

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

ESCUELA DE FORMACIÓN DE TECNÓLOGOS

SIMULACIÓN DE SISTEMAS DE SUMINISTRO DE AGUA CON ESTACIONES DE BOMBEO UTILIZANDO SIMSCAPE FLUIDS DEL SOFTWARE MATLAB.

TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE TECNÓLOGO EN AGUA Y SANEAMIENTO AMBIENTAL

Kevin Alexis Bedón Ruiz

kevin.bedon@epn.edu.ec

Juan Pablo Quinga Estrella

juan.quina@epn.edu.ec

DIRECTORA: ING. CATALINA ELIZABETH ARMAS FREIRE, MSC.

elizabeth.arms@epn.edu.ec

CODIRECTORA: ING. PATRICIA LORENA HARO RUIZ, PhD.

patricia.haro@epn.edu.ec

Quito, abril de 2021

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue desarrollado por los Sres. Bedón Ruiz Kevin Alexis y Quinga Estrella Juan Pablo como requerimiento parcial a la obtención del título de Tecnólogos en Agua y Saneamiento Ambiental, bajo nuestra supervisión:

Ing. Elizabeth Armas MSc.

DIRECTORA DEL
PROYECTO

Ing. Patricia Haro PhD.

CODIRECTORA DEL PROYECTO

DECLARACIÓN

Nosotros, Kevin Alexis Bedón Ruiz con CI: 1722700794 y Juan Pablo Quinga Estrella con CI: 1719395459, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

Sin perjuicio de los derechos reconocidos en el primer párrafo del artículo 144 del Código Orgánico de la Economía Social de los Conocimientos, Creatividad e Innovación – COESC-, somos titulares de la obra en mención y otorgamos una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva de uso con fines académicos a la Escuela Politécnica Nacional.

Entregamos toda la información técnica pertinente, en caso de que hubiese una explotación comercial de la obra por parte de la EPN, se negociará los porcentajes de los beneficios conforme lo establece la normativa nacional vigente.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1	Introducción	12
1.1	Planteamiento del Problema	13
1.2	Objetivo general.....	13
1.3	Objetivos específicos	13
2	Marco teórico	14
2.1	Software de simulación de sistemas hidráulicos	14
2.2	Matlab.....	15
2.3	Sistemas de suministro de agua	17
3	Metodología.....	18
3.1	Descripción de uso de la herramienta computacional Matlab.....	18
3.2	Simulación del sistema de suministro de agua utilizando el Simscape Fluids.	35
3.3	Simulación del sistema de bombeo de la Junta Administradora de Agua Potable y Saneamiento de Cutuglagua (JAAPS-C).....	37
3.4	Elaboración de la guía	45
4	Resultados y Discusión.....	46
4.1	Modelación y simulación del sistema de suministro de agua con estaciones de bombeo.	46
4.2	Resultados obtenidos por la variación de parámetros.	47
4.3	Modelación y simulación del sistema de bombeo de la Junta Administradora de Agua Potable y Saneamiento de Cutuglagua (JAAPS-C).	57
4.4	Comparación de resultados teóricos y simulados.	64
4.5	Identificación de características operativas del sistema de bombeo simulado.	67
4.6	Guía para la simulación de un sistema de suministro de agua.....	71
5	Conclusiones y Recomendaciones	72
5.1	Conclusiones	72
5.2	Recomendaciones	73
6	Referencias Bibliográficas.....	74
	ANEXO	78

Anexo 1: Levantamiento de datos en el sistema de bombeo de la comunidad de cutuglagua i	
Anexo 2: Diagramas	xi
Anexo 3 Tablas	xiii
Anexo 4: Cálculos del ejercicio teórico	xiv
Anexo 5: Cálculos de parámetros del sistema de la JAAPS-C	xvii
Anexo 6: Cálculos de perdidas por fricción y locales.....	xxii
Anexo 7: Cálculos del aire en la tubería	xxiv

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Interfaz del software Epanet (WordPress, 2019)	14
Figura 2. Sistema de distribución de agua de Locken Access solutions.).....	17
Figura 3. Ventana Inicio Matlab.....	18
Figura 4. Ventana Current Folder.....	19
Figura 5. Ventana Command Windows.....	19
Figura 6. Ventana Workspace.....	20
Figura 7. Espacio de trabajo Details.....	20
Figura 8. Ventana Simulink	21
Figura 9. Ventana de opciones de Simulink	21
Figura 10. Entorno de Simulink	22
Figura 11. Bloque Library browser	22
Figura 12. Ventana Simscape	23
Figura 13. Simscape Fluids.....	23
Figura 14. Ventana Hydraulics (Isothermal)	24
Figura 15. Bloque Constant head tank.....	25
Figura 16. Ventana de parámetros del bloque Constant head tank.....	25
Figura 17. Bloque Hydraulic Reference.....	25
Figura 18. Bloque Resistive Pipe LP	26
Figura 19. Ventana parámetros del bloque Resistive Pipe LP.....	27
Figura 20. Bloque Hydraulic Fluid	27
Figura 21. Ventana de parámetros del bloque Hydraulic Fluid	28
Figura 22. Bloque Solver configuration	28
Figura 23. Ventana de parámetros del bloque Solver configuration	29
Figura 24. Bloque Hydraulic Flow Rate Sensor.....	29
Figura 25. Bloque Display	30
Figura 26. Bloque PS-simulink converter	30
Figura 27. Ventana de parámetros del bloque PS-simulink converter	30
Figura 28. Subsystems “V”.....	30
Figura 29. Bloque Mux	31
Figura 30 Subsystem Pump Station	31
Figura 31. Bloques del Subsystems Pump Station.....	32

Figura 32. Bloque Centrifugal Pump	32
Figura 33. Ventana de parámetros del bloque Centrifugal Pump	33
Figura 34. Bloque PS Constant (Pump Speed)	33
Figura 35. Ventana de parámetros bloque PS Constant (Pump Speed).....	34
Figura 36. Bloque Mechanical Rotational Reference.....	34
Figura 37. Bloque Ideal Angular Velocity Source	35
Figura 38. Ejemplo de comando sh_water_supply_system.....	35
Figura 39. Simulación del sistema de suministro de agua.....	36
Figura 40. Simulación dentro de la estación 1.....	36
Figura 41. Conexión interna del sistema de bombeo Subsystem Pump Station.....	44
Figura 42. Conexiones de los bloques de Simscape Fluids	44
Figura 43. Resultado de simulación del sistema de suministro de agua con estaciones de bombeo.....	46
Figura 44. Gráfica de volumen vs tiempo en el bloque Tank Station 4.....	47
Figura 45. Gráfica de presión vs tiempo en el bloque Tank Station 4.....	48
Figura 46. Gráfica de caudal vs tiempo en el bloque Tank Station 4.....	48
Figura 47. Gráfica de volumen vs tiempo en el bloque Tank Station 4, modificando de 200 mm a 500 mm en toda la tubería.....	49
Figura 48. Gráfica de presión vs tiempo en el bloque Tank Station 4, modificando de 200 mm a 500 mm en toda la tubería.....	50
Figura 49. Gráfica de caudal vs tiempo en el bloque Tank Station 4 modificando de 200 mm a 500 mm en toda la tubería.....	51
Figura 50. Gráfica de presión vs tiempo en el bloque Tank Station 1	53
Figura 51. Gráfica de caudal vs tiempo en el bloque Tank Station 1	53
Figura 52. Gráfica de presión vs tiempo en el bloque Tank Station 1, modificando de 1700 rpm a 3000 rpm en la Pump Station 1.....	54
Figura 53. Gráfica de caudal vs tiempo en el bloque Tank Station 1, modificando de 1700 rpm a 3000 rpm en la Pump Station 1.....	55
Figura 54. Resultado de la simulación del sistema de la JAAPS-C	57
Figura 55. Gráfica de presión vs tiempo en el bloque Constant Head Tank	58
Figura 56 Gráfica de caudal vs tiempo en el bloque Constant Head Tank	58
Figura 57 Gráfica de presión vs tiempo en el bloque Constant Head Tank, modificando la altura piezométrica.....	59
Figura 58 Gráfica de caudal vs tiempo en el bloque Constant Head Tank, modificando la altura piezométrica	60
Figura 59. Gráfica de caudal vs tiempo en el Bloque Resistive Pipe LP 3.....	61

Figura 60. Gráfica de caudal vs tiempo en Bloque Resistive Pipe LP 3, modificando de 3600 rpm a 3000 rpm en la Pump Station 1.....	62
Figura 61. Resultado del caudal en la simulación del sistema de distribución de agua a gravedad.....	64
Figura 62. Resultado del caudal en la simulación del sistema de la JAAPS-C	65
Figura 63. Caudal del sistema de la JAAPS-C	67
Figura 64. Velocidad angular de la bomba del sistema de la JAAPS-C.....	68
Figura 65. Torque de la bomba del sistema de la JAAPS-C.....	68
Figura 66. Presión de descarga de la bomba del sistema de la JAAPS-C.....	69
Figura 67. Características operativas de la bomba del sistema de la JAAPS-C	70
Figura 68. Código QR del video de la simulación del sistema de la JAAPS-C	71
Figura 69. Código QR de la Guía para la simulación de un sistema de suministro de agua	71
Figura 70. Pozo del Sistema de la JAAPS-C.....	i
Figura 71. Tanque 2 de distribución del Sistema de la JAAPS-C	ii
Figura 72. Tanque 2 de distribución del Sistema de la JAAPS-C (vista frontal).....	ii
Figura 73. Tubería de succión desde el tanque 1 al sistema de bombeo	iii
Figura 74 Tubería de succión con reducción al ingreso de la bomba	iv
Figura 75. Tubería de descarga desde el sistema de bombeo al tanque 2.....	v
Figura 76. Bomba del sistema de bombeo de JAAPS-C.....	v
Figura 77. Placa del motor	vi
Figura 78. Potencia de trabajo del motor.....	vi
Figura 79. Frecuencia del motor	vii
Figura 80. Voltaje de alimentación del motor	vii
Figura 81. Corriente de alimentación del motor.....	vii
Figura 82. Placa de la bomba	viii
Figura 83. Altitud del Tanque 1 en la aplicación mobile topografic	viii
Figura 84. Altitud del Tanque 2 en la aplicación mobile topografic	ix
Figura 85. Altitud del sistema de bombeo de JAAPS-C en la aplicación mobile topografic ...	ix
Figura 86. Velocidad y Caudal de entrega tomada en el Caudalímetro	x
Figura 87. Manómetro de la tubería a la salida de la bomba	x
Figura 88. Distribución de agua del sistema de la JAAPS-C	xi
Figura 89. Ejercicio de bibliografía	xii
Figura 90. Diagrama de Moody (Wikipedia, 2020)	xiii
Figura 91. Diagrama del ejercicio teórico	xiv
Figura 92. Curva característica de la bomba.....	xviii

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Ventajas al usar el software de Epanet.	14
Tabla 2. Ventajas al usar el software de Matlab.	15
Tabla 3. Parámetros del Bloque Constant head tank	38
Tabla 4. Parámetros del Bloque Resistive Pipe LP 1.	38
Tabla 5. Parámetros del Bloque Resistive Pipe 2.....	39
Tabla 6. Parámetros del Bloque Resistive Pipe 3.....	40
Tabla 7. Parámetros del bloque “Hydraulic fluid”.	42
Tabla 8. Parámetros del Bloque Centrifugal Pump.....	42
Tabla 9. Resultados de la simulación del sistema de suministro de agua con estaciones de bombeo en el tiempo de 200s.	46
Tabla 10. Comparativa de resultados en el bloque Tank Station 4 del sistema de suministro de agua con estaciones de bombeo.....	51
Tabla 11. Variación porcentual en el bloque Tank Station 4 del sistema de suministro de agua con estaciones de bombeo.	52
Tabla 12. Comparativa de resultados en el bloque Tank Station 1 del sistema de suministro de agua con estaciones de bombeo.....	55
Tabla 13. Variación porcentual en el bloque Tank Station 1 del sistema de suministro de agua con estaciones de bombeo.	56
Tabla 14. Comparativa de resultados en el bloque Constant Head Tank del sistema de la JAAPS-C.....	60
Tabla 15. Variación porcentual en el bloque Constant Head Tank del sistema la JAAPS-C.60	
Tabla 16. Comparativa de resultados en el Bloque Resistive Pipe LP 3 del sistema de la JAAPS-C.....	62
Tabla 17. Variación porcentual en el Bloque Resistive Pipe LP 3 del sistema de la JAAPS-C.	63
Tabla 18. Comparativa del caudal obtenido en la simulación y en la resolución teórica del ejercicio.....	64
Tabla 19. Comparativas de los resultados de caudales, en el sistema de la JAAPS-C.	66
Tabla 20. Comparativas de los resultados de presiones de salida de la bomba en el sistema de la JAAPS-C.....	66
Tabla 21. Rugosidades absolutas de materiales	xiii
Tabla 22. Calculo del tiempo de llenado.....	xix
Tabla 23. Cálculo del caudal real por método volumétrico.	xx

Tabla 24. Tabla de Bunsen xxiv

RESUMEN

El presente proyecto integrador tiene como finalidad la simulación de sistemas de suministro de agua con estaciones de bombeo utilizando Simscape Fluids del software Matlab, debido a que las exigencias de los consumidores en las comunidades que se atienden en el territorio por el líquido vital, han dado sitio a nuevos procesos para minimizar tiempos en el análisis de resultados, por lo cual las simulaciones en software son una opción para encarar a los desafíos impuestos de los métodos tradicionales de implementación y construcción.

Se estudió las bibliotecas y comandos con los conceptos básicos del software mencionado, además de los fundamentos teóricos, se explicó de forma general todos los argumentos necesarios para el trabajo de investigación. Se inició con datos hidráulicos obtenidos de fuentes bibliográficas y datos hidráulicos tomados en campo; para posteriormente simular el sistema de suministro con varias estaciones de bombeo y el sistema de bombeo de la Junta Administradora de Agua Potable y Saneamiento de Cutuglagua (JAAPS-C).

El proceso general para el desarrollo de las simulaciones en el software Matlab y Simulink fue la asesoría de los desarrolladores y justificación experimental y bibliográfica de las configuraciones de los elementos utilizados.

Finalmente, para la verificación de los resultados se usó una comparativa teórica de similar característica en el tema hidráulico, variando características de operación en los sistemas simulados.

ABSTRACT

The purpose of this integrative project was to simulate water supply systems with pumping stations using Simscape Fluids from Matlab software, due to the fact that the demands of consumers in the communities that are served in the territory by the vital liquid, have given rise to new processes to minimize times in supply and supply of drinking water, for which the digital simulations in software show as an effective choice, to face the challenges imposed by the traditional methods of implementation and construction.

The libraries and commands were studied with the basic concepts of the aforementioned software, in addition to the theoretical foundations, all the necessary arguments for the research work were explained in a general way. It began with hydraulic data obtained from bibliographic sources and hydraulic data taken in the field, to later simulate the supply system with several pumping stations and the pumping system of the Cutuglagua Potable Water and Sanitation Administration Board (JAAPS-C).

The general process for the development of the simulations in the Matlab and Simulink software was the advice of the developers, justifying all the points to represent the research work model.

Finally, to verify the results, a theoretical comparison with a similar characteristic was used in the hydraulic issue, varying the operating characteristics in the simulated systems in percentage terms.

1 INTRODUCCIÓN

El avance tecnológico en la última década en el campo de sistemas informáticos ha cambiado la gestión, diseño y construcción de los sistemas de suministro y abastecimiento de agua por las empresas gestoras. La estrategia de hoy en día para mejorar la calidad y rendimiento de las redes de suministro de agua es la construcción de modelos y simulaciones matemáticas de estos sistemas. Además, las simulaciones se utilizan como instrumento de apoyo en el aprendizaje y estudio de sistemas hidráulicos. (Pérez López, 2015)

La presente investigación describe cómo se desarrolla la simulación de sistemas de suministro de agua con estaciones de bombeo, que se realizó basándose en conocimientos detallados con comandos básicos y herramientas necesarias para la utilización del software, además se describió las bibliotecas, componentes y diagramas de bloques del Simscape del entorno de Matlab, que crea un modelo físico para la simulación del sistema de suministro de agua.

La simulación de la estación de bombeo consta de tanques, bombas centrífugas, un motor principal y tuberías. Para dicho análisis y su respectiva modelación se utilizó herramientas basadas en la plataforma de simulación "Simulink" de Matlab, y criterios físicos de diseño que se utilizaron en diagramas de bloques del Simscape Fluids.

Además, se calculó teóricamente varios parámetros, que se compararon con los resultados de la simulación del modelo real de un sistema de bombeo. Con los datos proporcionados de la JAAPS-C se obtuvo como resultados: características operativas, variaciones porcentuales debido a modificación de parámetros y mediciones de variables del sistema. También se indicó ventajas de realizar simulaciones en fase de diseño previo a la implementación y construcción de un sistema de bombeo.

Finalmente, se realizó una guía de simulación de un sistema de suministro de agua, en el cual se redactó de forma detallada todo el proceso que se debe seguir, desde la descarga e instalación, hasta la simulación usando el Simscape Fluids del software Matlab. Esta guía será utilizada por los estudiantes como base para próximos estudios en el campo de aprendizaje de sistemas hídricos.

1.1 Planteamiento del Problema

Para realizar evaluaciones y diseños de sistemas de suministro de agua, se debe realizar cálculos matemáticos para determinar: pérdidas en succión, pérdidas en impulsión, alturas estática y dinámica, potencia y eficiencia de bombeo, realizar estas operaciones de forma manual puede resultar muy tedioso y repetitivo, para resolver el problema anteriormente mencionado es posible usar programas computacionales de simulación, permitiendo alcanzar sistemas de suministro eficientes, sin la necesidad de hacer pruebas en laboratorios físicos en el campo de la hidráulica. (Pérez, 2015)

El proceso de enseñanza-aprendizaje en la materia de Distribución de Agua, se fundamenta en conceptos y cálculos teóricos; sin embargo, éstos no son comprobados en la práctica, lo que provoca que los estudiantes no consoliden lo aprendido en las aulas. (Pulido, 2017)

1.2 Objetivo general

Simular sistemas de suministro de agua con estaciones de bombeo utilizando Simscape Fluids del software Matlab.

1.3 Objetivos específicos

- Describir el uso de la herramienta computacional Matlab.
- Simular un sistema de suministro de agua con estaciones de bombeo utilizando el Simscape Fluids.
- Realizar la simulación del sistema de bombeo de la JAAPS-C.
- Elaborar una guía de simulación de un sistema de suministro de agua con estaciones de bombeo, para los estudiantes.

2 MARCO TEÓRICO

2.1 Software de simulación de sistemas hidráulicos

Epanet

El programa computacional Epanet es desarrollado por la EPA (Environmental Protection Agency) de los Estados Unidos, realiza simulaciones del comportamiento hidráulico y de la calidad en un ciclo extendido del agua en redes de tuberías a presión. Epanet relaciona algoritmos de cálculo, con una interfaz gráfica que estudia la concentración de la sustancia del flujo en las tuberías (Figura 1). Además, calcula el caudal que transita por todas las conducciones, el nivel de agua en cada tanque, la concentración de diferentes elementos químicos por medio de la red, la permanencia del agua en las tuberías y el origen del agua en cada punto de la red. (Lewis A, 2017)

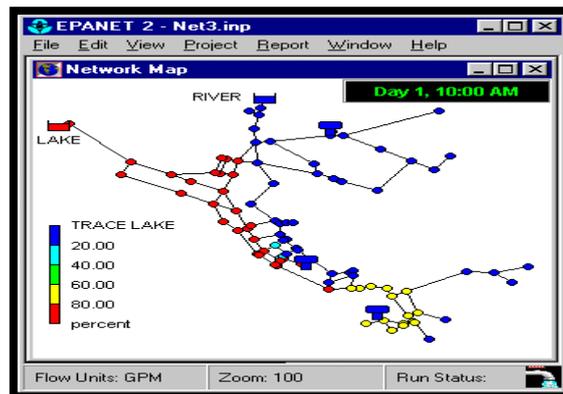


Figura 1. Interfaz del software Epanet (WordPress, 2019)

Tabla 1. Ventajas al usar el software de Epanet.

Ventajas de usar Epanet
Los resultados obtenidos en la simulación en Epanet, son utilizados en la selección y dimensionamiento de partes como: diámetros, presiones, potencia de bombeo, pérdidas de energía, válvulas de regulación, tanques de la red de distribución de agua potable, etc.
Evalúa el consumo, comportamiento y costo de energía en la operación de los sistemas de bombeo.
Evalúa el nivel de agua en los tanques de operación del sistema de suministro de agua.

2.2 Matlab

Es un entorno informático de altas prestaciones para la computación en diversas áreas, que a través del procesamiento de datos desarrollan, simulan y programan distintos tipos de problemas, como la visualización de flujos de potencia en aeronaves o el análisis de acciones en la bolsa, todo mediante simulaciones; es decir, Matlab se aplica en cualquier disciplina basada en ecuaciones matemáticas. (MathWorks, 2017)

Matlab se desempeña en el campo académico, científico e industrial, porque su interfaz de escritorio es sencillo y amigable al momento de examinar los sistemas. Sus gráficas integradas facilitan la visualización de datos y la obtención de información. En el tema de diseños y resultados desarrollados por Matlab, su centro de desarrollo tecnológico prueba rigurosamente todas sus funcionalidades. (MathWorks, 2017)

Además, Matlab posee un kit de herramientas llamado Epanet – Matlab, que es un software de código abierto, desarrollado originalmente por el Centro de Investigación para Sistemas y Redes Inteligentes de la Universidad de Chipre, que opera dentro del entorno de Matlab, para proporcionar una interfaz de programación en un software informático de alto nivel en el campo de la hidráulica. El objetivo de Epanet Matlab Toolkit es servir como un marco de programación común para la investigación y el desarrollo en el creciente campo de las redes de agua inteligentes. (MkDocs, 2020)

Entre el uso de las aplicaciones de Matlab están la biología computacional, análisis y diseño de sistemas de energía, mantenimiento predictivo, robótica, mecatrónica entre otras. Los sectores que utilizan Matlab son: aeroespacial, producción de energía, industria, biotecnología, farmacéutica, electrónica, dispositivos médicos, etc. (MathWorks, 2017)

Tabla 2. Ventajas al usar el software de Matlab.

Ventajas de usar Matlab
Controla con el lenguaje matemático el análisis de datos hidráulicos, procesamiento de señales e imágenes, diseño de control y otras aplicaciones en referencia a fluidos.
Matlab es considerado un software completo y fácil de usar, debido a que incluye herramientas de funcionalidad intuitiva para el usuario.
Las toolboxes de Matlab ofrecen características detalladas a nivel profesional.

MathWorks comprueba continuamente la calidad del software de Matlab.
--

Matlab incluye un asesoramiento personalizado y una web interactiva con soluciones al instante ante cualquier duda del usuario.

Simulink

Es un entorno que desarrolla sistemas dinámicos con métodos gráficos que simulan un multidominio de diseño, basándose en modelos predeterminados en Simulink. Además, otorga un editor gráfico, bibliotecas de bloques personalizables y solucionadores para modelar cualquier sistema. (Center, 2021)

Simscape

Crea modelos físicos dentro del entorno Simulink. Al usar Simscape se usan conexiones físicas de acuerdo con diagramas de bloque, es posible modelar sistemas como actuadores hidráulicos, sistemas de refrigeración, motores eléctricos, etc. Simscape en cooperación conjunta con Matlab, desarrolla sistemas de control y comprueba su rendimiento. (The MathWorks, Simscape, 2020)

Simscape Fluids

Las librerías de Simscape Fluids otorgan elementos para simular sistemas de fluidos; como, por ejemplo: válvulas, bombas, conductos, actuadores de calor hidráulicos, etc. Además, los elementos se usan para desarrollar sistemas de energía hidráulica, como por ejemplo sistemas de turbinas en la generación de energía en hidroeléctricas. (The MathWorks, Simscape Fluids, 2020)

Aplicaciones destacadas:

- Modelamiento de sistemas de energía de fluidos personalizados.
- Evaluación de efectos térmicos.
- Diseño de algoritmos de control.
- Transporte de fluidos.

(The MathWorks, Simscape Fluids, 2020)

SimHydraulics

Ofrece componentes personalizados de sistemas hidráulicos (modelos) como: diferentes tipos de bombas y motores, diferentes tipos de válvulas (flujo, presión, alivio, direcciones, etc.), diferentes tipos de tanques y tuberías, sensores, etc. Es decir, esta librería contiene

todas las herramientas y elementos para modelar sistemas de transporte de fluidos. (MathWorks, 2017)

2.3 Sistemas de suministro de agua

El sistema de suministro de agua asegura a la población el abastecimiento eficiente y continuo de agua en cantidad y presión adecuada, durante un periodo de 20 a 25 años. La cantidad de agua en los sistemas está determinada por el consumo de los usuarios (Figura 2). (Chamaidan Gomez, 2017)

En la línea de distribución existen diversos componentes como: tuberías principales, tuberías secundarias, tuberías terciarias, estaciones de bombeo, tanques de almacenamiento intermedios, dispositivos para macro y micro medición, diferentes tipos válvulas y derivaciones domiciliarias. (Chamaidan Gomez, 2017)

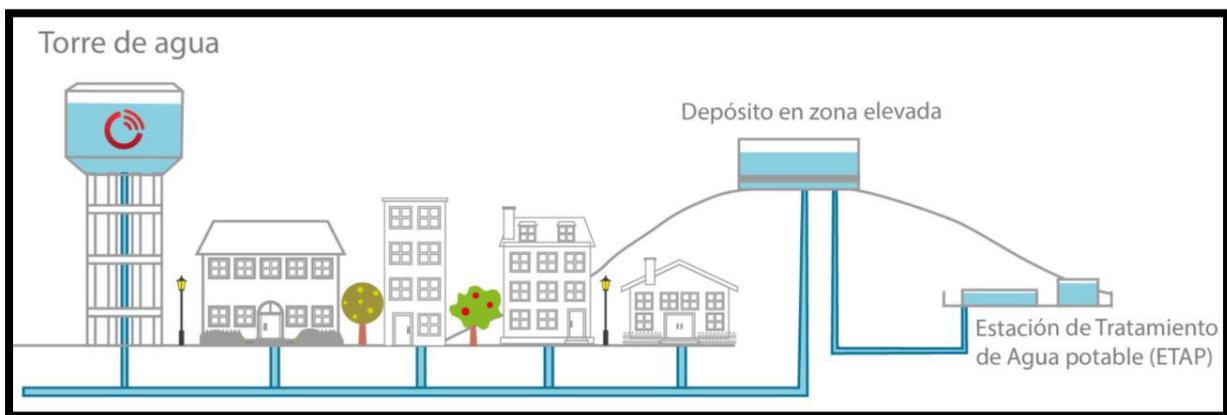


Figura 2. Sistema de distribución de agua de Locken Access solutions. (Lenntech, 2021)

3 METODOLOGÍA

3.1 Descripción de uso de la herramienta computacional

Matlab.

Se inició con un modelo abierto de Matlab, que permite adquirir una idea global de las características del software. (Figura 3).

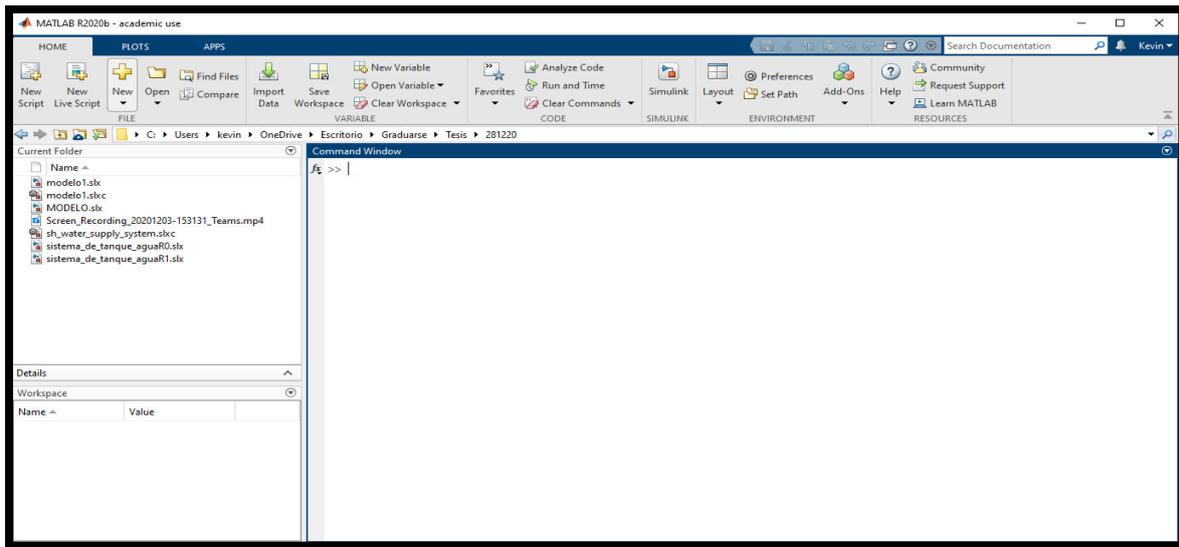


Figura 3. Ventana Inicio Matlab

En esta ventana se encuentran los siguientes componentes:

Current folder (Directorio de trabajo)

Este es un directorio en el que se pueden leer los comandos utilizados, así como también se encarga del almacenamiento de estos según la sesión de trabajo (Figura 4). También permite encontrar archivos, cambiar de directorio y cargar documentos seleccionándolos con doble clic sobre su nombre. (Santana, 2019)

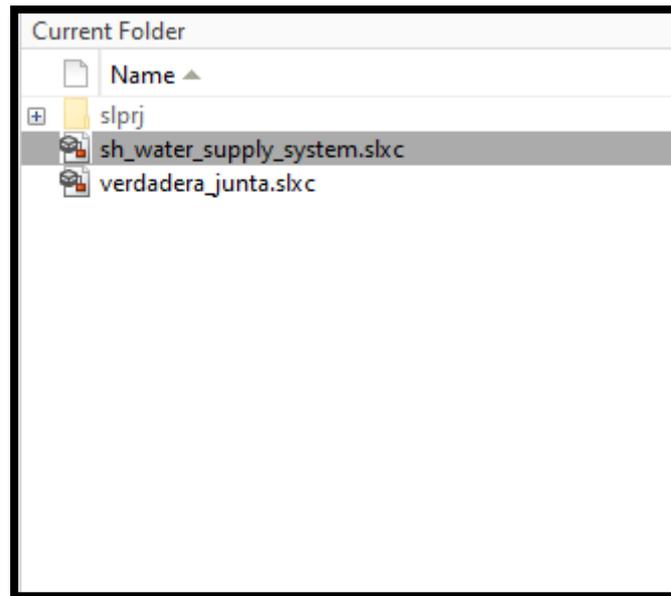


Figura 4. Ventana Current Folder

Command Window (Ventana de comandos):

En esta ventana (Figura 5) se ejecutan todas las operaciones y comandos, permitiendo visualizar los resultados generados. (Santana, 2019)



Figura 5. Ventana Command Windows

Workspace (Espacio de trabajo en memoria):

Pantalla situada a la derecha del entorno de trabajo, donde Matlab muestra todas las operaciones creadas en la ventana del Command Windows (Figura 6). Al ser Matlab un software que trabaja con matrices corresponde a valores matriciales. Incluso los valores más simples de un dígito son considerados vectores de dimensión 1x1. (Santana, 2019)

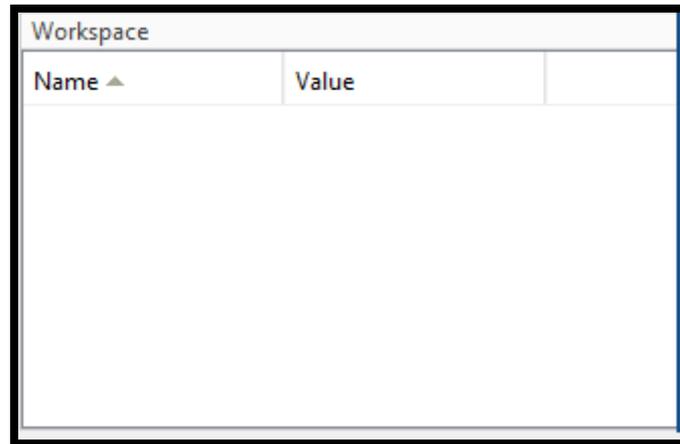


Figura 6. Ventana Workspace

Details (Detalles):

En este espacio se observa toda la información de un archivo seleccionado mediante un clic. (Santana, 2019)



Figura 7. Espacio de trabajo Details

Barra de menús:

Está conformada por las siguientes pestañas, como se observa en la Figura 8:

Home (principal): Permite crear nuevos archivos de código Matlab, abrir, guardar, etc.

Plots (gráficos): Da acceso a la barra de menús que nos permite ingresar gráficos para la representación de variables.

Apps (aplicaciones): permite el acceso a una barra de menús, para el uso de aplicaciones en Matlab, permitiendo descargarlas, instalarlas y abrirlas. (Santana, 2019)

Simulink

Para abrir el entorno de simulink se utiliza el comando `>>ssc_new`, que es una de las formas más rápidas para acceder al entorno (Figura 8).

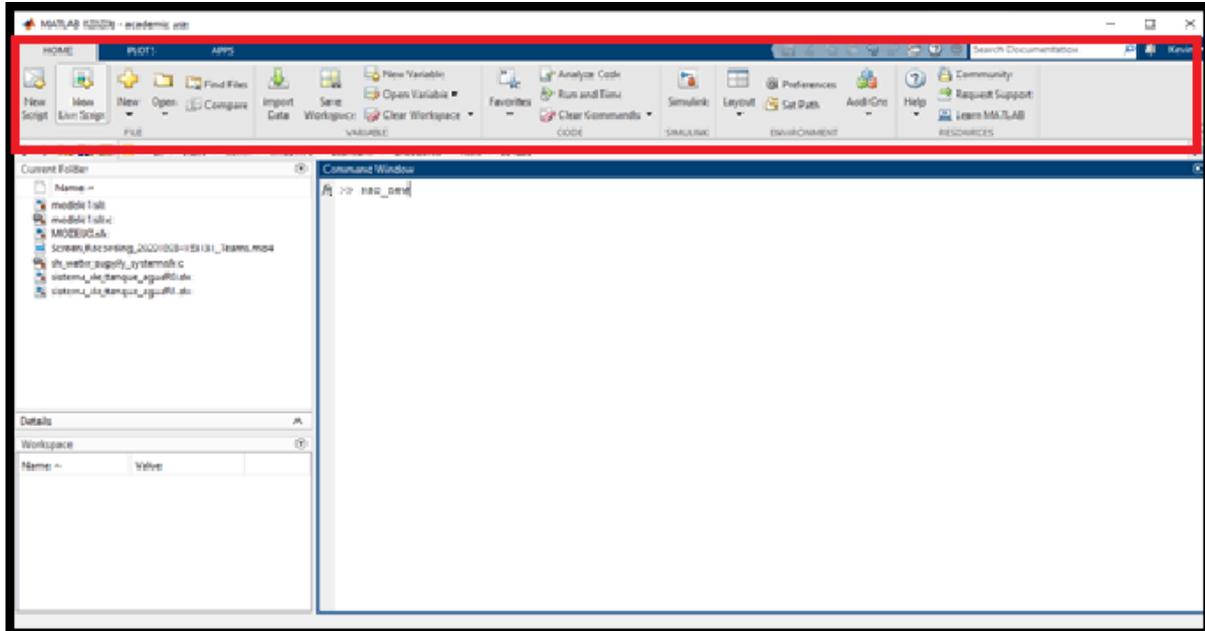


Figura 8. Ventana Simulink

Otra manera de abrir el entorno de Simulink es haciendo click en el cuadro Simulink de la barra de menus. A continuación aparecerá una ventana (Figura 9), en la cual se selecciona la opción Blank Model para abrir un nuevo modelo en el entorno de Simulink (Figura 10).

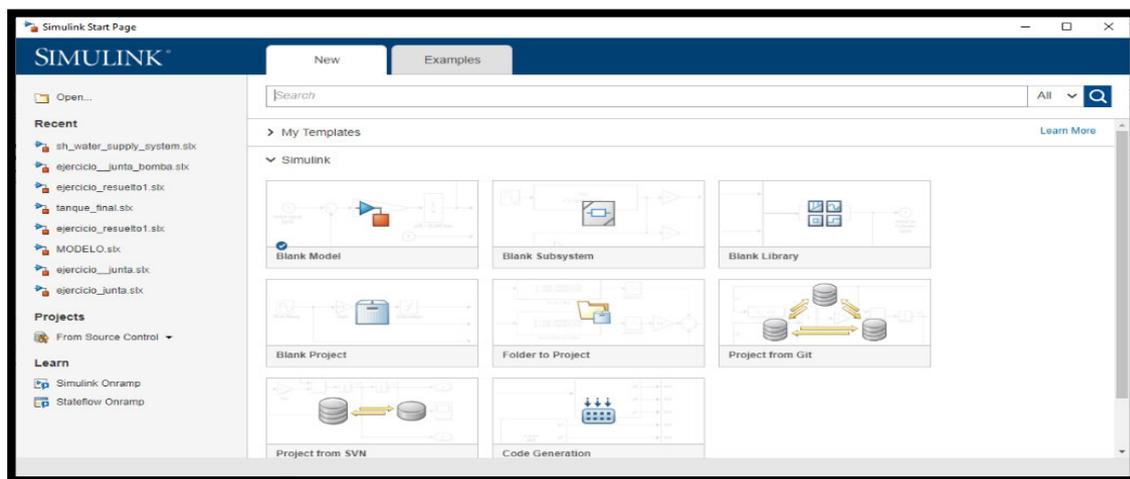


Figura 9. Ventana de opciones de Simulink

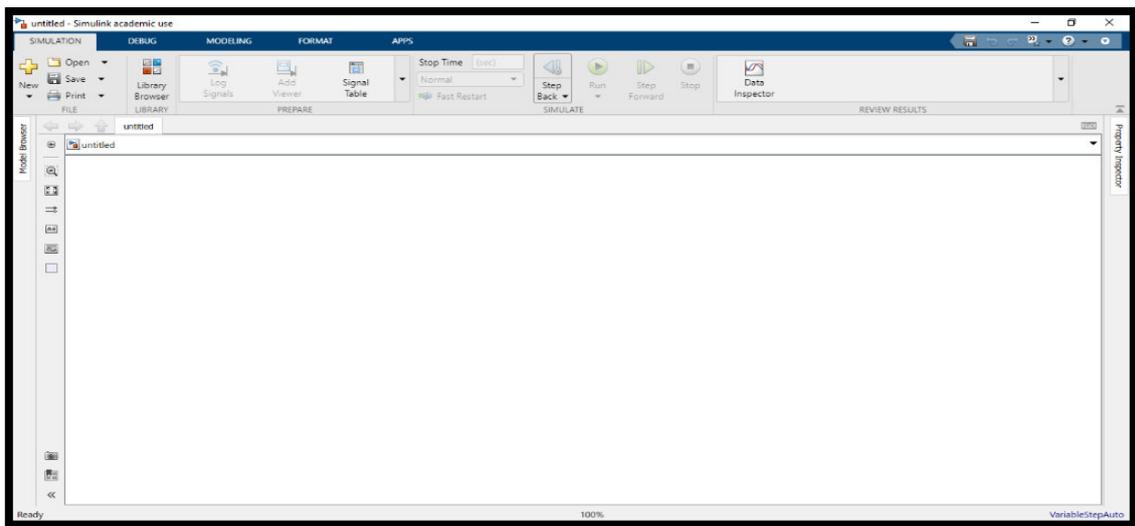


Figura 10. Entorno de Simulink

Library Browser

Se utilizó el panel de bibliotecas para encontrar los bloques necesarios para la simulación, haciendo clic en el botón Library Browser (Figura 11).



Figura 11. Bloque Library browser

A continuación, aparecerá el panel que muestra de manera detallada y clasificada las bibliotecas que contiene Simulink. Al seleccionar la biblioteca Simscape, su contenido (Electrical, Fluids, Foundation Library y Utilities) se muestra en el panel de bloque del lado derecho (Figura 12). (The MathWorks, Library Browser, 2020)

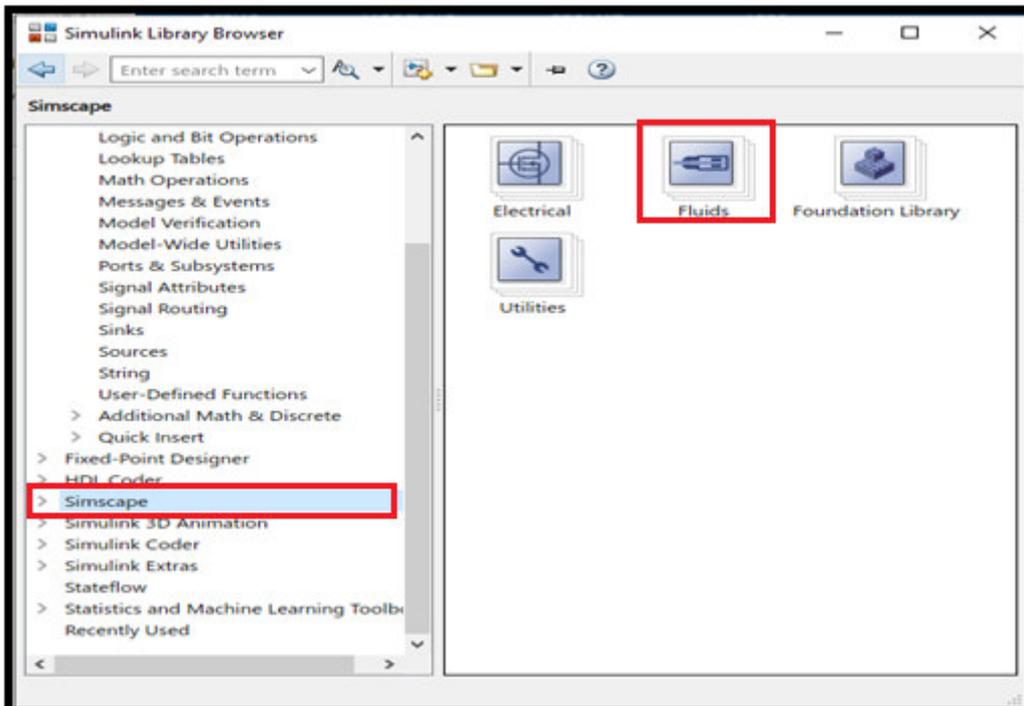


Figura 12. Ventana Simscape

Se selecciona el Simscape Fluids, el cual contiene de manera clasificada los conjuntos de bloques para la simulación de fluidos (Figura 13). De todos los bloques, el que se utilizó en este proyecto fue el Hydraulics.

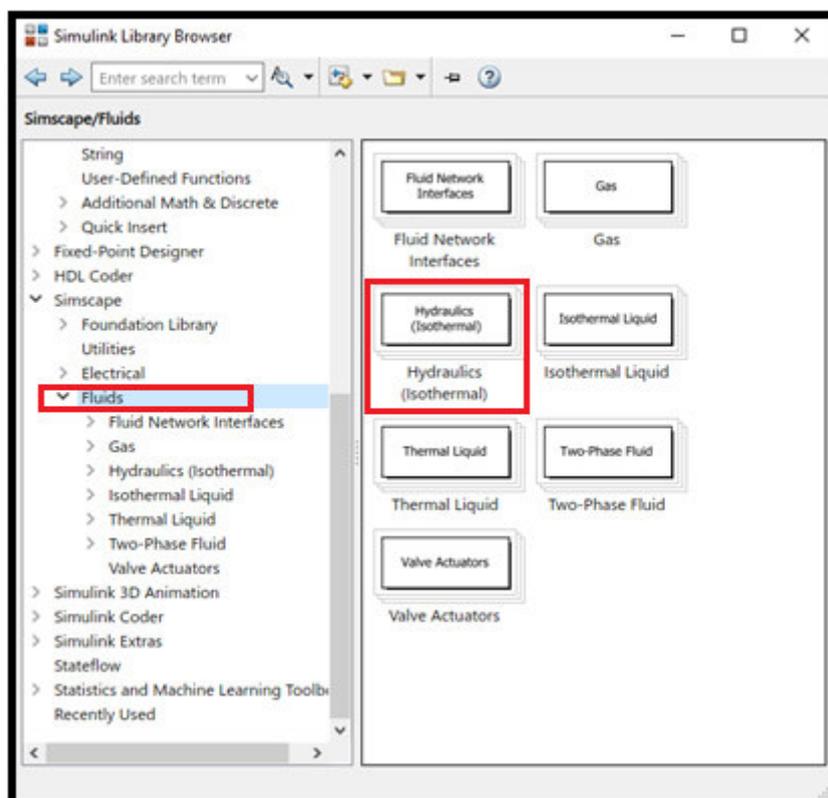


Figura 13. Simscape Fluids

El Bloque Hydraulics contiene los siguientes elementos de simulación como: Accumulators, Pipelines, Pumps and Motors, Hydraulic Utilities, etc. (Figura 14).

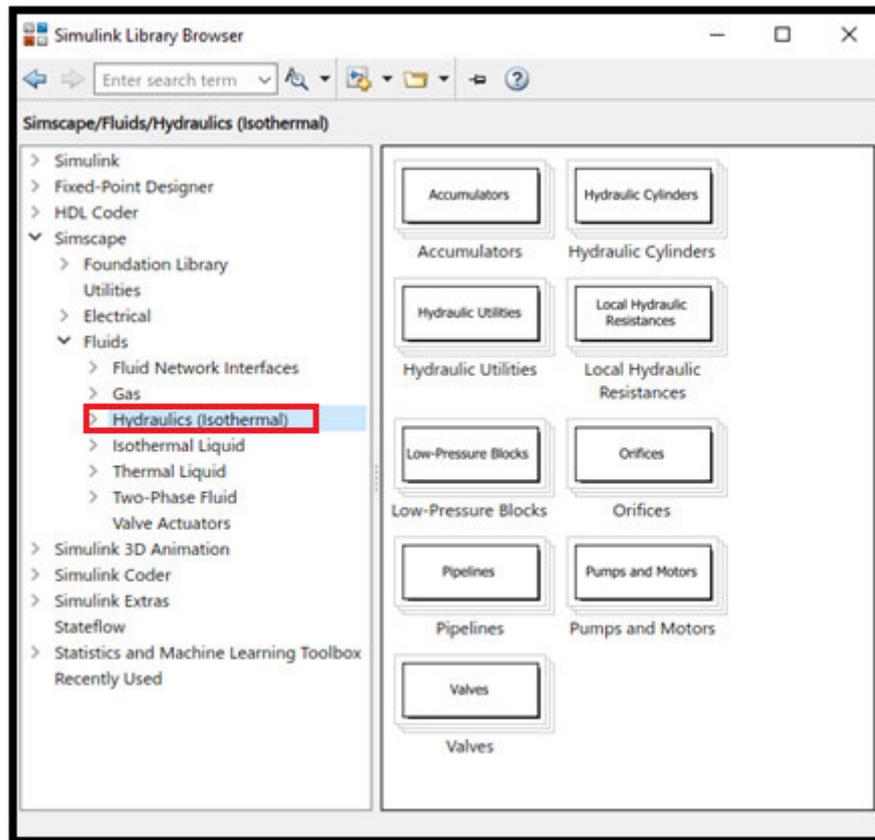


Figura 14. Ventana Hydraulics (Isothermal)

A continuación, se describen los bloques del Simscape Fluids Hydraulics que se utilizaron para el desarrollo del presente proyecto.

Constant Head Tank

Este bloque representa un tanque (Figura 15) que se encarga del almacenamiento de fluido a una presión especificada. Considera la elevación del fluido con respecto al fondo del tanque y pérdidas de presión en la tubería por causa de conexiones o alguna clase de resistencia local; y calcula el volumen del fluido en el tanque. (The MathWorks, Constant Head Tank, 2020)

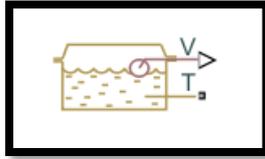


Figura 15. Bloque Constant head tank

La configuración del bloque requiere los siguientes parámetros: (Figura 16).

- Pressurization (Presurización).
- Fluid Level (Nivel de fluido).
- Inlet pipeline diameter (Diámetro interno).
- Pipeline pressure loss coefficient (Coeficiente de pérdida en la tubería).
- Acceleration due to gravity (Aceleración de la gravedad).

A screenshot of the 'Settings' window for the Constant head tank block. The window has two tabs: 'Parameters' and 'Variables'. The 'Parameters' tab is active. It contains five rows of settings, each with a label, a text input field, and a unit dropdown menu. The settings are: Pressurization: 0 Pa; Fluid level: station_1.fluid_level m; Inlet pipeline diameter: 0.02 m; Pipeline pressure loss coefficient: 1.2; Acceleration due to gravity: 9.80665 m/s^2.

Figura 16. Ventana de parámetros del bloque Constant head tank

Hydraulic Reference

Este bloque representa un fluido de presión atmosférica (Figura 17). (The MathWorks, Hydraulic Reference, 2020)

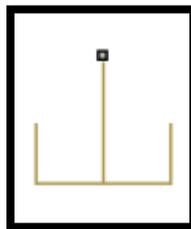


Figura 17. Bloque Hydraulic Reference

Resistive Pipe LP

Este bloque se encarga de modelar que la tubería sea circular o no (Figura 18), teniendo en cuenta propiedades resistivas. El bloque es diseñado para ingresar resistencias locales, accesorios y pérdidas entre entradas y salidas. (The MathWorks, Resistive Pipe LP, 2020)

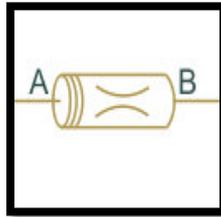


Figura 18. Bloque Resistive Pipe LP

La configuración del bloque requiere los siguientes parámetros: (Figura 19).

- Pipe cross section type (Tipo de tubería)
- Internal diameter (Diámetro interno)
- Laminar friction constant for Darcy friction factor (Constante de fricción laminar de Darcy).
- Pipe length (longitud de la tubería).
- Aggregate equivalent length of local resistances (Resistencias locales).
- Internal surface roughness height (Rugosidad interna de la tubería).
- Laminar flow upper Reynolds number Limit (Número de Reynolds para flujo laminar).
- Turbulent flow lower Reynolds number Limit (Número de Reynolds para flujo turbulento).
- Port A elevation with respect to “wrt” reference plane (Referenciación en el plano punto A).
- Port B elevation with respect to “wrt” reference plane (Referenciación en el plano punto B).
- Gravitational acceleration (Aceleración de la gravedad).

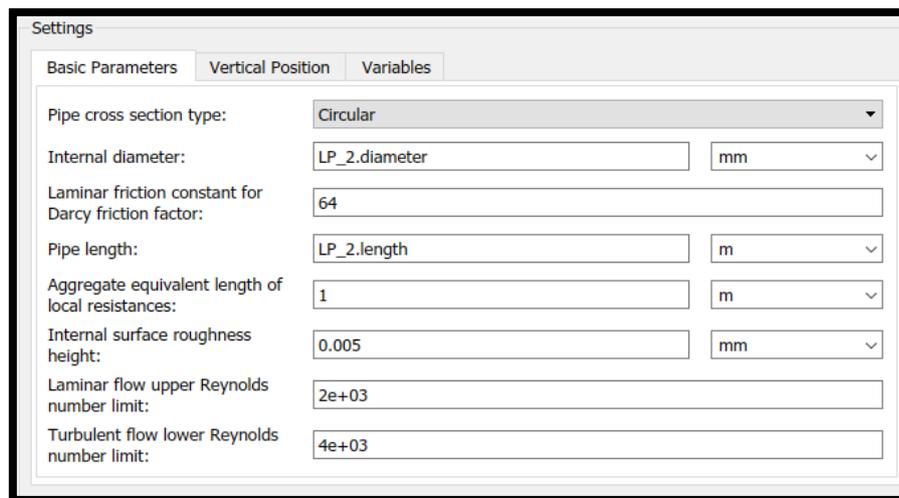


Figura 19. Ventana parámetros del bloque Resistive Pipe LP

Hydraulic Fluid

Este bloque proporciona diferentes fluidos a todos los componentes del sistema (Figura 20), permitiendo seleccionar el fluido y especificar sus propiedades de acuerdo con la aplicación. (The MathWorks, Hydraulic Fluid, 2020).



Figura 20. Bloque Hydraulic Fluid

La configuración del bloque requiere los siguientes parámetros: (Figura 21)

- Hydraulic Fluids (Fluidos hidráulicos).
- Relative amount of trapped air (Cantidad de aire atrapado).
- System temperature (°C) (Temperatura del sistema).
- Viscosity derating factor (Factor de reducción de viscosidad).
- Pressure below absolute zero (Presión debajo del cero absoluto).
- Density (Densidad).
- Viscosity (Viscosidad).
- Bulk modulus (Pa) at atm pressure and no gas (Módulo de carga a presión sin gas).

Parameters

Hydraulic fluid:

Relative amount of trapped air:

System temperature (C):

Viscosity derating factor:

Pressure below absolute zero:

Fluid Properties:

Density (kg/m³):

Viscosity (cSt):

Bulk modulus (Pa) at atm. pressure and no gas:

Figura 21. Ventana de parámetros del bloque Hydraulic Fluid

Solver Configuration

Define las configuraciones y propiedades de la simulación realizada (Figura 22 y Figura 23).
 (The MathWorks, Solver Configuration, 2020)

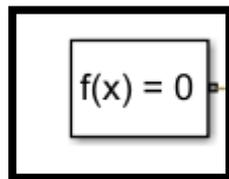


Figura 22. Bloque Solver configuration

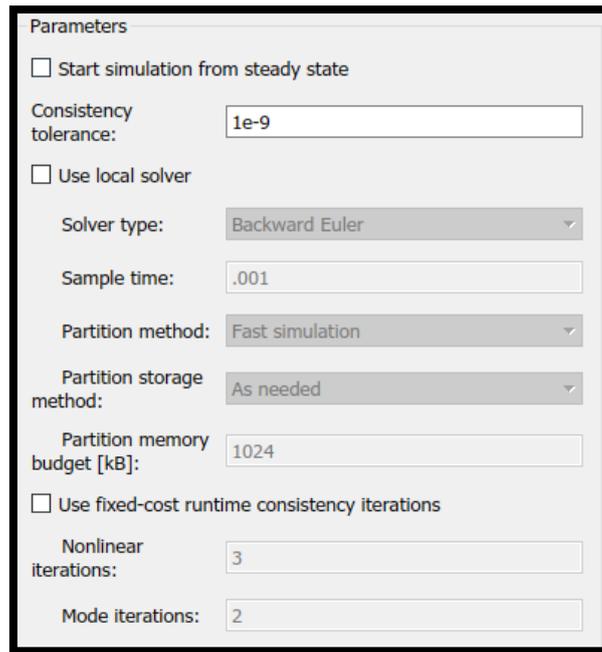


Figura 23. Ventana de parámetros del bloque Solver configuration

Hydraulic Flow Rate Sensor

Este bloque se encarga de medir el caudal en una red hidráulica (Figura 24). Las señales Q y M informan el caudal volumétrico a través del sensor. (The MathWorks, Hydraulic Flow Rate Sensor, 2020)

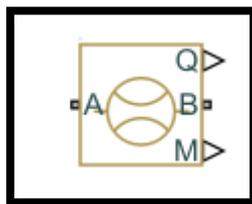


Figura 24. Bloque Hydraulic Flow Rate Sensor

Display

Este bloque muestra el resultado de la simulación (Figura 25). (The MathWorks, Display, 2020)

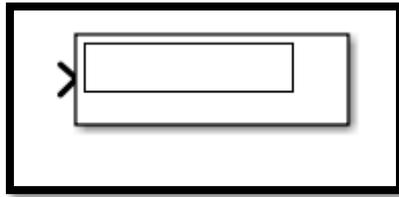


Figura 25. Bloque Display

PS-Simulink Converter

Es el bloque encargado de convertir la señal física de Simscape, en una señal de salida de Simulink (Figura 26). Estas señales son usadas como puente entre bloques de Simulink y bloques de Simscape. Además, pueden modificar los parámetros en las unidades que más convengan (Figura 27). (The MathWorks, PS-Simulink Converter, 2020)



Figura 26. Bloque PS-simulink converter

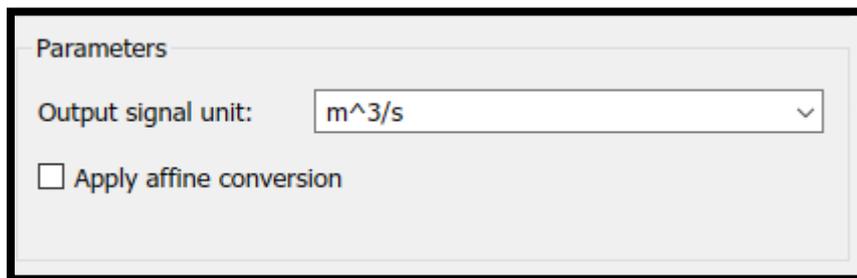


Figura 27. Ventana de parámetros del bloque PS-simulink converter

Subsystems (V):

Este subsistema envía una señal hacia el puerto V para ingresar un valor a calcular (Figura 28). (The MathWorks, Create Subsystems, 2020)

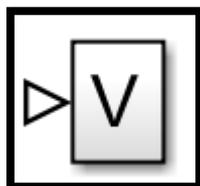


Figura 28. Subsystems "V"

Mux

Combina señales para mostrarlas en un Display u osciloscopio la respuesta de varios bloques (Figura 29). (The MathWorks, Mux, 2020)

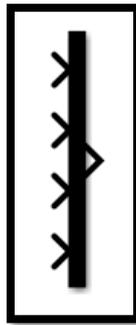


Figura 29. Bloque Mux

Subsystem Pump Station

Este subsistema (Figura 30) se encarga de simplificar los bloques que constituyen una estación de bombeo (Figura 31). (The MathWorks, Create Subsystems, 2020)

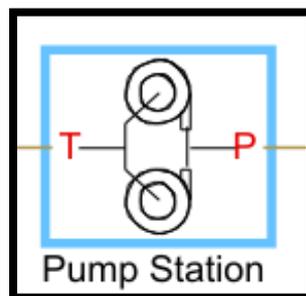


Figura 30 Subsystem Pump Station

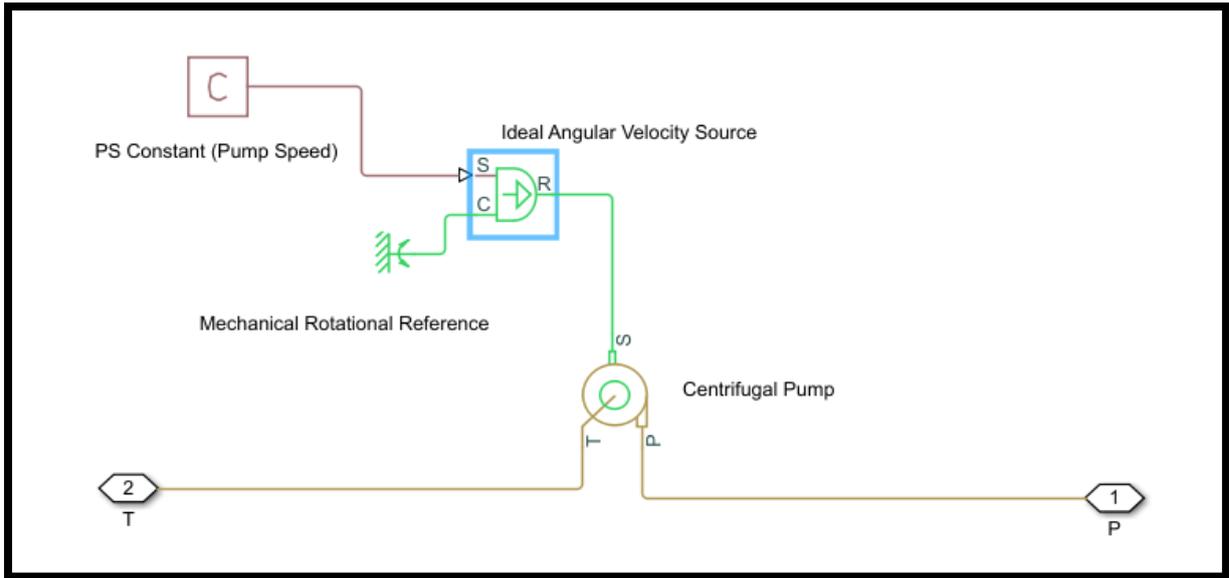


Figura 31. Bloques del Subsystems Pump Station

A continuación, se describen los bloques que forman parte del subsistema de bombeo:

Centrifugal Pump

Este bloque se encarga de modelar una bomba centrífuga para una red de líquido hidráulico (Figura 32). (The MathWorks, Centrifugal Pump, 2020)

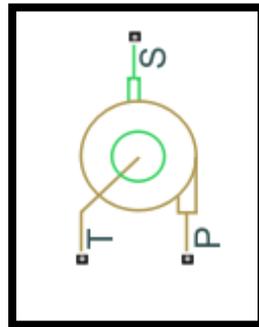


Figura 32. Bloque Centrifugal Pump

La configuración del bloque requiere los siguientes parámetros: (Figura 33)

- Model parameterization (Modelo de parametrización).
- Reference angular velocity (Velocidad angular).
- Reference density (Densidad de referencia).
- Pump delivery vector for Pressure differential (Vector de impulsión de la bomba para presión diferencial).
- Pressure differential across pump vector (Diferencia de presión a través de la bomba).
- Pump delivery vector for Brake power (Vector de impulsión de la bomba para frenado).
- Brake power vector (Vector de potencia de freno).

- Interpolation method (Método de interpolación).
- Extrapolation method (Método de extrapolación).

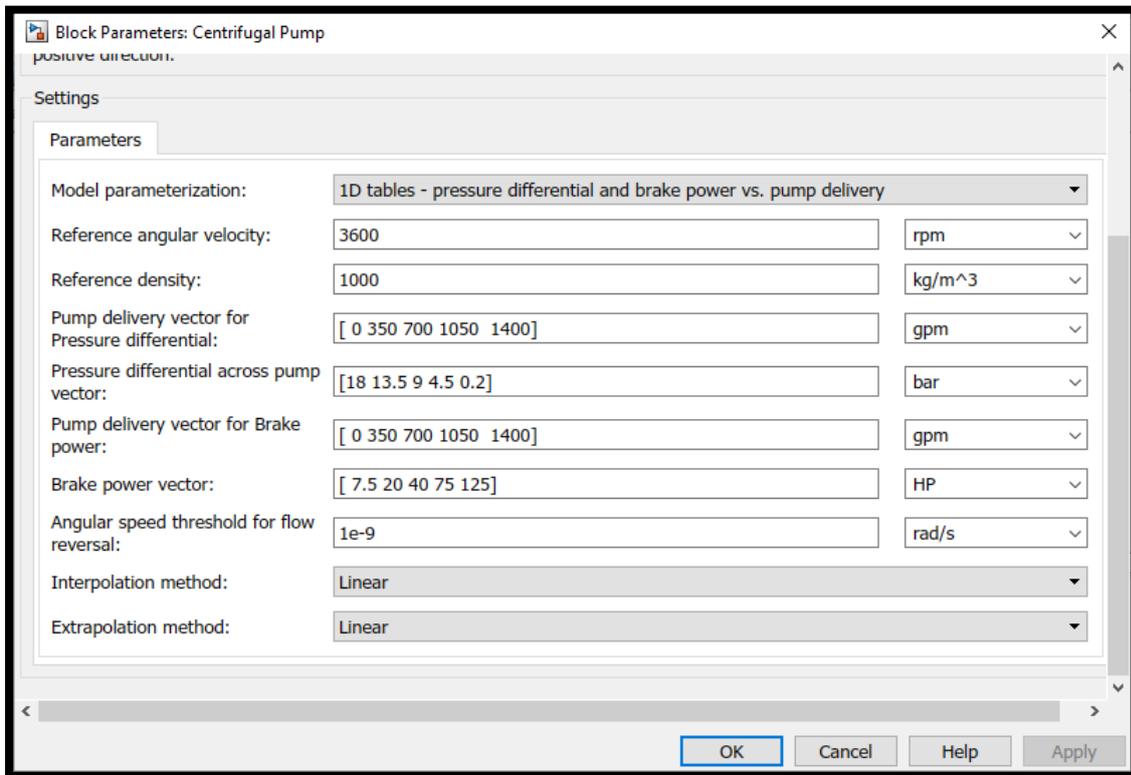


Figura 33. Ventana de parámetros del bloque Centrifugal Pump

PS Constant (Pump Speed)

Este bloque genera una señal física constante para dar valor a la velocidad de la bomba (Figura 34). (The MathWorks, PS Constant, 2020)

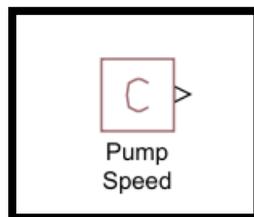


Figura 34. Bloque PS Constant (Pump Speed)

La configuración del bloque requiere el valor constante de la velocidad angular (Figura 35).

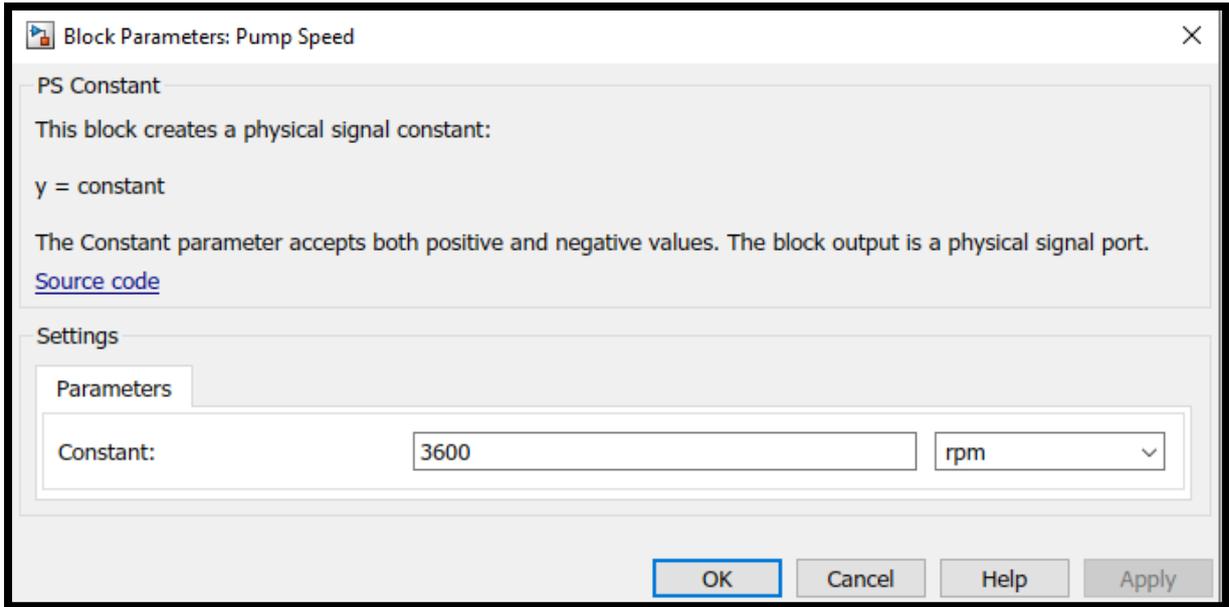


Figura 35. Ventana de parámetros bloque PS Constant (Pump Speed)

Mechanical Rotational Reference

Este bloque representa un punto de referencia de la rotación mecánica de la bomba (Figura 36). (The MathWorks, Mechanical Rotational Reference, 2020)

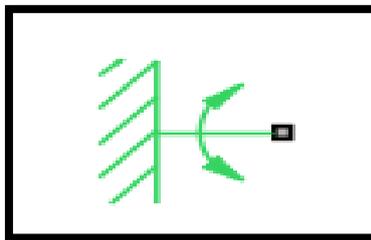


Figura 36. Bloque Mechanical Rotational Reference

Este bloque no requiere configuración de parámetros.

Ideal Angular Velocity Source

Este Bloque representa una fuente de velocidad angular ideal (Figura 37). (The MathWorks, Ideal Angular Velocity Source, 2020)

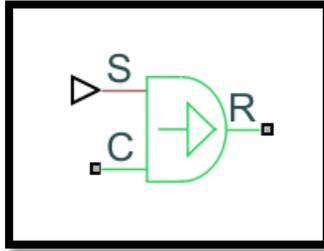


Figura 37. Bloque Ideal Angular Velocity Source

Este bloque no requiere configuración de parámetros.

3.2 Simulación del sistema de suministro de agua utilizando el Simscape Fluids.

Se inició con un modelo base que presenta Matlab, ya que permite adquirir una idea global del Simscape Fluids para luego aplicarlo a un sistema real.

Para el desarrollo de la simulación se ejecutó el comando “sh_water_supply_system” en el Command Windows (Figura 38).

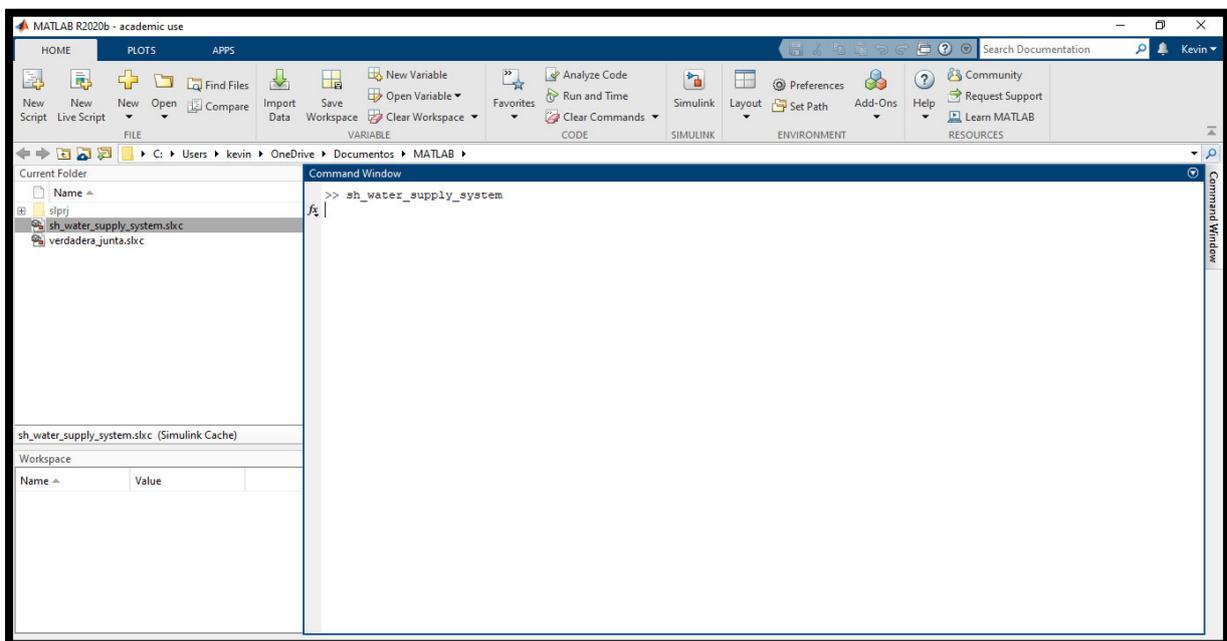


Figura 38. Ejemplo de comando sh_water_supply_system

Como resultado de la ejecución del comando mencionado anteriormente, se despliega la ejemplificación de un sistema de suministro de agua (Figura 39).

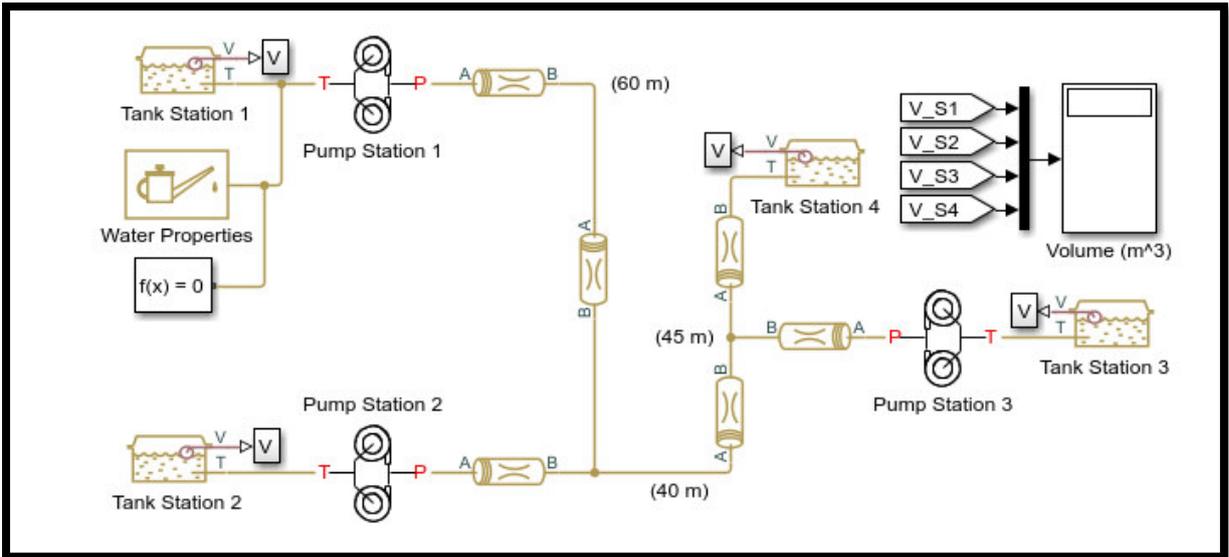


Figura 39. Simulación del sistema de suministro de agua

El sistema de suministro de agua simulado consta de lo siguiente:

- Tres estaciones de bombeo (Pump Station 1, Pump Station 2, Pump Station 3) ubicadas a alturas de 45, 25 y 30 m con referencia al plano y las alturas 60, 45 y 40 como puntos de estudio; respectivamente. Además, cada estación de bombeo consta de: dos bombas conectadas en paralelo (Pump 1 y Pump 2), fuentes de velocidad para cada bomba, valores constantes de velocidad de las bombas de 1700 rpm y tuberías (Figura 40).

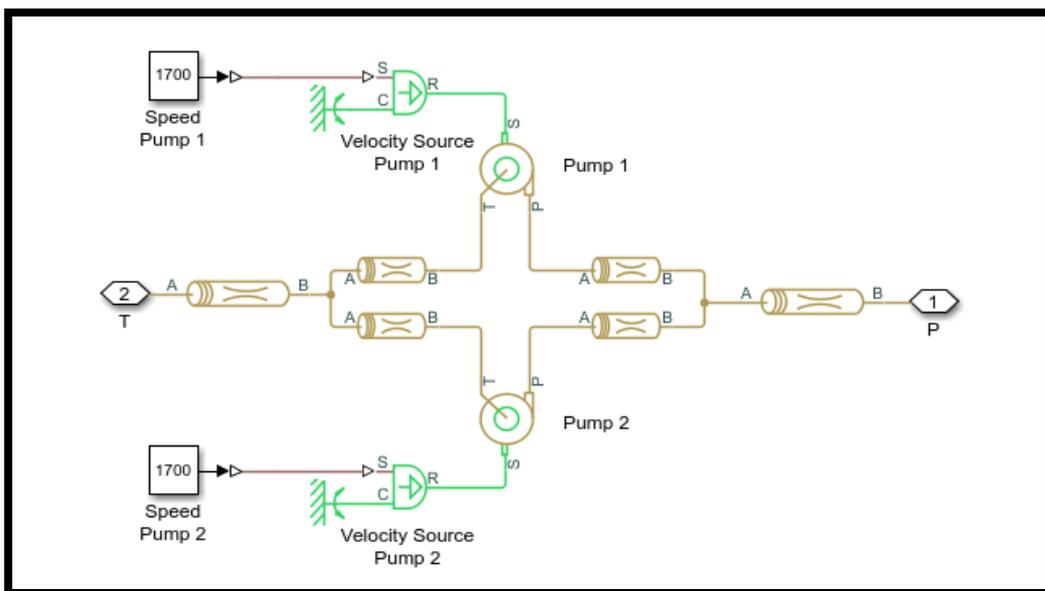


Figura 40. Simulación dentro de la estación 1

- Cuatro tanques de gran tamaño (Tank Station 1, Tank Station 2, Tank Station 3 y Tank Station 4), de forma que se considera un caudal constante. El volumen de agua inicial en Tank Station 1, Tank Station 2 y Tank Station 3 es 100 m^3 y en el Tank Station 4 es 0 m^3
- Líneas de conducción (tuberías).
- Display que muestra el volumen de los cuatro tanques en el tiempo de 200s.
- Water properties utilizan las propiedades del agua.
- Solver configuration define la configuración de la simulación.

En esta simulación, se espera que las estaciones de bombeo transporten agua al tanque, Tank Station 4, ubicado a 60 m de altura.

3.3 Simulación del sistema de bombeo de la Junta Administradora de Agua Potable y Saneamiento de Cutuglagua (JAAPS-C).

Una vez que se revisó el funcionamiento del sistema base de Matlab, se aplicaron los conocimientos en el sistema de la Junta Administradora de Agua y Saneamiento de Cutuglagua. Para esta fase del proyecto, se realizó una visita de campo para recopilar información del sistema y utilizarla en la simulación (Anexo 1).

El sistema de la JAAPS-C consta de: pozo de succión, sistema de bombeo, tanque de suministro, líneas de conducción (tuberías) y tablero de control.

Para la simulación de dicho sistema, es necesario crear un modelo en blanco de Simulink, como se describió en la sección 3.1.

Los bloques del Simscape Fluids Hydraulics necesarios para este sistema, se describen a continuación.

Simulación del pozo de succión.

Para simular el pozo de succión se utilizó el Bloque Hydraulic Reference, descrito en la sección 3.1.

Simulación del tanque de distribución.

Para simular el tanque de distribución se utilizó el Bloque Constant head tank, descrito en la sección 3.1. A continuación, se describen los parámetros para la configuración de este bloque (Tabla 3).

Tabla 3. Parámetros del Bloque Constant head tank .

Parámetro	Valor utilizado	Unidades	Justificación de los valores utilizados
Presión	0	Pa	Valor debido a que es un tanque abierto a la atmósfera.
Nivel de Fluido	3	m	Valor proporcionado por la JAAPS-C (Anexo 1).
Diámetro de la tubería de entrada	115	mm	Valor proporcionado por la JAAPS-C (Anexo 1).
Pérdidas por presión en la tubería	1.2	–	Valor predeterminado por Matlab.
Aceleración de la gravedad	9.8	$\left(\frac{m}{s^2}\right)$	Valor de la gravedad.
Volumen de fluido	84.82	m ³	Valor proporcionado por la JAAPS-C (Anexo 1).

Simulación de la línea de conducción (tubería)

Para simular las tuberías se utilizó el Bloque Resistive Pipe LP, descrito en la sección 3.1.

El Bloque Resistive Pipe LP 1 simula la tubería de succión. En la Tabla 4, se describen los parámetros para la configuración de este bloque.

Tabla 4. Parámetros del Bloque Resistive Pipe LP 1.

Parámetro	Valor utilizado	Unidades	Justificación de los valores utilizados
Tipo de la tubería	Circular	–	La tubería usada es de sección circular.
Diámetro interno	173	mm	Valor proporcionado por la JAAPS-C (Anexo 1).
Constante de fricción de Darcy Laminar	64	–	La constante de Darcy corresponde a un flujo laminar de sección transversal circular. Valor predeterminado por Matlab.
Longitud de la tubería	1	m	Valor proporcionado por la JAAPS-C (Anexo 1).

Parámetro	Valor utilizado	Unidades	Justificación de los valores utilizados
Resistencias locales	2.25	m	Valor que representa las resistencias a lo largo de la tubería (Anexo 6).
Rugosidad interna de la tubería	$2.4 \times (10^{-5})$	m	Valor que corresponde a la rugosidad absoluta de una tubería de acero galvanizado (Anexo 3. Tabla 21).
Número de Reynolds para flujo laminar	2000	–	Valor característico del flujo en régimen laminar que comienza a convertirse en turbulento (Anexo 3. Figura 90).
Número de Reynolds para flujo turbulento	4000	–	Valor característico del flujo en régimen turbulento (Anexo 3. Figura 90).
Referencia del punto A en el plano	3053	m	Valor proporcionado por la JAAPS-C (Anexo 1).
Referencia del punto B en el plano	3056	m	Valor proporcionado por la JAAPS-C (Anexo 1).
Aceleración de la gravedad	9.8	$\left(\frac{m}{s^2}\right)$	Valor de la gravedad.

El Bloque Resistive Pipe 2 simula la tubería de succión con un pequeño estrechamiento. En la Tabla 5, se describen los parámetros para la configuración de este bloque.

Tabla 5. Parámetros del Bloque Resistive Pipe 2

Parámetro	Valor utilizado	Unidades	Justificación de los valores utilizados
Tipo de la tubería	Circular	–	La tubería usada es de sección circular.
Diámetro interno	143	mm	Valor proporcionado por la JAAPS-C (Anexo 1).
Constante de fricción de Darcy Laminar	64	–	La constante de Darcy corresponde a un flujo laminar de sección

Parámetro	Valor utilizado	Unidades	Justificación de los valores utilizados
			trasversal circular. Valor predeterminado por Matlab.
Longitud de la tubería	0.10	m	Valor proporcionado por la JAAPS-C (Anexo 1).
Resistencias locales	2.25	m	Valor que representa las resistencias a lo largo de la tubería (Anexo 6).
Rugosidad interna de la tubería	$2.4 \times (10^{-5})$	m	Valor que corresponde a la rugosidad absoluta de una tubería de acero galvanizado (Anexo 3. Tabla 21).
Número de Reynolds para flujo laminar	2000	–	Valor característico del flujo en régimen laminar que comienza a convertirse en turbulento (Anexo 3. Figura 90).
Número de Reynolds para flujo turbulento	4000	–	Valor característico del flujo en régimen turbulento (Anexo 3. Figura 90).
Referencia del punto A en el plano	3056	m	Valor proporcionado por la JAAPS-C (Anexo 1).
Referencia del punto B en el plano	3056	m	Valor proporcionado por la JAAPS-C (Anexo 1).
Aceleración de la gravedad	9.8	$\left(\frac{m}{s^2}\right)$	Valor de la gravedad.

El Bloque Resistive Pipe 3 simula la tubería de conducción. En la Tabla 6, se describen los parámetros para la configuración de este bloque.

Tabla 6. Parámetros del Bloque Resistive Pipe 3

Parámetro	Valor utilizado	Unidades	Justificación de los valores utilizados
Tipo de la tubería	Circular	–	La tubería usada es de sección circular.

Parámetro	Valor utilizado	Unidades	Justificación de los valores utilizados
Diámetro interno	115	mm	Valor proporcionado por la JAAPS-C (Anexo 1).
Constante de fricción de Darcy Laminar	64	–	La constante de Darcy corresponde a un flujo laminar de sección transversal circular. Valor predeterminado por Matlab.
Longitud de la tubería	1500	m	Valor proporcionado por la JAAPS-C (Anexo 1).
Resistencias locales	2.25	m	Valor que representa las resistencias a lo largo de la tubería (Anexo 6).
Rugosidad interna de la tubería	$1.5 \times (10^{-5})$	m	Valor que corresponde a la rugosidad absoluta de una tubería de PVC (Anexo 3. Tabla 21).
Número de Reynolds para flujo laminar	2000	–	Valor característico del flujo en régimen laminar que comienza a convertirse en turbulento (Anexo 3.Figura 90).
Número de Reynolds para flujo turbulento	4000	–	Valor característico del flujo en régimen turbulento (Anexo 3.Figura 90).
Referencia del punto A en el plano	3158	m	Valor proporcionado por la JAAPS-C (Anexo 1).
Referencia del punto B en el plano	3056	m	Valor proporcionado por la JAAPS-C (Anexo 1).
Aceleración de la gravedad	9.8	$\left(\frac{m}{s^2}\right)$	Valor de la gravedad.

Simulación del fluido

Para simular el fluido se utilizó el Bloque Hydraulic Fluid, descrito en la sección 3.1. En la Tabla 7, se describen los parámetros para la configuración de este bloque.

Tabla 7. Parámetros del bloque “Hydraulic fluid”.

Parámetro	Valor utilizado	Unidades	Justificación de los valores utilizados
Fluidos hidráulicos	Agua	–	El fluido usado es agua.
Cantidad de aire atrapado	0.0201	–	Valor que representa la cantidad de aire en la tubería (Anexo 7).
Temperatura del sistema (°C)	10°	°C	Temperatura promedio del agua.
Factor de reducción de viscosidad	1	–	Valor predeterminado por Matlab.
Presión debajo del cero absoluto	Error	–	Advertencia si la presión cae por debajo del cero absoluto. Valor predeterminado por Matlab.
Densidad	999.17	$\left(\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}\right)$	Valor estándar del agua.
Viscosidad	1.27	cSt	Valor estándar del agua.
Módulo de carga a presión sin gas	$2.12 \times (10^9)$	Pa	Valor estándar del agua.

Simulación de la estación de bombeo

Para simular la estación de bombeo se utilizó el subsistema Pump Station, descrito en la sección 3.1. A continuación, se describen los bloques del subsistema.

Bomba centrífuga

Para simular la bomba se utilizó el Bloque Centrifugal Pump descrito en la sección 3.1. En la Tabla 8, se describen los parámetros para la configuración de este bloque.

Tabla 8. Parámetros del Bloque Centrifugal Pump.

Parámetro	Valor utilizado	Unidades	Justificación de los valores utilizados
Modelo de parametrización	Tablas 1D: diferencial de presión y potencia de frenado.	–	Valor predeterminado por Matlab.
Velocidad angular	3600	rpm	Valor predeterminado por el fabricante (Anexo 5. Figura 92).

Parámetro	Valor utilizado	Unidades	Justificación de los valores utilizados
Densidad de referencia	1000	$\left(\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}\right)$	Valor correspondiente al agua
Vector de impulsión de la bomba para presión diferencial	[0 350 700 1050 1400]	gpm	Valor predeterminado por el fabricante (Anexo 5. Figura 92).
Diferencia de presión a través de la bomba	[18 13.5 9 4.5 0.2]	bar	Valor predeterminado por el fabricante (Anexo 5. Figura 92).
Vector de impulsión de la bomba para frenado	[0 350 700 1050 1400]	gpm	Valor predeterminado por el fabricante (Anexo 5. Figura 92).
Vector de potencia de freno	[7.5 20 40 75 125]	hp	Valor predeterminado por el fabricante (Anexo 5. Figura 92).
Método de interpolación	Lineal	–	Valor predeterminado por Matlab.
Método de extrapolación	Lineal	–	Valor predeterminado por Matlab.

Bloque PS Constant (Pump Speed)

Este bloque permite simular la velocidad angular del motor y es una constante igual a 3600 rpm.

Bloque Mechanical Rotational Reference

Este bloque no requiere configuración y se describió en la sección 3.1.

Bloque Ideal Angular Velocity Source

Este bloque no requiere configuración y se describió en la sección 3.1.

En la Figura 41 se muestran las conexiones entre los bloques que forman el Subsystem Pump Station.

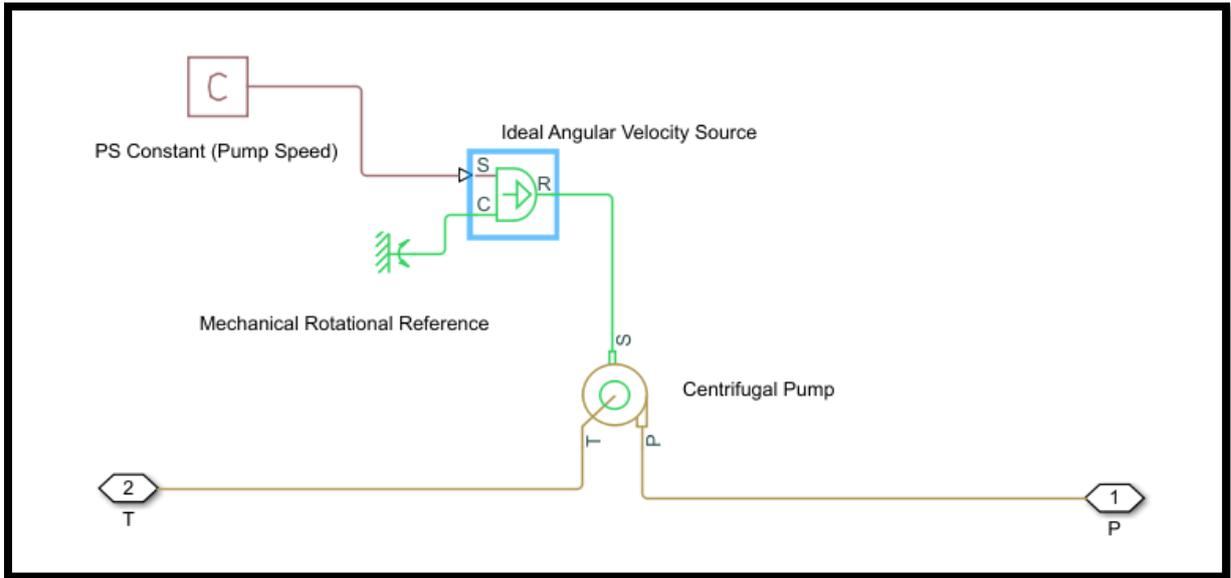


Figura 41. Conexión interna del sistema de bombeo Subsystem Pump Station

Se añadieron y configuraron los bloques: Bloque Hydraulic Reference, Constant Head Tank, Resistive Pipe LP 1, Resistive Pipe LP 2, Resistive Pipe LP 3, Hydraulic Fluid; y el subsistema de bombeo (Centrifugal Pump, PS Constant, Ideal Angular Velocity Source, Mechanical Rotational Reference); se añadieron también los bloques que no requieren configuración y son los siguientes: Display, Solver configuration y Ps-Simulink.

Finalmente, se muestran las conexiones entre los bloques que permiten simular el sistema de la JAAPS-C en el entorno de Simulink (Figura 42).

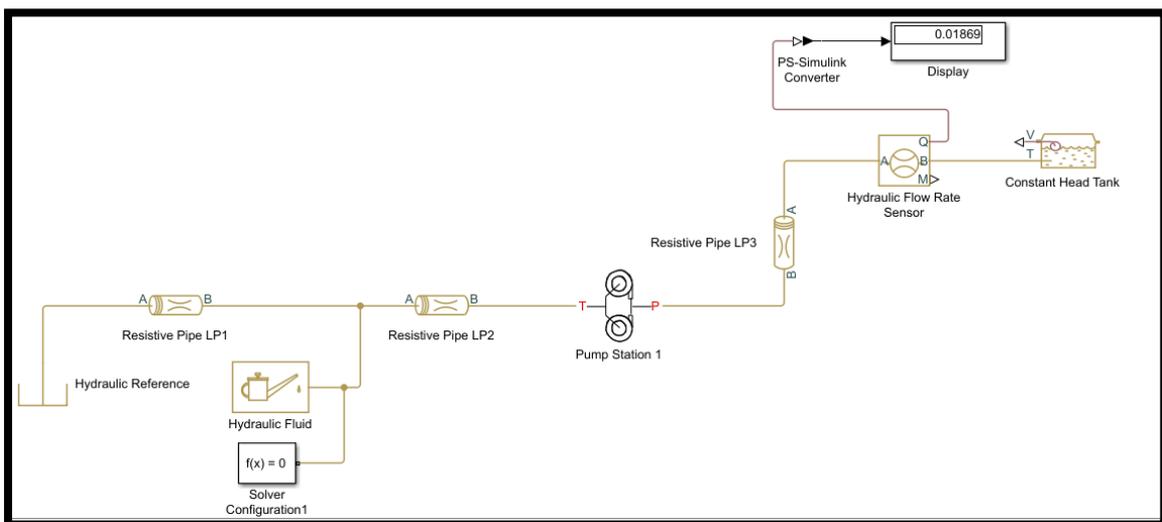


Figura 42. Conexiones de los bloques de Simscape Fluids

3.4 Elaboración de la guía

Se redactó de forma detallada todo el proceso para simular el sistema de la JAAPS-C. Esta guía permite a los estudiantes comprender el proceso necesario para realizar simulaciones utilizando Simscape Fluids de Matlab, y utilizarlo en el aprendizaje de sistemas hídricos.

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Modelación y simulación del sistema de suministro de agua con estaciones de bombeo.

Este modelo simula el flujo entre los cuatro tanques, Tank Station (Figura 43). El volumen inicial en los tres tanques es de 100 m^3 y en el cuarto es 0 m^3 . El resultado de la simulación se muestra en el Bloque Display (volumen resultante en cada estación de tanques en el tiempo de 200s mientras se llena el Tank Station 4 (Tabla 9).

Tabla 9. Resultados de la simulación del sistema de suministro de agua con estaciones de bombeo en el tiempo de 200s.

Parámetro	Volumen simulado (m^3)
V_S1	99.13
V_S2	99.33
V_S3	100.5
V_S4	1.029

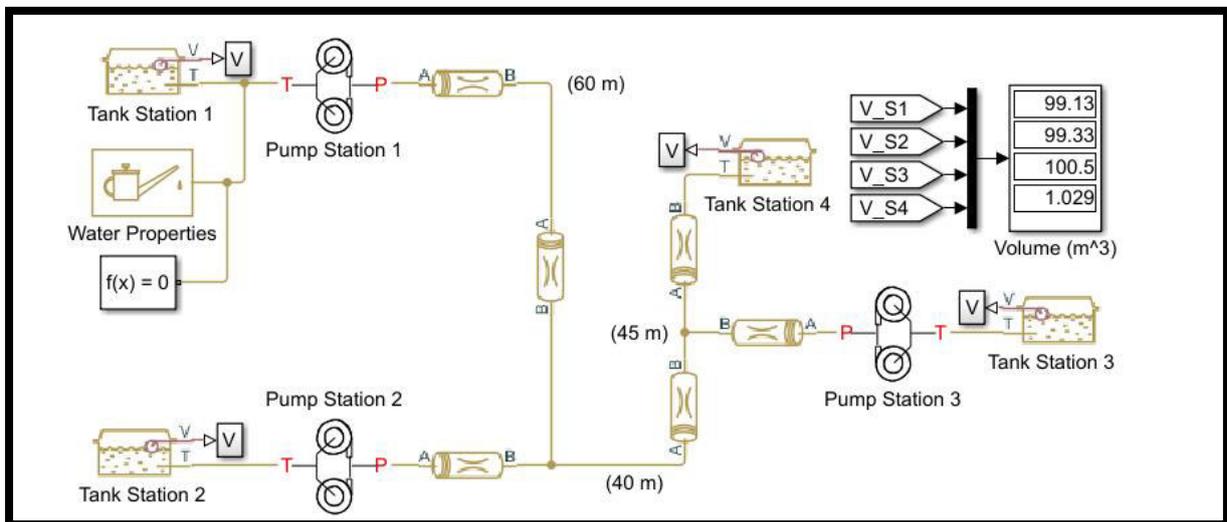


Figura 43. Resultado de simulación del sistema de suministro de agua con estaciones de bombeo.

4.2 Resultados obtenidos por la variación de parámetros.

Se realizó varias modificaciones de parámetros para encontrar distintas funciones de operaciones del sistema.

Modificación del diámetro en la línea de conducción del sistema de suministro de agua con estaciones de bombeo.

Se obtuvieron las siguientes gráficas en el bloque Tank Station 4, con un diámetro de 200 mm en toda la línea de conducción del sistema de suministro de agua con estaciones de bombeo.

Gráfica de volumen vs tiempo en el bloque Tank Station 4: volumen de 0 m^3 a 1 m^3 en un tiempo de 200 s (Figura 44)

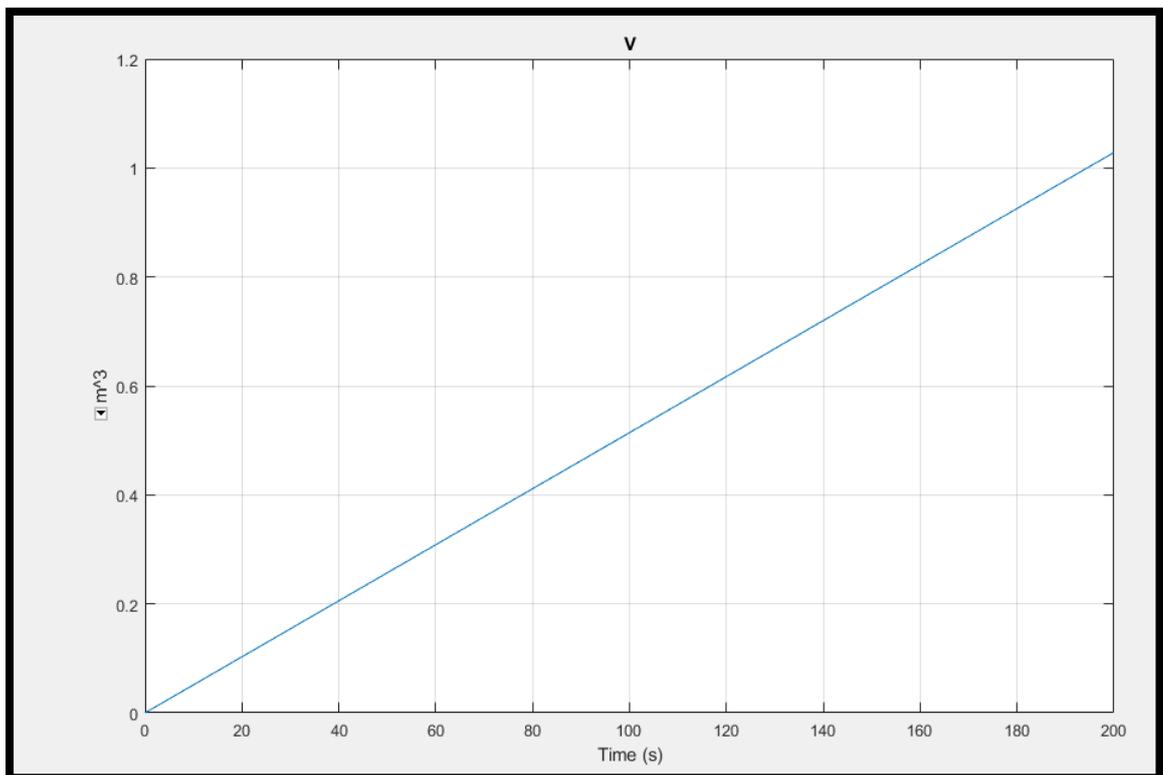


Figura 44. Gráfica de volumen vs tiempo en el bloque Tank Station 4

Gráfica de presión vs tiempo en el bloque Tank Station 4: presión igual a $1.60 \times 10^5 \text{ Pa}$ en un tiempo de 200 s (Figura 45).

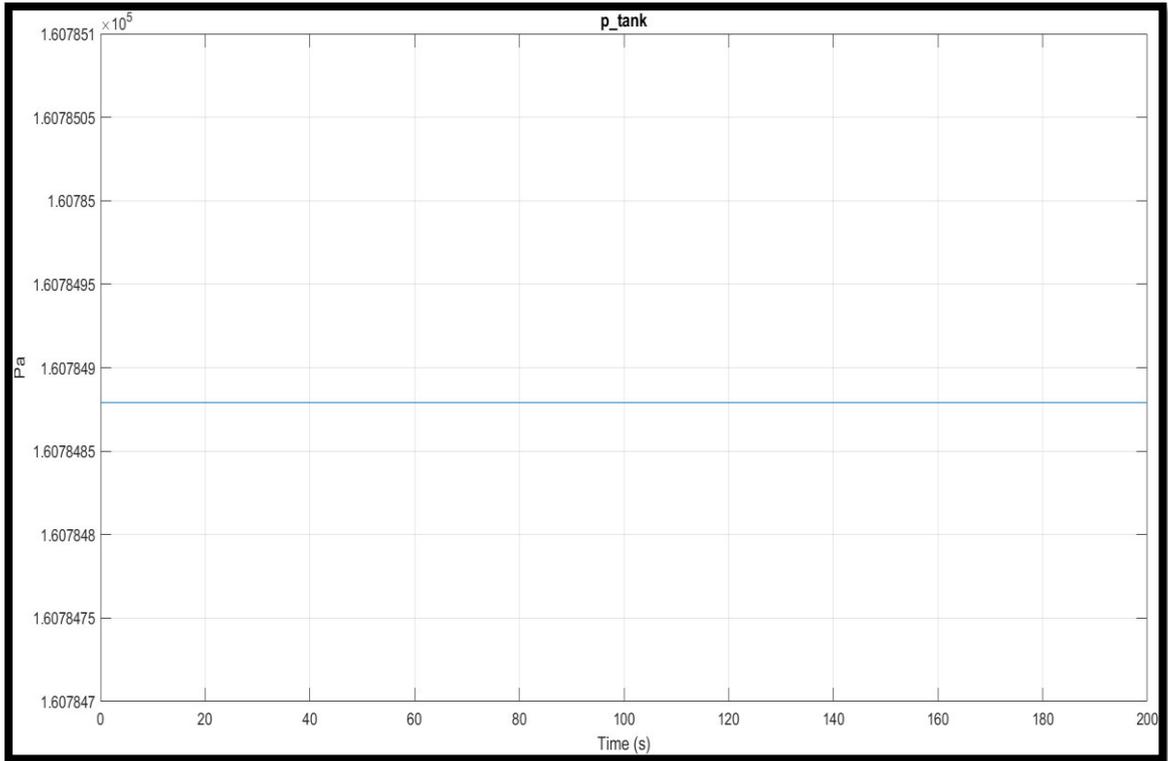


Figura 45. Gráfica de presión vs tiempo en el bloque Tank Station 4

Gráfica de caudal vs tiempo en el bloque Tank Station 4: caudal igual a $308.56 \frac{l}{min}$ en un tiempo de 200 s (Figura 46).

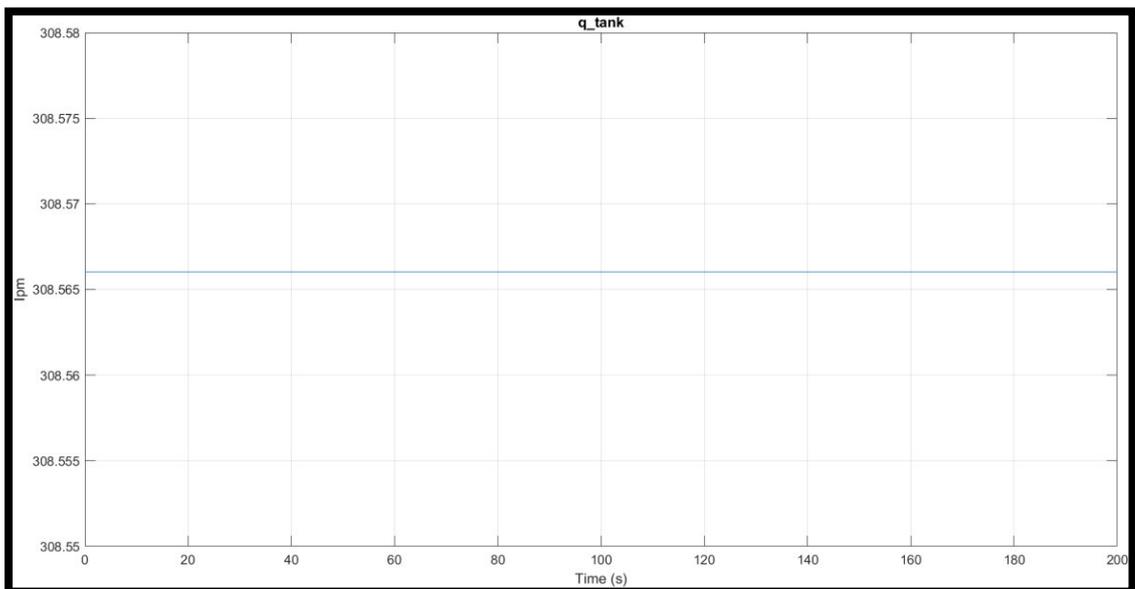


Figura 46. Gráfica de caudal vs tiempo en el bloque Tank Station 4

Modificación en Tank Station 4:

Se obtuvo las siguientes gráficas en el bloque Tank Station 4, modificando de 200 mm a 500 mm en toda la línea de conducción, del sistema de suministro de agua con estaciones de bombeo.

Gráfica de volumen vs tiempo en el bloque Tank Station 4: volumen de 0 m³ a 1 m³ en un tiempo de 200 s (Figura 47).

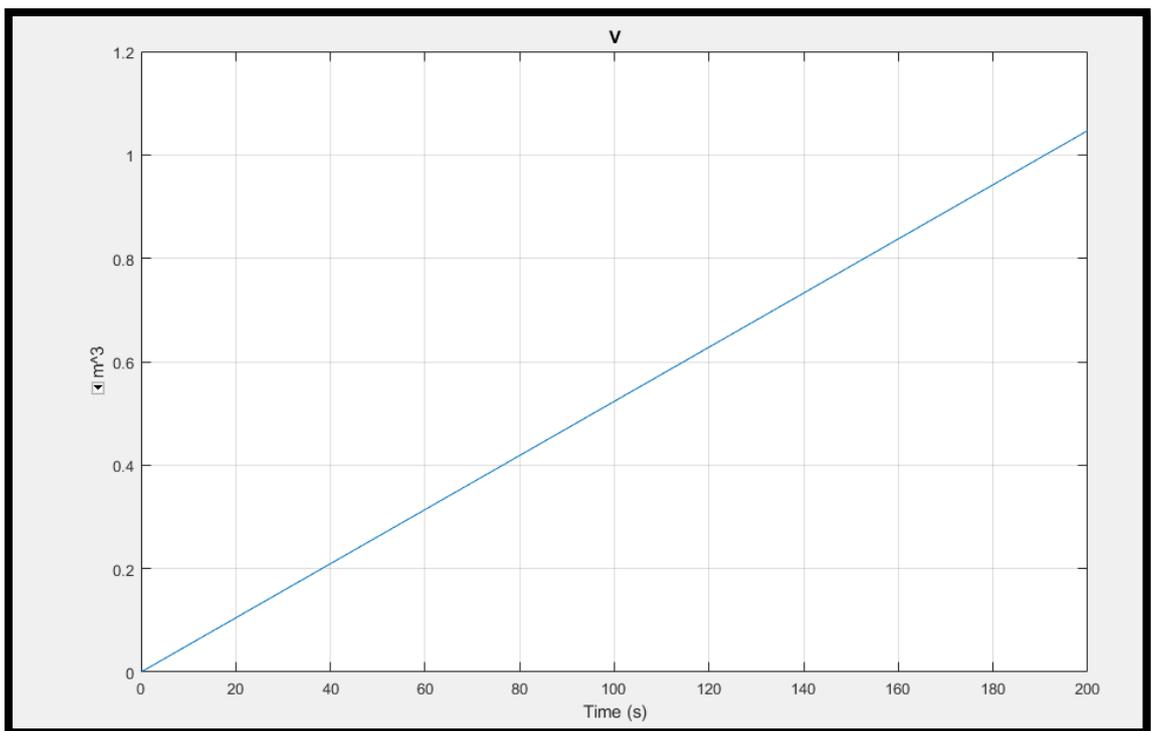


Figura 47. Gráfica de volumen vs tiempo en el bloque Tank Station 4, modificando de 200 mm a 500 mm en toda la tubería

Gráfica de presión vs tiempo en el bloque Tank Station 4: presión igual a $1.66 \times (10^5)$ Pa en un tiempo de 200 s (Figura 48).

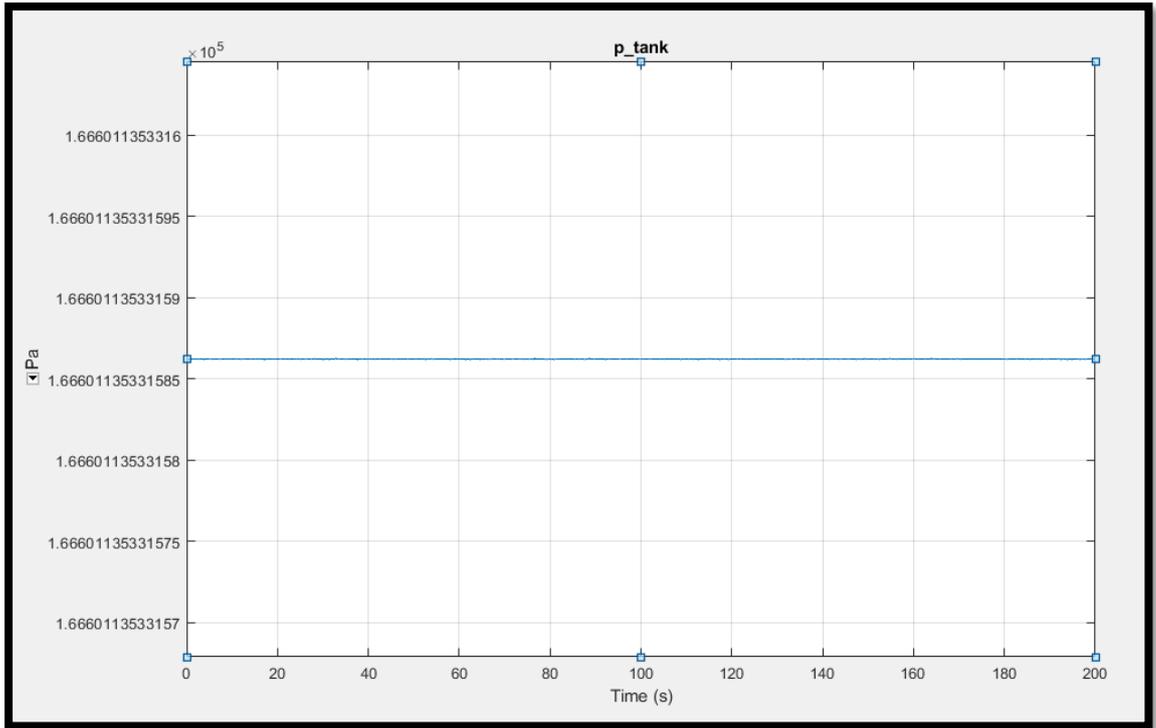


Figura 48. Gráfica de presión vs tiempo en el bloque Tank Station 4, modificando de **200 mm a 500 mm** en toda la tubería

Gráfica de caudal vs tiempo en el bloque Tank Station 4: caudal igual a $314.09 \frac{1}{\text{min}}$ en un tiempo de 200 s (Figura 49).

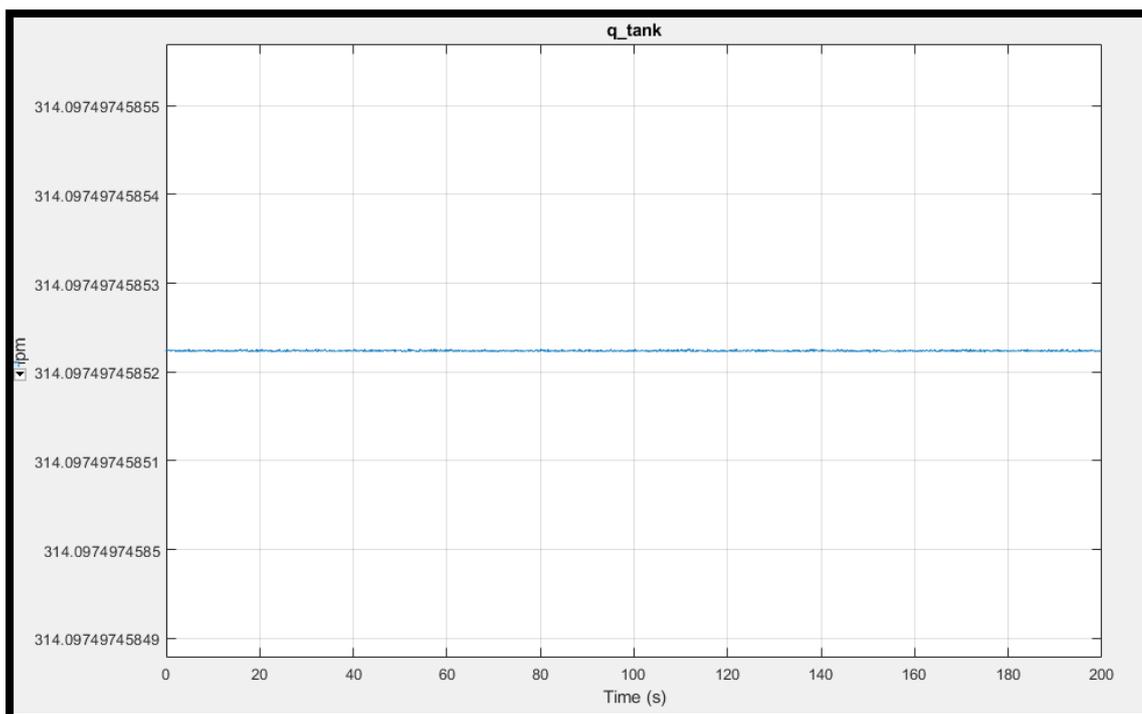


Figura 49. Gráfica de caudal vs tiempo en el bloque Tank Station 4 modificando de **200 mm a 500 mm** en toda la tubería

En la Tabla 10, se muestran los resultados obtenidos en las simulaciones anteriores.

Tabla 10. Comparativa de resultados en el bloque Tank Station 4 del sistema de suministro de agua con estaciones de bombeo.

Parámetros	Simulación sin modificación	Simulación con modificación	Tiempo
Volumen	0 m ³ a 1 m ³	0 m ³ a 1 m ³	0 a 200 s
Presión	1.60 × (10 ⁵)Pa	1.66 × (10 ⁵)Pa	0 a 200 s
Caudal	308.56 $\frac{l}{min}$	314.09 $\frac{l}{min}$	0 a 200 s

Comparación de resultados:

Se modificó el diámetro de la tubería de PVC en toda la línea de conducción de 200 mm a 500 mm, en el sistema de suministro de agua con estaciones de bombeo, y se obtuvo la variación porcentual de los resultados en el bloque Tank Station 4 (Tabla 11).

Tabla 11. Variación porcentual en el bloque Tank Station 4 del sistema de suministro de agua con estaciones de bombeo.

Parámetros	Tiempo	Rango de variación	Variación porcentual del caudal
Presión	0 a 200 s	$1.60 \times (10^5) \text{ Pa}$ a $1.66 \times (10^5) \text{ Pa}$	Aumento porcentual de 3.61%
Caudal	0 a 200 s	$308.56 \frac{\text{l}}{\text{min}}$ a $314.09 \frac{\text{l}}{\text{min}}$	Aumento porcentual de 1.79%

Análisis:

El incremento porcentual de 3.61% en la presión, se debe al incremento del área de succión y descarga en la tubería.

El incremento porcentual de 1.79% en el caudal, se debe a que esta variable es directamente proporcional al área transversal de la tubería.

Modificación de la velocidad angular en la estación de bombeo del sistema de suministro de agua con varias estaciones de bombeo.

Se obtuvieron las siguientes gráficas en el bloque Tank Station 1, con una velocidad angular de 1700 rpm en la Pump Station 1, del sistema de suministro de agua con estaciones de bombeo.

Gráfica de presión vs tiempo en el bloque Tank Station 1: presión igual a $4.06 \times (10^5) \text{ Pa}$ en un tiempo de 200 s (Figura 50).

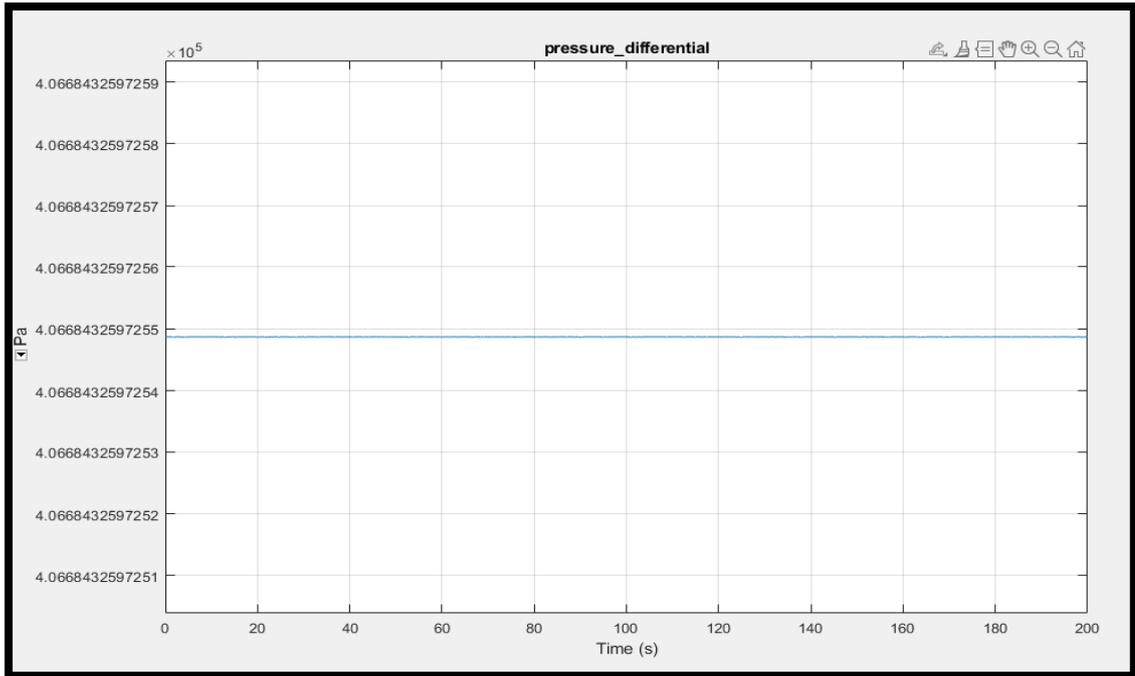


Figura 50. Gráfica de presión vs tiempo en el bloque Tank Station 1

Gráfica de caudal vs tiempo en el bloque Tank Station 1: caudal igual a $2.18 \times (10^{-3}) \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$ en un tiempo de 200 s (Figura 51).

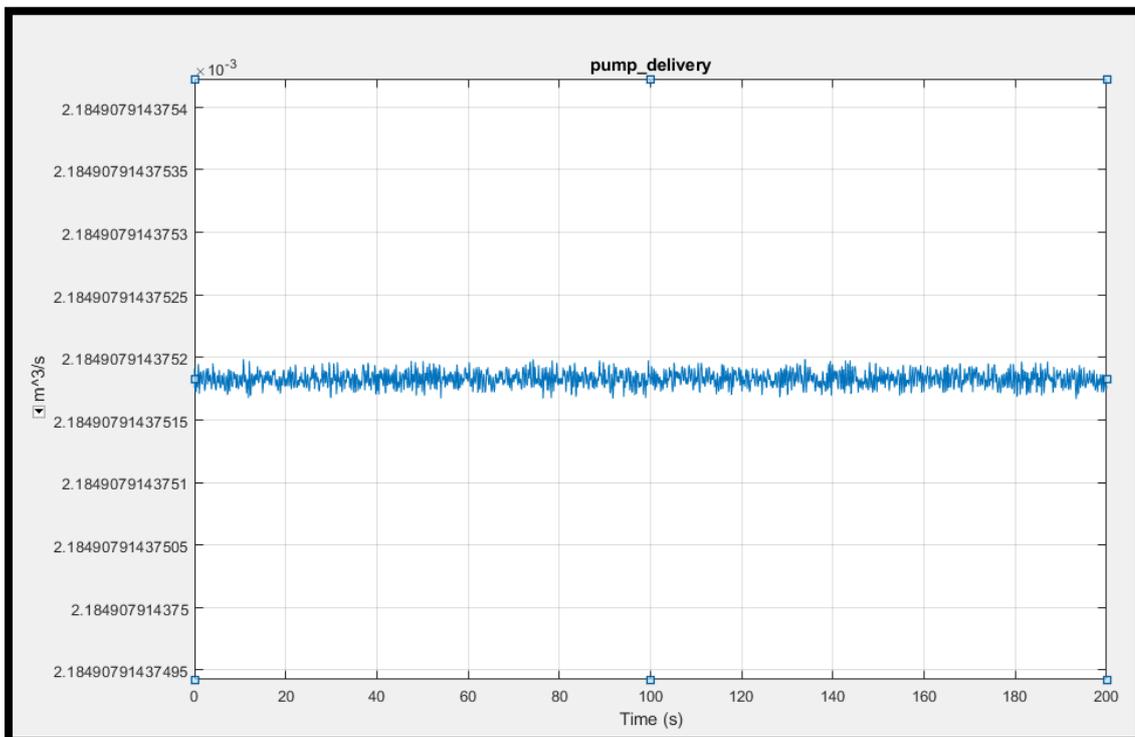


Figura 51. Gráfica de caudal vs tiempo en el bloque Tank Station 1

Modificación en Tank Station 1:

Se obtuvo las siguientes gráficas en el bloque Tank Station 1, modificando la velocidad angular de 1700 rpm a 3000 rpm en la Pump Station 1, del sistema de suministro de agua con estaciones de bombeo.

Gráfica de presión vs tiempo en el bloque Tank Station 1: presión igual a $1.25 \times (10^6)$ Pa en un tiempo de 200 s (Figura 52).

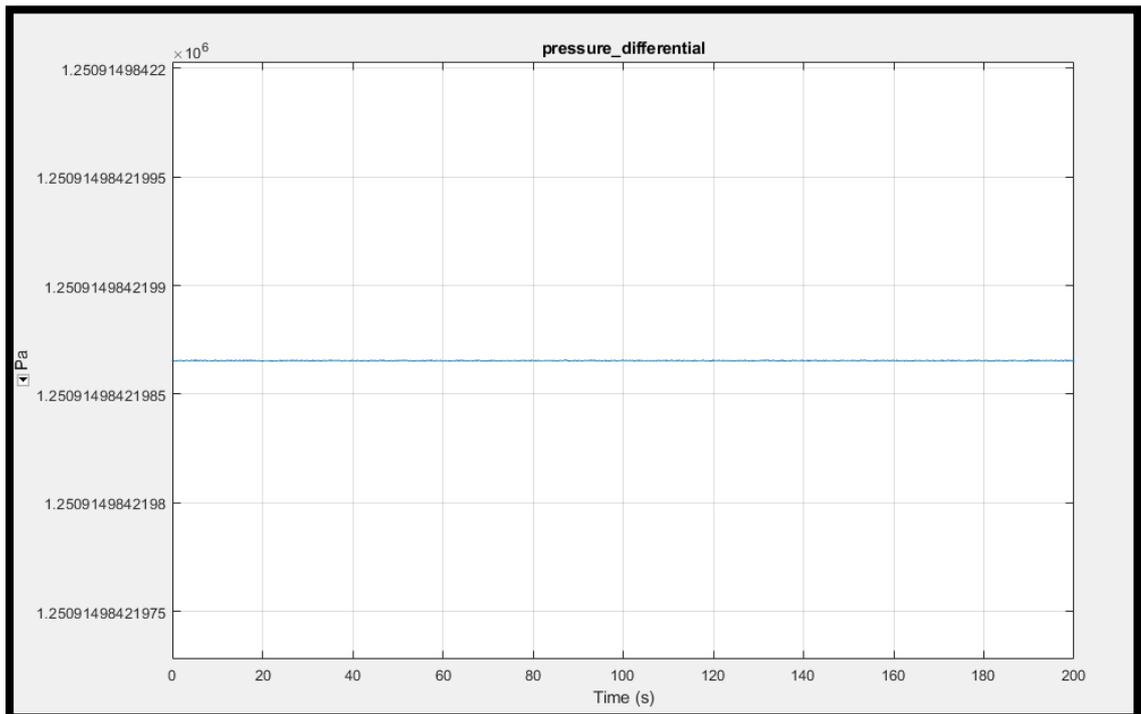


Figura 52. Gráfica de presión vs tiempo en el bloque Tank Station 1, modificando de **1700 rpm a 3000 rpm** en la Pump Station 1

Gráfica de caudal vs tiempo en el bloque Tank Station 1: caudal igual a $5.80 \times (10^{-3}) \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$ en un tiempo de 200 s (Figura 53).

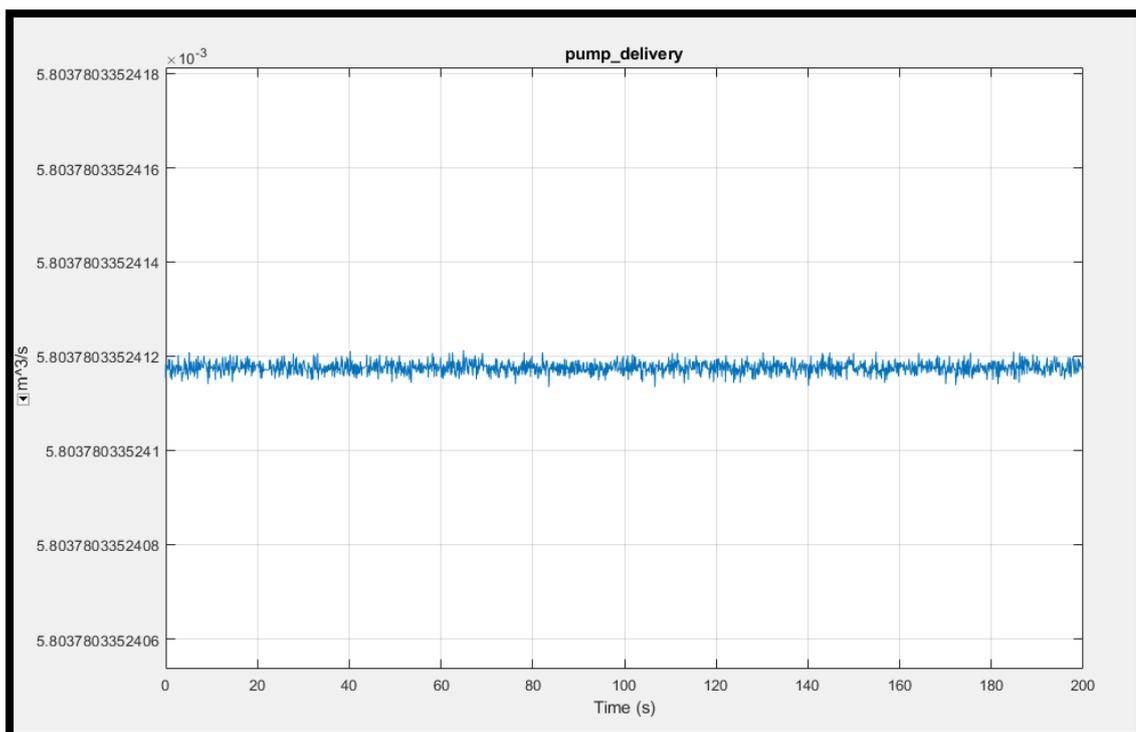


Figura 53. Gráfica de caudal vs tiempo en el bloque Tank Station 1, modificando de **1700 rpm a 3000 rpm** en la Pump Station 1

En la Tabla 12, se muestran los resultados obtenidos en las simulaciones anteriores.

Tabla 12. Comparativa de resultados en el bloque Tank Station 1 del sistema de suministro de agua con estaciones de bombeo.

Parámetros	Simulación sin modificación	Simulación con modificación	Tiempo
Presión	$4.06 \times (10^5)$ Pa	$1.25 \times (10^6)$ Pa	0 a 200 s
Caudal	$2.16 \times (10^{-3}) \frac{m^3}{s}$	$5.80 \times (10^{-3}) \frac{m^3}{s}$	0 a 200 s

Comparación de resultados:

Se modificó la velocidad angular en la Pump Station 1 de 1700 rpm a 3000 rpm, en el sistema de suministro de agua con estaciones de bombeo, y se obtuvo la variación porcentual de los resultados en el bloque Tank Station 1 (Tabla 13).

Tabla 13. Variación porcentual en el bloque Tank Station 1 del sistema de suministro de agua con estaciones de bombeo.

Parámetros	Tiempo	Rango de variación	Variación porcentual del caudal
Presión	0 a 200 s	$4.06 \times (10)^5 \text{ Pa}$ a $1.25 \times (10)^6 \text{ Pa}$	Aumento porcentual de 67.52%
Caudal	0 a 200 s	$2.16 \times (10^{-3}) \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$ a $5.80 \times (10^{-3}) \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$	Aumento porcentual de 62.75%

Análisis:

El incremento porcentual de 67.52% en la presión, se debe al incremento de velocidad angular del eje del motor conectado al impulsor de la bomba.

El incremento porcentual de 62.75% en el caudal, se debe al incremento de la velocidad angular del impulsor.

4.3 Modelación y simulación del sistema de bombeo de la Junta Administradora de Agua Potable y Saneamiento de Cutuglagua (JAAPS-C).

Este modelo simula el funcionamiento del sistema de la JAAPS-C, formado por los siguientes bloques: Bloque Hydraulic Reference, Constant Head Tank, Resistive Pipe LP 1, Resistive Pipe LP 2, Resistive Pipe LP 3, Hydraulic Fluid y el subsistema de bombeo; con el fin de obtener el caudal y variar diferentes parámetros que permitan identificar las características operativas del sistema.

Al simular el sistema de la JAAPS-C, se determinó el caudal igual a $0.01865 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$. El resultado de la simulación se muestra en el Bloque Display (Figura 54).

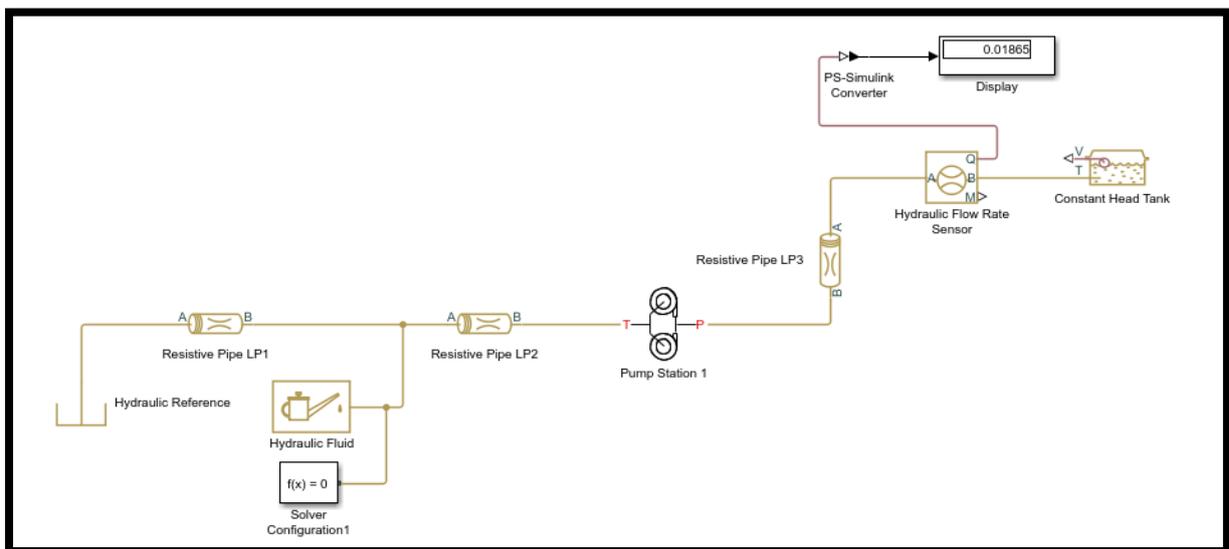


Figura 54. Resultado de la simulación del sistema de la JAAPS-C

Se obtuvieron las siguientes gráficas a una altura piezométrica de 3158 m s. n. m del bloque Constant Head Tank del sistema de la JAAPS-C.

Gráfica de presión vs tiempo en el bloque Constant Head Tank: presión igual a 201.37 psi en un tiempo de simulación 10 s (Figura 55).

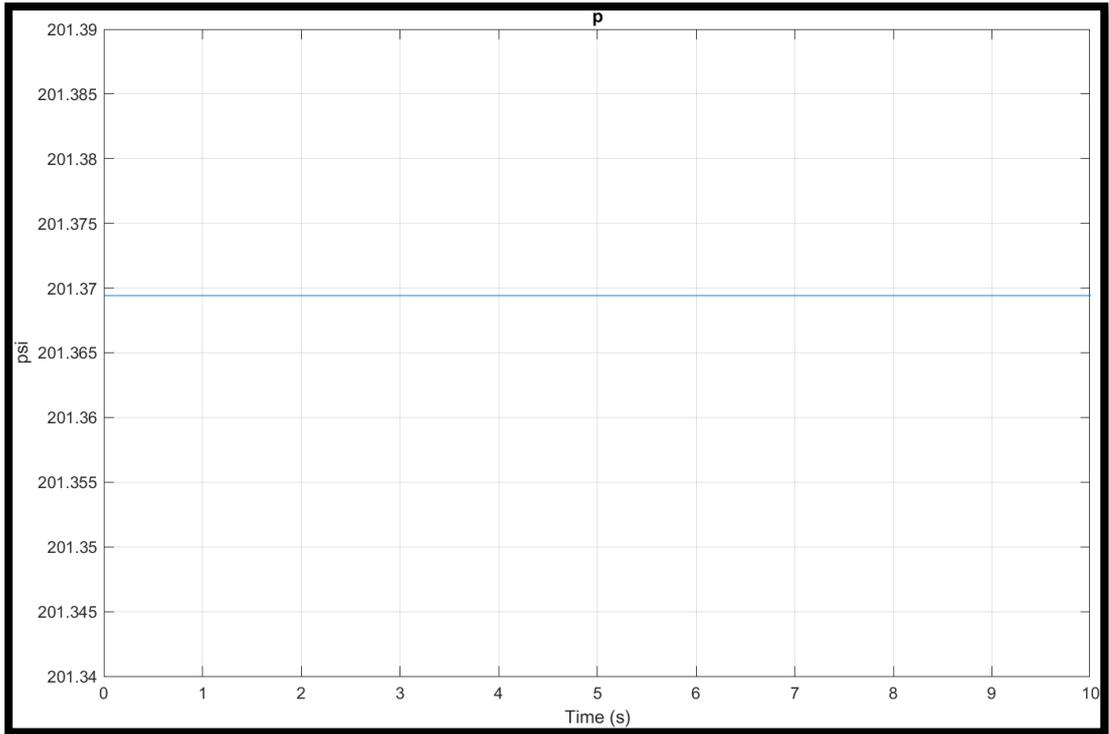


Figura 55. Gráfica de presión vs tiempo en el bloque Constant Head Tank

Gráfica de caudal vs tiempo en el bloque Constant Head Tank: caudal igual a $0.01878 \frac{m^3}{s}$ en 10 s (Figura 56).

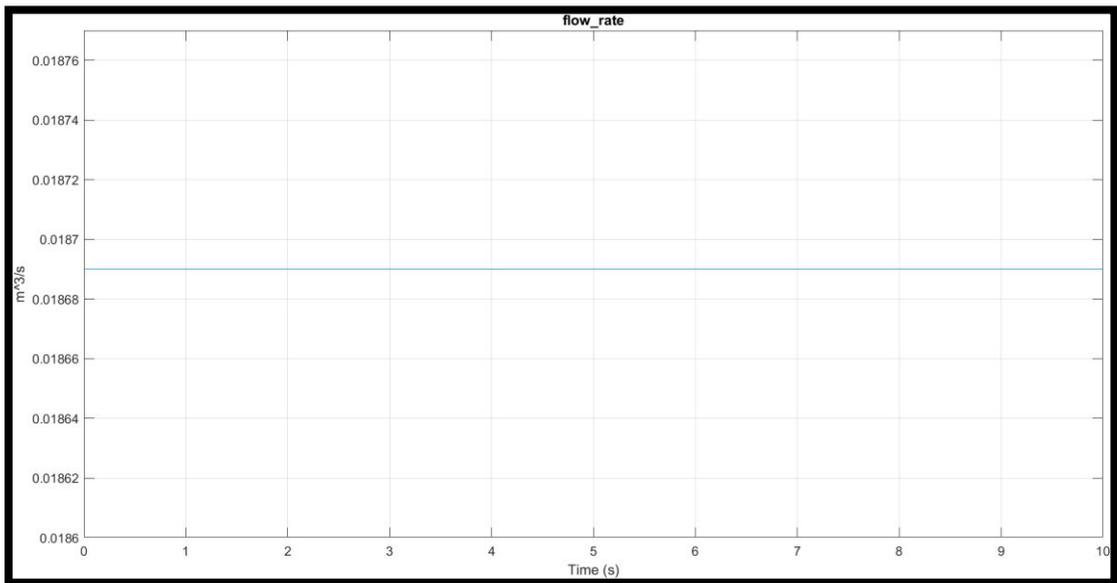


Figura 56 Gráfica de caudal vs tiempo en el bloque Constant Head Tank

Modificación en Constant Head Tank:

Se obtuvo las siguientes gráficas modificando la altura piezométrica de 3158 m s. n. m. a 3168 m s. n. m, en el bloque Constant Head Tank del sistema de bombeo de la JAAPS-C.

Gráfica presión vs tiempo en el bloque Constant Head Tank, presión igual a 206.5 psi en 10 s (Figura 57).

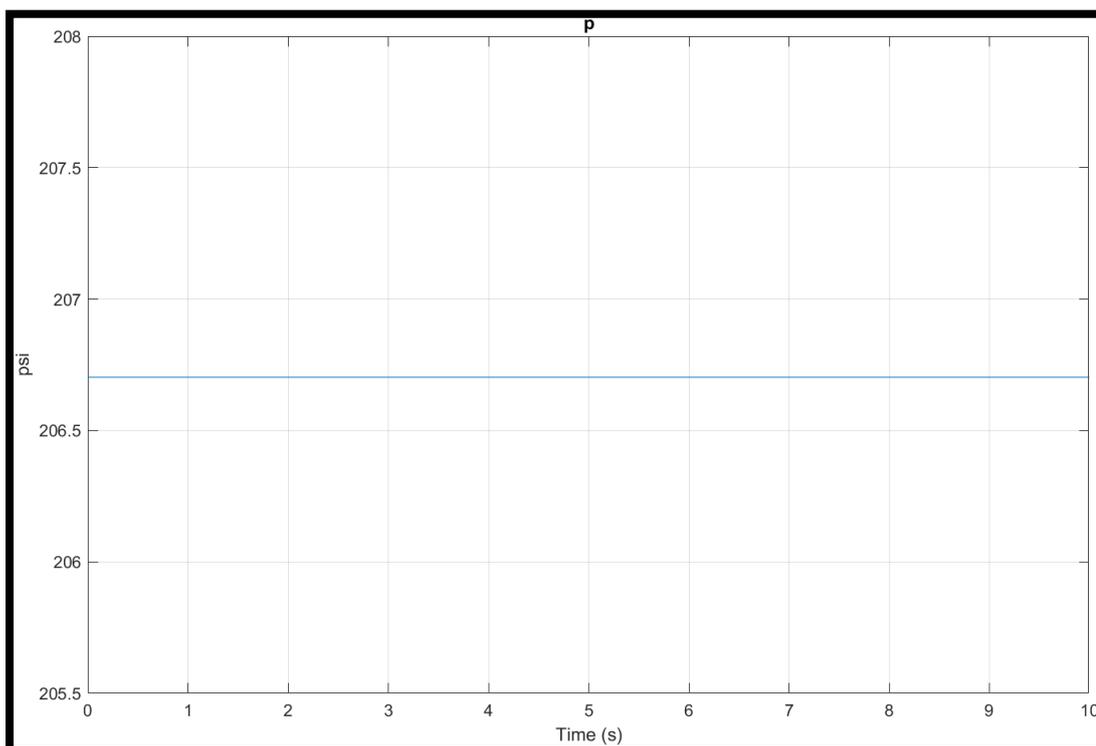


Figura 57 Gráfica de presión vs tiempo en el bloque Constant Head Tank, modificando la altura piezométrica

Gráfica de caudal vs tiempo en el bloque Constant Head Tank: caudal igual a $0.01688 \frac{m^3}{s}$ en 10 s (Figura 58).

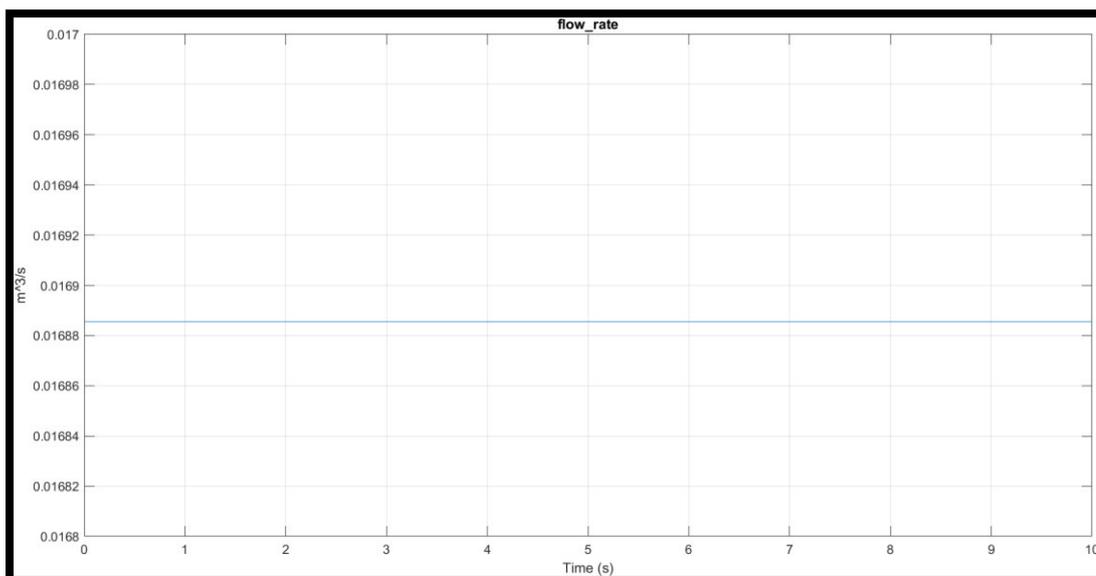


Figura 58 Gráfica de caudal vs tiempo en el bloque Constant Head Tank, modificando la altura piezométrica

En la Tabla 14, se muestran los resultados obtenidos en las simulaciones anteriores.

Tabla 14. Comparativa de resultados en el bloque Constant Head Tank del sistema de la JAAPS-C.

Parámetros	Simulación sin modificación	Simulación con modificación	Tiempo
Presión	201.37 psi	206.51 psi	0 a 10 s
Caudal	$0.01878 \frac{m^3}{s}$	$0.01688 \frac{m^3}{s}$	0 a 10 s

Comparación de resultados:

Se modificó la altura piezométrica de 3158 m s.n.m. a 3168 m s.n.m, en el sistema de bombeo de la JAAPS-C, y se obtuvo la variación porcentual de los resultados en el bloque Constant Head Tank (Tabla 15).

Tabla 15. Variación porcentual en el bloque Constant Head Tank del sistema la JAAPS-C.

Parámetros	Tiempo	Rango de variación	Variación porcentual del caudal
Presión	0 a 10 s	201.37 psi a 206.51 psi	Aumento porcentual de 2.48%
Caudal	0 a 10 s	$0.01878 \frac{m^3}{s}$ a $0.01688 \frac{m^3}{s}$	Disminución porcentual de 10.11%

Análisis:

El incremento porcentual de 2.48% en la presión, se debe a la mayor elevación del tanque de suministro.

La disminución porcentual de 10.11% en el caudal, se debe al incremento en la distancia a la que se encuentra el tanque de suministro.

Modificación de la velocidad angular en la estación de bombeo del sistema de la JAAPS-C.

Se obtuvo la siguiente gráfica en el Bloque Resistive Pipe LP 3, con una velocidad angular de 3600 rpm en la Pump Station 1, del sistema de la JAAPS-C.

- Gráfica del caudal vs tiempo en el Bloque Resistive Pipe LP 3: caudal igual a $1121.4 \frac{l}{min}$ en un tiempo de 10 s (Figura 59).

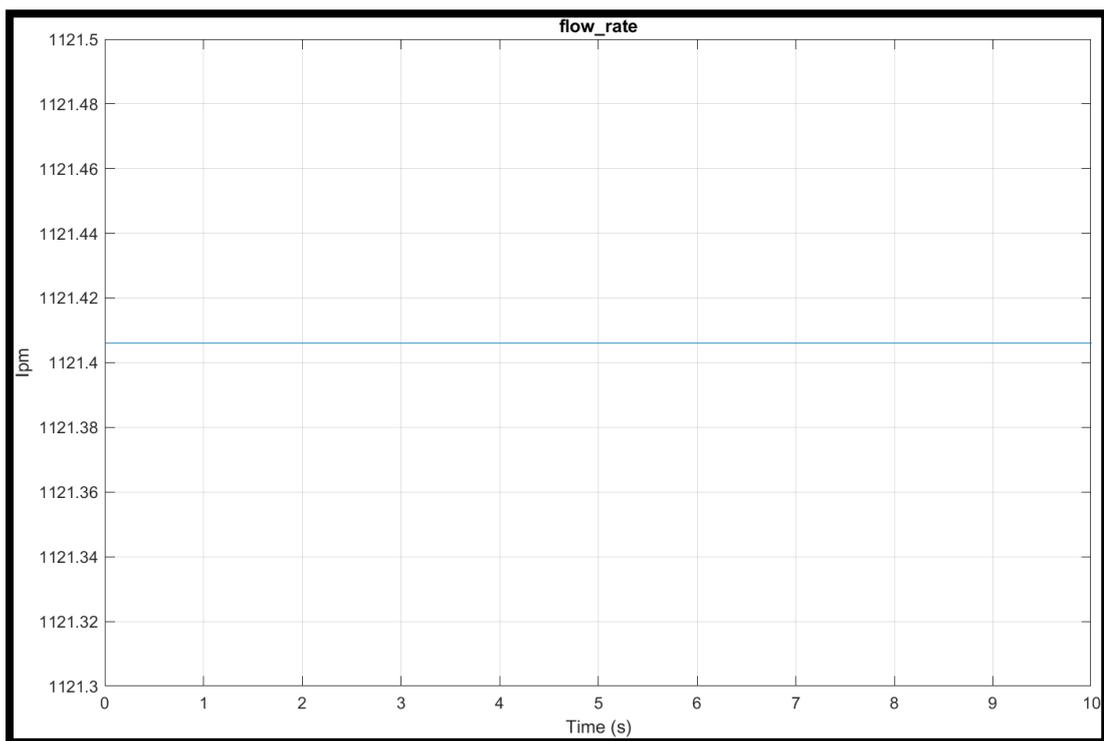


Figura 59. Gráfica de caudal vs tiempo en el Bloque Resistive Pipe LP 3

Modificación en Resistive Pipe LP 3:

Se obtuvo la siguiente gráfica en el Bloque Resistive Pipe LP 3, modificando la velocidad angular de 3600 rpm a 3000 rpm en la Pump Station 1, del sistema de la JAAPS-C.

Gráfica de caudal vs tiempo en el Bloque Resistive Pipe LP 3: caudal igual a $441.367 \frac{1}{\text{min}}$ en un tiempo de 10 s (Figura 60).

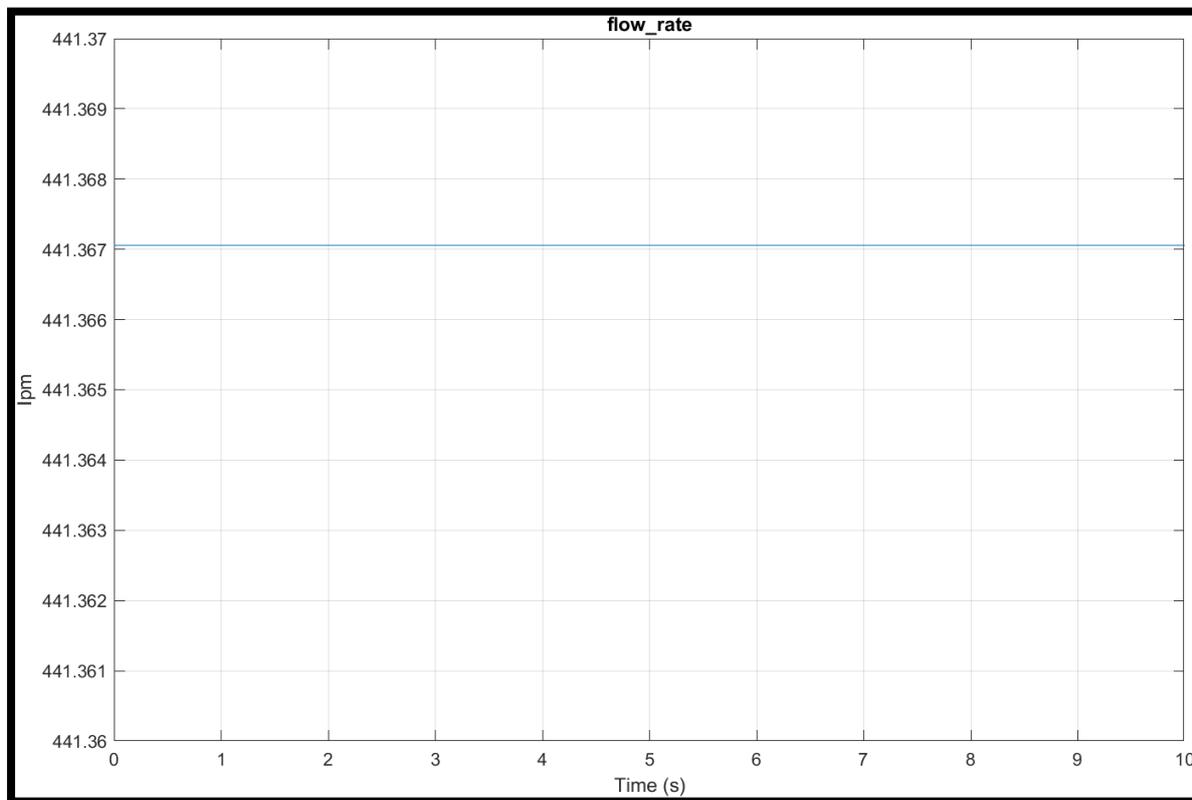


Figura 60. Gráfica de caudal vs tiempo en Bloque Resistive Pipe LP 3, modificando de 3600 rpm a 3000 rpm en la Pump Station 1

En la Tabla 16, se muestran los resultados obtenidos en las simulaciones anteriores.

Tabla 16. Comparativa de resultados en el Bloque Resistive Pipe LP 3 del sistema de la JAAPS-C.

Parámetros	Simulación sin modificación	Simulación con modificación	Tiempo
Caudal	$1121.4 \frac{1}{\text{min}}$	$441.397 \frac{1}{\text{min}}$	0 a 10 s

Comparación de resultados:

Se modificó la velocidad angular en la Pump Station 1 de 3600 rpm a 3000 rpm, en el sistema de la JAAPS-C, y se obtuvo la variación porcentual de los resultados en el Bloque Resistive Pipe LP 3 modificando la velocidad en el Bloque Centrifugal Pump (Tabla 17).

Tabla 17. Variación porcentual en el Bloque Resistive Pipe LP 3 del sistema de la JAAPS-C.

Variación porcentual al modificar la velocidad angular			
Parámetros	Tiempo	Rango de variación	Variación porcentual del caudal
Caudal	0 a 10 s	$1121.4 \frac{1}{\text{min}}$ a $441.3977 \frac{1}{\text{min}}$	Disminución porcentual de 60.3%

Análisis:

La disminución porcentual de 60.3% en el caudal, se debe a la menor velocidad angular del impulsor de la bomba.

Ventajas e importancia de realizar simulaciones del sistema en la fase de diseño previo a la fase de implementación y construcción.

Con las simulaciones realizadas anteriormente se evidencia las ventajas e importancia de realizar simulaciones de los sistemas en la fase de diseño, previo a la fase de implementación y construcción.

Las exigencias de los consumidores en las comunidades que se atienden en el territorio por el líquido vital han dado sitio a la investigación de nuevos procesos, que permitan mejorar la calidad en la distribución, abastecimiento y entrega de agua potable; por lo cual las simulaciones digitales muestran como una elección eficaz de los elementos que conforman el sistema de suministro, encaran a los desafíos impuestos a los métodos tradicionales.

La importancia de simular un sistema de bombeo en el software de Matlab y Simulink, es la reducción de precios en la construcción de prototipos físicos, con el fin de evaluar los resultados que avalen el desempeño de los elementos del sistema.

Otra ventaja es disponer de una forma de comprobación instantánea, sin arriesgar el funcionamiento del sistema de suministro, dejando de lado la complejidad del mismo.

4.4 Comparación de resultados teóricos y simulados.

A inicio se tomó un ejemplo de bibliografía y se lo resolvió teóricamente (Anexo 4. Figura 91), para después simularlo, y comprobar los resultados teóricos con los simulados.

Ejercicio de bibliografía: Sistema de distribución de agua a gravedad.

Este modelo simula el funcionamiento del sistema de distribución de agua a gravedad, formado por los siguientes bloques: Tanque 1, Water Properties, Tanque 2; con el fin de obtener el caudal que entrega la línea de conducción al Tanque 2.

Al simular el sistema de distribución de agua a gravedad, se determinó el caudal igual a $0.375 \frac{m^3}{s}$ (Figura 61).

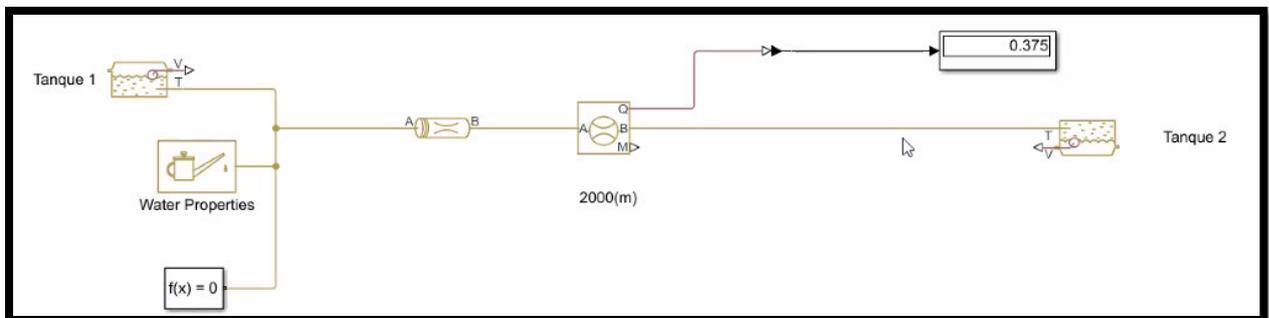


Figura 61. Resultado del caudal en la simulación del sistema de distribución de agua a gravedad

En la resolución teórica del ejercicio (Anexo 4), se obtuvo un caudal igual a $0.359 \frac{m^3}{s}$.

En la Tabla 18 se muestra el resultado del caudal obtenido en la simulación y en la resolución teórica del ejercicio de un sistema de distribución de agua a gravedad.

Tabla 18. Comparativa del caudal obtenido en la simulación y en la resolución teórica del ejercicio.

Método de resolución	Caudal
Resultado de modelación y simulación	$0.375 \frac{m^3}{s}$
Resultado de resolución teórica	$0.359 \frac{m^3}{s}$

Análisis:

El resultado porcentual del caudal de entrega, disminuyó el 4.26% en el ejercicio de resolución teórica.

La diferencia entre el caudal medido y el simulado se produce debido a que, Simulink considera los valores que afectan a la tubería (sistema físico), como son: pérdidas por fricción en el tanque, temperatura, número de Reynolds, etc.

Sistema de bombeo de la JAAPS-C.

Este modelo simula el funcionamiento del sistema de la JAAPS-C, formado por los siguientes bloques: Bloque Hydraulic Reference, Constant Head Tank, Resistive Pipe LP 1, Resistive Pipe LP 2, Resistive Pipe LP 3, Hydraulic Fluid y el subsistema de bombeo; con el fin de obtener y comparar el caudal de entrega en el Bloque Display (Figura 62).

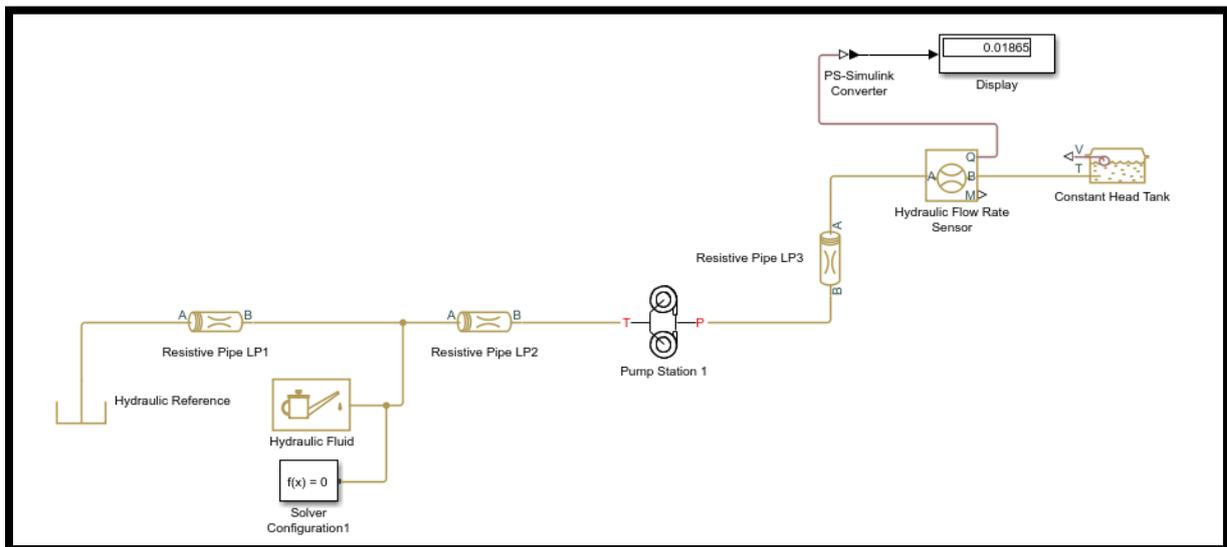


Figura 62. Resultado del caudal en la simulación del sistema de la JAAPS-C

Al simular el sistema de la JAAPS-C, se determinó el caudal igual a $0.018 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$ (Figura 62).

El caudal del sistema de la JAAPS-C se midió con un instrumento ultrasónico (Anexo 1. Figura 86), y se obtuvo un caudal igual a $0.00869 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$.

En la resolución teórica para calcular el caudal del sistema de la JAAPS-C, se calculó con el método volumétrico (Anexo 5. Tabla 23), y se obtuvo un caudal igual a $0.0159 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$.

En la Tabla 19, se muestran los resultados de los caudales obtenidos con diferentes procedimientos.

Tabla 19. Comparativas de los resultados de caudales, en el sistema de la JAAPS-C.

Resultados	Caudal
Resultado de modelación y simulación	$0.01869 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$
Medición con un instrumento ultrasónico	$0.00869 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$
Resultado teórico con método volumétrico	$0.0159 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$

Análisis:

El resultado porcentual del caudal de entrega medido con el instrumento disminuyó el 53.50%, con respecto al resultado de la simulación.

El resultado porcentual del caudal de entrega calculado teóricamente disminuyó el 25.55%, con respecto al resultado de la simulación.

Al simular el sistema de la JAAPS-C, se determinó la presión a la salida de la bomba de 201.37 psi (Figura 55).

La presión a la salida de la bomba de la JAAPS-C, se midió con un manómetro en campo (Anexo 1. Figura 87), se obtuvo una presión igual a 200 psi.

En la Tabla 20, se muestran los resultados de las presiones de descarga obtenidas con diferentes procedimientos.

Tabla 20. Comparativas de los resultados de presiones de salida de la bomba en el sistema de la JAAPS-C.

Resultados	Caudal
Resultado de modelación y simulación	201.37 psi
Medición con un manómetro	200 psi

Análisis:

El resultado porcentual de la presión de descarga medido con el instrumento disminuyó el 0.68%, con respecto al resultado de la simulación.

De acuerdo a los resultados obtenidos, se evidencia que la presión de descarga medida y simulada, son similares.

4.5 Identificación de características operativas del sistema de bombeo simulado.

De acuerdo al trabajo realizado en el sistema JAAPS-C: análisis, levantamiento de información en campo, configuración de parámetros para modelamiento, simulación; y análisis de los resultados teóricos y simulados. Se determinan las características operativas del sistema JAAPS-C.

El sistema tiene un caudal igual a $0.01868 \left(\frac{\text{m}^3}{\text{s}}\right)$ (Figura 63).

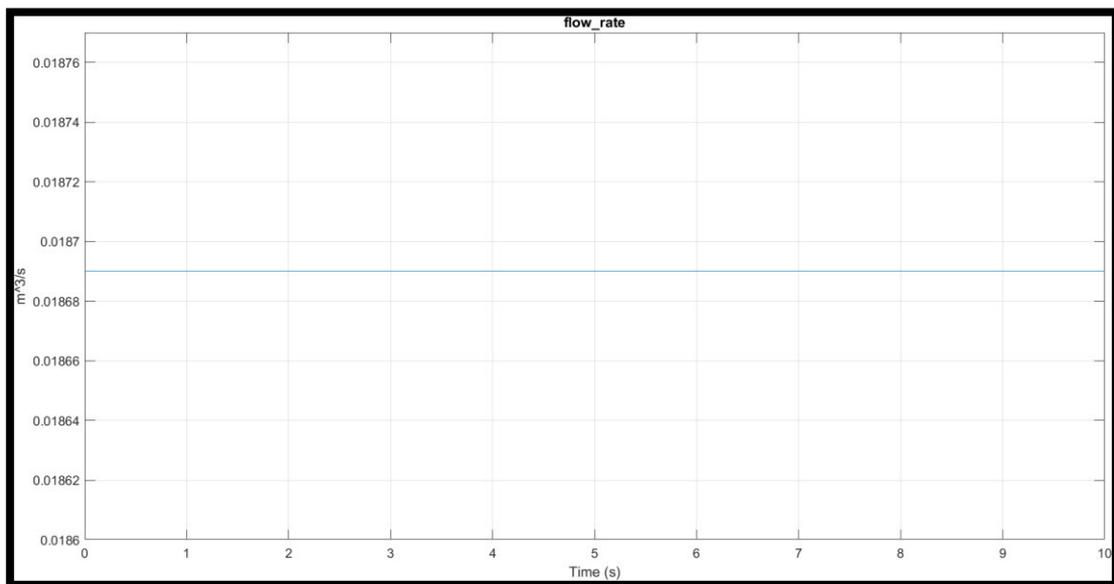


Figura 63. Caudal del sistema de la JAAPS-C

La velocidad angular de la bomba es 3600 rpm (Figura 64).

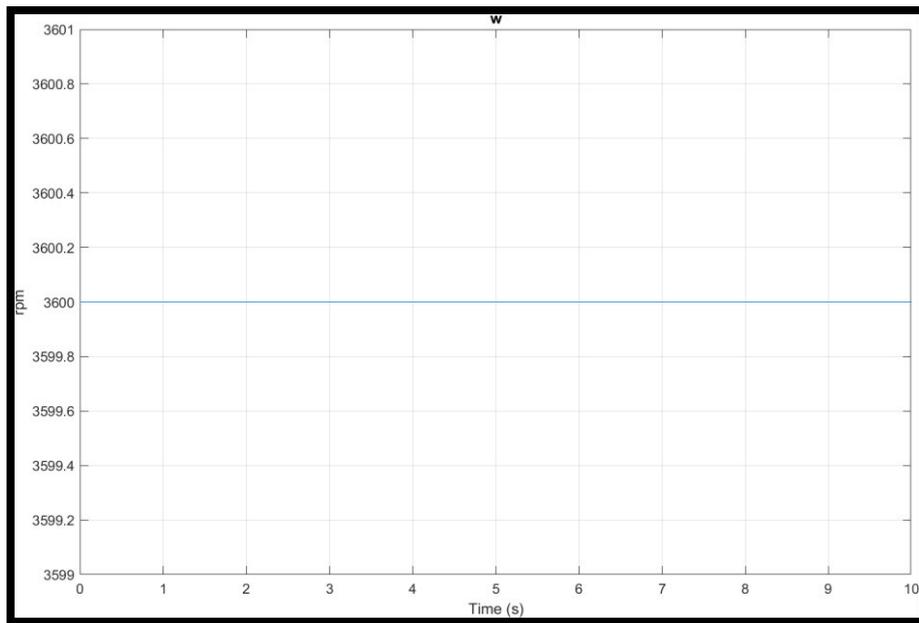


Figura 64. Velocidad angular de la bomba del sistema de la JAAPS-C

El torque de funcionamiento de la bomba corresponde a 35.24 m. N. (Figura 65)

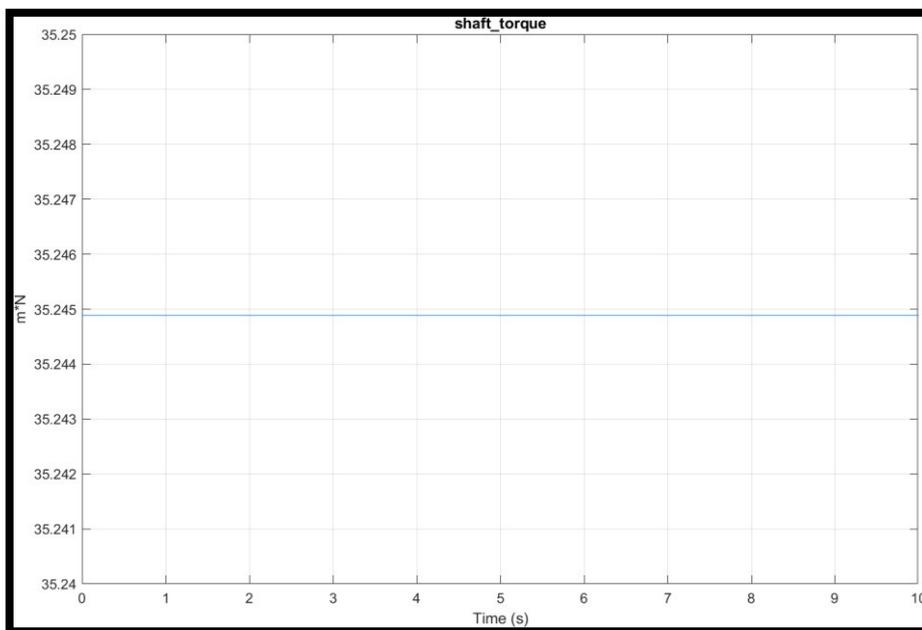


Figura 65. Torque de la bomba del sistema de la JAAPS-C

La presión de descarga es igual a 201.365 psi (Figura 66).

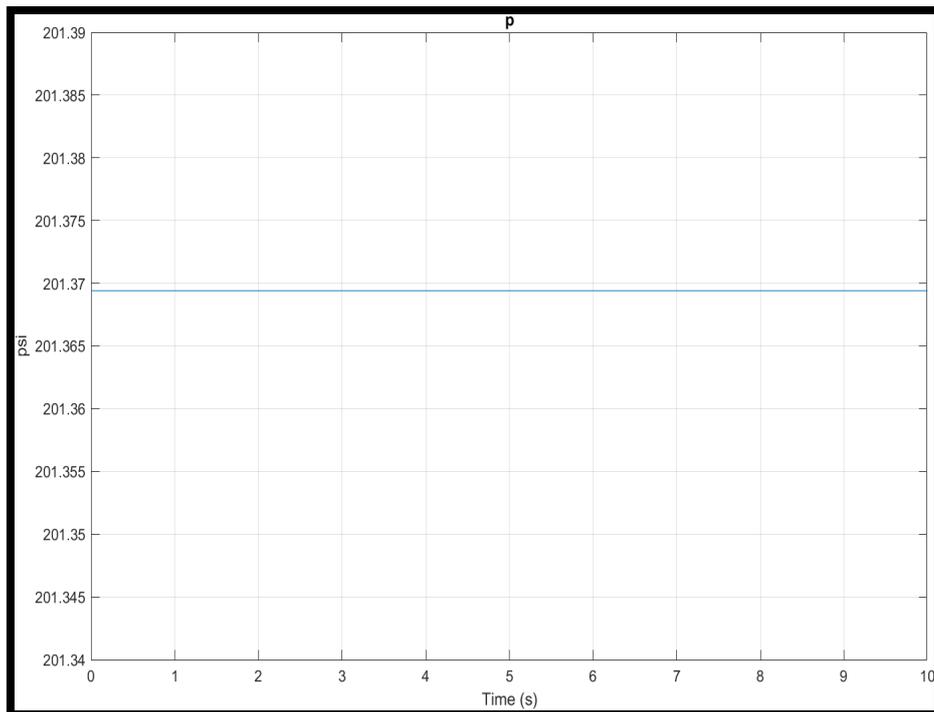


Figura 66. Presión de descarga de la bomba del sistema de la JAAPS-C

De acuerdo a las características operativas indicadas anteriormente, se realiza el análisis de las mismas en las curvas características de la bomba especificadas por el fabricante.

En la Figura 67 se representan las características operativas identificadas, y se muestra el punto de trabajo de la bomba. De acuerdo a la potencia de la bomba calculada (Anexo 5) se evidencia que la bomba trabaja aproximadamente a 75 hp.

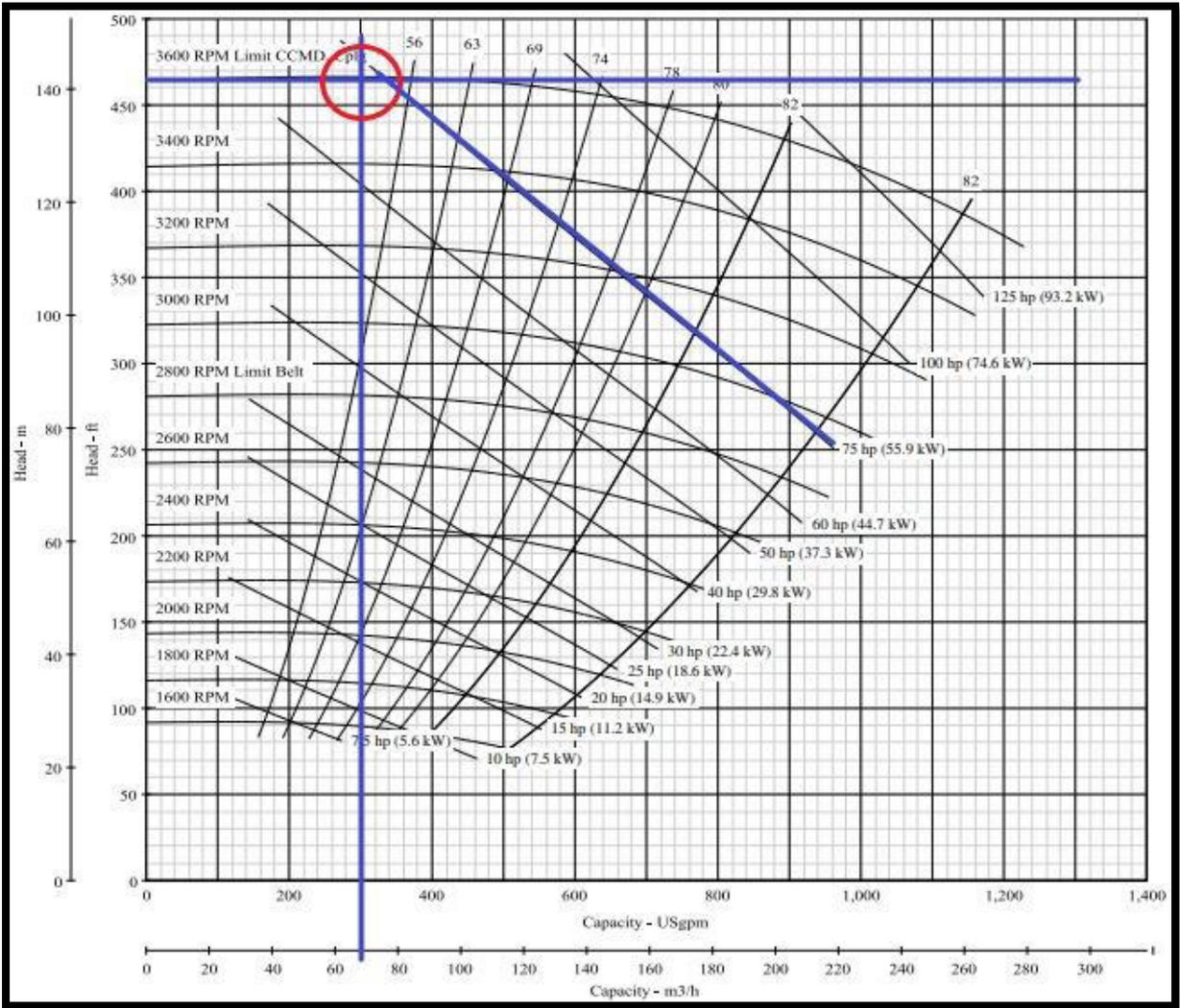


Figura 67. Características operativas de la bomba del sistema de la JAAPS-C

4.6 Guía para la simulación de un sistema de suministro de agua.

A continuación, se presentan los Códigos QR del video de la simulación del sistema de la JAAPS-C y la guía para la simulación del sistema.



Figura 68. Código QR del video de la simulación del sistema de la JAAPS-C

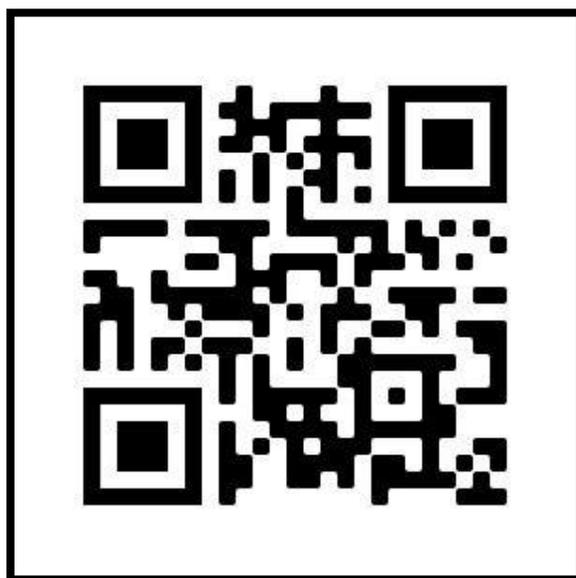


Figura 69. Código QR de la Guía para la simulación de un sistema de suministro de agua

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- Matlab es un entorno informático que permite programar y simular diferentes procesos. Este software se aplica en cualquier disciplina basada en ecuaciones matemáticas.
- Usar la simulación de un sistema es una manera fácil de conocer y evaluar características de un sistema.
- En este proyecto se simuló dos características de operación del sistema de suministro de agua con estaciones de bombeo, obteniendo lo siguiente:
 - Al aumentar del 200 mm a 500 mm el diámetro interno de la tubería de PVC en la línea de conducción de todo el sistema, se produce un incremento del 3.61% de presión, y un incremento del 1.79% de caudal de entrega en la simulación en Tank Station 4.
 - Al aumentar de 1700 rpm a 3000 rpm en las revoluciones del motor de la bomba en el Pump Station 1, se produce un incremento del 67.52 % en presión y, se produce un incremento del 62.75% de caudal de entrega en Tank Station 4.
- En este proyecto se simuló características de operación del sistema de la JAAPS-C, obteniendo lo siguiente:
 - Al aumentar la altura piezométrica de 3158 m s.n.m. a 3168 m s.n.m. en el Constant Head Tank 3, se produce una disminución del 10.11% de caudal de entrega y, se produce un incremento del 2.48% en presión en el Constant Head Tank 3.
 - Al disminuir la velocidad angular de 3600 rpm a 3000 rpm en el Pump Station 1 del sistema de la JAAPS-C, se produce una disminución del 60.3% de caudal de entrega en Bloque Resistive Pipe LP 3.
- Al analizar el resultado simulado y el resultado de resolución teórica del caudal en el sistema de distribución de agua a gravedad, se produce una disminución del 4.26% del caudal. La diferencia entre el caudal medido y el simulado se produce debido a que Simulink considera los valores que afectan a una tubería como son: pérdidas por fricción en el tanque, temperatura, número de Reynolds, etc.

- El caudal del sistema de la JAAPS-C se midió con un instrumento ultrasónico en campo, obteniéndose el valor de $0.00869 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$, en cambio en la resolución teórica se el valor de $0.01599 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$; y así mismo, en la simulación se determinó el valor de $0.01865 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$.
- Los resultados del caudal simulado con el caudal medido difieren debido a la subutilización de la bomba. Ya que esta no trabaja con su potencia de 100 hp si no solo 28 hp.
- Las características operativas del sistema de la JAAPS-C son: caudal igual a $0.01865 \left(\frac{\text{m}^3}{\text{s}}\right)$, velocidad angular de la bomba es 3600 rpm, el torque del motor de la bomba corresponde a 35.24 m. N y la presión de descarga es igual a 201.365 psi.
- La presión de descarga (salida de la bomba) del sistema de la JAAPS-C, medida con un manómetro es igual a 200 psi, este valor fue corroborado con la simulación (201.365 psi) indicando un desperdicio de energía.
- Las características operativas del sistema de la JAAPS-C fueron representadas en las curvas de operación de la bomba especificadas por el fabricante, lo que permitió identificar el punto de operación del sistema de bombeo.
- La guía detalla el procedimiento para realizar la simulación del sistema de la JAAPS-C.

5.2 Recomendaciones

- Obtener las respectivas hojas del fabricante, tanto de la bomba, como del motor del sistema a simular.
- Graficar un esquema en el que se muestre todos los elementos y componentes del sistema a simular, para que sirva de guía en la simulación.
- En caso de no entender o requerir más información sobre algún bloque, se recomienda utilizar la página de ayuda de Matlab.
- Para la simulación de las características de operación de cualquier proceso, es necesario tener todos los datos experimentales y prácticos.
- Realizar un proyecto de titulación para recopilar información que permita realizar los planos de instrumentación y tubería del sistema de la JAAPS-C.
- Realizar un proyecto para instrumentar y automatizar el sistema de la JAAPS-C.

- Se recomienda implementar en los laboratorios de la ESFOT módulos didácticos sobre sistemas de suministro de agua, con el objetivo de reforzar los conocimientos teóricos.
- Se recomienda agregar un manómetro de 400 psi para que la medición oscile en el centro.

6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Carhuapoma Mendoza , J. C., & Chahuayo Durán, A. R. (2019). *UNIVERSIDAD PERUANA DE CIENCIAS APLICADAS FACULTAD DE INGENIERÍA*. Obtenido de DISEÑO DEL SISTEMA DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE EN LA RINCONADA DE PAMPLONA ALTA, APLICANDO EPANET Y ALGORITMOS GENÉTICOS PARA LA LOCALIZACIÓN DE VÁLVULAS REDUCTORAS DE PRESIÓN.: https://repositorioacademico.upc.edu.pe/bitstream/handle/10757/626349/Carhuapoma_MJ.pdf?sequence=3&isAllowed=y

Center, M. H. (2021). *The MathWorks, Inc.* Obtenido de https://es.mathworks.com/help/index.html?s_tid=CRUX_lftnav

Chamaidan Gomez, A. E. (2017). *UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERÍA CIVIL*. Obtenido de DISEÑO, CÁLCULO Y MODELACIÓN DE UNA RED DE DISTRIBUCIÓN: http://repositorio.utmachala.edu.ec/bitstream/48000/11059/1/TUAIC_2017_IC_CD0015.pdf

Corporation, R. B. (2020). *PRODUCT INFORMATION PACKET Model No: 365TSTD4025*. Obtenido de https://cfmedia.regalbeloit.com/images/d120001/medias/docus/3338/Article_365TSTD4025_DataPack_9.pdf

Houcque, D. (2015). *Northwestern University*. Obtenido de INTRODUCTION TO MATLAB FOR ENGINEERING STUDENTS: <https://www.mccormick.northwestern.edu/documents/students/undergraduate/introduction-to-matlab.pdf>

Janamba, F. (2013). *Doc Player*. Obtenido de Doc Player: <https://docplayer.es/9452780-Universidad-nacional-de-ingenieria.html>

Jimenez, S. (2017). *Hidraulica facil* . Obtenido de Hidraulica facil : <https://www.hidraulicafacil.com/2017/07/perdida-de-carga-localizada-o-en.html>

- Laura V. Medina S, G. A. (20 de Marzo de 2017). *Modelado matemático, simulación, análisis y control de un sistema hidráulico interactivo-tres tanques en serie*. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/6546153.pdf>
- Lenntech. (2021). *Recursos de aguas residuales*. Obtenido de <https://www.lenntech.es/recursos-de-aguas-residuales.htm>
- Lewis A, R. (Mayo de 2017). *Manual de Usuario EPANET 2*. Obtenido de https://www.iiama.upv.es/iiama/src/elementos/Software/2/epanet/EN2Manual_esp_v20012_ext.pdf
- Lucero, V. (2013). *Slideshare*. Obtenido de Slideshare: <https://es.slideshare.net/DanNiel5/perdidas-por-friccion-y-locales>
- MathWorks. (3 de Abril de 2017). *SimHydraulics User's Guide*. Obtenido de https://www.dphu.org/uploads/attachements/books/books_2781_0.pdf
- MkDocs, R. (2020). *Kit de herramientas EPANET-MATLAB*. Obtenido de <https://epanet-matlab-toolkit.readthedocs.io/en/latest/>
- Monte, M. A. (2018). *iagua*. Obtenido de iagua: <https://www.iagua.es/blogs/miguel-angel-monge-redondo/aire-tuberias-ii-calculo-y-dimensionado-ventosas>
- Pérez López, E. (Diciembre de 2015). *Los Sistemas SCADA en la automatización industrial*. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/5280242.pdf>
- Pérez, I. G. (2015). *Análisis energético de la operación de redes hidráulicas*. Cuba: Instituto Superior Minero Metalúrgico.
- Pulido, S. B. (2017). *PROPUESTA DE OPTIMIZACIÓN DEL SERVICIO DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE -RDAP- DEL MUNICIPIO DE MADRID, CUNDINAMARCA*. Bogota: Universidad Católica.
- Salamarkesa. (2015). *Factor de fricción de Darcy y diagrama de Moody*. Obtenido de <https://www.salamarkesa.com/factor-friccion-darcy-diagrama-moody/>
- Santana, A. (2019). *Estadística MA*. Obtenido de El entorno de trabajo matlab: http://estadistica-dma.ulpgc.es/FCC/matlab-0-Entorno_de_trabajo.html#creaci%C3%B3n-de-un-script-b%C3%A1sico.
- The MathWorks, I. (2020). *Centrifugal Pump*. Obtenido de MathWorks: <https://es.mathworks.com/help/phymod/hydro/ref/centrifugalpump.html>

- The MathWorks, I. (2020). *Constant*. Obtenido de The MathWorks: <https://es.mathworks.com/help/simulink/slref/constant.html>
- The MathWorks, I. (2020). *Constant Head Tank*. Obtenido de MathWorks: https://es.mathworks.com/help/physmod/hydro/ref/constantheadtank.html?searchHighlight=Constant%20Head%20Tank&s_tid=srchtitle
- The MathWorks, I. (2020). *Create Subsystems*. Obtenido de MathWorks: https://es.mathworks.com/help/simulink/ug/creating-subsystems.html?searchHighlight=subsistema%20&s_tid=srchtitle
- The MathWorks, I. (2020). *Display*. Obtenido de MathWorks: https://es.mathworks.com/help/simulink/slref/display.html?searchHighlight=display&s_tid=srchtitle
- The MathWorks, I. (2020). *Hydraulic Flow Rate Sensor*. Obtenido de MathWorks: https://es.mathworks.com/help/physmod/simscape/ref/hydraulicflowratesensor.html?searchHighlight=Hydraulic%20Flow%20Rate%20Sensor%20&s_tid=srchtitle
- The MathWorks, I. (2020). *Hydraulic Fluid*. Obtenido de MathWorks: <https://es.mathworks.com/help/physmod/hydro/ref/hydraulicfluid.html>
- The MathWorks, I. (2020). *Hydraulic Reference*. Obtenido de MathWorks: <https://es.mathworks.com/help/physmod/simscape/ref/hydraulicreference.html>
- The MathWorks, I. (2020). *Ideal Angular Velocity Source*. Obtenido de MathWorks: <https://es.mathworks.com/help/physmod/simscape/ref/idealangularvelocitysource.html>
- The MathWorks, I. (2020). *Ideal Angular Velocity Source*. Obtenido de MathWorks, Inc: <https://es.mathworks.com/help/physmod/simscape/ref/idealangularvelocitysource.html>
- The MathWorks, I. (2020). *Library Browser*. Obtenido de MathWorks: https://es.mathworks.com/help/roadrunner/ug/Library-Browser.html?searchHighlight=library%20browser&s_tid=srchtitle
- The MathWorks, I. (2020). *MathWorks*. Obtenido de MathWorks: <https://es.mathworks.com/help/physmod/hydro/ref/resistivepipelp.html>
- The MathWorks, I. (2020). *Mechanical Rotational Reference*. Obtenido de MathWorks: https://es.mathworks.com/help/physmod/simscape/ref/mechanicalrotationalreference.html?searchHighlight=Rotational%20Reference&s_tid=srchtitle

- The MathWorks, I. (2020). *Mux*. Obtenido de MathWorks: <https://es.mathworks.com/help/simulink/slref/mux.html>
- The MathWorks, I. (2020). *PS Constant*. Obtenido de MathWorks: <https://es.mathworks.com/help/physmod/simscape/ref/pconstant.html#:~:text=Physical%20Signals%20%2F%20Sources-,%20Description,signal%20as%20the%20Constant%20parameter.>
- The MathWorks, I. (2020). *PS-Simulink Converter*. Obtenido de MathWorks: https://es.mathworks.com/help/physmod/simscape/ref/pssimulinkconverter.html?searchHighlight=PS-Simulink%20Converter&s_tid=srchtitle
- The MathWorks, I. (2020). *Resistive Pipe LP*. Obtenido de MathWorks: <https://es.mathworks.com/help/physmod/hydro/ref/resistivepipelp.html>
- The MathWorks, I. (2020). *Simscape*. Obtenido de MathWorks: <https://es.mathworks.com/products/simscape.html>
- The MathWorks, I. (2020). *Simscape Fluids*. Obtenido de MathWork: https://es.mathworks.com/products/simscape-fluids.html?s_tid=srchtitle
- The MathWorks, I. (2020). *Solver Configuration*. Obtenido de MathWorks: Solver Configuration
- Villegas, G. (2017). *Metodología computarizada de dimensionamiento de redes de agua potable*. Perú: Universidad de Piura.
- Wikipedia. (2020). *Wikipedia*. Obtenido de Wikipedia: https://es.wikipedia.org/wiki/Diagrama_de_Moody#/media/Archivo:Moody-es.png
- WordPress. (2019). *Epanet.es*. Obtenido de <https://epanet.es/>

ANEXO

ANEXO 1: LEVANTAMIENTO DE DATOS EN EL SISTEMA DE BOMBEO DE LA COMUNIDAD DE CUTUGLAGUA

Integrantes: Juan Quinga, Kevin Bedón.

Fecha: 2 de diciembre de 2020.

TANQUE 1

Imagen:



Figura 70. Pozo del Sistema de la JAAPS-C

Cálculo del volumen del tanque Constant Head Tank 1:

V= Volumen
h= Altura
b= ancho
a=largo

$$V = h \times b \times a$$

$$V = 3 \times 2 \times 2$$

$$V = 12 \text{ m}^3$$

TANQUE 2

Imagen:



Figura 71. Tanque 2 de distribución del Sistema de la JAAPS-C

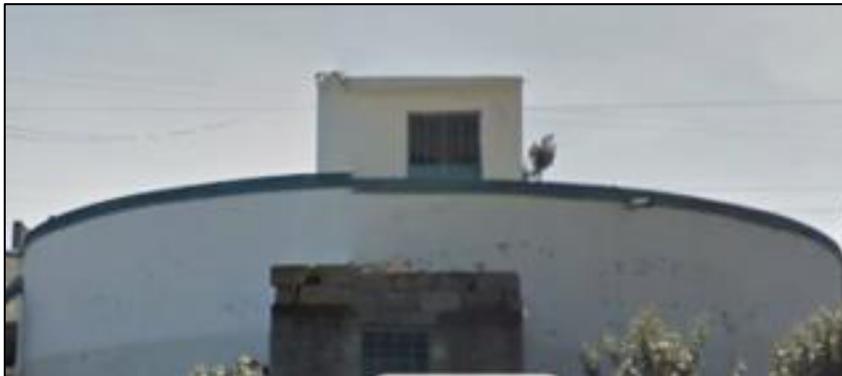


Figura 72. Tanque 2 de distribución del Sistema de la JAAPS-C (vista frontal)

Cálculo del volumen del tanque Constant Head Tank 2:

V= Volumen

h= Altura

r= radio

π .=pi

$$V = \pi \times r^2 \times h$$

$$V = \pi \times 3^2 \times 3$$

$$V = 84.82 \text{ m}^3$$

TUBERÍA 1

- Distancia desde el tanque 1 al sistema de bombeo: 1 m.
- Diámetro interno y externo de la tubería de hierro dúctil.

Dimensiones:

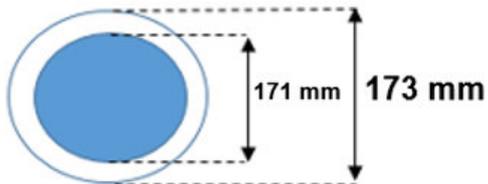


Imagen:



Figura 73. Tubería de succión desde el tanque 1 al sistema de bombeo

TUBERÍA 2

- Distancia de tubería de reducción al sistema de bombeo: 0.10 m.
- Diámetro interno y externo de la tubería de hierro dúctil.

Dimensiones:

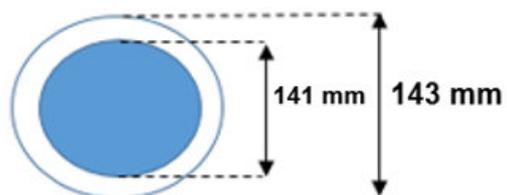


Imagen:



Figura 74 Tubería de succión con reducción al ingreso de la bomba

TUBERÍA 3

- Distancia desde el sistema de bombeo al tanque 3: 1500 m.
- Diámetro interno y externo de la tubería de PVC.

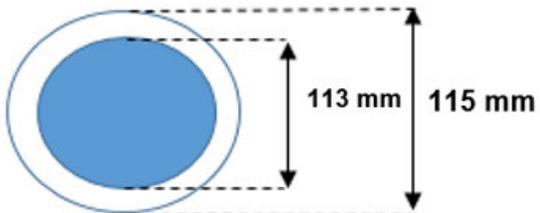


Imagen:



Figura 75. Tubería de descarga desde el sistema de bombeo al tanque 2

BOMBA

Potencia:100 hp de potencia.

Imagen:



Figura 76. Bomba del sistema de bombeo de JAAS-C

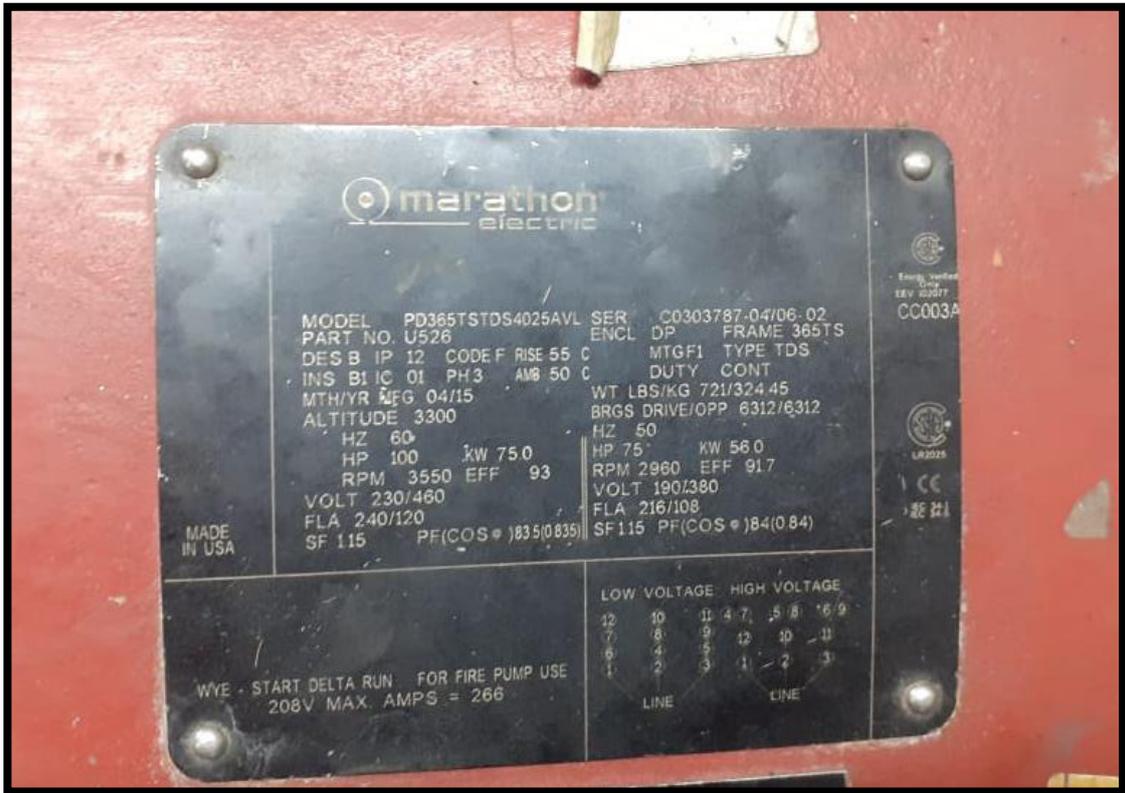


Figura 77. Placa del motor



Figura 78. Potencia de trabajo del motor



Figura 79. Frecuencia del motor



Figura 80. Voltaje de alimentación del motor



Figura 81. Corriente de alimentación del motor



Figura 82. Placa de la bomba

COTA DEL TANQUE 1

- Altitud de 3056 m sobre nivel del mar.

Imagen:

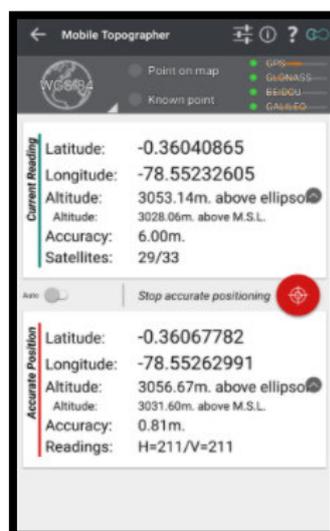


Figura 83. Altitud del Tanque 1 en la aplicación mobile topographic

COTA DEL TANQUE 2

- Altitud de 3158 m sobre nivel del mar.

Imagen:

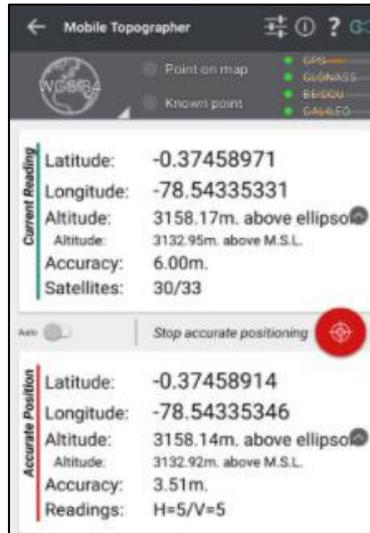


Figura 84. Altitud del Tanque 2 en la aplicación mobile topografic

COTA DEL SISTEMA DE BOMBEO DE JAAPS-C

- Altitud de 3056 m sobre nivel del mar.

Imagen:

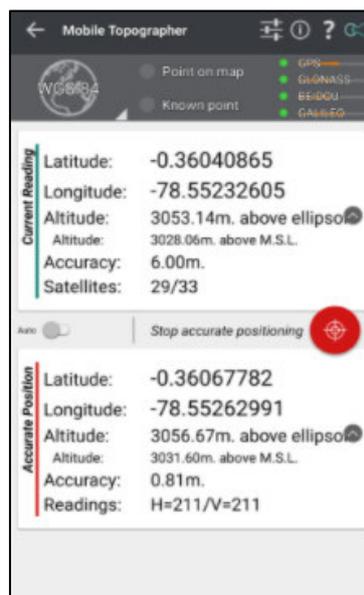


Figura 85. Altitud del sistema de bombeo de JAAPS-C en la aplicación mobile topografic

CAUDAL DE ENTREGA: $0.00869 \frac{m^3}{s}$

VELICIDAD DE ENTREGA: $0.4689 \frac{m}{s}$



Figura 86. Velocidad y Caudal de entrega tomada en el Caudalimetro

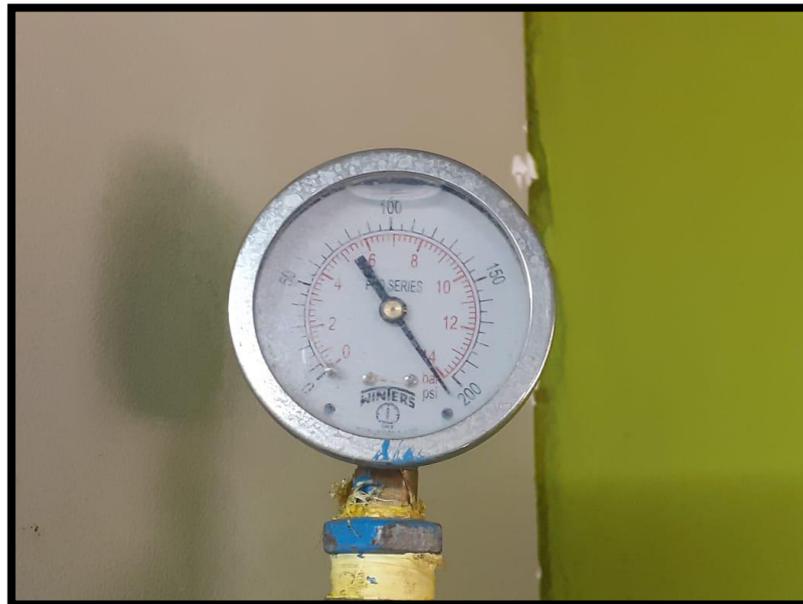


Figura 87. Manómetro de la tubería a la salida de la bomba

ANEXO 2: DIAGRAMAS

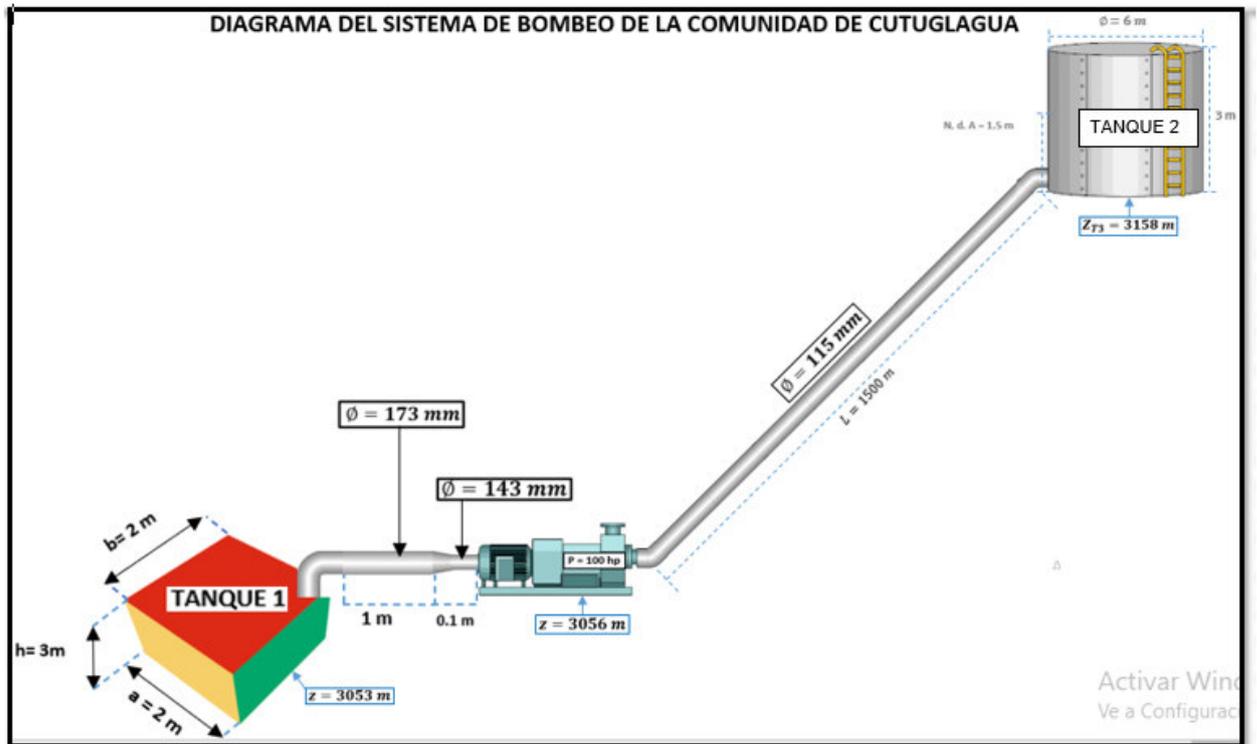


Figura 88. Distribución de agua del sistema de la JAAPS-C

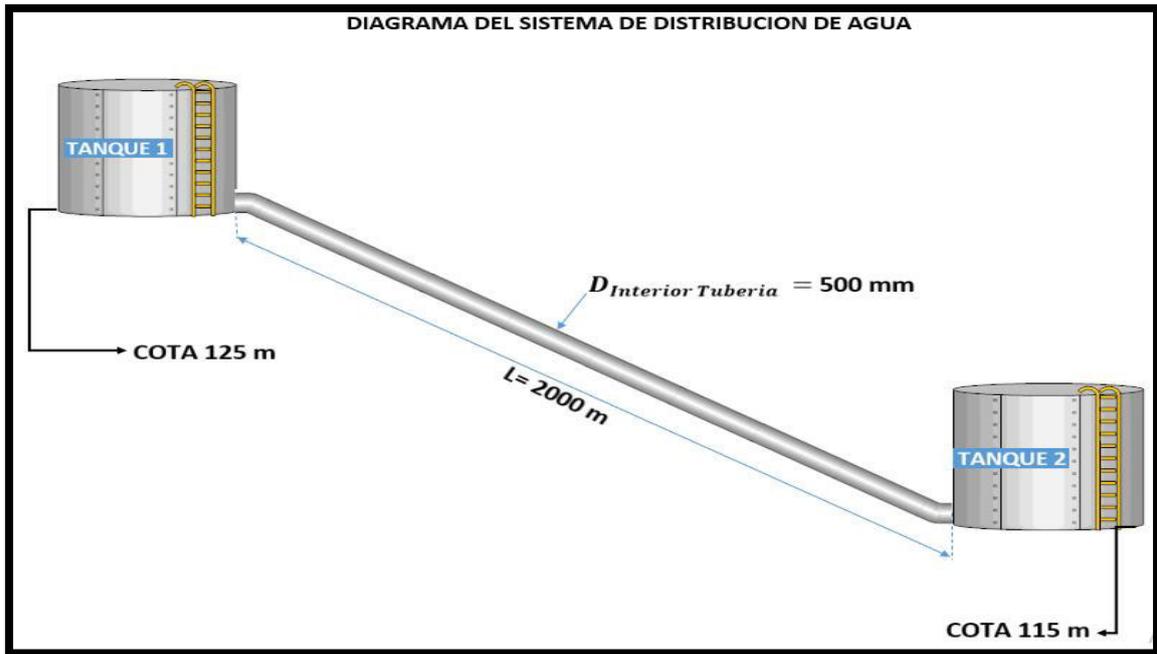


Figura 89. Ejercicio de bibliografía

ANEXO 3 TABLAS

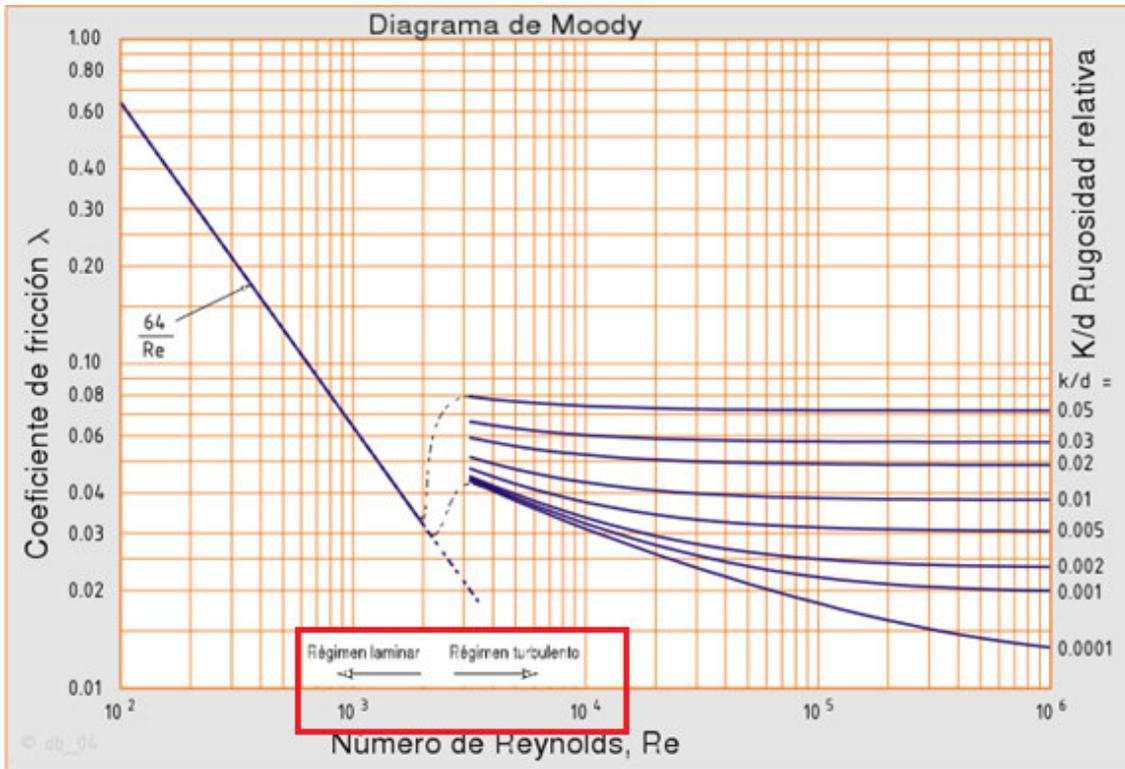


Figura 90. Diagrama de Moody (Wikipedia, 2020)

Tabla 21. Rugosidades absolutas de materiales (Janamba, 2013)

RUGOSIDAD ABSOLUTA DE MATERIALES			
Material	z (mm)	Material	z (mm)
Plástico (PE, PVC)	0,0015	Fundición asfaltada	0,06-0,18
Poliéster reforzado con fibra de vidrio	0,01	Fundición	0,12-0,60
Tubos estirados de acero	0,0024	Acero comercial y soldado	0,03-0,09
Tubos de latón o cobre	0,0015	Hierro forjado	0,03-0,09
Fundición revestida de cemento	0,0024	Hierro galvanizado	0,06-0,24
Fundición con revestimiento bituminoso	0,0024	Madera	0,18-0,90
Fundición centrifugada	0,003	Hormigón	0,3-3,0

ANEXO 4: CÁLCULOS DEL EJERCICIO TEÓRICO

Dos tanques de distribución se unen mediante una tubería de PVC de 500 mm de diámetro interior, y de 2000 m de longitud. La cota de la lámina libre del primer tanque está a 125 m y la del tanque final a 115 m. Calcular el caudal que circulará por dicha tubería, así como la velocidad media correspondiente (Figura 91).

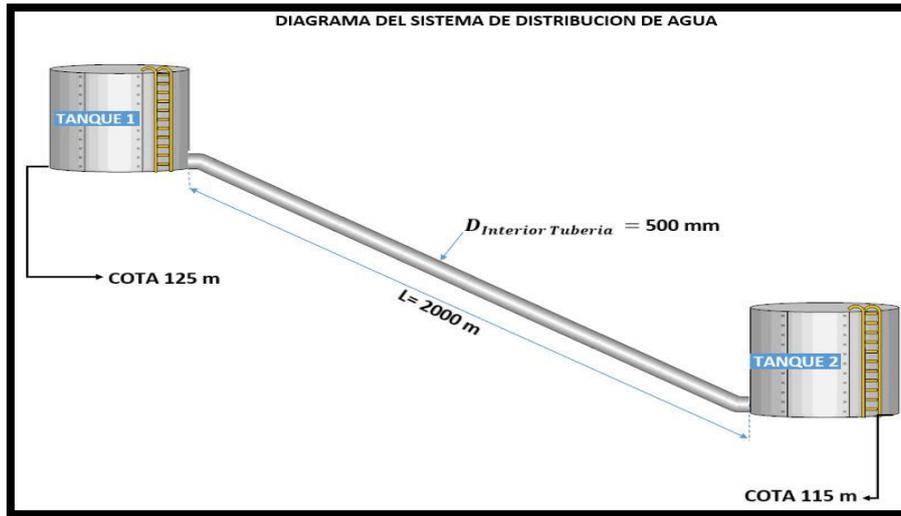


Figura 91. Diagrama del ejercicio teórico

Para determinar la carga admisible en la conducción aplicamos Bernoulli.

$$(z_1) + \left(\frac{P_1}{\rho g}\right) + \left(\frac{v_1^2}{2g}\right) = z_2 + \left(\frac{P_2}{\rho g}\right) + \left(\frac{v_2^2}{2g}\right) + \Delta H$$

Ecuación 1.1 Ecuación de Bernoulli

Donde:

V_1 : $0 \left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)$ velocidad 1

g : $9.81 \left(\frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right)$ gravedad

P_1 : 0 (Pa) presión 1

ρ : $\left(\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}\right)$ densidad

P_2 : 0 (Pa) presión 1

V_2 : $0 \left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)$ velocidad 2

Z1 125 (m) altura 1
Z2 115 (m) altura 2
 ΔH (mca) carga admisible

Se obtiene:

$$\Delta H = 10 \text{ (mca)}$$

Para determinar el caudal podemos aplicar una ecuación para determinar la pérdida de carga en régimen turbulento. Por ejemplo, conocemos las ecuaciones de Darcy Weisbach o Hazen Williams.

$$J = 10.62 \times (C^{-1.85}) \times (D^{-4.87}) \times (Q^{1.85})$$

Ecuación 2 Ecuación de Hazen Williams

Donde:

J : pendiente
C : 140 factor de Hazen William para PVC
D : 0.5 (m) diámetro
Q : $\left(\frac{m^3}{s}\right)$ caudal

Se obtiene:

$$Q = 0.359 \left(\frac{m^3}{s}\right)$$

Como conocemos el caudal y la sección de la conducción, podemos determinar la velocidad V.

$$Q = A \times V$$

Ecuación 3.1 Ecuación de caudal de Bernoulli

Donde:

Q : 0.359 ($\frac{m^3}{s}$) caudal

A : (m^2) área

V : ($\frac{m}{s}$) velocidad

$$A = \pi \times \frac{D^2}{4}$$

Ecuación 3.2 Ecuación de área de un círculo

Donde:

A : (m^2) área

π : 3.14 pi

D : 0.5 (m) diámetro

Remplazando 3.2 en 3.1 se obtiene:

$$V = 1.831 \frac{m}{s}$$

ANEXO 5: CÁLCULOS DE PARÁMETROS DEL SISTEMA DE LA JAAPS-C

Análisis de la bomba centrífuga del sistema

Modelo B4ERBHS

Los parámetros del fabricante de acuerdo al modelo de la bomba son los siguientes:

- B: Type of construction (Tipo de construcción). "Back Pull-Out" Design
- 4: DISCHARGE SIZE (Inches) (Tamaño de descarga) (pulgadas).
- E: Nominal impeller diameter (Diámetro nominal del impulsor). 10"
- R: Type of drive (Tipo de impulsión). Frame Mounted Belt or Flexible Coupling Drive (Transmisión de Acoplamiento Flexible).
- B: Special Features (Optional) (Características Especiales) (opcional). Hydraulically Balanced Impeller Desing.
- H: Relative capacity of impeller (Capacidad relativa del impulsor). Medium.
- S: Shaft seal (Optional) (Sello del eje) (Opcional). Mechanical Seal Packed Stuffing Box is not indicated.

Cálculo de potencia:

$$P = \sqrt[3]{3} \times I \times V$$

Ecuación 4 Ecuación de la potencia

Donde:

P : (Kw) potencia

I : 122 (A) corriente

V : 208 (V) voltaje

Se obtiene:

$$P = 43.95 \text{ kW}$$

Curvas características de la bomba

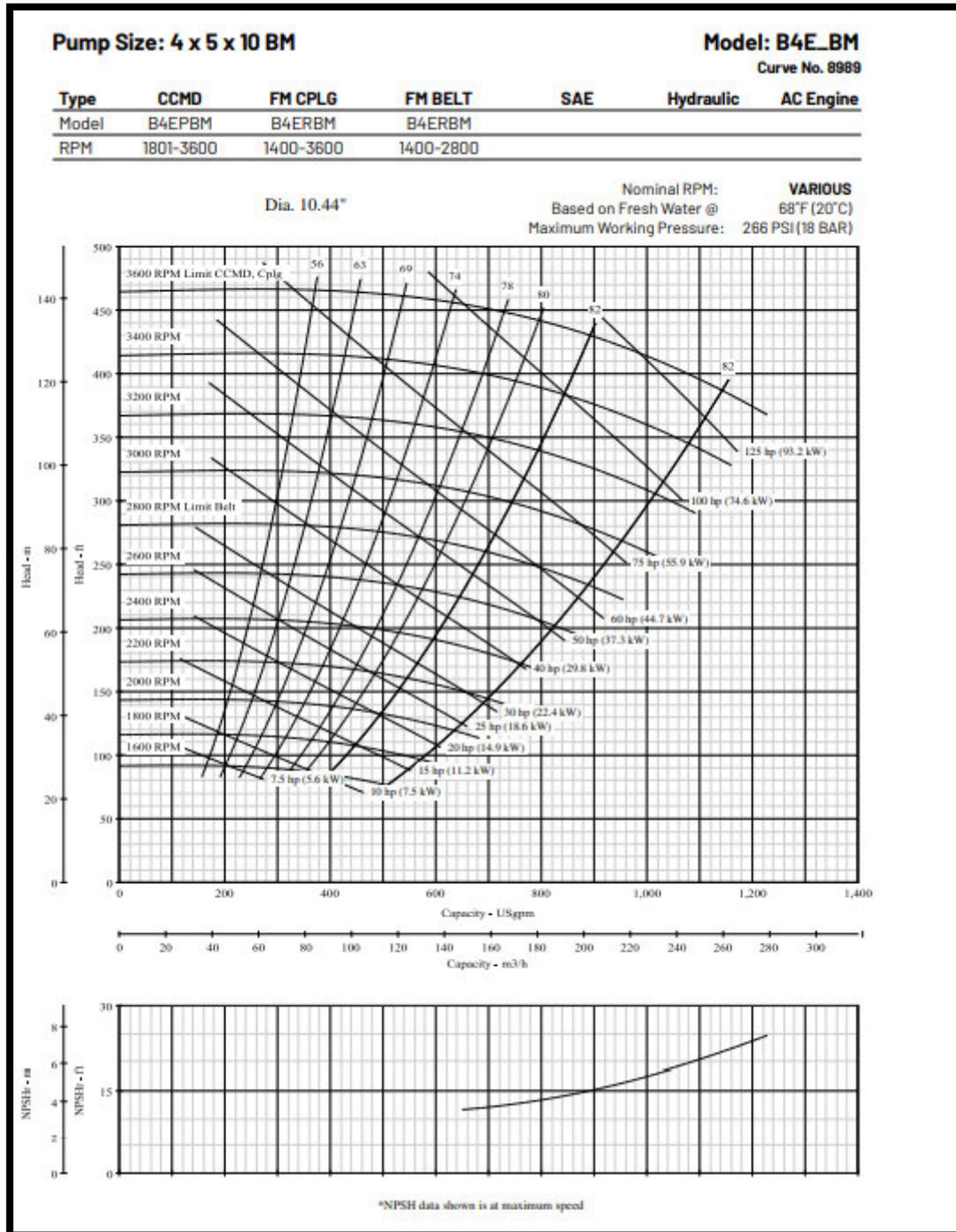


Figura 92. Curva característica de la bomba

Cálculo del caudal

Debido a que el taque estaba lleno hasta 2.23 m de altura, se tomó referencia este punto en intervalos de 2 minutos.

La prueba realizada fue el método volumétrico, que consiste en medir el tiempo en el que tarda en llenar el tanque.

Tabla 22. Calculo del tiempo de llenado.

Cálculo de Caudal		
N°	Rango (min)	Altura (m)
0	0	2.23
1	0-2	2.28
2	2-4	2.32
3	4-6	2.36
4	6-8	2.42
5	8-10	2.48
6	10-12	2.52
7	12-14	2.58
8	15	2.62

Cálculo del tiempo de llenado

$$h_c = h_i - h_f$$

Ecuación 5.1 Ecuación de la potencia

Donde:

- hc : (m) altura calculada
- hi : 2.23 (m) altura inicial
- hf : 2.62 (m) altura final

Se obtiene:

$$h_c = 0.39 \text{ (m)}$$

Remplazando 5.1 en 5.2

$$h = \frac{h_f}{h_c}$$

Ecuación 5.2 Ecuación de la potencia

- hf : 2.62 (m) altura final
hc : 0.39 (m) altura calculada
h : altura teórica

Se obtiene:

$$h = 6.71$$

Remplazando 5.2 en 5.3

$$t = h \times t_m$$

Ecuación 5.3 Ecuación de la potencia

Donde:

- t : (h) tiempo
h : 6.71 altura teórica
tm : 15 (min) tiempo medido

Se obtiene:

$$t = 1.67 (h)$$

Tabla 23. Cálculo del caudal real por método volumétrico.

Cálculo de Caudal	
N°	Tiempo de llenado (h)
1	1.67
2	1.31

Calculo promedio del caudal

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n}$$

Ecuación 5 Ecuación del promedio

Donde:

\bar{x} : promedio
 x_1 : 1.67 valor 1
 x_2 : 1.31 valor 2
n : 2 número de valores

Se obtiene:

$$\bar{x} = 1.49$$

Cálculo del volumen del tanque 2

$$V = \pi \times r^2 \times h$$

Ecuación 6 Cálculo del volumen

Donde:

V : volumen
h : 3 (m) Altura
r : 3 (m) radio
 π : 3.14 pi

Calculo del caudal

$$Q = \frac{V}{t}$$

Ecuación 7 Cálculo del caudal

Donde:

Q : $\left(\frac{m^3}{s}\right)$ caudal
V : 84.82 (m) volumen
t : 1.41 (h) tiempo

Se obtiene:

$$Q = 0.0159 \left(\frac{m^3}{s}\right)$$

ANEXO 6: CÁLCULOS DE PERDIDAS POR FRICCIÓN Y LOCALES

Cálculo de pérdida por fricción:

$$H_f = f \frac{L V^2}{D 2g}$$

Ecuación 8 Cálculo del perdido por fricción por la fórmula de Darcy-Weisbach (Lucero, 2013)

Donde:

- H_f : pérdida por fricción
- f : factor de fricción
- L : 1500 (m) longitud
- V : 0.46 ($\frac{m}{s}$) velocidad
- D : 0.0115 (m) diámetro
- g : 9.81 ($\frac{m}{s^2}$) gravedad

Calculo del factor de fricción:

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

Ecuación 8.2 Cálculo del factor de fricción por la fórmula de Poiseuille (Lucero, 2013)

Donde:

- Re : 2300 número de Reynolds
- f : factor de fricción

Se obtiene:

$$f = 0.032$$

Remplazando la Ecuación 8.2 en la Ecuación 8:

Se obtiene:

$$H_f = 45.01$$

Cálculo de perdidas localizadas:

De acuerdo a la bibliografía se puede obtener el cálculo de perdidas locales con el porcentaje igual a 5% para velocidad cercanas a $1 \left(\frac{m}{s}\right)$ y de 10 % para velocidades cercanas a $2 \left(\frac{m}{s}\right)$.

$$H_l = 5\% \times H_f$$

Ecuación 9 cálculo de perdidas locales (Jimenez, 2017)

Donde:

H_l : (m) perdidas locales

H_f : Perdidas por fricción

Se obtiene:

$$H_l = 2.25 \text{ (m)}$$

ANEXO 7: CÁLCULOS DEL AIRE EN LA TUBERIA

De acuerdo al coeficiente de Bunsen (C_b) los cuales estarán determinados de acuerdo a la Tabla 24.

Tabla 24. Tabla de Bunsen (Monte, 2018)

t (°C)	0	5	10	15	20	25	30
C_b	0.0286	0.0252	0.0224	0.0201	0.0183	0.0167	0.0154