de los elementos a utilizar para su construcción.

En el cuarto capítulo se presenta la Guía de laboratorio para el curso de Mecánica de Fluidos. Matlab: Modelamiento y simulación de sistemas hidráulicos en Simulink con *Simscape Fluids*.

En el quinto capítulo se presenta la Guía de laboratorio para el curso de Mecánica de Fluidos. Teorema de Reynolds: Visualización de Flujo laminar, turbulento y de transición y del fenómeno de cavitación.

En el sexto capítulo se presenta la Guía de laboratorio para el curso de Mecánica de Fluidos. Pérdidas de carga en tuberías.

En el séptimo capítulo se presenta una propuesta de trabajo semestral para el curso de Mecánica de Fluidos: Diseño y prueba de un sistema de tuberías.

Capítulo 1

Marco teórico

1.1. El número de Reynolds[1]

En 1880, luego de experimentos exhaustivos Osborne Reynolds descubrió que el tipo de flujo de un fluido que circula por una tubería depende principalmente de la razón entre sus fuerzas inerciales y fuerzas viscosas. Dicha razón fue denominada número de Reynolds y, para el caso de una tubería circular, se puede expresar utilizando la ecuación (1):

$$Re = \frac{Fuerzas\ inerciales}{Fuerzas\ viscosas} = \frac{V_{prom}.\mathrm{D}}{\upsilon} = \frac{\rho.V_{prom}.\mathrm{D}}{\mu} \qquad (1)$$

Donde:

ρ: Densidad del fluido (kg/m^3)

$\boldsymbol{V_{prom}}$**:** Velocidad característica del fluido (m/s)

D: Diámetro de la tubería a través de la cual circula el fluido o longitud característica del sistema (m)

μ: Viscosidad dinámica del fluido [$kg/(m.s)$]

υ: Viscosidad cinemática del fluido (m^2/s)

El número de Reynolds es un parámetro adimensional; grandes valores de este parámetro implican fuerzas inerciales altas, éstas son proporcionales a la velocidad del fluido y a su densidad. Físicamente eso se traduce en que el fluido presenta fluctuaciones rápidas y aleatorias que no pueden ser contrarrestadas por las fuerzas viscosas. Las características descritas con anterioridad caracterizan a un flujo turbulento.

[1] Apartado resumido del libro de Cengel, Y. & Cimbala, J. (2006), pp. 324-325.

Números de Reynolds pequeños indican fuerzas viscosas suficientemente grandes para suprimir las fluctuaciones del fluido y mantenerlo "ordenado". Estas características son propias de un flujo laminar.

Además, existe un número de Reynolds crítico (Re_{cr}) que indica cuando un flujo se vuelve turbulento. Dicho número varía según las diferentes geometrías de la tubería y condiciones del fluido; para el flujo interno de una tubería circular se tiene un valor aproximado de $Re_{cr} = 2\,300$.

Idealmente sería útil contar con valores exactos para flujos laminar, transicional y turbulento. No obstante, en la práctica la transición de flujo laminar a turbulento depende de otros factores como la rugosidad y vibraciones de la tubería, así como de las fluctuaciones en el flujo. Los siguientes valores permiten determinar el tipo de flujo interno de una tubería circular:

$$\begin{aligned} \text{Re} \leq 2\,300 &\rightarrow \text{flujo laminar} \\ 2\,300 \leq \text{Re} \leq 4\,000 &\rightarrow \text{flujo transicional} \\ \text{Re} \geq 4\,000 &\rightarrow \text{flujo turbulento} \end{aligned}$$

El flujo transicional se define como el paso aleatorio entre flujo laminar y turbulento. Sin embargo, el lector debe saber que en adelante se priorizará la explicación del flujo laminar y turbulento

1.2. Tipo de flujo en tuberías[2]

Cuando existe un requerimiento de llevar un caudal "Q" desde un punto inicial hasta otro final, que dependiendo de la necesidad se puede transportar dicho flujo por un ducto cerrado; usualmente se utiliza una tubería cerrada, de diámetro "D", se extiende a lo largo de una longitud "L" y, además, se le deben acoplar los elementos de seguridad, acople, cambio de dirección, medición, entre otros. A esto se le conoce como flujo en tuberías.

En este apartado se describirán las características del flujo laminar y el flujo turbulento. No se abarcará el flujo transicional debido a que dicho tipo de flujo es una transición aleatoria entre flujo laminar y turbulento; y, por tanto, su estudio se realiza principalmente de forma empírica.

[2] Apartado resumido del libro de Cengel, Y. & Cimbala, J. (2006), pp. 327-346.

1.2.1. Flujo Laminar

El flujo de un fluido es laminar si su número de Reynolds es menor que 2300[3] y cuando está totalmente desarrollado, esto se cumple si la tubería por la que circula es lo suficientemente larga, en relación con la sección de entrada, de modo que los efectos de entrada sean despreciables. En un flujo laminar totalmente desarrollado, cada partícula se desplaza a velocidad constante siguiendo una línea de corriente; es decir, no existe aceleración axial a lo largo de la línea de corriente y por tanto el perfil de velocidad se mantiene constante.

Como se puede observar en la figura 1, el perfil de velocidad de un flujo laminar totalmente desarrollado en una tubería circular es una parábola que tiene su velocidad máxima en la línea central y la mínima (nula) en las paredes de la tubería. Debido al comportamiento previamente descrito, las ecuaciones que modelan dicho fenómeno utilizan una velocidad promedio que es igual a la mitad de la velocidad máxima:

$$V_{máx} = 2V_{prom}$$

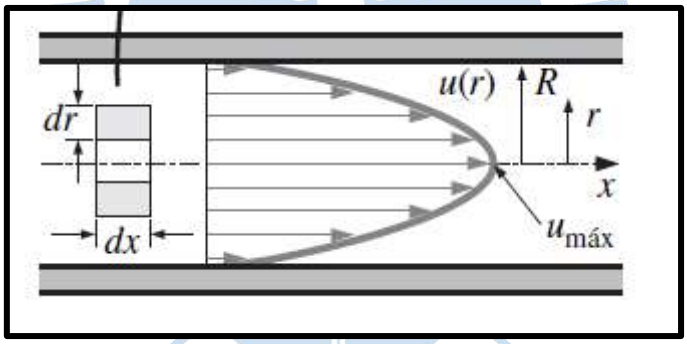


Figura 1. Perfil de velocidad "u(r)" constante en un flujo laminar totalmente desarrollado
Fuente: Cengel, Y. & Cimbala, J. (2006)

- **Factor de fricción[4]:** El factor de fricción de una tubería se utiliza para determinar las pérdidas de carga y su cálculo depende del tipo de flujo del fluido. Para el flujo laminar, el factor de fricción de un tubo de sección circular obedece la ecuación (2):

$$f = \frac{64}{Re} \tag{2}$$

[3] Referencia del libro de Cengel, Y. & Cimbala, J. (2006), pp. 324
[4] En esta tesis, el factor de fricción será representado por la letra 'f'. No obstante, es importante saber que en la bibliografía existente es también muy común encontrar el factor de fricción representado por la letra griega lambda 'λ'.

Donde:

Re: número de Reynolds

1.2.2. Flujo turbulento

La mayoría de flujos presentes en ingeniería son turbulentos y su estudio sigue basado principalmente en experimentos y correlaciones empíricas. El flujo turbulento se caracteriza por fluctuaciones rápidas y aleatorias de regiones giratorias del fluido, denominadas remolinos, los cuales transportan rápidamente masa y energía de un sitio a otro y por esa razón el flujo turbulento es asociado a altos coeficientes de fricción, transferencia de calor y de masa.

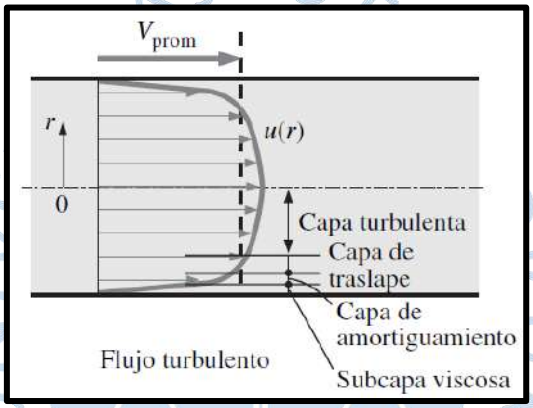


Figura 2. Perfil de velocidad "u(r)" en flujo turbulento

Fuente: Cengel, Y. & Cimbala, J. (2006)

En cuanto al perfil de velocidad "u(r)" del flujo turbulento se basa en análisis y mediciones. Como se puede observar en la figura 2 el perfil es una parábola más plana que en la del flujo laminar; además, tiene presente una brusca caída cerca de la pared. Para su mejor análisis se consideran 4 regiones con características particulares:

- Subcapa viscosa: El perfil de velocidad es aproximadamente lineal y los efectos viscosos son dominantes.
- Capa de amortiguamiento: Los efectos turbulentos se vuelven significativos pero el flujo es dominado aún por los efectos viscosos.
- Capa de traslape: También llamada capa inercial. Los efectos turbulentos se intensifican, aunque no son dominantes.

- Capa turbulenta: Los efectos turbulentos dominan sobre los efectos viscosos

- **Factor de fricción:** El factor de fricción de una tubería se utiliza para determinar las pérdidas de carga y su cálculo depende del tipo de flujo del fluido. Para flujo turbulento, el factor de fricción puede calcularse mediante la ecuación (3), de Colebrook-White:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2log_{10}\left(\frac{\boldsymbol{\varepsilon}/D}{3.7} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f}}\right) \tag{3}$$

Donde:

Re: número de Reynolds

$\boldsymbol{\varepsilon}/D$: rugosidad relativa

f: factor de fricción

1.3. Pérdida de carga en tuberías[5]

Durante el análisis de tuberías e instalaciones es importante calcular y diferenciar las pérdidas causadas por las tuberías (pérdidas primarias) y por los accesorios (pérdidas secundarias). La suma de ambas representa las pérdidas totales en la instalación y para calcularlas se utilizan las ecuaciones (4) y (5):

$$h_{L,\ total} = h_{L,\ primarias} + h_{s,\ secundarias} \tag{4}$$

$$h_{L,\ total} = \sum_i f_i \frac{L_i}{D_i}\frac{V_i^2}{2g} + \sum_j K_{s,j}\frac{V_j^2}{2g} \tag{5}$$

La "i" representa cada tramo recto de tubería con diámetro constante y la "j" representa cada accesorio en el recorrido de la tubería. Luego, si se supone un diámetro constante se obtiene la ecuación (6):

$$h_{L,\ total} = \left(f\frac{L}{D} + \sum K_s\right)\frac{V^2}{2g} \tag{6}$$

Donde:

$h_{L,\ total}$: Pérdida de carga total (m)

[5] Apartado resumido del libro de Cengel, Y. & Cimbala, J. (2006), pp. 347-353.

f: Factor de fricción

D: Diámetro de la tubería (m)

L: Longitud de la tubería (m)

K_s: Coeficiente de pérdida del accesorio

V: Velocidad del fluido en la tubería (m/s)

El coeficiente de fricción se obtiene a partir del Diagrama de Moody (ver figura 43), generalmente utilizado para casos de tuberías conectadas en serie, o mediante las ecuaciones (8), (9), (10), (11) y (12) (ubicadas en el apartado 3.2.), las cuales se utilizan generalmente para casos de tuberías conectadas en paralelo.

1.3.1. Tuberías conectadas en serie

Un sistema de tuberías conectadas en serie es aquel en el cual el fluido fluye a través de una línea continua, sin ramificaciones. En este proyecto se ha utilizado un sistema de tuberías conectadas en serie para el análisis y cálculo de velocidades de flujo promedio de cada una de las tuberías que componen el sistema, así como el análisis y cálculo de pérdida de carga de todo el sistema, tanto por fricción como por accesorios. Por ello, a continuación, se explicará brevemente el método que se recomienda utilizar para obtener los resultados pedidos en las guías de laboratorio correspondientes.

Para sistemas de tuberías conectadas en serie, de una entrada y de una salida, se utilizarán cálculos simples. Primero, se deberá hallar la velocidad de flujo promedio de cada tubería mediante la ecuación (7) de la continuidad:

$$Q = V.A \tag{7}$$

Dónde:

Q: Caudal, cantidad de fluido que circula a través de una tubería (kg/m^3)

V: Velocidad promedio con la que fluye el flujo en la tubería (m/s)

A: Área o sección de la tubería por la cual circula el fluido (m^2)

Definiendo previamente la viscosidad dinámica (μ) y la densidad (ρ) del fluido, se calcula el número de Reynolds del flujo, mediante la ecuación *(1)*, en cada una de las tuberías que junto al valor de la rugosidad relativa permitirá obtener el valor del coeficiente de fricción a través del diagrama de Moody.

Después de hallar el coeficiente de fricción se determinan las pérdidas de carga por fricción y por accesorios haciendo uso de la ecuación *(5)*. Con ello, se obtendrán todos los resultados requeridos en el laboratorio correspondiente al tema de cálculo de pérdidas en sistemas de tuberías conectadas en serie.

1.3.2. Tuberías en paralelo

Un sistema de tuberías en paralelo es aquel en el cual el fluido se transporta a través de dos o más ramificaciones. En este proyecto se ha utilizado un sistema de tuberías en paralelo para el análisis y cálculo del caudal de cada una de las tuberías que componen el sistema, así como el análisis y cálculo de pérdida de carga de todo el sistema. Por ello, se explicará, brevemente, el método que se recomienda utilizar para obtener los resultados requeridos en las guías de laboratorio correspondientes.

Al ser un sistema de tuberías conectadas en paralelo, los cálculos a realizar son complicados debido a la cantidad de variables sin conocer (caudales, coeficientes de fricción y número de Reynolds del fluido en cada tubería) del sistema, por ello, es importante conocer los fundamentos teóricos para establecer las hipótesis que permitan realizar simplificaciones y así tras realizar un método iterativo poder hallar el coeficiente de fricción del fluido en cada tubería.

Teóricamente el valor de la presión en un mismo punto se mantiene constante; en el cálculo analítico los puntos con distancias pequeñas de separación entre tuberías en paralelo (0.15m) se considerarán como un mismo punto y tendrán una misma presión para simplificar los cálculos. En la figura **3** se puede observar la configuración de las tuberías en paralelo del módulo en SolidWorks.

Para calcular la pérdida de carga a lo largo de las tuberías en paralelo se utilizará la ecuación Darcy-Weisbach ya que permite simplificar los cálculos. Este es un método que tiene como fin hallar el valor con mayor precisión de los coeficientes de fricción mediante iteraciones para

luego hallar los valores de caudales de cada una de las tuberías y la pérdida de carga total del sistema.

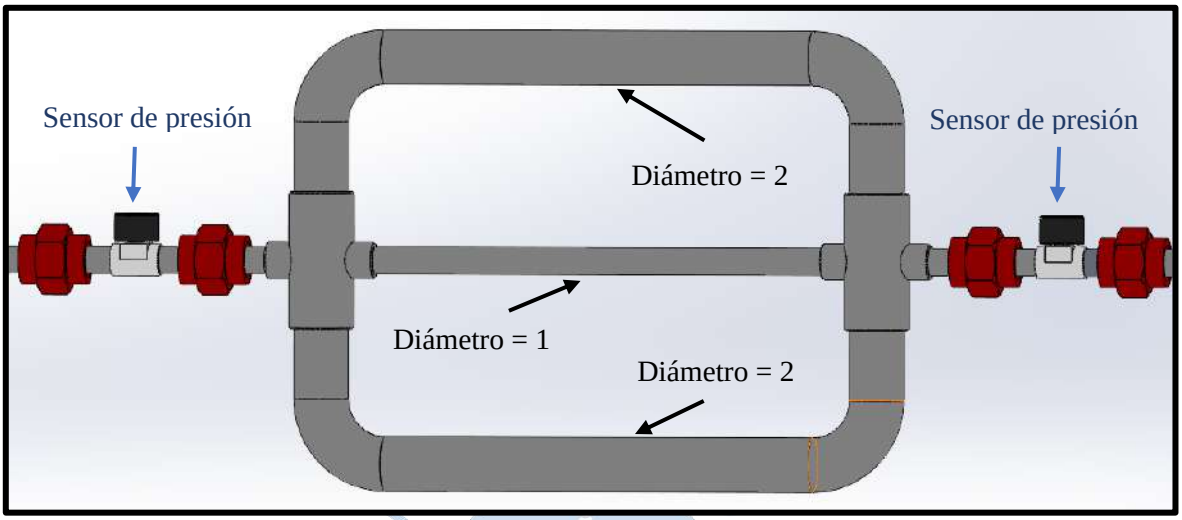


Figura 3. Sistema de tuberías en paralelo del módulo en SolidWorks.

Fuente: Elaboración propia.

En la primera iteración se suponen los valores de los coeficientes de fricción, éstos se calculan asumiendo que el fluido se encuentre en la zona de turbulencia completa para poder utilizar la variante de la fórmula de Altshul mostrada en la ecuación (8):

$$f_i = 0.11\left(\frac{\varepsilon}{D_i}\right)^{2.5} \tag{8}$$

Dónde:

$\boldsymbol{f_i}$**:** Coeficiente de fricción.

$\boldsymbol{\varepsilon}$**:** Coeficiente de rugosidad absoluta (es un parámetro que representa el material de la tubería) (m)

$\boldsymbol{D_i}$**:** Diámetro de la tubería (i) por la cual circula el fluido (m)

Luego, se utilizarán las fórmulas de relaciones establecidas por Darcy-Weisbach. Se hallan los coeficientes de relación de caudales mediante la ecuación (9), luego se obtienen los primeros valores de caudales supuestos mediante las ecuaciones (10) y (11); y los números de Reynolds del fluido de cada una de las tuberías del sistema. Se establece como común a una de las tuberías, representando sus características con un subíndice "*j*" y las características de las demás tuberías se representarán con un subíndice "*i*".

$$K_{ij} = \left(\frac{f_j L_j}{f_i L_i}\right)^{0.5} \left(\frac{D_i}{D_j}\right)^{2.5} \quad (9)$$

$$Q_j = \frac{Q_0}{1 + \sum_{i=1}^{n} K_{ij}} \quad (10)$$

$$Q_i = K_{ij} Q_j \quad (11)$$

Dónde:

K_{ij}: Coeficiente que indica la relación entre los caudales de distintas tuberías.

Q_o: Caudal inicial del sistema de tuberías en paralelo. (kg/m^3)

Q_j: Caudal común de las tuberías en paralelo. (kg/m^3)

Q_i: Caudal de las tuberías en paralelo no seleccionadas como comunes. (kg/m^3)

f_i: Coeficiente de fricción.

L: Longitud de la tubería. (m)

D: Diámetro de la tubería por la cual circula el fluido. (m)

En la segunda iteración se calcula el valor de los coeficientes de fricción con la fórmula de Altshul (ecuación (12)) considerando el valor de Reynolds (Re) calculado en el paso anterior.

$$f_i = 0.11 \left(\frac{\varepsilon}{D_i} + \frac{68}{Re_i}\right)^{0.25} \quad (12)$$

Dónde:

f_i: Coeficiente de fricción rectificado.

ε: Coeficiente de rugosidad absoluta (es un parámetro que representa el material de la tubería). (m)

D_i: Diámetro de la tubería por la cual circula el fluido. (m)

Re_i: Número de Reynolds.

Se realiza el proceso de la primera iteración para hallar los valores de los caudales de cada tubería; se recomienda iterar hasta que los valores de los coeficientes de fricción rectificados sean muy similares a los valores obtenidos en el cálculo anterior. Después, se tomarían los últimos valores de coeficientes de fricción y los últimos valores obtenidos de los caudales de cada tubería para hallar la pérdida de carga total del sistema de tuberías en paralelo con la ecuación (13):

$$Pérdida\ carga\ i\ [Pa] = f_i \times \frac{L_i}{{D_i}^5} \times \frac{8\ {Q_i}^2}{g \times \pi^2} \quad (13)$$

Dónde:

L_i: Longitud de la tubería. (m)

Q_i: Caudal de cada tubería en paralelo. (kg/m^3)

f_i: Coeficiente de fricción rectificado.

g: Gravedad. (m/s^2)

D: Diámetro de la tubería por la cual circula el fluido. (m)

1.4. Cavitación

Según White, Frank M. (2004), la cavitación aparece cuando la presión de un líquido cae por debajo de la presión de vapor debido al flujo y ocasiona la aparición de burbujas de vapor en el líquido; es decir, la ebullición del líquido sucede a la temperatura a la cual está siendo transportado el fluido. En las bombas centrífugas, el fenómeno de cavitación sucede en la entrada o tubería de aspiración de la bomba; y, se busca evitar reduciendo las pérdidas en la entrada de la bomba, instalando la bomba en carga y cuidando que la NPSH de la instalación sea mayor que la NPSH de la bomba.

"Si apareciese cavitación, habría ruido y vibraciones en la bomba, deterioro del rotor por picaduras y una caída brusca en la altura manométrica y el caudal de la bomba. Con algunos líquidos estos deterioros aparecen antes de que se presente la ebullición, debido a la liberación de gases disueltos e hidrocarburos ligeros." (White, Frank M., 2004). En la **figura 4** se pueden observar las burbujas que se forman debido a la cavitación en una hélice y debajo se aprecia el efecto perjudicial que ocasiona la cavitación en el rodete de una bomba centrífuga. El deterioro en el rodete o en las aristas de la hélice se ocasiona debido a que las burbujas provocadas por una cavitación prolongada erosionan considerablemente el material.

1.4.1. NPSH

La NPSH se estudia a mayor profundidad en la asignatura de Máquinas Hidráulicas, pero se explicará brevemente en las siguientes líneas pues es un concepto clave para entender la cavitación en una bomba.

Cengel, Y. & Cimbala, J. (2006) establece que la "carga de aspiración neta positiva (NPSH, por sus siglas en inglés), se define como la diferencia entre la carga de presión de estancamiento en la entrada de la bomba y la carga de la presión de vapor". Su fórmula es la ecuación (14):

$$NPSH = \left(\frac{P}{\rho g} + \frac{V^2}{2g}\right)_{entrada\ de\ la\ bomba} - \frac{P_v}{\rho g} \qquad (14)$$

La NPSH es muy utilizado por los fabricantes de bombas, pues según Cengel, Y. & Cimbala, J. (2006) ellos prueban sus productos y publican "un parámetro de rendimiento llamado carga de aspiración neta positiva necesaria ($NPSH_{necesaria}$), que se define como la *NPSH mínima necesaria para evitar la cavitación en la bomba*." Dicho parámetro también es conocido como la NPSH de la bomba. Por otro lado, el NPSH calculado en la instalación real es conocido como NPSH de la instalación o NPSH real.

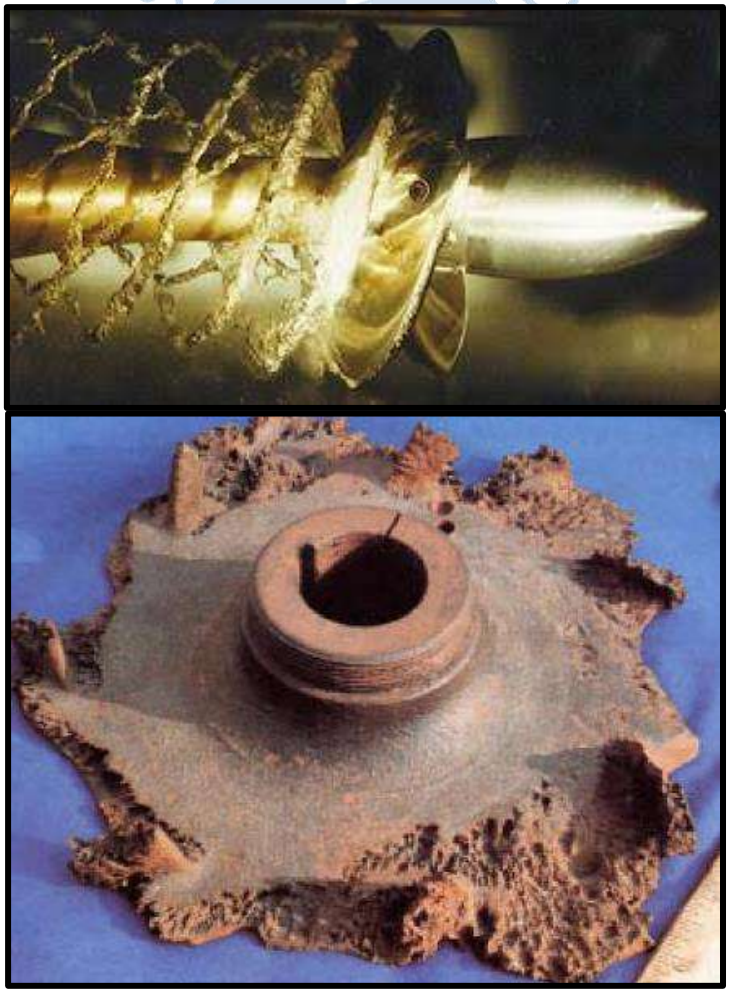


Figura 4. Efectos de la cavitación.

Fuente: Carmona Orta, J. (2016) y Castorani, J. (2015)

Gracias a las definiciones previas es posible decir que para “que una bomba no sufra cavitación, la NPSH real o disponible debe ser mayor que $NPSH_{necesaria}$. Es importante hacer notar que el valor de NPSH, aparte de variar con el caudal, también se modifica con la temperatura del líquido porque P_v es una función de la temperatura. NPSH también depende del tipo de líquido que se bombea, ya que hay una curva única de P_v contra T para cada líquido” (Cengel, Y. & Cimbala, J, 2006, p.746).

Capítulo 2

Modelo en SolidWorks del módulo de laboratorio

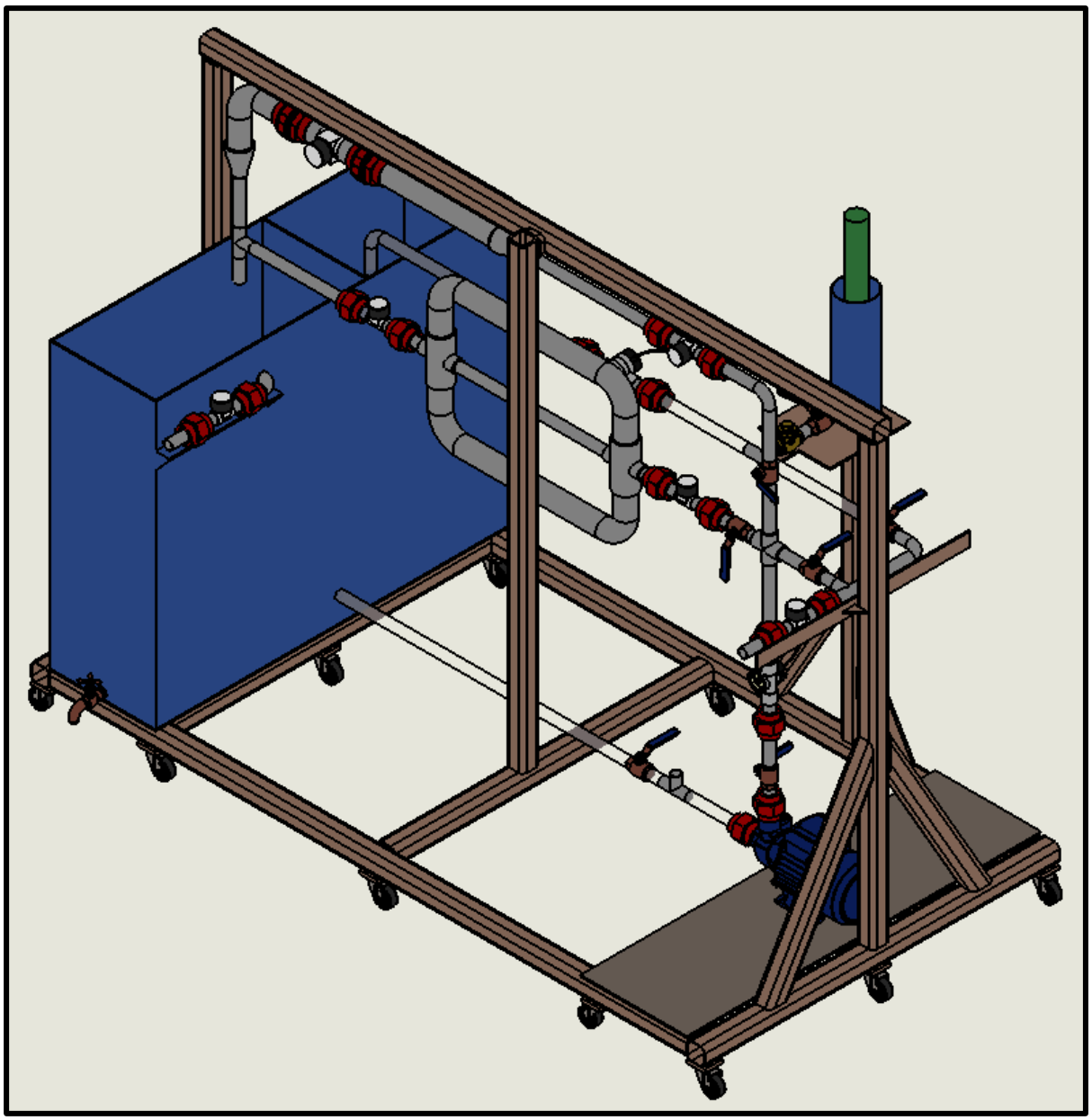


Figura 5. Representación del módulo de laboratorio diseñado en SOLIDWORKS.

Fuente: Elaboración propia.

2.1. Descripción del módulo de laboratorio dibujado en SolidWorks

El módulo observado en la figura 5 fue diseñado con el objetivo de ser usado en la asignatura de Mecánica de Fluidos. Para su diseño se tomó como base el módulo existente en Campus Lima y el módulo diseñado por Severín Augusto Fahsbender Céspedes en su tesis "Diseño y construcción de un módulo de ensayo para bombas centrífugas", 1986.

Para la descripción del diseño se evitará usar medidas específicas ya que el propósito del apartado es proporcionar el porqué de las configuraciones y elementos utilizados. No obstante, las medidas se encuentran a disposición del lector y de manera detallada en los planos del módulo ubicados en los anexos 1, 2, 3, 4 y 5 de la presente tesis.

2.1.1. Sistema de tuberías

El primer paso del diseño consistió en definir el sistema de tuberías necesario para desarrollar los laboratorios propuestos. Se definieron 4 subsistemas correspondientes a cada experimento (ver figura 7). A continuación, se especifican las características de cada subsistema.

- El subsistema de tuberías conectadas en serie cuenta con dos tuberías de diferentes diámetros (1 pulgada y 2 pulgadas) unidas mediante un reductor. Además, en sus extremos tiene sensores de presión para determinar experimentalmente la pérdida de carga total. En la figura 6 se puede observar un esquema del subsistema descrito.

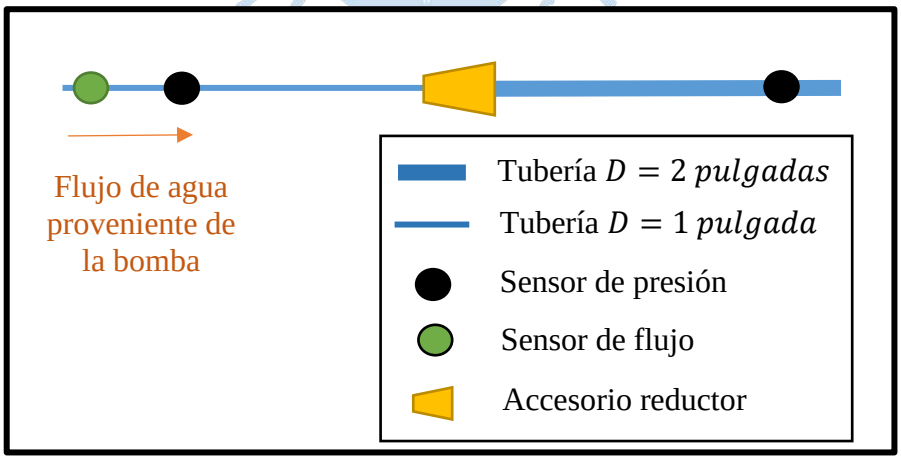


Figura 6. Esquema del subsistema en serie.

Fuente: Elaboración propia.

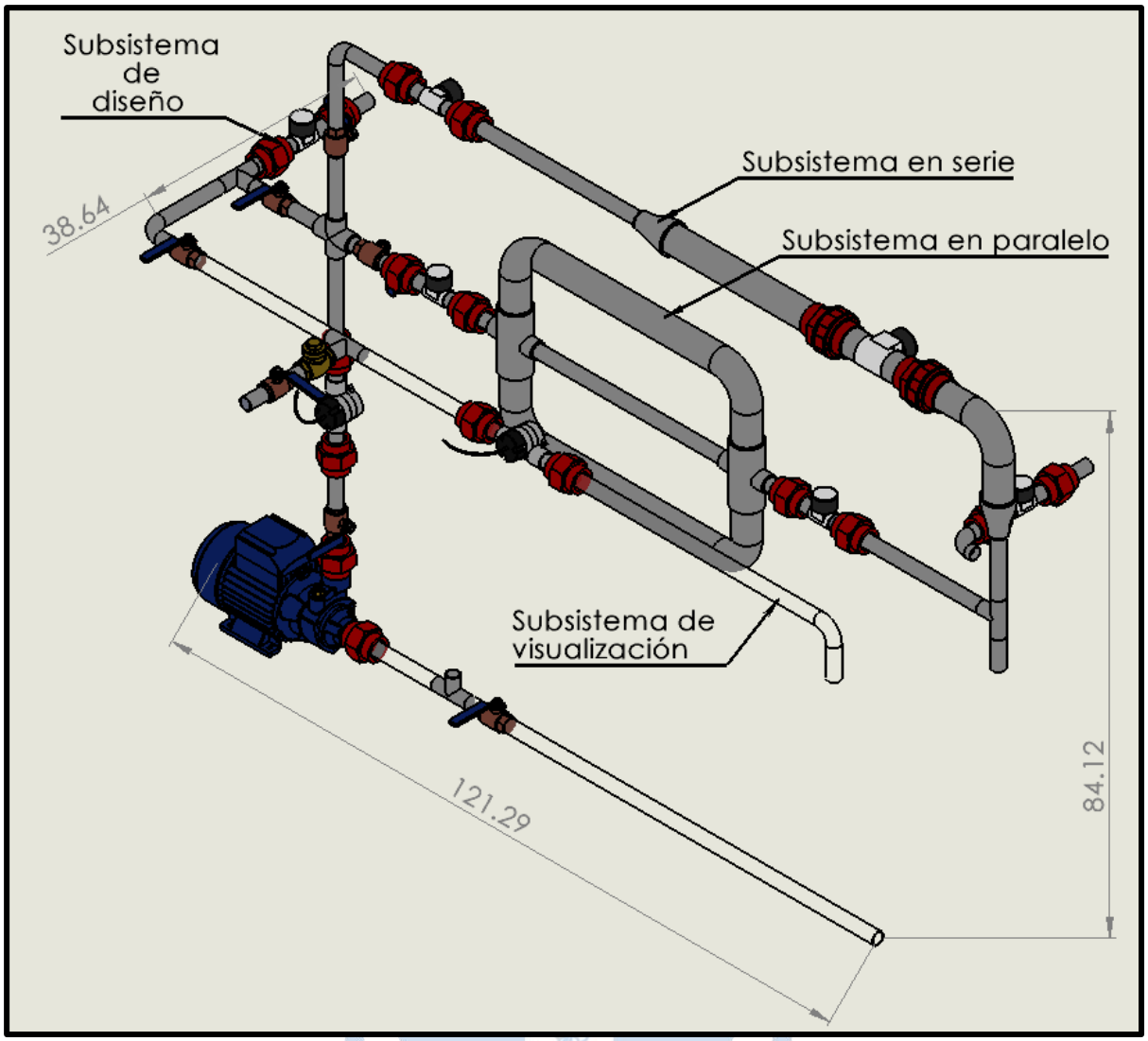


Figura 7. Sistema de tuberías (unidades en centímetros).
Fuente: Elaboración propia.

- El subsistema de tuberías en paralelo consiste en tres tuberías en paralelo: dos tuberías de 2 pulgadas y una tubería de 1 pulgada. Al igual que el caso anterior, dos sensores de presión se encuentran ubicados en los extremos del subsistema para medir el total de la pérdida de carga. En la figura 8 se puede observar un esquema del subsistema descrito.

- El subsistema de visualización se utilizará para los tipos de flujo de un fluido. Por dicha razón, la tubería de 1 pulgada en este subsistema es completamente transparente y cuenta con una "T" por la que ingresará el colorante líquido. La tubería por la que ingresa el colorante tiene una válvula antirretorno para impedir que el agua proveniente de la bomba ingrese al tanque de tinta. Además, se dispone de un sensor de flujo que medirá el caudal circulante. Dicho caudal

se utilizará para obtener analíticamente el tipo de flujo y compararlo con el observado. En la figura 9 se puede observar un esquema del subsistema descrito.

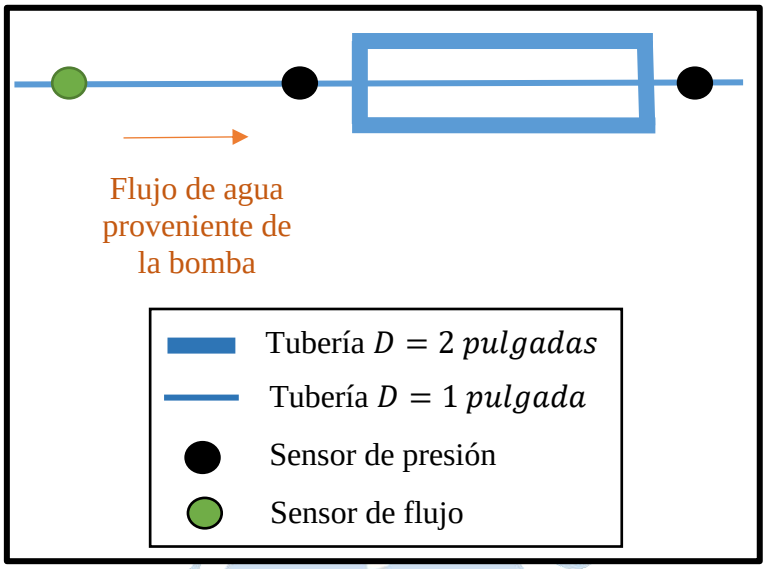


Figura 8. Esquema del subsistema en paralelo.

Fuente: Elaboración propia.

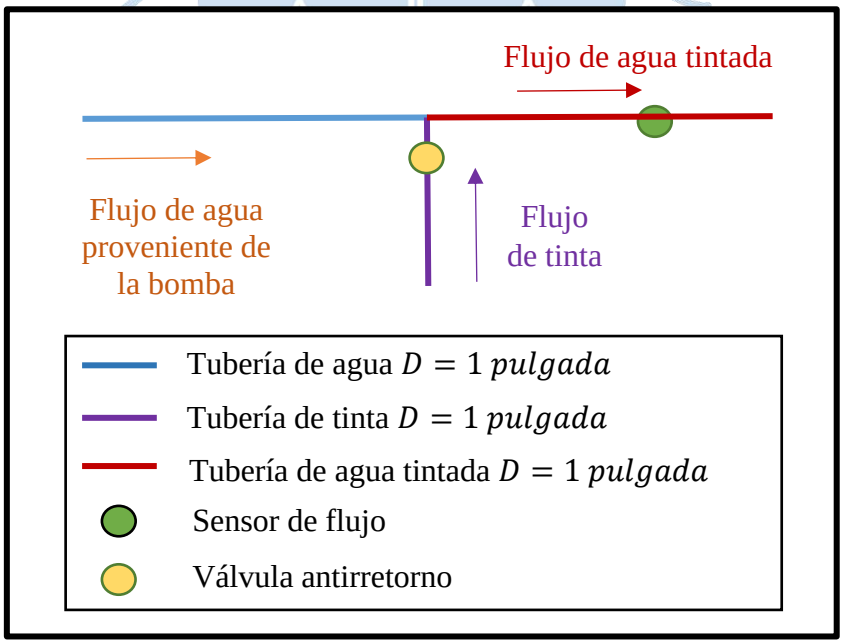


Figura 9. Esquema del subsistema de visualización.

Fuente: Elaboración propia.

• El subsistema de diseño se utilizará como punto de anclaje en donde el alumno podrá añadir sus propios diseños u experimentos o en su defecto los definidos por el profesor de la asignatura; por tal razón, tiene dos tramos separados y cortos con sensores de presión para poder medir la pérdida de carga en el sistema de tuberías añadido. Un tramo se encuentra conectado a la tubería de impulsión de la bomba y el otro tramo está unido al tanque de agua (entrada y salida de agua).

Cada uno de los subsistemas descritos cuenta con una válvula para regular el caudal de entrada; y, cada sensor y la bomba tienen uniones universales en sus extremos para facilitar su reemplazo o mantenimiento según sea necesario.

Al inicio de la tubería de impulsión se coloca un sensor de flujo para medir el caudal cuando se utilice el subsistema de visualización, en serie o en paralelo. Además, en la tubería de impulsión también hay una válvula que permitirá regular el caudal, especialmente cuando se requieran bajos caudales como en el laboratorio que utiliza el subsistema de visualización.

Adicionalmente, hay una válvula en la tubería de aspiración para aumentar las pérdidas cuando se requiera simular el fenómeno de cavitación de la bomba. Dicha situación se requiere en uno de los laboratorios propuestos para la visualización de las burbujas en la entrada de la bomba como producto de la cavitación y, por ese motivo, la tubería de aspiración es transparente. En la tubería de aspiración también se tiene una “T” que permitirá colocar un vacuómetro (Visualización de cavitación) o sensor de presión (Laboratorio de diseño de sistema de tuberías) según se requiera cuando se realicen pruebas experimentales en el módulo construido.

2.1.2. Tanques de agua y recipiente de tinta

El recipiente de tinta se diseñó tomando como referencia el recipiente usado en el módulo ubicado en el edificio de Hidráulica. Así, se estableció que un recipiente cilíndrico de 2.3 litros, como el que se observa en la figura 10, puede almacenar la suficiente tinta para garantizar un funcionamiento adecuado del subsistema de visualización.

El agua del subsistema de visualización que viene de la bomba tiene una presión mayor que la de la tinta. Esa diferencia de presiones puede dificultar el ingreso de la tinta a la tubería con agua. Por dicha razón, el recipiente de tinta cilíndrico tiene en su interior un émbolo (color

verde en la figura 10) que permitirá aplicar presión a la tinta. La presión aplicada permitirá "inyectar" la tinta a la tubería con agua, y, así, el mezclado de la tinta con el agua quedará asegurado.

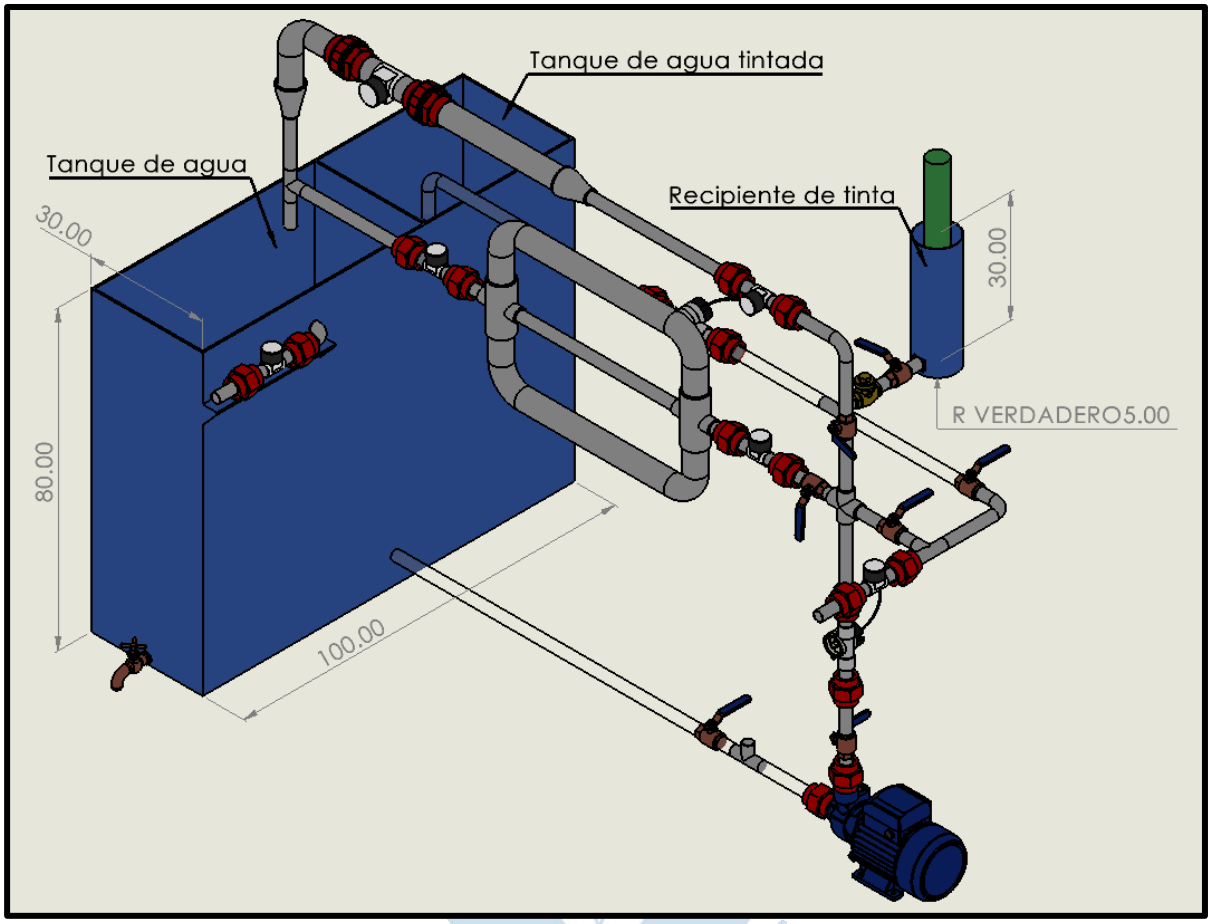


Figura 10. Tanques de agua y recipiente de tinta (unidades en centímetros).
Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, para almacenar el agua se estableció que serían necesarios dos tanques (tanque de agua y tanque de agua tintada), ya que el agua tintada que saldría del subsistema de visualización no recircula por la bomba centrífuga. El ancho de ambos tanques juntos es de 1 metro y así se considera como un módulo compacto. Además, la altura de los tanques se estableció en 0.8 metros para permitir que el sensor de caudal en la tubería de impulsión tenga el suficiente espacio para su correcta instalación y que el tramo final de los subsistemas en paralelo y de visualización puedan usar el borde de los tanques como apoyo.

Se estableció que el tanque de agua tendrá mayor capacidad que el tanque de agua tintada y, por tal razón, el tanque de agua tiene 0.6 metros de ancho y el de agua tintada 0.4 metros. Luego,

para definir la profundidad de los tanques se calculó el volumen interno de todas las tuberías del módulo (7 litros) y se definió una altura de 0.6 metros hasta la que se espera tener lleno el tanque durante el funcionamiento del módulo. Se estableció una profundidad de 0.3 metros que define un volumen de 144 litros para el tanque de agua y de 96 litros para el tanque de agua tintada.

Los tanques de agua están sobredimensionados, lo que garantiza holgura en el tamaño del sistema que se puede anexar en el laboratorio de diseño de sistema de tuberías. Además, el tamaño de los tanques permite acciones de limpieza y mantenimiento.

2.1.3. Estructura metálica

Cumple la función de apoyo y soporte estructural de los elementos mencionados en los apartados previamente. Su diseño tomó como referencia la estructura del módulo existente en Campus Lima y se puede observar en la figura 11.

El armazón de la estructura está diseñado con tubería cuadrada de 2 pulgadas. La base cuenta con 14 ruedas que pueden soportar hasta 80 kg cada una; es un rectángulo de 1 m x 1.9 m y tiene dos rectángulos laterales interiores de 1 m x 0.35 m que sirven de apoyo para soportar el peso de la bomba, tuberías y tanques de agua; para garantizar la resistencia de estos se le realizó un diseño interno como el que se puede observar en la figura 11. Después, se colocaron placas rectangulares sobre dichos rectángulos laterales interiores para que los tanques y la bomba se puedan apoyar en bases uniformes.

En la parte superior de la estructura se observa un marco que atraviesa la estructura de un lado a otro y que en su parte central tiene un tubo vertical que parte de la base. Dicho marco y sus elementos sirven de apoyo estructural para el sistema de tuberías. Además, en un lateral de la parte superior también se tiene un tubo vertical con una pequeña base superior destinada a soportar el recipiente de la tinta. Adicionalmente, en el anexo 8 se encuentra una simulación estática de la estructura para validar su resistencia.

2.2. Modos de operación del módulo de laboratorio

En este apartado se explicará el modo de operación de cada subsistema; se detallan los pasos a seguir para obtener los datos y resultados esperados. Se han etiquetado sensores y válvulas

como se observa en la figura 12, pues son elementos a los que se hará continua referencia durante la descripción de cada modo de operación.

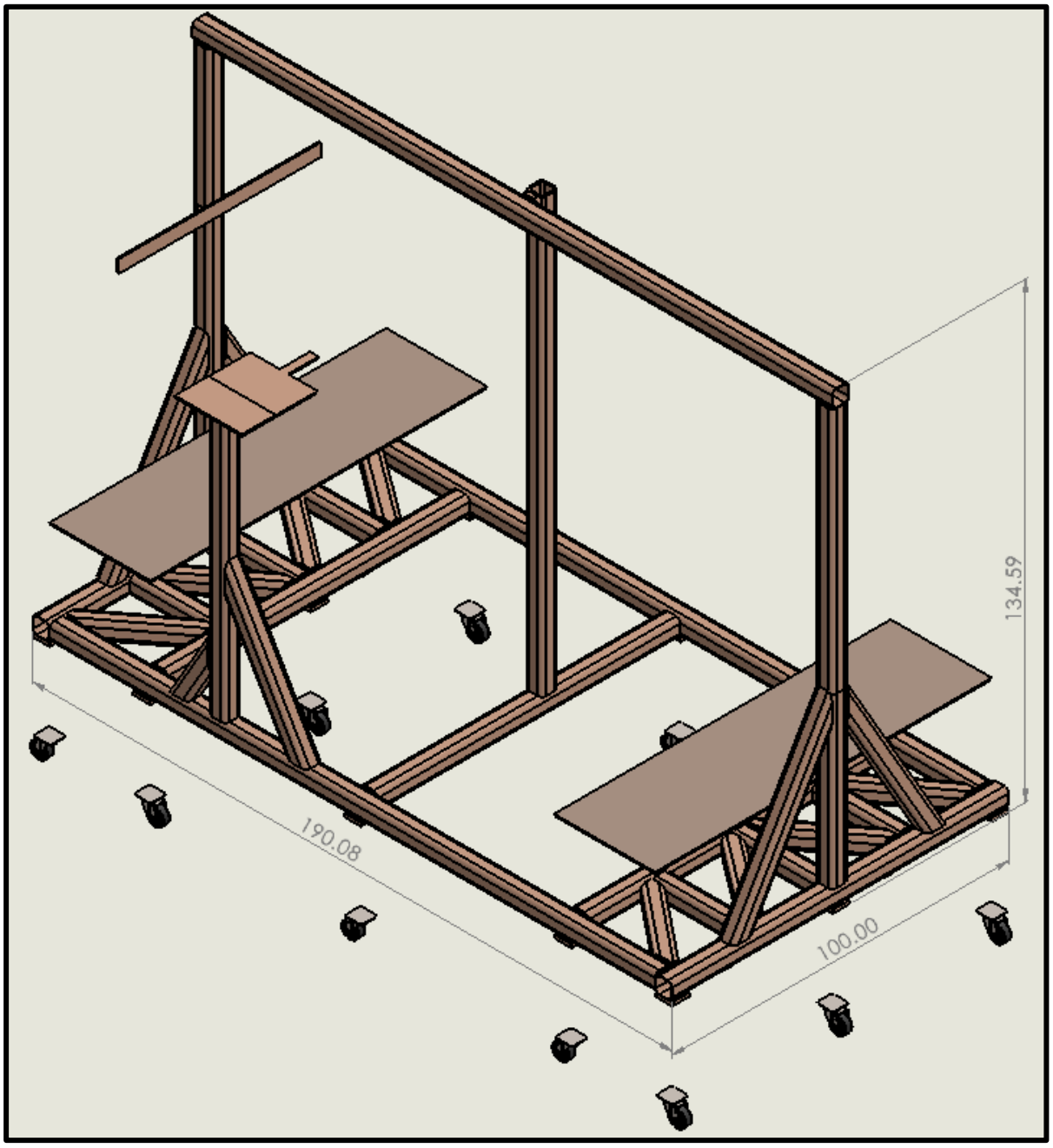


Figura 11. Vista explosionada de la estructura metálica (unidades en centímetros).
Fuente: Elaboración propia.

El módulo cuenta con 5 modos de operación que serán utilizados en los laboratorios propuestos en los siguientes capítulos. En cada uno de ellos el fluido de trabajo es agua y la bomba centrífuga opera en condiciones nominales.

2.2.1. Cavitación

El objetivo es la visualización de las burbujas en la entrada de la bomba debido al fenómeno de cavitación. Las válvulas V1, V3 y V7 se abrirán antes de encender la bomba. Luego, se cierra gradualmente la válvula V7 para aumentar la pérdida de carga en la entrada de la bomba hasta que se observe la cavitación y se escuche el sonido de las burbujas al impactar contra el rodete de la bomba. Cabe mencionar que la situación de cavitación descrita anteriormente solo se mantendrá durante unos segundos para evitar causar daño permanente a la bomba.

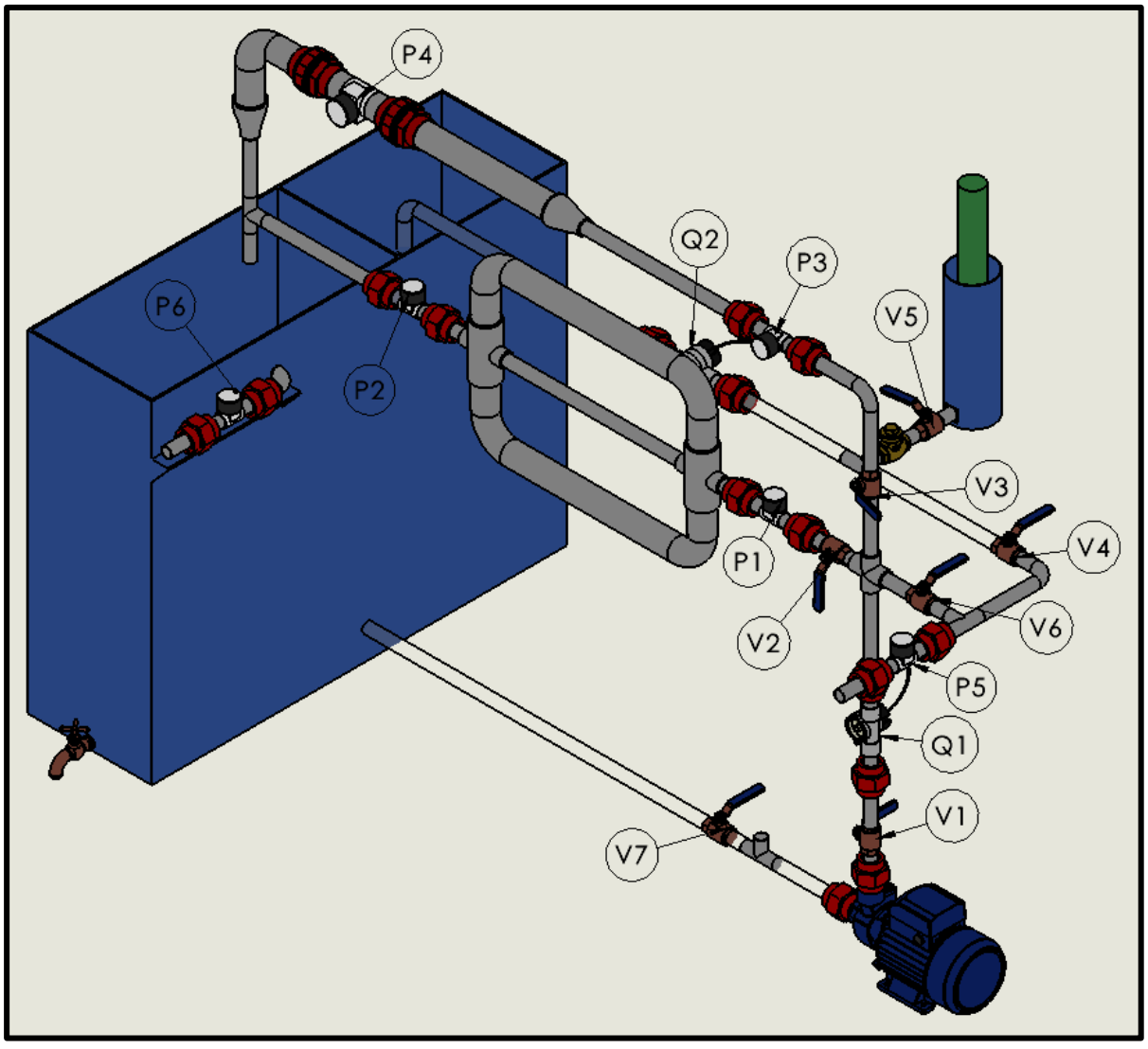


Figura 12. Etiquetas de sensores y válvulas en el módulo.

Fuente: Elaboración propia.

Durante el experimento de cavitación, se mantendrá el nivel del agua del tanque al mismo nivel que la entrada de la bomba para evitar que la bomba se encuentra en carga. Además, la

válvula de bola V7 se regulará hasta estar 2/3 cerrada ($K_s = 210$)[6]. Para comprobar que la cavitación ocurra se calculará el $NPSH_{instalación}$ y se comparará con el máximo de succión (máximas pérdidas admitidas en la tubería de aspiración).

Datos

- $Má \times imo\ de\ succión_{bomba\ @\ 60\ l/min} = 8\ m$ (dato de la ficha técnica de la bomba seleccionada)
- Coeficiente de pérdida de carga de una válvula de bola 2/3 cerrada: $K_s = 210$
- $Q = 60\ l/min$
- Tubería de aspiración: $D = 0.0254\ m$
- $g = 9.81\ \frac{m}{s^2}$ y $\rho = 997\ \frac{kg}{m^3}$
- $P_{atm} = 101\ 325\ Pa\ y P_{v\ @\ 25°C} = 3\ 169\ Pa$

La velocidad se calculará con la ecuación (7) y el $NPSH_{instalación}$ se calculará utilizando la ecuación (15):

$$NPSH_{instalación} = \frac{P_{atm} - P_v}{\rho g} - K_s \frac{V^2}{2g} \quad (15)$$

Donde:

$\boldsymbol{NPSH_{instalación}}$: Altura Neta Positiva en la Aspiración de la instalación (m)

$\boldsymbol{P_{atm}}$: Presión atmosférica (Pa)

$\boldsymbol{P_v}$: Presión de vapor (Pa)

$\boldsymbol{\rho}$: Densidad del fluido (kg/m^3)

$\boldsymbol{g}$: Gravedad (m/s^2)

$\boldsymbol{K_s}$:Coeficiente de pérdida de carga de accesorios (adimensional)

$\boldsymbol{V}$: Velocidad característica del fluido (m/s)

Resolución

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{60\ l/min \times \frac{1\ min}{60\ s} \times \frac{1\ m^3}{1000\ l}}{\pi * \frac{(0.0254)^2}{4}} = 1.97353\ m/s$$

[6] El coeficiente de pérdida de carga ha sido obtenido de Munson (2009) en la página 422.

$$NPSH_{instalación} = \frac{101\,325\,Pa\ -3\,169\,Pa}{(997\,\frac{kg}{m^3})(9.81\,\frac{m}{s^2})} - (210)\frac{(1.97353\,m/s)^2}{2\times(9.81\,\frac{m}{s^2})}$$

$$NPSH_{instalación} = -11.09\,m$$

El resultado obtenido de $NPSH_{instalación}$ indica que ocurrirá cavitación pues las pérdidas en la tubería de aspiración (11.09 m) son mayores a la capacidad máxima de succión que tiene la bomba (8 m) a 60 l/min. En esta configuración del módulo, la cavitación sucederá incluso a caudales inferiores a 60 l/min porque el $NPSH_{bomba}$ disminuye cuando el caudal disminuye. No se han tomado en cuenta las pérdidas por fricción en la tubería de aspiración para simplificar el cálculo y para demostrar que la válvula de bola agrega las pérdidas de carga suficientes para hacer cavitar la bomba.

2.2.2. Subsistema de visualización

El objetivo de este subsistema es la visualización del tipo de flujo a partir de las líneas del flujo visibles gracias a la tinta agregada al agua. La tinta será "inyectada" en la tubería de agua por el émbolo del recipiente de tinta como se muestra en la figura 13. Se abrirán las válvulas V1, V2, V3, V6 y V7. Después, con la bomba encendida, el caudal será controlado con las válvulas V1 y V4 para conseguir el tipo de flujo deseado; y, la tinta será añadida a través de la apertura de la válvula V5. Es importante indicar que se busca trabajar con caudales bajos (1 a 20 l/min) para poder obtener flujos laminares y evitar llenar rápidamente el tanque de agua con tinta. Para alcanzar dichos caudales, se cerrará gradualmente la válvula de bola V4 hasta observar que la medición en tiempo real del sensor de flujo Q2 indica el caudal deseado.

El caudal medido por el sensor de flujo Q2 permitirá obtener analíticamente el tipo de flujo y hacer las comparaciones respectivas con lo observado experimentalmente.

2.2.3. Subsistema de tuberías conectadas en serie

El objetivo de este subsistema es medir experimentalmente la pérdida de carga de las tuberías conectadas en serie. Primero, las válvulas V1, V3 y V7 debes estar abiertas; a continuación, con la bomba encendida, el caudal se regula con la válvula V1 para poder obtener pérdidas de carga a distintos caudales mediante los sensores de presión P3 y P4. Además, el caudal será medido a través del sensor de flujo Q1 para poder calcular analíticamente la pérdida de carga; y, realizar la comparación y análisis correspondiente.

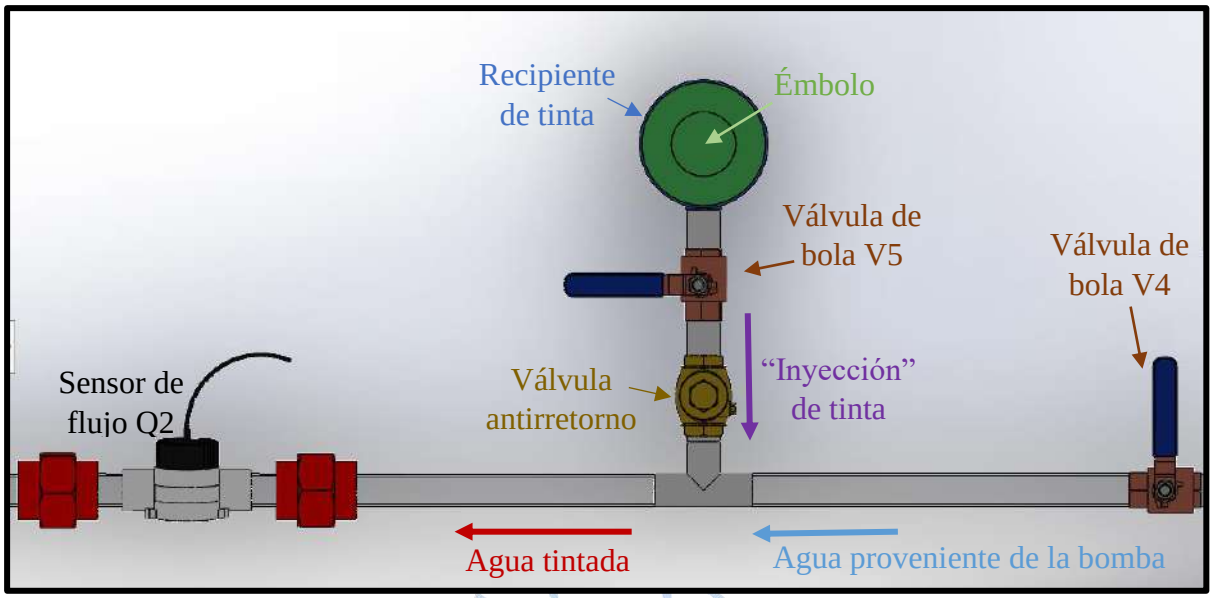


Figura 13. "Inyección" de tinta al agua proveniente de la bomba.

Fuente: Elaboración propia.

2.2.4. Subsistema de tuberías en paralelo

En este subsistema se busca medir el total de la pérdida de carga en el sistema de tuberías en paralelo. Las válvulas V1, V2 y V7 deben estar abiertas. Luego, con la bomba encendida, el caudal se regulará con la válvula V1 para medir la pérdida de carga total del sistema con diferentes caudales mediante los sensores de presión P1 y P2. Además, el caudal será medido a través del sensor de flujo Q1 para poder calcular analíticamente la pérdida de carga total y poder realizar las comparaciones necesarias con los datos de pérdida de carga obtenidos experimentalmente.

2.2.5. Subsistema de diseño

Este subsistema tiene como finalidad permitir el acoplamiento y prueba de un sistema de tuberías diseñado por el alumno. El alumno acoplará su diseño a los tramos de tuberías donde se encuentran los sensores de presión P5 y P6. Durante la puesta en marcha del módulo solo deben estar abiertas las válvulas V1, V6 y V7. Luego, con la bomba encendida, se podrá regular el caudal con la válvula V1, medir las pérdidas de carg con los sensores de presión P5 y P6; y, medir el caudal con el sensor de flujo Q1.

En este modo de operación, el alumno probará su diseño de un sistema de tuberías aprovechando la infraestructura (bomba, recirculación del agua, válvulas y sensores) del módulo de laboratorio. Además, si el diseño del alumno necesita una bomba más potente o

sensores más precisos (los sensores correspondientes a este subsistema son P5, P6 y Q1), el alumno podrá reemplazar fácilmente dichos componentes porque tanto la bomba como los sensores estarán acoplados a las tuberías mediante uniones universales.

2.3. Programación de sensores

El módulo contará con la ventaja de tener sensores electrónicos de flujo y de presión que proporcionarán medidas en tiempo real. Dichas medidas serán almacenadas en una computadora para ser analizadas e interpretadas por el alumno. Por consiguiente, para hacer posible el funcionamiento descrito será necesario implementar el hardware y software descritos en las siguientes líneas.

2.3.1. Hardware

El hardware necesario consiste en los sensores de presión (HK3022) y flujo (FS400A) que estarán ubicados en el sistema de tuberías de acuerdo al diseño en SolidWorks. Todos los sensores estarán cableados directamente a un microcontrolador Arduino que recibirá las medidas de cada sensor. El microcontrolador estará conectado a una computadora que mostrará y guardará las medidas de cada sensor en tiempo real. Además, el microcontrolador y los sensores tendrán una fuente de voltaje continuo para que reciban toda la corriente que necesiten. En la figura 14 se puede observar el esquema general del sistema descrito previamente.

2.3.2. Software

El microcontrolador Arduino será el encargado de recibir los datos de cada sensor, mostrarlos en tiempo real y guardarlos en la computadora. Para lograr dicho objetivo se programarán las instrucciones necesarias en el lenguaje basado en C++ de Arduino. Además, la programación será la misma para cada sensor de presión y la misma para cada sensor de flujo; y, por tal motivo, en el anexo 9 se expone la programación de un sensor de presión y de un sensor de flujo.

Básicamente, el código del anexo 9 transforma las señales enviadas por los sensores de presión y caudal en medidas fáciles de entender con unidades de metros y l/min, respectivamente. La transformación mencionada previamente es obtenida al ingresar las señales leídas de los sensores de presión y caudal en las ecuaciones (16) y (17), respectivamente. Además, es importante notar que ambas ecuaciones presentan factores de conversión que se obtienen durante la calibración de cada sensor.

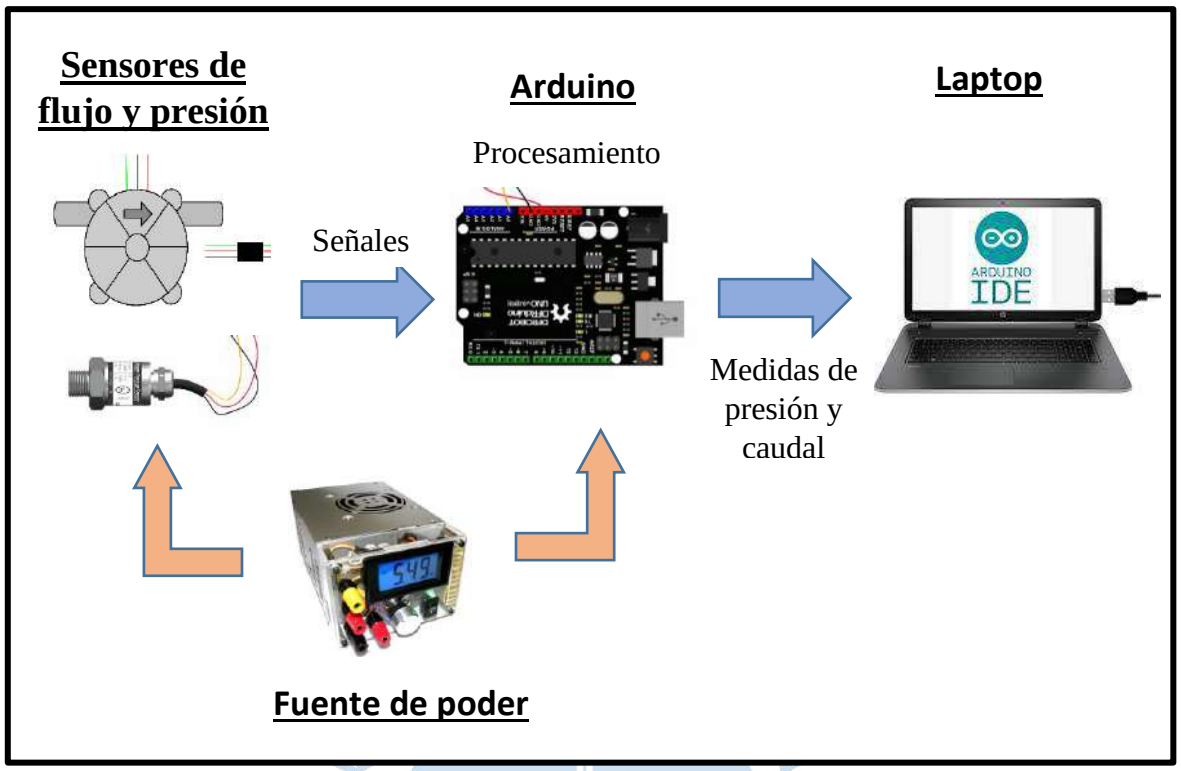


Figura 14. Esquema general del hardware a utilizar.

Fuente: Elaboración propia con imágenes obtenidas de la web.

$$\text{Presión (m)} = (\text{señalSensorPresión} \times \text{factorConversión1}) - \text{factorConversión2} \tag{16}$$

$$\text{Caudal (l/min)} = \left(\frac{\text{frecuenciaPulsosSensorCaudal}}{\text{factorConversion}}\right) \times 60 \tag{17}$$

El código expuesto en el anexo 9 se ha basado, en gran parte, en el código desarrollado en la tesis de pregrado de Simón Mori (2018) con algunas modificaciones para permitir transferir los datos obtenidos de cada sensor a un archivo Excel. Para la compatibilidad de Arduino con Excel se hará uso del complemento para adquisición de data denominado PLX-DAQ.

Además, los datos de cada sensor de presión y flujo serán mostrados en tiempo real mediante el Monitor serie del IDE de Arduino. La programación es directa y fácil de entender tal como se observa al leer el código. Sin embargo, el adecuado funcionamiento de este depende de que cada uno de los sensores sea calibrado adecuadamente; y para ello se obtendrá experimentalmente el factor de conversión de cada sensor de flujo y la ecuación que relaciona los bits con la presión en metros para cada sensor de presión.

La calibración del sensor de flujo consiste en medir en un depósito la cantidad de agua que circula por una tubería en donde esté colocado el sensor de flujo. Luego, al comparar varias medidas de volumen de agua (litros) con las respectivas medidas del sensor (pulsos) se podrá hallar el factor de conversión necesario. Por otro lado, la calibración del sensor de presión consiste en comparar los bits leídos por el sensor con la presión en metros leída por un sensor de presión analógico. Ambos sensores deberán estar colocados juntos en una misma tubería para poder establecer la ecuación que relacione los bits leídos con la presión en metros.[7]

2.4. Lista de materiales y costo total

La tabla 1 presenta la lista de los materiales y el costo total estimado que supondría la construcción de dicho módulo de laboratorio, el cual está sujeto a variaciones en los precios unitarios y a la disponibilidad del producto. Los costos de mano de obra, tanques y material estructural son referenciales y pueden variar.

2.5. Plan de construcción: Propuesta general

La construcción del módulo de laboratorio al igual que su diseño se puede dividir en tres partes: estructura metálica, tanques de agua y recipiente de tinta, y sistema de tuberías.

- **Estructura metálica:** Se construirá con tubos cuadrados de acero de 2 pulgadas (2 mm de espesor) soldados entre sí de acuerdo al plano disponible en el anexo 4; y, las 14 ruedas se unirán a la base de la estructura mediante pernos. La base del recipiente de tinta y las bases rectangulares de los tanques y la bomba, que se unirán a la estructura metálica mediante soldadura por arco, serán hechas con planchas de fierro de 5 mm.

- **Tanques de agua y recipiente de tinta:** Serán fabricados con planchas de fierro de 5 mm con soldadura por cada línea de unión para evitar fugas y se recubrirá su interior con pintura impermeable. El recipiente de tinta y el émbolo serán de plástico para aligerar el peso en dicha parte del módulo. Ambos tanques y el recipiente de tinta estarán apoyados y no unidos permanentemente a la estructura metálica para facilitar su mantenimiento, limpieza y reemplazo.

[7] Ambas calibraciones son sustentadas, explicadas y realizadas a mayor detalle en las páginas 51-53 y 55-57 de la tesis de pregrado de Simón Mori (2018).

Tabla 1. Presupuesto del proyecto.

Nombre		Cantidad		Costo unitario (Soles)	Subtotal (Soles)
Bomba	Electrobomba centrífuga	1		169	S/ 169.00
	Interruptor termomagnético	1		35.9	S/ 35.90
Sensores	Sensor de Presión	6		99	S/ 594.00
	Sensor de flujo de agua 1"	2		50	S/ 100.00
	Arduino				S/ 30.00
	Cable				S/ 15.00
Tuberías y accesorios	Válvula antirretorno	1		59.9	S/ 59.90
	Válvula de pie	1		13.9	S/ 13.90
	Válvula jardinera	2		9.9	S/ 19.80
	Válvula de bola	7		6.5	S/ 45.50
	Unión universal 2"	2		21.5	S/ 43.00
	Unión universal 1"	16		10.9	S/ 174.40
	Tubería 1"	2.76	metros	15.73 cada 5 m	S/ 8.68
	Tubería 2"	2.08	metros	8.3 cada 3 m	S/ 5.75
	Tubería transparente 1"	2.89	metros		S/ 25.00
	Codo 90° 1"	4		3.43	S/ 13.72
	Codo 90° 2"	5		1.4	S/ 7.00
	Reductor 2" a 1"	2		9.6	S/ 19.20
	Te	4		3.81	S/ 15.24
	Cruz 1"	1		5.3	S/ 5.30
	Cruz 1" y 2"	2		8.22	S/ 16.44
Soporte estructural	Tubo cuadrado 2"x2"x2mm	22	metros	Estimado: 20 soles cada 3m	S/ 146.67
	Plancha de fierro	0.64	m^2		S/ 20.00
	Abrazaderas 1"	6		0.2	S/ 1.20
	Abrazaderas 2"	5		0.4	S/ 2.00
	Ruedas	14		9.9	S/ 138.60
Tanques	Tanques para agua con tinte	1			S/ 100.00
	Tanques para agua	1			S/ 100.00
	Recipiente para el tinte y émbolo	1			S/ 100.00
Mano de obra	Mano de obra de la estructura				S/ 500.00
	Mano de obra de gasfitería				S/ 500.00
				Total	S/ 2,989.30

Fuente: Elaboración propia.

- **Sistema de tuberías:** El sistema de tuberías será armado e instalado luego de tener listos los tanques de agua, recipiente de tinta y estructura metálica. El armado se realizará directamente en la estructura metálica y se seguirán las medidas indicadas en los planos de los anexos 2, 3 y 5.

UNIVERSITAS STUDIORUM PIURENSIS

Capítulo 3

Datos técnicos de los elementos utilizados en el módulo para el sistema de tuberías

En los siguientes apartados se detallarán algunos datos técnicos de los elementos: equipos y accesorios, utilizados en el módulo. Estos fueron tomados de tiendas online que realizan envíos a Piura y/o cuenta con tienda física en la ciudad de Piura. Esto significa que están sujetos a cambios según necesidad y/o disponibilidad. Los datos técnicos completos se encuentran en el anexo 10.

3.1. Bomba centrífuga

Se eligió la bomba centrífuga de la figura 15 porque garantiza un caudal máximo de 60 l/min en su tubería de impulsión. Y, dicho caudal es el máximo que el sensor de flujo (ubicado en la tubería de impulsión) puede medir apropiadamente y sin sufrir daños. Además, 3 de los 5 modos de funcionamiento del módulo propuesto (Subsistema en serie, en paralelo y de visualización) han sido diseñados suponiendo que al comienzo de cada subsistema (cada subsistema parte de la tubería de impulsión) existe un caudal constante máximo de aproximadamente 60 l/min. En adición, la bomba funcionará en carga en la mayoría de modos de funcionamiento para asegurar que pueda alcanzar su caudal máximo de 60 l/min.

Por último, se eligió esta bomba porque pese a su bajo precio y potencia, puede cumplir adecuadamente con los requerimientos, previamente mencionados, del módulo de laboratorio propuesto. De acuerdo a su descripción, la bomba centrífuga elegida cuenta con un rodete silencioso y garantiza presiones constantes ante cambios de caudal. Su potencia es de 0.5HP y su máximo de succión es 8 m.

3.2. Sensor de presión

En el módulo se utilizarán 6 sensores de presión y para una medición adecuada se ha elegido el sensor HK3022 0.5MPa como se observa en la figura 16; puede obtener medidas en fluidos cuyas presiones oscilen dentro del rango de 0 a 5 bar. Además, está fabricado en acero

inoxidable para protegerlo de la corrosión y aumentar su durabilidad. La calibración, conexión y programación del sensor de presión electrónico serán detalladas en el siguiente capítulo. En el anexo 10 se listan algunas de sus características resaltantes.

Figura 15. Electrobomba centrífuga Werken 0.5 HP.

Fuente: Electrobomba Centrífuga Werken 0.5 HP [Figura] (s/f). Recuperado de https://www.promart.pe/electrobomba-centrifuga-werken-0-5hp-1/p

Figura 16. Sensor de presión HK3022 0.5MPa

Fuente: Sensor de presión HK3022 0.5MPa [Figura] (s/f). Recuperado de https://naylampmechatronics.com/sensores-liquido/318-sensor-de-presion-hk3022-05mpa.html?search_query=manometro+agua&results=42

3.3. Sensor de flujo de agua

El módulo requiere 2 sensores de flujo de 1 pulgada; y, debido a su funcionalidad y bajo costo, se utilizará el sensor de flujo de agua de 1 pulgada FS400A que se muestra en la figura 17. La medición del sensor es posible gracias a que el flujo de agua que lo atraviesa hace girar en su interior una turbina conectada a un imán que activa un sensor de efecto Hall; éste, emite luego, un pulso eléctrico que puede ser leído por la entrada analógica de un microcontrolador para su posterior procesamiento. Una vez calibrado, el sensor puede alcanzar una precisión de hasta un 10%. La calibración, conexión y programación del sensor de flujo serán detalladas en el siguiente capítulo. En el anexo 10 se listan algunas características resaltantes.

Figura 17. Sensor de flujo de agua 1" FS400A

Fuente: Sensor de flujo de agua 1" FS400A (s/f). Recuperado de https://naylampmechatronics.com/sensores-liquido/233-sensor-de-flujo-de-agua-1-fs400a.html?search_query=manometro+agua&results=42

3.4. Válvulas de bola

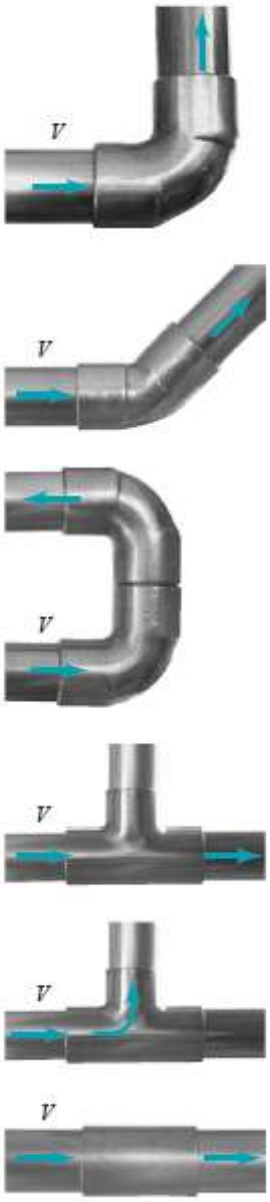
El módulo contará con 7 válvulas principales de bola. Se han elegido válvulas de bola porque al estar parcialmente cerradas tienen coeficientes de pérdida de carga altos como se observa en la figura 18. Las altas pérdidas que pueden provocar estas válvulas serán muy útiles para regular el caudal de la bomba y, especialmente, para lograr simular la cavitación en la bomba.

Otra aplicación de las válvulas de bola en el módulo será permitir el paso de agua a cada subsistema según se requiera pues cada subsistema tendrá una válvula de bola a la entrada. La válvula elegida está hecha de PVC, tiene un diámetro nominal de 1 pulgada y una presión nominal (y máxima) de 145 psi. En la figura 19 se puede observar una imagen referencial.

TABLE 8.2

Loss Coefficients for Pipe Components $\left(h_L = K_L \frac{V^2}{2g}\right)$ **(Data from Refs. 5, 10, 27)**

Component	K_L
a. Elbows	
Regular 90°, flanged	0.3
Regular 90°, threaded	1.5
Long radius 90°, flanged	0.2
Long radius 90°, threaded	0.7
Long radius 45°, flanged	0.2
Regular 45°, threaded	0.4
b. 180° return bends	
180° return bend, flanged	0.2
180° return bend, threaded	1.5
c. Tees	
Line flow, flanged	0.2
Line flow, threaded	0.9
Branch flow, flanged	1.0
Branch flow, threaded	2.0
d. Union, threaded	0.08
***e. Valves**	
Globe, fully open	10
Angle, fully open	2
Gate, fully open	0.15
Gate, $\frac{1}{4}$ closed	0.26
Gate, $\frac{1}{2}$ closed	2.1
Gate, $\frac{3}{4}$ closed	17
Swing check, forward flow	2
Swing check, backward flow	∞
Ball valve, fully open	0.05
Ball valve, $\frac{1}{3}$ closed	5.5
Ball valve, $\frac{2}{3}$ closed	210



*See Fig. 8.32 for typical valve geometry.

Figura 18. Tabla de coeficientes de pérdida de carga de accesorios.

Fuente: Munson (2009) página 422.

Figura 19. Válvula de bola cromada de 1 pulgada.

Fuente: Válvula de bola cromada 1” [Figura] (s/f). Recuperado de https://www.promart.pe/valvula-de-bola-cromada-1/p

3.5. Válvula antirretorno

El módulo utiliza una válvula antirretorno para el subsistema de visualización. El objetivo de la válvula antirretorno será evitar que el agua proveniente de la bomba ingrese al recipiente de tinta. Se ha elegido una válvula antirretorno de bronce de 1 pulgada con rosa NPT como se puede observar en la figura 20.

Figura 20. Válvula antirretorno de 1 pulgada.

Fuente: Válvula check Swing Neoprene 250 libras 1" (s/f). Recuperado 21:22, diciembre 6, 2020, de PROMART Homecenter: https://www.promart.pe/valvula-check-swing-neoprene-250-libras-1-/p?idsku=110324&gclid=CjwKCAiAn7L-BRBbEiwAl9UtkOQ-5VW9HOseSFuSRDqmZLnPz2P53ciY5b3oCsH2YNywDZ6gZ1Jt1hoCjWoQAvD_BwE

3.6. Tuberías y accesorios

Para el diseño realizado en el módulo se utilizarán tuberías de 1 y 2 pulgadas; y, accesorios como codos de 90°, cruces, reductores, válvulas de pie, tes y uniones universales. Con el fin de aligerar el peso del módulo se optó por utilizar tuberías y accesorios de PVC. Además, para asegurar las uniones se sugiere el uso de tuberías y accesorios roscados.

- **Tuberías:** El módulo tiene aproximadamente 8 metros de tuberías roscadas de PVC de 1 y 2 pulgadas de diámetro. Además, se utilizarán tuberías transparentes en sectores clave para permitir la visualización del flujo de agua.

- **Uniones universales:** Un elemento importante en el módulo son las uniones universales. Estos accesorios se colocarán en los extremos de los elementos críticos para el funcionamiento del módulo como son los sensores y la bomba pues facilitarán su mantenimiento o reemplazo.

Capítulo 4

Guía de laboratorio para el curso de Mecánica de Fluidos. Matlab: Modelamiento y simulación de sistemas hidráulicos en Simulink con *Simscape Fluids*

4.1. Introducción

Este primer laboratorio tiene como fin enseñar al alumno el uso y utilidad de la librería de Matlab denominada *Simscape Fluids* en el entorno de Simulink. Los objetivos son:

- Familiarizar al alumno con la interfaz y herramientas de la librería *Simscape Fluids*.
- Mostrar la forma en que se puede modelar un sistema hidráulico en Simulink con la ayuda de las herramientos de la librería *Simscape Fluids*.
- Obtener los parámetros requeridos de un modelo de sistema hidráulico a partir de una simulación.

4.2. Marco teórico

Los fundamentos necesarios para el desarrollo de este laboratorio se imparten en el curso de Mecánica de Fluidos. Los parámetros hidráulicos serán en su mayoría calculados directamente en el entorno de Simulink. Sin embargo, es necesario el dominio de los siguientes conceptos y fórmulas básicas para poder realizar y evaluar correctamente las simulaciones a realizar.

- **Número de Reynolds:** Es una cantidad numérica adimensional que establece la relación entre las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas de un fluido en movimiento.

$$\begin{aligned} \text{Re} < 2\,300 &\rightarrow \text{flujo laminar} \\ 2\,300 < \text{Re} < 4\,000 &\rightarrow \text{flujo transicional} \\ \text{Re} > 4\,000 &\rightarrow \text{flujo turbulento} \end{aligned}$$

Además, se puede calcular mediante la ecuación (18).

$$\text{Re} = \frac{V.D}{\upsilon} \tag{18}$$

Donde:

V: Velocidad característica del fluido (m/s)

D: Diámetro de la tubería a través de la cual circula el fluido (m)

υ: Viscosidad cinemática del fluido (m^2/s)

• **Pérdida de carga:** Hacen referencia a la caída de presión de un fluido debido a la fricción de sus partículas entre sí y con las paredes de la tubería. Existen dos tipos. Las pérdidas primarias, se producen por el rozamiento del fluido con la tubería y las pérdidas secundarias, se deben al efecto de los accesorios hidráulicos (codos, tes, empalmes, uniones universales, etc.). Además, se debe tener en cuenta que la pérdida de carga se mide en unidades de presión (Pa, psi, kPa, ksi, etc.)

• **Velocidad de flujo promedio:** Se analiza de forma sencilla utilizando la velocidad de flujo promedio que se puede observar expresada en la ecuación (19). Sin embargo, es importante entender que para poder utilizar esa fórmula se debe cumplir que el flujo debe ser perpendicular al área de la tubería, la velocidad del fluido debe ser uniforme y la sección debe ser plana.

$$Q = V.A \tag{19}$$

Dónde:

***Q*:** Caudal, cantidad de fluido que circula a través de una tubería (m^3/s)

***V*:** Velocidad promedio con la que fluye el flujo en la tubería (m/s)

A: Área de la sección de la tubería por la cual circula el fluido (m^2)

• **Tuberías conectadas en serie:** Dos o más tuberías conectadas una con otra son consideradas tuberías conectadas en serie. En estos sistemas se cumplen dos premisas básicas:

- Continuidad: El caudal se mantiene constante en todas las tuberías.

$$Q_{sistema\ en\ serie} = Q_1 = Q_2 = \cdots = v_1.A_1 = v_2.A_2 = \cdots \qquad (m^3/s)$$

- La suma de la pérdida de carga de cada tubería es igual a la pérdida de carga total del sistema de tuberías.

$$h_{sistema\ en\ serie} = h_1 + h_2 + \cdots = \sum_{i=1}^{n} h_i \qquad (Pa)$$

• **Tuberías en paralelo:** Se tiene un sistema de tuberías en paralelo cuando una tubería principal se divide en varias tuberías que transportan una parte del caudal de la tubería principal. Según Cengel (2006), las tuberías en paralelo inician en una sola tubería que se divide en ramales para, finalmente, volver a juntarse en un mismo punto corriente abajo. Además, se cumple lo siguiente:

- El caudal total es igual a la suma del caudal de cada tubería.

$$Q_{sistema\ en\ paralelo} = Q_1 + Q_2 + \cdots = \sum_{i=1}^{n} Q_i \qquad (m^3/s)$$

- La pérdida de carga es la misma en cada tubería.

$$h_{sistema\ en\ paralelo} = h_1 = h_2 = \cdots \qquad (Pa)$$

4.3. Descripción de la interfaz y herramientas de *Simscape Fluids*

La presente guía de laboratorio se ha redactado utilizando la versión 2020 de Matlab. Y, según la documentación disponible, la librería *Simscape Fluids* se encuentra disponible a partir de la versión 2015. El primer paso es ejecutar Matlab y en la pantalla principal hacer clic en el símbolo de Simulink como se observa en la figura 21.

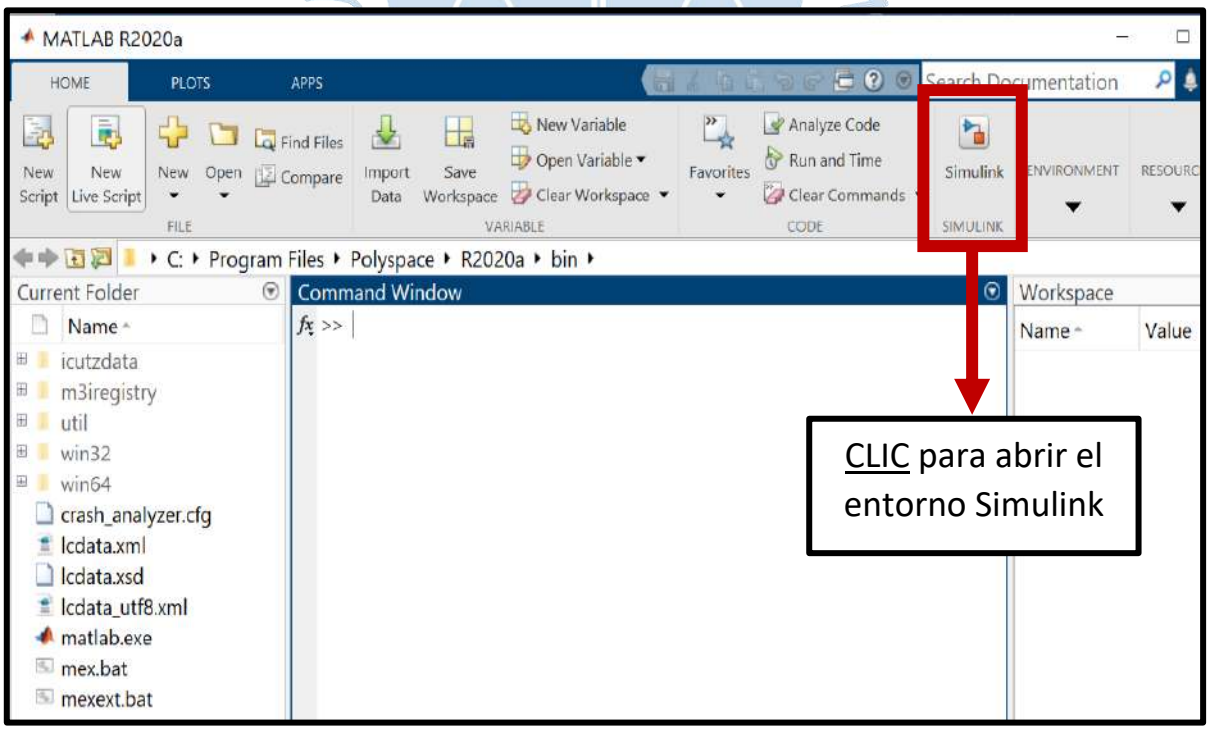


Figura 21. Abrir el entorno Simulink.

Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente, aparecerá una ventana de Simulink similar a la que se muestra en la figura 22. En dicha ventana se debe hacer clic en *Blank Model* para acceder al entorno de trabajo de Simulink para modelar y simular los ejemplos de esta guía.

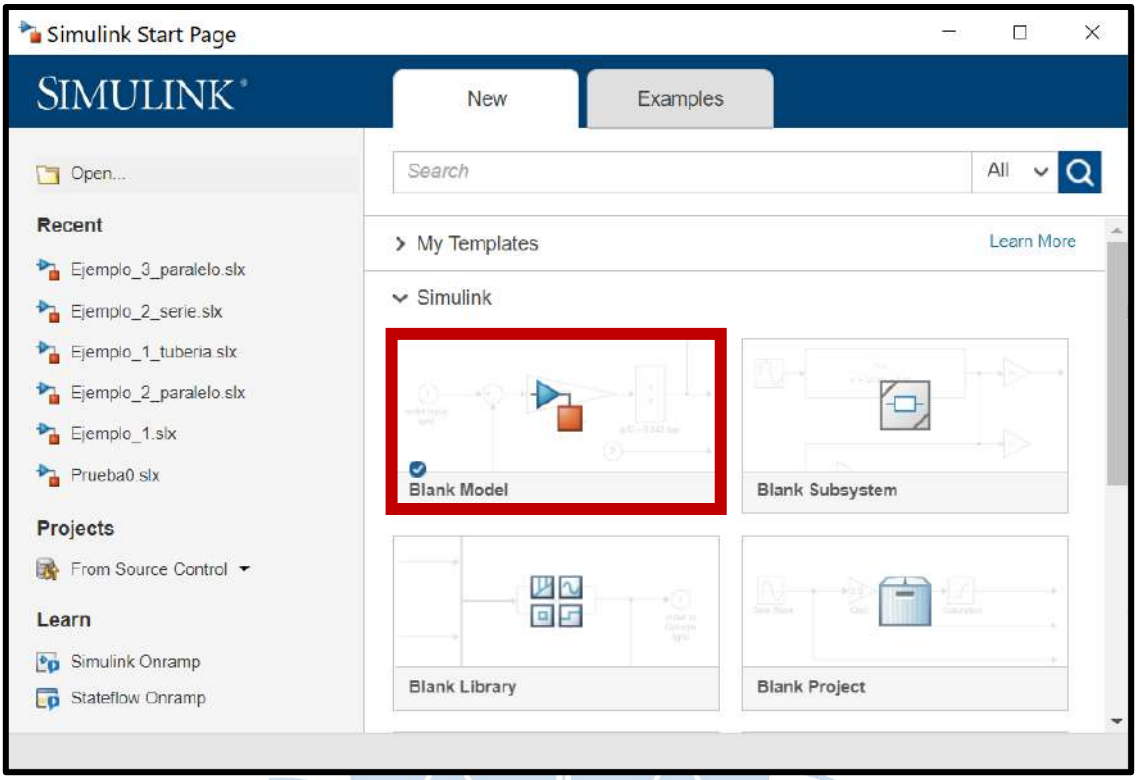


Figura 22. Página inicial de Simulink.

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 23 se aprecia el entorno de trabajo de Simulink. En el área en blanco se añadirán los elementos necesarios para modelar distintos problemas de fluidos; en la parte superior se tienen las herramientas necesarias. Para acceder a los elementos que se utilizarán en los modelos se debe hacer clic en el ícono denominado *Library Browser* que contiene todas las librerías disponibles y en esta guía en particular se utilizarán la librería de *Simscape* y Simulink que se pueden observar en la figura 24. La librería de Simulink proporciona bloques matemáticos y gráficos mientras que la librería de *Simscape* contiene los elementos necesarios para modelar problemas de fluidos y medir sus parámetros hidráulicos.

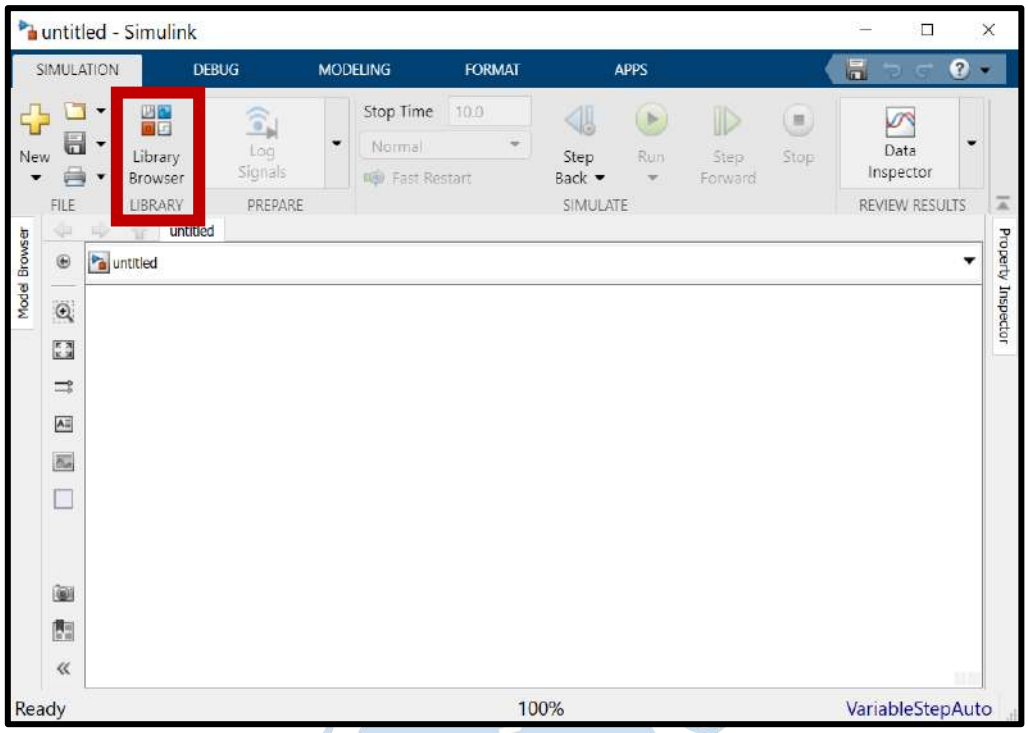


Figura 23. Entorno de Simulink.

Fuente: Elaboración propia.

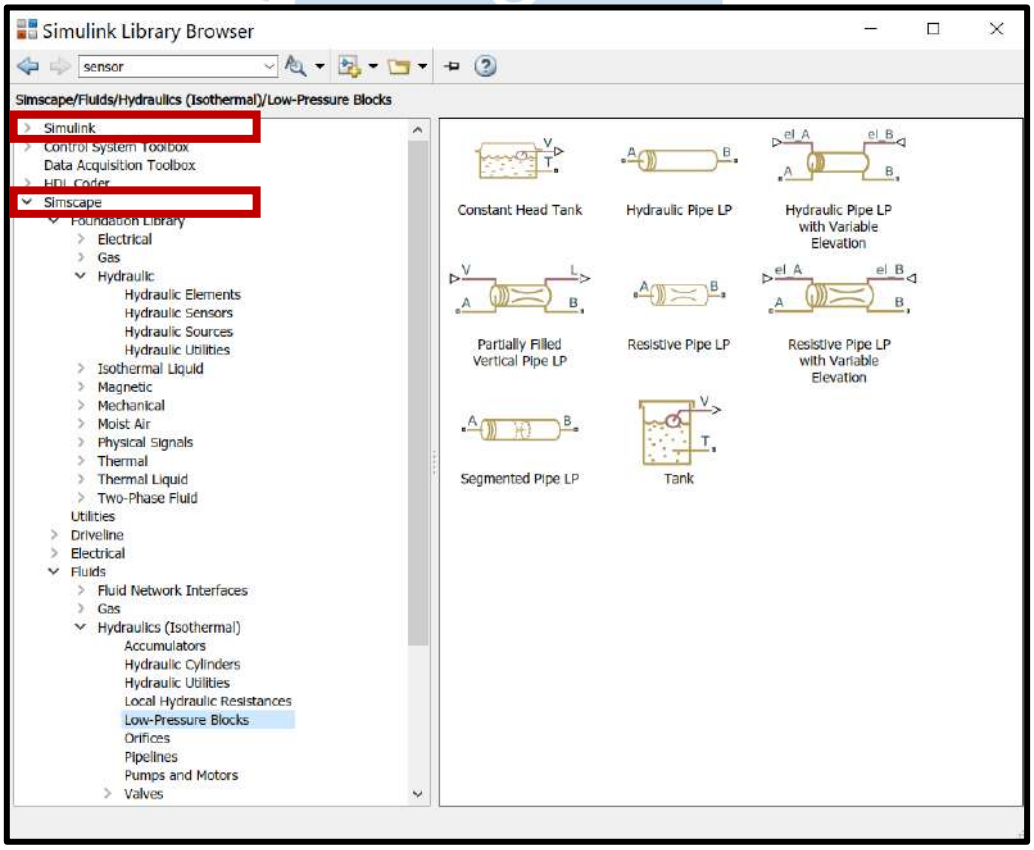
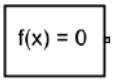
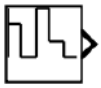
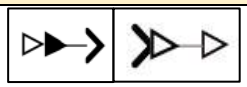
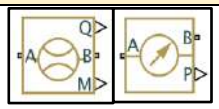


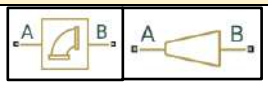
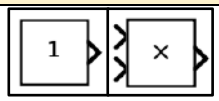
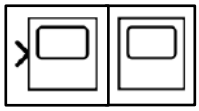
Figura 24. Simulink *Library Browser*.

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, en la tabla 2 se presentan los elementos principales que se utilizarán en esta guía con una breve descripción.

Tabla 2. Elementos a utilizar en el modelado.

Hydraulic fluid	Este elemento permite definir las características del fluido de trabajo. Contiene varios fluidos comunes en la industria y es posible configurar la temperatura a la que se va a utilizar.
Solver configuration 	Este elemento es necesario en cada modelo hidráulico porque define la configuración del *solver* que se utilizará para la simulación.
Hydraulic flow rate source	Representa una fuente ideal de caudal constante. Los puertos T y P son la entrada y salida del fluido, respectivamente. Y, el puerto S es una señal de control física que permite configurar el caudal que proporciona la fuente.
Repeating sequence stair 	Este bloque genera una señal escalón que se repite. En su configuración se puede configurar el valor de cada escalón y su duración (*Sample time*).
Simulink-PS converter & PS-Simulink converter 	Estos bloques convierten una señal en una señal física. Además, en su configuración se especifica la unidad de la señal de entrada o salida según sea el caso.
Hydraulic reference	Este elemento representa una conexión a presión atmosférica. Se utilizará principalmente al inicio y final de los sistemas modelados.
Hydraulic flow rate sensor & Hydraulic pressure rate sensor. 	Ambos elementos miden parámetros hidráulicos del sistema modelado. El sensor de flujo arroja los valores de caudal y flujo másico (Q y M); y, por su parte, el sensor de presión proporciona la diferencia de presión entre dos puntos (P = p_A - p_B).
Hydraulic pipe LP	Este bloque modela una tubería (D, ε y L) en un sistema de baja presión y toma en cuenta pérdidas por fricción y compresibilidad del fluido. Además, permite modelar la elevación de los extremos de la tubería.

Local Hydraulic resistances 	En el apartado de *Local Hydraulic resistances* se pueden encontrar varios accesorios muy útiles para el modelado de sistemas hidráulicos.
Constant & Product 	El elemento *constant* arroja una señal con un valor constante y el elemento *product* realiza una operación entre dos señales y arrojar un resultado.
Scope & Floating scope 	Ambos elementos pueden graficar una o varias señales. *Floating scope* tiene la particularidad de no necesitar que la señal esté directamente cableada y, así, permite un mayor orden en el modelo.
Terminator	Este elemento se coloca al extremo de señales que no estén conectadas a otro elemento para evitar errores en la simulación. Se utilizará en los extremos de las señales que sean graficadas mediante un *Floating scope*.

Fuente: Elaboración propia.

Todos los elementos descritos previamente se pueden añadir al entorno de trabajo de Simulink simplemente haciendo clic sobre ellos y arrastrándolos hacia el área en blanco. Al utilizarlos se debe leer cuidadosamente la descripción que da Matlab de cada uno de ellos para poder entender su modo de conexión, parámetros configurables, modos de operación y unidades de trabajo.

4.4. Ejemplo: Modelado y simulación

En los siguientes dos apartados se desarrollarán ejemplos de modelamiento de tuberías y accesorios, así como de su respectiva simulación para obtener distintos parámetros hidráulicos que puedan ser de interés.

Para que las siguientes simulaciones puedan ejecutarse de forma adecuada se deben realizar algunos ajustes al solver de Simulink de acuerdo a lo que indica la guía de usuario *SimHydraulics* de Matlab 2015. Primero, en el entorno de trabajo de Simulink se selecciona *Modeling* > *Model Settings* o Ctrl + E. Luego, se abrirá una ventana como la que se muestra en la figura 25.

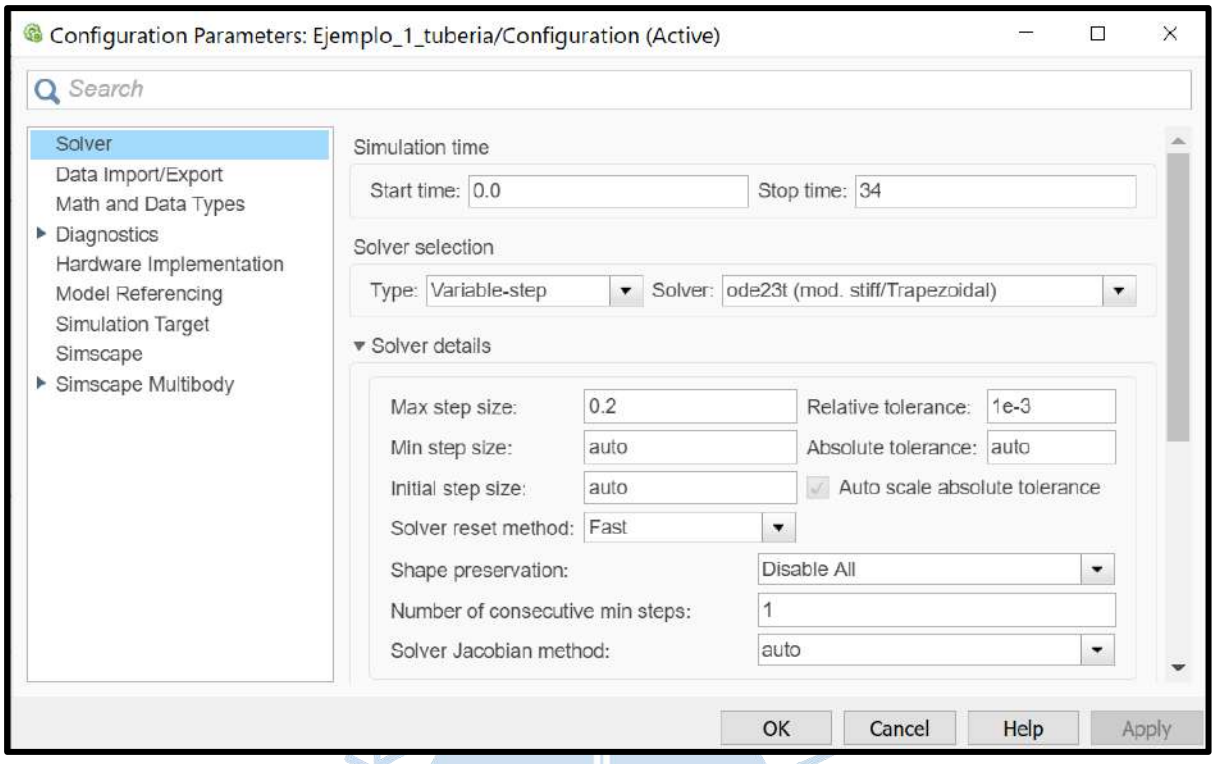


Figura 25. *Configuration Parameters*.

Fuente: Elaboración propia.

En el apartado de *Solver* de la ventana *Configuration Parameters* se elegirá cualquiera de los *solvers* tipo *Variable-step* ode23t o ode15s. Además, se ingresará un *Max step size* de 0.2. Finalmente, se hace clic en *Apply* y *OK*. Todos estos valores son recomendados en el manual de usuario de *SimHydraulics* de MathWorks (2015) en la página 2-16 a 2-20.

4.4.1. Tubería

El primer ejemplo consiste en el modelado de una tubería circular de PVC de 1 pulgada de diámetro y 1.5 metros de longitud por la cual circulará un caudal constante de agua a 30°C. En dicho sistema se medirá la pérdida de carga del fluido y se calculará el número de Reynolds para determinar el tipo de flujo. La figura 26 muestra el modelado del sistema haciendo uso de los elementos de la tabla 2. El modelo incluye una fuente de caudal constante que tiene como señal de control un bloque Repeating sequence stair que permite que la simulación arroje resultados a distintos valores de caudal. Esto se entiende mejor al ver las gráficas de caudal de la simulación.

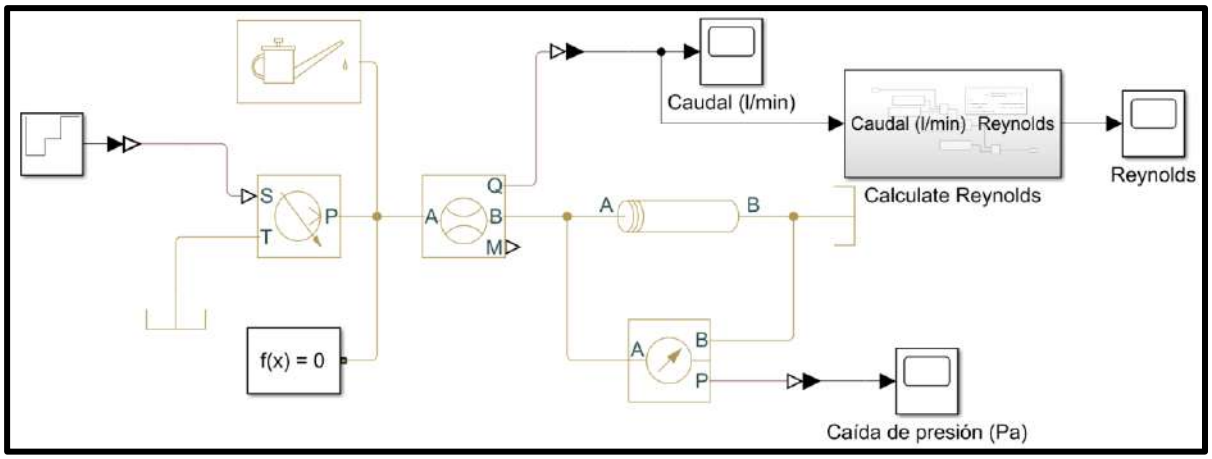


Figura 26. Tubería modelada.

Fuente: Elaboración propia.

El modelo también incluye un sensor de caudal y un sensor de presión para medir el caudal (l/min = litros por minuto) y la caída de presión (Pa) entre los extremos de la tubería, respectivamente. En adición, se ha creado un bloque de subsistema que contiene las operaciones necesarias para calcular el número de Reynolds en base al caudal en l/min como se puede observar en la figura 27.

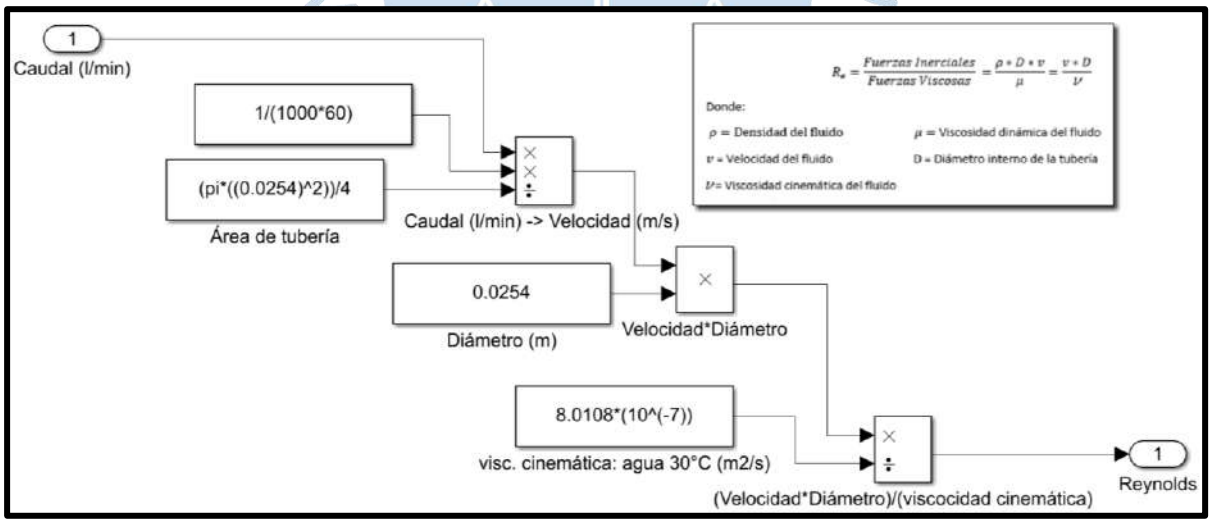


Figura 27. Bloque de subsistema para calcular el número de Reynolds.

Fuente: Elaboración propia.

El bloque de subsistema contiene bloques *Constant* y *Product* para realizar las operaciones y conversiones necesarias para hallar el número de Reynolds mediante la fórmula $Re = \frac{v.D}{\upsilon}$.

Para crear el bloque de subsistema se tiene que seleccionar un grupo de bloques, hacer clic derecho sobre ellos y seleccionar *Create Subsytem from Selection* del menú desplegado.

El sistema modelado también cuenta con el bloque de *Hydraulic Fluid* para definir las características del fluido de trabajo y el bloque *Solver Configuration* necesario para ejecutar la simulación sin problemas. En el bloque de *Hydraulic Fluids* se escogió el agua a 30°C y los demás parámetros (r*elative amount of trapped air*, *viscocity derating* y *pressure below absolute zero*) se dejaron con los valores por defecto que Simulink les asigna. Luego de definir esos parámetros, el bloque automáticamente establece las propiedades del fluido. (*density*, *viscosity* y *Bulk modulus*). Por otro lado, el bloque *Solver Configuration* se utilizó sin aplicar ningún cambio a los parámetros por defecto pues así se utiliza en el ejemplo del manual de usuario de *SimHydraulics* de MathWorks (2015) en la página 2-15 y 2-16. En la figura 28 se aprecia la configuración de ambos bloques.

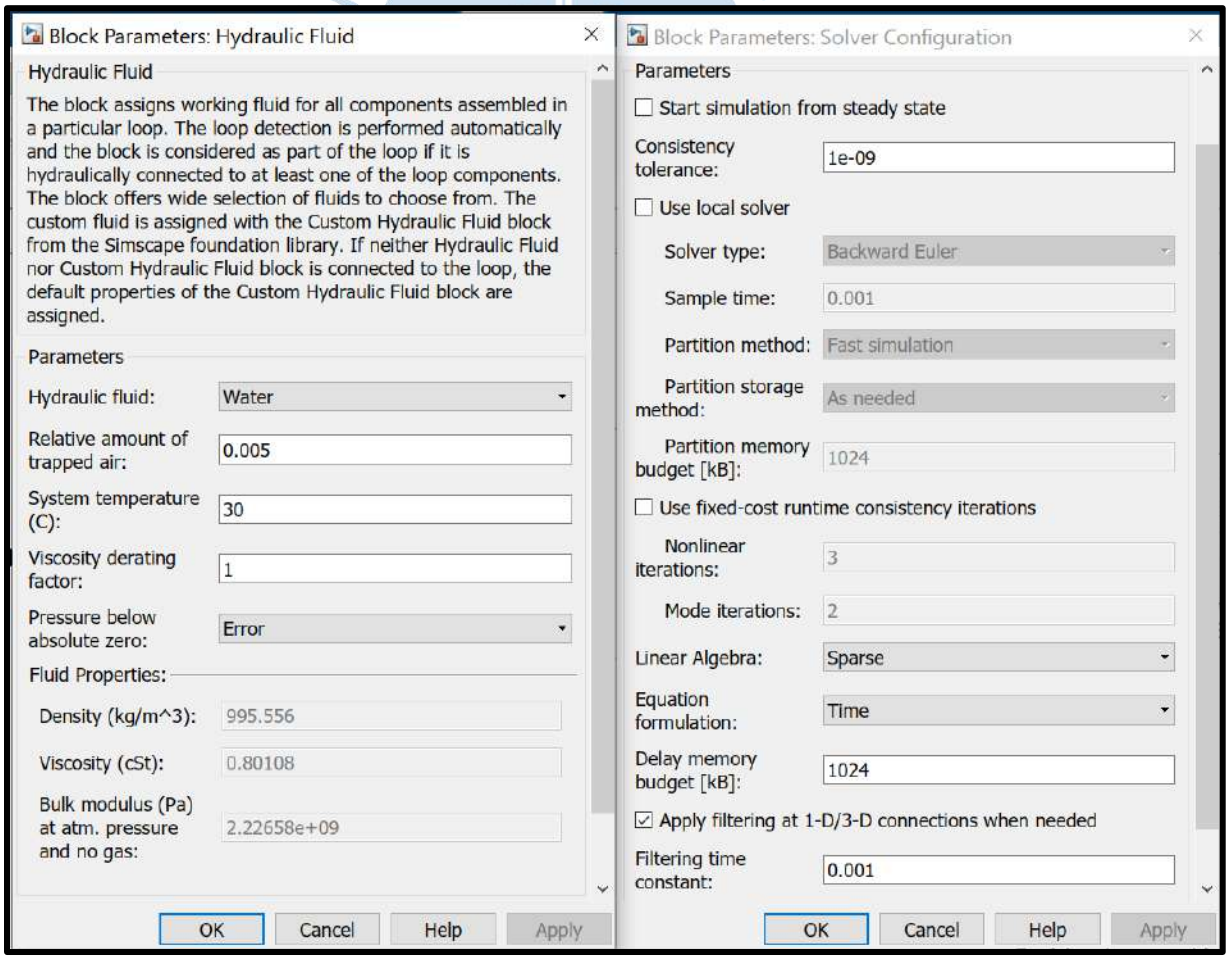


Figura 28. Parámetros de los bloques *Hydraulic Fluid* y *Solver Configuration*.

Fuente: Elaboración propia.

Además, se utilizó un bloque *Hydraulic Pipe LP* para modelar la tubería circular de PVC de D=0.0254 m, L=1.5 m y $\varepsilon = 0.0015\ mm$ cuya configuración se observa en la figura 29. En los extremos se colocaron bloques *Hydraulic Reference* a la izquierda de la fuente de caudal constante y a la derecha de la tubería a fin de no dejar desconectados los extremos del sistema.

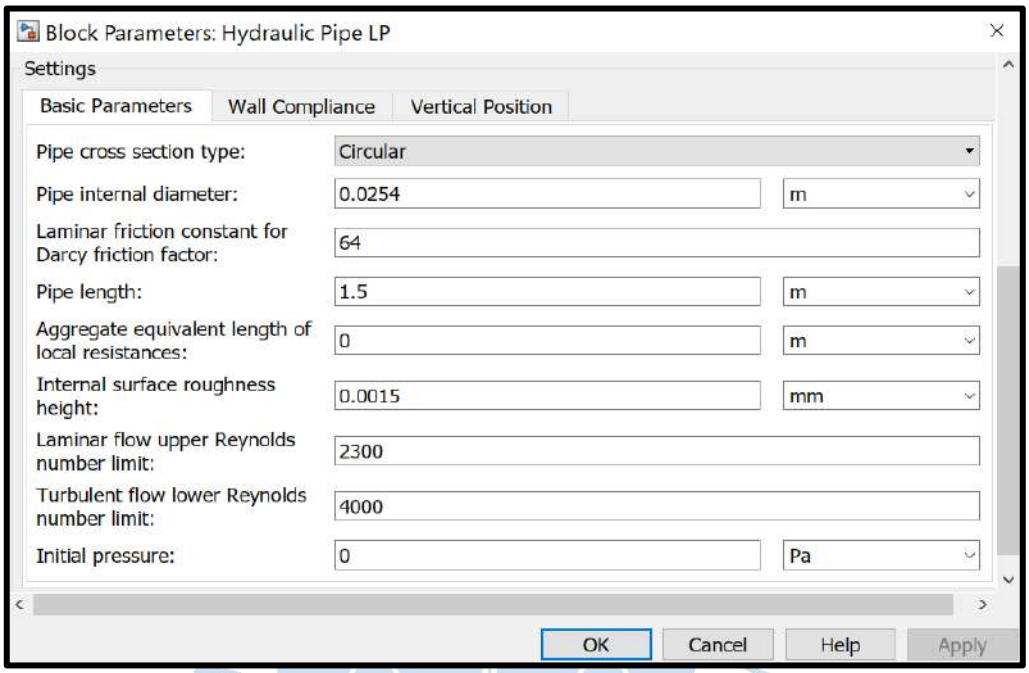


Figura 29. Configuración del bloque *Hydraulic Pipe LP*.

Fuente: Elaboración propia.

Las mediciones de caudal y presión y el cálculo del número de Reynolds tienen conectados *Scopes* que grafican los resultados durante la simulación. Luego de ejecutar la simulación haciendo clic en el botón *Run* que se puede apreciar en la figura 30, se obtienen las gráficas de caudal (l/min), caída de presión (Pa) y número de Reynolds que se observan en la figura 31.

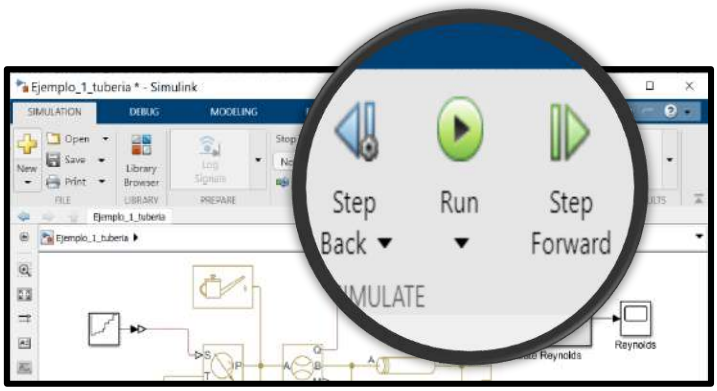


Figura 30. Botón *Run* para ejecutar la simulación.

Fuente: Elaboración propia.

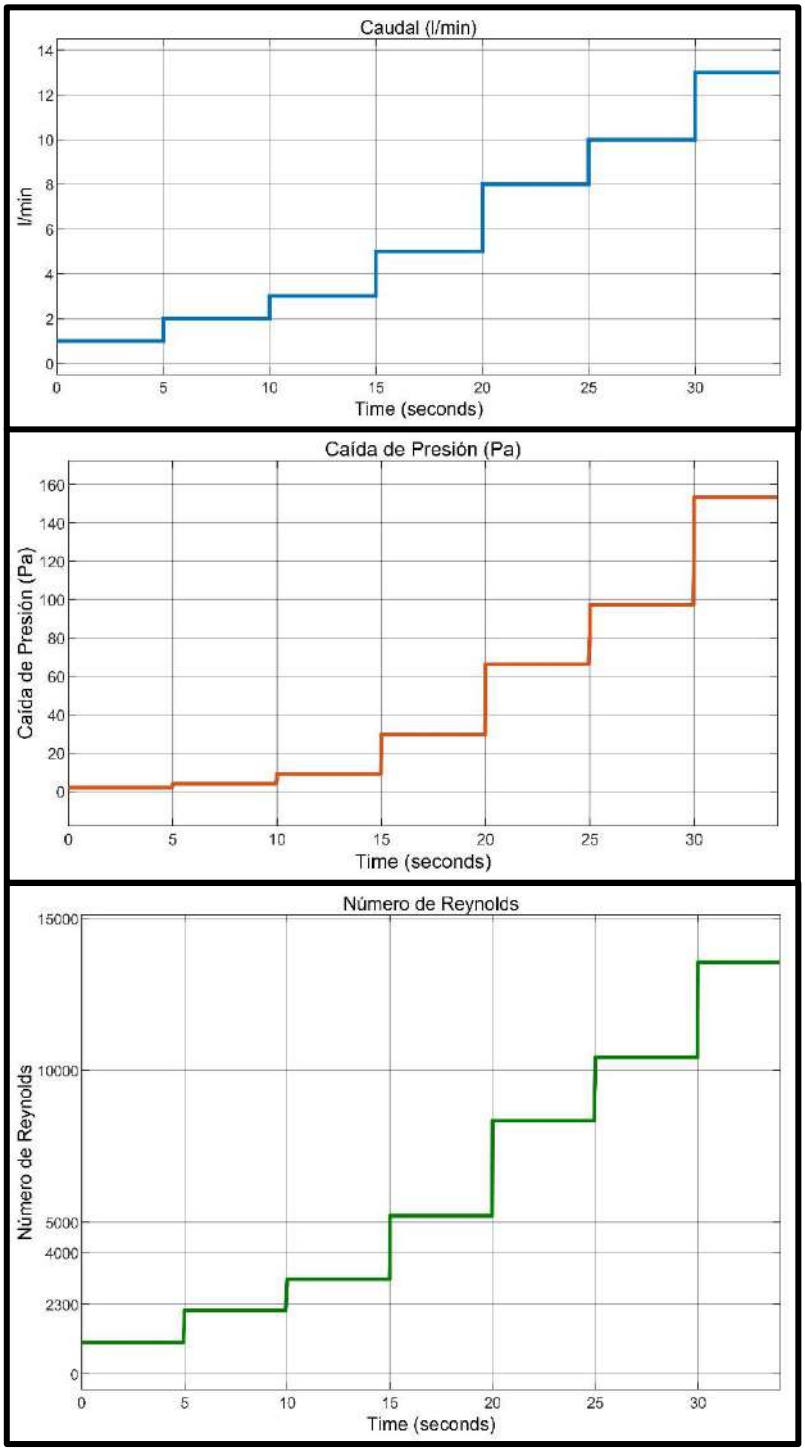


Figura 31. Caudal, caída de presión y número de Reynolds de una tubería.

Fuente: Elaboración propia.

La gráfica de caudales muestra que la simulación ha sido realizada tomando un rango arbitrario de caudales bajos para poder obtener no solo flujos turbulentos, sino también flujos

laminares y de transición. Para cada caudal simulado se ha calculado la caída de presión y número de Reynolds. Por tanto, la gráfica de caída de presión muestra que, a mayor caudal, la pérdida de carga en la tubería aumenta. Y, por su parte, la gráfica del número de Reynolds muestra que con flujo menores a 2 l/min es posible tener flujo laminar en una tubería de PVC de 1 pulgada.

4.4.2. Tuberías conectadas en serie

En este segundo ejemplo se modelarán dos tuberías de PVC ($\varepsilon = 0.0015\ mm$) en serie, de distintos diámetros, unidas mediante un accesorio de reducción por las que circulará un caudal constante de agua a 30°C. La tubería 1 es de 1 pulgada de diámetro y 1 m de longitud; mientras que la tubería 2 es de 2 pulgadas de diámetro y 1 m de longitud.

El objetivo del ejemplo es validar mediante la simulación las premisas de las tuberías conectadas en serie: continuidad de caudal y que la suma de la pérdida de carga de cada tubería es igual a la pérdida de carga total del sistema. De este modo, se ha modelado el sistema, descrito en el párrafo previo, que se muestra en la figura 32.

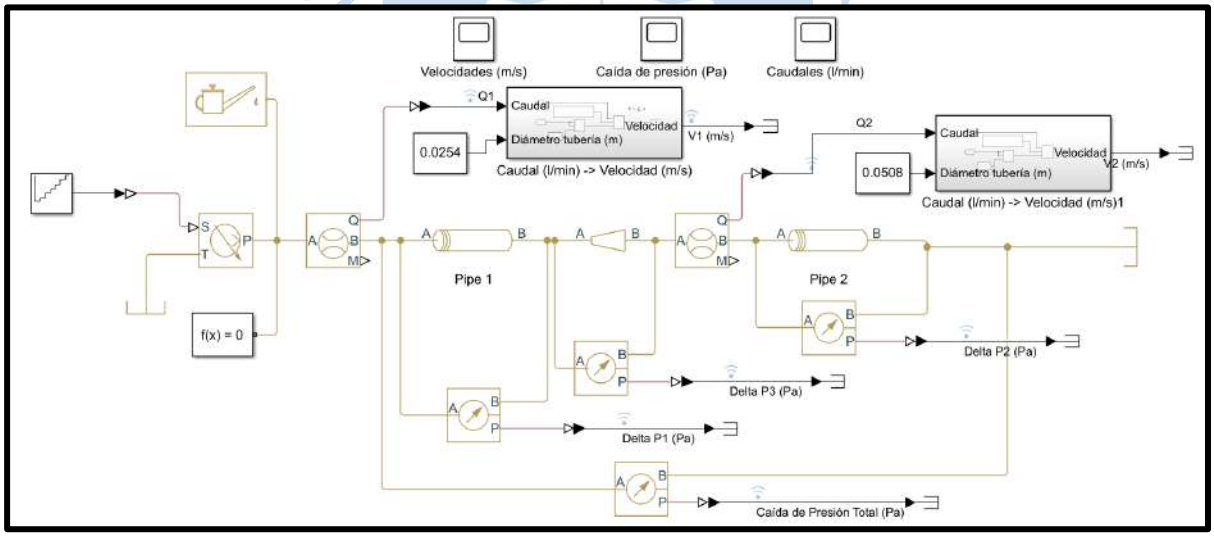


Figura 32. Modelado del sistema en serie.

Fuente: Elaboración propia.

Este modelado cuenta con los mismos elementos que el modelado del ejemplo anterior con algunas modificaciones. El modelado de las dos tuberías de distinto diámetro ha requerido el uso de un accesorio denominado *Gradual Area Change* que representa un accesorio reductor (1 pulgada – 2 pulgadas) y cuya configuración se observa en la figura 33. Además, los caudales

que se utilizarán en la simulación se encuentran en el intervalo de 5 a 90 l/min porque son caudales obtenidos a partir de una bomba centrífuga de 0.5 HP.

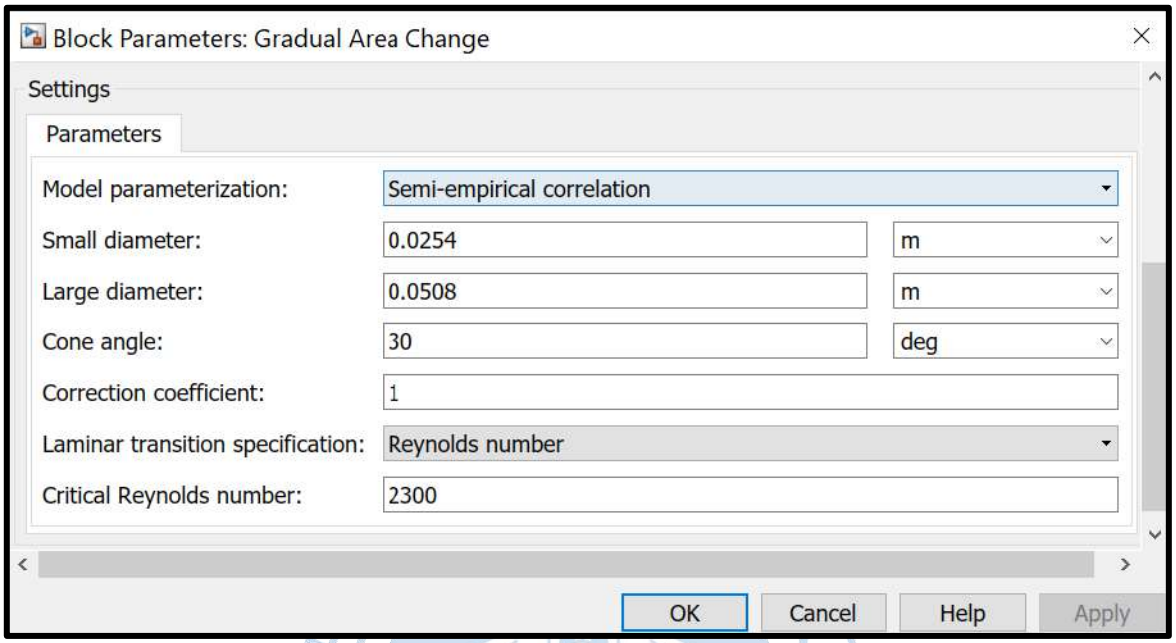


Figura 33. Configuración del bloque *Gradual Area Change*.

Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, se han utilizado dos sensores de caudal para medir el caudal en ambas tuberías. También, se cuenta con cuatro sensores de presión para medir la pérdida de carga total del sistema y de cada elemento (2 tuberías y 1 accesorio). Para calcular las velocidades del fluido en cada tubería se ha creado un bloque de subsistema que las determina a partir del caudal en l/min y el diámetro en metros como se observa en la figura 34.

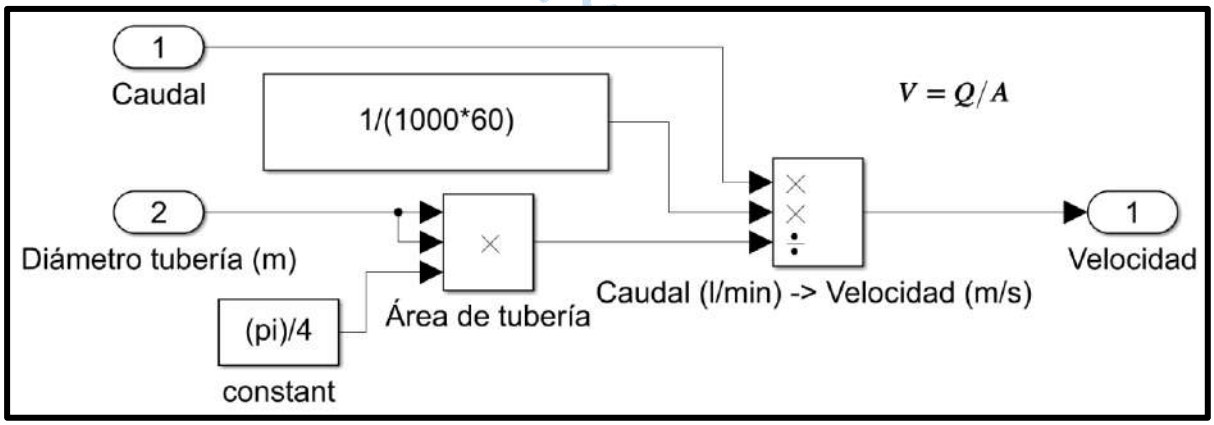


Figura 34. Bloque de subsistema para calcular la velocidad del fluido.

Fuente: Elaboración propia.

Otro aspecto interesante de este modelado respecto del anterior es el uso de dos elementos nuevos: El *Floating scope*, grafica señales, al igual que el elemento *Scope*, y no necesita estar cableado directamente a la señal ya que se conecta a las señales mediante el botón *Signal selector*; para acceder a dicho botón se hace doble clic sobre el elemento Floating Scope y Signal Selector se encontrará en el menú de opciones (ver figura 35). Al hacer clic en el botón *Signal Selector* se mostrará el sistema modelado y se deberá hacer clic en la fuente de las señales que se quiere graficar. En el caso específico de este modelo se debe hacer clic en los bloques *PS-Converter* que es de donde salen las señales que se van a graficar.

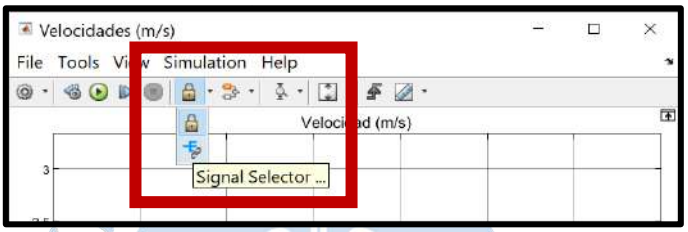


Figura 35. *Signal Selector*.

Fuente: Elaboración propia.

No obstante, para poder añadir una señal con *Signal Selector* es necesario que previamente se "active" la señal; ello se logra al hacer clic derecho sobre la línea que contenga la señal a graficar, línea que normalmente se conectaría directamente al *Scope*, y seleccionar la opción *Log Selected Signals* como se observa en la figura 36.

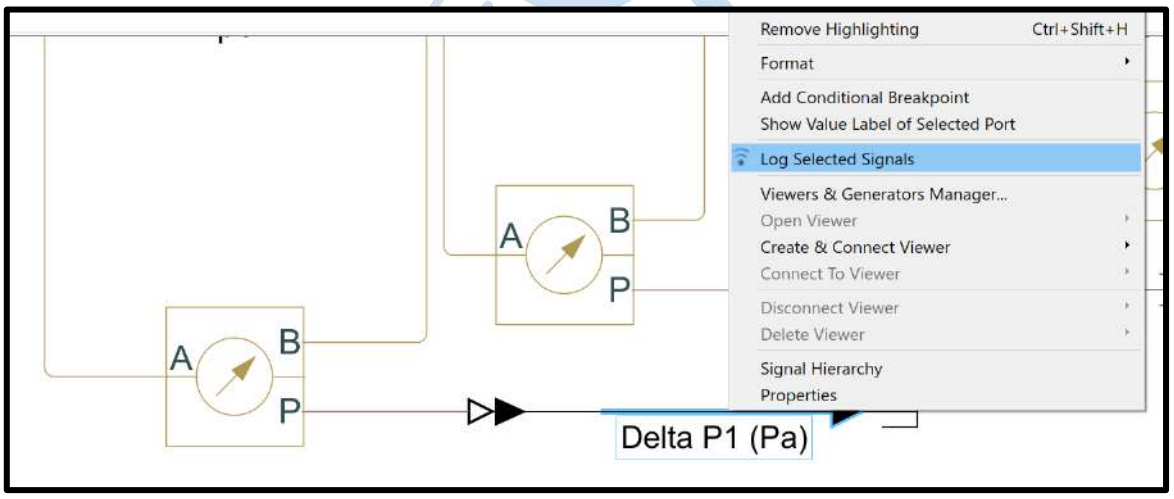


Figura 36. *Log Selected Signals*.

Fuente: Elaboración propia.

El otro elemento es el *Terminator* y se ha colocado en los extremos de las señales a graficar pues estas ya no van a estar conectadas directamente a un *Scope*; de esa forma, se evita tener errores durante la simulación por tener puertos desconectados. El siguiente paso es ejecutar la simulación y obtener las gráficas con los parámetros medidos (caudal, velocidad y pérdida de carga) como se observa en la figura 38.

En las gráficas se puede comprobar que el caudal siempre es el mismo en ambas tuberías y lo que cambia es la velocidad; así, el principio de continuidad de las tuberías conectadas en serie queda validado. Además, de la gráfica de velocidades se infiere que, a mayor diámetro de la tubería, menor es la velocidad del fluido.

Por su parte, la gráfica de caída de presión muestra las pérdidas de carga totales y la pérdida de carga en cada elemento del sistema en serie facilita la visualización de que las pérdidas totales del sistema equivalen a la suma de las pérdidas individuales de cada elemento del sistema en serie. Por tanto, la segunda premisa de los sistemas en serie queda validada.

Por último, el alumno debe entender que se han simulado 7 caudales diferentes en 7 segundos porque Simulink lo permite. Se ha asignado una duración de 1 segundo a cada caudal para obtener gráficas de forma ordenada y escalonada, pues el objetivo de esta guía es que el alumno aprenda a realizar simulaciones en Simulink. No obstante, el alumno debe tener claro que experimentalmente dicha gráfica es imposible de obtener pues la regulación del caudal y su posterior medición es un proceso que requiere un tiempo mayor a 1 segundo.

4.5. Trabajo: Modela y simula tuberías en paralelo en Simulink

Aplicando lo aprendido en los ejemplos previos se plantea al alumno el trabajo de modelar y simular un sistema de tuberías en paralelo. El objetivo es validar las dos premisas de las tuberías en paralelo, expuestas en el marco teórico de la guía, a partir de las gráficas que sean necesarias.

4.5.1. Solucionario

Como propuesta de solución para el trabajo se ha planteado el modelado y simulación de un sistema de tuberías en paralelo con las características descritas a continuación. El sistema de

tuberías de PVC ($\varepsilon = 0.0015\ mm$) en paralelo contará con tres ramales en paralelo por los que circulará un caudal constante de agua a 30°C.

El ramal central será una tubería de 1 pulgada y 1 metro de longitud. Por su parte, el ramal superior estará alejado verticalmente 0.15 metros de la tubería central y el ramal inferior dista verticalmente -0.15 metros de la tubería central. Ambas tuberías serán de 2 pulgadas y 1.3 metros de longitud. El sistema modelado se puede observar en la figura 37.

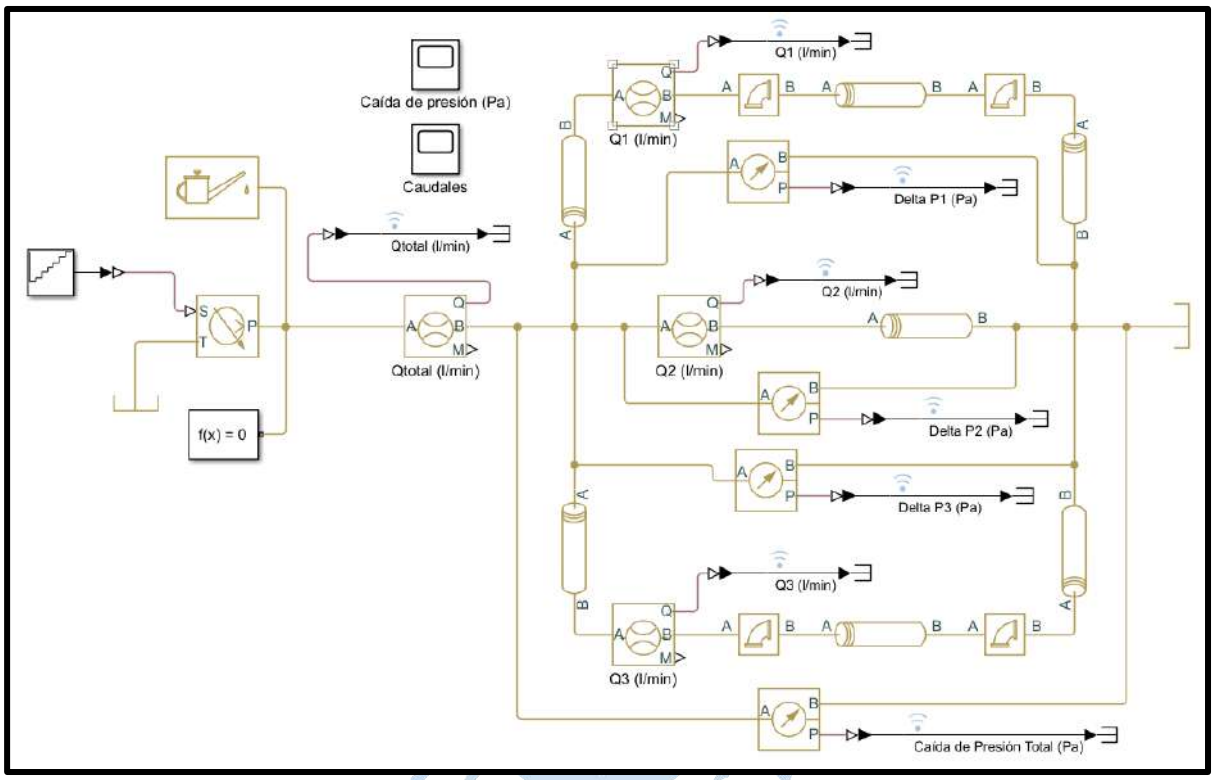


Figura 37. Sistema de tuberías en paralelo.
Fuente: Elaboración propia.

En la figura 37 se puede apreciar que en los ramales superior e inferior ha sido necesario el uso de elementos adicionales (codos y tuberías laterales) para conseguir un modelado completo. Para los codos se ha usado un elemento denominado *Elbow* de 2 pulgadas cuya configuración se observa en la figura 39 y las tuberías laterales son de 2 pulgadas y 0.15 metros de longitud. Además, la elevación de sus extremos se ha configurado para cumplir con las distancias descritas en el párrafo anterior.

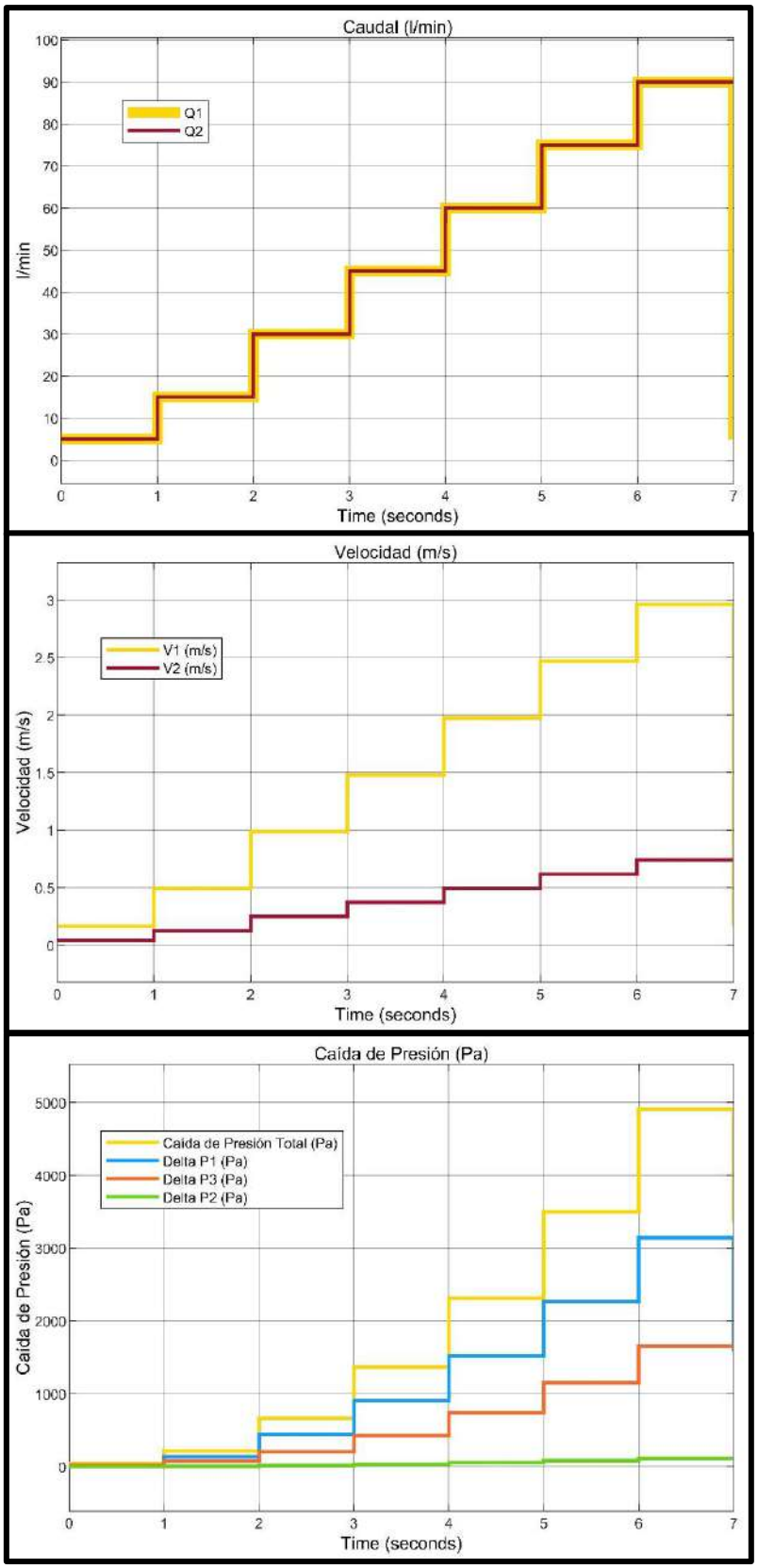


Figura 38. Caudales, velocidades y caídas de presión en sistema en serie.

Fuente: Elaboración propia.

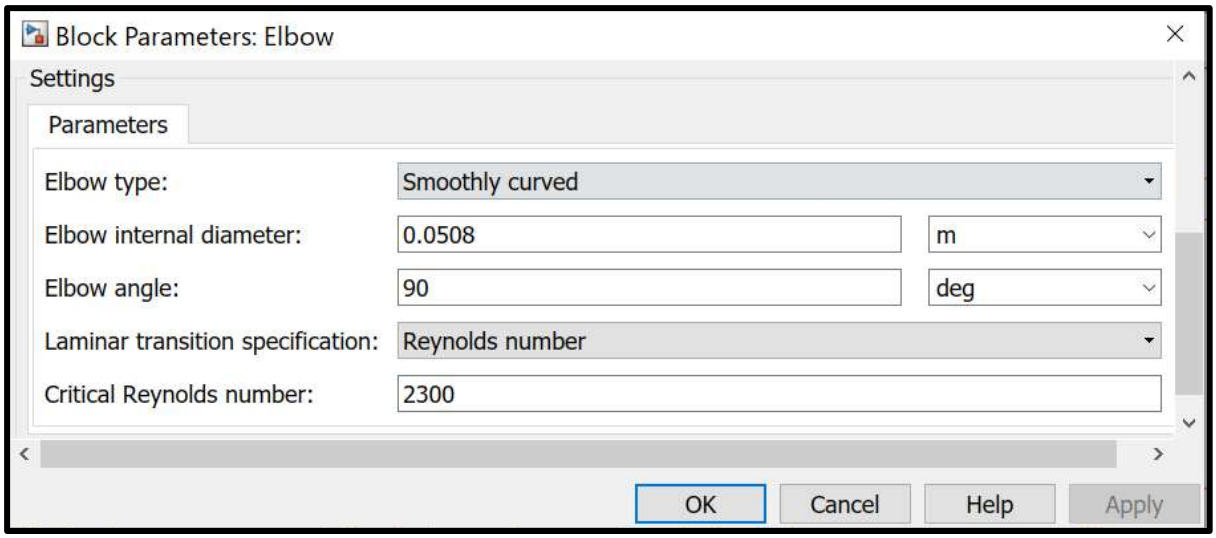


Figura 39. Configuración del bloque *Elbow*.

Fuente: Elaboración propia.

La elevación de las tuberías horizontales de los ramales superior e inferior también ha sido configurada para que se encuentra a 0.15 y -0.15 metros de la tubería central, respectivamente. Dicha configuración se realiza en el apartado *Vertical Position* de la configuración de la tubería como se puede apreciar en la figura 40. La figura solo hace referencia a la tubería del ramal superior, la tubería del ramal inferior tendría una configuración similar, pero con elevaciones negativas.

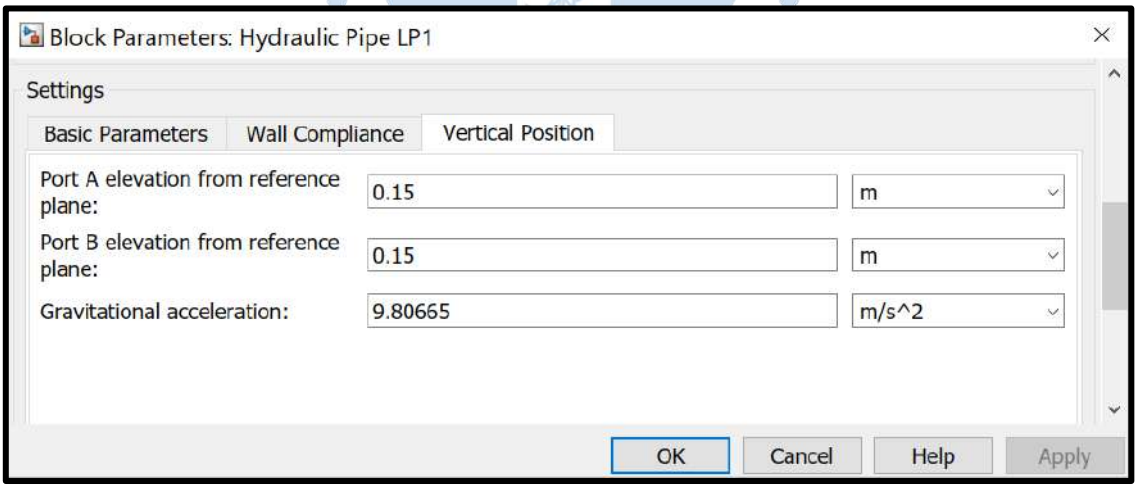


Figura 40. Configuración de elevación de tubería del ramal superior.

Fuente: Elaboración propia.

En la simulación no se ha incluido una cruz en cada extremo del sistema en paralelo porque el elemento todavía no está disponible en la librería *Simscape*. Se han colocado cuatro sensores

de caudal y cuatro sensores de presión para medir el caudal y la caída de presión del sistema y de cada ramal.

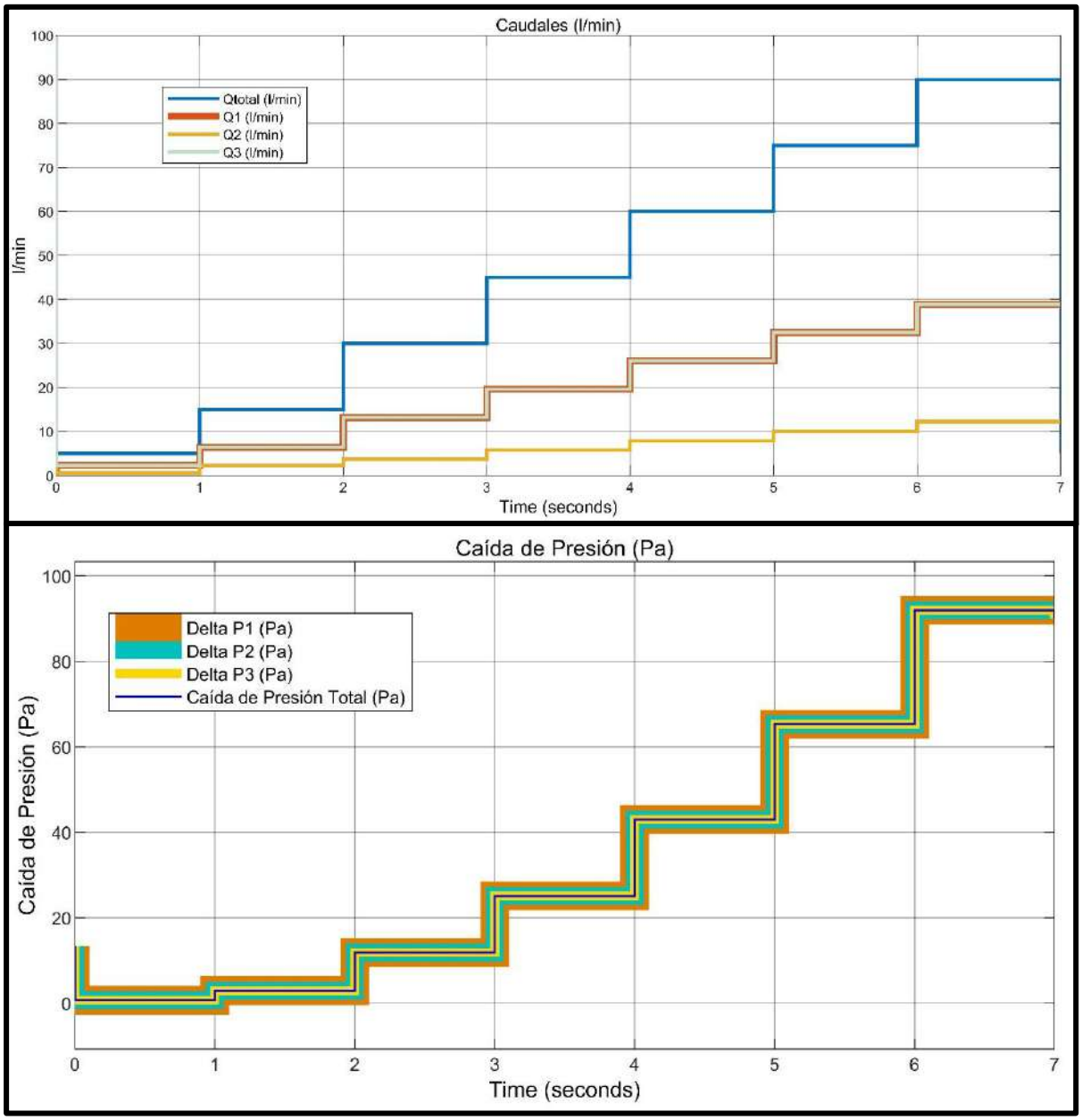


Figura 41. Caudales y caída de presión en sistema en paralelo.

Fuente: Elaboración propia.

En la simulación se obtuvieron las gráficas que se muestran en la figura 41. En la gráfica de caudales se observa la distribución de caudales en cada ramal a distintos caudales totales. Los ramales superior e inferior siempre conducen el mismo caudal al ser simétricos; y, es fácilmente observable que se cumple la premisa de que la suma de los caudales individuales es igual al caudal total. La gráfica de caída de presión total del sistema permite comprender que la caída

de presión en cada ramal es la misma, esto se debe a que los puntos de inicio y final de cada ramal y del sistema completo es el mismo por su disposición en paralelo como se observa en la figura 37.

UNIVERSITAS STUDIORUM PIURENSIS

Capítulo 5

Guía de laboratorio para el curso de Mecánica de Fluidos. Teorema de Reynolds: Visualización de Flujo laminar, turbulento y de transición y del fenómeno de cavitación

5.1. Introducción

En este laboratorio el alumno visualizará los distintos tipos de flujo en una tubería y experimentará el fenómeno de cavitación en una bomba centrífuga. Los objetivos son:

- Diferenciar visualmente los tipos de flujo en una tubería: turbulento, laminar y en transición. Y, reconocer las manifestaciones físicas del fenómeno de cavitación.
- Obtener analíticamente el tipo de flujo esperado y comparar su coincidencia con lo observado durante el desarrollo del laboratorio.
- Saber cómo y cuáles parámetros modificar en una instalación para poder obtener el tipo de flujo deseado. Y, conocer los efectos negativos de la cavitación en la bomba.

5.2. Marco teórico

- **Número de Reynolds:** Es un número adimensional que funciona como criterio para determinar el tipo de flujo que circula por una tubería circular recta. Se puede determinar de dos formas como se aprecia en las ecuaciones (20) y (22).

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho.V.D}{\mu} \tag{20}$$

O, sabiendo que:

$$\upsilon = \frac{\mu}{\rho} \qquad (m^2/s) \tag{21}$$

También se puede expresar de la siguiente forma:

$$\text{Re}= \frac{\text{V.D}}{\upsilon} \tag{22}$$

Donde:

ρ: densidad del fluido (kg/m^3)

V: velocidad característica del fluido (m/s)

D: diámetro de la tubería a través de la cual circula el fluido o longitud característica del sistema (m)

μ: viscosidad dinámica del fluido ($Pa.s$)

υ: viscosidad cinemática del fluido (m^2/s)

- **Tipo de flujo en una tubería:** Existen tres tipos de flujo y es posible determinarlos a partir del valor adimensional obtenido del número de Reynolds:

Re < 2 300	→ flujo laminar
2 300 < Re < 4 000	→ flujo transicional
Re > 4 000	→ flujo turbulento

Los tres tipos de flujo son fácilmente identificables si se agrega un colorante al fluido. De esa manera, en un flujo laminar cuyas líneas de corriente son paralelas a la tubería como se observa en la figura 42, el colorante es fácilmente identificable.

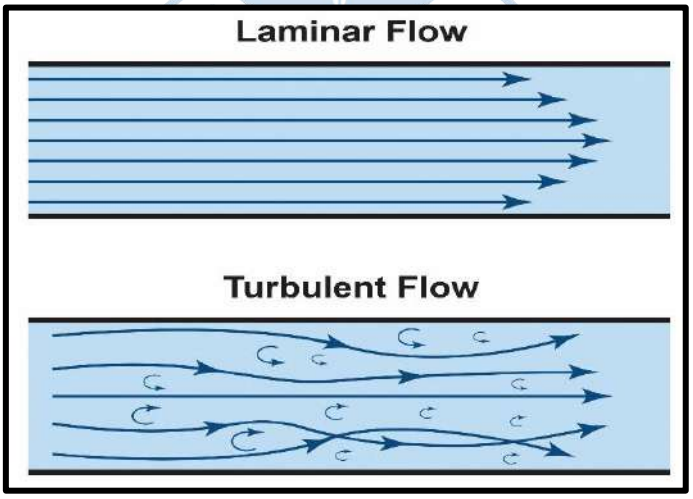


Figura 42. Líneas de corriente en flujo laminar y turbulento.

Fuente: Fernández M. (2019)

Por otro lado, en un flujo en transición se observarán líneas de corriente con ondulaciones pequeñas y el colorante hará dicho comportamiento más apreciable.

Por último, un flujo turbulento presenta líneas de corriente que se entrecruzan e interaccionan como se observa en la figura 42 y, por tanto, el colorante se mezclará y homogeneizará con el fluido.

• **Pérdida de carga en una tubería:** Sucede debido a la fricción del fluido con la tubería y es calculado comúnmente para flujos laminares y turbulentos mediante la ecuación (23) de Darcy-Weisbach:

$$h_L = f\frac{L}{D}\frac{V^2}{2g} \quad (Pa) \tag{23}$$

Dónde:

f: coeficiente de fricción

L: longitud del tramo de tubería (m)

D: diámetro de tubería (m)

V: velocidad con la que fluye el flujo en la tubería (m/s)

g: aceleración de la gravedad (m/s^2)

Además, cabe resaltar que el coeficiente de fricción es determinado en función al número de Reynolds $(\frac{\rho.v.D}{\mu})$ y la rugosidad relativa de la tubería[8] $(\frac{\boldsymbol{\varepsilon}}{D})$ como se observa en la ecuación (24) .

$$f = f\left(\frac{\rho.v.D}{\mu}, \frac{\boldsymbol{\varepsilon}}{D}\right) \tag{24}$$

• **Diagrama de Moody:** Este diagrama como se observa en la figura 43 permite obtener el coeficiente de fricción para tuberías de distintos diámetros a partir del número de Reynolds y la rugosidad relativa de la tubería.

[8] La letra '$\boldsymbol{\varepsilon}$' hace referencia a la rugosidad absoluta del material. Es una propiedad física del material que se mide generalmente en metros, pies o pulgadas.

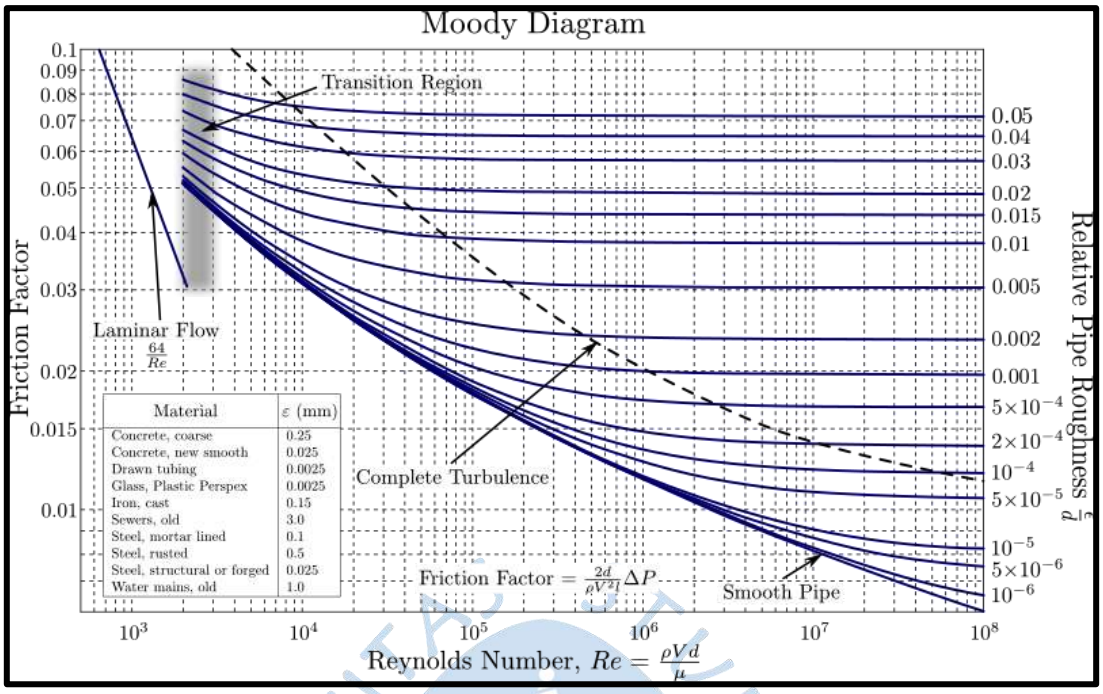


Figura 43. Diagrama de Moody.

Fuente: Beck S. & Collins R. (2012)

- **Cavitación:** Según White, Frank M. (2004), la cavitación aparece cuando la presión de un líquido cae por debajo de la presión de vapor debido al flujo y ocasiona la aparición de burbujas de vapor en el líquido; es decir, la ebullición del líquido sucede a la temperatura a la cual está siendo transportado el fluido. En las bombas centrífugas, el fenómeno de cavitación sucede en la entrada o tubería de aspiración de la bomba; y, se busca evitar reduciendo las pérdidas en la entrada de la bomba, instalando la bomba en carga y cuidando que la NPSH de la instalación sea mayor que la NPSH de la bomba.

"Si apareciese cavitación, habría ruido y vibraciones en la bomba, deterioro del rotor por picaduras y una caída brusca en la altura manométrica y el caudal de la bomba. Con algunos líquidos estos deterioros aparecen antes de que se presente la ebullición, debido a la liberación de gases disueltos e hidrocarburos ligeros." (White, Frank M., 2004)

- **NPSH:** La NPSH se estudia a mayor profundidad en la asignatura de Máquinas Hidráulicas, pero se explicará brevemente en las siguientes líneas pues es un concepto clave para entender la cavitación en una bomba.

Cengel, Y. & Cimbala, J. (2006) establece que la "carga de aspiración neta positiva (NPSH, por sus siglas en inglés), se define como la diferencia entre la carga de presión de estancamiento en la entrada de la bomba y la carga de la presión de vapor". Su fórmula es la siguiente:

$$NPSH = \left(\frac{P}{\rho g} + \frac{V^2}{2g}\right)_{entrada\ de\ la\ bomba} - \frac{P_v}{\rho g} \quad (25)$$

La NPSH es muy utilizado por los fabricantes de bombas, pues según Cengel, Y. & Cimbala, J. (2006) ellos prueban sus productos y publican "un parámetro de rendimiento llamado carga de aspiración neta positiva necesaria ($NPSH_{necesaria}$), que se define como la *NPSH mínima necesaria para evitar la cavitación en la bomba*." Dicho parámetro también es conocido como la NPSH de la bomba. Por otro lado, el NPSH calculado en la instalación real es conocido como NPSH de la instalación o NPSH real.

Gracias a las definiciones previas es posible decir que para "que una bomba no sufra cavitación, la NPSH real o disponible debe ser mayor que $NPSH_{necesaria}$. Es importante hacer notar que el valor de NPSH, aparte de variar con el caudal, también se modifica con la temperatura del líquido porque P_v es una función de la temperatura. NPSH también depende del tipo de líquido que se bombea, ya que hay una curva única de P_v contra T para cada líquido" (Cengel, Y. & Cimbala, J, 2006, p.746).

5.3. Número de Reynolds: Desarrollo del laboratorio

Para el experimento se utilizarán las siguientes partes del módulo:

- Bomba centrífuga
- Fluido de trabajo: agua
- Válvulas V1, V2, V3, V4, V5, V6 y V7
- Válvula antirretorno
- Sensor de flujo Q2
- Recipiente de tinta con agua y émbolo

Las partes previamente mencionadas pueden ser identificadas en la figura 44. Además, antes del inicio del experimento se debe comprobar el correcto funcionamiento de los equipos y accesorios mencionados anteriormente.

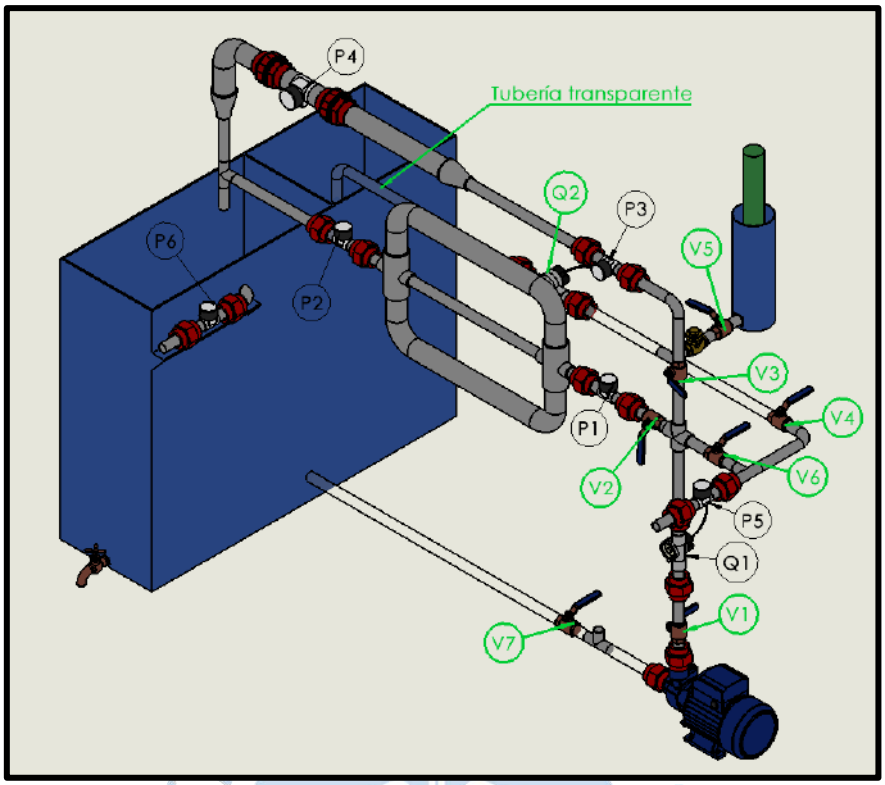


Figura 44. Módulo con elementos a utilizar en el laboratorio de Reynolds.

Fuente: Elaboración propia.

El módulo a utilizar durante el desarrollo del presente laboratorio permite observar los distintos tipos de flujo a través de un tramo de tubería plástica transparente. Luego, el experimento se desarrolla de la siguiente manera:

1. Cerrar totalmente las válvulas V4 y V5 y abrir completamente las válvulas V1, V2, V3, V6 y V7. Esta disposición permitirá que solo una parte del caudal total de la bomba circule por la tubería transparente. Y, es importante porque se busca trabajar con caudales bajos para poder obtener flujo laminar.

2. Encender la bomba centrífuga y esperar a que todo el tramo de tuberías tenga agua circulando.

3. Abrir levemente la válvula V4 para que el caudal que circule por la tubería transparente sea el más bajo posible y asegurar obtener flujo laminar. Si el caudal aún es elevado, se pueden cerrar parcialmente las válvulas V1 y V6 hasta alcanzar el caudal deseado.

4. Abrir levemente la válvula V5 y empujar levemente el émbolo de recipiente de tinta para que un pequeño chorro de agua con tinte se mezcle con el agua que circula por la tubería transparente; y, así, el alumno pueda observar las líneas de corriente del fluido.

5. Seguir abriendo la válvula V4 para poder obtener flujos de transición y flujos turbulentos. Paralelamente, anotar en la tabla 3 los diferentes caudales medidos por el sensor de flujo y los cambios observados en el flujo de la tubería transparente.

5.4. Cavitación: Desarrollo del laboratorio

Para el experimento se utilizarán las siguientes partes del módulo:

- Bomba centrífuga
- Fluido de trabajo: agua
- Válvulas V1, V2, V3, V6 y V7
- Recipiente de tinta con agua

Las partes previamente mencionadas pueden ser identificadas en la figura 45. Además, antes del inicio del experimento se debe comprobar el correcto funcionamiento de los equipos y accesorios mencionados anteriormente.

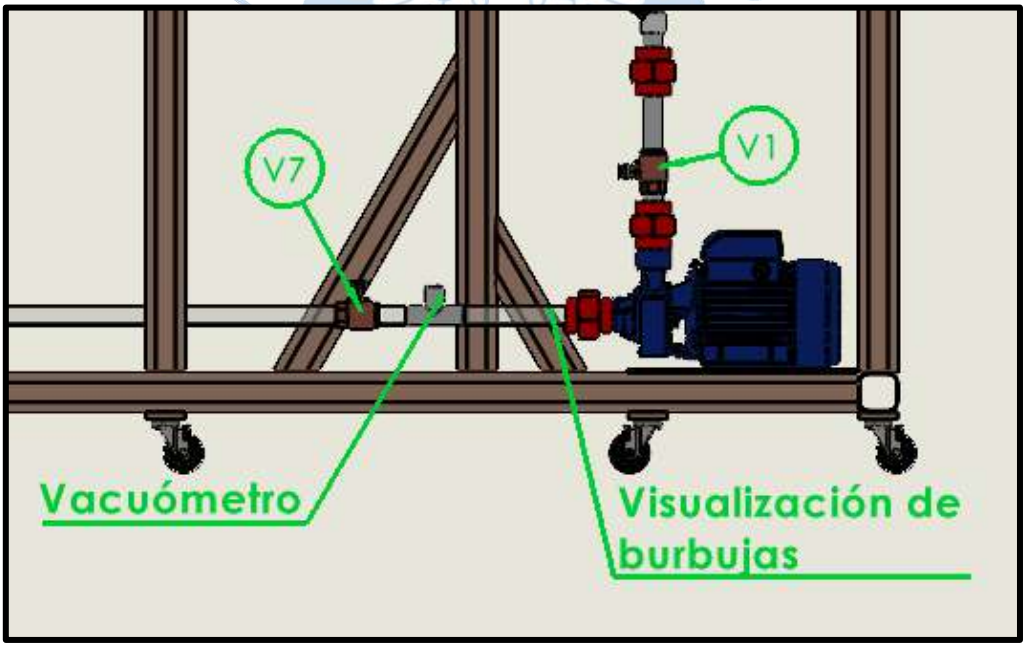


Figura 45. Módulo con elementos a utilizar en el laboratorio de cavitación.
Fuente: Elaboración propia.

Este experimento tiene como objetivo que el alumno pueda visualizar el efecto de la cavitación en la tubería de aspiración de la bomba. Es decir, se espera que el alumno pueda apreciar la aparición de burbujas en la entrada de la bomba y el sonido de las burbujas al

colapsar con el rodete de la bomba. A continuación, se expondrán los pasos para el desarrollo del laboratorio:

1. Cerrar totalmente las válvulas V2 y V6 y abrir totalmente las válvulas V1, V3 y V7. Esta disposición permite la recirculación del agua.

2. Encender la bomba centrífuga y esperar a que todo el tramo de tuberías tenga agua circulando.

3. Cerrar gradualmente la válvula V7 hasta que se observen burbujas en la tubería transparente próxima a la entrada de la bomba. Además, White (2004) afirma que "Si apareciese cavitación, habría ruido y vibraciones en la bomba, deterioro del rotor por picaduras y una caída brusca en la altura manométrica y el caudal de la bomba". **Nota:** Este estado no se debe mantener por mucho tiempo para evitar que se produzcan daños permanentes en la bomba centrífuga.

4. Como paso adicional se puede considerar instalar un vacuómetro en la "T" próxima a la válvula V7 para poder medir la presión del agua líquida y, así, comprobar si es menor a la presión de vapor de agua a esa temperatura.

5.5. Cálculos y resultados

1. Determinar la viscosidad mediante el uso de tablas y obtener el valor del número de Reynolds para cada experimento realizado. Mostrar los cálculos y resumir los resultados en la tabla 3. Adicionalmente, el alumno puede incluir fotos de la tubería con colorante en los diferentes tipos de flujo.

Tabla 3. Tabla de anotación de datos del experimento de Reynolds.

Observación del colorante	**Caudal (m^3/s)**	**Re**
(Ejemplo: El colorante traza líneas rectas en el flujo de agua y no se mezcla)	1	1500

Fuente: Elaboración propia.

2. Comparar los resultados analíticos previos con lo observado en el tubo transparente del módulo de laboratorio. ¿Los resultados empíricos y analíticos concuerdan? ¿Por qué?

3. Con el número de Reynolds obtenido en el apartado anterior y el diagrama de Moody, calcular las pérdidas en las tuberías para cada experimento.

4. ¿Por qué se debe evitar el fenómeno de cavitación en una bomba centrífuga?

5.5.1. Solucionario

En este apartado se realizarán los cálculos analíticos que el alumno tendría que realizar en el laboratorio. Los datos a utilizar serán los más parecidos a los que se obtendrían experimentalmente.

Datos

- Tubería

$D = 0.0254\ m$

$L = 1.5\ m$

$Rugosidad\ absoluta$[9] $= \varepsilon = 0.0015\ mm$

$Rugosidad\ relativa = \frac{\varepsilon}{D} = 5.91\ \times\ 10^{-5}$

- Fluido: agua

$Viscosidad\ cinemática\ =\ 8.0108\ \times\ 10^{-7}\ m^2/s$

$Caudales\ = 1,3\ y\ 6\ \ l/min$

$Q = 1\ l/min = 1.6667\ \times\ 10^{-5}\ m^3/s$

$$\text{Re}= \frac{\text{v.D}}{\upsilon} = \frac{\dfrac{1.6667\ \times\ 10^{-5}\frac{m^3}{s}}{\pi\ \times\frac{(0.0254\ m)^2}{4}}\times\ 0.0254\ m}{8.0108\ \times\ 10^{-7}\ m^2/s} = \mathbf{1042.94}$$

Ya que el flujo es laminar el factor de fricción es:

$$f = \frac{64}{Re} = \frac{64}{1042.94} = 0.061$$

Y, la pérdida de carga será:

[9] El valor de rugosidad absoluta del PVC fue obtenido de la tesis de maestría de Osorio Escamilla (2004) en la página 51.

$$h_L = f\frac{L}{D}\frac{V^2}{2g} = 0.061 \times \frac{1.5\,m \times \left(\frac{1.6667 \times 10^{-5}\frac{m^3}{s}}{\pi \times \frac{(0.0254\,m)^2}{4}}\right)^2}{0.0254\,m \times 2 \times 9.81\,m/s^2} \times \frac{9\,806.38\ \text{Pa}}{1\,mca} = \mathbf{1.95\ Pa}$$

$\underline{Q = 3\ l/min = 5 \times 10^{-5}\,m^3/s}$

$$\text{Re} = \frac{v.D}{\upsilon} = \frac{\frac{5 \times 10^{-5}\frac{m^3}{s}}{\pi \times \frac{(0.0254\,m)^2}{4}} \times 0.0254\,m}{8.0108 \times 10^{-7}\,m^2/s} = \mathbf{3128.75}$$

El flujo está en transición según su número de Reynolds y, por tanto, no se puede determinar el factor de fricción en el Diagrama de Moody ni la pérdida de carga.

$\underline{Q = 6\ l/min = 0.0001\ m^3/s}$

$$\text{Re} = \frac{v.D}{\upsilon} = \frac{\frac{0.0001\ \frac{m^3}{s}}{\pi \times \frac{(0.0254\,m)^2}{4}} \times 0.0254\,m}{8.0108 \times 10^{-7}\,m^2/s} = \mathbf{6257.5}$$

Según el Diagrama de Moody el factor de fricción es:

$$f = 0.035$$

Y, la pérdida de carga será:

$$h_L = f\frac{L}{D}\frac{V^2}{2g} = 0.035 \times \frac{1.5\,m \times \left(\frac{0.0001\ \frac{m^3}{s}}{\pi \times \frac{(0.0254\,m)^2}{4}}\right)^2}{0.0254\,m \times 2 \times 9.81\,m/s^2} \times \frac{9\,806.38\ \text{Pa}}{1\,mca} = \mathbf{40.24\ Pa}$$

5.6. Simulación en Simulink

1. Realizar una simulación en Simulink del experimento del número de Reynolds. Utilizar como datos conocidos los caudales medidos y calcular el número de Reynolds y la pérdida de carga.

2. ¿Coinciden las pérdidas de carga de la simulación con las halladas analíticamente? ¿Por qué?

5.6.1. Solucionario

En este apartado se mostrará la simulación que el alumno tendría que realizar, y se utilizarán los mismos datos que fueron usados en los cálculos analíticos. Para la simulación se usará el mismo esquema en Simulink que se puede observar en la figura 26 y las gráficas resultantes se muestran en la figura 47.

Como se puede observar en la figura 47, los caudales elegidos producen flujo laminar ($Re = 1043$), en transición ($Re = 3129$) y turbulento ($Re = 6257$). Además, la simulación ayuda a entender que para conseguir un flujo laminar en una tubería como la del módulo se deben utilizar caudales muy bajos (menores a 2 l/min).

5.7. Solucionario para el jefe laboratorio

Para este solucionario se ha preparado una interfaz utilizando el desarrollador Visual Basic en Microsoft Excel. En dicha interfaz el jefe de laboratorio ingresará los siguientes datos: diámetro de la tubería (en metros), caudal de flujo (en litros por minuto), viscosidad cinemática del fluido (en metros cuadrados sobre segundos), rugosidad absoluta del fluido (en milímetros) y la longitud de la tubería (en metros). Luego de dar clic en "CALCULAR", se mostrarán los siguientes resultados: velocidad (en metros por segundo), número de Reynolds (adimensional) y pérdida de carga en la tubería (en Pa). Esta interfaz facilitará la revisión de los informes de laboratorio debido a que está programada para obtener los resultados requeridos (ver figura 46).

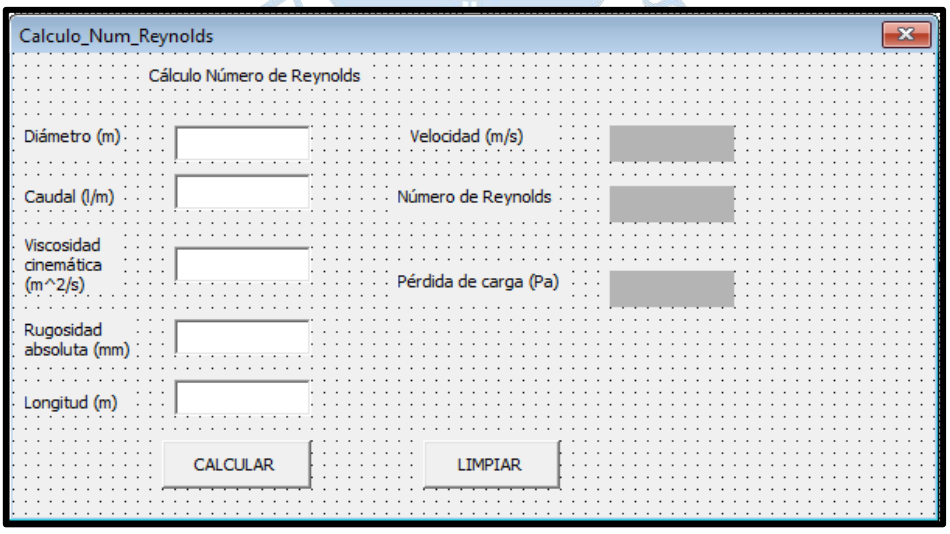


Figura 46. Interfaz en Visual Basic de Excel para laboratorio del número de Reynolds.
Fuente: Elaboración propia.

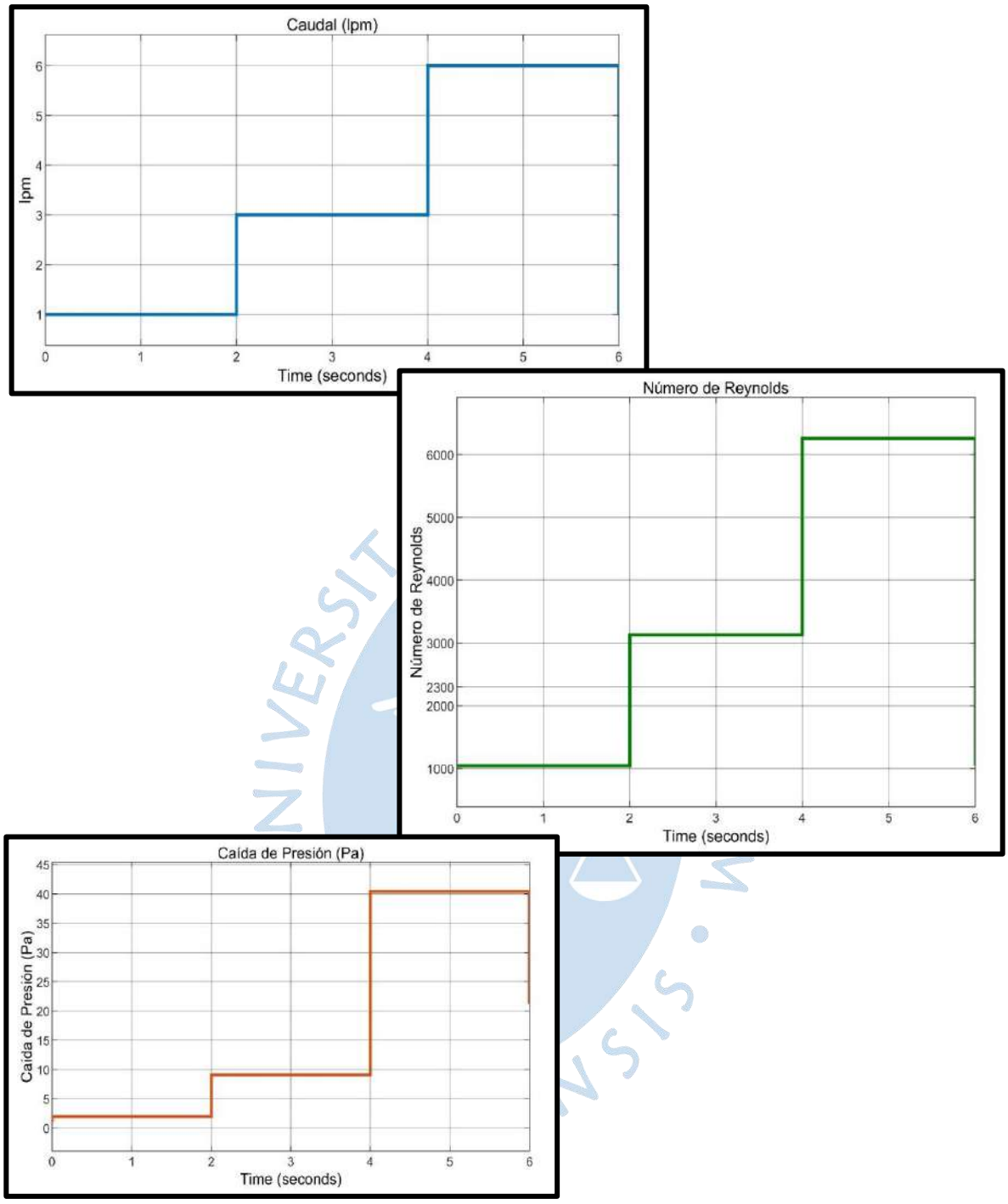


Figura 47. Resultados de simulación de tubería de 1 pulgada con caudales de 1, 3 y 6 l/min.

Fuente: Elaboración propia.

El código completo se encuentra disponible para el lector en el anexo 11 y se divide principalmente en dos: el correspondiente al botón calcular y al botón limpiar. El código de programación elaborado para obtener los resultados requeridos, en forma resumida es:

• **Opción "CALCULAR":** La primera sección es la correspondiente al código que se activará al presionar el botón CALCULAR de la figura 46; y, en la figura 48 se muestra el diagrama de flujo correspondiente a dicho código. En las primeras líneas del código se declaran todas las variables que se utilizarán en los cálculos posteriores mediante la función "Dim … As Double". Las variables serán del tipo Double para obtener la parte entera y parte decimal.

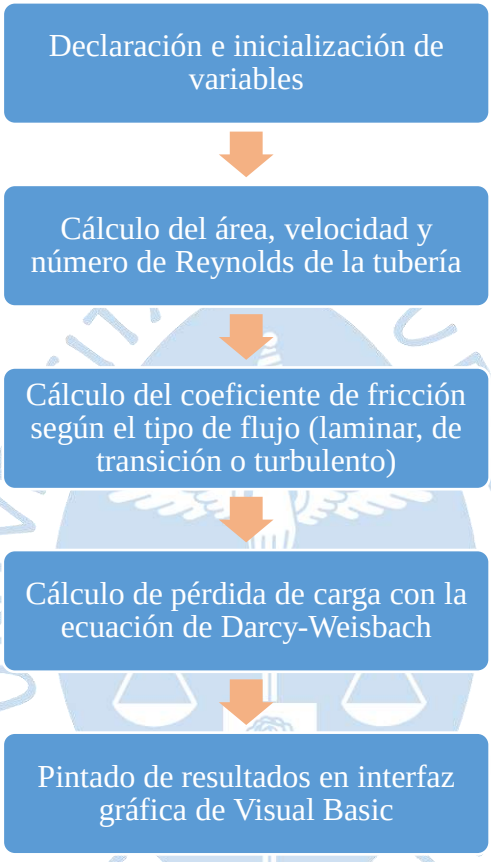


Figura 48. Diagrama de flujo del código de Visual Basic de Excel para laboratorio del número de Reynolds.
Fuente: Elaboración propia.

Luego, se inicializan las variables de entrada; es decir, se les asigna a las variables correspondientes los valores ingresados por el jefe de laboratorio en la interfaz. Lo anterior se lograr igualando la variable con el nombre correspondiente del recuadro donde se ingresan los datos. El nombre de los recuadros de entrada de datos se encuentra en sus propiedades como se observa en la figura 49.

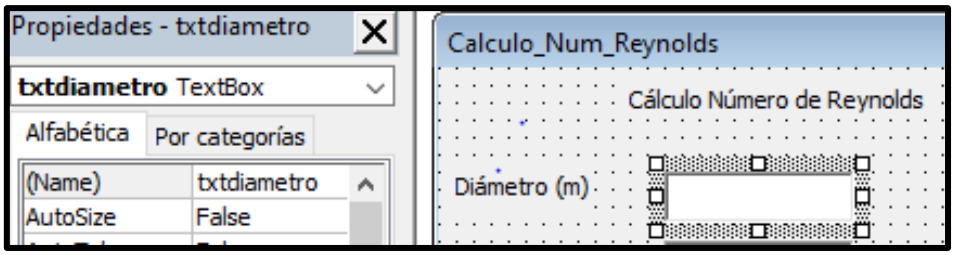


Figura 49. Nombre del recuadro de entrada de datos

Fuente: Elaboración propia.

Tras ingresar los datos se hará el cambio de unidades del caudal y la rugosidad absoluta debido a que en las operaciones se utilizarán el caudal en $\frac{m^3}{s}$ y la rugosidad absoluta en m. Luego se desarrolla el cálculo del área, velocidad y número de Reynolds.

Posteriormente, se procede a hallar el coeficiente de fricción para el cual se tienen diferentes fórmulas dependiendo del tipo de flujo (laminar, de transición o turbulento). Por esto, se utiliza la función condicional "If … Then", donde la condición es el número de Reynolds. Para el flujo laminar, el factor de fricción depende únicamente del número de Reynolds y se halla mediante la ecuación (2).

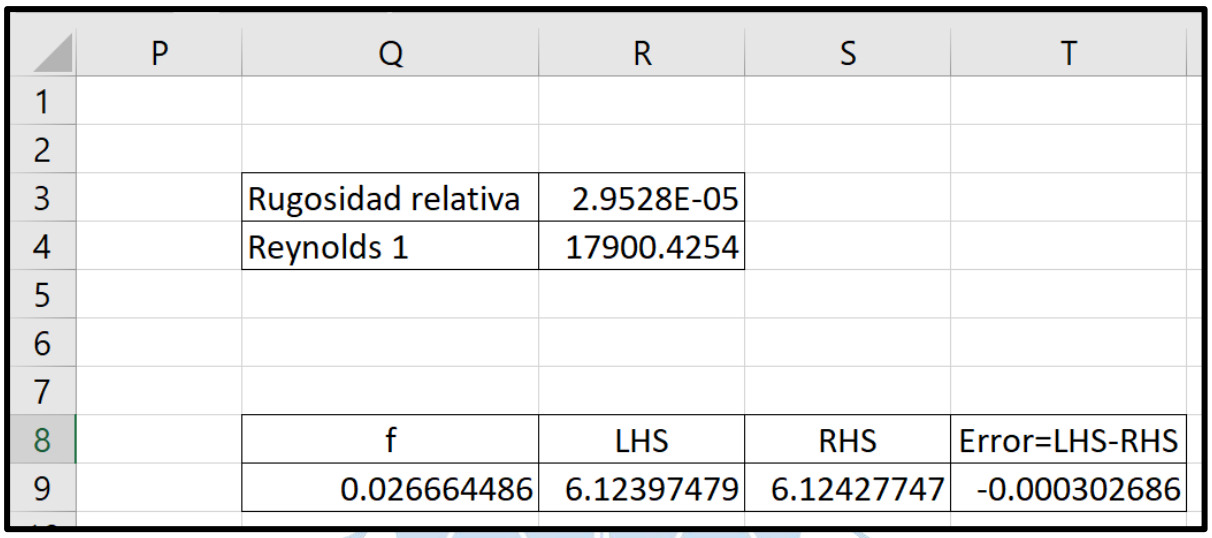
El factor de fricción para flujo en transición se calculará mediante una interpolación lineal como la usada por Martin-Dominguez, Ignacio (2006) en el paper Determination of the Darcy Pipe Flow Friction Factor as a Routine in Visual Basic for MS Excel. Los puntos utilizados para la interpolación serán el factor de fricción calculado con un Reynolds de 2300 (Coeffri2300) y con un Reynolds de 4000 (Coeffri4000).

El factor de fricción para el flujo turbulento se determina con la ecuación implícita de Colebrook-White (ecuación (3)) pues evita el uso de ecuaciones aproximadas. Ya que, según Anaya-Durand, A. I. (2014) todas las aproximaciones explícitas de dicha ecuación conllevan un error mayor a un 11%. La ecuación implícita se resolverá utilizando la función GoalSeek de Excel que simplificará el código al evitar la programación de algún método numérico.

La función GoalSeek se encargará de que la resta del lado izquierdo de la ecuación (LHS) y el lado derecho de la ecuación (RHS) de Colebrook-White (ecuación (3)) tienda a 0 a partir de

la modificación del factor de fricción (f). De esa forma, la función actúa como un método numérico que iterará hasta encontrar el factor de fricción que haga que la resta sea 0.

Debido a que en esta función necesita que todos los valores estén en celdas de una hoja de Excel, el código transfiere los datos de Visual Basic a una hoja de Excel, ejecuta la función y luego guarda el factor de fricción resultante en una variable (coef_friccion1). En la **figura 50** se pueden observar las celdas utilizadas para la función GoalSeek luego de haberse ejecutado el código.



	P	Q	R	S	T
1					
2					
3		Rugosidad relativa	2.9528E-05		
4		Reynolds 1	17900.4254		
5					
6					
7					
8		f	LHS	RHS	Error=LHS-RHS
9		0.026664486	6.12397479	6.12427747	-0.000302686

Figura 50. Celdas utilizadas para la función GoalSeek luego de ejecutar el código.
Fuente: Elaboración propia.

Para el cálculo de la pérdida de carga se utiliza la ecuación de Darcy-Weisbach y, posteriormente, se multiplica por un factor numérico para el cambio de unidades a Pascales

Finalmente, se le asigna el valor numérico correspondiente a cada recuadro designado para mostrar los resultados. Esto se realiza igualando el nombre del recuadro de salida y la variable que contiene el resultado numérico. El nombre del recuadro de salida se encuentra en sus propiedades como se aprecia en la figura 51.

- **Botón limpiar:** La segunda sección es la correspondiente al código que se activará al presionar el botón “LIMPIAR” que como su nombre lo dice cumplirá la función de limpiar o borrar los datos de entrada y los resultados de sus recuadros correspondientes ubicados en la interfaz. De tal modo, el jefe de laboratorio podrá ingresar nuevos datos de manera rápida.

Figura 51. Nombre de recuadro de salida.

Fuente: Elaboración propia.

En esta sección se utiliza la función *Clear* ("... = *Clear*") para limpiar los recuadros necesarios. Para utilizarla, todos los nombres de los recuadros de entrada y de salida se igualan a la palabra *Clear*.

En la figura 52 se muestran los resultados obtenidos mediante la interfaz en Excel utilizando los mismos datos que los usados en los cálculos analíticos.

5.8. Análisis de resultados

En el presente apartado se realizará una evaluación de la variación de los resultados analíticos y simulados respecto de los obtenidos mediante la interfaz en Excel. La comparativa se hará respecto a la interfaz en Excel debido a que es la que utilizará el jefe de laboratorio para corregir los resultados analíticos y simulados del alumno. Por tal motivo en la tabla 4 se puede observar el resumen de los resultados obtenidos previamente mediante los distintos métodos.

Tabla 4. Comparativa de resultados entre el método analítico, simulación y Excel.

		Número de Reynolds	Pérdida de carga (Pa)	Variación en pérdida de carga respecto de Excel Pa (%)
$\boldsymbol{Q = 1\ lpm}$	**Analítico**	1042.94	1.95	0.01 Pa (0.51%)
	Simulación	1042.92	1.95	0.01 Pa (0.51%)
	Excel	1042.92	1.96	0 Pa (0%)
$\boldsymbol{Q = 3\ lpm}$	**Analítico**	3128.75	Transición	Flujo en transición
	Simulación	3128.75	9.07	0.64 Pa (6.59%)
	Excel	3128.75	9.71	0 Pa (0%)
$\boldsymbol{Q = 6\ lpm}$	**Analítico**	6257.5	40.24	0.18 Pa (0.45%)
	Simulación	6257.5	40.45	0.03 Pa (0.07%)
	Excel	6257.5	40.42	0 Pa (0%)

Fuente: Elaboración propia.

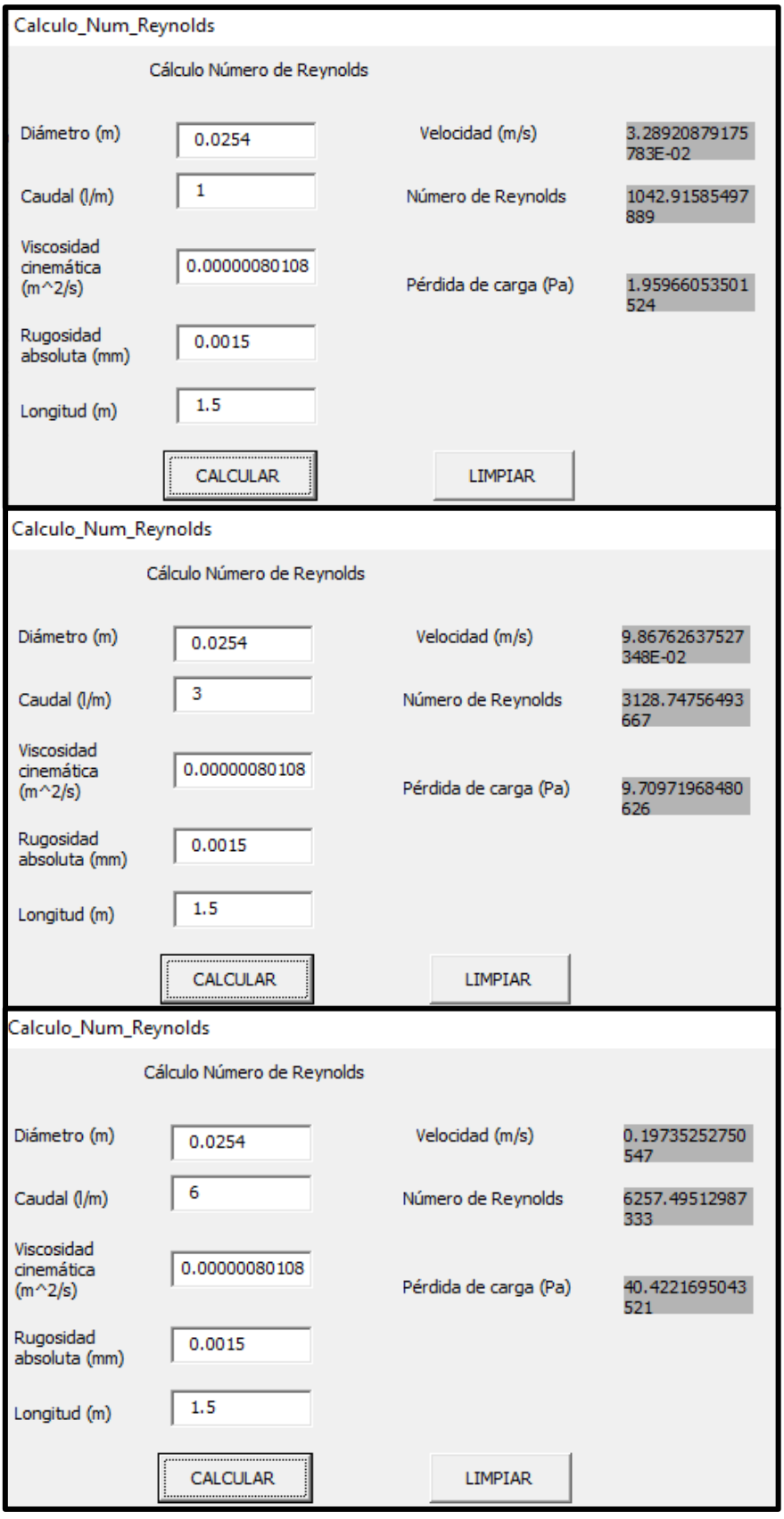


Figura 52. Resultados de la interfaz de Excel con caudales de 1, 3 y 6 l/min.

Fuente: Elaboración propia.

El número de Reynolds ha sido calculado de la misma manera en los tres métodos; es decir, los tres métodos han utilizado la misma ecuación y por tanto el resultado es el mismo en cada caso. De igual manera, la pérdida de carga calculada por los tres métodos es también muy parecida tanto en régimen laminar como en turbulento.

En régimen turbulento el factor de fricción es calculado mediante la ecuación de Colebrook-White en la interfaz de Excel y mediante el Diagrama de Moody en el método analítico. Así, la diferencia de un 0.45% entre las pérdidas de carga de ambos métodos se debe a que el Diagrama de Moody solo permite calcular los decimales del factor de fricción con exactitud hasta la cifra de las milésimas mientras que la ecuación de Colebrook-White proporciona mayor cantidad de decimales. Además, la tabla 4 permite inferir que la simulación en Simulink utiliza Colebrook-White o algún método similar en régimen turbulento debido a la similitud entre los resultados de la simulación y los obtenidos en Excel (variación entre pérdidas de carga de un 0.07%)

En flujo de transición el método analítico no es capaz de hallar un factor de fricción ni pérdida de carga. Por su parte, en flujo transicional la interfaz de Excel realiza una interpolación lineal, explicada en el apartado anterior, para hallar un factor de fricción y poder calcular de forma aproximada la pérdida de carga. Luego, al comparar los resultados de la simulación con los de Excel se observa que la diferencia entre sus pérdidas de carga es de un 6.59%; y, por lo tanto, es posible establecer que ambos métodos, a pesar de utilizar ecuaciones distintas, proporcionan resultados de pérdida de carga en flujo transicional muy similares.

Capítulo 6

Guía de laboratorio para el curso de Mecánica de Fluidos. Pérdidas de carga en tuberías.

6.1. Introducción

El presente laboratorio complementa, de manera práctica, los conocimientos sobre las pérdidas de carga en tuberías y la velocidad de flujo promedio. Los objetivos son:

- Desarrollar un análisis y cálculo de pérdida de carga y de la velocidad de flujo promedio en tuberías conectadas en serie.
- Desarrollar un análisis y cálculo de pérdida de carga y de la velocidad de flujo promedio en tuberías en paralelo.
- Analizar y comparar los resultados obtenidos de manera teórica y mediante la simulación para cada caso planteado.

6.2. Marco teórico

6.2.1. Pérdidas de carga en tuberías

La pérdida de carga o también llamada caída de presión en una tubería, hace referencia a la disminución de presión en un fluido debido a la fricción de las partículas del fluido entre sí y contra las paredes de la tubería de conducción, además por los accesorios que puedan modificar la energía del fluido.

Otra definición tomada por la pérdida de carga en tuberías es la diferencia de presión entre dos puntos, para un determinado caudal, durante la conducción de un fluido.

Los factores que influyen en la pérdida de carga en tuberías son:

- La sección de la tubería: Influye de manera inversamente proporcional, a menor sección, mayor pérdida de carga.

- La longitud de la tubería: Influye de manera directamente proporcional, a mayor longitud, mayor pérdida de carga.
- El caudal que circula por la tubería: Influye de manera directamente proporcional, a mayor caudal, mayor pérdida de carga.
- El tipo de material, su rugosidad: Influye de manera directamente proporcional, a mayor rugosidad del material, mayor pérdida de carga.
- El tipo de fluido: según el tipo de fluido, su densidad y su viscosidad se obtendrán valores distintos de pérdida de carga.

6.2.2. Tipos de pérdidas de carga en tuberías

Existen dos tipos de caídas de presión o pérdidas de carga en tuberías:

- **Pérdidas primarias:** Estas pérdidas son las que ocurren por la fricción, por el rozamiento del fluido con las tuberías; dependen de factores como la longitud y la rugosidad de la tubería y de la velocidad, viscosidad o densidad del fluido. Las pérdidas primarias son consideradas como las de mayor importancia, esto se demuestra cuantitativamente en las ecuaciones utilizadas para el cálculo de pérdidas.

Las pérdidas primarias son calculadas comúnmente para flujos laminares y turbulentos mediante la ecuación (26) de Darcy-Weisbach:

$$h_L = f\frac{L}{D}\frac{V^2}{2g} \tag{26}$$

Dónde:

f: coeficiente de fricción

L: longitud del tramo de tubería (m)

D: diámetro de tubería (m)

V: velocidad con la que fluye el flujo en la tubería (m/s)

g: aceleración de la gravedad (m/s^2)

Se debe tener en cuenta que el coeficiente de fricción es determinado en función al número de Reynolds ($\frac{\rho.v.D}{\mu}$) y la rugosidad relativa de la tubería ($\frac{\varepsilon}{D}$), como se observa en la ecuación *(27)*.

$$f = f\left(\frac{\rho . v . D}{\mu}, \frac{\boldsymbol{\varepsilon}}{D}\right) \quad (27)$$

• **Diagrama de Moody:** Este diagrama, es la expresión gráfica del factor de fricción para tuberías de distintos diámetros. Aquí, se observan todos los valores para determinarlo a partir del número de Reynolds y la rugosidad relativa de la tubería, como se aprecia en la figura 43.

.

• **Pérdidas secundarias:** Son las pérdidas debidas al cambio de movimiento que experimenta el fluido cuando varía de dirección, es decir, por la intervención de los accesorios, por ello se les conoce como pérdidas en accesorios, accidentales o singulares. Estas son el resultado de fenómenos de turbulencia ocasionados en puntos específicos de los sistemas de tuberías, que generalmente son válvulas, codos, cambios de dirección, juntas.

Las pérdidas secundarias son calculadas comúnmente en función de la altura cinética corregida mediante un coeficiente empírico K_s, como se observa en la ecuación (28).

$$h_s = K_s \frac{V^2}{2g} \quad (28)$$

Dónde:

K_s: Coeficiente adimensional, determinado de forma empírica para cada tipo de punto específico. Depende del tipo de singularidad de los puntos (accesorios).

V: velocidad con la que fluye el flujo en el accesorio (m/s)

g: aceleración de la gravedad (m/s^2)

6.2.3. Fórmulas para simplificación de cálculos

Existen distintos métodos que permiten simplificar los cálculos de la pérdida de carga a lo largo de tuberías. En este laboratorio se utilizará la ecuación de Darcy-Weisbach para el cálculo en tuberías en paralelo. Este método supondrá llevar a cabo un procedimiento iterativo para determinar los coeficientes de fricción.

1.1.1. Casos de tuberías conectadas en paralelo: Para casos de tuberías conectadas en paralelo se consideran las pérdidas de carga por fricción iguales debido a que en nuestro diseño

las distancias entre los puntos de inicio de las tuberías son pequeñas, al igual que las distancias entre los puntos de salida.

Se utilizan las fórmulas de Darcy-Weisbach, para hallar los coeficientes de relación de caudales mediante la ecuación (29), luego se obtienen los primeros valores de caudales supuestos mediante las ecuaciones *(30)*(*29*) y (31), y los números de Reynolds del fluido de cada una de las tuberías del sistema. Se establece como común a una de las tuberías, representando sus características con un subíndice "*j*" y las características de las demás tuberías se representarán con un subíndice "*i*".

$$K_{ij} = \left(\frac{f_j L_j}{f_i L_i}\right)^{0.5} \left(\frac{D_i}{D_j}\right)^{2.5} \tag{29}$$

$$Q_j = \frac{Q_0}{1 + \sum_{i=1}^{n} K_{ij}} \tag{30}$$

$$Q_i = K_{ij} Q_j \tag{31}$$

Dónde:

K_{ij}: Coeficiente que indica la relación entre los caudales de distintas tuberías.

Q_o: Caudal inicial del sistema de tuberías en paralelo. (kg/m^3)

Q_j: Caudal común de las tuberías en paralelo. (kg/m^3)

Q_i: Caudal de las tuberías en paralelo no seleccionadas como comunes. (kg/m^3)

f_i: Coeficiente de fricción.

L: Longitud de la tubería. (m)

D: Diámetro de la tubería por la cual circula el fluido. (m)

Al utilizar este método se debe tener en cuenta que para el proceso de iteración se suponen primero valores de coeficientes de fricción como si estuvieran en la zona de turbulencia completa, siguiendo la variante de la fórmula de Altshul mostrada en la ecuación (32):

$$f_i = 0.11 \left(\frac{\varepsilon}{D_i}\right)^{0.25} \tag{32}$$

Luego de realizar el proceso para hallar los primeros valores de los caudales de cada tubería se hace una segunda iteración donde se cambiará el valor de los coeficientes de fricción, los cuales seguirán la fórmula de Altshul pero ahora ya se tomará en cuenta el valor de Reynolds (Re), hallado con las ecuaciones (33) y (34):

$$Re_i = \frac{4\,Q_i}{\pi D_i v} = \frac{V_i \times D_i}{v} \tag{33}$$

$$f_i = 0.11\left(\frac{\varepsilon}{D_i} + \frac{68}{Re_i}\right)^{0.25} \tag{34}$$

Dónde:

V_i: Velocidad del fluido en su recorrido a través de las tuberías. (m/s)

Q_i: Caudal de cada tubería en paralelo. (kg/m^3)

f_i: Coeficiente de fricción rectificado.

ε: Coeficiente de rugosidad absoluta. (m)

v: Viscosidad del fluido. (m^2/s)

D: Diámetro de la tubería por la cual circula el fluido. (m)

Luego, se realiza el proceso anterior para hallar el caudal de cada tubería, los cuales serán muy similares a los primeros valores obtenidos, con lo que se puede dar por finalizada la iteración y los últimos resultados serían los correctos. Finalmente, para hallar la pérdida de carga en cada tubería se sigue la ecuación (35):

$$Pérdida\ carga\ i\ [Pa] = f_i \times \frac{L_i}{{D_i}^5} \times \frac{8\,{Q_i}^2}{g \times \pi^2} \tag{35}$$

6.2.4. Velocidad de flujo promedio

Si bien cada partícula del fluido cumple con las leyes de movimiento de Newton, las ecuaciones que se pueden llegar a plantear para describir el movimiento del fluido resultarían complejas. Por ello en la mayoría de casos prácticos, el comportamiento del fluido se puede representar mediante modelos ideales sencillos los cuales permiten un análisis detallado.

El concepto anterior se toma en cuenta en el cálculo de la velocidad de un fluido, en el cual se podría analizar dicho parámetro de cualquier partícula del fluido, sin embargo, se analiza la velocidad promedio de todas las partículas del fluido siempre y cuando se cumplan unas condiciones que nos permitan realizar cálculos sencillos, estas condiciones son:

- El flujo debe ser perpendicular al área.
- Velocidad del fluido debe ser uniforme.
- El área debe ser plana.

La velocidad promedio del flujo se determina con la ecuación (36):

$$Q = V.A \tag{36}$$

Dónde:

Q: Caudal, cantidad de fluido que circula a través de una tubería. (kg/m^3)

V: velocidad promedio con la que fluye el flujo en la tubería. (m/s)

A: Área o sección de la tubería por la cual circula el fluido. (m^2)

6.3. Tuberías conectadas en serie: Desarrollo del laboratorio

Para el experimento se utilizarán las siguientes partes del módulo:

- Bomba centrífuga
- Fluido de trabajo: agua
- Válvulas V1, V2, V3, V6 y V7
- Sensor de flujo Q1
- Sensores de presión P3 y P4

Las partes previamente mencionadas pueden ser identificadas en la figura 53. Además, antes del inicio del experimento se debe comprobar el correcto funcionamiento de los equipos y accesorios mencionados anteriormente.

El módulo a utilizar durante el desarrollo del presente laboratorio permite observar el flujo del fluido a través de dos tuberías, de diferente diámetro, conectadas en serie. El experimento se desarrolla de la siguiente manera:

1. Cerrar totalmente la válvula V2, V4, V5 y V6 y abrir completamente las válvulas V3 y V7. Esta disposición permitirá que el caudal total de la bomba circule por las tuberías conectadas en serie que se utilizarán para el análisis en este laboratorio.

2. Encender la bomba centrífuga, abrir levemente la válvula V1 y esperar a que el tramo de tuberías que se encuentran posterior a la V3 tenga agua circulando.

3. Ya con el flujo estable, se utilizará el sensor de flujo Q1 para obtener el dato del caudal de flujo que circulará por el sistema de tuberías conectadas en serie. Además, se utilizarán los sensores de presión P3 y P4 para medir la caída de presión a través del sistema de tuberías conectadas en serie.

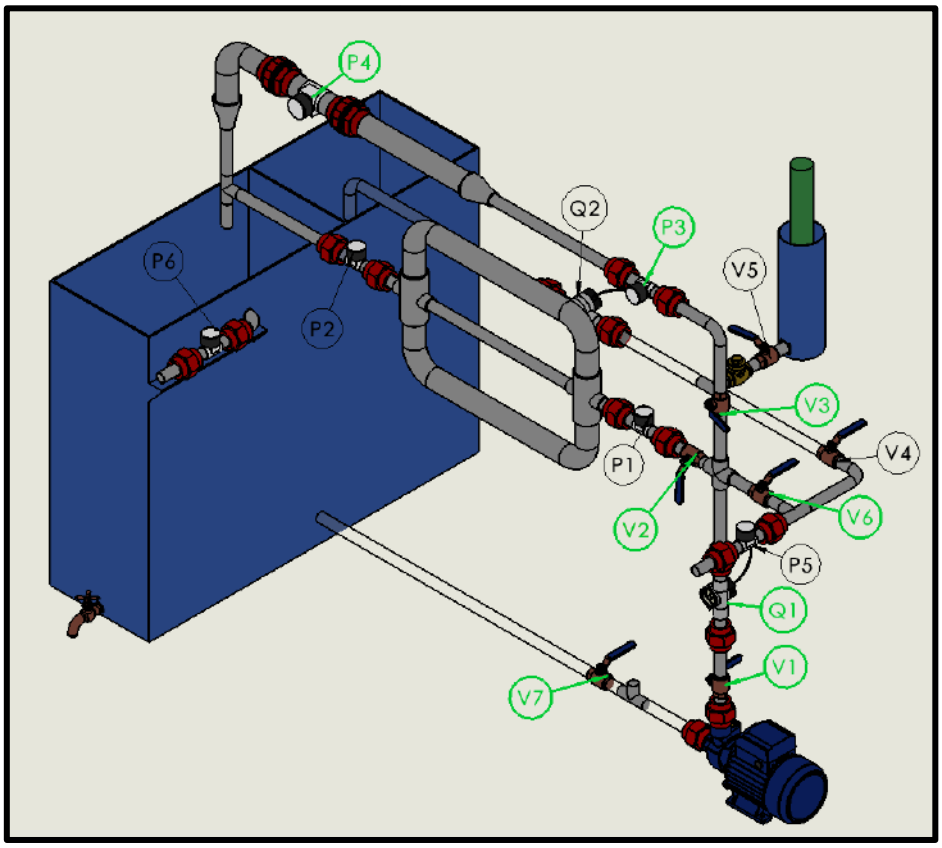


Figura 53. Módulo con elementos a utilizar en el laboratorio en serie.

Fuente: Elaboración propia.

4. Luego de haber obtenido los datos de una primera prueba, se manipulará de manera cuidadosa la válvula V1 para variar el caudal y obtener nuevos resultados, se recomienda hacer las pruebas para un caudal pequeño (con la válvula V1 mínimamente abierta), para un caudal medio (con la válvula V1 medianamente abierta) y para un caudal grande (con la válvula V1

mayormente abierta). Así, se podrán comparar diferentes casos con los diferentes métodos y se obtendrán mejores conclusiones a partir de ello.

Tabla 5. Datos del experimento de tuberías conectadas en serie.

Caudal	Presión a la entrada	Presión a la salida	Caída de Presión

Fuente: Elaboración propia.

Los datos recogidos de las pruebas de la práctica de laboratorio se deben colocar en la tabla 5.

6.4. Tuberías conectadas en paralelo: Desarrollo del laboratorio

Para el experimento se utilizarán las siguientes partes del módulo:

- Bomba centrífuga
- Fluido de trabajo: agua
- Válvulas V1, V2, V3, V6 y V7
- Sensor de flujo Q1
- Sensores de presión P1 y P2

Las partes previamente mencionadas pueden ser identificadas en la figura 54. Además, antes del inicio del experimento se debe comprobar el correcto funcionamiento de los equipos y accesorios mencionados anteriormente.

El módulo a utilizar durante el desarrollo del presente laboratorio permite observar el flujo del fluido a través de tres tuberías, de diferente diámetro, conectadas en paralelo. El experimento se desarrolla de la siguiente manera:

1. Cerrar totalmente la válvula V3, V4, V5 y V6 y abrir completamente las válvulas V2 y V7. Esta disposición permitirá que el caudal total de la bomba circule por las tuberías conectadas en paralelo que utilizaremos para el análisis en este laboratorio.

2. Encender la bomba centrífuga, abrir levemente la válvula V1 y esperar a que el tramo de tuberías que se encuentran posterior a la V2 tenga agua circulando.

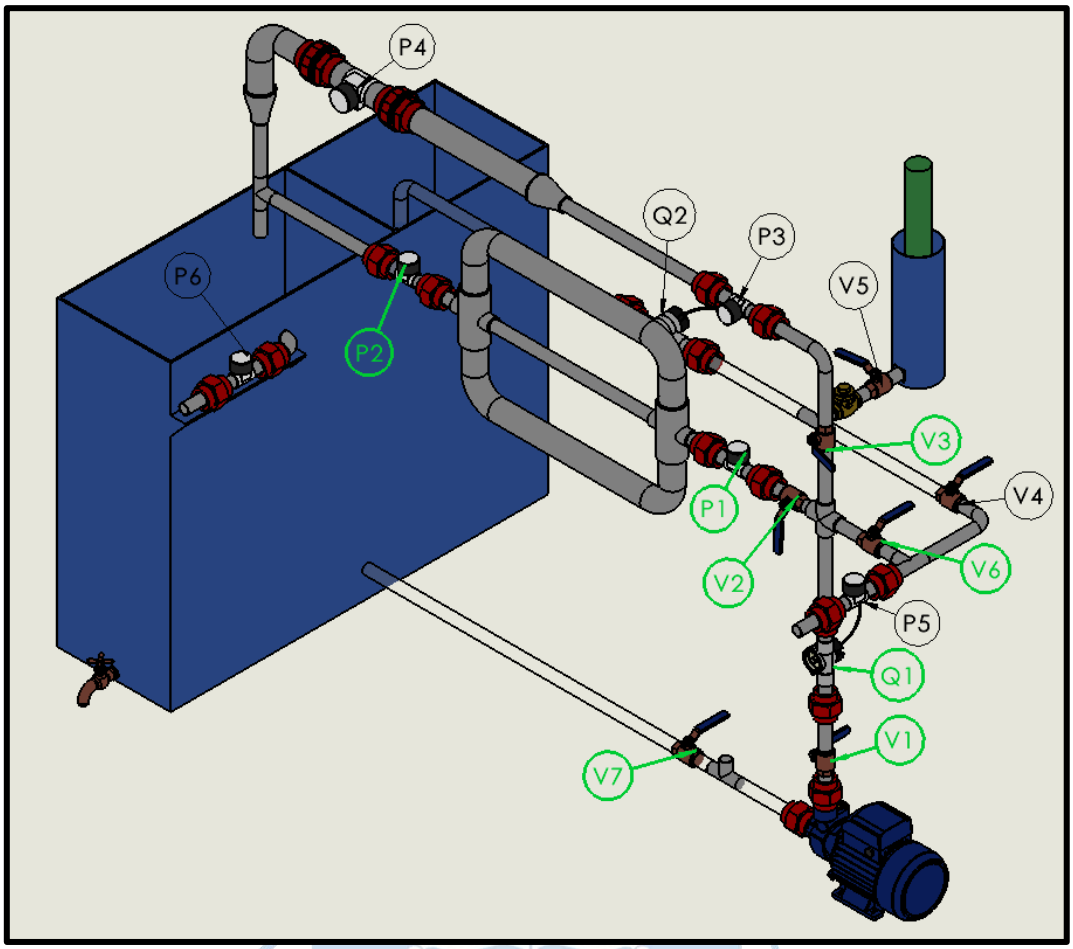


Figura 54. Módulo con elementos a utilizar en el laboratorio en paralelo.

Fuente: Elaboración propia.

3. Ya con el flujo estable, se utilizará el sensor de flujo Q1 para obtener el dato del caudal de flujo que circulará por el sistema de tuberías en paralelo. Además, se utilizarán los sensores de presión P1 y P2 para medir la caída de presión a través del sistema de tuberías en paralelo.

4. Luego de haber obtenido los datos de una primera prueba, se manipulará de manera cuidadosa la válvula V1 para variar el caudal y obtener nuevos resultados, se recomienda hacer las pruebas para un caudal pequeño (con la válvula V1 mínimamente abierta), para un caudal medio (con la válvula V1 medianamente abierta) y para un caudal grande (con la válvula V1 mayormente abierta), de esta manera se podrán comparar diferentes casos con los diferentes métodos y se obtendrán mejores conclusiones a partir de ello.

Los datos recogidos de las pruebas de la práctica de laboratorio se deben colocar en la tabla 6.

Tabla 6. Datos del experimento de tuberías en paralelo.

Caudal	Presión a la entrada	Presión a la salida	Caída de Presión

Fuente: Elaboración propia.

6.5. Cálculos y resultados

6.5.1. Cálculos y resultados: Tuberías conectadas en serie

1. Se pide al alumno realizar el cálculo analítico necesario para hallar las velocidades de flujo promedio de las tuberías ubicadas entre los sensores de presión P3 y P4.

2. Se pide al alumno realizar el cálculo analítico necesario para hallar la caída de presión por fricción en cada tramo (tubería) ubicado entre los sensores de presión P3 y P4, además de las pérdidas de carga por accesorios y las pérdidas totales.

3. Los datos necesarios para realizar el cálculo de velocidad promedio y de caída de presión son los siguientes:

$$L_1 = 1m$$
$$L_2 = 1m$$
$$D_1 = 0.0254m$$
$$D_2 = 0.0508m$$

Se pide explicar cada paso necesario para hallar la velocidad promedio y la caída de presión en los puntos previos. Además, resumir todos los resultados en la tabla 7.

Tabla 7. Datos obtenidos de cálculos analíticos de tuberías conectadas en serie.

Caudal	Velocidad 1	Velocidad 2	Caída de Presión

Fuente: Elaboración propia.

6.5.1.1. Solucionario

En este apartado se realizarán los cálculos analíticos que el alumno tendría que realizar en el laboratorio. Los datos a utilizar serán los más parecidos a los que se obtendrían experimentalmente.

Datos

- Tubería 1

$D = 0.0254\ m$

$L = 1\ m$

$Rugosidad\ absoluta = \varepsilon = 0.0015\ mm$

$Rugosidad\ relativa = \frac{\varepsilon}{D} = 5.91\ \times\ 10^{-5}$

- Tubería 2

$D = 0.0508\ m$

$L = 1\ m$

$Rugosidad\ absoluta = \varepsilon = 0.0015\ mm$

$Rugosidad\ relativa = \frac{\varepsilon}{D} = 2.95\ \times\ 10^{-5}$

- Fluido: agua

$Viscosidad\ cinemática\ =\ 8.0108\ \times\ 10^{-7}\ m^2/s$

$Caudales\ =\ 15, 45\ y\ 60\ l/min$

- Accesorios: Coeficientes

Cambio de sección de tubería = 0.46

$Q = 15\ l/min = 2.5\ \times\ 10^{-4}\ m^3/s$

Tubería 1

$$velocidad\ 1 = \frac{caudal}{área\ 1} = \frac{2.5\ \times\ 10^{-4}\ \frac{m^3}{s}}{\pi\ \times\ \frac{(0.0254\ m)^2}{4}} = 0.49338\ \frac{m}{s}$$

$$\text{Re } 1 = \frac{V.D}{\upsilon} = \frac{\dfrac{2.5 \times 10^{-4}\,\frac{m^3}{s}}{\pi \times \frac{(0.0254\,m)^2}{4}} \times 0.0254\,m}{8.0108 \times 10^{-7}\,m^2/s} = \mathbf{15643.74}$$

Según el Diagrama de Moody el factor de fricción es:

$$f = 0.031$$

Y, la pérdida de carga por fricción será:

$$h_L = f\frac{L}{D}\frac{V^2}{2g} = 0.031 \times \frac{1\,m \times \left(\dfrac{0.00025\,\frac{m^3}{s}}{\pi \times \frac{(0.0254\,m)^2}{4}}\right)^2}{0.0254\,m \times 2 \times 9.81\,m/s^2} \times \frac{9\,806.38\ \text{Pa}}{1\,mca} = \mathbf{148.49\ Pa}$$

<u>Tubería 2</u>

$$velocidad\ 2 = \frac{caudal}{área\ 2} = \frac{2.5 \times 10^{-4}\,\frac{m^3}{s}}{\pi \times \frac{(0.0508\,m)^2}{4}} = 0.1233\,\frac{m}{s}$$

$$\text{Re } 2 = \frac{V.D}{\upsilon} = \frac{\dfrac{2.5 \times 10^{-4}\,\frac{m^3}{s}}{\pi \times \frac{(0.0508\,m)^2}{4}} \times 0.0508\,m}{8.0108 \times 10^{-7}\,m^2/s} = \mathbf{7821.87}$$

Según el Diagrama de Moody el factor de fricción es:

$$f = 0.035$$

Y, la pérdida de carga por fricción será:

$$h_L = f\frac{L}{D}\frac{V^2}{2g} = 0.035 \times \frac{1\,m \times \left(\dfrac{0.00025\,\frac{m^3}{s}}{\pi \times \frac{(0.0508\,m)^2}{4}}\right)^2}{0.0508\,m \times 2 \times 9.81\,m/s^2} \times \frac{9\,806.38\ \text{Pa}}{1\,mca} = \mathbf{5.239\ Pa}$$

La pérdida de carga por accesorios será:

$$h_s = K_s\frac{V^2}{2g}$$

$$h_s = 0.46 \frac{\left(0.49338 \frac{m}{s}\right)^2}{2 \times 9.81 \frac{m}{s^2}} \times \frac{9\,806.38 \text{ Pa}}{1\, mca} = \mathbf{55.967\ Pa}$$

Por lo tanto, el total de las pérdidas será:

$$Pérdidas\ de\ carga\ totales = \mathbf{148.49\ Pa} + \mathbf{5.239\ Pa} + \mathbf{55.967\ Pa} = \mathbf{209.696\ Pa}$$

$Q = 45\ l/min = 7.5 \times 10^{-4}\ m^3/s$

Tubería 1

$$velocidad\ 1 = \frac{caudal}{área\ 1} = \frac{7.5 \times 10^{-4} \frac{m^3}{s}}{\pi \times \frac{(0.0254\ m)^2}{4}} = 1.48 \frac{m}{s}$$

$$\text{Re 1} = \frac{\text{V.D}}{\upsilon} = \frac{\frac{7.5 \times 10^{-4} \frac{m^3}{s}}{\pi \times \frac{(0.0254\ m)^2}{4}} \times 0.0254\ m}{8.0108 \times 10^{-7}\ m^2/s} = \mathbf{46931.22}$$

Según el Diagrama de Moody el factor de fricción es:

$$f = 0.022$$

Y, la pérdida de carga por fricción será:

$$h_L = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} = 0.022 \times \frac{1\ m \times \left(\frac{0.00075 \frac{m^3}{s}}{\pi \times \frac{(0.0254\ m)^2}{4}}\right)^2}{0.0254\ m \times 2 \times 9.81\ m/s^2} \times \frac{9\,806.38 \text{ Pa}}{1\, mca} = \mathbf{948.432\ Pa}$$

Tubería 2

$$velocidad\ 2 = \frac{caudal}{área\ 2} = \frac{7.5 \times 10^{-4} \frac{m^3}{s}}{\pi \times \frac{(0.0508\ m)^2}{4}} = 0.3699 \frac{m}{s}$$

$$\text{Re } 2 = \frac{\text{V.D}}{\upsilon} = \frac{\dfrac{7.5 \times 10^{-4}\,\frac{m^3}{s}}{\pi \times \frac{(0.0508\,m)^2}{4}} \times 0.0508\,m}{8.0108 \times 10^{-7}\,m^2/s} = \mathbf{23456.983}$$

Según el Diagrama de Moody el factor de fricción es:

$$f = 0.03$$

Y, la pérdida de carga por fricción será:

$$h_L = f\frac{L}{D}\frac{V^2}{2g} = 0.03 \times \frac{1\,m \times \left(\dfrac{0.00075\,\frac{m^3}{s}}{\pi \times \frac{(0.0508\,m)^2}{4}}\right)^2}{0.0508\,m \times 2 \times 9.81\,m/s^2} \times \frac{9\,806.38\ \text{Pa}}{1\,mca} = \mathbf{40.386\ Pa}$$

La pérdida de carga por accesorios será:

$$h_s = K_s\frac{V^2}{2g}$$

$$h_s = 0.46\frac{\left(1.48\,\frac{m}{s}\right)^2}{2 \times 9.81\,\frac{m}{s^2}} \times \frac{9\,806.38\ \text{Pa}}{1\,mca} = \mathbf{503.606\ Pa}$$

Por lo tanto, el total de las pérdidas será:

$$Pérd.de\ carga\ totales = \mathbf{948.432Pa} + \mathbf{40.386Pa} + \mathbf{503.606Pa} = \mathbf{1492.424Pa}$$

$\underline{Q = 60\ l/min = 1 \times 10^{-3}\ m^3/s}$

Tubería 1

$$velocidad\ 1 = \frac{caudal}{área\ 1} = \frac{1 \times 10^{-3}\,\frac{m^3}{s}}{\pi \times \frac{(0.0254\,m)^2}{4}} = 1.9735\,\frac{m}{s}$$

$$\text{Re } 1 = \frac{\text{V.D}}{\upsilon} = \frac{\dfrac{1 \times 10^{-3}\,\frac{m^3}{s}}{\pi \times \frac{(0.0254\,m)^2}{4}} \times 0.0254\,m}{8.0108 \times 10^{-7}\,m^2/s} = \mathbf{62574.95}$$

Según el Diagrama de Moody el factor de fricción es:

$$f = 0.0205$$

Y, la pérdida de carga por fricción será:

$$h_L = f\frac{L}{D}\frac{V^2}{2g} = 0.0205 \times \frac{1\,m \times \left(\frac{0.001\,\frac{m^3}{s}}{\pi \times \frac{(0.0254\,m)^2}{4}}\right)^2}{0.0254\,m \times 2 \times 9.81\,m/s^2} \times \frac{9\,806.38\,\text{Pa}}{1\,mca} = \mathbf{1571.14\,Pa}$$

Tubería 2

$$velocidad\ 2 = \frac{caudal}{área\ 2} = \frac{1 \times 10^{-3}\,\frac{m^3}{s}}{\pi \times \frac{(0.0508\,m)^2}{4}} = 0.4934\,\frac{m}{s}$$

$$\text{Re } 2 = \frac{V.D}{\upsilon} = \frac{\frac{1 \times 10^{-3}\,\frac{m^3}{s}}{\pi \times \frac{(0.0508\,m)^2}{4}} \times 0.0508\,m}{8.0108 \times 10^{-7}\,m^2/s} = \mathbf{31287.47}$$

Según el Diagrama de Moody el factor de fricción es:

$$f = 0.023$$

Y, la pérdida de carga por fricción será:

$$h_L = f\frac{L}{D}\frac{V^2}{2g} = 0.023 \times \frac{1\,m \times \left(\frac{0.001\,\frac{m^3}{s}}{\pi \times \frac{(0.0508\,m)^2}{4}}\right)^2}{0.0508\,m \times 2 \times 9.81\,m/s^2} \times \frac{9\,806.38\,\text{Pa}}{1\,mca} = \mathbf{55.08\,Pa}$$

La pérdida de carga por accesorios será:

$$h_s = K_s\frac{V^2}{2g}$$

$$h_s = 0.46\frac{\left(1.9735\,\frac{m}{s}\right)^2}{2 \times 9.81\,\frac{m}{s^2}} \times \frac{9\,806.38\,\text{Pa}}{1\,mca} = \mathbf{895.45\,Pa}$$

Por lo tanto, el total de las pérdidas será:

$$Pérd.de\ carga\ totales = \mathbf{1571.14Pa} + \mathbf{55.08Pa} + \mathbf{895.45Pa} = \mathbf{2521.67Pa}$$

6.5.2. Cálculos y resultados: Tuberías conectadas en paralelo

1. Se pide al alumno realizar el cálculo analítico necesario para hallar las velocidades de flujo promedio de las tuberías ubicadas entre los sensores de presión P1 y P2.

2. Se pide al alumno realizar el cálculo analítico necesario para hallar la caída de presión por fricción en cada tramo (tubería) ubicado entre los sensores de presión P1 y P2, además de las pérdidas de carga por accesorios y las pérdidas totales.

3. Los datos necesarios para realizar el cálculo de velocidad promedio y de caída de presión son los siguientes:

$$L_1 = 1.3\,m$$
$$L_2 = 1\,m$$
$$L_3 = 1.3\,m$$
$$D_1 = 0.0508\,m$$
$$D_2 = 0.0254\,m$$
$$D_3 = 0.0508\,m$$
$$K_s = 0.57$$

El valor de K_s es obtenido mediante la fórmula $K_s = 30 f_T$ utilizada por Matlab donde f_T es el factor de fricción el cual se halla en la tabla 8. Para este caso, debido a que el diámetro de los codos utilizados es de 2 pulgadas, el valor de f_T será igual a 0.019.

Tabla 8. Coeficientes representativos de resistencia (K) para válvulas y accesorios.

"K" FACTOR TABLE — SHEET 1 of 4

Representative Resistance Coefficients (K) for Valves and Fittings

("K" is based on use of schedule pipe as listed on page 2-10)

PIPE FRICTION DATA FOR CLEAN COMMERCIAL STEEL PIPE WITH FLOW IN ZONE OF COMPLETE TURBULENCE

Nominal Size	mm	15	20	25	32	40	50	65, 80	100	125	150	200, 250	300-400	450-600
	in.	½	¾	1	1¼	1½	2	2½, 3	4	5	6	8, 10	12-16	18-24
Friction Factor (f_T)		.027	.025	.023	.022	.021	.019	.018	.017	.016	.015	.014	.013	.012

Fuente: Crane Co. (1982) en *Appendix* A-26.

Se pide explicar cada paso necesario para hallar la velocidad promedio y la caída de presión, además de resumir todos los resultados en la tabla 9 y la tabla 10.

Tabla 9. Datos de velocidad obtenidos de cálculos analíticos de tuberías en paralelo.

Prueba	Caudal Inicial	Velocidad 1	Velocidad 2	Velocidad 3
1				
2				
3				

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 10. Datos de caudal y caída de presión obtenidos de cálculos analíticos de tuberías en paralelo.

Prueba	Caudal Inicial	Caudal 1	Caudal 2	Caudal 3	Caída de Presión
1					
2					
3					

Fuente: Elaboración propia.

6.5.2.1. Solucionario

En este apartado se realizarán los cálculos analíticos que el alumno tendría que desarrollar en el laboratorio. Los datos a utilizar serán similares a los que se obtendrían experimentalmente.

Datos

- Ramal superior – Tubería 1 (Elevación = 0.15 m)

$D = 0.0508\ m$

$L = 1.3\ m$

$Rugosidad\ absoluta = \varepsilon = 0.0015\ mm$

$Rugosidad\ relativa = \frac{\varepsilon}{D} = 2.95\ \times\ 10^{-5}$

- Ramal medio – Tubería 2 (Elevación = 0 m)

$D = 0.0254\ m$

$L = 1\ m$

$Rugosidad\ absoluta = \varepsilon = 0.0015\ mm$

$Rugosidad\ relativa = \frac{\varepsilon}{D} = 5.91\ \times\ 10^{-5}$

• Ramal inferior – Tubería 3 (Elevación = -0.15 m)

$D = 0.0508\ m$

$L = 1.3\ m$

$Rugosidad\ absoluta = \varepsilon = 0.0015\ mm$

$Rugosidad\ relativa = \frac{\varepsilon}{D} = 2.95\ \times\ 10^{-5}$

• Codo 90°

$D = 0.0508\ m$

$Tipo = Smoothly\ curved$

• Fluido: agua

$Viscosidad\ cinemática\ =\ 8.0108\ \times\ 10^{-7}\ m^2/s$

$Rugosidad\ absoluta\ de\ las\ tuberías = \varepsilon = 0.0015\ mm$

$Caudales\ = 15, 45\ y\ 60\ l/min$

Para el análisis de un sistema de tuberías conectadas se considera que las caídas de presión son iguales en cada una de las tuberías debido a que en el diseño las distancias de elevación entre tuberías son pequeñas. Por ello, se recomienda utilizar el método de Darcy-Weisbach.

$Q = 15\ l/min = 2.5\ \times\ 10^{-4}\ m^3/s$

En este método iterativo se suponen los primeros valores de coeficientes de fricción como si estuvieran en la zona de turbulencia completa.

Primera iteración:

$$f_i = 0.11\left(\frac{\varepsilon}{D_i}\right)^{0.25}$$

$$f_1 = 0.11(2.95\ \times\ 10^{-5})^{0.25} = 8.107\ \times\ 10^{-3}$$

$$f_2 = 0.11(5.91\ \times\ 10^{-5})^{0.25} = 9.645\ \times\ 10^{-3}$$

$$f_3 = 0.11(2.95\ \times\ 10^{-5})^{0.25} = 8.107\ \times\ 10^{-3}$$

$$K_{ij} = \left(\frac{f_j L_j}{f_i L_i}\right)^{0.5}\left(\frac{D_i}{D_j}\right)^{2.5}$$

$$K_{12} = \left(\frac{9.645 \times 10^{-3} \times 1\,m}{8.107 \times 10^{-3} \times 1.3\,m}\right)^{0.5} \left(\frac{0.0508\,m}{0.0254\,m}\right)^{2.5} = 5.41$$

$$K_{32} = \left(\frac{9.645 \times 10^{-3} \times 1\,m}{8.107 \times 10^{-3} \times 1.3\,m}\right)^{0.5} \left(\frac{0.0508\,m}{0.0254\,m}\right)^{2.5} = 5.41$$

$$Q_j = \frac{Q_0}{1 + \sum_{i=1}^{n} K_{ij}}$$

$$Q_2 = \frac{2.5 \times 10^{-4}\ \frac{m^3}{s}}{1 + 5.41 + 5.41} = 2.11 \times 10^{-5}\ \frac{m^3}{s}$$

$$Q_i = K_{ij} Q_j$$

$$Q_1 = K_{12} Q_2 = 5.41 \times 2.11 \times 10^{-5} \frac{m^3}{s} = 1.14 \times 10^{-5}\ \frac{m^3}{s}$$

$$Q_3 = K_{32} Q_2 = 5.41 \times 2.11 \times 10^{-5} \frac{m^3}{s} = 1.14 \times 10^{-5}\ \frac{m^3}{s}$$

$$Re_i = \frac{4\,Q_i}{\pi D_i v}$$

$$Re_1 = \frac{4 \times 1.14 \times 10^{-5}\ \frac{m^3}{s}}{\pi \times 0.0508\,m \times 8.0108 \times 10^{-7}\ m^2/s} = 356.67$$

$$Re_2 = \frac{4 \times 2.11 \times 10^{-5}\ \frac{m^3}{s}}{\pi \times 0.0254\,m \times 8.0108 \times 10^{-7}\ m^2/s} = 1320.33$$

$$Re_3 = \frac{4 \times 1.14 \times 10^{-5}\ \frac{m^3}{s}}{\pi \times 0.0508\,m \times 8.0108 \times 10^{-7}\ m^2/s} = 356.67$$

Segunda iteración:

$$f_i = 0.11\left(\frac{\varepsilon}{D_i} + \frac{68}{Re_i}\right)^{0.25}$$

$$f_1 = 0.11\left(2.95 \times 10^{-5} + \frac{68}{356.67}\right)^{0.25} = \mathbf{0.0727}$$

$$f_2 = 0.11\left(5.91 \times 10^{-5} + \frac{68}{1320.33}\right)^{0.25} = \mathbf{0.0524}$$

$$f_3 = 0.11\left(2.95 \times 10^{-5} + \frac{68}{356.67}\right)^{0.25} = \mathbf{0.0727}$$

$$K_{12} = \left(\frac{0.0524 \times 1\,m}{0.0727 \times 1.3\,m}\right)^{0.5}\left(\frac{0.0508\,m}{0.0254\,m}\right)^{2.5} = \mathbf{4.21}$$

$$K_{32} = \left(\frac{0.0524 \times 1\,m}{0.0727 \times 1.3\,m}\right)^{0.5}\left(\frac{0.0508\,m}{0.0254\,m}\right)^{2.5} = \mathbf{4.21}$$

$$Q_2 = \frac{2.5 \times 10^{-4}\ \frac{m^3}{s}}{1 + 4.21 + 4.21} = 2.65 \times 10^{-5}\ \frac{m^3}{s} = \mathbf{1.59}\ \frac{\boldsymbol{l}}{\boldsymbol{min}}$$

$$Q_1 = 4.21 \times 2.65 \times 10^{-5}\frac{m^3}{s} = 1.11 \times 10^{-4}\ \frac{m^3}{s} = \mathbf{6.66}\frac{\boldsymbol{l}}{\boldsymbol{min}}$$

$$Q_3 = 4.21 \times 2.65 \times 10^{-5}\frac{m^3}{s} = 1.11 \times 10^{-4}\ \frac{m^3}{s} = \mathbf{6.66}\frac{\boldsymbol{l}}{\boldsymbol{min}}$$

$$Re_1 = \frac{4 \times 1.11 \times 10^{-4}\ \frac{m^3}{s}}{\pi \times 0.0508\,m \times 8.0108 \times 10^{-7}\,m^2/s} = 3472.91$$

$$Re_2 = \frac{4 \times 2.65 \times 10^{-5}\ \frac{m^3}{s}}{\pi \times 0.0254\,m \times 8.0108 \times 10^{-7}\,m^2/s} = 1658.23$$

$$Re_3 = \frac{4 \times 1.14 \times 10^{-5}\ \frac{m^3}{s}}{\pi \times 0.0508\,m \times 8.0108 \times 10^{-7}\,m^2/s} = 3472.91$$

Tercera iteración:

$$f_1 = 0.11\left(2.95 \times 10^{-5} + \frac{68}{3472.91}\right)^{0.25} = \mathbf{0.0412}$$

$$f_2 = 0.11\left(5.91 \times 10^{-5} + \frac{68}{1658.23}\right)^{0.25} = \mathbf{0.0495}$$

$$f_3 = 0.11\left(2.95 \times 10^{-5} + \frac{68}{3472.91}\right)^{0.25} = \mathbf{0.0412}$$

$$K_{12} = \left(\frac{0.0495 \times 1\,m}{0.0412 \times 1.3\,m}\right)^{0.5}\left(\frac{0.0508\,m}{0.0254\,m}\right)^{2.5} = \mathbf{5.438}$$

$$K_{32} = \left(\frac{0.0495 \times 1\,m}{0.0412 \times 1.3\,m}\right)^{0.5}\left(\frac{0.0508\,m}{0.0254\,m}\right)^{2.5} = \mathbf{5.438}$$

$$Q_2 = \frac{2.5 \times 10^{-4}\ \frac{m^3}{s}}{1 + 5.438 + 5.438} = 2.105 \times 10^{-5}\ \frac{m^3}{s} = \mathbf{1.263}\frac{\boldsymbol{l}}{\boldsymbol{min}}$$

$$Q_1 = 5.438 \times 2.105 \times 10^{-5} \frac{m^3}{s} = 1.145 \times 10^{-4} \frac{m^3}{s} = \mathbf{6.87} \frac{\boldsymbol{l}}{\boldsymbol{min}}$$

$$Q_3 = 5.438 \times 2.105 \times 10^{-5} \frac{m^3}{s} = 1.145 \times 10^{-4} \frac{m^3}{s} = \mathbf{6.87} \frac{\boldsymbol{l}}{\boldsymbol{min}}$$

$$Re_1 = \frac{4 \times 1.145 \times 10^{-4} \frac{m^3}{s}}{\pi \times 0.0508\, m \times 8.0108 \times 10^{-7}\, m^2/s} = 3582.41$$

$$Re_2 = \frac{4 \times 2.105 \times 10^{-5} \frac{m^3}{s}}{\pi \times 0.0254\, m \times 8.0108 \times 10^{-7}\, m^2/s} = 1317.20$$

$$Re_3 = \frac{4 \times 1.145 \times 10^{-4} \frac{m^3}{s}}{\pi \times 0.0508\, m \times 8.0108 \times 10^{-7}\, m^2/s} = 3582.41$$

Cuarta iteración:

$$f_1 = 0.11\left(2.95 \times 10^{-5} + \frac{68}{3582.41}\right)^{0.25} = \mathbf{0.0408}$$

$$f_2 = 0.11\left(5.91 \times 10^{-5} + \frac{68}{1317.20}\right)^{0.25} = \mathbf{0.0525}$$

$$f_3 = 0.11\left(2.95 \times 10^{-5} + \frac{68}{3582.41}\right)^{0.25} = \mathbf{0.0408}$$

$$K_{12} = \left(\frac{0.0525 \times 1\, m}{0.0408 \times 1.3\, m}\right)^{0.5} \left(\frac{0.0508\, m}{0.0254\, m}\right)^{2.5} = \mathbf{5.628}$$

$$K_{32} = \left(\frac{0.0525 \times 1\, m}{0.0408 \times 1.3\, m}\right)^{0.5} \left(\frac{0.0508\, m}{0.0254\, m}\right)^{2.5} = \mathbf{5.628}$$

$$Q_2 = \frac{2.5 \times 10^{-4} \frac{m^3}{s}}{1 + 5.628 + 5.628} = 2.041 \times 10^{-5} \frac{m^3}{s} = \mathbf{1.224} \frac{\boldsymbol{l}}{\boldsymbol{min}}$$

$$Q_1 = 5.628 \times 2.041 \times 10^{-5} \frac{m^3}{s} = 1.148 \times 10^{-4} \frac{m^3}{s} = \mathbf{6.888} \frac{\boldsymbol{l}}{\boldsymbol{min}}$$

$$Q_3 = 5.628 \times 2.04 \times 10^{-5} \frac{m^3}{s} = 1.148 \times 10^{-4} \frac{m^3}{s} = \mathbf{6.888} \frac{\boldsymbol{l}}{\boldsymbol{min}}$$

$$Re_1 = \frac{4 \times 1.148 \times 10^{-4} \frac{m^3}{s}}{\pi \times 0.0508\, m \times 8.0108 \times 10^{-7}\, m^2/s} = 3591.8$$

$$Re_2 = \frac{4 \times 2.041 \times 10^{-5}\ \frac{m^3}{s}}{\pi \times 0.0254\,m \times 8.0108 \times 10^{-7}\ m^2/s} = 1295.53$$

$$Re_3 = \frac{4 \times 1.148 \times 10^{-4}\ \frac{m^3}{s}}{\pi \times 0.0508\,m \times 8.0108 \times 10^{-7}\ m^2/s} = 3591.8$$

Quinta iteración:

$$f_1 = 0.11\left(2.95 \times 10^{-5} + \frac{68}{3591.8}\right)^{0.25} = \mathbf{0.04081}$$

$$f_2 = 0.11\left(5.91 \times 10^{-5} + \frac{68}{1295.53}\right)^{0.25} = \mathbf{0.0526}$$

$$f_3 = 0.11\left(2.95 \times 10^{-5} + \frac{68}{3591.8}\right)^{0.25} = \mathbf{0.04081}$$

Se detienen las iteraciones debido a que se cumple que la diferencia entre factores de fricción es menor igual a 0.0001.

$$P.carga\ por\ accesorios = \ h_s = K_s\frac{V^2}{2g} = K_s\frac{\left(\frac{Q}{\frac{\pi D^2}{4}}\right)^2}{2g} = \ K_s\frac{\frac{8Q^2}{\pi^2 D^4}}{g}$$

$$Pérdida\ carga\ i = \ f_i \times \frac{L_i}{{D_i}^5} \times \frac{8\ {Q_i}^2}{g \times \pi^2} + \ K_s\frac{\frac{8Q^2}{\pi^2 D^4}}{g}$$

$$P.carga = 0.04081 \times \frac{1.3m}{(0.0508m)^5} \times \frac{8\left(1.148 \times 10^{-4}\ \frac{m^3}{s}\right)^2}{9.81\ \frac{m}{s^2} \times \pi^2} \times \frac{9\,806.38\ \text{Pa}}{1\ mca}$$

$$+\ 2 \times 0.57 \times \frac{\frac{8\left(1.148 \times 10^{-4}\ \frac{m^3}{s}\right)^2}{\pi^2(0.0508m)^4}}{9.81\ \frac{m}{s^2}} \times \frac{9\,806.38\ \text{Pa}}{1\ mca}$$

$$\boldsymbol{P.carga = 1.6746\ Pa + 1.8274\ Pa = 3.502\ Pa}$$

$\underline{Q = 45\ l/min = 7.5\ \times\ 10^{-4}\ m^3/s}$

En este método iterativo se suponen los primeros valores de coeficientes de fricción como si estuvieran en la zona de turbulencia completa.

Primera iteración:

$$f_i = 0.11\left(\frac{\varepsilon}{D_i}\right)^{0.25}$$

$$f_1 = 0.11(2.95\ \times\ 10^{-5})^{0.25} = 8.107\ \times\ 10^{-3}$$

$$f_2 = 0.11(5.91\ \times\ 10^{-5})^{0.25} = 9.645\ \times\ 10^{-3}$$

$$f_3 = 0.11(2.95\ \times\ 10^{-5})^{0.25} = 8.107\ \times\ 10^{-3}$$

$$K_{ij} = \left(\frac{f_j L_j}{f_i L_i}\right)^{0.5}\left(\frac{D_i}{D_j}\right)^{2.5}$$

$$K_{12} = \left(\frac{9.645\ \times\ 10^{-3} \times\ 1\ m}{8.107\ \times\ 10^{-3}\ \times\ 1.3\ m}\right)^{0.5}\left(\frac{0.0508\ m}{0.0254\ m}\right)^{2.5} = 5.41$$

$$K_{32} = \left(\frac{9.645\ \times\ 10^{-3} \times\ 1\ m}{8.107\ \times\ 10^{-3}\ \times\ 1.3\ m}\right)^{0.5}\left(\frac{0.0508\ m}{0.0254\ m}\right)^{2.5} = 5.41$$

$$Q_j = \frac{Q_0}{1 + \sum_{i=1}^{n} K_{ij}}$$

$$Q_2 = \frac{7.5\ \times\ 10^{-4}\ \frac{m^3}{s}}{1 + 5.41 + 5.41} = 6.345\ \times\ 10^{-5}\ \frac{m^3}{s}$$

$$Q_i = K_{ij} Q_j$$

$$Q_1 = K_{12} Q_2 = 5.41\ \times\ 6.345\ \times\ 10^{-5}\frac{m^3}{s} = 3.43 \times\ 10^{-4}\ \frac{m^3}{s}$$

$$Q_3 = K_{32} Q_2 = 5.41\ \times\ 6.345\ \times\ 10^{-5}\frac{m^3}{s} = 3.43 \times\ 10^{-4}\ \frac{m^3}{s}$$

$$Re_i = \frac{4\ Q_i}{\pi D_i v}$$

$$Re_1 = \frac{4\ \times\ 3.43 \times\ 10^{-4}\ \frac{m^3}{s}}{\pi\ \times\ 0.0508\ m\ \times\ 8.0108\ \times\ 10^{-7}\ m^2/s} = 10731.6$$

$$Re_2 = \frac{4 \times 6.345 \times 10^{-5}\ \frac{m^3}{s}}{\pi \times 0.0254\,m \times 8.0108 \times 10^{-7}\,m^2/s} = 3970.38$$

$$Re_3 = \frac{4 \times 3.43 \times 10^{-4}\ \frac{m^3}{s}}{\pi \times 0.0508\,m \times 8.0108 \times 10^{-7}\,m^2/s} = 10731.6$$

Segunda iteración:

$$f_i = 0.11\left(\frac{\varepsilon}{D_i} + \frac{68}{Re_i}\right)^{0.25}$$

$$f_1 = 0.11\left(2.95 \times 10^{-5} + \frac{68}{10731.6}\right)^{0.25} = \mathbf{0.031}$$

$$f_2 = 0.11\left(5.91 \times 10^{-5} + \frac{68}{3970.38}\right)^{0.25} = \mathbf{0.0398}$$

$$f_3 = 0.11\left(2.95 \times 10^{-5} + \frac{68}{10731.6}\right)^{0.25} = \mathbf{0.031}$$

$$K_{12} = \left(\frac{0.0398 \times 1\,m}{0.031 \times 1.3\,m}\right)^{0.5}\left(\frac{0.0508\,m}{0.0254\,m}\right)^{2.5} = \mathbf{5.62}$$

$$K_{32} = \left(\frac{0.0398 \times 1\,m}{0.031 \times 1.3\,m}\right)^{0.5}\left(\frac{0.0508\,m}{0.0254\,m}\right)^{2.5} = \mathbf{5.62}$$

$$Q_2 = \frac{7.5 \times 10^{-4}\ \frac{m^3}{s}}{1 + 5.62 + 5.62} = 6.127 \times 10^{-5}\ \frac{m^3}{s} = \mathbf{3.68}\ \frac{\boldsymbol{l}}{\boldsymbol{min}}$$

$$Q_1 = 5.62 \times 6.127 \times 10^{-5}\frac{m^3}{s} = 3.44 \times 10^{-4}\ \frac{m^3}{s} = \mathbf{20.64}\frac{\boldsymbol{l}}{\boldsymbol{min}}$$

$$Q_3 = 5.62 \times 6.127 \times 10^{-5}\frac{m^3}{s} = 3.44 \times 10^{-4}\ \frac{m^3}{s} = \mathbf{20.64}\frac{\boldsymbol{l}}{\boldsymbol{min}}$$

$$Re_1 = \frac{4 \times 3.44 \times 10^{-4}\ \frac{m^3}{s}}{\pi \times 0.0508\,m \times 8.0108 \times 10^{-7}\,m^2/s} = 10762.89$$

$$Re_2 = \frac{4 \times 6.127 \times 10^{-5}\ \frac{m^3}{s}}{\pi \times 0.0254\,m \times 8.0108 \times 10^{-7}\,m^2/s} = 3833.97$$

$$Re_3 = \frac{4 \times 3.44 \times 10^{-4}\ \frac{m^3}{s}}{\pi \times 0.0508\,m \times 8.0108 \times 10^{-7}\,m^2/s} = 10762.89$$

Tercera iteración:

$$f_1 = 0.11\left(2.95\ \times\ 10^{-5} + \frac{68}{10762.89}\right)^{0.25} = \mathbf{0.031}$$

$$f_2 = 0.11\left(5.91\ \times\ 10^{-5} + \frac{68}{3833.97}\right)^{0.25} = \mathbf{0.0401}$$

$$f_3 = 0.11\left(2.95\ \times\ 10^{-5} + \frac{68}{10762.89}\right)^{0.25} = \mathbf{0.031}$$

$$K_{12} = \left(\frac{0.0401\ \times\ 1\,m}{0.031\ \times\ 1.3\,m}\right)^{0.5}\left(\frac{0.0508\,m}{0.0254\,m}\right)^{2.5} = \mathbf{5.63}$$

$$K_{32} = \left(\frac{0.0401\ \times\ 1\,m}{0.031\ \times\ 1.3\,m}\right)^{0.5}\left(\frac{0.0508\,m}{0.0254\,m}\right)^{2.5} = \mathbf{5.63}$$

$$Q_2 = \frac{7.5\ \times\ 10^{-4}\ \frac{m^3}{s}}{1 + \ 5.63 + 5.63} = 6.12\ \times\ 10^{-5}\frac{m^3}{s} = \mathbf{3.672}\frac{\boldsymbol{l}}{\boldsymbol{min}}$$

$$Q_1 = 5.63\ \times\ 6.12\ \times\ 10^{-5}\frac{m^3}{s} = 3.44 \times\ 10^{-4}\ \frac{m^3}{s} = \mathbf{20.64}\frac{\boldsymbol{l}}{\boldsymbol{min}}$$

$$Q_3 = 5.63\ \times\ 6.12\ \times\ 10^{-5}\frac{m^3}{s} = 3.44 \times\ 10^{-4}\ \frac{m^3}{s} = \mathbf{20.64}\frac{\boldsymbol{l}}{\boldsymbol{min}}$$

$$Re_1 = \frac{4\ \times\ 3.44 \times\ 10^{-4}\ \frac{m^3}{s}}{\pi\ \times\ 0.0508\,m\ \times\ 8.0108\ \times\ 10^{-7}\ m^2/s} = 10762.89$$

$$Re_2 = \frac{4\ \times\ 6.12 \times\ 10^{-5}\ \frac{m^3}{s}}{\pi\ \times\ 0.0254\,m\ \times\times\ 8.0108\ \times\ 10^{-7}\ m^2/s} = 3829.6$$

$$Re_3 = \frac{4\ \times 3.44\ \times\ 10^{-4}\ \frac{m^3}{s}}{\pi\ \times\ 0.0508\,m\ \times\ 8.0108\ \times\ 10^{-7}\ m^2/s} = 10762.89$$

Cuarta iteración:

$$f_1 = 0.11\left(2.95\ \times\ 10^{-5} + \frac{68}{10762.89}\right)^{0.25} = \mathbf{0.031}$$

$$f_2 = 0.11\left(5.91\ \times\ 10^{-5} + \frac{68}{3829.6}\right)^{0.25} = \mathbf{0.04018}$$

$$f_3 = 0.11\left(2.95\ \times\ 10^{-5} + \frac{68}{10762.89}\right)^{0.25} = \mathbf{0.031}$$

Se detienen las iteraciones debido a que se cumple que la diferencia entre factores de fricción es menor igual a 0.0001.

$$P.carga\ por\ accesorios = \ h_s = K_s\frac{V^2}{2g} = K_s\frac{\left(\frac{Q}{\frac{\pi D^2}{4}}\right)^2}{2g} = \ K_s\frac{\frac{8Q^2}{\pi^2 D^4}}{g}$$

$$Pérdida\ carga\ i = \ f_i \times \frac{L_i}{{D_i}^5} \times \frac{8\ {Q_i}^2}{g \times \pi^2} + \ K_s\frac{\frac{8Q^2}{\pi^2 D^4}}{g}$$

$$P.carga = 0.031 \times \frac{1.3m}{(0.0508m)^5} \times \frac{8\left(3.44 \times 10^{-4}\ \frac{m^3}{s}\right)^2}{9.81\ \frac{m}{s^2} \times \pi^2} \times \frac{9\ 806.38\ \text{Pa}}{1\ mca}$$

$$+\ 2 \times 0.57 \times \frac{\frac{8\left(3.44 \times 10^{-4}\ \frac{m^3}{s}\right)^2}{\pi^2(0.0508m)^4}}{9.81\ \frac{m}{s^2}} \times \frac{9\ 806.38\ \text{Pa}}{1\ mca}$$

$$\boldsymbol{P.carga = 11.422\ Pa + 16.413\ Pa = 27.835\ Pa}$$

$\underline{Q = 60\ l/min = 1 \times 10^{-3}\ m^3/s}$

En este método iterativo se suponen los primeros valores de coeficientes de fricción como si estuvieran en la zona de turbulencia completa.

Primera iteración:

$$f_i = 0.11\left(\frac{\varepsilon}{D_i}\right)^{0.25}$$

$$f_1 = 0.11(2.95 \times 10^{-5})^{0.25} = 8.107 \times 10^{-3}$$

$$f_2 = 0.11(5.91 \times 10^{-5})^{0.25} = 9.645 \times 10^{-3}$$

$$f_3 = 0.11(2.95 \times 10^{-5})^{0.25} = 8.107 \times 10^{-3}$$

$$K_{ij} = \left(\frac{f_j L_j}{f_i L_i}\right)^{0.5}\left(\frac{D_i}{D_j}\right)^{2.5}$$

$$K_{12} = \left(\frac{9.645 \times 10^{-3} \times 1\,m}{8.107 \times 10^{-3} \times 1.3\,m}\right)^{0.5} \left(\frac{0.0508\,m}{0.0254\,m}\right)^{2.5} = 5.41$$

$$K_{32} = \left(\frac{9.645 \times 10^{-3} \times 1\,m}{8.107 \times 10^{-3} \times 1.3\,m}\right)^{0.5} \left(\frac{0.0508\,m}{0.0254\,m}\right)^{2.5} = 5.41$$

$$Q_j = \frac{Q_0}{1 + \sum_{i=1}^{n} K_{ij}}$$

$$Q_2 = \frac{1 \times 10^{-3}\ \frac{m^3}{s}}{1 + 5.41 + 5.41} = 8.46 \times 10^{-5}\ \frac{m^3}{s}$$

$$Q_i = K_{ij} Q_j$$

$$Q_1 = K_{12} Q_2 = 5.41 \times 8.46 \times 10^{-5} \frac{m^3}{s} = 4.57 \times 10^{-4}\ \frac{m^3}{s}$$

$$Q_3 = K_{32} Q_2 = 5.41 \times 8.46 \times 10^{-5} \frac{m^3}{s} = 4.57 \times 10^{-4}\ \frac{m^3}{s}$$

$$Re_i = \frac{4\,Q_i}{\pi D_i v}$$

$$Re_1 = \frac{4 \times 4.57 \times 10^{-4}\ \frac{m^3}{s}}{\pi \times 0.0508\,m \times 8.0108 \times 10^{-7}\ m^2/s} = 14298.37$$

$$Re_2 = \frac{4 \times 8.46 \times 10^{-5}\ \frac{m^3}{s}}{\pi \times 0.0254\,m \times 8.0108 \times 10^{-7}\ m^2/s} = 5293.84$$

$$Re_3 = \frac{4 \times 4.57 \times 10^{-4}\ \frac{m^3}{s}}{\pi \times 0.0508\,m \times 8.0108 \times 10^{-7}\ m^2/s} = 14298.37$$

Segunda iteración:

$$f_i = 0.11\left(\frac{\varepsilon}{D_i} + \frac{68}{Re_i}\right)^{0.25}$$

$$f_1 = 0.11\left(2.95 \times 10^{-5} + \frac{68}{14298.37}\right)^{0.25} = \mathbf{0.0289}$$

$$f_2 = 0.11\left(5.91 \times 10^{-5} + \frac{68}{5293.84}\right)^{0.25} = \mathbf{0.0371}$$

$$f_3 = 0.11\left(2.95 \times 10^{-5} + \frac{68}{14298.37}\right)^{0.25} = \mathbf{0.0289}$$

$$K_{12} = \left(\frac{0.0371 \times 1\,m}{0.0289 \times 1.3\,m}\right)^{0.5}\left(\frac{0.0508\,m}{0.0254\,m}\right)^{2.5} = \mathbf{5.621}$$

$$K_{32} = \left(\frac{0.0371 \times 1\,m}{0.0289 \times 1.3\,m}\right)^{0.5}\left(\frac{0.0508\,m}{0.0254\,m}\right)^{2.5} = \mathbf{5.621}$$

$$Q_2 = \frac{1 \times 10^{-3}\,\frac{m^3}{s}}{1 + 5.621 + 5.621} = 8.168 \times 10^{-5}\,\frac{m^3}{s} = \mathbf{4.9}\,\frac{\boldsymbol{l}}{\boldsymbol{min}}$$

$$Q_1 = 5.621 \times 8.168 \times 10^{-5}\frac{m^3}{s} = 4.59 \times 10^{-4}\,\frac{m^3}{s} = \mathbf{27.54}\,\frac{\boldsymbol{l}}{\boldsymbol{min}}$$

$$Q_3 = 5.621 \times 8.168 \times 10^{-5}\frac{m^3}{s} = 4.59 \times 10^{-4}\,\frac{m^3}{s} = \mathbf{27.54}\,\frac{\boldsymbol{l}}{\boldsymbol{min}}$$

$$Re_1 = \frac{4 \times 4.59 \times 10^{-4}\,\frac{m^3}{s}}{\pi \times 0.0508\,m \times 8.0108 \times 10^{-7}\,m^2/s} = 14360.95$$

$$Re_2 = \frac{4 \times 8.168 \times 10^{-5}\,\frac{m^3}{s}}{\pi \times 0.0254\,m \times 8.0108 \times 10^{-7}\,m^2/s} = 5111.12$$

$$Re_3 = \frac{4 \times 4.59 \times 10^{-4}\,\frac{m^3}{s}}{\pi \times 0.0508\,m \times 8.0108 \times 10^{-7}\,m^2/s} = 14360.95$$

Tercera iteración:

$$f_1 = 0.11\left(2.95 \times 10^{-5} + \frac{68}{14360.95}\right)^{0.25} = \mathbf{0.0289}$$

$$f_2 = 0.11\left(5.91 \times 10^{-5} + \frac{68}{5111.12}\right)^{0.25} = \mathbf{0.0374}$$

$$f_3 = 0.11\left(2.95 \times 10^{-5} + \frac{68}{14360.95}\right)^{0.25} = \mathbf{0.0289}$$

$$K_{12} = \left(\frac{0.0374 \times 1\,m}{0.0289 \times 1.3\,m}\right)^{0.5}\left(\frac{0.0508\,m}{0.0254\,m}\right)^{2.5} = \mathbf{5.64}$$

$$K_{32} = \left(\frac{0.0374 \times 1\,m}{0.0289 \times 1.3\,m}\right)^{0.5}\left(\frac{0.0508\,m}{0.0254\,m}\right)^{2.5} = \mathbf{5.64}$$

$$Q_2 = \frac{1 \times 10^{-3}\,\frac{m^3}{s}}{1 + 5.64 + 5.64} = 8.14 \times 10^{-5}\,\frac{m^3}{s} = \mathbf{4.884}\,\frac{\boldsymbol{l}}{\boldsymbol{min}}$$

$$Q_1 = 5.64 \times 8.14 \times 10^{-5}\frac{m^3}{s} = 4.59 \times 10^{-4}\,\frac{m^3}{s} = \mathbf{27.54}\,\frac{\boldsymbol{l}}{\boldsymbol{min}}$$

$$Q_3 = 5.64 \times 8.14 \times 10^{-5}\frac{m^3}{s} = 4.59 \times 10^{-4}\ \frac{m^3}{s} = \mathbf{27.54}\frac{\boldsymbol{l}}{\boldsymbol{min}}$$

$$Re_1 = \frac{4 \times 4.59 \times 10^{-4}\ \frac{m^3}{s}}{\pi \times 0.0508\,m \times 8.0108 \times 10^{-7}\,m^2/s} = 14360.95$$

$$Re_2 = \frac{4 \times 8.14 \times 10^{-5}\ \frac{m^3}{s}}{\pi \times 0.0254\,m \times 8.0108 \times 10^{-7}\,m^2/s} = 5093.6$$

$$Re_3 = \frac{4 \times 4.59 \times 10^{-4}\ \frac{m^3}{s}}{\pi \times 0.0508\,m \times 8.0108 \times 10^{-7}\,m^2/s} = 14360.95$$

Cuarta iteración:

$$f_1 = 0.11\left(2.95 \times 10^{-5} + \frac{68}{14360.95}\right)^{0.25} = \mathbf{0.0289}$$

$$f_2 = 0.11\left(5.91 \times 10^{-5} + \frac{68}{5093.6}\right)^{0.25} = \mathbf{0.03743}$$

$$f_3 = 0.11\left(2.95 \times 10^{-5} + \frac{68}{14360.95}\right)^{0.25} = \mathbf{0.0289}$$

Se detienen las iteraciones debido a que se cumple que la diferencia entre factores de fricción es menor igual a 0.0001.

$$P.carga\ por\ accesorios = h_s = K_s\frac{V^2}{2g} = K_s\frac{\left(\frac{Q}{\frac{\pi D^2}{4}}\right)^2}{2g} = K_s\frac{\frac{8Q^2}{\pi^2 D^4}}{g}$$

$$Pérdida\ carga\ i = f_i \times \frac{L_i}{{D_i}^5} \times \frac{8\,{Q_i}^2}{g \times \pi^2} + K_s\frac{\frac{8Q^2}{\pi^2 D^4}}{g}$$

$$P.carga = 0.0289 \times \frac{1.3m}{(0.0508m)^5} \times \frac{8\left(4.59 \times 10^{-4}\ \frac{m^3}{s}\right)^2}{9.81\ \frac{m}{s^2} \times \pi^2} \times \frac{9\,806.38\ \text{Pa}}{1\ mca}$$

$$+\ 2 \times 0.57 \times \frac{\frac{8\left(4.59 \times 10^{-4}\ \frac{m^3}{s}\right)^2}{\pi^2(0.0508m)^4}}{9.81\ \frac{m}{s^2}} \times \frac{9\,806.38\ \text{Pa}}{1\ mca}$$

$$\boldsymbol{P.carga = 18.96\ Pa + 29.22\ Pa = 48.18\ Pa}$$

6.6. Simulación en Simulink

1. Realizar una simulación en Simulink del experimento de tuberías conectadas en serie. Utilizar como datos conocidos los caudales medidos y calcular el número de Reynolds, velocidades y la pérdida de carga en las tuberías y el accesorio.

2. Realizar una simulación en Simulink del experimento de tuberías en paralelo. Utilizar como datos conocidos los caudales medidos y calcular el caudal en cada ramal y la pérdida de carga.

3. ¿Coinciden las pérdidas de carga en cada simulación con las halladas analíticamente? ¿Por qué?

6.6.1. Solucionario

En este apartado se mostrará las simulaciones que el alumno tendría que realizar y se utilizarán los datos de los cálculos analíticos. Para la simulación de las tuberías conectadas en serie se usará el esquema de la figura 32 y las gráficas resultantes se muestran en la figura 55.

En la figura 55, se observa que la simulación utiliza valores de caudal que podrían obtenerse de la regulación del caudal de la bomba centrífuga mediante válvulas. Además, la gráfica muestra que el caudal se mantiene constante en las tuberías conectadas en serie; y, en la gráfica de velocidades se visualiza su variación en función del diámetro.

Para la simulación de las tuberías conectadas en paralelo se usará como referencia el esquema en Simulink que se puede observar en la figura 37 y las gráficas resultantes se muestran en la figura 56.

.

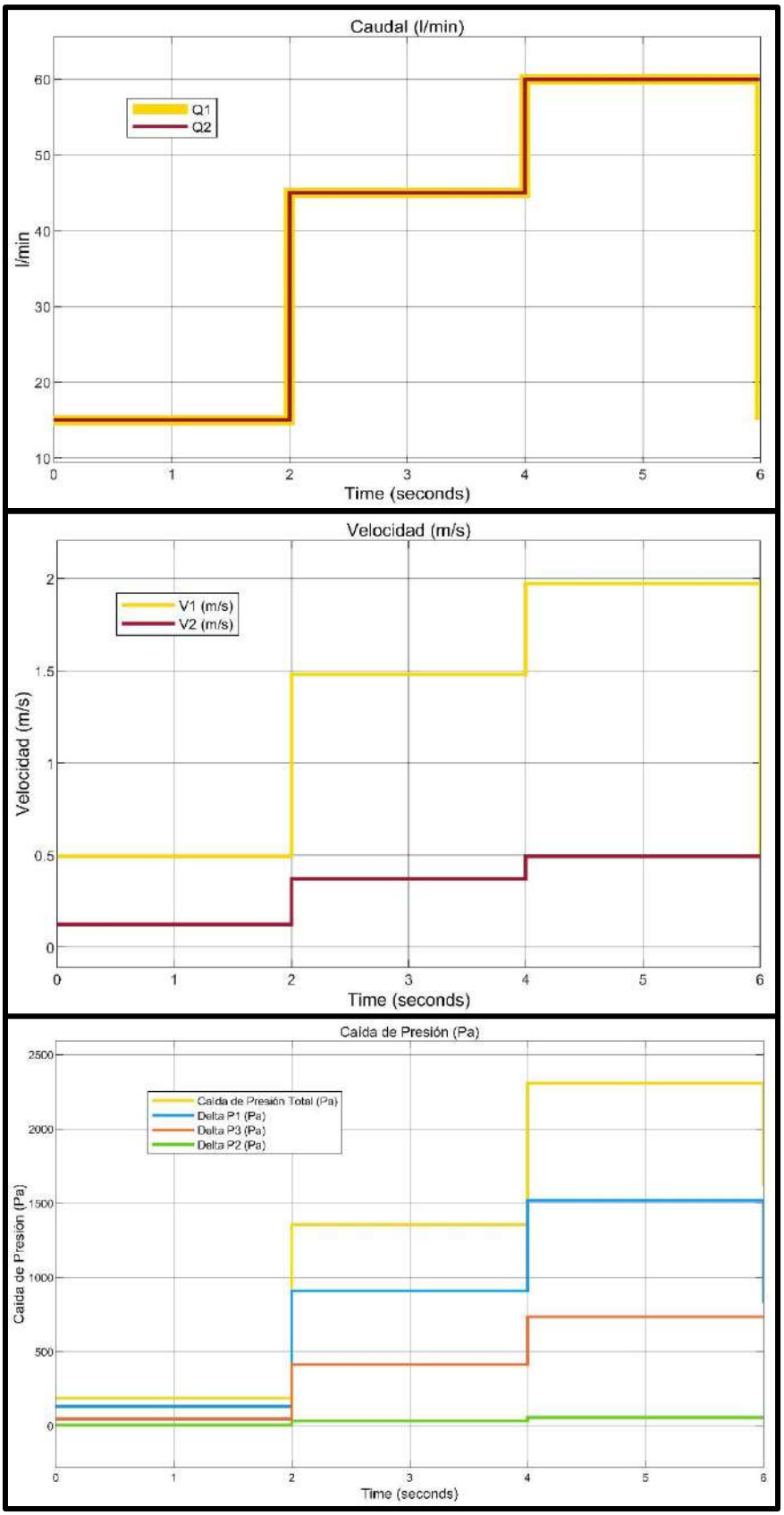


Figura 55. Resultados de tuberías conectadas en serie con caudales de 15, 45 y 60 l/min.

Fuente: Elaboración propia.

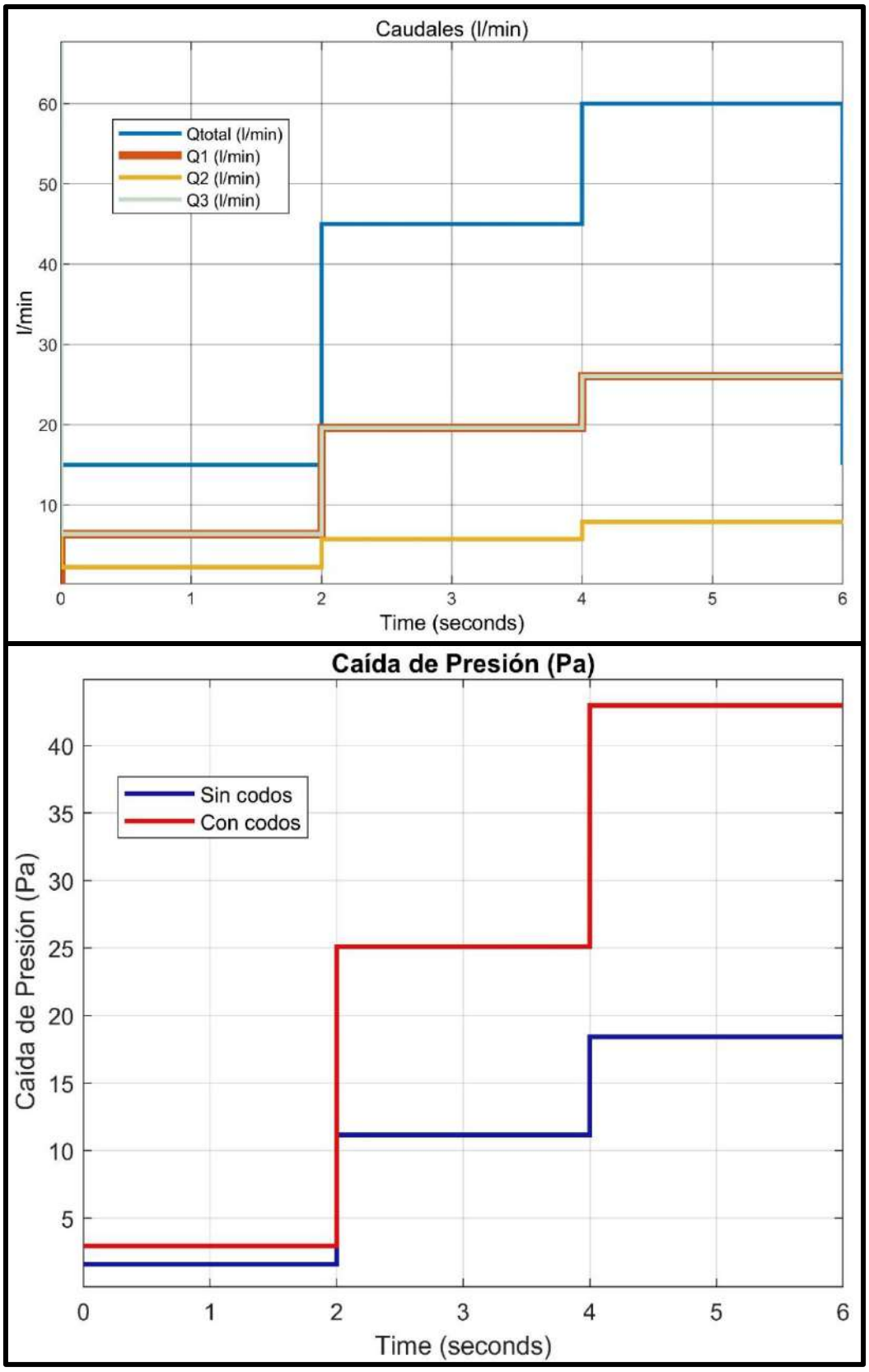


Figura 56. Resultados de tuberías en paralelo con caudales de 15, 45 y 60 l/min.

Fuente: Elaboración propia.

La gráfica de caudales muestra que el caudal total se distribuye proporcionalmente entre los tres ramales ya que los dos ramales de características similares conducen el mismo caudal ($Q1 \approx Q3$). En la gráfica de pérdida de carga, se optó por realizar la simulación del modelo en Simulink en dos casos; el primero sin considerar los accesorios y el segundo considerándolos, debido a que los cálculos analíticos en estos casos no consideran los accesorios y por ello la comparación se realiza con la primera simulación; sin embargo, la segunda simulación permite observar la variación de valores generada por las pérdidas en los accesorios.

6.7. Solucionario

6.7.1. Interfaz en VBA en Excel para tuberías conectadas en serie

Para el solucionario de este laboratorio se ha preparado una interfaz utilizando el desarrollador Visual Basic en Microsoft Excel, en la cual el jefe de laboratorio ingresará los siguientes datos: diámetros de las tuberías 1 y 2 (en metros), caudal de flujo (en litros por minuto), viscosidad cinemática del fluido (en metros al cuadrado por segundos), rugosidad absoluta del fluido (en milímetros) y las longitudes de las tuberías 1 y 2 (en metros). Luego de pulsar el botón "CALCULAR", se mostrarán los siguientes resultados: velocidades de flujo en las tuberías 1 y 2 (en metros por segundos), número de Reynolds del flujo en las tuberías 1 y 2 (adimensional), pérdida de carga en las tuberías 1 y 2 (en Pascales), pérdida de carga por accesorios (en Pascales) y la pérdida de carga total (en Pascales). Esta interfaz facilitará la revisión de los informes de laboratorio debido a que está programada para obtener los resultados requeridos en el informe de laboratorio (ver figura 57).

El código completo se encuentra disponible para el lector en el anexo 12 y se divide principalmente en dos: el correspondiente a las opciones "CALCULAR" y "LIMPIAR".

- **Opción "CALCULAR":** La primera sección es la correspondiente al código que se activará al presionar el botón CALCULAR de la figura 57 y en la figura 58 se muestra el diagrama de flujo correspondiente a dicho código. La primera parte de este código se encarga de declarar e inicializar las variables, luego calcula la pérdida de carga en la primera tubería y se utiliza el mismo código que el que se utilizó en el Excel sobre el número de Reynolds del laboratorio anterior. Este procedimiento se debe repetir en la tubería 2 para calcular la pérdida de carga.

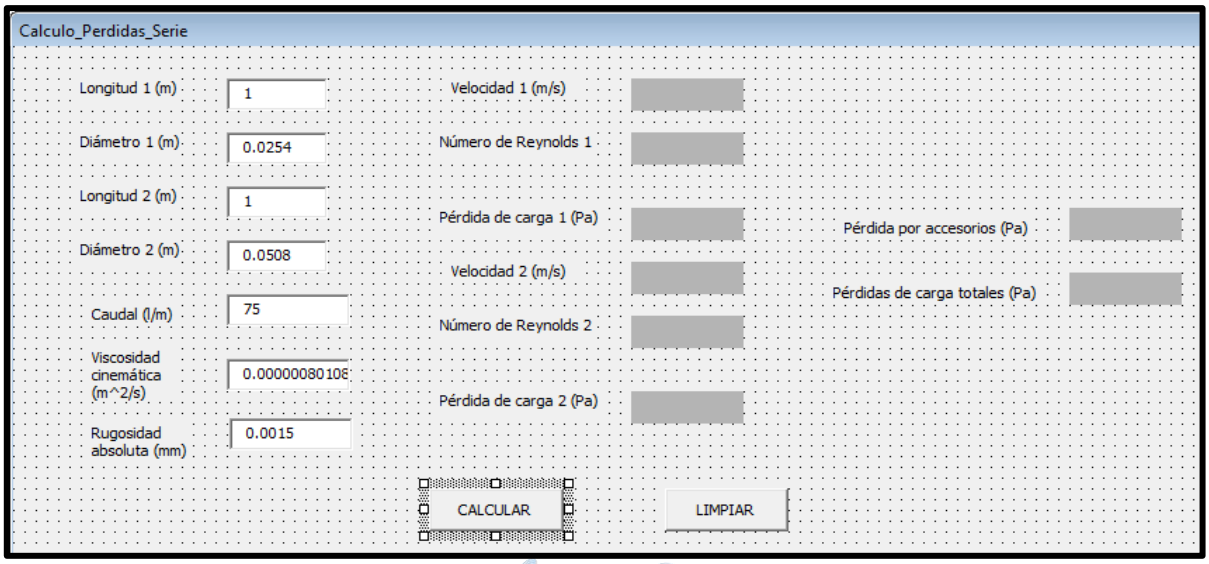


Figura 57. Interfaz en Visual Basic de Excel para laboratorio de Cálculo de Pérdidas en un sistema de tuberías conectadas en serie.

Fuente: Elaboración propia.

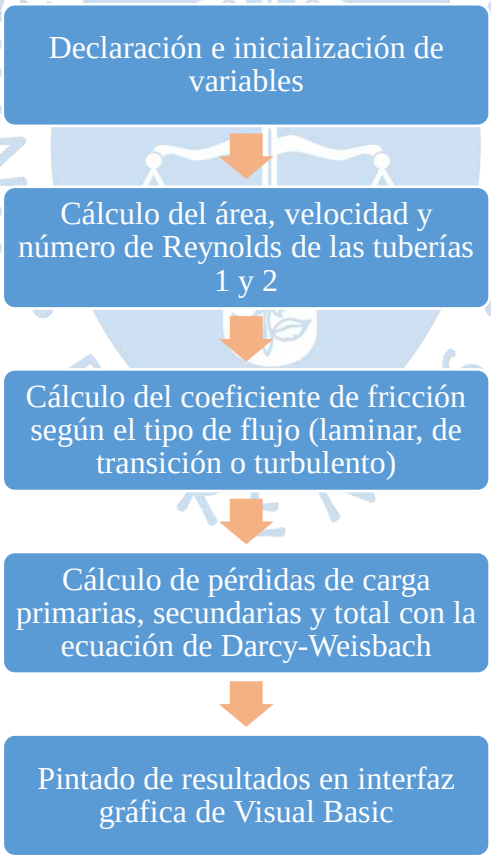


Figura 58. Diagrama de flujo del código de Visual Basic de Excel para tuberías conectadas en serie.

Fuente: Elaboración propia.

Luego se calcula la pérdida de carga correspondientes al accesorio de cambio de sección, el cual tiene una constante de 0.46; se utiliza la ecuación de pérdidas por accesorios ($h_s = K_s \frac{V^2}{2g}$) y posteriormente, se multiplica por un factor numérico para el cambio de unidades a Pascales.

Finalmente se hace la suma de la pérdida de carga por tuberías y la pérdida por accesorio para obtener la pérdida de carga total del sistema.

Para terminar, se le asigna el valor numérico correspondiente a cada recuadro designado para mostrar los resultados.

- **Opción "LIMPIAR":** La segunda sección es la correspondiente al código que se activará al presionar el botón "LIMPIAR" que como su nombre lo dice cumplirá la función de limpiar o borrar los datos de entrada y los resultados de sus recuadros correspondientes ubicados en la interfaz. De tal modo, el jefe de laboratorio podrá ingresar nuevos datos de manera rápida.

En la figura 59 se muestran los resultados obtenidos mediante la interfaz en Excel utilizando los mismos datos que los usados en los cálculos analíticos.

6.7.2. Interfaz en VBA en Excel para tuberías en paralelo

Para el solucionario para el jefe de laboratorio se ha preparado una interfaz utilizando el desarrollador Visual Basic en Microsoft Excel. En dicha interfaz se ingresará los siguientes datos: diámetros de las tuberías 1, 2 y 3 (en metros), caudal de flujo (en litros por minuto), viscosidad cinemática del fluido (en metros cuadrados sobre segundos), rugosidad absoluta del fluido (en milímetros) y las longitudes de las tuberías 1, 2 y 3 (en metros). Con la opción "CALCULAR", se mostrarán los siguientes resultados: coeficientes de fricción rectificados 1, 2 y 3, coeficientes de relación de caudales rectificados 1-2 y 3-2, caudales rectificados 1, 2 y 3 (en litros por minutos) y la pérdida de carga total (en Pascales). Esta interfaz facilitará la revisión de los informes de laboratorio debido a que está programada para obtener los resultados requeridos como se observa en la figura 60.

El código completo se encuentra disponible para el lector en el anexo 13 y se divide principalmente en dos: el correspondiente a las opciones "CALCULAR" y "LIMPIAR".

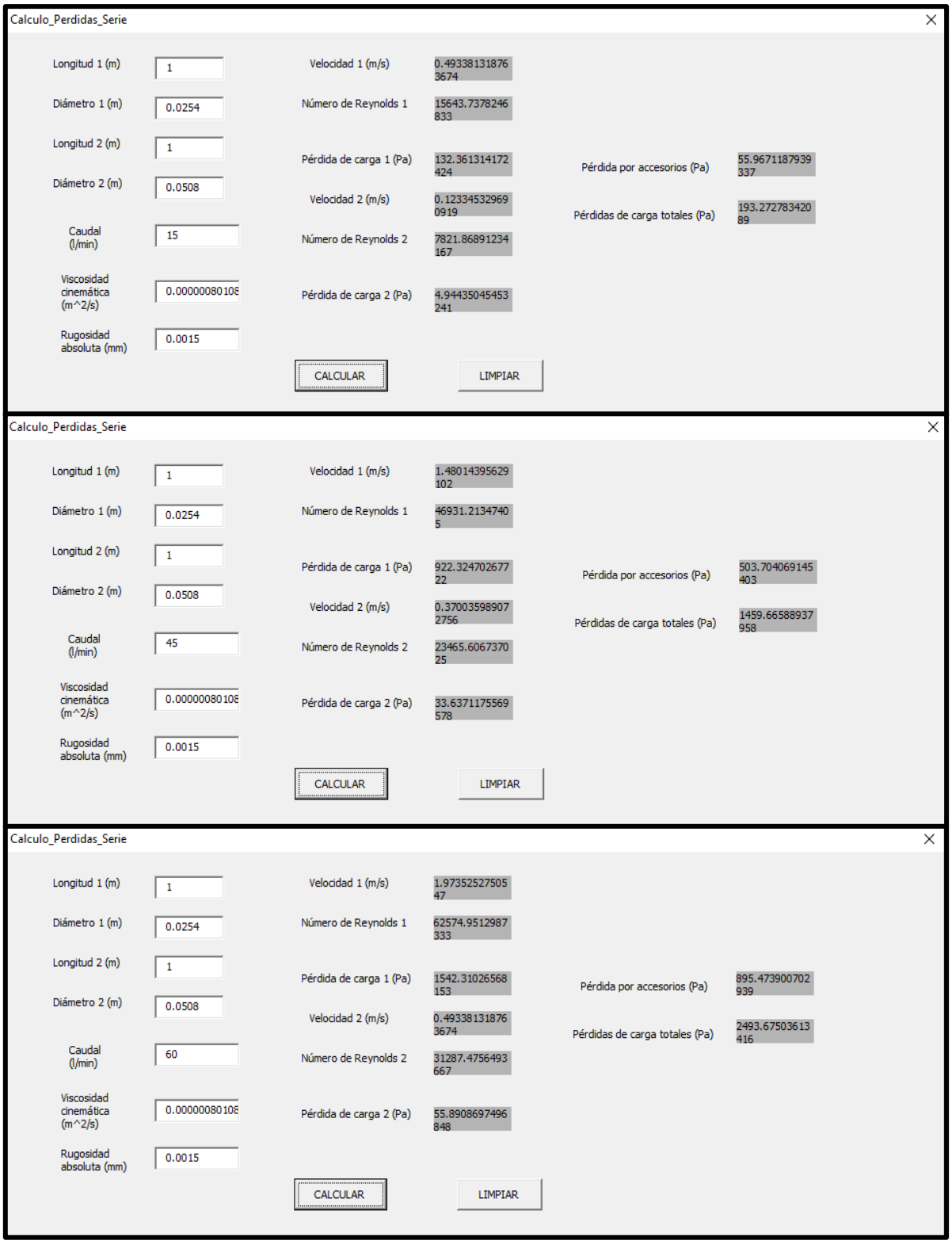


Figura 59. Resultados de la interfaz de Excel para tuberías conectadas en serie con caudales de 15, 45 y 60 l/min.

Fuente: Elaboración propia.

• **Opción "CALCULAR":** La primera sección es la correspondiente al código que se activará al presionar el botón CALCULAR de la figura 60 y en la figura 61 se muestra el diagrama de flujo correspondiente a dicho código. La primera parte de este código se encarga de declarar e inicializar variables y se utiliza un código similar al que se utilizó en el Excel sobre el número de Reynolds del laboratorio anterior como se puede apreciar en el siguiente código.

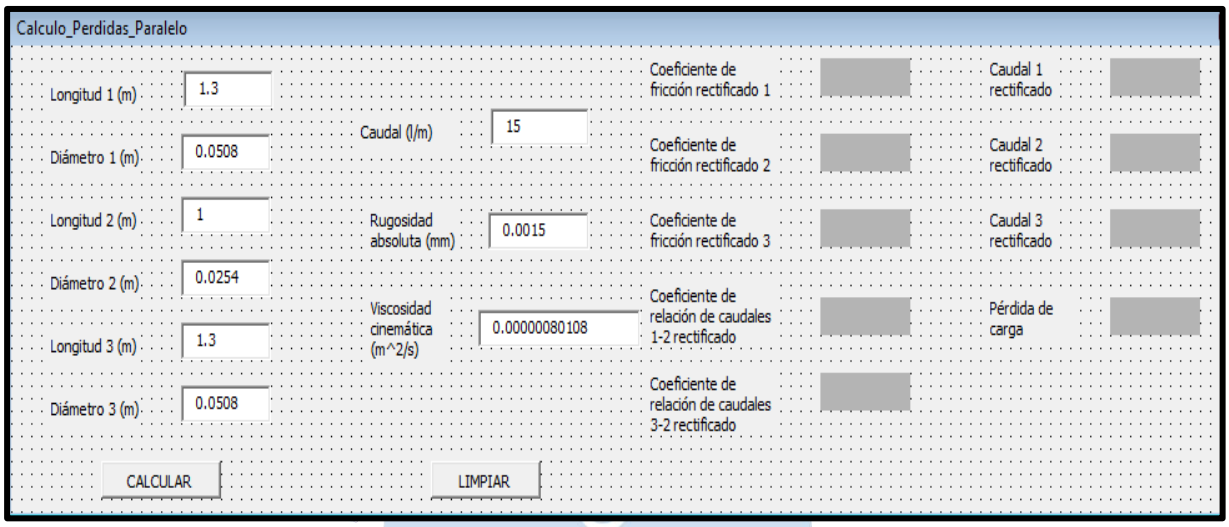


Figura 60. Interfaz en Visual Basic de Excel para laboratorio de Cálculo de Pérdidas en un sistema de tuberías en paralelo.
Fuente: Elaboración propia.

Luego de tener todos los datos en variables y con las unidades correctas se calcula el área de la tubería 1 y los coeficientes de fricción supuestos para cada una de las tuberías. Debido a que para el cálculo de pérdidas de un sistema de tuberías en paralelo se utiliza un método iterativo en el cual se suponen los primeros valores de coeficientes de fricción como si estuvieran en la zona de turbulencia completa.

En la programación de este método iterativo se define una variable "i" igual a 1 para contabilizar y actualizar los valores de los coeficientes de fricción en cada una de las iteraciones. Se utilizará el bucle While para iterar hasta encontrar los valores corregidos de los coeficientes de fricción de cada tubería; y, la condición para que el bucle finalice es que la diferencia elevada al cuadrado entre el coeficiente de fricción actual y anterior sea menor a 0.0001^2.

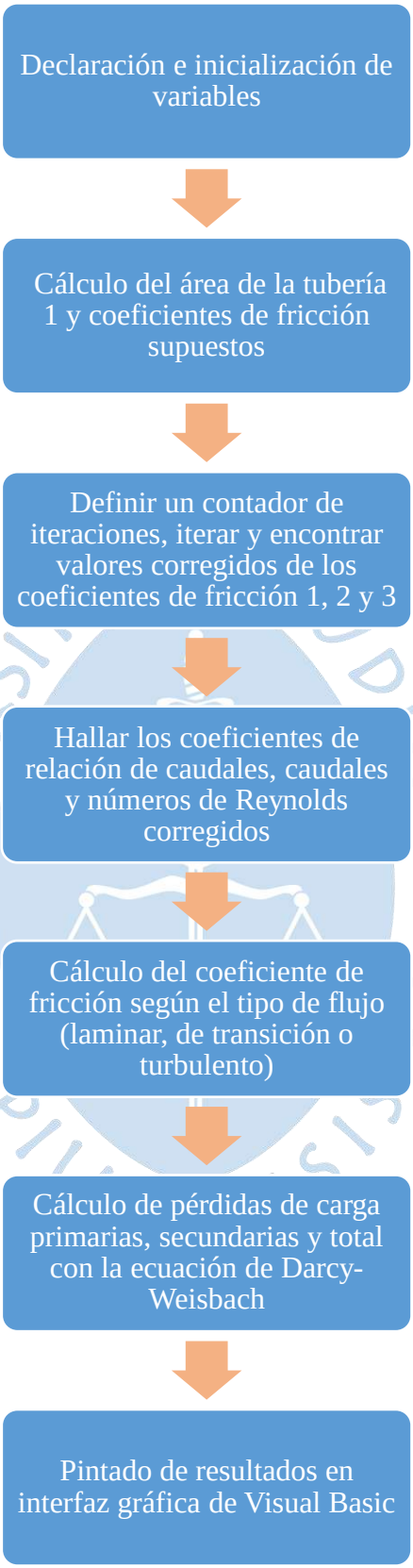


Figura 61. Diagrama de flujo del código de Visual Basic de Excel para tuberías en paralelo.

Fuente: Elaboración propia.

Dentro de este bucle se desarrollará un conjunto de ecuaciones siguiendo el método de Darcy-Weisbach. De esta manera, se hallarán los coeficientes de relación de caudales, los caudales y el número de Reynolds de cada una de las tuberías en paralelo.

También, se determina el coeficiente de fricción según el tipo de flujo de manera similar a la interfaz para el número de Reynolds y para las tuberías conectadas en serie. Los nuevos coeficientes de fricción hallados se convertirán en los coeficientes de fricción actuales y permitirán iterar hasta que la condición del bucle While se deje de cumplir.

Los coeficientes de fricción de las tuberías 2 y 3, respectivamente, también se calculan para iterar hasta que la condición del bucle While deje de cumplirse. Luego de salir del bucle While, con los valores correctos de los coeficientes de fricción se determinan los valores correctos de los coeficientes de relación de caudales y de los caudales de cada tubería.

También, se determina la pérdida de carga del sistema de tuberías conectadas en paralelo y para ello se calcula la pérdida de carga de la tubería 1, incluyendo las pérdidas por accesorios, que en este caso serán debido a 2 codos. Se conoce que la pérdida de carga en cada una de las tuberías es la misma y, a la vez, es igual a la de todo el sistema. También se multiplica por un factor de conversión de unidades para obtener resultados en Pascales.

Se asigna el valor numérico correspondiente a cada recuadro designado para mostrar los resultados.

- **Opción "LIMPIAR":** La segunda sección es la correspondiente al código que se activará al presionar el botón "LIMPIAR" que como su nombre lo dice cumplirá la función de limpiar o borrar los datos de entrada y los resultados de sus recuadros correspondientes ubicados en la interfaz. De tal modo, que se pueda ingresar nuevos datos de manera rápida.

En la figura 62 se muestran los resultados obtenidos mediante la interfaz en Excel utilizando los mismos datos que en los cálculos analíticos sin considerar las pérdidas por accesorios. Y, en la figura 63 se muestran los resultados obtenidos mediante la interfaz en Excel utilizando los mismos datos que en los cálculos analíticos considerando las pérdidas por accesorios.

6.8. Análisis de resultados

En el presente apartado se realizará una evaluación de la variación de los resultados analíticos y simulados respecto de los obtenidos mediante la interfaz en Excel. La comparativa se hará respecto a la interfaz en Excel debido a que es la que se utilizará para evaluar y calificar los resultados analíticos y simulados del alumno.

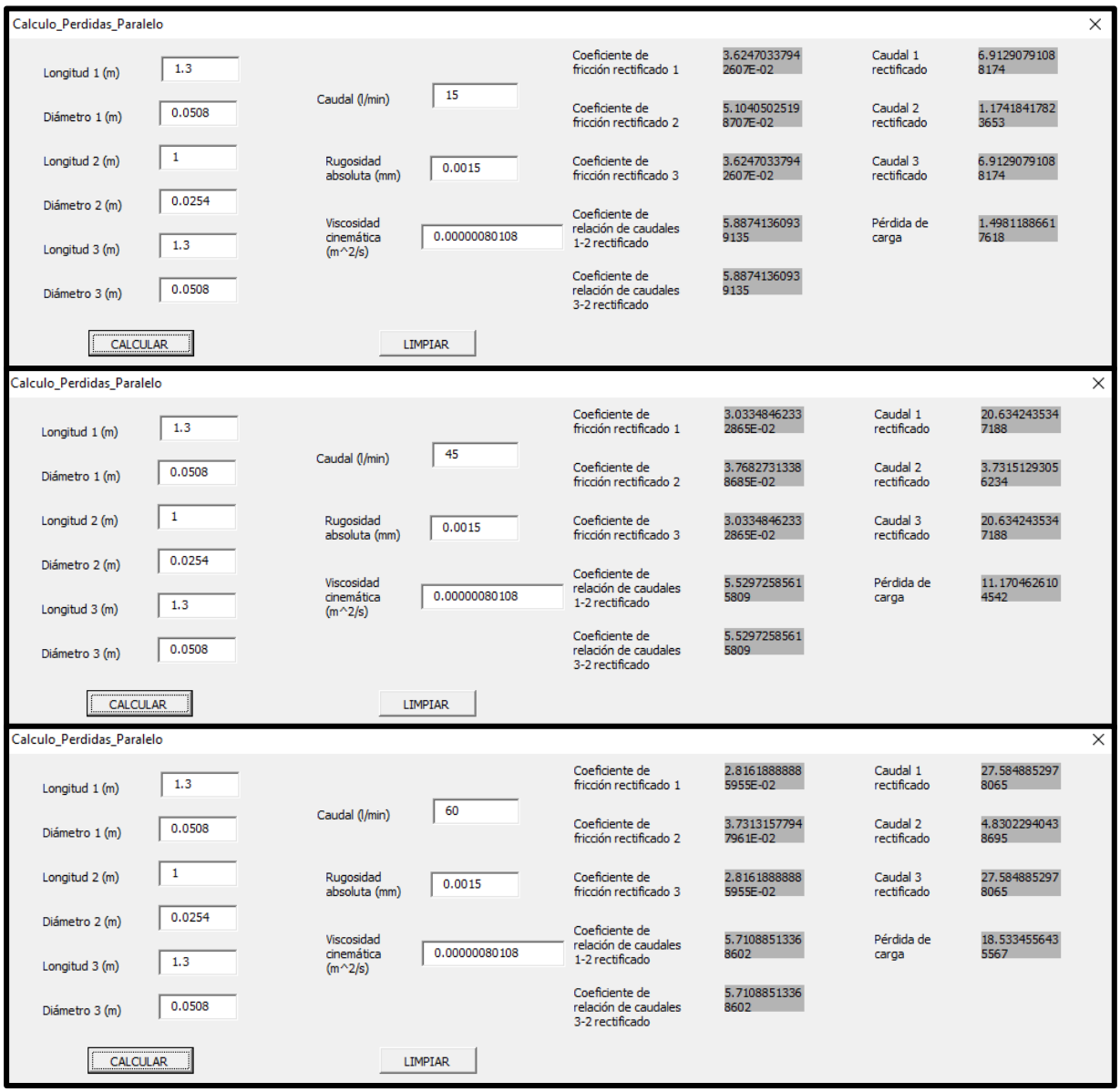


Figura 62. Resultados de la interfaz de Excel para tuberías en paralelo con caudales de 15, 45 y 60 l/min sin pérdidas por accesorios.

Fuente: Elaboración propia.

6.8.1. Análisis de resultados: tuberías conectadas en serie

En la tabla 11 se observa el resumen de los resultados obtenidos mediante los distintos métodos.

La velocidad de flujo promedio en cada una de las tuberías se calculó de la misma manera en los tres métodos y por tanto los resultados concuerdan en cada caso. Las pérdidas de carga calculadas por los tres métodos son similares y por los valores de caudal inicial escogidos en este laboratorio solo se tienen fluidos en régimen turbulento.

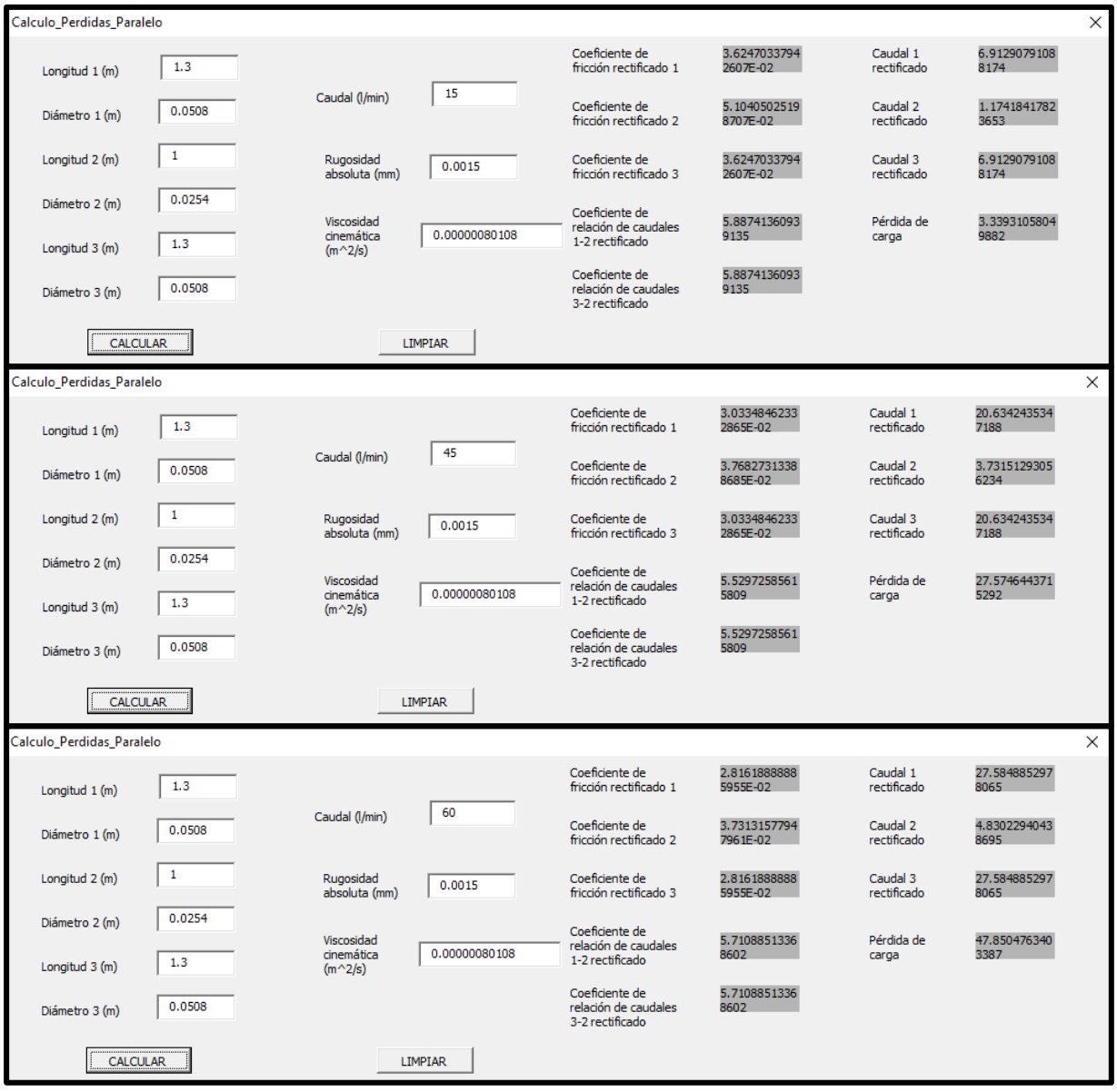


Figura 63. Resultados de la interfaz de Excel para tuberías en paralelo con caudales de 15, 45 y 60 l/min con pérdidas por accesorios.

Fuente: Elaboración propia.

En régimen turbulento el factor de fricción es calculado mediante la ecuación de Colebrook-White en la interfaz de Excel; y mediante el Diagrama de Moody en el método analítico. Como se puede observar en el cuadro comparativo, a menor caudal inicial, la diferencia entre las pérdidas totales del sistema, entre el método analítico y la interfaz de Excel, es mayor. Pues con un caudal de 15 l/min se obtiene una variación de un 8.49%, mientras que con el caudal mayor de 60 l/min se tiene una variación de un 1.12%. Esto se debe a que el Diagrama de Moody solo permite calcular los decimales del factor de fricción con exactitud hasta la cifra de las milésimas mientras que la ecuación de Colebrook-White proporciona muchos más decimales. Por ello, al tener pérdidas de carga grandes (debido a los altos caudales), los errores de aproximación en los decimales no ocasionan variaciones porcentuales considerables entre las pérdidas de carga total.

Tabla 11. Comparativa de resultados de tuberías conectadas en serie entre el método analítico, simulación y Excel.

		Vel. 1 (m/s)	Vel. 2 (m/s)	Pérd. de carga 1 (Pa)	Pérd. de carga 2 (Pa)	Pérd. por accesorios (Pa)	Pérd. de carga total (Pa)	Variación de pérd. de carga total - Excel Pa (%)
$Q = 15\ lpm$	**Analítico**	0.4934	0.1233	148.49	5.239	55.967	209.696	16.424 Pa (8.49%)
	Simulación	0.4934	0.1233	131.1	4.935	45.865	181.9	11.372 Pa (5.88%)
	Excel	0.4934	0.1233	132.36	4.944	55.968	193.272	0 Pa (0%)
$Q = 45\ lpm$	**Analítico**	1.48	0.37	948.432	40.386	503.602	1492.42	32.76 Pa (2.24%)
	Simulación	1.48	0.37	908.7	33.26	413.04	1355	104.66 Pa (7.17%)
	Excel	1.48	0.37	922.324	33.637	503.699	1459.66	0 Pa (0%)
$Q = 60\ lpm$	**Analítico**	1.97	0.493	1571.14	55.08	895.45	2521.67	28 Pa (1.12%)
	Simulación	1.974	0.4934	1518	55.19	733.81	2307	186.67 Pa (7.49%)
	Excel	1.97	0.493	1542.31	55.89	895.47	2493.67	0 Pa (0%)

Fuente: Elaboración propia.

Caso contrario se observa en la comparación entre los resultados de los métodos de simulación de Simulink y la interfaz de Excel, debido a que la variación porcentual aumenta con tendencia a un 8% mientras mayor sea el caudal inicial. Sin embargo, si se hace un análisis

más riguroso se observa que las diferencias de los valores de pérdida de carga en cada tubería son menores a un 2%. Así, se puede inferir que son las pérdidas por accesorios las que producen la mayor variación porcentual en el total de pérdidas de carga. Esto se debe a que tanto para el método de cálculo analítico y para la interfaz de Excel se utiliza el coeficiente con un valor de 0.46 obtenida de la tabla 12, mientras que el método de simulación en Simulink, según la documentación del bloque utilizado, calcula dicho coeficiente mediante las ecuaciones A.H. Gibson como se observa en la figura 64.

Tabla 12. Tabla de valores del coeficiente "k" para pérdidas de energía locales.

TABLA C.2

Contracción brusca		Ensanchamiento gradual para un ángulo total del cono						
D_1/D_2	Kc	4º	10º	15º	20º	30º	50º	60º
1.2	0.08	0.02	0.04	0.09	0.16	0.25	0.35	0.37
1.4	0.17	0.03	0.06	0.12	0.23	0.36	0.50	0.53
1.6	0.26	0.03	0.07	0.14	0.26	0.42	0.57	0.61
1.8	0.34	0.04	0.07	0.15	0.28	0.44	0.61	0.65
2.0	0.37	0.04	0.07	0.16	0.29	0.46	0.63	0.68
2.5	0.41	0.04	0.08	0.16	0.30	0.48	0.65	0.70
3.0	0.43	0.04	0.08	0.16	0.31	0.48	0.66	0.71
4.0	0.45	0.04	0.08	0.16	0.31	0.49	0.67	0.72
5.0	0.46	0.04	0.08	0.16	0.31	0.50	0.67	0.72

D_1 = Diámetro mayor
D_2 = Diámetro menor

Fuente: Farfán (s/f). Apéndice C valores del coeficiente "k" para pérdidas de energía local.

6.8.2. Análisis de resultados del sistema de tuberías en paralelo

En la tabla 13 y en la tabla 14 se puede observar el resumen de los resultados obtenidos previamente mediante los distintos métodos.

Para el sistema de tuberías conectadas en paralelo se han considerado dos cálculos distintos mediante los 3 métodos, el primero sin considerar las pérdidas por accesorios y el segundo considerándolas. Se han realizado estos dos cálculos debido a que se observó que para el caso de tuberías conectadas en paralelo, la influencia de los accesorios (codos) en el método de la simulación en Simulink causaba un mayor porcentaje de error, sin embargo no se pueden dejar de lado estas pérdidas por accesorios porque experimentalmente también serán tomadas en cuenta.

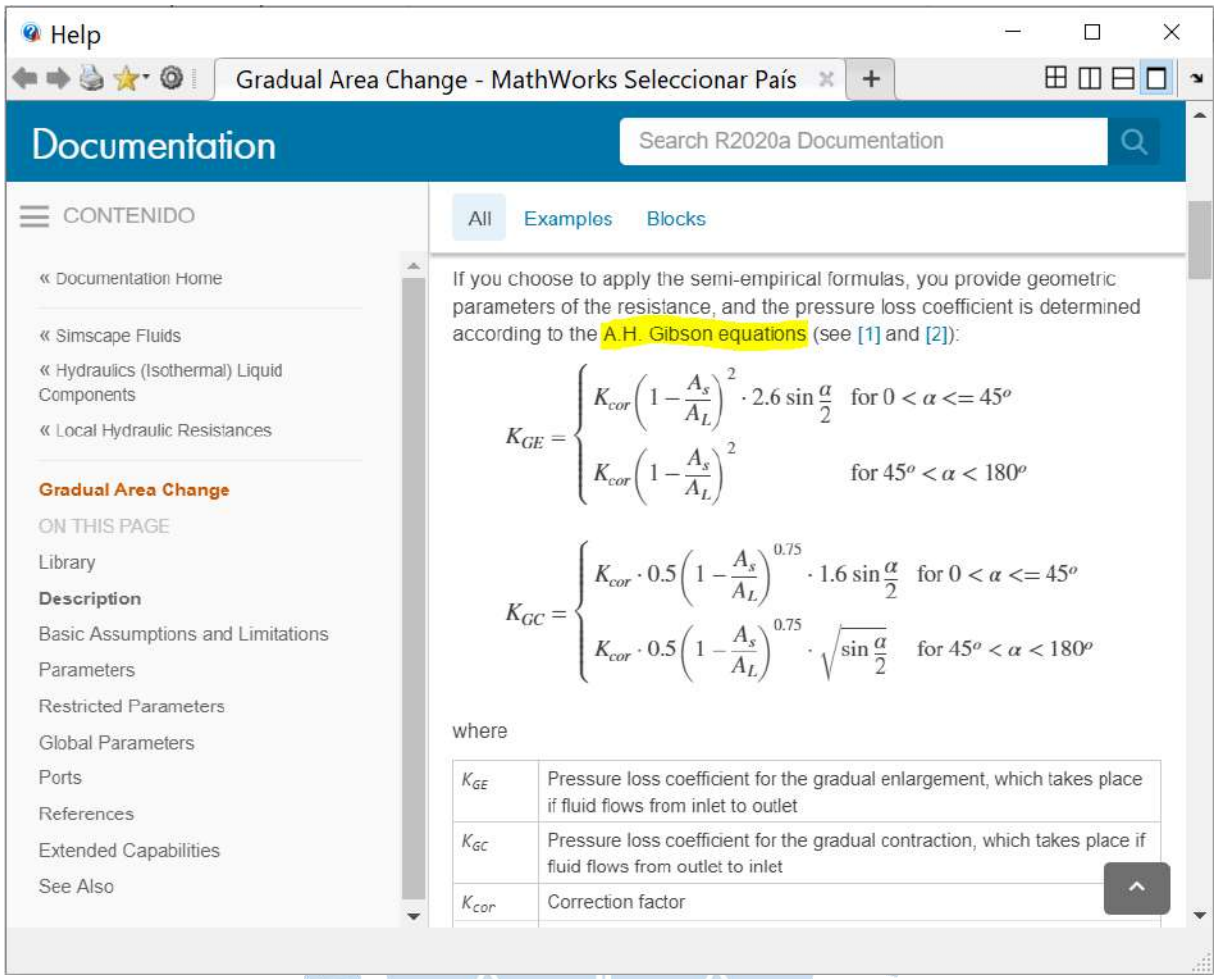


Figura 64. Documentación del bloque Gradual Area Change sobre el cálculo del coeficiente de pérdida de carga.

Fuente: Elaboración propia.

En el primer cálculo (Ver tabla 13), los valores de caudales y pérdida de carga calculados por los tres métodos son similares y para los valores de caudal inicial escogidos en este laboratorio solo se tienen fluidos en régimen turbulento.

En régimen turbulento, el factor de fricción es calculado mediante la ecuación de Colebrook-White en la interfaz de Excel y mediante la ecuación aproximada de Altshul en el método analítico. Como se observa en el cuadro comparativo, a menor caudal inicial, la diferencia de pérdida de carga total del sistema entre los métodos analítico y la interfaz de Excel es mayor; pues con un caudal de 15 l/min se obtiene una variación de un 11.79%, mientras que con el caudal mayor de 60 l/min se tiene una variación de un 2.31%. Entonces, se puede establecer que esta variación tiende a disminuir conforme aumenta el número de Reynolds; y, dicho comportamiento concuerda con el paper de Anaya-Durand, A. I. (2014) que sostiene que el

error (medido respecto a la ecuación de Colebrook-White), en el cálculo del factor de fricción ocasionado por utilizar ecuaciones aproximadas (Altshul), disminuye a medida que el fluido se acerca a la turbulencia completa. Así, se tiene la mayor variación al inicio del régimen turbulento, con un número de Reynolds cercano a 4000; y la menor variación en la región de completa turbulencia, la cual es la más frecuente en las situaciones presentes en la industria.

Tabla 13. Comparativa de resultados de tuberías conectadas en paralelo entre el método analítico, simulación y Excel, sin considerar pérdidas por accesorios.

		Caudal 1 (l/min)	Caudal 2 (l/min)	Caudal 3 (l/min)	Pérd. de carga 1 (Pa)	Variación de pérd. de carga - Excel Pa (%)
$Q = 15\ lpm$	**Analítico**	6.888	1.224	6.888	1.6746	0.1766 Pa (11.79 %)
	Simulación sin codos	6.9	1.21	6.9	1.573	0.075 Pa (5.01 %)
	Excel	6.91	1.17	6.91	1.498	0 Pa (0 %)
$Q = 45\ lpm$	**Analítico**	20.64	3.672	20.64	11.422	0.252 Pa (2.25 %)
	Simulación sin codos	20.69	3.63	20.69	11.163	0.007 Pa (0.063 %)
	Excel	20.63	3.73	20.63	11.17	0 Pa (0 %)
$Q = 60\ lpm$	**Analítico**	27.54	4.88	27.54	18.96	0.427 Pa (2.31 %)
	Simulación sin codos	27.6	4.794	27.6	18.41	0.123 Pa (0.66%)
	Excel	27.58	4.83	27.58	18.533	0 Pa (0 %)

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 14. Comparativa de resultados de tuberías conectadas en paralelo entre el método analítico, simulación y Excel, considerando pérdidas por accesorios.

		Caudal 1 (l/min)	Caudal 2 (l/min)	Caudal 3 (l/min)	Pérd. de carga 1 (Pa)	Variación de pérd. de carga - Excel Pa (%)
$Q = 15\ lpm$	**Analítico**	6.888	1.224	6.888	3.502	0.163 Pa (4.88 %)
	Simulación con codos	6.376	2.249	6.376	2.931	0.408 Pa (12.22 %)
	Excel	6.91	1.17	6.91	3.339	0 Pa (0 %)
$Q = 45\ lpm$	**Analítico**	20.64	3.672	20.64	27.835	0.261 Pa (0.94 %)
	Simulación con codos	19.62	5.754	19.62	25.104	2.47 Pa (8.96 %)
	Excel	20.634	3.73	20.634	27.574	0 Pa (0 %)
$Q = 60\ lpm$	**Analítico**	27.54	4.88	27.54	48.18	0.33 Pa (0.69 %)
	Simulación con codos	26.06	7.873	26.06	42.95	4.9 Pa (10.24 %)
	Excel	27.58	4.83	27.58	47.85	0 Pa (0 %)

Fuente: Elaboración propia.

Además, es importante notar que las variaciones porcentuales entre el método analítico y Excel son mayores a las obtenidas en el caso de tuberías conectadas en serie. Esto se debe a que para el cálculo de pérdida de carga en tuberías en paralelo se utiliza un método iterativo que Excel puede manejar muy bien gracias a su gran capacidad de cómputo mientras que en el método analítico las iteraciones son repetitivas.

La diferencia de pérdida de carga total del sistema entre los métodos de simulación en Simulink y la interfaz de Excel, al igual que con el método analítico, es mayor cuando se tiene un caudal menor, pues con un caudal de 15 l/min se obtiene una variación de un 5.01%, mientras que con el caudal mayor de 60 l/min se tiene una variación de un 0.66%. Cabe resaltar que las diferencias en estos métodos son menores, lo cual indica que la simulación de Simulink debe de utilizar un método de cálculo de pérdida de carga similar al implementado en Excel.

En el segundo cálculo (Ver tabla 14) se sigue la misma tendencia que el primer cálculo, las diferencias de pérdidas de carga disminuyen porcentualmente mientras se tenga un caudal mayor.

Como se observa en el segundo cuadro comparativo, la diferencia de pérdida de carga total del sistema que se obtiene entre los métodos analítico y la interfaz de Excel para un caudal de 15 l/min es de un 4.88%, mientras que con el caudal mayor de 60 l/min se tiene una variación de un 0.69%. De igual manera, la diferencia de pérdida de carga total del sistema que se obtiene entre los métodos de simulación en Simulink y la interfaz de Excel para un caudal de 15 l/min es de un 12.22%, mientras que con el caudal mayor de 60 l/min se tiene una variación de un 10.24 %.

En este cálculo se observa que las diferencias entre los métodos de simulación en Simulink y la interfaz de Excel son mayores que al utilizar el cálculo analítico, esto se debe a que la simulación en Simulink utiliza un método de cálculo distinto. Sin embargo, los porcentajes no son altos y se consideran aceptables.

Capítulo 7

Trabajo semestral para el curso de Mecánica de Fluidos: Diseño y prueba de un sistema de tuberías

7.1. Introducción

El trabajo semestral busca complementar el aprendizaje teórico del curso de Mecánica de Fluidos. Los objetivos son:

- Mostrar al alumno los diferentes usos que se le puede dar al módulo de laboratorio para complementar los conocimientos de la totalidad de los temas estudiados en la asignatura de Mecánica de Fluidos.
- Lograr que el alumno realice su propio diseño de sistema de tuberías donde se pueda analizar el flujo en ductos cerrados.

7.2. Explicación del trabajo

El presente módulo posee una amplia flexibilidad pues se ha dejado un ducto de salida posterior a la bomba hidráulica (punto P5 en la figura 65) al cual se pueden acoplar los instrumentos necesarios para realizar diferentes laboratorios ya impartidos actualmente como "Fuerza en superficies sumergidas", "Fuerza de chorro", entre otros. Además, se dejarán dos sensores de presión (P5 y P6) y un sensor de flujo (Q1) de manera que, al realizar los laboratorios ya mencionados, se podrá realizar el análisis completo desde tres enfoques: el teórico (con los cálculos planteados en las guías de laboratorio), el práctico (con el desarrollo de las prácticas de laboratorio utilizando la instrumentación correspondiente) y desde la simulación (el Simulink de Matlab enseñado en una guía de laboratorio previa).

La flexibilidad del módulo también permite el desarrollo de un trabajo semestral con el objetivo de reforzar las clases teóricas. Para el buen desarrollo de este trabajo el alumno deberá comprender el diseño de un módulo y tomará como referencia bibliográfica este trabajo de tesis. También deberá poner en práctica el uso de diferentes softwares: SolidWorks para el diseño y

Matlab para la simulación pues ambos serán de gran ayuda para la construcción y análisis de resultados.

El trabajo semestral propuesto tendrá como objetivo principal el análisis de flujo en ductos cerrados, es decir, los alumnos deberán diseñar y posteriormente construir un sistema de tuberías que permita el análisis de flujo en tuberías conectadas en serie y en paralelo; este análisis comprenderá el cálculo de pérdida de carga, velocidad promedio de flujo y determinar el tipo de flujo, se deberán presentar todos los resultados comprobados y comparados según los 3 enfoques mencionados anteriormente.

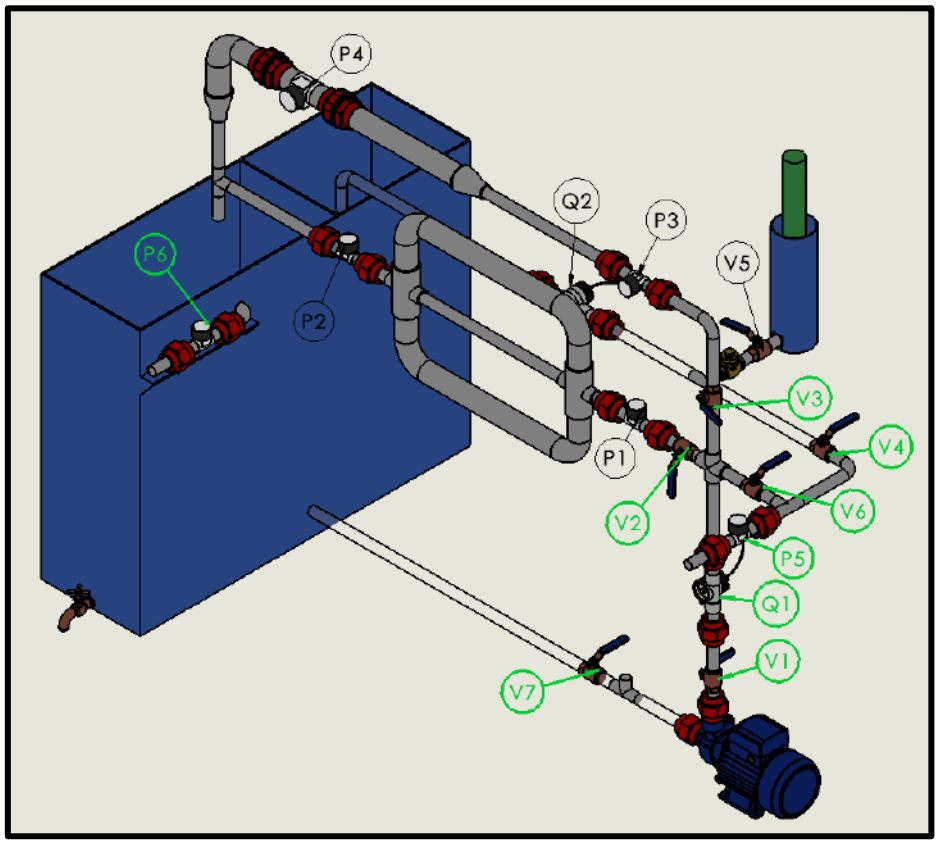


Figura 65. Módulo con elementos a utilizar en el laboratorio.

Fuente: Elaboración propia.

Para este trabajo se debe tener en cuenta las dimensiones del módulo, debido a que el inicio (salida de agua) del sistema de tuberías planteado por los alumnos será justo después del sensor de presión P5 y el final (desfogue) estará en la tubería que tiene el sensor de presión P6.

7.2.1. Desarrollo experimental

Luego de haber conectado el diseño del sistema de tuberías a los puntos especificados se procederá a realizar la parte experimental. Para ello se utilizarán las siguientes partes del módulo (ver figura 65):

- Bomba centrífuga
- Fluido de trabajo: agua
- Válvulas V1, V2, V3, V4, V6 y V7
- Sensor de flujo Q1
- Sensores de presión P5 y P6
- Recipiente de tinta con agua

Además, antes del inicio del experimento se debe comprobar el correcto funcionamiento de los equipos y accesorios. La ejecución de las pruebas experimentales en el diseño de tuberías se realizará siguiendo las siguientes indicaciones:

1. Cerrar totalmente las válvulas V2, V3 y V4 y abrir completamente las válvulas V1, V6 y V7. Esta disposición permitirá que el flujo de la bomba circule solamente por el subsistema de diseño.

2. Encender la bomba centrífuga y esperar a que todo el tramo de tuberías tenga agua circulando.

3. Regular el caudal con la válvula V1 para obtener los caudales deseados. Paralelamente, anotar en la tabla 15 los diferentes caudales medidos por el sensor de flujo Q1 y las medidas de los sensores de presión P5 y P6.

Los pasos indicados previamente son sugerencias para la realización del proceso experimental pues en base al diseño de cada alumno se tendrán que realizar algunas variaciones a lo expuesto previamente. Por ejemplo, si algún diseño necesita conocer la presión a la entrada de la bomba centrífuga se podrá instalar un sensor de presión en la “T” que se encuentra junto a la válvula V7.

Tabla 15. Tabla de anotación de datos del experimento.

Caudal (m^3/s)	Presión P5 (Pa)	Presión P6 (Pa)

Fuente: Elaboración propia.

7.3. Simulación en Simulink

Realiza una simulación de tu diseño de sistema de tuberías en Simulink utilizando los valores de caudal obtenidos experimentalmente. Calcular la pérdida de carga total del sistema y muestra los gráficos y parámetros que creas necesarios.

7.4. Cálculos y resultados

1. Realiza los cálculos necesarios para determinar analíticamente la pérdida de carga total del diseño de sistema de tuberías utilizando los caudales obtenidos experimentalmente. Además, calcular la longitud equivalente de su diseño para cada caudal.

2. Complete la tabla 16.

Tabla 16. Comparativa de pérdida de carga entre el método analítico, simulación y experimental.

		Pérdida de carga (Pa)	Variación en pérdida de carga respecto de la medida experimental Pa (%)
$Q =$	**Analítico**		
	Simulación		
	Experimental		
$Q =$	**Analítico**		
	Simulación		
	Experimental		
$Q =$	**Analítico**		
	Simulación		
	Experimental		

Fuente: Elaboración propia.

3. ¿Concuerdan la pérdida de carga analítica y simulada con las obtenidas experimentalmente? ¿Por qué?

4. Si se buscase llevar agua del sensor de presión P5 al sensor de presión P6 con la mínima pérdida de carga, ¿qué diseño debería utilizar? Defina el diseño óptimo y calcule su pérdida de carga analíticamente. ¿En qué porcentaje el diseño óptimo reduciría la pérdida de carga respecto de su diseño previo?

UNIVERSITAS STUDIORUM PIURENSIS

Conclusiones

1. La herramienta de Simulink: *Simscape Fluids* ofrece una forma rápida y sencilla de modelar, simular y obtener parámetros hidráulicos (caudal y pérdida de carga) en distintos sistemas de tuberías. Por los resultados obtenidos se afirma que es una herramienta de mucha utilidad que permite predecir con alto grado de precisión el comportamiento de sistemas. Se evidenció, también, que un sistema puede diseñarse desde el punto de vista analítico, experimental y utilizando herramientas de simulación.

2. En la presente tesis se ha modelado el módulo de laboratorio utilizando bloques de tuberías de baja presión y el agua como fluido de trabajo. Sin embargo, la librería *Simscape* ofrece también bloques de mayor complejidad que permiten modelar y simular el comportamiento de distintos fluidos en aplicaciones como intercambiadores de calor, sistemas de lubricación o de inyección, amortiguadores hidráulicos, etc. En este sentido, la herramienta Simulink junto con la librería *Simscape* permitirán utilizar diferentes tipos de fluidos, analizar sistemas y, además, comparar el comportamiento de los mismos.

3. Describir y visualizar el tipo de flujo en una tubería es sumamente útil para el análisis del flujo turbulento, que es el predominante para el transporte en ductos cerrados. Se concluye que las prácticas de laboratorio propuestas son beneficiosas para el estudiante ya que tanto el módulo como la herramienta del software tienen la ventaja, flexibilidad y monitoreo de cambiar parámetros y componentes a fin de observar la variación del flujo de un fluido y su comportamiento en la zona laminar, de turbulencia o de transición.

4. El módulo propuesto es versátil y puede ser utilizado para incorporar nuevas prácticas experimentales; por ejemplo, para determinar los valores críticos del número de Reynolds, los cuales indican cuando un flujo deja de ser laminar o turbulento. Éstos varían ligeramente de acuerdo a las geometrías y condiciones de flujo distintas, por ende, varían según la instalación.

5. El diseño del módulo tiene la facilidad de poder acoplar instalaciones complementarias y de diferentes características geométricas, permitiendo su uso para los diversos casos desarrollados en los trabajos prácticos de la asignatura de Mecánica de Fluidos. Su implementación fortalecería los resultados del estudiante, principalmente los referidos a la experimentación y al trabajo en equipo.

6. La similitud de resultados analíticos en los métodos existentes de solución para hallar la pérdida de carga en un sistema de tuberías conectadas en serie permite concluir que los métodos planteados en este trabajo de tesis son válidos y podrían replicarse en futuras aplicaciones lo que incentivaría al desarrollo de la creatividad e imaginación del estudiante.

7. En un sistema de tuberías conectadas en paralelo, los cálculos a realizar son complicados debido a la cantidad de variables sin conocer (caudales, coeficientes de fricción y número de Reynolds del fluido en cada tubería) del sistema, por ello, es importante conocer los fundamentos teóricos para establecer las hipótesis que permitan realizar simplificaciones y así tras realizar un método iterativo poder hallar el coeficiente de fricción del fluido en cada tubería.

8. La construcción del módulo de laboratorio diseñado en la presente tesis ha sido presupuestada de forma referencial debido a que algunas cotizaciones se requieren hacer de forma presencial y, por la coyuntura actual, no se han podido realizar. Por tal motivo, los costos reales se conocerán durante la posterior construcción del módulo de laboratorio que los autores realizaremos en cuanto la crisis sanitaria termine.

9. La importancia de este trabajo de investigación es incentivar al complemento de la formación integral de los alumnos por medio del desarrollo de laboratorios experimentales que se podrían implementar con la construcción del diseño propuesto y con el uso adecuado de las guías de laboratorio indicadas.

Referencias bibliográficas

Anaya-Durand, A. I., Cauich-Segovia, G. I., Funabazama-Bárcenas, O. & Alfonso Gracia-Medrano-Bravo, V. (2014) Evaluación de ecuaciones de factor de fricción explícito para tuberías. Educación Química, Volumen 25 (Edición 2), 128-134. Recuperado 21:43, julio 24, 2020, de ScienceDirect: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0187893X1470535X#!

Beck S. & Collins R. (2012). Diagrama de Moody. University of Sheffield. Recuperado 19:36, diciembre 8, 2020 de Wikipedia: https://ca.wikipedia.org/wiki/Diagrama_de_Moody#/media/Fitxer:Moody_EN.svg

Carmona Orta, J. & Jasso Aceves, L. (2016). Máquinas Hidráulicas CUCEI 2016-A D02. Recuperado 10:51, julio 31, 2020, de http://maquinashidraulicasferjasso.blogspot.com/2016/05/cavitacion.html

Castorani, J. (2015) Término de Cavitación en Bombas. Recuperado 11:18, julio 31, 2020, de http://ingmaritima.blogspot.com/2015/09/termino-de-cavitacion-en-bombas.html

Cengel, Y. & Cimbala, J. (2006). Mecánica de fluidos Fundamentos y aplicaciones (1ra ed.). México. MCGRAW-HILL INTERAMERICANA.

Crane Co. (1982) *Flow of Fluids Through Valves, Fittings, and Pipe*, Crane Valves North America, Technical Paper No. 410M. Recuperado 15:21, noviembre 22, 2020, de https://www.researchgate.net/file.PostFileLoader.html?id=56e01ba8b0366d0ab561c315&assetKey=AS%3A337709886394387%401457527720082

Electrobomba Centrífuga Werken 0.5 HP (s/f). Recuperado 21:08, julio 31, 2020, de PROMART Homecenter: https://www.promart.pe/electrobomba-centrifuga-werken-0-5hp-1/p

Fahsbender, S. (1986). Diseño y construcción de un módulo de ensayo para bombas centrífugas (tesis de pregrado). Universidad de Piura, Piura, Perú.

Farfán (s/f). Apéndice C valores del coeficiente "k" para pérdidas de energía local. Recuperado 20:51, setiembre 12, 2020, de Academia: https://www.academia.edu/7510814/AP%C3%89NDICE_C_VALORES_DEL_COEFICIENTE_k_PARA_P%C3%89RDIDAS_DE_ENERG%C3%8DA_LOCAL?source=swp_share

Fernández M. (2019). Flujo laminar y turbulento [Figura]. Recuperado 19:03, diciembre 8, 2020, de Aerodinámica F1: https://www.aerodinamicaf1.com/2019/10/flujo-laminar-y-turbulento/

Giles R., Evett J. & Liu C. (1994) Mecánica de los fluidos e hidráulica (4ta ed.). España. S.A. MCGRAW-HILL / INTERAMERICANA DE ESPAÑA

Laboratorio N° 03 Aparato de Osborne Reynolds. (2018) Universidad de Piura, Facultad de Ingeniería, Laboratorio de Mecánica de Fluidos (FL) 2018-II.

Marcelo, D. (s/f) Máquinas Hidráulicas: Bombas centrífugas. Apuntes para uso exclusivo de alumnos del curso de MH. Programa académico de ingeniería mecánico eléctrica de la Universidad de Piura.

Martin-Dominguez, Ignacio & Alarcón-Herrera, Ma & Escobedo, Jorge. (2006). Determination of the Darcy Pipe Flow Friction Factor as a Routine in Visual Basic for MS Excel. 10.1115/ANES/ASME2006-0016.

Mataix, C. (1986) Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas (2da ed.). España, Madrid. Ediciones del Castillo, S. A.

MathWorks (2015) SimHydraulics User's Guide: Matlab & Simulink R2015a. Recuperado 19:45, noviembre 7, 2020, de https://www.dphu.org/uploads/attachements/books/books_2781_0.pdf

Munson, B., Young, D., Okiishi T. y Huebsch W. (2009) Fundamentals of Fluid Mechanics (6ta ed.). Estado Unidos. John Wiley & Sons, Inc. Recuperado 19:22, diciembre 4, 2020: https://civilcafe.weebly.com/uploads/2/8/9/8/28985467/fluid_mechanics.pdf

Osorio Escamilla, F. J., Rodríguez Gutiérrez, J. F. (2004). Propuesta de infraestructura hidráulica para la Universidad de las Américas de acuerdo al Plan Ordenador de Espacios. Tesis Maestría. Gerencia de Proyectos de Construcción. Departamento de Ingeniería Civil, Escuela de Ingeniería, Universidad de las Américas Puebla. Mayo. Recuperado 20:51, diciembre 8, 2020, de Bibliotecas UDLAP: http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/mgc/osorio_e_fj/capitulo3.pdf

Sensor de flujo de agua 1" FS400A (s/f). Recuperado 18:17, agosto 2, 2020, de Naylamp Mechatronics: https://naylampmechatronics.com/sensores-liquido/233-sensor-de-flujo-de-agua-1-fs400a.html?search_query=manometro+agua&results=42

Sensor de presión HK3022 0.5MPa (s/f). Recuperado 17:29, agosto 2, 2020, de Naylamp Mechatronics: https://naylampmechatronics.com/sensores-liquido/318-sensor-de-presion-hk3022-05mpa.html?search_query=manometro+agua&results=42

Simón Mori, G. (2018) Implementación, control y monitoreo de un sistema de riego por goteo subterráneo con microcontroladores (tesis de pregrado). Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima, Perú.

Válvula check Swing Neoprene 250 libras 1" (s/f). Recuperado 21:22, diciembre 6, 2020, de PROMART Homecenter: https://www.promart.pe/valvula-check-swing-neoprene-250-

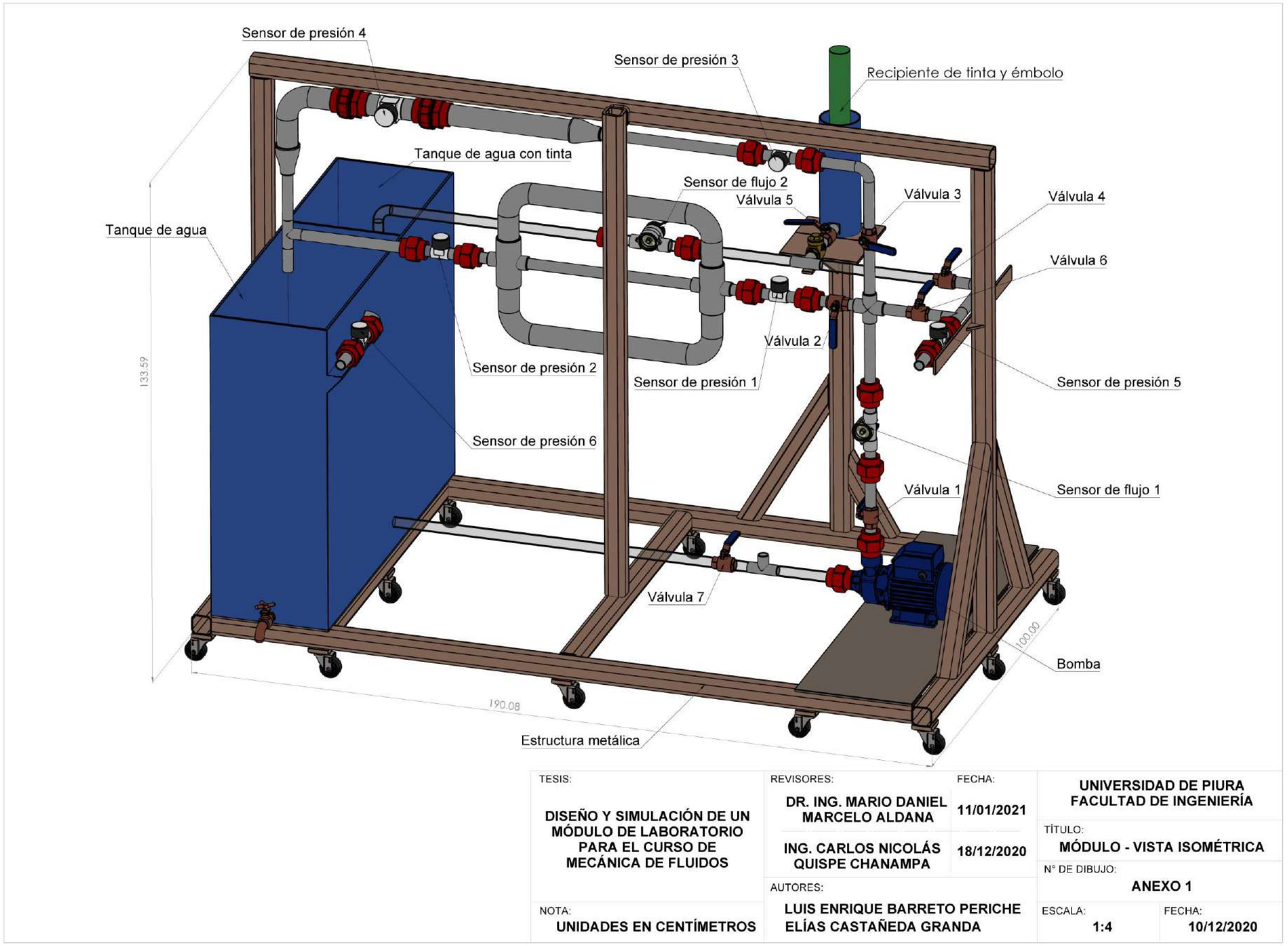
libras-1-/p?idsku=110324&gclid=CjwKCAiAn7L-BRBbEiwAl9UtkOQ-5VW9HOseSFuSRDqmZLnPz2P53ciY5b3oCsH2YNywDZ6gZ1Jt1hoCjWoQAvD_BwE

Válvula de bola cromada 1" (s/f). Recuperado 17:24, agosto 2, 2020, de PROMART Homecenter: https://www.promart.pe/valvula-de-bola-cromada-1/p

White, Frank M. (2004) Mecánica de Fluidos. (5ta ed.) España. MCGRAW-HILL / INTERAMERICANA DE ESPAÑA.

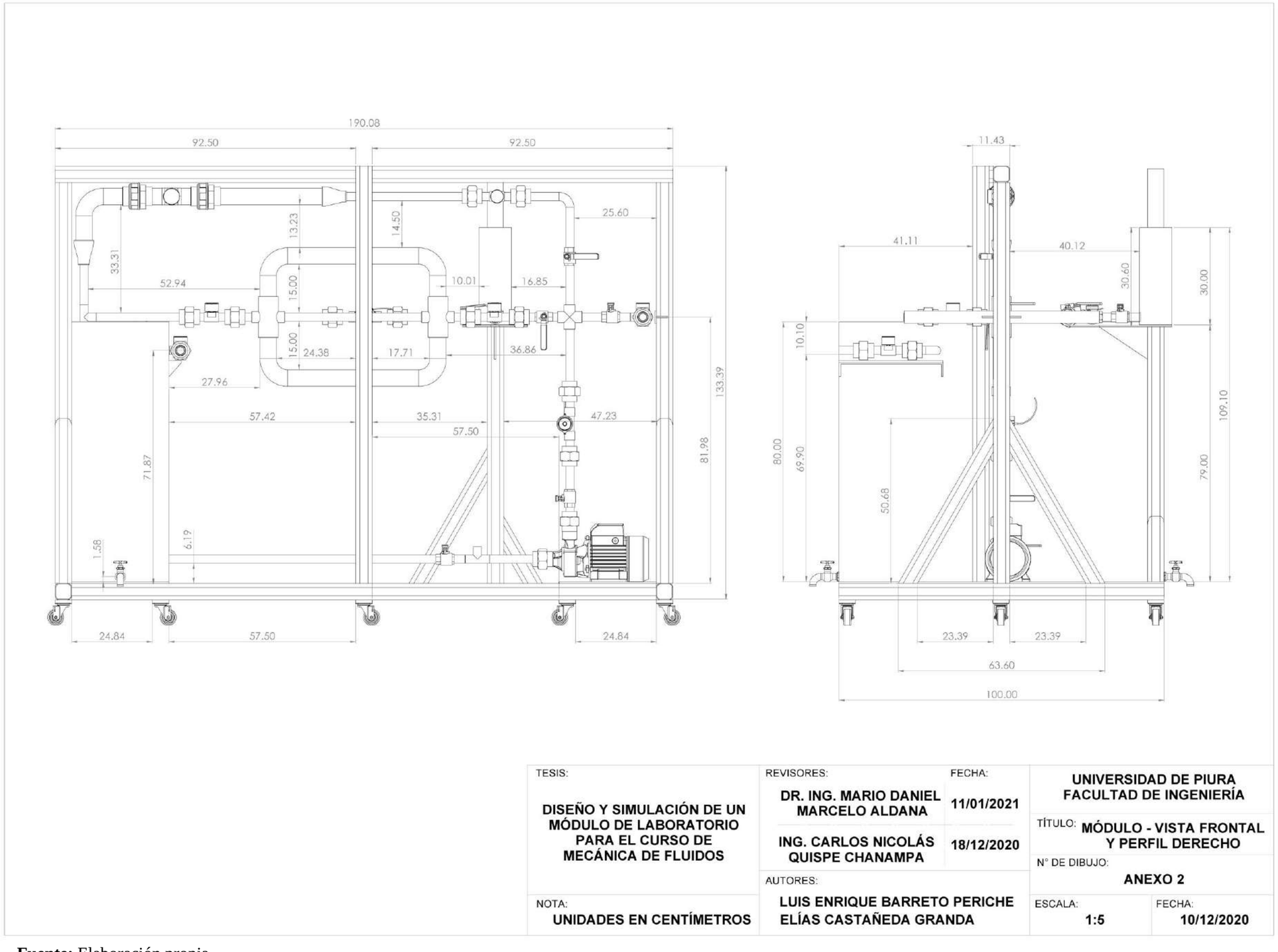
Anexos

Anexo 1. Módulo - Vista isométrica



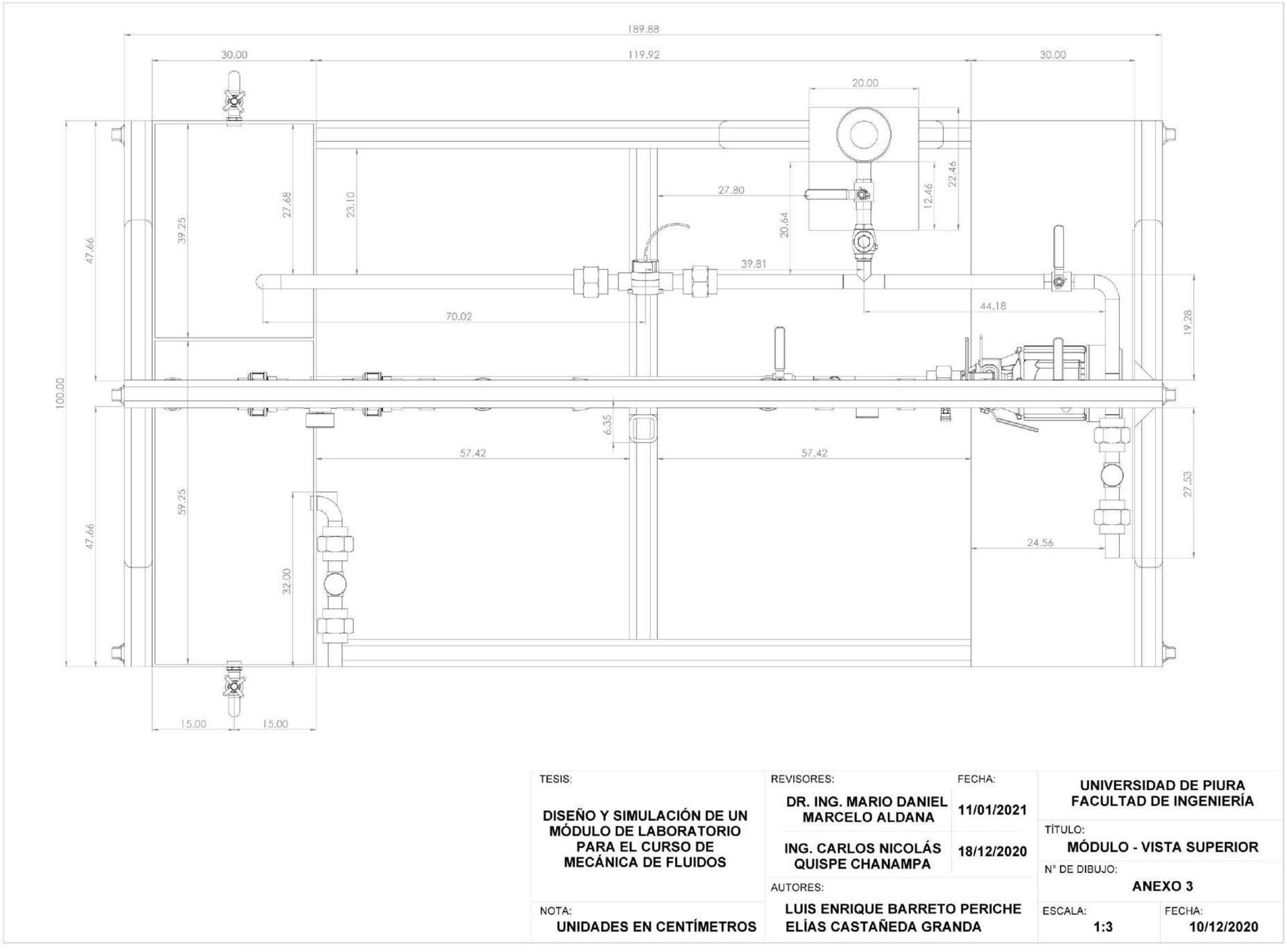
Fuente: Elaboración propia.

Anexo 2. Módulo - Vista frontal y Perfil derecho



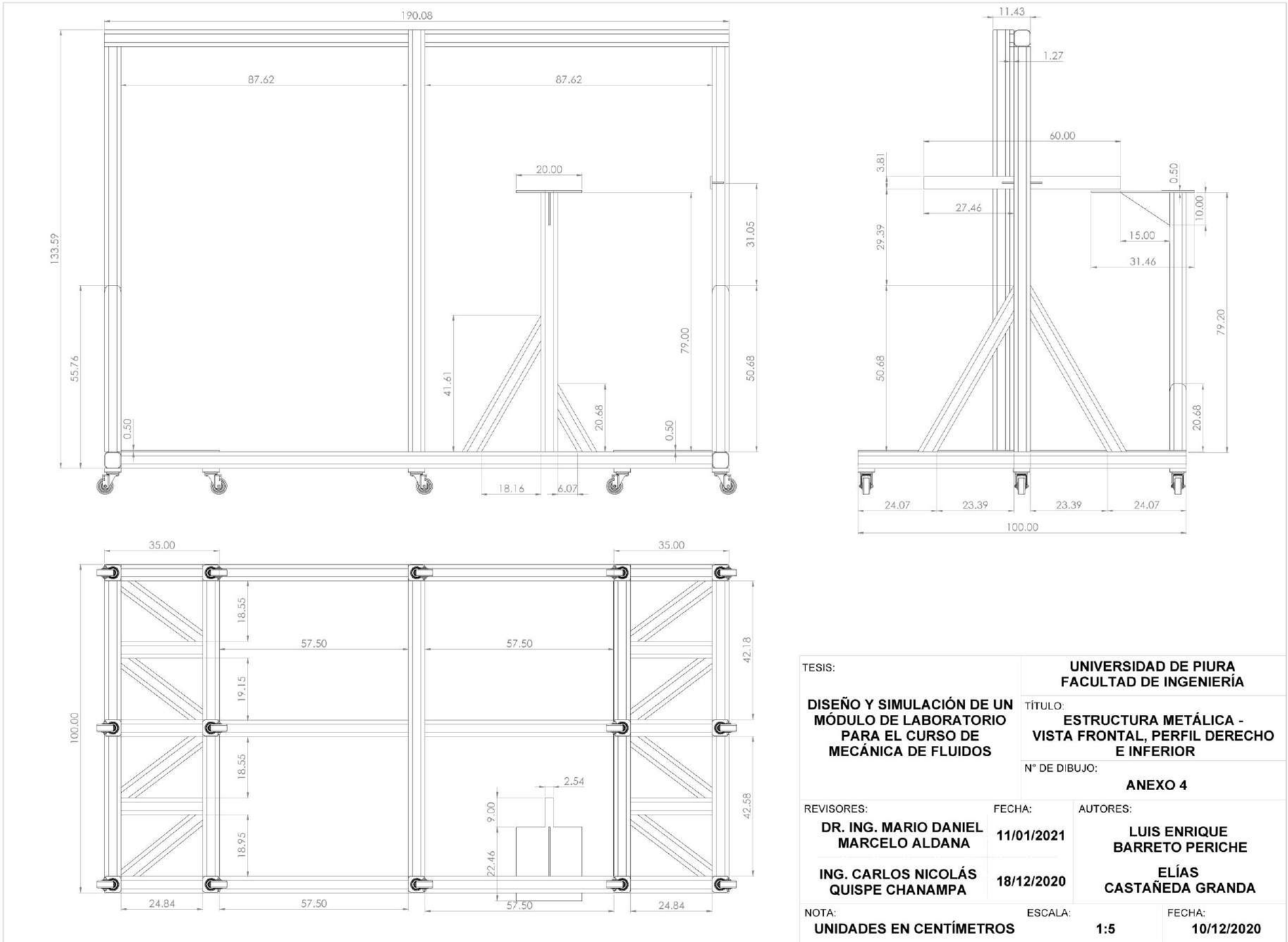
Fuente: Elaboración propia.

Anexo 3: Módulo - Vista superior



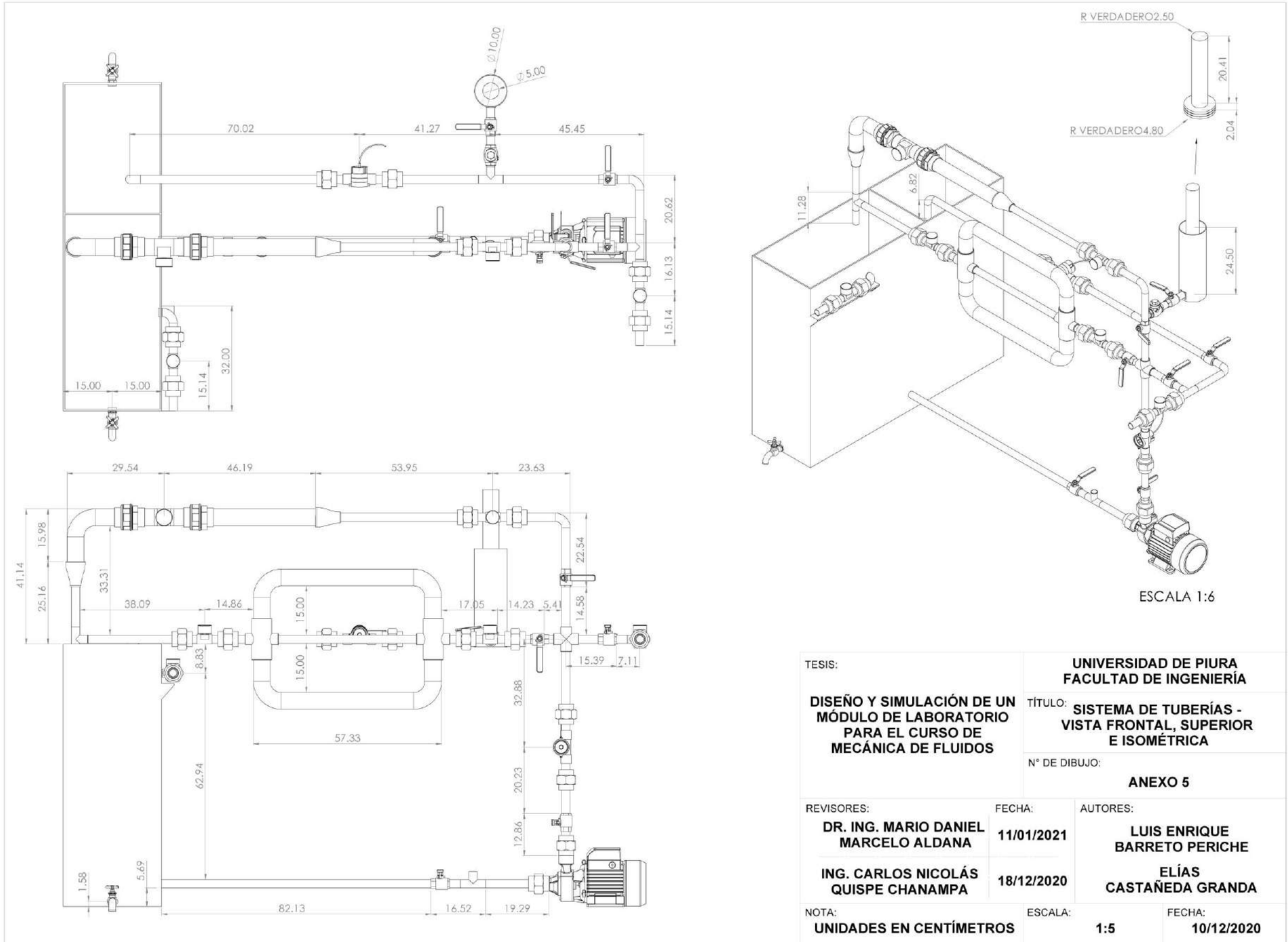
Fuente: Elaboración propia.

Anexo 4: Estructura metálica - Vista frontal, Perfil derecho e Inferior



Fuente: Elaboración propia.

Anexo 5: Sistema de tuberías - Vista frontal, Superior e Isométrica



Fuente: Elaboración propia.

Anexo 6. Nomenclatura

A	Área
D	Diámetro
$\boldsymbol{\varepsilon}$	Rugosidad absoluta
$\boldsymbol{f}$	Factor de fricción
g	Gravedad
$\boldsymbol{h}$	Pérdida de carga
$\boldsymbol{h_L}$	Pérdidas de carga primarias
$\boldsymbol{h_s}$	Pérdidas de carga secundarias
$\boldsymbol{K_{ij}}$	Coeficiente que indica la relación entre los caudales de distintas tuberías en paralelo
$\boldsymbol{K_s}$	Coeficiente de pérdida de carga en accesorios
$\boldsymbol{L}$	Longitud de la tubería
l/min	Litros por minuto
$\boldsymbol{NPSH}$	Net Positive Suction Head o Altura Neta Positiva en la Aspiración
P	Presión absoluta
$\boldsymbol{P_v}$	Presión de vapor
$\boldsymbol{\rho}$	Densidad
Q	Caudal
Re	Número de Reynolds
μ	Viscosidad dinámica del fluido
V	Velocidad
υ	Viscosidad cinemática del fluido

Fuente: Elaboración propia en base a Cengel, Y. & Cimbala, J. (2006).

Anexo 7. Coeficientes de pérdida de carga en accesorios

Accesorio	K_s
Válvula de bola abierta completamente	0.05
Válvula de bola 1/3 cerrada	5.5
Válvula de bola 2/3 cerrada	210
Cambio de sección de tubería	0.46
Codo de 90° de 2 pulgadas	0.57

Fuente: Datos extraídos de Cengel, Y. & Cimbala, J. (2006) p. 351, Munson (2009) p. 422, Farfán (s/f) y Crane Co. (1982) en *Appendix* A-26.

Anexo 8. Simulación estática de la estructura metálica

Se realizó una simulación estática de la estructura metálica en SolidWorks como se observa en la **figura 66** para determinar que los elementos de la estructura metálica no fallarían ante las cargas de diseño. Por dicho motivo, la simulación estática se realizó con cargas mayores a las de diseño: 350 kg para el área que soportaría los tanques, 120 kg para el área que soportaría la bomba y 10 kg para el área que soportaría el recipiente de tinta. Además, el tubo de la estructura metálica se simuló utilizando las propiedades mecánicas de un tubo de acero LAC ASTM A500.

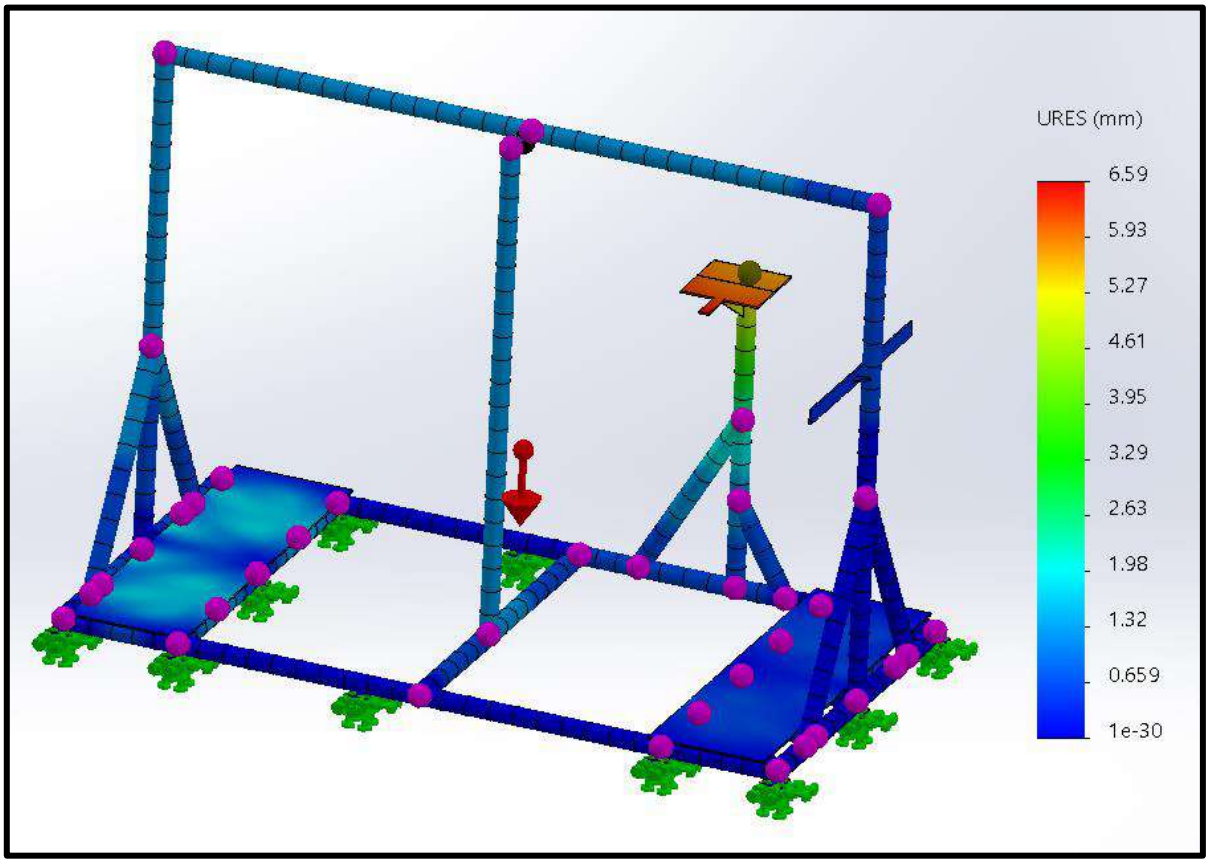


Figura 66. Simulación estática del desplazamiento en elementos de la estructura metálica.
Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en la **figura 66**, ningún elemento de la estructura sufre desplazamientos mayores a 2.5 mm en la base de los tanques o de la bomba y, así, los desplazamientos tan bajos (menores a 2.5 mm) permiten afirmar que ambas bases soportarán adecuadamente sus cargas respectivas de trabajo. El mayor desplazamiento alcanzado es de 6.59 mm y corresponde a la base del recipiente de tinta. No obstante, dicho desplazamiento no implica que el material haya fallado, pues el análisis según Von Mises de la simulación especifica que ningún elemento de

la estructura supera el límite elástico del material (270 MPa). Por lo tanto, el desplazamiento de 6.59 mm de la base del recipiente de tinta se atribuye a la inclinación de dicha base debido a la esbeltez de su tubo vertical de apoyo.

Anexo 9. Código de Arduino para la configuración de los sensores de caudal y presión

```
int sensorP1; //Inicializa la variable para el sensor de presión

int sensorQ1 = 2; //Inicializa la variable para el sensor de flujo de agua y se le asigna el pin digital
float factor_conversion1=0.72; // Coeficiente de corrección convierte pulsos en litros (Litros=Pulsos/factor)

void ContarPulsos1 () // Se crea una variable para contar los pulsos del sensor de flujo de agua
{
 NumPulsos1++; //incrementamos la variable de pulsos
}

int ObtenerFrecuencia1() //Se crea una variable, llamandola ObtenerFrencuencia
{
 int frecuencia1; // Se crea una variable, llamandola frecuencia
 NumPulsos1 = 0; //Ponemos a 0 el número de pulsos
 interrupts(); //Habilitamos las interrupciones
 delay(1000); //Se muestrea el número de pulsos que produce el sensor en 1 segundo
 noInterrupts(); //Desabilitamos las interrupciones
 frecuencia1=NumPulsos1; //Hz(pulsos por segundo)
 return frecuencia1; //Termine una función y devuelva un valor de una función a la función de llamada
}

void setup() {
 Serial.begin(9600); //Activamos el monitor serial

 Serial.println("CLEARDATA"); //Limpia data en archivo Excel de cualquier proyecto previo
 Serial.println("LABEL,Presión 1,Caudal 1"); //Nombre de columnas en archivo Excel
 Serial.println("RESETTIMER"); //Reinicia el timer en Excel

 pinMode(sensorP1, INPUT);

 pinMode(sensorQ1, INPUT); //Definimos las variables de sensor de flujo de agua como entrada, recibimos información.
 attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(2),ContarPulsos1,RISING); //activamos las interrupciones, se define el pin del sensor, la variable y el modo cuando se va activar la interrupción.
}

void loop() {
 sensorP1=analogRead(A1); //Se asigna a los sensores de presion los pines analógicos
 float presion1_m = (sensorP1*0.1405)-14.514; //Mediante la formula regresion simple resultado de la calibracion se transforma bits a presion en metros

 float frecuencia1=ObtenerFrecuencia1(); //obtenemos el número de pulsos en 1 segundo
```

```
  float caudal_L_m1=(frecuencia1/factor_conversion1)*60;  //calculamos el caudal en Litro/min

  Serial.print("DATA,");//Inicia envía datos a archivo Excel.
  Serial.print(presion1_m); //se imprime los datos procesados por el microcontrolador
  Serial.print(","); // se añade la separacion por coma entre cada variable
  Serial.println(caudal_L_m1,2);
  delay(1000);
}
```

Fuente: Código modificado y extraído de la tesis de pregrado de Simón Mori (2018).

Anexo 10. Especificaciones técnicas de elementos del módulo de laboratorio

1. Electrobomba centrífuga Werken 0.5 HP.

- Material: aluminio
- Máximo poder de descarga: 60 l/min
- Presión máxima de trabajo: 29 psi
- Diámetro de distribución: 1 pulgada
- Diámetro de succión: 1 pulgada
- Peso del producto: 7.5 kg
- Caudal máximo: 90 l/min
- Máximo de succión: 8 m

Fuente: Electrobomba Centrífuga Werken 0.5 HP (s/f). Recuperado de https://www.promart.pe/electrobomba-centrifuga-werken-0-5hp-1/p

2. Sensor de presión (HK3022 0.5MPa)

- Voltaje de operación: 5.0 VDC
- Voltaje de salida (analógica): 0.5 - 4.5 VDC
- Corriente de funcionamiento: <=10 mA
- Rango de presión de trabajo: 0 - 0.5 MPa (0-5 Bar ó 0-72.5psi)
- Presión máxima: 1.5 MPa
- Presión de ruptura: 3.0 MPa
- Tiempo de respuesta: <= 2.0 ms
- Error de medición: +/- 1 %FSO
- Error por temperatura: +/- 3.5 %FSO
- Temperatura de trabajo: 0 - 85°C
- Rosca de conexión: Macho G1/4 (BSP: Rosca Whitworth para tubos cilíndrica)
- Fluido de trabajo: Gas, Aire comprimido, Agua, Aceite.
- Dimensiones: 26 x 26 x 60 mm
- Conexiones: Rojo (5V), Negro(tierra) y Amarillo (Salida)

Fuente: Sensor de presión HK3022 0.5MPa (s/f). Recuperado de https://naylampmechatronics.com/sensores-liquido/318-sensor-de-presion-hk3022-05mpa.html?search_query=manometro+agua&results=42

3. Sensor de flujo de agua (FS400A)

- Voltaje de operación: 5V - 24V DC
- Consumo de corriente: 15mA (5V)
- Capacidad de carga: 10mA (5 VDC)
- Salida: Onda cuadrada pulsante
- Rango de Flujo: 1 - 60L/min
- Volumen promedio por pulso: 3.47mL
- Pulsos por litro: 280
- Factor de conversión: 4.8
- Rosca externa: 1" NPS
- Presión de trabajo máx.: 1.2MPa (12 bar)
- Temperatura de funcionamiento: -25ºC a 80ºC
- Material: Plástico color negro

Fuente: Sensor de flujo de agua 1" FS400A (s/f). Recuperado de https://naylampmechatronics.com/sensores-liquido/233-sensor-de-flujo-de-agua-1-fs400a.html?search_query=manometro+agua&results=42

Anexo 11. Código de Visual Basic en Excel para el laboratorio sobre el Teorema de Reynolds

Botón Calcular

```
Private Sub cmdcalcular_Clic()

Dim f, Error, LHS, RHS, longitud, diametro, caudal1, caudal, viscosidad,
area, velocidad, reynolds, rugosidad, rugosidad_absoluta, coef_friccion1,
perdiida_carga1, perdidad_carga As Double
Dim Coeffri2300, Coeffri4000 As Double
diametro = txtdiametro.Text
caudal1 = txtcaudal.Text
viscosidad = txtviscosidad.Text
rugosidad = txtrugosidad.Text
longitud = txtlongitud.Text

caudal = caudal1 / 60000
rugosidad_absoluta = rugosidad / 1000
area = 3.1415926 * (diametro ^ 2) / 4
velocidad = caudal / area
reynolds = velocidad * diametro / viscosidad

 If reynolds <= 2300 Then

    coef_friccion1 = (64 / reynolds)

    ElseIf 2300 < reynolds And reynolds < 4000 Then

    Coeffri2300 = 64 / 2300

    f = 1
    Workbooks("Formulas_cap_6(1).xlsm").Worksheets("Hoja1").Activate
    ActiveSheet.Range("Q9").Value = f
    ActiveSheet.Range("R3").Value = rugosidad_absoluta / diametro
    ActiveSheet.Range("R4").Value = 4000

    Worksheets("Hoja1").Range("T9").GoalSeek Goal:=0,
ChangingCell:=Worksheets("Hoja1").Range("Q9")

    Coeffri4000 = ActiveSheet.Range("Q9").Value

    coef_friccion1 = Coeffri2300 + (reynolds - 2000) * (Coeffri4000 -
Coeffri2300) / 2300

    ElseIf 4000 < reynolds And reynolds < 100000 Then
    'Código para Colebrook-White
    f = 1
```

```
    Workbooks("Formulas_cap_6(1).xlsm").Worksheets("Hoja1").Activate
    ActiveSheet.Range("Q9").Value = f
    ActiveSheet.Range("R3").Value = rugosidad_absoluta / diametro
    ActiveSheet.Range("R4").Value = reynolds

    Worksheets("Hoja1").Range("T9").GoalSeek Goal:=0,
ChangingCell:=Worksheets("Hoja1").Range("Q9")

    coef_friccion1 = ActiveSheet.Range("Q9").Value

    End If

perdida_carga = coef_friccion1 * (longitud / diametro) * ((velocidad ^ 2) /
(2 * 9.81))
perdida_carga1 = perdida_carga * 9806.38

Lblvelocidad = velocidad
Lblnumreynolds = reynolds
Lblperdida = perdida_carga1

End Sub
```

Fuente: Elaboración propia.

Botón Limpiar

```
Private Sub cmdlimpiar_Clic()

txtdiametro.Text = Clear
txtcaudal.Text = Clear
txtviscosidad.Text = Clear
Lblvelocidad = Clear
Lblnumreynolds = Clear
txtrugosidad.Text = Clear
txtlongitud.Text = Clear
Lblperdida = Clear

End Sub
```

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 12. Código de Visual Basic en Excel para el laboratorio sobre las Pérdida de carga de un sistema de tuberías conectadas en serie

Botón Calcular

```
Private Sub cmdcalcular_Clic()

Dim f, Error, LHS, RHS, perdida_total, perdida_accesorio_pa, longitud1,
longitud2, diametro1, diametro2, caudal1, caudal, viscosidad, area1, area2,
velocidad1, velocidad2, reynolds1, reynolds2, inlog1, inlog2, rugosidad,
rugosidad_absoluta, coef_friccion1, coef_friccion2, perdida_carga1,
perdida_carga1_pa, perdida_carga2, perdida_carga2_pa, perdida_accesorio As
Double
Dim Coeffri2300, Coeffri4000 As Double

diametro1 = txtdiametro1.Text
diametro2 = txtdiametro2.Text
caudal1 = txtcaudal.Text
viscosidad = txtviscosidad.Text
rugosidad = txtrugosidad.Text
longitud1 = txtlongitud1.Text
longitud2 = txtlongitud2.Text

caudal = caudal1 / 60000
rugosidad_absoluta = rugosidad / 1000
area1 = 3.1415926 * (diametro1 ^ 2) / 4
velocidad1 = caudal / area1
reynolds1 = velocidad1 * diametro1 / viscosidad

area2 = 3.1415926 * (diametro2 ^ 2) / 4
velocidad2 = caudal / area2
reynolds2 = velocidad2 * diametro2 / viscosidad

 If reynolds1 <= 2300 Then

    coef_friccion1 = (64 / reynolds1)

    ElseIf 2300 < reynolds1 And reynolds1 < 4000 Then

    Coeffri2300 = 64 / 2300

    f = 1
    Workbooks("Formulas_cap_6(1).xlsm").Worksheets("Hoja1").Activate
    ActiveSheet.Range("Q9").Value = f
    ActiveSheet.Range("R3").Value = rugosidad_absoluta / diametro1
    ActiveSheet.Range("R4").Value = 4000
```

```
    Worksheets("Hoja1").Range("T9").GoalSeek Goal:=0,
ChangingCell:=Worksheets("Hoja1").Range("Q9")

    Coeffri4000 = ActiveSheet.Range("Q9").Value

    coef_friccion1 = Coeffri2300 + (reynolds1 - 2000) * (Coeffri4000 -
Coeffri2300) / 2300

    ElseIf 4000 < reynolds1 And reynolds1 < 100000 Then
    'Cödigo para Colebrook-White
    f = 1
    Workbooks("Formulas_cap_6(1).xlsm").Worksheets("Hoja1").Activate
    ActiveSheet.Range("Q9").Value = f
    ActiveSheet.Range("R3").Value = rugosidad_absoluta / diametro1
    ActiveSheet.Range("R4").Value = reynolds1

    Worksheets("Hoja1").Range("T9").GoalSeek Goal:=0,
ChangingCell:=Worksheets("Hoja1").Range("Q9")

    coef_friccion1 = ActiveSheet.Range("Q9").Value

    End If

 perdida_carga1 = coef_friccion1 * (longitud1 / diametro1) * ((velocidad1 ^
2) / (2 * 9.81))
 perdida_carga1_pa = perdida_carga1 * 9806.38

 If reynolds2 <= 2300 Then

    coef_friccion2 = (64 / reynolds2)

    ElseIf 2300 < reynolds2 And reynolds2 < 4000 Then

    Coeffri2300 = 64 / 2300

    f = 1
    Workbooks("Formulas_cap_6(1).xlsm").Worksheets("Hoja1").Activate
    ActiveSheet.Range("Q9").Value = f
    ActiveSheet.Range("R3").Value = rugosidad_absoluta / diametro2
    ActiveSheet.Range("R4").Value = 4000

    Worksheets("Hoja1").Range("T9").GoalSeek Goal:=0,
ChangingCell:=Worksheets("Hoja1").Range("Q9")

    Coeffri4000 = ActiveSheet.Range("Q9").Value

    coef_friccion2 = Coeffri2300 + (reynolds2 - 2000) * (Coeffri4000 -
Coeffri2300) / 2300
```

```
    ElseIf 4000 < reynolds2 And reynolds2 < 100000 Then
    'Cödigo para Colebrook-White
    f = 1
    Workbooks("Formulas_cap_6(1).xlsm").Worksheets("Hoja1").Activate
    ActiveSheet.Range("Q9").Value = f
    ActiveSheet.Range("R3").Value = rugosidad_absoluta / diametro2
    ActiveSheet.Range("R4").Value = reynolds2

    Worksheets("Hoja1").Range("T9").GoalSeek Goal:=0,
ChangingCell:=Worksheets("Hoja1").Range("Q9")

    coef_friccion2 = ActiveSheet.Range("Q9").Value

    End If
 perdida_carga2 = coef_friccion2 * (longitud2 / diametro2) * ((velocidad2 ^
2) / (2 * 9.81))
 perdida_carga2_pa = perdida_carga2 * 9806.38

 perdida_accesorio = 0.46 * ((velocidad1) ^ 2) / (2 * 9.81)
 perdida_accesorio_pa = perdida_accesorio * 9806.38
 perdida_total = perdida_carga1_pa + perdida_carga2_pa +
perdida_accesorio_pa

Lblvelocidad1 = velocidad1
Lblnumreynolds1 = reynolds1
Lblperdida1 = perdida_carga1_pa

Lblvelocidad2 = velocidad2
Lblnumreynolds2 = reynolds2
Lblperdida2 = perdida_carga2_pa

Lblperdida_accesorio = perdida_accesorio_pa
Lblperdidastotal = perdida_total

End Sub
```

Fuente: Elaboración propia.

Botón Limpiar

```
Private Sub cmdlimpiar_Clic()
txtdiametro1.Text = Clear
txtdiametro2.Text = Clear
txtcaudal.Text = Clear
txtviscosidad.Text = Clear
Lblvelocidad1 = Clear
Lblvelocidad2 = Clear
Lblnumreynolds1 = Clear
Lblnumreynolds2 = Clear
```

```
txtrugosidad.Text = Clear
txtlongitud1.Text = Clear
txtlongitud2.Text = Clear
Lblperdida1 = Clear
Lblperdida2 = Clear
Lblperdida_accesorio = Clear
Lblperdidastotal = Clear

End Sub
```

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 13. Código de Visual Basic en Excel para el laboratorio sobre las Pérdida de carga de un sistema de tuberías en paralelo

Botón Calcular

```
Private Sub cmdcalcular_Clic()
Dim diametro1, diametro2, diametro3, longitud1, longitud2, longitud3,
caudal, viscocidad, rugosidad_absoluta As Double
Dim coef_friccion_supuesto1(100), coef_friccion_supuesto2(100),
coef_friccion_supuesto3(100) As Double
Dim coef_caudales_1_2_supuesto, coef_caudales_3_2_supuesto As Double
Dim caudal_1_supuesto, caudal_2_supuesto, caudal_3_supuesto, reynolds1,
reynolds2, reynolds3 As Double
Dim inlog1, inlog2, inlog3, coef_friccion_1_rectificado,
coef_friccion_2_rectificado, coef_friccion_3_rectificado As Double
Dim coef_caudales_1_2_rectificado, coef_caudales_3_2_rectificado As Double
Dim f, Error, LHS, RHS, caudal_1_rectificado, caudal_2_rectificado,
caudal_3_rectificado, caudal_in As Double
Dim Coeffri2300, Coeffri4000, area1, velocidad1 As Double
Dim perdida_carga, perdida_carga_accesorios, perdida_carga_pa As Double

diametro1 = txtdiametro1.Text
diametro2 = txtdiametro2.Text
diametro3 = txtdiametro3.Text
longitud1 = txtlongitud1.Text
longitud2 = txtlongitud2.Text
longitud3 = txtlongitud3.Text
caudal_in = txtcaudal.Text
caudal = caudal_in / 60000
viscosidad = txtviscosidad.Text
rugosidad_absoluta_in = txtrugosidadabs.Text
rugosidad_absoluta = rugosidad_absoluta_in / 1000

area1 = 3.1415926 * ((diametro1 ^ 2) / 4)

coef_friccion_supuesto1(1) = 0.11 * (rugosidad_absoluta / diametro1) ^ 0.25
coef_friccion_supuesto2(1) = 0.11 * (rugosidad_absoluta / diametro2) ^ 0.25
coef_friccion_supuesto3(1) = 0.11 * (rugosidad_absoluta / diametro3) ^ 0.25

i = 1
coef_friccion_supuesto1(0) = coef_friccion_supuesto1(1) + 5
coef_friccion_supuesto2(0) = coef_friccion_supuesto2(1) + 5
coef_friccion_supuesto3(0) = coef_friccion_supuesto3(1) + 5

While (coef_friccion_supuesto1(i) - coef_friccion_supuesto1(i - 1)) ^ 2 >
0.0001 ^ 2 And (coef_friccion_supuesto2(i) - coef_friccion_supuesto2(i -
1)) ^ 2 > 0.0001 ^ 2 And (coef_friccion_supuesto3(i) -
coef_friccion_supuesto3(i - 1)) ^ 2 > 0.0001 ^ 2
```

```
coef_caudales_1_2_supuesto = (((coef_friccion_supuesto2(i) * longitud2) ^
0.5) / (coef_friccion_supuesto1(i) * longitud1) ^ 0.5) * ((diametro1 /
diametro2) ^ 2.5)

coef_caudales_3_2_supuesto = (((coef_friccion_supuesto2(i) * longitud2) ^
0.5) / (coef_friccion_supuesto3(i) * longitud3) ^ 0.5) * ((diametro3 /
diametro2) ^ 2.5)

caudal_2_supuesto = caudal / (1 + coef_caudales_1_2_supuesto +
coef_caudales_3_2_supuesto)

caudal_1_supuesto = coef_caudales_1_2_supuesto * caudal_2_supuesto

caudal_3_supuesto = coef_caudales_3_2_supuesto * caudal_2_supuesto

    i = i + 1


    reynolds1 = (4 * caudal_1_supuesto) / (3.141592 * diametro1 *
viscosidad)

     If reynolds1 <= 2300 Then

    coef_friccion_supuesto1(i) = (64 / reynolds1)

    ElseIf 2300 < reynolds1 And reynolds1 < 4000 Then

    Coeffri2300 = 64 / 2300

    f = 1
    Workbooks("Formulas_cap_6(1).xlsm").Worksheets("Hoja1").Activate
    ActiveSheet.Range("Q9").Value = f
    ActiveSheet.Range("R3").Value = rugosidad_absoluta / diametro1
    ActiveSheet.Range("R4").Value = 4000

    Worksheets("Hoja1").Range("T9").GoalSeek Goal:=0,
ChangingCell:=Worksheets("Hoja1").Range("Q9")

    Coeffri4000 = ActiveSheet.Range("Q9").Value

    coef_friccion_supuesto1(i) = Coeffri2300 + (reynolds1 - 2000) *
(Coeffri4000 - Coeffri2300) / 2300

    ElseIf 4000 < reynolds1 And reynolds1 < 100000 Then
    'Cödigo para Colebrook-White
    f = 1
    Workbooks("Formulas_cap_6(1).xlsm").Worksheets("Hoja1").Activate
```

```
    ActiveSheet.Range("Q9").Value = f
    ActiveSheet.Range("R3").Value = rugosidad_absoluta / diametro1
    ActiveSheet.Range("R4").Value = reynolds1

    Worksheets("Hoja1").Range("T9").GoalSeek Goal:=0,
ChangingCell:=Worksheets("Hoja1").Range("Q9")

    coef_friccion_supuesto1(i) = ActiveSheet.Range("Q9").Value

    End If


    reynolds2 = (4 * caudal_2_supuesto) / (3.141592 * diametro2 *
viscosidad)

    If reynolds2 <= 2300 Then

    coef_friccion_supuesto2(i) = (64 / reynolds2)

    ElseIf 2300 < reynolds2 And reynolds2 < 4000 Then

    Coeffri2300 = 64 / 2300

    f = 1
    Workbooks("Formulas_cap_6(1).xlsm").Worksheets("Hoja1").Activate
    ActiveSheet.Range("Q9").Value = f
    ActiveSheet.Range("R3").Value = rugosidad_absoluta / diametro2
    ActiveSheet.Range("R4").Value = 4000

    Worksheets("Hoja1").Range("T9").GoalSeek Goal:=0,
ChangingCell:=Worksheets("Hoja1").Range("Q9")

    Coeffri4000 = ActiveSheet.Range("Q9").Value

    coef_friccion_supuesto2(i) = Coeffri2300 + (reynolds2 - 2000) *
(Coeffri4000 - Coeffri2300) / 2300

    ElseIf 4000 < reynolds2 And reynolds2 < 100000 Then
    'Cödigo para Colebrook-White
    f = 1
    Workbooks("Formulas_cap_6(1).xlsm").Worksheets("Hoja1").Activate
    ActiveSheet.Range("Q9").Value = f
    ActiveSheet.Range("R3").Value = rugosidad_absoluta / diametro2
    ActiveSheet.Range("R4").Value = reynolds2

    Worksheets("Hoja1").Range("T9").GoalSeek Goal:=0,
ChangingCell:=Worksheets("Hoja1").Range("Q9")

    coef_friccion_supuesto2(i) = ActiveSheet.Range("Q9").Value
```

```
    End If

    reynolds3 = (4 * caudal_3_supuesto) / (3.141592 * diametro3 *
viscosidad)

    If reynolds3 <= 2300 Then

    coef_friccion_supuesto3(i) = (64 / reynolds3)

    ElseIf 2300 < reynolds3 And reynolds3 < 4000 Then

    Coeffri2300 = 64 / 2300

    f = 1
    Workbooks("Formulas_cap_6(1).xlsm").Worksheets("Hoja1").Activate
    ActiveSheet.Range("Q9").Value = f
    ActiveSheet.Range("R3").Value = rugosidad_absoluta / diametro3
    ActiveSheet.Range("R4").Value = 4000

    Worksheets("Hoja1").Range("T9").GoalSeek Goal:=0,
ChangingCell:=Worksheets("Hoja1").Range("Q9")

    Coeffri4000 = ActiveSheet.Range("Q9").Value

    coef_friccion_supuesto3(i) = Coeffri2300 + (reynolds3 - 2000) *
(Coeffri4000 - Coeffri2300) / 2300

    ElseIf 4000 < reynolds3 And reynolds3 < 100000 Then
    'Cödigo para Colebrook-White
    f = 1
    Workbooks("Formulas_cap_6(1).xlsm").Worksheets("Hoja1").Activate
    ActiveSheet.Range("Q9").Value = f
    ActiveSheet.Range("R3").Value = rugosidad_absoluta / diametro3
    ActiveSheet.Range("R4").Value = reynolds3

    Worksheets("Hoja1").Range("T9").GoalSeek Goal:=0,
ChangingCell:=Worksheets("Hoja1").Range("Q9")

    coef_friccion_supuesto3(i) = ActiveSheet.Range("Q9").Value

    End If

Wend
```

```
coef_caudales_1_2_rectificado = (((coef_friccion_supuesto2(i) * longitud2)
^ 0.5) / (coef_friccion_supuesto1(i) * longitud1) ^ 0.5) * ((diametro1 /
diametro2) ^ 2.5)

coef_caudales_3_2_rectificado = (((coef_friccion_supuesto2(i) * longitud2)
^ 0.5) / (coef_friccion_supuesto3(i) * longitud3) ^ 0.5) * ((diametro3 /
diametro2) ^ 2.5)

caudal_2_rectificado = (caudal / (1 + coef_caudales_1_2_rectificado +
coef_caudales_3_2_rectificado))
caudal_1_rectificado = coef_caudales_1_2_rectificado * caudal_2_rectificado

caudal_3_rectificado = coef_caudales_3_2_rectificado * caudal_2_rectificado


velocidad1 = caudal_1_rectificado / area1
perdida_carga_accesorios = (2 * 0.57 * (velocidad1 ^ 2)) / (2 * 9.81)
perdida_carga = coef_friccion_supuesto1(i) * (longitud1 / diametro1) *
((velocidad1 ^ 2) / (2 * 9.81))

 perdida_carga_pa = (perdida_carga + perdida_carga_accesorios) * 9806.38



Lblcoef_friccion_rectificado1 = coef_friccion_supuesto1(i)
Lblcoef_friccion_rectificado2 = coef_friccion_supuesto2(i)
Lblcoef_friccion_rectificado3 = coef_friccion_supuesto3(i)
Lblcoef_caudales_1_2_rectificado = coef_caudales_1_2_rectificado
Lblcoef_caudales_3_2_rectificado = coef_caudales_3_2_rectificado
Lblcaudal_1_rectificado = caudal_1_rectificado * 60000
Lblcaudal_2_rectificado = caudal_2_rectificado * 60000
Lblcaudal_3_rectificado = caudal_3_rectificado * 60000
Lblperdida_carga = perdida_carga_pa

End Sub
```

Fuente: Elaboración propia.

Botón Limpiar

```
Private Sub cmdlimpiar_Clic()

txtdiametro1.Text = Clear
txtdiametro2.Text = Clear
txtdiametro3.Text = Clear
txtlongitud1.Text = Clear
txtlongitud2.Text = Clear
txtlongitud3.Text = Clear
txtcaudal.Text = Clear
txtviscosidad.Text = Clear
```

```
txtrugosidadabs.Text = Clear
Lblcoef_friccion_rectificado1 = Clear
Lblcoef_friccion_rectificado2 = Clear
Lblcoef_friccion_rectificado3 = Clear
Lblcoef_caudales_1_2_rectificado = Clear
Lblcoef_caudales_3_2_rectificado = Clear
Lblcaudal_1_rectificado = Clear
Lblcaudal_2_rectificado = Clear
Lblcaudal_3_rectificado = Clear
Lblperdida_carga = Clear

End Sub
```

Fuente: Elaboración propia.