



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE QUITO

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

**REDISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN SISTEMA DE BOMBEO DE AGUA
POTABLE DE 60 m³/h PARA LA JUNTA DE AGUA POTABLE CUENDINA
UBICADA EN LA CIUDAD DE QUITO-ECUADOR**

Trabajo de titulación previo a la obtención de

Ingenieros Mecánicos

AUTORES: Jefferson Andrés Guanoliquin Navarrete

Jeremy Javier Simbaña Ramírez

TUTOR: Carlos Iván Maldonado Dávila

Quito-Ecuador

2023

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Jefferson Andrés Guanoliquin Navarrete con documento de identificación N° 1726533951 y Jeremy Javier Simbaña Ramírez con documento de identificación N° 1727130229; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 2 de marzo del año 2023

Atentamente,



Jefferson Andrés Guanoliquin
Navarrete
1726533951



Jeremy Javier Simbaña Ramírez
1727130229

CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

Nosotros Jefferson Andrés Guanoliquin Navarrete, con documento de identificación No. 1726533951 y Jeremy Javier Simbaña Ramírez con documento de identificación No. 1727130229, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del proyecto técnico: “Rediseño y simulación de un sistema de bombeo de agua potable de 60 m³/h para la junta de agua potable Cuendina ubicado en la ciudad de Quito-Ecuador”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingenieros Mecánicos, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 2 de marzo del año 2023

Atentamente,

Jefferson Andrés Guanoliquin
Navarrete
1726533951

Jeremy Javier Simbaña Ramírez
1727130229

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Carlos Iván Maldonado Dávila con documento de identificación N° 1711156073, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: REDISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN SISTEMA DE BOMBEO DE AGUA POTABLE DE 60 m³/h PARA LA JUNTA DE AGUA POTABLE CUENDINA UBICADA EN LA CIUDAD DE QUITO ECUADOR, realizado por Jefferson Andrés Guanoliquin Navarrete con documento de identificación N° 1726533951 y por Jeremy Javier Simbaña Ramírez con documento de identificación N° 1727130229, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción proyecto técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 2 de marzo del año 2023



Ing. Carlos Iván Maldonado Dávila, Msc

1711156073

DEDICATORIA

Quiero dedicar este proyecto a mis padres Omar y Melida quienes me han brindado su apoyo incondicional durante toda mi trayectoria estudiantil, por todas las enseñanzas y valores que me inspiran a ser un gran profesional. A todas las personas que conforman mi familia quienes siempre me brindaron un buen consejo para cumplir mis metas y plantearme seguir mis objetivos hasta llegar a cumplirlos. Y a todos mis amigos quienes están en los malos y buenos momentos.

Jefferson Guanoliquin

Dedico este trabajo principalmente a Dios, por haberme dado la vida y permitirme haber llegado hasta este momento tan importante de mi formación profesional. A mi padre, por ser el pilar más importante, por demostrarme siempre su cariño y apoyo incondicional sin importar nuestras diferencias de opiniones. A mi madre, a pesar de que ya no te encuentres en este mundo, siento que estás conmigo siempre y aunque nos faltaron muchas cosas por vivir juntos, sé que este momento hubiera sido tan especial para ti como lo es para mí. A mi amiga Susana, a quien quiero como a una hermana, por compartir momentos significativos conmigo por siempre estar dispuesta a escucharme y ayudarme en cualquier momento. A Erik, porque te amo infinitamente hermanito.

Jeremy Simbaña

AGRADECIMIENTO

Queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento a la universidad y a todos sus docentes quienes nos brindaron su conocimiento para el desarrollo de este proyecto, a la “Junta Administradora de agua potable Cuendina” por permitirnos realizar el estudio de sus instalaciones y compartirnos su documentación, a nuestro tutor de proyecto por su colaboración en el desarrollo del proyecto.

ÍNDICE

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN.....	ii
CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA	iii
CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	iv
DEDICATORIA.....	v
AGRADECIMIENTO	vi
ÍNDICE DE TABLAS.....	xi
ÍNDICE DE FIGURAS	xiii
CAPÍTULO I.....	1
MARCO TEÓRICO DE EQUIPOS Y ACCESORIOS PARA UN SISTEMA DE BOMBEO	1
1.1. Fuentes de abastecimiento de agua.....	1
<i>1.1.1. Abastecimientos subterráneos.....</i>	1
<i>1.1.2. Abastecimientos superficiales</i>	1
1.2. Red de abastecimiento de agua potable	2
<i>1.2.1. Componentes de una red de abastecimiento</i>	2
1.3. Formas de distribución	4
<i>1.3.1. Distribución por gravedad.....</i>	4
<i>1.3.2. Distribución por bombeo</i>	4
1.4. Aforo de la fuente de abastecimiento	6
<i>1.4.1. Sección de aforo.....</i>	6

1.4.2. Tipos de secciones de aforo	6
1.5. Conceptos básicos de mecánica de fluidos.....	7
1.5.1. Presión	7
1.5.2. Viscosidad	7
1.5.3. Hidrostática.....	7
1.5.4. Hidrodinámica	7
1.6. Sistemas de bombeo	7
1.6.1. Tipos de sistemas de bombeo	8
1.6.2. Elementos principales de un sistema de bombeo	8
1.7. Bombas	9
1.7.1. Elementos constitutivos de una bomba centrífuga.....	9
1.7.2. Cebado de la bomba.....	12
1.7.3. Pérdidas	12
1.7.4. Potencia.....	13
1.7.5. Rendimiento.....	14
1.7.6. Altura neta de succión positiva (NPSH)	15
1.7.7. Curvas características	15
1.7.8. Criterios de selección de una bomba	16
CAPÍTULO II.....	17
REDISEÑO DEL SISTEMA DE BOMBEO DE AGUA POTABLE	17
2.1. Características de la implementación actual.....	17
2.2. Equipos y accesorios instalados	19

2.2.1. Tanques	19
2.2.2. Tuberías.....	20
2.2.3. Bombas centrífugas.....	23
2.3. Rediseño del sistema para la implementación de bombeo de agua potable	30
2.3.1. Cálculo de usuarios del sistema.....	30
2.3.2. Dotación de agua por persona.....	31
2.3.3. Caudales de diseño	32
2.3.4. Dimensionamiento de tubería para línea de succión.....	34
2.3.5. Elección de tuberías para la implementación.....	38
2.3.6. Altura manométrica	45
2.3.7. Selección de bomba centrífuga	46
CAPÍTULO III	52
SIMULACIÓN DE FLUIDOS Y FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE BOMBEO DE AGUA POTABLE	52
3.1. Bomba centrífuga seleccionada.....	52
3.1.1. Condiciones para simulación.....	53
3.2. Modelado de simulación con SolidWorks Flow Simulation.....	53
3.2.1. Pasos para la configuración de simulación de flujo.....	53
3.2.2. Análisis de simulación de sistema de bombeo	61
CAPÍTULO IV	70
DETERMINACIÓN DE COSTOS DE IMPLEMENTACIÓN	70
4.1. Costos de materiales.....	70
4.2. Costo de instalación	72

CONCLUSIONES.....	74
RECOMENDACIONES	76
LISTA DE REFERENCIAS.....	76
ANEXOS	81

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Factores de diseño servicio de agua potable actual.	18
Tabla 2. Capacidad de tanques existentes en el recinto de bombeo.	19
Tabla 3. Accesorios del sistema de bombeo actual.	21
Tabla 4. Resumen de velocidades de succión en tuberías instaladas.	22
Tabla 5. Bombas instaladas en el sistema de la Junta de Agua Potable Cuendina.....	23
Tabla 6. Resumen de pérdidas totales en tuberías de succión	25
Tabla 7. Resumen de valores de NPSH disponible en el sistema de bombeo actual.	28
Tabla 8. Dotaciones recomendadas.	32
Tabla 9. Tabla de consumo doméstico por habitante [20].....	32
Tabla 10. Factores de planeamiento para diseño de sistemas de agua potable.	34
Tabla 11. Factores para el procesamiento de datos de Agüera en descarga.....	37
Tabla 13. Codificación de líneas de tubería del sistema de agua potable del barrio Cuendina.....	41
Tabla 14. Lista de materiales para línea de succión.	41
Tabla 15. Lista de materiales de línea de interconexión 2”-PW-0010-A1B	42
Tabla 16. Lista de materiales para la línea de descarga 6”-PW-0001-A1B	43
Tabla 17. Resumen de pérdidas totales en tuberías de succión	45
Tabla 18. Variables para Hazen- Williams.....	45
Tabla 19 . Lista de materiales adicionales para rediseño de sistema de bombeo de agua potable del barrio Cuendina ubicado en la Ciudad de Quito-Ecuador.....	50
Tabla 20. Características generales de bomba centrífuga.....	52
Tabla 21. Condiciones para el diseño del sistema.	53

Tabla 22. Valores analíticos para interpretación de simulación.....	62
Tabla 23. Presupuesto de accesorios y materiales.....	70
Tabla 24. Presupuesto de instalación de sistema de bombeo de agua potable.	73

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Distribución por gravedad	4
Figura 2. Distribución Mixta en un sistema de bombeo de agua	6
Figura 3. Red de distribución de agua potable a una población	9
Figura 4. Vista frontal y lateral de una bomba centrífuga, con sus principales elementos constitutivos	10
Figura 5. Sección de rodets para bombas centrífugas	11
Figura 6. Tipos de carcasa de bombas centrífugas	12
Figura 7. Pérdidas de potencia existentes en una bomba centrífuga	14
Figura 9. Ubicación de la Junta de Agua potable del Barrio Cuendina.....	17
Figura 10. Recinto de reparto del sistema de servicio potable del barrio Cuendina.	18
Figura 11. Plano Topográfico de la ubicación del recinto de bombeo y el tanque D.....	19
Figura 12. Sistema de bombeo para tanque A.	20
Figura 13. Sistema de conexión del cuarto de bombas del tanque C.	20
Figura 14. Diagrama de conexionado de tanques del servicio de agua potable	23
Figura 15. Alturas de la geometría del sistema actual.	27
Figura 16. Diagrama de NPSHr para bombas centrífugas existentes.....	28
Figura 17. Punto de operación real con la curva característica para bomba de la marca Berkeley Modelo: E3RBL.	29
Figura 18. Punto de trabajo para la curva característica de la bomba de la marca HIDROMAC modelo: 50-250A.	30
Figura 19. Composición de partes que conforman la codificación de líneas de tubería.	39

Figura 20. Modelo de rediseño para el servicio de agua potable del barrio Cuendina en la ciudad de Quito.	40
Figura 21. Vista en planta del sistema de agua potable del barrio Cuendina.	40
Figura 22. Curva de selección para bomba BERKELEY.....	46
Figura 23. Diagrama de tubería de succión para cálculo de NPSH _d	47
Figura 24. NPSH _r para bomba BERKELEY.....	48
Figura 25 . Curva característica- Curva de resistencia, para la bomba: 2-1/2x9H, modelo: B2ZPH.....	48
Figura 26. Modelo bomba centrífuga marca BERKELEY modelo B2ZPH.	52
Figura 27. Modelado de flujo de fluido en impulsor de bomba centrífuga.	54
Figura 28. Inserción de LIDS para cierre de tuberías y generación de volumen de flujo.....	54
Figura 29. Límites de volumen para simulación de sistema de bombeo.	55
Figura 30. Configuración de unidades Flow simulation.....	55
Figura 31. Configuración de tipo de análisis en Flow simulation.	56
Figura 32. Configuración de tipo de fluido y flujo de fluido.	57
Figura 33. Configuración de paredes de elementos en Flow simulation.	57
Figura 34. Configuración de volumen de salida para simulación.	58
Figura 35. Tabla de equivalencias de altura y presión atmosférica.....	59
Figura 36. Configuración de presión para simulación.....	59
Figura 37. Configuración de parámetros de giro de impulsor para simulación.	60
Figura 38. Configuración de parámetros de giro de impulsor para simulación.	60
Figura 39. Secciones de impulsor seleccionas para la configuración de parámetros de giro de simulación.	61

Figura 40. Parametrización de regiones de giro para simulación.....	61
Figura 41. Distribución de presiones y velocidades en tubería de succión 6"-PW-0011-A1B y descarga 2"-PW-0021-A1B/6"-PW-0003-A1B.	63
Figura 42. Desarrollo de velocidad sin fricción en el sistema.....	63
Figura 43. Gráfica de velocidad vs trayectoria de la curva de simulación.....	64
Figura 44. Velocidades para la línea de descarga de la bomba P-002.....	64
Figura 45. Gráfica velocidad de descarga vs longitud de curva de simulación.....	65
Figura 46. Desarrollo de la presión del sistema.....	65
Figura 47. Presión estática en las líneas de succión y descarga.	66
Figura 48. Gráfica presión vs velocidad.....	66
Figura 49. Gráfica presión vs trayectoria en la curva de simulación.	67
Figura 50. Estado de la temperatura del fluido en sistema de bombeo.	67
Figura 51. Gráfica temperatura vs longitud de curva de simulación.....	68

RESUMEN

El siguiente proyecto desarrolló el rediseño del sistema de bombeo de agua potable de 60m³/h del barrio Cuendina en Quito-Ecuador, iniciando en un estudio del sistema instalado actualmente. También se realizó una simulación numérica del sistema de bombeo que se implementara, el cual valida los valores desarrollados analíticamente.

El rediseño muestra un análisis del sistema implementado en la actualidad y sus principales fallas, como es el caso de la errónea selección de tuberías lo cual ocasiona cavitación en las bombas centrífugas existentes y las pérdidas de energía en los accesorios utilizados. Durante la etapa de rediseño se calculó un nuevo sistema que pueda funcionar durante los próximos 20 años, este rediseño fue enfocado principalmente en las líneas de tubería y equipos del recinto de bombeo que se deben ocupar de acuerdo con un análisis y simulación, todo esto se realizó en base a las normas ASME para tuberías de procesos. La simulación numérica de fluidos que se desarrolla muestra las magnitudes de presión, velocidad, temperatura de la línea de succión y descarga con el rediseño realizado, todos estos valores fueron validados de acuerdo con los cálculos teóricos que se realizaron para la selección de materiales y equipos.

En la sección de análisis de costos de implementación del sistema, se realizó una estimación de gastos de acuerdo con la adquisición de equipos, fabricación de líneas de tubería, montaje de sistema de bombeo y funcionamiento del sistema. Los presupuestos se realizaron en base a los precios en el mercado nacional ecuatoriano y las tasas de consumo energético para instalaciones industriales.

Palabras clave: líneas de tubería, fluido, bomba, succión, descarga

ABSTRACT

The following project developed the redesign of the 60 m³/h potable water pumping system of the Cuendina-Quito city, beginning with a study of the currently installed system. A numerical simulation of the pumping system to be implemented was also, which validates the values developed analytically carried out.

The redesign shows an analysis of the currently implemented system and some failures, such as the wrong selection of pipes, which causes cavitation in the existing centrifugal pumps and energy losses due to the accessories used. During the procedure, a new system was designed that could work for the next 20 years, this plan was focused mainly on the piping lines and equipment of the pumping area that have to be used according to an analysis and simulation all this was based on ASME standards for process piping. The numerical simulation of fluids in development shows the pressure level, speed, and temperature of the suction and discharge line with the redesign carried out, all these values were validated according to the theoretical calculations that were carried out for the selection of materials and equipment.

In the cost implementation analysis, an estimate of expenses was made for the acquisition of equipment, manufacturing of pipelines, assembly of the pumping system, and operation of the system. The budget was based on the prices in the Ecuadorian national market and the energy consumption rates for industrial facilities.

Keywords: pipelines, fluid, pump, suction, discharge

INTRODUCCIÓN

Los sectores rurales en general cuentan con un sistema autónomo de agua potable, debido a que la administración zonal del municipio de Quito no logra abastecer a las personas del sector en su totalidad, por lo cual los barrios aprovechan caudales de ríos y vertientes cercanas, sus sistemas de bombeo no se encuentran acorde al uso de los pobladores en cuestiones de diseño y este se ve saturado lo cual produce fallas en el sistema de bombas. Actualmente se registra un aumento de acometidas de agua potable en el barrio Cuendina de manera que esto no fue considerado en los parámetros iniciales de diseño del sistema y esto se ve reflejado en la insuficiencia que se produce en los sectores más alejados al tanque principal.

El rediseño del sistema de bombeo toma en consideración el crecimiento exponencial de la población y el uso de agua potable, por lo cual el sistema trabajará de una forma óptima evitando paros del sistema de bombas y desabastecimiento del servicio, esto se logrará analizando los equipos en funcionamiento y el caudal necesario para el abastecimiento eficiente de la prestación a todos los usuarios del sector. La altura geométrica de impulsión que se requiere es de 78 mca y se ocupara la línea de impulsión existente.

La eficiencia de un sistema de bombeo se ve reflejada en la durabilidad y el bajo consumo energético que se puede dar bajo un correcto diseño de los componentes. En este proceso se debe tomar en cuenta las pérdidas mayores y menores que se deben revisar para la selección de la bomba que se empleara para tal sistema.

OBJETIVOS GENERALES Y ESPECIFICOS

Objetivo general:

Rediseño y simulación de un sistema de bombeo de agua potable de 60 m³/h para la Junta de Agua Potable Cuendina en la ciudad de Quito-Ecuador.

Objetivos específicos:

Determinar las condiciones actuales del sistema de bomba de agua.

Rediseñar el sistema de bombeo para garantizar un adecuado funcionamiento conforme a las necesidades actuales.

Validar los resultados mediante la simulación del sistema de bombeo, para garantizar el funcionamiento del rediseño.

Determinar la viabilidad financiera del presupuesto a futuro de implementación y operación del sistema de bombeo rediseñado.

En el primer capítulo se estudiará, los conceptos relacionados al bombeo de agua potable, también se hará un recorrido con respecto a los elementos y materiales necesarios para la implementación de este tipo de servicio. En el capítulo dos se hace un relevamiento de información del sistema actual instalado, de esta manera se obtendrá los valores que actúan al momento y a continuación, se procederá con los cálculos para el rediseño de la propuesta y la validación de estos datos.

En el capítulo tres se hará un estudio de las condiciones de cálculo mediante el uso del software SolidWorks en su sub-herramienta FlowSimulation que se usa para el diseño de elementos que involucran fluidos compresibles, con los resultados obtenidos se procederá con el análisis de estos haciendo una relación entre los resultados teóricos y los obtenidos. En el capítulo cuatro se realizará un análisis de los costos relacionados a la implementación del sistema y su funcionamiento.

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO DE EQUIPOS Y ACCESORIOS PARA UN SISTEMA DE BOMBEO

Dentro de la actual sección se estudiará las definiciones que corresponden a sistemas para distribuir el agua potable, como: fuentes de abastecimiento, formas de distribución, aforo en la fuente de abastecimiento, conceptos básicos de mecánica de fluidos, sistemas de bombeo y bombas. De esta manera se conceptualizará las definiciones necesarias que tengan relación con el estudio que se realizará para el análisis y rediseño del proyecto.

1.1.Fuentes de abastecimiento de agua

Angarita R. y Meléndez M. [1], mencionan que estas fuentes, son un agregado de sistemas que acceden al tanque de agua potable a un grupo delimitado de ciudadanos que hacen vida en un sector urbano o rural. Para dicho abastecimiento se requieren de los dos tipos de recursos que existen y estos son superficiales y subterráneos. Estos recursos se determinan con factores, como: calidad, disponibilidad de cuantía, garantía en el suministro y coste de obra y operación.

A continuación, se describe los dos tipos de abastecimientos de agua potable para sistemas de bombeo.

1.1.1. Abastecimientos subterráneos

Orellana J. [2], según su estudio define que este tipo de abastecimientos funcionan por las aguas existentes en el suelo, las cuales son proveniente de precipitaciones de riberas y lagunas. Estas aguas tienden a caer bajo la influencia de la gravedad y su permeabilidad es inversamente relacionada a la filtración del suelo por el que pasan. La ventaja en este tipo de depósitos se debe a que la mayoría contiene agua dulce, por lo que requieren un menor tratamiento para eliminar las suciedades e impurezas que contiene el agua y, por lo tanto, se excluyen de forma natural.

1.1.2. Abastecimientos superficiales

Estos provienen de los ríos, lagos y embalses los cuales cuentan con una estructura básica, donde se aprovecha una fuente de agua usada. El abastecimiento superficial se puede adaptar a dos diferentes sistemas de bombeo, el primero que trabaja por gravedad, es decir

al nivel del terreno y el segundo, por un sistema bombeo electromecánico con el cual se puede garantizar la provisión de agua en una población determinada [3].

Este tipo de aguas contienen un nivel de contaminación medio debido a que provienen de ríos y lagos que se encuentran en los lugares montañosos de la zona, por lo que se requiere de ciertos tratamientos químicos para procesar las impurezas y obtener un agua de calidad, de tal manera que ésta sea adecuada para su consumo [3].

1.2. Red de abastecimiento de agua potable

Stauffer B. y Sphuler D., [3] realizaron un estudio en el cual definen a una red de distribución como una agrupación de conductos, suplementos y distribuciones que direccionan el caudal del agua hacia depósitos de servicios, con la finalidad de distribuir de manera óptima el agua, en el que todos los habitantes de un sector puedan utilizarla para el consumo doméstico, público, comercial e industrial [4].

1.2.1. Componentes de una red de abastecimiento

Dentro de una red de abastecimiento se encuentran los siguientes componentes:

- Tubería

Las tuberías son un conjunto formado por la unión de varios tubos de diferentes diámetros, en puntos llamados nodos, los mismos que constan de una red primaria principal que está conformada por los tubos de mayor diámetro y que conducen un alto caudal, mientras que la red secundaria está conformada por tubos de menor diámetro y abarcan las acometidas de la localidad [4].

- Válvulas

Son accesorios que sirven para la regulación del flujo de agua que se encuentra en tuberías. Estas se pueden clasificar según su geometría y funcionamiento [4]:

- Válvulas seccionamiento o de aislamiento

Se emplean en puntos específicos de tuberías, bombas y equipos de control para cerrar el flujo al resto del sistema de abastecimiento, este accesorio tiene la finalidad de interrumpir el flujo, para la reparación de estos [4].

- Válvulas de control

Este tipo de accesorios sirven para regular la presión, además ayudan a que el aire y sedimentos que se quedan atrapados en el sistema puedan entrar y salir de forma más sencilla [4].

- Hidrantes

Es considerada como conexión especial, porque como accesorio se ubica en diversos sitios de la línea de distribución, siendo su finalidad, proporcionar el servicio de agua de calidad a diversos consumidores. Este hidrante, consta de una base y varios interruptores comunes, ubicados en la red para brindar una conexión directo al servicio de agua potable [4].

- Tanques de distribución

Su función principal se enfoca en el almacenamiento de agua que proviene de la fuente. El cual sirve para distribuir agua potable o para prever fallas en el almacenamiento de este. La mayor parte de los tanques que conforman las redes de agua potable suelen ser tanques de regulación, que almacenan un cierto volumen adicional del líquido, en el supuesto de existir una demanda en la red que sobrepase el volumen y caudal que es infiltrado por la fuente [4].

- Tomas domiciliarias

Son un grupo de piezas y conductos que ceden a la distribución o abastecimiento desde una tubería que se encuentra en la red hasta el predio del usuario que lo va a consumir. Este tipo de elementos determina si la distribución de agua está funcionando correctamente, ya que este realiza el abastecimiento al consumidor [4].

- Rebombeos

Son unidades de bombeo ubicadas en puntos específicos de las líneas de transmisión o, en algunos casos, de las redes de distribución. Esto aumenta la carga hidráulica del lugar y, por lo tanto, mantener la circulación del agua en las tuberías [4].

- Cajas rompedoras de presión

Este tipo de dispositivo tiene la característica de conservar un espacio libre, así como la circulación de una cantidad pequeña de agua, esta se encarga de almacenar el flujo de la tubería que se descarga en ella. Esto hace que, en la red no exista una presión hidrostática y por lo cual se obtenga un nuevo nivel estático aguas abajo [4].

1.3. Formas de distribución

Se pueden distribuir de dos maneras:

1.3.1. Distribución por gravedad

Este método conduce o bombea el agua hacia un tanque elevado, por consiguiente, este hace que el fluido se conduzca a la población de forma gravitatoria. Esto ayuda a que el fluido obtenga una presión constante y suficiente para la red que sirve a dicha población. Además de ello este método depende mucho de las cotas de terreno, estas deben ser elevadas para la ubicación del tanque y con ello se puede obtener la presión requerida en la red [4].

A continuación, se presenta la distribución por este método en la Figura 1.

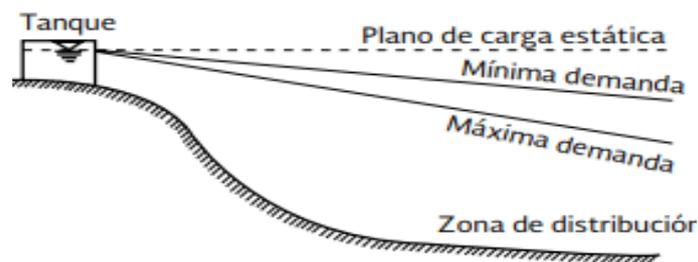


Figura 1. Distribución por gravedad [4].

1.3.2. Distribución por bombeo

Se clasifican en:

- Bombeo directo a la red, sin almacenamiento

Se basa en dar el máximo funcionamiento a las bombas, es decir estas proveen de manera directa a la red y línea de suministro, la cual está diseñado para regular el consumo diario máximo, y el día que presente una mayor demanda. Es considerado el con menos uso, debido a que si existe alguna falla en el servicio eléctrico esta interrumpiría todo el servicio de agua potable por completo [4].

- Bombeo directo a la red, con excedencias a tanques de regulación.

Este método consiste en cómo se distribuyen los elementos en la red. Ubicándose el tanque posteriormente a la red, es decir, se ubicará en un lugar contrario de donde llega a entrar el agua cuando es bombeada, donde la principal tubería ira conectada de manera directa a la bomba con el tanque [4]. Esto hace que la mayor cantidad de agua que es bombeada por la red en un corto tiempo de consumo llegue almacenarse dentro del tanque y cuando exista un tiempo en el que el consumo aumente, el agua almacenada llegue a enviarse nuevamente por la red.

1.3.3. *Distribución mixta*

En esta contribuyen los dos tipos de distribución, parte de la red de consumo es realizada a través del bombeo con excedencia a un tanque, al mismo tiempo que el agregado de abastecimiento de la red se realiza por gravitación. Una opción para el funcionamiento correcto de la distribución es mover el tanque al centro gravitacional del área de uso de agua [4].

A continuación, se mostrará la distribución de este método en la Figura 2.

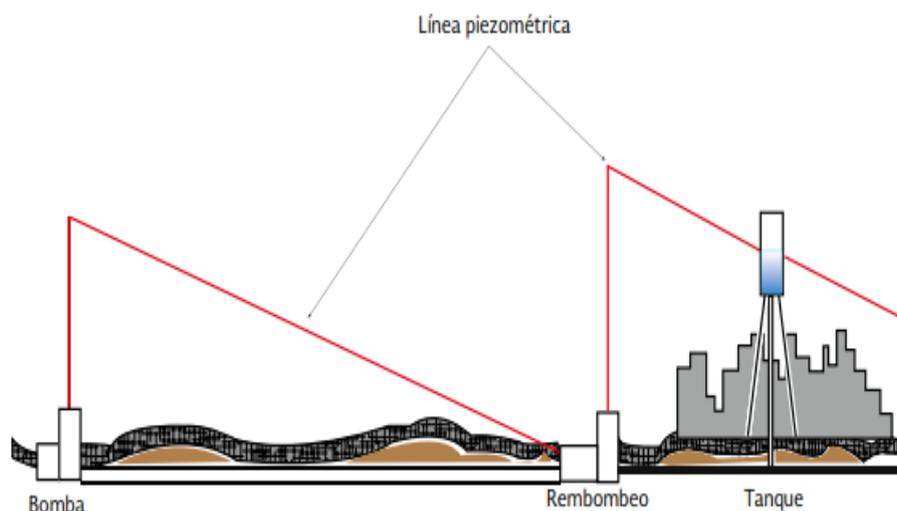


Figura 2. Distribución Mixta en un sistema de bombeo de agua [4].

1.4. Aforo de la fuente de abastecimiento

Castellón M. [5] menciona que siempre en un estudio de agua se debe tener en la fuente parámetros de medición respecto a la cuantía de agua, esto nos ayuda a resolver el problema de cuanta disponibilidad de agua potable necesita la población para su de abastecimiento. El aforo se define como el cálculo de volumen en el agua durante un tiempo concreto. El parámetro más importante de esta medición es el promedio mínimo del caudal, donde éste debe estar por encima del consumo máximo que se registra diariamente, con el objetivo de abarcar con el abastecimiento total de la población futura.

1.4.1. Sección de aforo

Es la zona o punto en la cual se estudia la medición del caudal, se realiza de forma transversal a la fuente correspondiente [6].

Para ello se debe cumplir ciertas características que se mostraran a continuación:

Accesibilidad a la población, ubicar el tramo del aforo, para que pueda mantenerse estable y así evitar el deterioro o sedimentación en este, además establecer un rango de velocidad del agua de la fuente entre 0.1 a 2.5 m/s. Durante el tramo más largo se debe tener una sección equilibrada, se debe ubicar el flujo del agua donde exista la menos influencia de turbulencias que pueda afectar a la misma y mantenerse libre de obstáculos.

1.4.2. Tipos de secciones de aforo

Los tipos de secciones de aforo pueden tener la configuración presentada a continuación:

- Sección de forma natural

Este tipo de sección suele ser muy inestables, debido a que se produce mucha sedimentación o erosión en el sector, lo que dificulta la medición del caudal de la fuente [6].

- Sección con tablonés

La principal característica de este tipo de secciones es que posee tablonés los cuales son ubicados y enterrados en las orillas de la fuente, obteniéndose así una figura geométrica

regular, la cual facilita el cálculo del área de sección y por lo tanto no existirán problemas de deterioro o sedimentación [6].

- Sección de concreto

Este tipo de sección suele ser muy ideal, ya que no existe invariabilidad en el tiempo, es decir es muy estable, su problema es que tiene un alto costo de construcción y mantenimiento [6].

1.5. Conceptos básicos de mecánica de fluidos

Hernández K. et al. [7] definen varios conceptos relacionados al campo de mecánica de fluidos que se presentan de la siguiente forma.

1.5.1. Presión

Es una cantidad física que se encarga de medir el predominio de una fuerza con orientación perpendicular por unidad de área y se usa para describir el resultado de una fuerza dada en una línea.

1.5.2. Viscosidad

Ésta corresponde al rozamiento interno en los fluidos debido a interacciones intermoleculares, siendo generalmente función de la temperatura.

1.5.3. Hidrostática

La presión hidrostática, también conocida como presión manométrica, puede estudiar los fluidos en reposo mediante el producto de la densidad, la aceleración de la gravedad y la altura del fluido.

1.5.4. Hidrodinámica

Es el estudio de la mecánica de fluidos a diferencia de la hidrostática esta estudia los fluidos en movimiento.

1.6. Sistemas de bombeo

Blanco E. et al [8], definen a los sistemas de bombeo de agua como el conjunto de distintos elementos que interactúan entre sí, con el objetivo de lograr el mismo resultado,

el cual es transportar un fluido desde un depósito inferior a un depósito superior. Por tanto, la bomba es la encargada de llevar a cabo el proceso de transformación de la energía mecánica en energía hidráulica, siendo éste el principal objetivo de un sistema de bombeo. Para obtener el equilibrio hidráulico se realiza un balance de energía en donde es necesaria la energía cinética, potencial y pérdidas por accesorios y tuberías.

1.6.1. Tipos de sistemas de bombeo

Sistema cerrado: este tipo de sistema se caracteriza por que el fluido que circula y es el portador de energía calorífica, en este ciclo se pretende transportar energía calorífica mas no el fluido en el sistema. Se usan bombas que vencen la suma de pérdidas por fricción que generan los componentes [9].

Sistema abierto: en este tipo de instalación se utiliza con la finalidad de trasportar fluidos a través de una bomba tal es el caso de los sistemas de bombeo de agua, sistemas de riego o sistemas de tratamientos industriales. En este sistema la bomba maneja la altura geodésica del líquido, así como también refrenar las pérdidas realizadas por la fricción producidas en tuberías y en los componentes del sistema, los sistemas abiertos se clasifican en sistemas abiertos de altura geodésica positiva y sistemas abiertos de altura geodésica negativa [9].

1.6.2. Elementos principales de un sistema de bombeo

En un sistema simple existen tuberías que se unen en los puntos de origen y destino. Existen diferentes elementos que proveen la energía obligatoria para realizar su transportación, tal es el caso de las bombas. También los sistemas de bombeo están incorporados por accesorios de medida y control como son, el equipo de medida y válvulas [9].

En la Figura 3 se observa un esquema en el que se puede encontrar válvulas, codos y bombas.

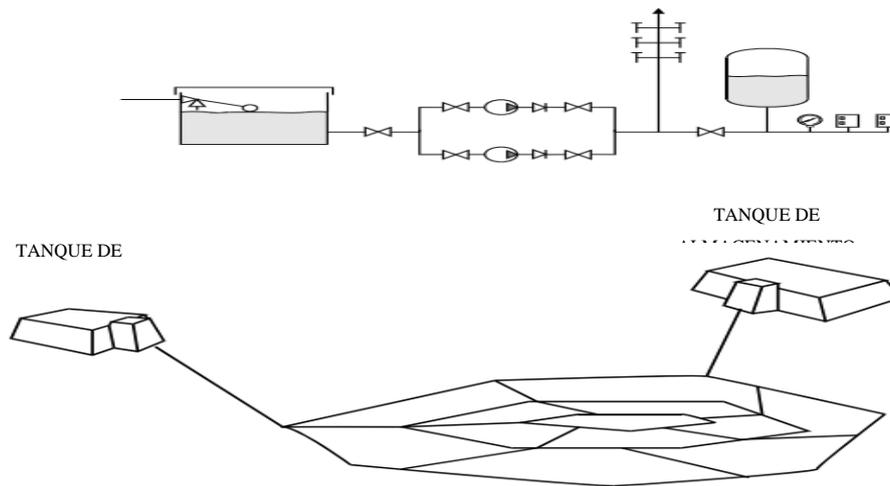


Figura 3. Red de distribución de agua potable a una población [9].

1.7. Bombas

Hernández J. [7], define a las bombas hidráulicas como dispositivos generatrices, esta modifica la energía total del fluido que la atraviesa, se desprecia los efectos térmicos ya que el fluido que se conduce es considerado incompresible, se caracteriza generalmente por manejar en la máquina la rotación de la velocidad y el que el fluidos sea abundante y constante. A través del fluido la energía se cambia por medio de un grupo mecánico de revolución el cual gira en torno a una línea imaginaria, constando de un rodete provisto de álabes que forman canales en los cuales se mueve el fluido. Su estudio analítico se basa en el análisis de: el caudal, la carga, la presión, la potencia, la velocidad de rotación, el tamaño o dimensión, la masa específica, la viscosidad, la elasticidad, etc.

1.7.1. Elementos constitutivos de una bomba centrífuga

En la siguiente figura se puede apreciar un esquema en vista frontal y lateral de un sistema de bombeo en la zona de succión.

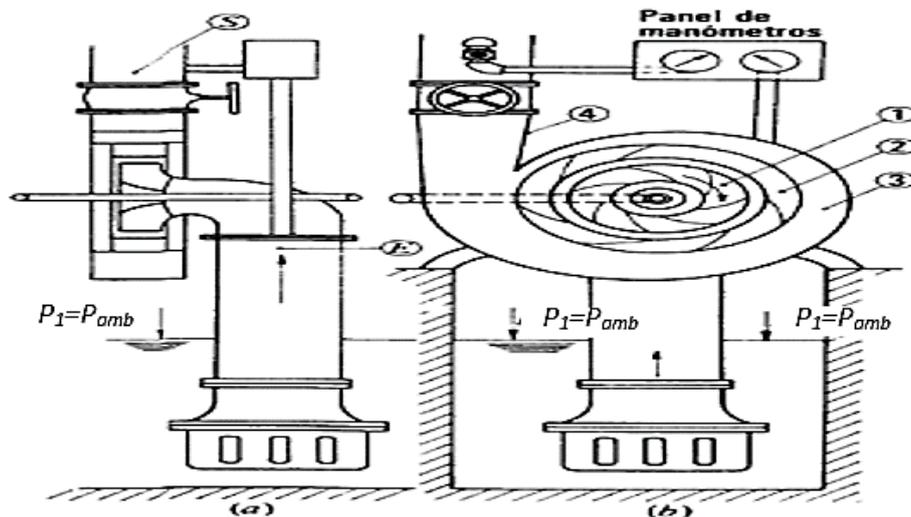


Figura 4. Vista frontal y lateral de una bomba centrífuga, con sus principales elementos constitutivos [10].

- Rodete

Mataix C. [10] ,en su libro menciona que el rodete es el elemento que consta de álabes los cuales giran con el cigüeñal de la máquina, para impartir energía al fluido en representación de energía de presión y cinética. Existen diferentes tipos de rodetes según su aplicación y geometría estos son:

- a. Rodete cerrado de simple aspiración: se define por la cara anterior y posterior, las cuales cada una integran una caja, donde se conectan los álabes.
- b. Rodete cerrado de doble aspiración.
- c. Rodete semiabierto de simple aspiración: no presenta una cara anterior, por lo tanto, los álabes se precisan únicamente en la cara exterior.
- d. Rodete abierto de doble aspiración sin cara anterior ni posterior: debido a que no presenta ambas caras, estos álabes solo se asientan dentro del cubo del rodete.

En la Figura 5 se exteriorizan las diferentes secciones de rodete para una bomba centrífuga.

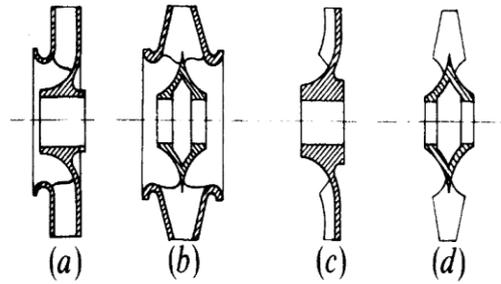


Figura 5. Sección de rodetes para bombas centrífugas [10].

La geometría del rodete varía de acuerdo con las condiciones de servicio, ya que estos deben satisfacer a Q y H para que obtengan el máximo rendimiento [10].

- Corona directriz

Se encarga de recibir el fluido que viene del impulsor convirtiendo la energía cinética transferida a través de éste, en energía para presión a medida que se aumenta la sección del canal para la corona en la dirección del flujo. Este fragmento de la bomba se incluye en modelos muy específicos por su costo de construcción, su principal ventaja es que aumenta la eficiencia de esta [10].

- Caja espiral

Este elemento convierte la energía cinética en energía de presión, recogiendo el fluido que recorre desde el impulsor con una mínima pérdida de energía y lo dirige a la salida o tubería de suministro [10].

- Tubo difusor troncocónico

Este elemento se encarga de ejecutar una tercera fase en cuanto a la transmisión de energía cinética de presión. La corona directriz, la caja espiral y el tubo difusor son elementos del sistema difusor, en ocasiones se localizan en la misma bomba salvo en los casos de caja espiral-tubo difusor y en las bombas de alta gama donde se ubican los tres elementos esto mejora el rendimiento de esta. El papel que estos elementos desempeñan son la transformación, con una mínima pérdida de presión de la energía dinámica que da el rodete [10].

En la Figura 6 se muestra 3 tipos de carcasas centrífugas.

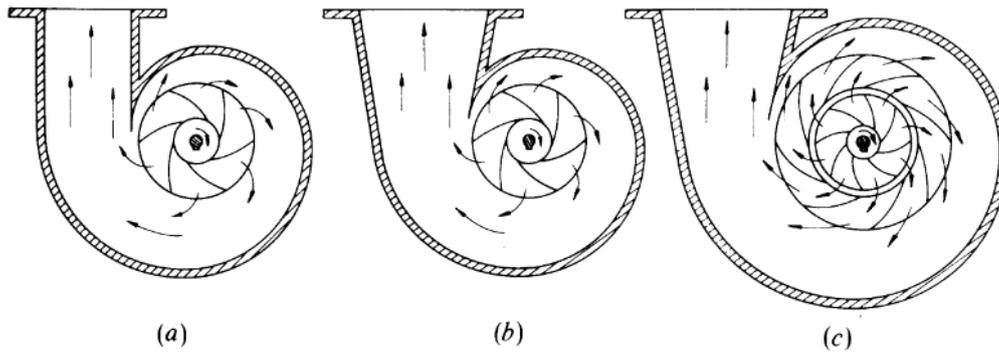


Figura 6. Tipos de carcasa de bombas centrífugas [10].

1.7.2. Cebado de la bomba

Este es un proceso en el cual la bomba va a tener una columna de agua proporcionada, que mantendrá un valor alto en la presión de salida, esto será logrado si el sistema de bombeo se encuentra cebado, es decir al comenzar su funcionamiento tanto la tubería de succión como la carcasa de la bomba contendrán el fluido de arrastre en su interior. Cuando se cumplen estas condiciones el desempeño de la bomba y la columna de agua lograda será de alto rendimiento, de esta manera se tendrá una alta presión de descarga cumpliendo así con la expectativa del diseño [10].

1.7.3. Pérdidas

Las pérdidas de una bomba se especifican en:

- Pérdidas hidráulicas

En el libro de Mataix C. [10], se menciona las pérdidas hidráulicas reducen la energía determinada del fluido, así como también la altura útil, debido a la presencia de fricción hidráulica y turbulencia que se produce a lo largo de la trayectoria del flujo de la planta. Las pérdidas hidráulicas surgen principalmente de los componentes de la bomba, como el impulsor, la caja espiral, la corona directriz y el proceso entre la caja espiral y la descarga de la bomba [10].

Constan dos clases de pérdidas hidráulicas:

Pérdidas superficiales causadas por la fricción del líquido contra la pared de la bomba o la fricción del fluido con el material. Estas pérdidas que provoca el deslizamiento de la capa límite dentro de los cambios producidos en el impulsor, de esta manera la tangente

del alabe debe estar en la misma dirección que la velocidad relativa en la entrada o en la salida del rodete, esta corona directriz cambia y la velocidad absoluta en la salida no coincide [10].

- Pérdidas volumétricas

Denominadas también pérdidas intersticiales, las causas de la pérdida por volumen se produce por: los prensaestopas friccionado con el cigüeñal del elemento, el rozamiento del disco, impulsor de auxiliares, los cuales se fragmentan en dos tipos [10].

Las pérdidas externas, son dispersiones exteriores de fluidos que escapan del espacio entre la carcasa y el cigüeñal de la bomba por donde pasa. Para ello es necesario el uso de la caja de empaquetaduras para poder reducir este efecto [10].

Pérdidas interiores, reducen considerablemente el rendimiento volumétrico, esto se puede identificar cuando existe mayor presión en la salida que en la entrada del rodete, de esta manera una parte del fluido retrocede por el rodete-carcasa que es donde se encuentra el conducto de este [10].

- Pérdidas mecánicas

Estas pérdidas se producen por la erosión mecánica que existe entre los diferentes elementos de la bomba tal es el caso de: erosión de los prensaestopas con el cigüeñal de la máquina, erosión entre el cigüeñal con los cojinetes y el impulsor de los auxiliares. Y el más importante, el rozamiento de disco en el cual se involucra al fluido de trabajo debido a que este ingresa entre el juego del rodete y la carcasa, de esta manera se produce un giro en el vacío [10].

1.7.4. Potencia

La potencia nominal es la cantidad que indica el consumo de energía en una unidad de tiempo, se mide cuantificando la velocidad de rotación y el torque de la bomba [11], existen tres tipos de potencia que son los siguientes:

La Figura 7 muestra las diferentes pérdidas de potencia en una bomba centrífuga.

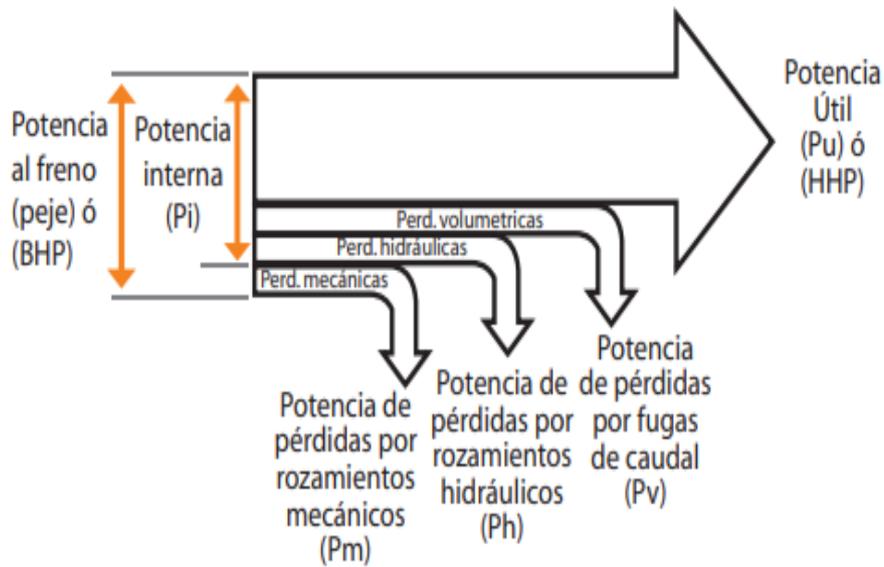


Figura 7. Pérdidas de potencia existentes en una bomba centrífuga [12].

En general para determinar los diferentes tipos de potencia se definen a partir de las pérdidas hidráulicas, volumétricas y mecánicas que existentes en una bomba centrífuga [11].

- **Potencia de accionamiento**

Es la potencia que se logra extraer del eje del motor, siendo esta inferior a la potencia eléctrica que entra debido al detrimento de energía del motor provocados por el calentamiento de los elementos móviles del motor, las interferencias magnéticas, la fricción y la ventilación [11].

- **Potencia hidráulica o potencia interna**

Es la fuerza total con que se entrega el líquido, es decir, potencia motriz menos pérdidas mecánicas [11].

- **Potencia útil**

Es la fuerza motriz menos las pérdidas por bombeo la cual es equivalente menos estas y, sólo el interior la tubería siendo estas aforadas e hidráulicas [11].

1.7.5. Rendimiento

Se refiere cuando la totalidad de las bombas llegan alcanzar su máxima utilidad en un margen estrecho correspondiente del caudal, que expresa el porcentaje entregado en la

potencia del fluido en relación con la adición de potencia por el eje del motor [7]. Es la potencia hidráulica en relación con la salida de una bomba y la potencia mecánica entregada al eje de la bomba [13].

1.7.6. *Altura neta de succión positiva (NPSH)*

Consiste en la presión ejercida por el vapor del líquido que se va a bombear, para que esta pueda trabajar de una manera correcta y no exista el fenómeno de cavitación. Los fabricantes realizan pruebas con todos los diseños para poder estipular el nivel de presión de succión requerido, lo cual le permite informar los datos resultantes, como suele utilizarse con respecto a la carga de succión de la bomba requerida ($NPSH_R$) en cada capacidad operativa o flujo volumétrico, así como la presión total de la bomba. Por lo tanto, la carga de succión positiva neta utilizable deber estar por encima que la se requiere [14].

El caudal máximo en función de los NPSH se muestra en la Figura 8.

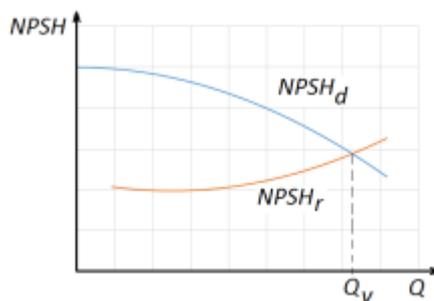


Figura 8. Determinación del máximo caudal de aspiración desde el punto de vista de la cavitación [14].

1.7.7. *Curvas características*

Lujan G. [15] en su libro menciona que las curvas características son resultado de la realización de diversos intentos dentro de un banco de experimentos, los cuales requieren de instrumentos exclusivos en los estudios para esta ejecución. Esta instrumentación conlleva a la diversa medición en cuanto a la velocidad del caudal y giro, el cual se refiere a la aplicación de torsión y la divergencia entre la descarga de la bomba y la presión de succión.

Con estos parámetros se puede predecir el compartimiento de la bomba y con ello se puede obtener un mejor punto de operación, lo que depende no solo del diseño de la bomba sino también de la succión que ejerce esta.

1.7.8. Criterios de selección de una bomba

Mataix [10] considera algunos parámetros que son necesarios para seleccionar una bomba, entre los que menciona:

- Para qué tipo de aplicación se usará el equipo
- Se debe tener un alto grado de conocimiento acerca del fluido que se va a usar en el equipo, como es: viscosidad, temperatura, gravedad específica, volatilidad, explosividad, etc.
- Realizar los cálculos exactos de la carga de la bomba, en esto se añade una aproximación de la carga estática total, la diferencia que existe entre las presiones, el líquido en un nivel determinado en las zonas de aspiración y descarga, de la misma forma se debe tener en cuenta las pérdidas de fricción que existen en las zonas ya mencionadas.
- Tener en cuenta un gasto de operación de la bomba aproximada.
- La disponibilidad de repuestos que exista en el mercado nacional.

CAPÍTULO II

REDISEÑO DEL SISTEMA DE BOMBEO DE AGUA POTABLE

El capítulo 2 realizará un estudio en las instalaciones del sistema de bombeo que se encuentra implementado. Haciendo un análisis de las pérdidas de carga que posee el sistema por las líneas, accesorios de tubería y bombas instaladas. Para detectar las principales fallas de funcionamiento que presenta el sistema. Teniendo en cuenta las fallas de cálculo que tiene el sistema actual se procederá a dimensionar los valores de la tubería más adecuada para este uso, con una velocidad recomendada para este tipo de instalaciones y la menor cantidad de pérdidas por accesorios que se pueda implementar. De la misma forma con los cálculos de carga que se realicen se procederá con la elección de los equipos más correcta para la instalación de bombeo.

2.1. Características de la implementación actual

El sistema de bombeo del barrio Cuendina en la ciudad de Quito – Ecuador, consta en un cuarto de bombas, tanques de reserva, tuberías y acometidas que funcionan alrededor de 28 años en los que se ha realizado diferentes modificaciones de acuerdo con el crecimiento de usuarios y el caudal que se requiere para la provisión poblacional actual. La Junta Administradora de Agua Potable y Saneamiento Cuendina (JAAPSC), no han considerado todos los factores de diseño, por lo cual en este momento el sistema presenta fallas en su funcionamiento esto debido a la instalación inadecuada de los equipos.

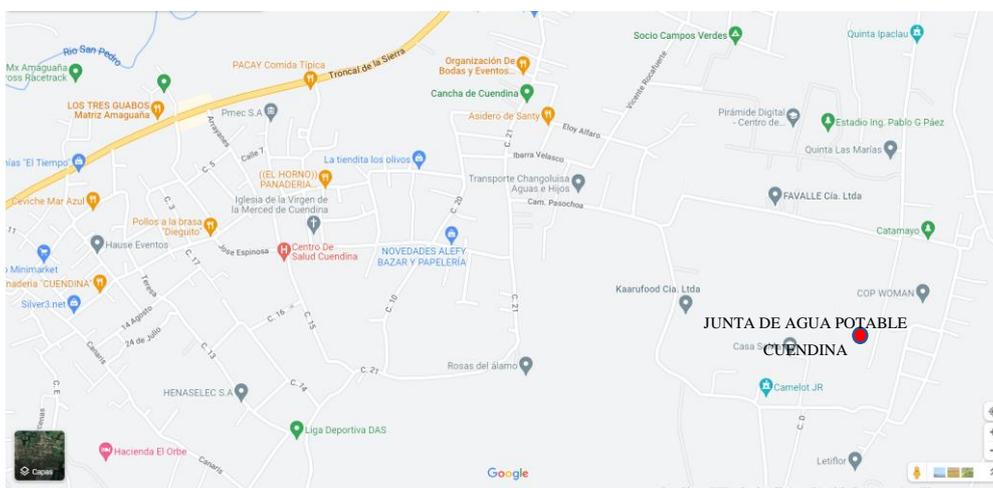


Figura 9. Ubicación de la Junta de Agua potable del Barrio Cuendina, localizada en la ciudad de Quito sus principales vías de acceso son por la Troncal Sierra y el Camino a la reserva ecológica Pasochoa.

Existen dos cuartos de bombeo, el primero con un tanque de 18 m³ que trabaja con una sola bomba que dirige su flujo hacia la tubería de descarga al tanque D, el segundo cuarto de bombas que esta sobre un tanque de 54 m³ y trabaja con dos bombas. Las tres bombas alternan su funcionamiento dependiendo de la exigencia de caudal del sistema de bombeo en forma de un sistema redundante. En la Figura 10 se observa una imagen de los tanques y cuartos de bombeo.



Figura 10. Recinto de reparto del sistema de servicio potable del barrio Cuendina.

El sistema está diseñado para una población de 1091 personas, con un consumo diario de 120 l/hab·d y un caudal máximo horario de 52.36 m³/h. Actualmente el sistema instalado esta valorizado en 30000 dólares aproximadamente, en el que constan accesorios, instalación de las bombas, instalación de tuberías, etc.

Tabla 1. Factores de diseño servicio de agua potable actual.

Factor	Valor
Población final (Pf)	1091
Consumo (m ³ /hab d)	0.12
Caudal medio diario (m ³ /h)	26.18
Caudal máximo diario (m ³ /d)	34.03
Caudal máximo horario (m ³ /h)	52.37

2.2. Equipos y accesorios instalados

En el sistema se encuentran instalados los siguientes equipos y accesorios:

2.2.1. Tanques

Durante su funcionamiento se han construido 4 tanques de las siguientes capacidades:

Tabla 2. Capacidad de tanques existentes en el recinto de bombeo.

Nombre	Capacidad (m ³)
Tanque A	18
Tanque B	70
Tanque C	54
Tanque D	100

El tanque D se encuentra aproximadamente a un kilómetro del recinto de bombeo en donde se encuentran los tanques A, B y C, con una diferencia de altura de 78 m, esto para complementar al sistema y abastecer a la población mediante un sistema por gravedad. Las bombas y motores instalados en el sistema se encargan de cargar este tanque cada cierto límite de tiempo esto dependiendo del uso del servicio por la población, en promedio se utiliza 52.37 m³/h durante las horas de mayor consumo que son de 5:00 am hasta 9:00 pm, de ahí en adelante hasta repetir el ciclo el tanque se vacía en un 30 % de su capacidad total.

En la Figura 11 se observa un plano topográfico del recinto y la línea de bombeo principal.



Figura 11. Plano Topográfico de la ubicación del recinto de bombeo y el tanque D y el servicio de agua potable del barrio Cuendina en Quito-Ecuador [16].

2.2.2. Tuberías

Para realizar un análisis de velocidades y caudal, se enlistó todos los accesorios y tuberías instaladas en el sistema actual todas estas se observan en la Tabla 3. En la Figura 12, se observa el montaje del primer cuarto de bombeo; su funcionamiento se da con una sola bomba y el tanque tiene una capacidad de 18 m³.



Figura 12. Sistema de bombeo para tanque A.

La instalación actual del sistema de bombeo del segundo cuarto de máquinas se muestra en la figura 13, al ser el tanque de 70 m³ de capacidad, este funciona con dos bombas como se puede observar.



Figura 13. Sistema de conexión del cuarto de bombas del tanque C.

En la Tabla 3, se detalla el nombre, la medida y cantidad de los accesorios, que están instalados en el sistema de las tres bombas.

Tabla 3. Accesorios del sistema de bombeo actual.

ACCESORIO	MEDIDA (pulgadas)	CANTIDAD	UNIDAD
Bomba centrífuga	-	3	u
Tubo de acero cédula 40	4"	7000	mm
Brida de acero ANSI 300#	4"	16	u
Codo soldable 90° CÉDULA 40	4"	4	u
Codo soldable 45° CÉDULA 40	4"	1	u
Tubo acero galvanizado	2"	2000	mm
Codo acero galvanizado 90°	2"	3	u
T acero galvanizado	2"	3	u
Válvula de compuerta	2"	2	u
Reducción concéntrica	2"X6"	1	u
Reducción excéntrica	4"X3"	1	u
Reducción concéntrica	4"X3"	1	u
Tubería acero negro cédula 40	6"	1000	mm
Codo de soldable 45° cédula 40	6"	2	u
Codo soldable 45° cedula 40	4"	1	u
Válvula de compuerta	4"	1	u
Válvula check (antiretorno)	4"	1	u
Válvula check (antiretorno)	6"	2	u
Válvula de compuerta	6"	2	u

Uno de los parámetros a considerar es el diseño de las líneas de succión y descarga y comprobar si la tubería usada es la adecuada, si es la incorrecta esto afectaría al sistema de bombeo y se considera unos de los factores por el cual la configuración presenta fallas. Por ello se debe realizar un análisis de velocidades con el caudal y tuberías existentes.

Para ello se debe revisar la tabla de propiedades de las tuberías cédula 40 que se encuentran en el Anexo A, para obtener datos de la tubería instalada.

- Análisis de velocidades

Se realiza el análisis en succión y descarga mediante la siguiente formulación.

$$Q = A \cdot v \quad (1)$$

$$v = \frac{Q}{A}$$

Donde:

Q: caudal en m³/s

A: área en m²

v: velocidad real en m/s

Entonces en la línea de succión se obtiene:

Datos

$$Q = 52 \left[\frac{m^3}{h} \right] \rightarrow 0.014 \left[\frac{m^3}{s} \right]$$

Tubería 4 plg cédula 40

$$A = 8.213 \times 10^{-3} \left[m^2 \right]$$

$$v = \frac{0.014 \left[\frac{m^3}{s} \right]}{8.213 \times 10^{-3} \left[m^2 \right]}$$

$$v = 1.704 \left[\frac{m}{s} \right]$$

Tabla 4. Resumen de velocidades de succión en tuberías instaladas.

Número de bomba	Diámetro en succión(mm)	Velocidad de succión (m/s)	Diámetro en descarga (mm)	Velocidad de descarga (m/s)	Ubicación
Bomba 1	3"	2.93	3"	2,93	Tanque A
Bomba 2	4"	1.70	6"	0,75	Tanque C
Bomba 3	4"	1.70	4"	1,70	Tanque C

Como se observa el resultado sobrepasa el 1 m/s recomendado en succión, por lo tanto, el actual sistema contempla un fallo de diseño de tuberías.

De igual manera en la línea de descarga, se tiene tuberías de diferentes medidas y los valores de velocidad varían con respecto a la velocidad recomendada de diseño como se presenta en la Tabla 4.

2.2.3. Bombas centrífugas

En la actualidad el sistema cuenta con aproximadamente 1091 usuarios, que en total abarcan un caudal de 52.37 m³/h, por lo cual existen tanques de almacenamiento para abastecer a esta población. La tabla 5 muestra las tres bombas instaladas:

Tabla 5. Bombas instaladas en el sistema de la Junta de Agua Potable Cuendina.

NÚMERO DE BOMBA	MODELO	COLUMNA DE AGUA (m)
Bomba 1	B3ERBL	137
Bomba 2	50-250A	137
Bomba 3	50-250A	137

Estas bombas se encargan de abastecer al tanque de mayor capacidad, durante todo el año, las mismas se encuentran conectadas en un sistema mixto y de funcionamiento redundante, la construcción de los tanques por la geometría del terreno tiene diferentes capacidades de carga como se observa en la Tabla 2 y funcionan como el diagrama lo muestra.



Figura 14. Diagrama de conexión de tanques del servicio de agua potable del barrio Cuendina.

El tanque A se encuentra interconectado al tanque B y por los efectos de circulación el fluido se carga al tanque B y se une al tanque C, que en su instalación trabaja con dos bombas de 137 m de columna de agua respectivamente, mismas que se encargan de bombear el fluido hacia el tanque D para la parte final del proceso. La bomba que se encuentra en el tanque A de 137 m de columna de agua, está conectada a la tubería de alta, que desemboca directamente en el tanque D.

2.2.3.1. Pérdidas de energía.

Para determinar las pérdidas, se debe tener datos de fricción de accesorios que se encuentran en el Anexo E, rugosidad de la tubería en el Anexo D y propiedades del agua que se puede observar en el Anexo B.

a. Pérdidas mayores

En las pérdidas mayores se toma en cuenta factores tanto de la tubería, como del flujo que se encuentra durante la circulación de agua por el interior del ducto.

$$h_L = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (2)$$

Donde:

h_L : pérdidas mayores en el sistema de succión (m), ver anexo E

f: factor de fricción de la tubería (adimensional)

L: longitud de la tubería (m)

D: diámetro interior de la tubería (m)

v: velocidad a la que trabaja el fluido (m/s)

g: gravedad (m/s^2)

De esta manera se determina las siguientes pérdidas:

$$h_L = 0.019 \cdot \frac{2.66[m]}{0.1023[m]} \cdot \frac{2.93^2 \left[\frac{m^2}{s^2} \right]}{2(9.81) \left[\frac{m}{s^2} \right]}$$
$$h_L = 0.289[m]$$

b. Pérdidas menores

En las pérdidas menores se toma en cuenta todos los accesorios que se encuentra en el sistema de succión estos valores se muestran en el Anexo E.

En este caso se encuentran:

- Codo estándar a 90°
- Codo a 45°
- Válvula de pie

Este factor se define como:

$$h_{Lmenores} = K \left(\frac{v^2}{2g} \right) \quad (3)$$

Donde:

K: se define como la suma de los coeficientes de rugosidad de cada uno de los accesorios que se encuentran en el sistema. (adimensional)

v: velocidad a la que trabaja el fluido. (m/s)

g: gravedad (m/s²)

Conociendo todas las variables, procedemos a reemplazar los datos para obtener las pérdidas menores.

$$h_{Lmenores} = 7.65 \cdot \frac{2.93^2 \left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} \right]}{2(9.81) \left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right]}$$

$$h_{Lmenores} = 3.34 [\text{m}]$$

Tabla 6. Resumen de pérdidas totales en tuberías de succión

Descripción	Número de Reynolds	Factor de fricción	Pérdidas mayores (m)	Pérdidas menores (m)	Pérdidas totales (m)
Bomba 1	223100.25	0.019	0.289	3.34	3,58
Bomba 2	169988.50	0.019	0.073	1.16	1.23
Bomba 3	169988.50	0.019	0.073	1.16	1.23

2.2.3.2. Carga neta positiva de succión (NPSH).

Para determinar los fallos en la instalación de bombeo actual se debe realizar un análisis de presión en el sistema, a este estudio se le denomina carga neta positiva de succión, como su nombre lo indica el análisis se realiza en la parte de succión del sistema, en el que influye varios factores como son las pérdidas de fricción en el flujo, pérdidas menores de los accesorios ubicados en las líneas de tubería, presiones de la atmosfera y fluido [17].

Existen dos tipos de NPSH:

a. NPSH disponible

El cual es una función en base al sistema en que opera la bomba.

A continuación, se muestra la función con la se realizará el análisis de la bomba.

$$NPSH_d = \pm Z_1 + \frac{P_1 - P_v}{\rho \cdot g} \cdot 10^5 - h_f \quad (4)$$

Donde:

Z_1 : Altura de succión (m)

P_1 : Presión del fluido (bar), a condiciones ideales

P_v : Presión de vapor (bar), a condiciones ideales

ρ : Densidad (kg/m^3), a condiciones ideales

g : aceleración gravedad (m/s^2)

h_f : Pérdidas totales en succión (m)

Conociendo las diferentes variables, se procede a calcular el $NPSH_d$

$$NPSH_d = -0.6[\text{m}] + \frac{0.71[\text{bar}] - 0.021[\text{bar}]}{998.4 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \cdot 9.81 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right]} \cdot 10^5 - 3.58$$
$$NPSH_d = 3.55[\text{m}]$$

En la Figura 15 se observa las alturas correspondientes de la geometría del diseño los cuales son importantes en el calculo del $NPSH_d$



Figura 15. Alturas de la geometría del sistema actual.

b. NPSH requerido

Es una función que se basa en el diseño de la bomba, las curvas de operación ayudan a definir estos valores.

El $NPSH_r$ de la bomba actual con la que funciona el sistema de bombeo se muestra en la figura 15.

$$NPSH_r = \text{Valor curva de operacion} + 0,5 \quad (5)$$

$$NPSH_r = 4 + 0,5$$

$$NPSH_r = 4,5 [m]$$

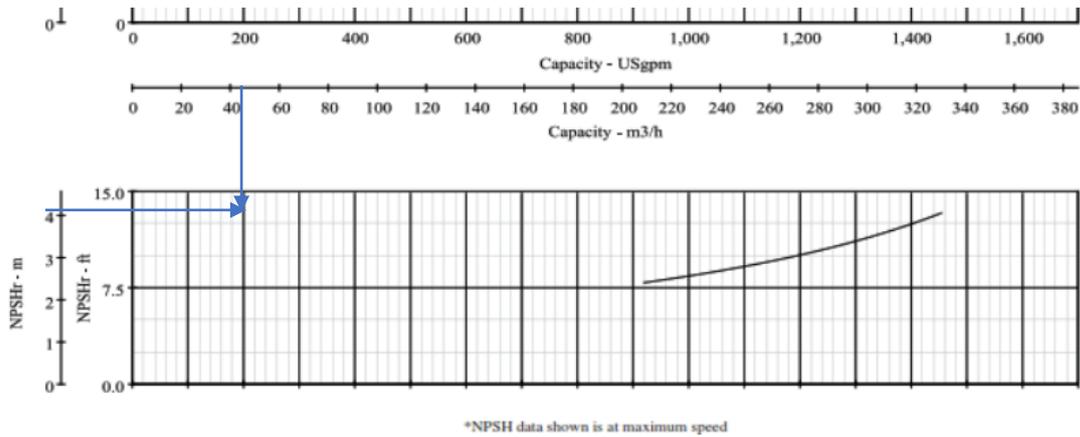


Figura 16. Diagrama de NPSHr para bombas centrífugas existentes.

En la Tabla 7 se exterioriza los valores de NPSH de las tres bombas instaladas.

Tabla 7. Resumen de valores de NPSH disponible en el sistema de bombeo actual.

DESCRIPCIÓN	NPSHd	NPSHr
Bomba 1	3.55	4.5
Bomba 2	5.758	4.5
Bomba 3	5.716	4.5

c. Curva de operación hidráulica

De las Heras S. [18], menciona que la curva de operación hidráulica o curva resistente se encuentra definida Hazen-Williams en la ecuación 6 y sirve para establecer el punto de operación Caudal vs Altura, adecuado para las condiciones de diseño actuales y el funcionamiento óptimo de la bomba que se va a seleccionar.

$$h_f = \frac{10,679}{C^{1,852}} \cdot \frac{L}{D^{4,87}} \cdot Q^{1,852} \quad (6)$$

Donde:

L: longitud total de tubería en descarga (m)

D: diámetro de tubería (m)

Q: caudal (m³/s)

C: coeficiente de Hazen-Williams (ver el Anexo H)

Esta ecuación calcula las supresiones de carga en función de la geometría como es la longitud de la tubería, el diámetro en metros y el caudal en m^3/s , el coeficiente de Hazen-Williams es un valor adimensional que se asigna dependiendo del material de la tubería que se está utilizando, de esta manera para el sistema se obtiene el siguiente valor:

$$h_f = \frac{10.679}{(130)^{1.852}} \cdot \frac{800[m]}{(0.110)^{4.87} [m]} \cdot (0.014)^{1.852} \left[\frac{m^3}{s} \right]$$
$$h_f = 25.57 [m]$$

El valor obtenido se suma a la altura geométrica para obtener el punto de operación teórico. Para trazar la curva resistente se usa la ecuación de Hazen-Williams con un caudal inicial de 0 en intervalos de 2 y una altura manométrica de 105.32 m, de esta manera para las bombas existentes, se obtiene resultados, los cuales se pueden apreciar las Figuras 17 y 18.

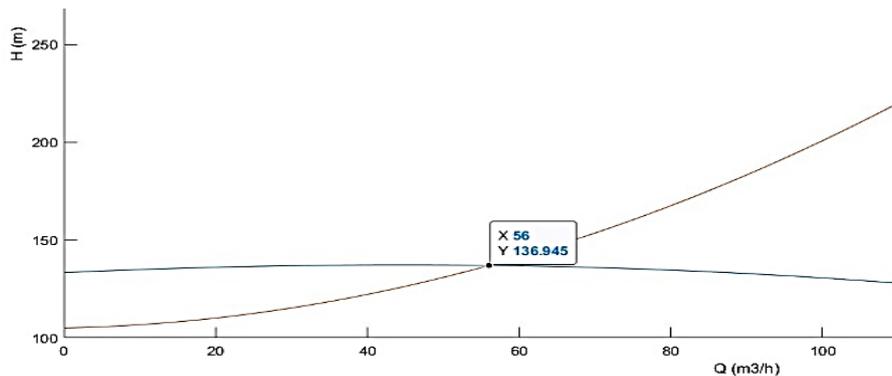


Figura 17. Punto de operación real con la curva característica para bomba de la marca Berkeley Modelo: E3RBL.

En la Figura 17, el sistema se encuentra trabajando con un rodete de 10.43 pulgadas y una potencia de 75 HP, la altura manométrica es establecida por las condiciones de diseño este corresponde a 105.3 m y un caudal de $52.37 m^3/s$, el punto de operación ha sido modificado por la selección de la bomba, con una altura manométrica de 137 m y el caudal de $56 m^3/s$.

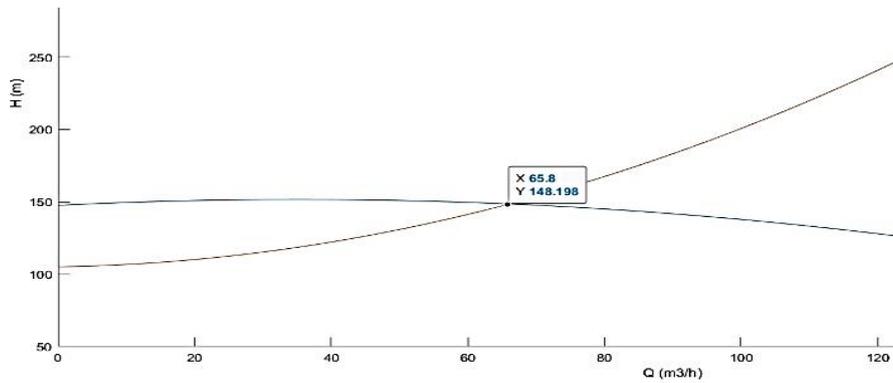


Figura 18. Punto de trabajo para la curva característica de la bomba de la marca HIDROMAC modelo: 50-250A.

Analizando las curvas de diseño que se observan en la Figura 17 y Figura 18 se puede apreciar, que estas trabajan a lo requerido para la población actual es decir para los 1091 usuarios del sistema. De acuerdo con el manual de diseño de García E. [19], los sistemas mediante bombeo tienen un período de funcionamiento para 20 años, es por esta razón que la implementación de bombeo de agua potable del barrio Cuendina en la ciudad de Quito debe contar con un rediseño, porque de acuerdo con la demografía y período de funcionamiento que ya ha tenido, este se encuentra entre los 28 años de funcionamiento y simplemente se ha realizado readecuaciones mas no una ingeniería en su totalidad. Es por esto, que el sistema presenta fallas en los elementos que se encuentran instalados, principalmente se ha observado la desalineación de equipos como las bombas y motores de la instalación, es decir se encuentra con un alto nivel de vibración esto produce un ejercicio mecánico para los accesorios de esta y un bajo período de funcionamiento. Además, las tuberías seleccionadas para las líneas de succión tienen un diámetro menor al requerido, con accesorios inadecuados que representan altas pérdidas de energía para la línea de succión.

2.3. Rediseño del sistema para la implementación de bombeo de agua potable

Para el rediseño del sistema se inicia con el cálculo de los usuarios que estarán dentro del servicio.

2.3.1. Cálculo de usuarios del sistema

Para la implementación del bombeo se plantea a partir de la cantidad de usuarios que van a utilizar el servicio a futuro, de esta manera se inicia con las siguientes fórmulas [20]. Para el cálculo del caudal necesario del sistema a diseñarse se utiliza la siguiente fórmula:

$$P_f = P_a \cdot \left(\frac{1 + r \cdot t}{1000} \right) \quad (7)$$

Donde:

P_f: población futura

P_a: población actual

r: tasa de crecimiento anual por mil

t: número de años

De acuerdo con los registros de la Junta Administradora de Agua Potable y Saneamiento Cuendina, actualmente existen 450 socios que cuentan con acometidas domiciliarias instaladas y en funcionamiento. Entonces el cálculo se realizará a partir de este número de personas teniendo en cuenta que en promedio las familias son de tres personas, también de acuerdo con el último estudio de crecimiento poblacional realizado en la ciudad de Quito que corresponde al 4.95% anualmente, esta encuesta se realizó en el año 2020.

$$P_f = 1091 \cdot \left(\frac{1 + 4.95 \cdot 20}{1000} \right)$$

$$P_f = 1200$$

De esta manera la población futura de usuarios sera de 1200 personas que usarán el servicio de agua potable.

2.3.2. Dotación de agua por persona

Según el INEN [20], en el Código Ecuatoriano de la Construcción se establece una tabla de consumo doméstico por usuario la misma que se mide en litros/habitante diario. En esta tabla se divide el consumo promedio por el clima en donde se diseña el sistema de bombeo, como se muestra a continuación en la Tabla 8.

Tabla 8. Dotaciones recomendadas [20].

Población	Clima	Dotación media futura (l/hab/día)
Hasta 5000	Frío	120-150
	Templado	130-160
	Cálido	170-200
5000-50000	Frío	180-200
	Templado	190-220
	Cálido	200-230
Más de 50000	Frío	>220
	Templado	>220
	Cálido	>230

Poniendo en comparación el cálculo de consumo doméstico por habitante en promedio se aproxima a las dotaciones recomendadas por el INEN para climas fríos que es 120 l/hab·d, pues al ser una cantidad ya establecida el diseño se realizará con este caudal de consumo.

Tabla 9. Tabla de consumo doméstico por habitante [20].

Ítem	Consumo (L/hab. d)
Aseo personal	45
Descarga de sanitarios	30
Lavado de ropa	20
Cocina	15
Lavado de pisos	5
Total, de consumo domestico	115

2.3.3. Caudales de diseño

Para determinar el caudal de diseño y selección de las bombas se realiza un análisis entre el caudal medio diario, el caudal máximo diario y el caudal máximo horario.

a. Caudales medio diario (Qm)

Se define como el consumo durante 24 horas, siendo el promedio de los consumos diarios durante un año de registro.

$$qmd = \frac{f \cdot (P \cdot D)}{86400} \quad (8)$$

Donde:

qmd: consumo medio diario

Pf: población futura

D: dotación de agua

f: factor de fugas (20%)

Conociendo todas las variables se procede al cálculo del consumo medio diario.

$$qmd = \frac{0.2 \cdot (1200 \cdot 120)}{86400}$$

$$qmd = 0.33 \left[\frac{l}{s} \right]$$

b. Caudal máximo diario

Este caudal está definido por la siguiente ecuación:

$$q_{\max d} = 1.3 \cdot Qm \quad (9)$$

$$q_{\max d} = 1.3 \cdot (0.33) \left[\frac{l}{s} \right]$$

$$q_{\max d} = 0.43 \left[\frac{l}{d} \right]$$

c. Caudal máximo horario

Este caudal está definido por la siguiente ecuación:

$$q_{\max h} = 2 \times (0.33) \left[\frac{l}{s} \right] \quad (10)$$

$$q_{max h} = 0.66 \left[\frac{l}{h} \right]$$

$$q_{max h} = 4.33 \times 10^{-4} \left[\frac{m^3}{s} \right]$$

El caudal máximo diario, sirve para el esbozo de la captación y el ducto de conducción al tanque de almacenamiento. Para el diseño del aductor y el sistema de distribución se usa el caudal máximo horario, por lo cual a partir de este punto 0.66 l/h (57.6 m³/h) será el factor de diseño del sistema para la Junta de Agua Potable y Saneamiento Cuendina ubicada en el barrio Cuendina, Quito-Ecuador.

Tabla 10. Factores de planeamiento para diseño de sistemas de agua potable.

Factor	Valor
Población final (Pf)	1200
Consumo (m ³ /hab d)	0.12
Caudal medio diario (m ³ /h)	28.8
Caudal máximo diario (m ³ /s)	4.33X10 ⁻⁴
Caudal máximo horario (m ³ /h)	57.6

2.3.4. Dimensionamiento de tubería para línea de succión

Los sistemas de bombeo están compuestos por una tubería de succión y una tubería de descarga. Con el uso de la siguiente ecuación se calcula el diámetro inicial de la tubería.

$$Q = v \cdot A \quad (11)$$

$$A = \pi Dh^4$$

$$Dh = \left[4 \cdot \left(\frac{Q}{v \cdot \pi} \right) \right]^{0.5}$$

Donde:

Dh: diámetro hidráulico en mm

Q: caudal en m³/s

V: velocidad recomendada en succión en m/s

En la zona de succión para la selección de una tubería que sea apta para el caudal, es necesario saber que la velocidad recomendada para esta operación sea de 1 m/s, de esta manera en un diseño inicial se obtiene:

Datos

$$Q = 60 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right] \rightarrow 0.016 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right]$$

$$v = 1 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$$

$$Dh = \left(4 \cdot \left(\frac{0.016 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right]}{1 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right] \cdot \pi} \right) \right)^{0.5}$$
$$D_h = 0.147 [\text{m}] \rightarrow 147.1 [\text{mm}]$$

El diámetro hidráulico que se obtiene es 147.1 mm, con el cual hay que verificar ese dato en las tablas de tubería de acero cédula 40. Si no se encuentra el diámetro exacto, este debe ser aproximado a un diámetro mayor, el cual se indica que es de 154.1 mm el cual equivale a un tubo de 6 pulgadas.

Para comprobar si las tuberías elegidas son las correctas se debe verificar con el análisis de velocidades, utilizando la ecuación 11 y despejando la velocidad.

$$v = \frac{Q}{A}$$

Datos

$$Q = 60 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right] \rightarrow 0.016 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right]$$

Tubería de 6 plg cédula 40

$$A = 1.864 \times 10^{-2} [\text{m}^2]$$

$$v = \frac{0.016 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right]}{1.864 \times 10^{-2} \left[\text{m}^2 \right]}$$

$$v = 0.91 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$$

La tubería seleccionada para la línea de succión tendrá una velocidad de 0.91 m/s.

a. Dimensionamiento del diámetro de descarga usando un diámetro económico.

Uno de los parámetros para que funcione correctamente un sistema de bombeo, es el diámetro de la tubería, en ello se analizan las variables de costos, cavitación y velocidad, con el fin de buscar un diámetro económico para la conducción, en definitiva, será aquel que haga un costo combinado anual de la tubería y a su vez el bombeo sea óptimo.

Existen varios autores que describen los cálculos para un diámetro económico, en este caso se usara la fórmula de Agüera, en el cual se consideran los siguientes factores:

- Factor de fricción en el material
- Rendimiento de la bomba
- Factor de amortización
- El valor actualizado de la energía eléctrica a pagar en t cantidad de años por vida útil de la instalación (basado en los costos de las planillas eléctricas de la EEQ)
- Número de horas de funcionamiento anual.
- Costo de la tubería
- Caudal

$$D = 1,165 \left[\frac{f}{\eta_g} \left(0,5 + \frac{pn}{ca} \right) \right]^{0,154} Q^{0,462} \quad (12)$$

Donde:

D: diámetro económico en mm

Q: caudal en m³/s

n: horas de funcionamiento anual

f: factor de fricción (ver anexo D)

a: factor de amortización.

ηg: rendimiento total en % (como se muestra en la sección 2.3.1)

p: precio de kWh en usd (costos actuales de energía EEQ)

- Factor de amortización

$$a = \frac{(1+r)^{20} \cdot r}{(1+r)^{20} - 1}$$
$$a = 0.1091$$

r: interes real del dinero

a: factor de amortización

Este método comprueba que tubería posee los factores costo-rendimiento, para que no exista un gasto excesivo y su vez realice su funcionamiento de forma correcta.

La tabla 11 muestra los factores que se va a considerar para el diseño.

Tabla 11. Factores para el procesamiento de datos de Agüera en descarga.

Factor	Valor
Caudal (m ³ /s)	0.016
Horas de funcionamiento anual	5475
Factor de fricción	0.002
Rendimiento total (%)	0.65
Precio (usd)	0.912
Costo de la tubería (Usd/m*m)	13.81
Factor de amortización	0.1091

Reemplazando los datos obtenemos en la línea de descarga el siguiente diámetro de tubería:

$$D_h = 1.165 \left[\frac{0.002}{0.65} \left(0.5 + \frac{0.912 [\text{usd}] \cdot 5475 [\text{h}]}{13.81 \left[\frac{\text{Usd}}{\text{m} \cdot \text{m}} \right] \cdot (0.1091)} \right) \right]^{0.154} \cdot 0.016^{0.462} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right]$$

$$D_h = 154.1 \text{ mm}$$

Este diámetro resulta ser el apropiado para la línea de descarga, este valor se debe aproximar al dato más cercano de la tabla de selección de tuberías cédula 40, por lo cual el diámetro es de 154.1 mm y equivale a una tubería de 6 pulgadas. Esto se puede comprobar en la tabla de tuberías cedula 40 que se encuentra en el Anexo A

Para comprobar si la tubería seleccionada es la correcta se debe verificar su velocidad con la ecuación 11.

$$v = \frac{Q}{A}$$

Por lo tanto, en la línea de descarga se obtiene una velocidad de:

$$Q = 60 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right] \rightarrow 0.016 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right]$$

$$A = 1.864 \times 10^{-2} \left[\text{m}^2 \right]$$

$$v = \frac{0.016 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right]}{1.864 \times 10^{-2} \left[\text{m}^2 \right]}$$

$$v = 0.91 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$$

La velocidad de la tubería corresponde a 0.91 m/s y se encuentra dentro de los parámetros adecuados de funcionamiento.

2.3.5. Elección de tuberías para la implementación

En el diseño de redes de tubería que trabajan a presión se toma en cuenta las características que va a tener el diseño fundamentalmente, la clase de fluido, la temperatura y la presión que se va a manejar, en este caso los parámetros son una presión de 0,71 bar y 19°C

Guevara D. [21], realizó un estudio de tubería en el cual menciona que para la selección de la tubería se maneja un “Piping Class” el cual contiene características de la tubería y sus accesorios, además los parámetros físicos de presión y la temperatura que esta puede manejar, además si la misma puede ser instalada con accesorios de bridas soldadas o uniones roscadas. De acuerdo con las características que se encuentre en el “Piping Class” del anexo G se puede realizar un diseño tanto de la tubería como de la instrumentación que se puede aplicar en el sistema.

Como se muestra en el anexo G, este “Piping Class” es aplicable para sistemas de aire y sistemas de agua, por su presión máxima de 18.5 bar (268.3 psig) y una temperatura máxima de 75 °C (167°F). Para el diseño del sistema de bombeo de agua potable del barrio Cuendina en la ciudad de Quito, se trabajará con una presión de 0.73 bar (10.63 psi) y 19 °C, estos parámetros están dentro de las tolerancias permitidas para esta clase.

a. Codificación de líneas de tubería

La codificación de las líneas de tubería sirve para una fácil identificación de estas durante la fase de diseño-construcción y rediseño. Los nombres que se establecen no poseen codificaciones universales, estas dependen de cada proyecto. La estructura de codificación se indica en la Figura 19.

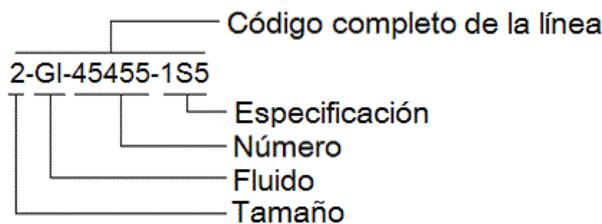


Figura 19. Composición de partes que conforman la codificación de líneas de tubería [22].

La codificación se divide en cinco componentes, el primero es el tamaño de la tubería en pulgadas, el segundo corresponde al tipo de fluido que se conduce por la línea, el tercero se refiere al número de línea y por último se encuentra la especificación de la línea esta se coloca de acuerdo al piping class, que se esta manejando.

b. Líneas de tubería para succión y descarga

La Figura 20 contiene el modelo con el nombre de las líneas y la geometría en general que se va a implementar en el sistema de bombeo de acuerdo con los cálculos que se

realizaron para la selección de la bomba y tuberías. En la parte de los anexos se encontrarán los planos isométricos constructivos para el sistema.

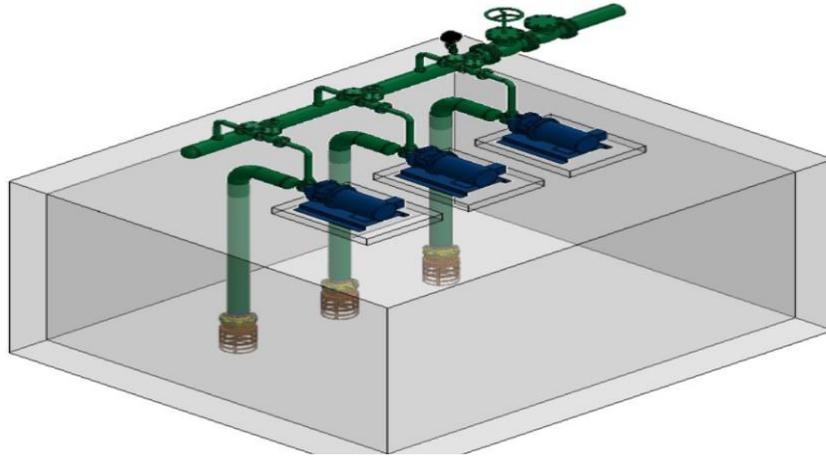


Figura 20. Modelo de rediseño para el servicio de agua potable del barrio Cuendina en la ciudad de Quito.

c. Codificación de líneas de tubería para las líneas de succión y descarga

Se ha codificado las líneas de tubería de acuerdo con el servicio el cual corresponde a agua potable, como se muestra en el piping class “Potable Water”. Por lo cual la etiqueta será PW (potable water).

La Figura 21 se muestra el piping layout del sistema de bombeo de agua rediseñado, en este se observa todos los elementos que constituyen la configuración implementada.

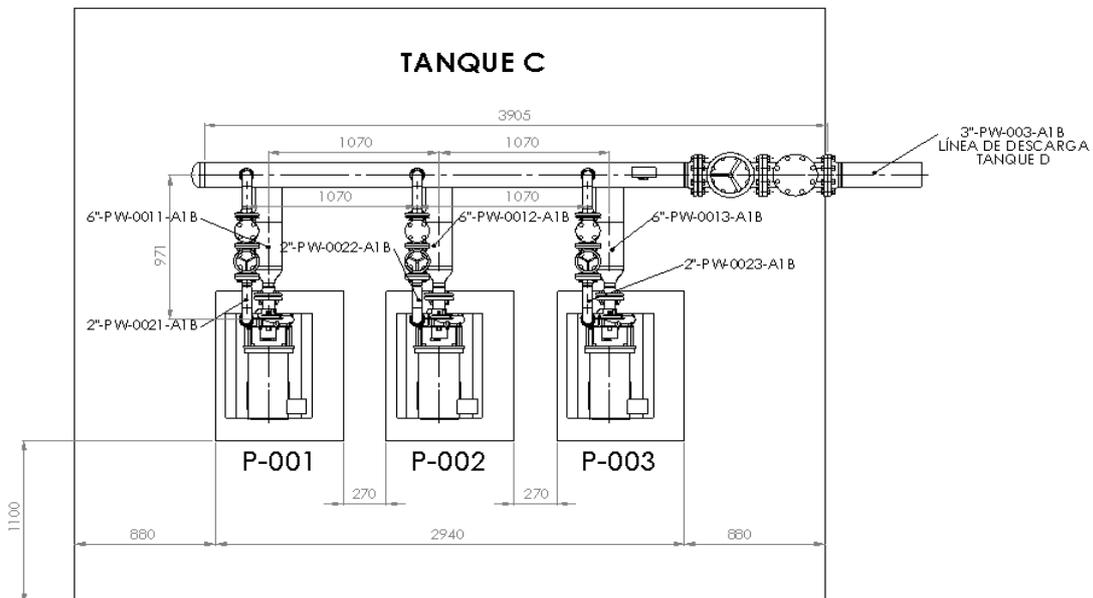


Figura 21. Vista en planta del sistema de agua potable del barrio Cuendina.

En la Tabla 13,14,15 y 16 se observan la codificación de las tuberías, el tamaño y la cantidad de accesorios que se encuentra en el rediseño.

Tabla 12. Codificación de líneas de tubería del sistema de agua potable del barrio Cuendina.

Servicio	Tamaño	Fluido	Número	Especificación	Cod. Completo
Succión	6"	PW	0010	A1B	6"-PW-0010-A1B
Descarga	2"	PW	0020	A1B	2"-PW-0020-A1B
Descarga	6"	PW	0030	A1B	6"-PW-0030-A1B

- Línea 6"-PW-0011-A1B/6"-PW-0012-A1B/6"-PW-0013-A1B

Estas líneas corresponden a las líneas de succión del sistema, las cuales se encuentran conectadas al punto de succión de la bomba centrífuga. Se encuentran conformadas por los siguientes elementos:

Tabla 13. Lista de materiales para línea de succión.

N.º de elemento	Descripción	ND	Cantidad
Tubería			
1	Tubo, sin costura, gr b, be, a-106, SCH 40 (estándar), ANSI B36.10	2-1/2"	182.5mm
2	Tubo, sin costura, GR B, A-106, SCH 40 (estándar), ANSI B36.10	6"	2060mm
Accesorios			
4	Reductor excéntrico, SCH 40(STD), MSS-SP95	6"x2-1/2"	8
5	Codo LR, SCH 40(STD), ASME B16.9, A193	6"	1
Bridas			
6	Brida WN, SCH 40, 150 LB, A105, RF, ASME B16.5	2-1/2"	2
7	Brida WN, SCH 40, 150 LB, A105, RF, ASME B16.5	6"	1
Espárragos y empaques			

8	Espárrago, A193 B7 recubierto de fluoro carbonado, con 2 tuercas A194 GR2H tuercas hexagonales pesados y arandelas	5/8"x90mm	4
9	Espárrago, A193 B7 recubierto de fluoro carbonado, con 2 tuercas A194 GR2H tuercas hexagonales pesados y arandelas	3/4"x100 mm	
10	Empaque 150# RF, ANILLO 1/8", 304SS Enrollado en espiral, material de relleno (flexible grafito FG) con CS Anillo exterior	2-1/2"	2
11	Empaque 150# RF, ANILLO 1/8", 304SS Enrollado en espiral, material de relleno (flexible grafito FG) con CS anillo exterior	6"	2

Válvulas

12	Válvula de pie de compuerta con canastilla ANSI 150#, RF	6"	1
----	----------------------------------------------------------	----	---

La configuración de esta línea trabaja con un flujo turbulento, cambiando de sección mediante una reducción excéntrica que conecta la tubería a la bomba. Por su geometría evita la acumulación de burbujas de agua en la zona de reducción para que no se produzca el efecto de cavitación.

Las pérdidas de energía producidas en esta línea corresponden a 0.33 m, siendo los accesorios los elementos que producen mayor pérdida.

- Línea 2"-PW-0011-A1B/ 2"-PW-0012-A1B/ 2"-PW-0013-A1B

Las líneas de 2 pulgadas sirven para interconectar la boca de descarga de la bomba y la línea principal denominada 6"-PW-0010-A1B, que conduce el fluido hasta el tanque final. La Tabla 15 muestra todos los componentes de la línea de interconexión, por la válvula de globo que se instala, se puede controlar el flujo hacia la línea de alta hacia el tanque D.

Tabla 14. Lista de materiales de línea de interconexión 2"-PW-0010-A1B

N.º de elemento	Descripción	ND	Cantidad
1	Tubo, sin costura, GR B, BE, A-106, SCH 40 (estándar), ANSI B36.10	2"	814 mm
2	Union universal, 3000LB, FPT, MSS-SP-83	2"	1

3	Boquilla, A106 GRB sin costura, 160 B36.10 PLXTHD	2"	1
4	Codo 90LR, SCH 40, BW, A-234 GR WPB, ASME B16.9	2"	2
5	Brida WN, SCH 40, 150 LB, A105, RF, ASME B16.5	2"	2
6	Espárrago, A193-B7 recubierto de fluoro carbonado, con 2 tuercas A194 gr2h tuercas hexagonales pesados y arandelas	5/8"x85m m	12
7	Empaque 150# RF, anillo 1/8", 304SS enrollado en espiral, material de relleno (flexible grafito FG) con CS anillo exterior	2"	3
8	Válvula de globo (ASME B16.34), extremo con brida, clase 150, NPS 6, RF	2"	1
9	Válvula de retención de oscilación (ASME B16.34), extremo con brida, clase 150, NPS 6, RF	2"	1

- Línea de descarga 6"-PW-0010-A1B

La línea de descarga 6"-PW-0001-A1B se conectará a la tubería existente que se conduce al tanque D, su configuración asimila un manifold de tres entradas a la cual se conectan las tres bombas del sistema.

En la zona de conexión al ducto de ascenso al tanque D se instala una válvula de globo que controla el flujo del fluido y una válvula check que evita el retorno del fluido en el caso de que los equipos estén fuera de funcionamiento.

También, se coloca un manómetro analógico, para mantener un control del nivel de presión que sale a la línea principal del sistema.

Tabla 15. Lista de materiales para la línea de descarga 6"-PW-0001-A1B

N.º de elemento	Descripción	ND	Cantidad
1	Tubo, sin costura, GR B, BE, A-106, SCH 40 (estándar), ANSI B36.10	6"	3500mm
2	Tapa, A234 GR WPB, 40 (estándar) B16.9, BW	6"	1
3	Socketweld, A105, 3000#, MSS -SP97, SW	6"x2"	3
4	Threadolet, A105, 3000#, MSS -SP97, SW	6"x1"	1

5	Niple, A106 GRB sin costura, 160 B36.10 PLXTHD	1"	1
6	Brida WN, SCH 40, 150 LB, A105, RF, ASME B16.5	6"	2
7	Espárrago, A193 B7 recubierto de fluoro carbonado, con 2 w/u a194 gr2h tuercas hexagonales pesados y arandelas	3/4"x100m m	24
8	Empaque 150# RF, anillo 1/8", 304SS enrollado en espiral, material de relleno (flexible grafito FG) con anillo exterior	6"	3
9	Válvula de globo (ASME B16.34), extremo con brida, clase 150, NPS 6, RF	6"	1
10	Válvula de retención de oscilación (ASME B16.34), extremo con brida, clase 150, NPS 6, RF	6"	1
11	Válvula de bola, 800#, THDF, cuerpo dividido, cuerpo ASTM A105, a prueba de fuego, API 607, vástago diseño a prueba de explosión AISI 316, asiento blando teflón, bola ANSI 316-empaque tipo flotante, operado por palanca de manejo, puerto regular.	1"	1

A continuación, se procede a calcular las pérdidas del sistema rediseñado y los datos para calcular se encuentran en los Anexos D y E.

2.3.6 Pérdidas mayores

En las pérdidas mayores se toma en cuenta factores tanto de la tubería, como del flujo que se encuentra durante la circulación de agua al interior de la línea, como ya se calculó en la sección anterior. La medida de longitud se la muestra en el Anexo F (plano de tubería de succión)

$$h_L = 0.019 \cdot \frac{3.073[m]}{0.1023[m]} \cdot \frac{0.91^2 \left[\frac{m^2}{s^2} \right]}{2(9.81) \left[\frac{m}{s^2} \right]}$$

$$h_L = 0.01574[m]$$

a. Pérdidas menores

En las pérdidas menores se toma en cuenta todos los accesorios que se encuentra en el sistema de succión.

En este caso se encuentran: codos estándar a 90° y una válvula de pie

Utilizando la ecuación 3 se define el factor como:

$$h_{L_{\text{menores}}} = 7.65 \cdot \frac{0.91^2 \left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} \right]}{2(9.81) \left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right]}$$

$$h_{L_{\text{menores}}} = 0.3229 [\text{m}]$$

Tabla 16. Resumen de pérdidas totales en tuberías de succión

Descripción	Número de Reynolds	Factor de fricción	Pérdidas mayores (m)	Pérdidas menores (m)	Pérdidas totales (m)
BOMBA1	137068.93	0.019	0.01574	0.3229	0.3386

2.3.6. Altura manométrica

Para determinar la altura manométrica del sistema a rediseñar, se toma en cuenta el valor a obtener de la fórmula de Hazen-Williams, el cual toma a consideración el nuevo caudal rediseñado además de otros parámetros importantes que se mencionaran en la Tabla 17.

Además de ello se requiere de la geometría rediseñada del sistema de bombeo que se encuentran en el anexo F.

Tabla 17. Variables para Hazen- Williams.

Factor	Valor
Caudal (m ³ /h)	60
Longitud de la tubería (m)	800
Constante de Hazen-Williams (C)	130

Estas variables ayudan a la obtención de las pérdidas de carga del sistema con el método de Hazen-Williams utilizando la ecuación 6, en dónde su resultado es:

$$h_f = \frac{10.67}{(130)^{1.852}} \cdot \frac{800[m]}{(0.154)^{4.87} [m]} \cdot (0.017)^{1.852} \left[\frac{m^3}{s} \right]$$

$$h_f = 4.95[m]$$

Con el dato obtenido, se calcula la altura manométrica de la siguiente manera.

$$Hm = Hg + hf \tag{13}$$

Donde:

Hg: altura geométrica

Hm: altura manométrica

hf: pérdidas de carga

$$Hm = 77.83[m] + 4.95[m]$$

$$Hm = 82.78[m]$$

2.3.7. Selección de bomba centrífuga

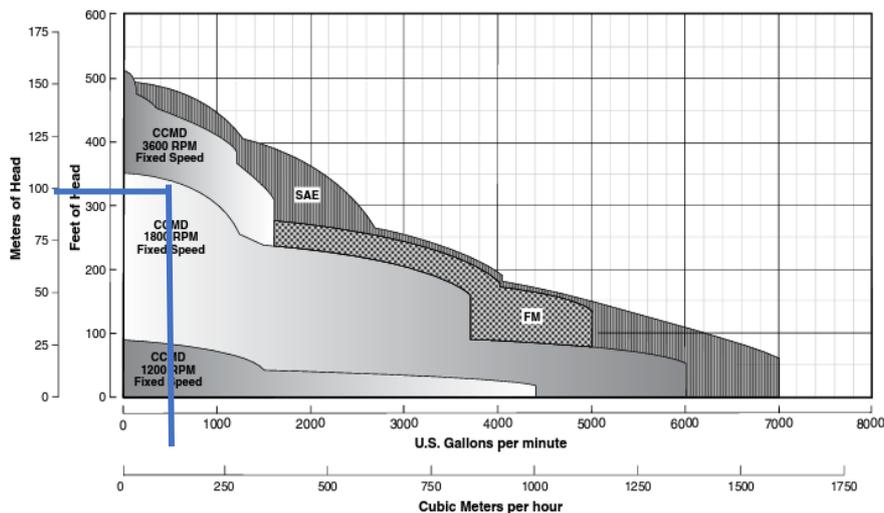


Figura 22. Curva de selección para bomba BERKELEY.

En la Figura 22, se puede apreciar la curva de selección para bombas BERKELEY Tipo B, de esta manera para el caso del rediseño se utilizará una bomba de la misma marca, de la que ya se encuentra instalada esto debido a que esta es una de las más comerciales en el mercado nacional. Con los datos obtenidos como son el caudal de diseño 60 m³/h y 83

m de columna de agua, en la sección anterior se debe trabajar con la bomba CCMD 1800 RPM FIXED SPEED.

a. NPSH disponible

Como se realizó en la sección anterior aquí se calculará un nuevo $NPSH_d$ para las características de diseño actual. La propiedad del agua se muestra en el Anexo B y la geometría del rediseño en el Anexo F.

$$NPSH_d = -0.6[m] + \frac{0.71[bar] - 0.021[bar]}{998.4 \left[\frac{kg}{m^3} \right] \cdot 9.81 \left[\frac{m}{s^2} \right]} \cdot 10^5 - 0.337$$

$$NPSH_d = 6.045[m]$$

En la Figura 23 se muestra las alturas correspondientes para el cálculo del $NPSH_d$, para el rediseño del sistema.

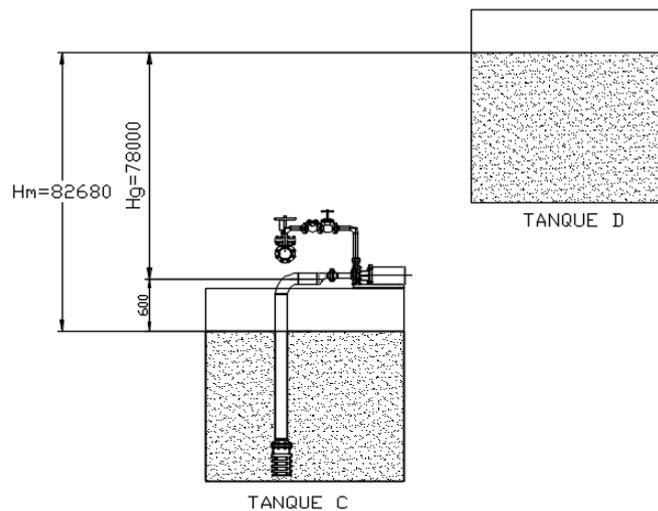


Figura 23. Diagrama de tubería de succión para cálculo de $NPSH_d$.

En la Figura 24, se aprecia la curva de $NPSH_r$ para la selección de la bomba esto se hace como el primer análisis por la cavitación que podría existir en la bomba seleccionada. En el cálculo del $NPSH_d$ se obtuvo un valor de 6.045 m, en la Figura 24 haciendo un análisis rápido se puede apreciar que la bomba se encuentra sobre la curva de la gráfica y cumple el primer parámetro de selección [22].

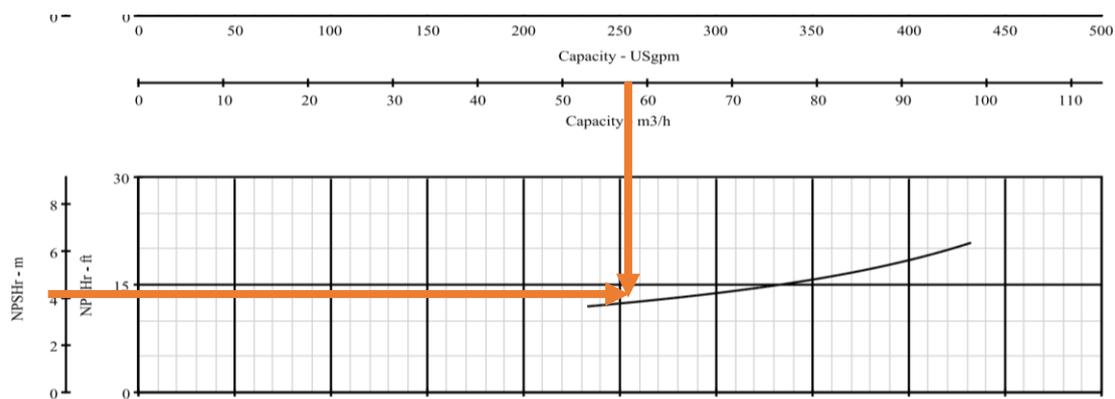


Figura 24. NPSHr para bomba BERKELEY.

Y se procede a realizar la comparación entre el NPSH disponible y el requerido como se muestra a continuación:

$$NPSH_d \geq NPSH_r$$

$$6.045 \geq 4.5$$

El segundo de parámetro de selección es verificar si la bomba está dentro de la altura manométrica requerida en este caso se necesita un valor que sobrepase los 82,78 m, como se puede observar en la Figura 25. Para una mejor observación se ha reflejado una curva de Caudal vs Altura geométrica del equipo, en donde se puede apreciar el punto de trabajo entre la curva característica y la curva de resistencia del sistema, de esta manera la bomba trabajara con un caudal máximo de 65.7 m³/h y 88.80 m de altura manométrica.

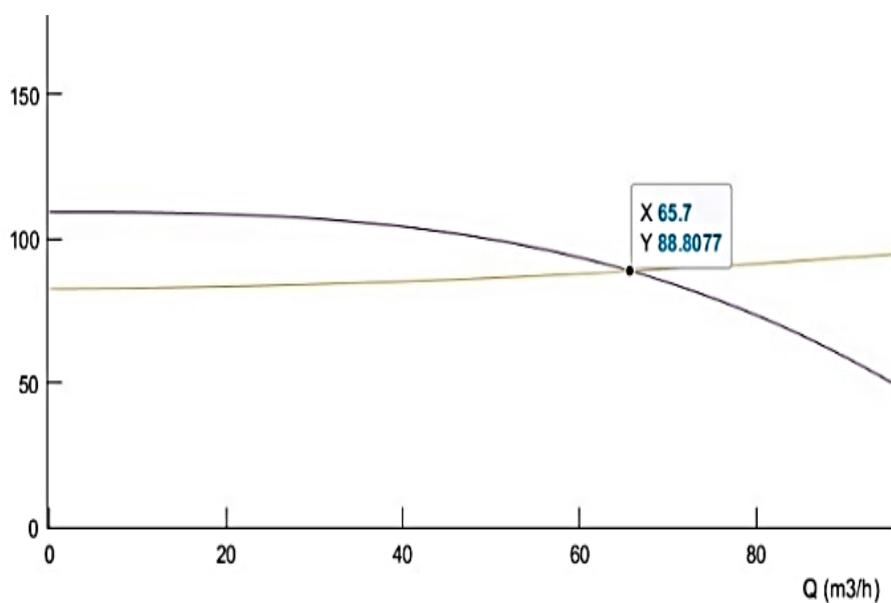


Figura 25 . Curva característica- Curva de resistencia, para la bomba: 2-1/2x9H, modelo: B2ZPH.

b. Potencia teórica de la bomba

Para la comprobación de la selección y la obtención de la eficiencia del equipo se calcula una potencia teórica, medida en Watts o HP, con la siguiente ecuación:

$$P_B = H_B \cdot \gamma_{fluido} \cdot Q \quad (14)$$

$$P_B = 14577.12[\text{W}]$$

La potencia teórica de la bomba es 14577.12 W.

c. Eficiencia mecánica

En la siguiente ecuación se muestra la fórmula para la obtención de la eficiencia mecánica que la bomba va a trabajar:

$$\eta = \frac{P_A}{P_r} \quad (15)$$

Donde:

P_A : potencia teórica de la bomba

P_r : potencia a la entrada de la bomba

η : eficiencia

$$\eta = \frac{14577.12[\text{W}]}{22400[\text{W}]}$$
$$\eta = 0.65$$

Para este caso la potencia real que va a ser transmitida al fluido por parte de la bomba es 22400 W, por lo tanto, se obtendrá una eficiencia del 65 % que de acuerdo con la Figura 22 presenta el punto de trabajo, la misma se encuentra en los rangos teóricos establecidos por el fabricante.

d. Potencia del motor

El cálculo de la potencia del motor es una relación entre la potencia de la bomba y un factor de 0.9 como se muestra en la ecuación 16.

$$P_M = \frac{P_B}{0,9} \quad (16)$$

$$P_M = 16.19 \text{ kW}$$

Donde:

P_M : potencia del motor

P_B : potencia de la bomba kW

La potencia requerida en el motor para esta bomba es 16.17 kW.

e. Tabla consolidada de lista de materiales adicionales necesaria para el rediseño

A continuación, se detalla una lista de materiales y accesorios para la fabricación de las líneas de tubería, la cual se detalla en la Tabla 19.

Tabla 18 . Lista de materiales adicionales para rediseño de sistema de bombeo de agua potable del barrio Cuendina ubicado en la Ciudad de Quito-Ecuador.

ID	DESCRIPCIÓN	ND	CTD
TUBOS			
1	TUBERÍA, SIN COSTURA, GR B, BE, A-106, SCH 40(STD), ANSI B36.10	6"	19,5m
2	TUBERÍA, TIPO S-GALVANIZADA, GR B, BE, A-53, SCH 80(XS), ANSI B36.10	2"	9m
3	PIPE, SEAMLESS, GR B, A-106, SCH 40(STD), ANSI B36.10	2 ^{1/2} "	0,6m
ACCESORIOS			
4	ELBOW 90 LR, A234 Gr WPB SCH 40 B16.9 BW	6"	9
5	REDUCER (ECC), A234 Gr WPB SCH STD B16.9 BW	6 x 2 ^{1/2}	6

6	REDUCER (CONC), A234 Gr WPB SCH STD B16.9 BW	6"	3
7	ELBOW 90 LR, A234 Gr WPB SCH 40 B16.9 BW	2 ½"	6
8	FLANGE RF, WN A105, 150# B16.5, STD	6"	6
9	FLANGE RF, WN A105, 150# B16.5, STD	2 ½"	18

VÁLVULAS

10	CHECK VALVE SWING 150 LB RF ASME B16.10 ASTM A216 GR WPB";	6"	3
11	GATE VALVE DOUBLE DISC 150 LB RF ASME B16.10 ASTM A216 GR WPB HAND WHEEL"	6"	3
12	CHECK VALVE SWING 150 LB RF ASME B16.10 ASTM A216 GR WPB";	2"	6
13	BALL VALVE, 150#, RF, ASME B16.10 ASTM A216 WPB	2"	6

EQUIPOS

14	BOMBA CENTRIFUGA, BARKELEY MODELO: B2ZPH	2X2- 1/2	3
----	------------------------------------------	-------------	---

CAPÍTULO III

SIMULACIÓN DE FLUIDOS Y FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE BOMBEO DE AGUA POTABLE

En el siguiente capítulo se realiza una comprobación mediante la simulación CFD, de los parámetros que debe cumplir la bomba centrífuga y las líneas de tubería para el sistema de bombeo del barrio Cuendina en la ciudad de Quito-Ecuador. Para la simulación se realizará un modelado 3D de la tubería, accesorios y la bomba centrífuga, a continuación, se explicará los pasos que se realizó para la obtención del mallado del volumen del fluido, generado a partir del modelo 3D en el programa “SolidWorks Flow Simulation” y el análisis del estudio que se hizo a partir de las iteraciones generadas mediante el software.

3.1. Bomba centrífuga seleccionada

La bomba centrífuga que se va a utilizar posee un impulsor de 9 pulgadas y 6 álabes, de acuerdo con la curva característica seleccionada este elemento trabaja en 3600 RPM, la temperatura del fluido es 20°C y su presión máxima de aplicación es 266 psi, todo esto se detalla en la Tabla 20.

Tabla 19. Características generales de bomba centrífuga.

Parámetros	Valor
Impulsor (pulg)	9
RPM Nominal	3600
Basado en agua fresca (°C)	20
Presión de trabajo máxima (PSI)	266

La Figura 26 muestra el modelo del equipo para su aplicación en la simulación se procura que esta tenga todos los elementos mecánicos reales de la bomba, pues de esto dependerá los resultados de la simulación del fluido en el equipo.



Figura 26. Modelo bomba centrífuga marca BERKELEY modelo B2ZPH.

3.1.1. Condiciones para simulación

Todo el sistema de bombeo funciona con un caudal de 60 m³/h, mientras que la altura manométrica se ha definido mediante un valor de 90 m de columna de agua. El régimen de velocidad angular que posee la bomba centrífuga queda definido por el motor de 16 kW de potencia y el valor de rotación corresponde a 3600 rpm.

Los valores de la tubería fueron analizados por el método de diámetro económico y método de velocidades. La línea de seis pulgadas cédula 40 será utilizada en la zona de descarga y succión del sistema, también se utilizará una tubería de 2 pulgadas, para la interconexión entre el punto de salida de la bomba y la línea de descarga.

Se considera también que, en las condiciones de presión, están establecidas por la altura sobre el nivel del mar el cual corresponde a 2643 msnm, esto por la ubicación del recinto en donde se instalará el sistema de bombeo, la Tabla 21 se indica estos parámetros.

Tabla 20. Condiciones para el diseño del sistema.

PARÁMETROS	Valor
Caudal (m ³ /h)	60
Altura (m)	90
Régimen de giro (rpm)	3600
Diámetro tubería de succión (mm)	154.1
Diámetro tubería de descarga (mm)	154.1
Diámetro tubería de interconexión (mm)	60.3

3.2. Modelado de simulación con SolidWorks Flow Simulation

SolidWorks Flow Simulation es un subprograma cuyo campo de estudio desarrolla aplicaciones relacionadas con operaciones de válvulas, calefacción, ventilación y equipos rotativos; transferencia de calor y análisis de flujo, la capacidad está dada por el establecimiento del tipo de análisis a realizar.

3.2.1. Pasos para la configuración de simulación de flujo

Para realizar la simulación se debe configurar los parámetros de flujo, volumen y unidades medida para que los resultados sean válidos durante el proceso.

3.2.1.1. Flujo en el interior de la bomba centrífuga

En el cuerpo del impulsor se crea un cuerpo sólido, el cual representa al fluido en el impulsor. Como se observa en la Figura 27 este sólido ocupará todos los espacios entre los álabes del impulsor formando el flujo en el interior de la carcasa.

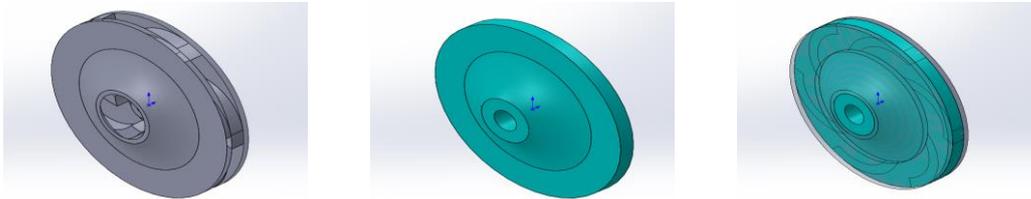


Figura 27. Modelado de flujo de fluido en impulsor de bomba centrífuga.

3.2.1.2. Configuración de volumen en tubería

Para el caso del análisis del conjunto bomba centrífuga-tubería de succión y descarga, se utilizará la herramienta “Wizard”, esta herramienta genera un volumen de control automático, la cual da resultados muy exactos. Este volumen se puede definir después de agregar tapas o “Lids” en la succión y descarga de la tubería como se indica en la siguiente figura.

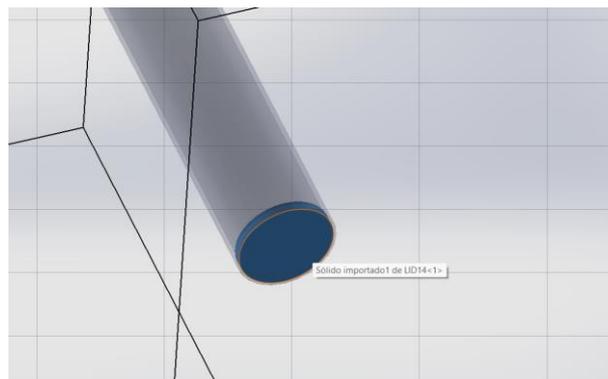


Figura 28. Inserción de LIDS para cierre de tuberías y generación de volumen de flujo.

El software limita los puntos y elementos que se podrán simular el cual se muestra en la Figura 29. Los rangos están establecidos desde la cara de inicio de la línea de succión de 6 pulgadas pasando por el cuerpo de la bomba, hasta el punto final de la línea de descarga.

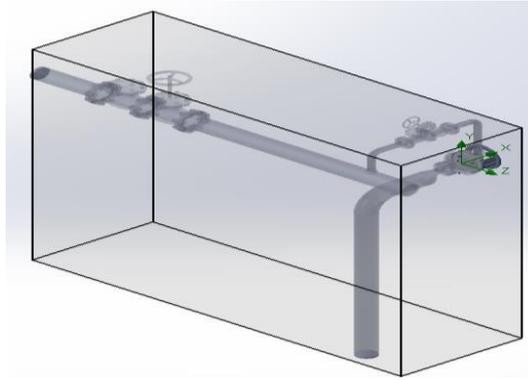


Figura 29. Límites de volumen para simulación de sistema de bombeo.

a. Configuración de parámetros de simulación

El primer paso es crear el proyecto en el cual el sistema reconocerá el volumen del ensamble como se mencionó anteriormente, este debe ser cerrado o finito.

El siguiente paso es configurar el sistema de unidades que se usara para la simulación que se encuentra en la Figura 30, para el caso del sistema de bombeo, se configura la presión (psi), la temperatura en (°C), régimen de giro (RPM) y el flujo másico (m^3/h).



Figura 30. Configuración de unidades Flow simulation.

Después de la configuración de las unidades, se establece el tipo de análisis, que puede ser un análisis de flujo externo o uno de flujo interno, para el sistema de bombeo se realiza un análisis de tipo flujo interno ya que el fluido tiene como recorrido interno. En el

análisis se selecciona la rotación con dependencia del tiempo y rotación de región deslizante.

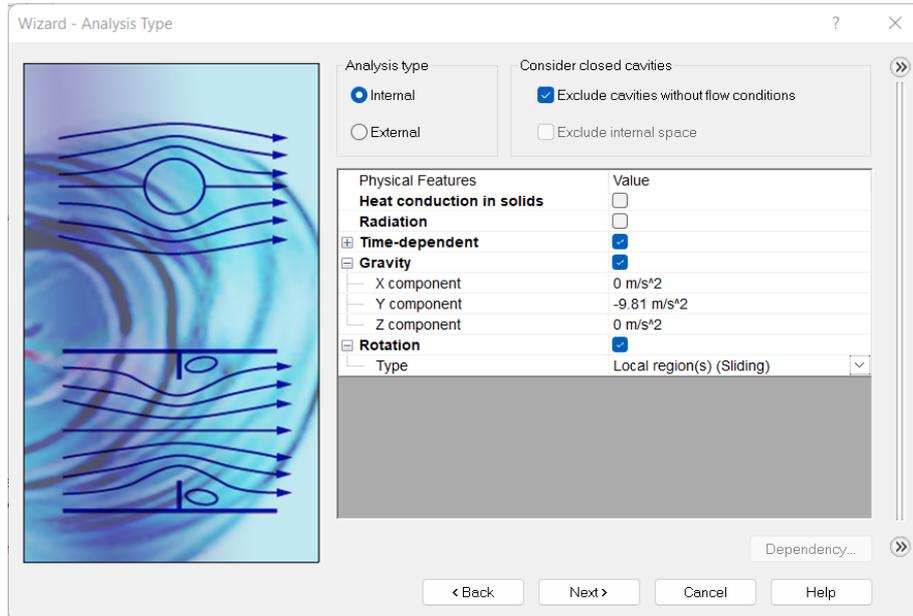


Figura 31. Configuración de tipo de análisis en Flow simulation.

Una vez establecido el tipo de análisis, se selecciona el fluido que se va a estudiar para este caso se utiliza agua y las características de esta. La primera característica que selecciona es el tipo de flujo que puede ser laminar o turbulento, de acuerdo con los cálculos teóricos del número de Reynolds que se encuentran en la Tabla 17, este análisis se debe hacer bajo el parámetro de flujo turbulento, el programa queda configurado para una combinación entre laminar-turbulento.

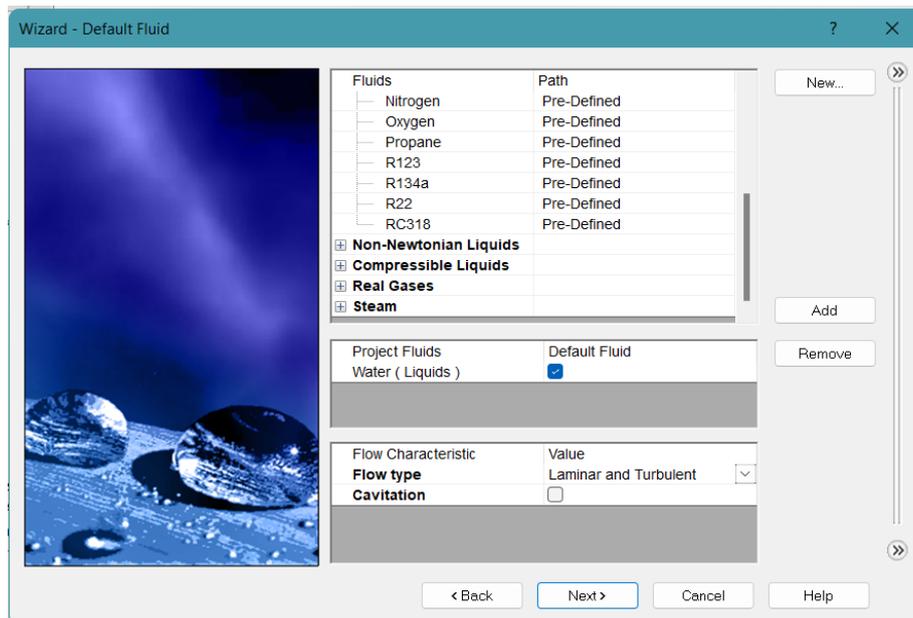


Figura 32. Configuración de tipo de fluido y flujo de fluido.

En las condiciones de entrada y salida, se configura con una tubería lisa y adiabática. Las condiciones iniciales se mantienen por defecto, para un segundo análisis se configura el programa con la rugosidad de la tubería de acero.

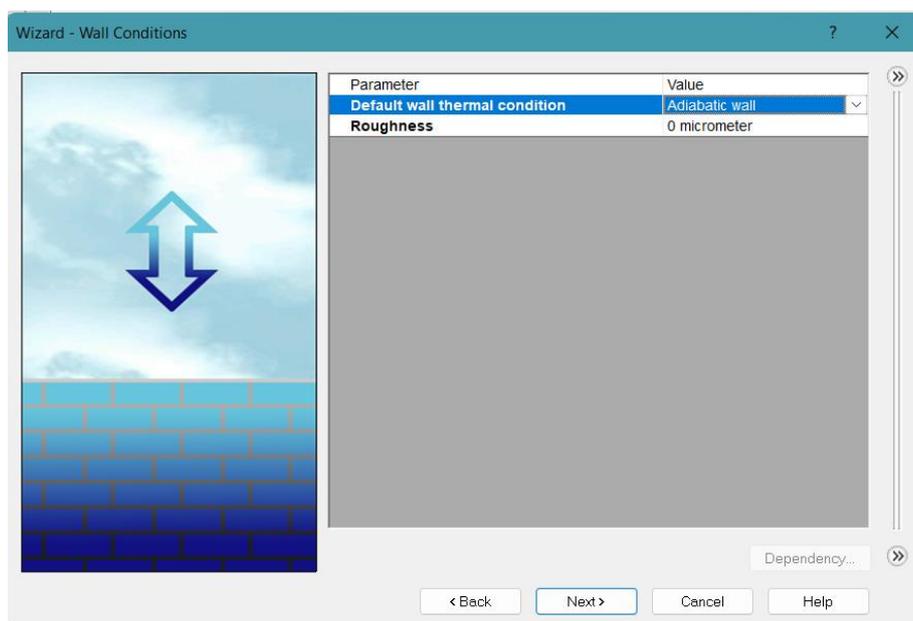


Figura 33. Configuración de paredes de elementos en Flow simulation.

b. Creación de mallado

El mallado del sistema define la precisión de los resultados. De esta manera se ha escogido los siguientes parámetros para la configuración de la malla, el tamaño de la

mallado está dado por la medida mínima que posee la geometría del modelo que es 0.015 m.

La selección del mallado también dependerá de los siguientes factores:

- La dependencia de los resultados según el tipo de mallado, esto quiere decir que mientras más nodos existan en el sistema los resultados serán más precisos.
- El tiempo de computación necesario para el cálculo de los resultados, dependiendo de la geometría de la mallado el proceso de cómputo será más largo.

Debido a estos factores la selección será automática para que el programa configure los parámetros de mallado de acuerdo con la capacidad computacional de la máquina.

c. Parametrización de las variables de estudio

La parametrización de las variables de estudio se realiza en la pestaña denominada “Boundary Conditions” en el cual se establece las condiciones de contorno.

- Outlet Volume Flow, en este punto se establece el caudal esperado en la salida del fluido a la tubería $60 \text{ m}^3/\text{h}$, esto en la cara o tapa de la tubería de descarga.

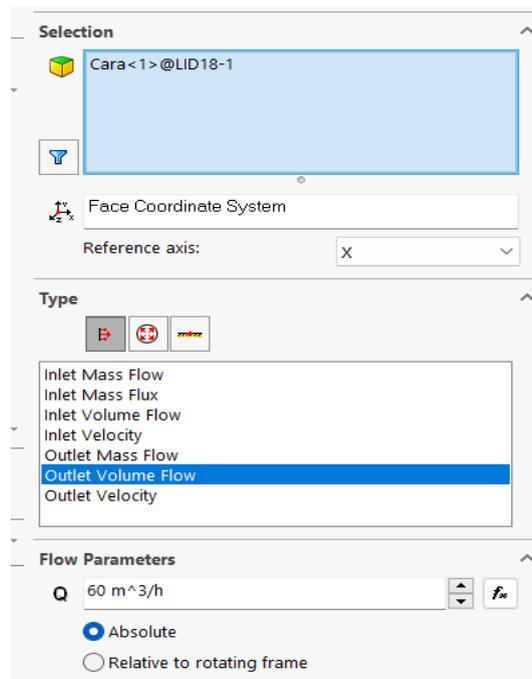


Figura 34. Configuración de volumen de salida para simulación.

- Environment pressure, en este parámetro se selecciona la tapa que se encuentra al inicio de la tubería de succión, con las siguientes condiciones de presión 0,0015 psi y 20 °C de temperatura esto de acuerdo con el punto de análisis y la ubicación geográfica r del sitio donde se va a instalar el sistema de bombeo. En la Figura 35 se muestra una tabla de equivalencias de altura sobre el nivel del mar y presión atmosférica requerida para la selección de tapa en la entrada de la succión.

Altura sobre el nivel del mar		Presión atmosférica (Pa)	
m	ft	m	Pa
0	0	10.33	14.69
250	820	10.03	14.26
500	1640	9.73	13.83
750	2640	9.43	13.41
1000	3280	9.13	12.98
1250	4101	8.83	12.55
1500	4291	8.53	12.13
1750	5741	8.25	11.73
2000	6561	8.00	11.38
2250	73.81	7.75	11.02
2500	8202	7.57	10.68
2750	9022	7.28	10.35
3000	9842	7.05	10.02
3250	10662	6.83	9.71
3500	11483	6.62	9.42
3750	12303	6.41	9.12
4000	13123	6.20	8.82
4250	13943	5.98	8.52
4500	14764	5.78	8.22

Figura 35. Tabla de equivalencias de altura y presión atmosférica.

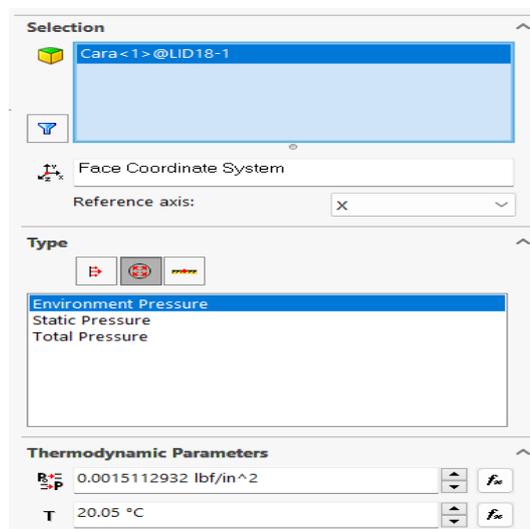


Figura 36. Configuración de presión para simulación.

- Real Wall, en este parámetro se selecciona todas las caras del impulsor excepto la cara de los álabes. Para que el programa reconozca el interior de la voluta y limite los rangos de simulación, también se configura el límite de rotación de la pieza en -3600 RPM. El valor de giro negativo representa la rotación que hace el impulsor de la bomba durante el ejercicio mecánico.

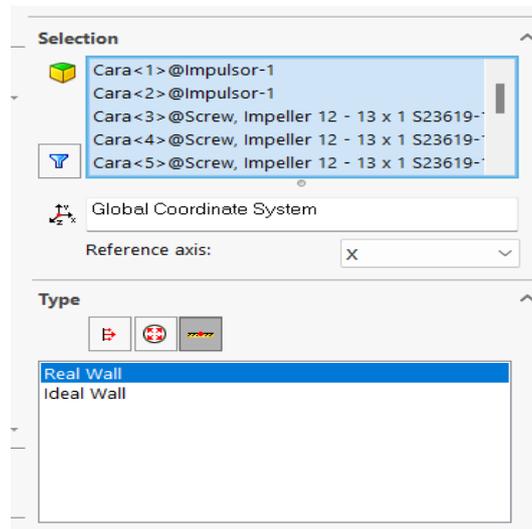


Figura 37. Configuración de parámetros de giro de impulsor para simulación.

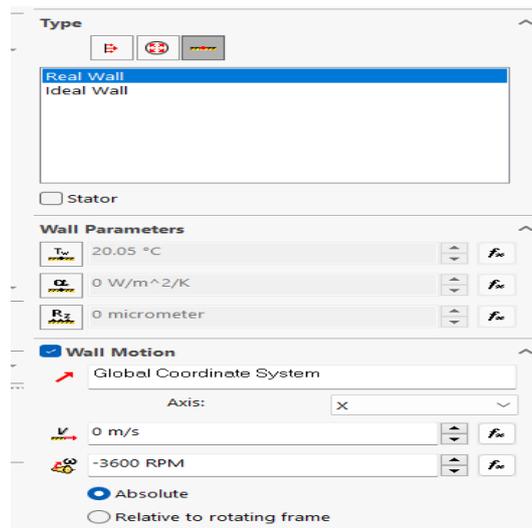


Figura 38. Configuración de parámetros de giro de impulsor para simulación.

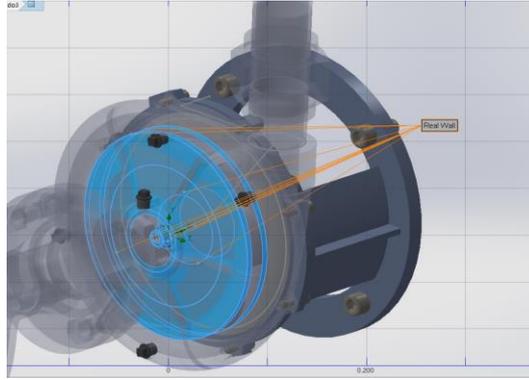


Figura 39. Secciones de impulsor seleccionadas para la configuración de parámetros de giro de simulación.

d. Parametrización de las regiones rotativas de estudio

Para esto se modeló un sólido que representará al flujo del fluido dentro de la carcasa de la bomba y posee los espacios de los álabes del rodete que no se incluyeron en el parámetro anterior. Además, se establece la velocidad angular 3600 RPM del rodete durante el funcionamiento del sistema, para la correcta configuración se coloca el valor negativo para que el programa establezca un régimen de giro en sentido antihorario, sentido en el cual gira el impulsor de la bomba centrífuga.

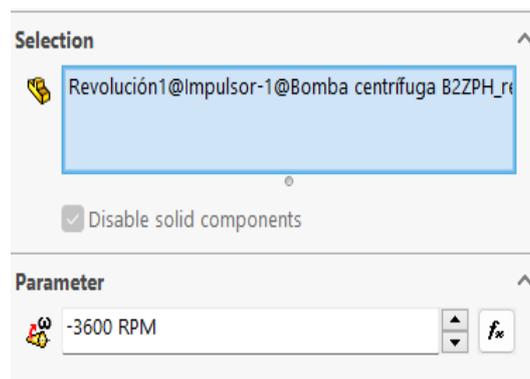


Figura 40. Parametrización de regiones de giro para simulación.

3.2.2. Análisis de simulación de sistema de bombeo

Luego de realizar la simulación se expone los siguientes puntos:

3.2.2.1. Análisis de resultados

Analizando los valores de velocidad, temperatura y presión. Los resultados obtenidos se miden en la línea de alta y la línea de baja del sistema, de acuerdo con los valores obtenidos analíticamente, como se observa en la Tabla 22.

Se ha denominado una trayectoria ideal del fluido en la cual no considerando la fricción del material de la tubería.

Tabla 21. Valores analíticos para interpretación de simulación.

Variable	Valor	Unidad
Velocidad en succión (v_s)	0.91	m/s
Velocidad en descarga (v_d)	0.91	m/s
Presión de entrada (P_{in})	0	Psi
Presión de salida (P_{out})	1.52×10^{-3}	Psi
Temperatura de entrada (T_{in})	18	°C
Temperatura de salida (T_s)	20	°C
Caudal (Q)	60	m ³ /h

a. Análisis de velocidad en bomba centrífuga

Los campos de la velocidad se muestran en la Figura 41, considerando los valores teóricos calculados. En la línea de succión se ilustra una velocidad del fluido de 0.9 m/s hasta el ingreso a la bomba, en esta sección la velocidad varía por los efectos mecánicos que produce el impulsor en el recorrido del fluido por el interior de la bomba hasta la línea de descarga.

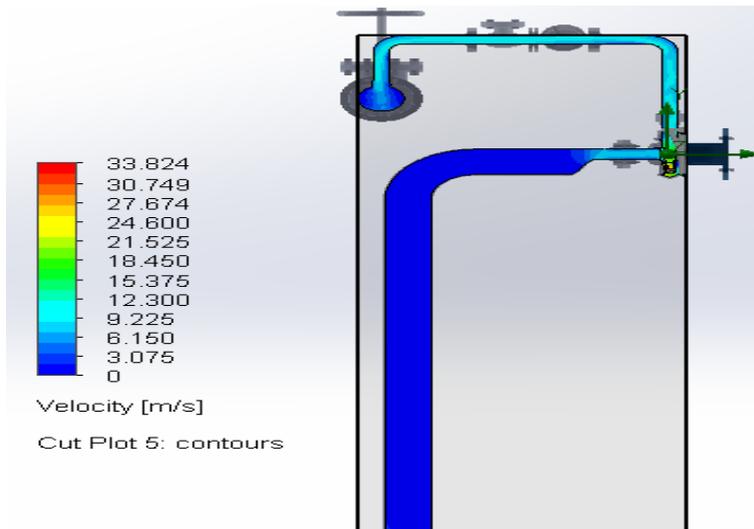


Figura 41. Distribución de presiones y velocidades en tubería de succión 6"-PW-0011-A1B y descarga 2"-PW-0021-A1B/6"-PW-0003-A1B.

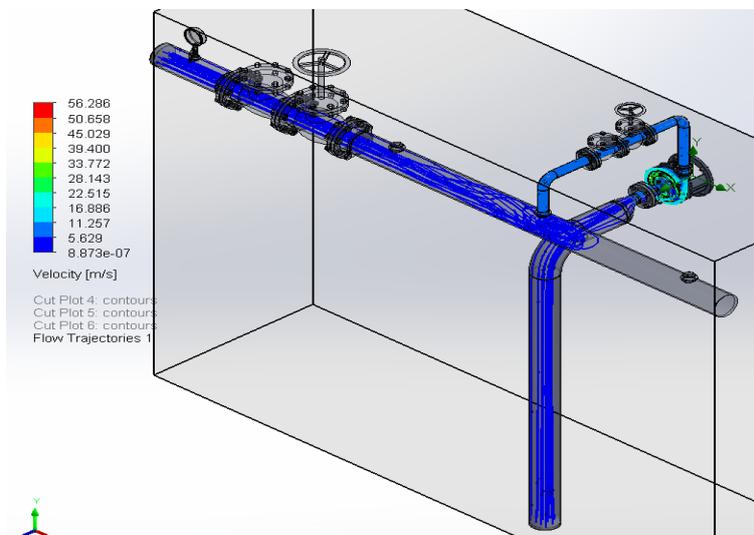


Figura 42. Desarrollo de velocidad sin fricción en el sistema.

La curva de la Figura 43 se aprecia como la velocidad dentro de la tubería permanece constante en 0.9 m/s hasta el cambio de sección que se produce en la reducción excéntrica que conecta con la entrada de aspiración y la tubería. Además, se observa los cambios de velocidad que se producen cuando el fluido está en contacto con el impulsor.

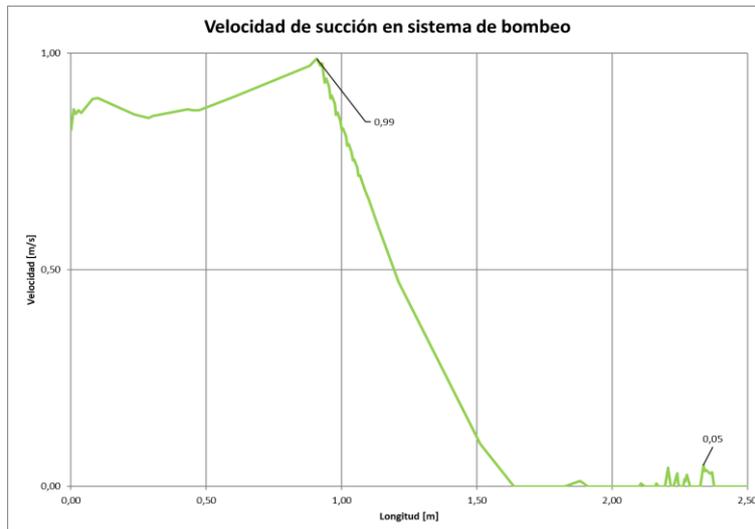


Figura 43. Gráfica de velocidad vs trayectoria de la curva de simulación.

La tubería de descarga está conformada por una tubería de 2" que funciona como interconexión con la línea de 6", esta tubería se usa por el diámetro de la salida de la carcasa de la bomba. En la tubería de 2" se observa un aumento en la velocidad de 7.86 m/s hasta el punto de unión con la línea de 6" y regulándose hasta una velocidad de 0.9 m/s mientras avanza en la tubería desde la derecha hasta la izquierda como se indica en la Figura 44.

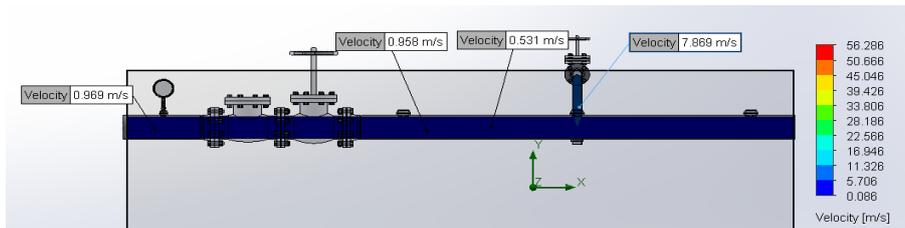


Figura 44. Velocidades para la línea de descarga de la bomba P-002.

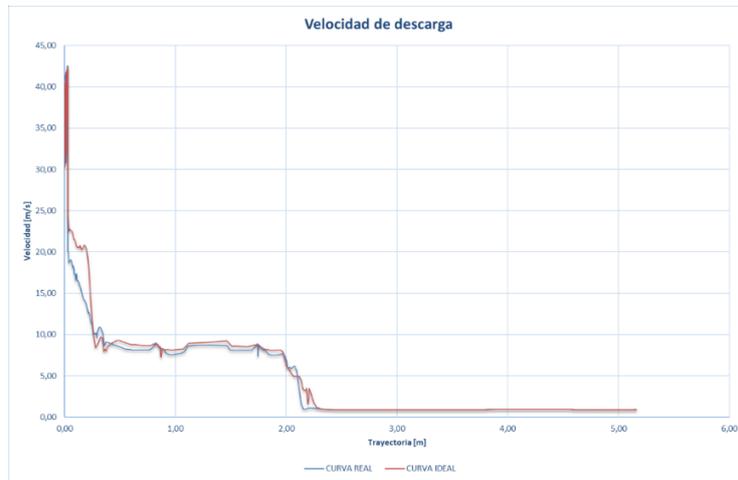


Figura 45. Gráfica velocidad de descarga vs longitud de curva de simulación.

b. Análisis de los valores de presión

La Figura 48 muestra la trayectoria de la presión del sistema, iniciando en un valor de 0,015 psi en la línea de succión y con un aumento de la presión estática hasta el punto final de la tubería.

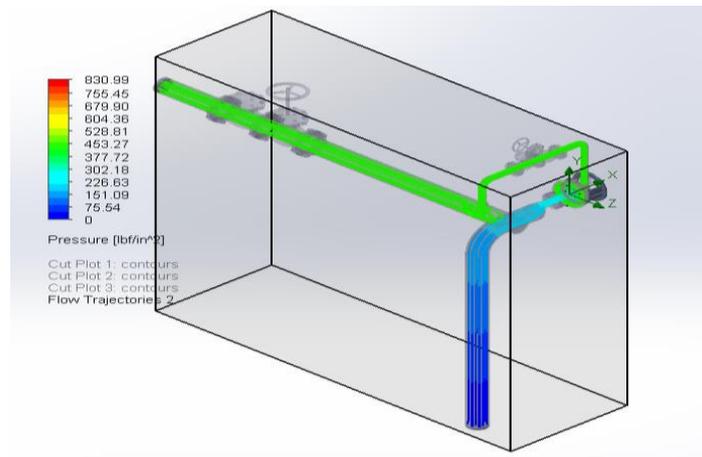


Figura 46. Desarrollo de la presión del sistema.

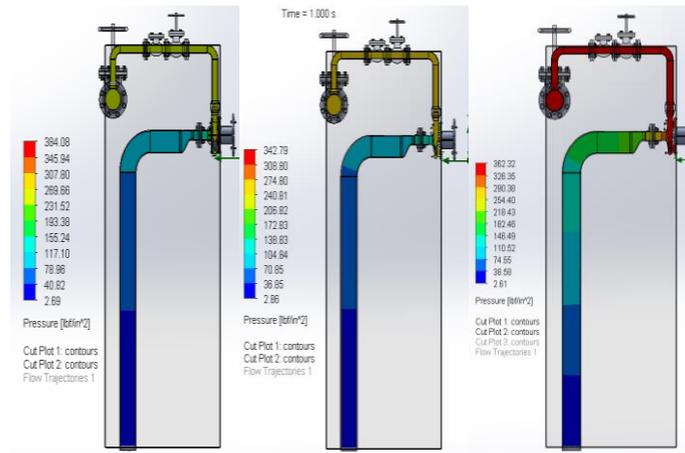


Figura 47. Presión estática en las líneas de succión y descarga.

Con la variación de colores se puede apreciar el aumento de presión que sufre el fluido a partir del contacto con el impulsor de la bomba y los cambios de sección que se producen en la tubería de descarga.

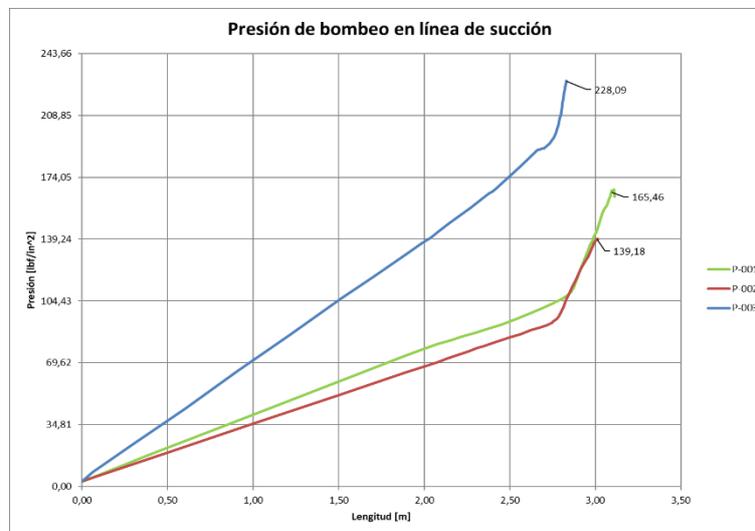


Figura 48. Gráfica presión vs velocidad.

La presión estática dentro de la tubería aumenta en el recorrido del fluido desde la válvula de pie hasta el punto de succión. Este fenómeno se lo interpreta en la Figura 48 donde se aprecia el incremento de los valores de presión conforme el fluido circula por la tubería hasta la entrada de mayor diámetro de la reducción excéntrica en donde la bomba 1 produce una presión 139.2 psi, la bomba 2 una presión de 165.5 psi y la bomba 3 una presión de 228.1 psi. Estas gráficas representan los valores promedio que tendrá la presión en succión debido a que todas las geometrías son similares.

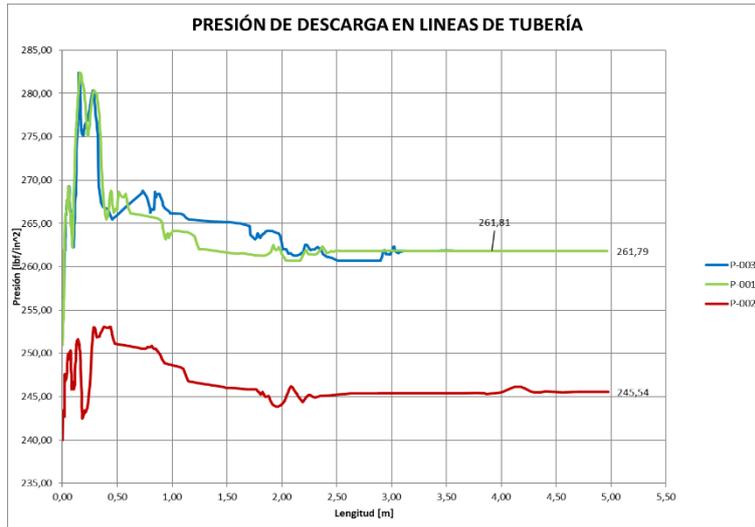


Figura 49. Gráfica presión vs trayectoria en la curva de simulación.

De acuerdo con las simulaciones realizadas se puede apreciar en la Figura 49 la variación de la presión de acuerdo con la posición de la bomba, en la primera bomba se observa una presión de 261.8 psi, en la segunda bomba se observa una presión de 245.5 psi manteniéndose dentro del rango de presión máxima que puede producir este tipo de bomba y la tercera bomba produce la mayor presión por la disminución de pérdidas en su trayectoria obteniéndose un valor de 261.8 psi.

c. Análisis de la temperatura en el sistema de bombeo

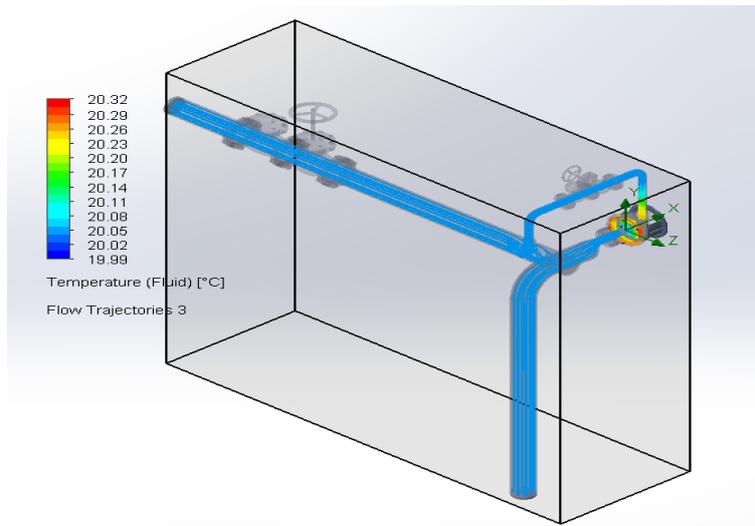


Figura 50. Estado de la temperatura del fluido en sistema de bombeo.

La temperatura no tiene mayor variación en sus valores como se observa en la Figura 50. Esto debido a que el fluido mantiene su temperatura durante todo el proceso y con una variación mínima en la fase de contacto entre el fluido y el impulsor de la bomba.

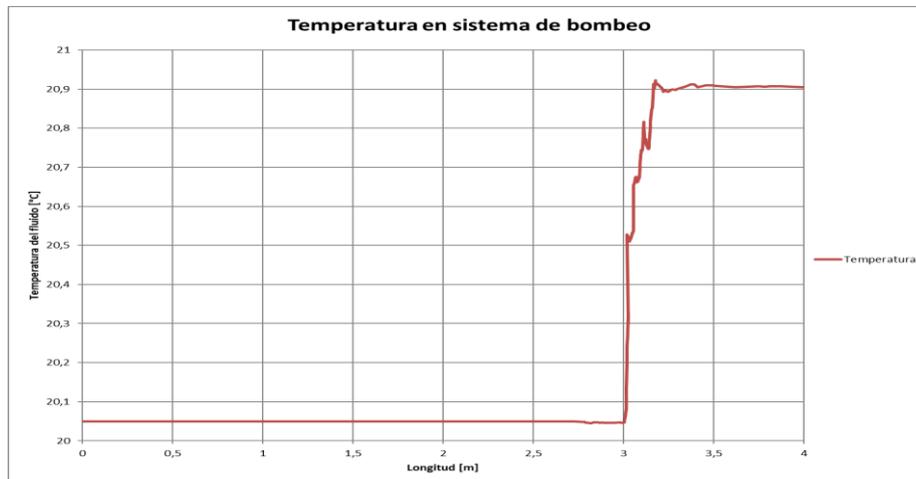


Figura 51. Gráfica temperatura vs longitud de curva de simulación

La temperatura permanecerá en un valor alrededor de 20 °C durante el funcionamiento del sistema, como se indica en la Figura 51. De esta manera el cuerpo de la bomba no se verá afectado y el sistema funcionará de forma eficiente.

Se realiza una simulación con un solo equipo debido a que el sistema es redundante, como se mencionó en el capítulo 2, por lo tanto, los tres equipos que se requieren cumplirán con los mismos parámetros y funcionarán de la misma forma, a veces a tiempos diferentes.

En el transcurso de la simulación de la línea de succión se puede apreciar la mínima variación de las condiciones de velocidad y temperatura en el fluido, de esta manera el fluido dentro de la tubería mantendrá una velocidad constante de 0.9 m/s, una temperatura de 20.45°C.

La variable que mayor cambio presenta es la presión esto debido al ascenso que tiene el fluido respecto a la altura.

El sistema cumple con los parámetros de diseño establecidos teóricamente esto se puede comprobar con la medición de los valores de velocidad en cualquier punto de la tubería de succión como de descarga. Además, no se presentan valores con presión negativa y se

deduce que no existen campos de burbujas de vapor de agua las cuales ocasionarían cavitación en la bomba.

CAPÍTULO IV

DETERMINACIÓN DE COSTOS DE IMPLEMENTACIÓN

En este capítulo se hará un breve análisis de precios de materiales, equipos y los costos de funcionamiento del sistema. Para la determinación de la viabilidad de implementación y remplazo para el proyecto.

4.1. Costos de materiales

Se presenta un presupuesto de todos los accesorios que componen el rediseño del sistema de bombeo de agua potable. Este presupuesto es compuesto por tuberías, reductores, codos, bridas, válvulas y las bombas centrífugas que se implementarán.

Los materiales y accesorios están seleccionados con respecto a las medidas que se muestran en el plano del rediseño del sistema, con sus respectivas normas y cédulas elegidas. Las bombas y las tuberías se escogen con el estudio realizado en el capítulo 2, en el cual se analizó los parámetros que se plantea para el rediseño.

Tabla 22. Presupuesto de accesorios y materiales.

PRESUPUESTO ACCESORIOS				
DESCRIPCION	DIM.	CT D	PRECIO (USD)	TOTAL (USD)
TUBERÍA				
Tubo, sin costura, GR B, BE, A-106, SCH 40 (estándar), ANSI B36.10	6 in	4	253,94	1.015,76
Tubo, sin costura, GR B, BE, A-106, SCH 40 (estándar), ANSI B36.10	2 in	2	233,92	467,84
Tubo, sin costura, GR B, BE, A-106, SCH 40 (estándar), ANSI B36.10	2 1/2 in	1	88,59	88,59
ACCESORIOS				
Codo 90 LR, A234 Gr WPB SCH 40 B16.9 BW	6 in	9	24,78	223,02
Codo 90 LR, A234 Gr WPB SCH 40 B16.9 BW	2 in	2	14,00	28,00
Reducción (ECC), A234 Gr WPB SCH STD B16.9 BW	6 x 2 1/2 in	10	35,00	350,00
Reducción (CONC), A234 Gr WPB SCH STD B16.9 BW	6 in	3	35,00	105,00
Codo 90 LR, A234 Gr WPB SCH 40 B16.9 BW	2 1/2 in	6	15,48	92,88

Brida, WN A105, 150# B16.5, STD	6 in	7	40,97	286,79
Brida, WN A105, 150# B16.5, STD	2 1/2 in	20	18,97	379,40
Brida, WN A105, 150# B16.5, STD	2 in	2	16,00	32
VÁLVULAS				
Válvula de pie de clapeta y canastilla ANSI 150", RF	6 in	1	100,00	100,00
Válvula de globo (ASME B16.34), bridada, clase 150, NPS6, RF	2 in	1	300,00	300,00
Válvula de globo (ASME B16.34), bridada, clase 150, NPS6, RF	6 in	1	1.000,00	1.000,00
Válvula de bola, 150#, RF, ASME B16.10 ASTM A216 WPB	2 in	6	228,69	1.372,14
Válvula de pie de aluminio brida ANSI 125 PSI	6 in	3	240,00	720,00
Válvula de compuerta de doble disco, 150 LB RF ASME B16.10 ASTM A216 GR WPB HAND WHEEL	6 in	3	825,83	2477,49
Válvula check 150 LB RF ASME B16.10 ASTM A216 GR WPB"	2 in	6	245,00	1470,00
Válvula check 150 LB RF ASME B16.10 ASTM A216 GR WPB"	6 in	3	762,30	2286,90
Válvula de retención de oscilación (ASME B16.34), bridada	6 in	1	300,00	300,00
Válvula de bola, 800#, THDF, cuerpo dividido, cuerpo ASTM A105, a prueba de fuego YES-ACC, API 607, vástago diseño a prueba de explosión AISI 316 asiento blando teflon, bola ANSI 316-empaque tipo flotante grafoil, operado por palanca de manejo, puerto regular.	1 in	1	200,00	200,00
Espárrago A193 B7 fluoro carbonado, con 2 tuercas hexagonales pesados y arandelas W/U A194 GR2H	5/8"x90m m	4	4,00	16,00
Espárrago A193 B7 fluoro carbonado, con 2 tuercas hexagonales pesados y arandelas W/U A194 GR2H	3/4"x100 mm	28	4,00	112,00
Empaque 150# RF, anillo 1/8", 304SS FG-CS	2x1/2 in	2	4,00	8,00
Empaque 150# RF, anillo 1/8", 304SS FG-CS	6 in	5	6,00	30,00
Empaque 150# RF, anillo 1/8", 304SS FG-CS	2 in	3	4,00	12,00

Unión universal, 3000LB, FPT, MSS-SP-83; boquilla, A106 GRB sin costura, 160 B36.10 PLXTHD	2 in	1	100,00	100,00
Socketweld, A105, 3000#, MSS -SP97, SW	2 in	1	20,00	20,00
Socketweld, A105, 3000#, MSS -SP97, SW	6x2 in	3	20,00	60,00
Tapa soldable, A234 GR WPB, 40 (ESTÁNDAR) B16.9, BW	6 in	1	22,00	22,00
Threadolet, A105, 3000#, MSS -SP97, SW	6x1 in	1	20,00	20,00
Neplo, A106 GRB SIN COSTURA, 160 B36.10 PLXTHD	1 in	1	18,00	18,00
EQUIPOS				
Bomba centrífuga, BERKELEY MODELO: B2ZPH		3	4.242,58	12.727,74
			TOTAL	26.417,55

4.2. Costo de instalación

En la Tabla 24 se detalle todos los costos de instalación, este se divide en 3 secciones, la fabricación que consiste en la instalación de las líneas de tubería de succión y descarga además el recubrimiento que se aplicará para evitar el deterioro del material. La segunda sección corresponde a los costos de instalación de válvulas, ajuste de conexiones bridadas y se determinan por el tipo de válvula a instalar.

Por último, está la sección de montaje de bombas, en el cual los costos son evaluados por las normas de instalación que se requieren en este tipo de sistema. Es decir, la alineación de los ejes del motor y la bomba, también la alineación sobre la superficie de instalación.

Tabla 23. Presupuesto de instalación de sistema de bombeo de agua potable.

PRESUPUESTO DE INSTALACIÓN			
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	P.UNITARIO (USD)	P.TOTAL (USD)
FABRICACIÓN			
JUNTAS DE 6 IN	15	3.50	315.00
JUNTAS DE 2 IN	27	3.50	189.00
RECUBRIMIENTOS DE 6 IN	15	3.50	52.50
RECUBRIMIENTOS DE 2 IN	27	3.50	94.50
EQUIPO DE OXICORTE	30 MIN (10H)	5.00	100.00
EQUIPOS DE PERFORACIÓN	15 MIN (10H)	2.50	100.00
CORTADORA DE DISCO	30 MIN (10H)	1.25	25.00
INSTALACIÓN DE ACCESORIOS			
INSTALACIÓN DE VÁLVULAS	19	15.00	285.00
INSTALACIÓN DE TUBERIAS	40	10.00	400.00
INSTALACIÓN DE BOMBAS			
INSTALACIÓN DE BOMBAS	3	500.00	1.500.00

CONCLUSIONES

Los parámetros actuales del sistema de bombeo no permiten el funcionamiento eficiente del sistema, esto debido a la geometría de la tubería de succión produce demasiadas pérdidas de energía por los codos y diámetro erróneo que se usa en la instalación, por lo tanto, existe un esfuerzo excesivo de las bombas instaladas. Además, los valores de velocidad sobrepasan el límite necesario en una línea de alta siendo este el caso de un valor de 1.75 m/s.

El sistema se encuentra rediseñado en su totalidad, basándose en los criterios que se aplican para las instalaciones que corresponden a sistemas de bombeo. Siendo así el cálculo poblacional de los usuarios del servicio que corresponde a 1200 personas que de acuerdo con el crecimiento poblacional utilizarán el servicio en los próximos 20 años. De esta manera el sistema rediseñado tiene una geometría en la cual las pérdidas de energía se ven reducidas respecto al sistema instalado, además la tubería es seleccionada de acuerdo con el caudal de 60 m³/h que se requiere. Con esto el sistema evitara los sobreesfuerzos que se producían en las bombas instaladas y la falla de estas.

La configuración que se realizó para el rediseño muestra un sistema más ordenado y con menos pérdidas de energía en succión que en comparación con el sistema anterior con un promedio de pérdidas de 2,01 m y la configuración actual con 0.3386 tiene un 83% de pérdidas menor, con respecto al sistema instalado, además en el rediseño se considera una tubería de 6 pulgadas para la línea de succión la cual de acuerdo a los cálculos de diámetro es la más apropiada para que el sistema tenga una alta eficiencia y evite la cavitación en la carcasa de la bomba, que es una de las principales fallas del sistema actual. En la zona de descarga se rediseño la tubería que asimila un manifold con la cantidad de accesorios que produzcan la menor cantidad de pérdidas y que toda la energía sea para la circulación del fluido hacia el tanque final.

El sistema que se va a implementar cumple con los parámetros de rediseño, la simulación muestra como las variables de velocidad con un valor desde 0.89-0.91 m/s, una presión promedio de 17.49 bar y una temperatura de 20.9 °C se encuentran dentro de los rangos de cálculos analíticos que se realizaron. Principalmente se puede demostrar la disminución de pérdidas de energía en la tubería de succión con el rediseño realizado y el funcionamiento eficiente del sistema de bombeo en todas sus etapas.

El sistema que se va a implementar cumple con la viabilidad financiera, el valor con los nuevos accesorios e instalación en el rediseño tiene un resultado de costos de 29121.55 dólares, que es un porcentaje del 3 % menor al costo que tiene el diseño actual, esto debido a la modificación del sistema. De esta manera los costos por mantenimientos correctivos que se dan en el sistema actual ya no representaran gastos excesivos para la administración.

RECOMENDACIONES

Se recomienda implementar un plan de mantenimiento, para la revisión periódica de los elementos de las bombas centrifugas instaladas, las válvulas y las líneas de tubería. Debido a que los accesorios de las bombas centrifugas y los motores requieren inspecciones y lubricación constante en sus partes rotativas para un correcto funcionamiento de esta manera evitar el remplazo a corto tiempo de estos. En el caso de las tuberías dependiendo de las condiciones ambientales locales se realizará un mantenimiento de tubería para evitar la corrosión.

Se recomienda la implementación de un sistema de control eléctrico, para el funcionamiento del sistema, con el uso de instrumentos de medición electrónicos los cuales reflejen la marcha del proceso y que todas las variables se encuentren en los rangos adecuados.

Se sugiere realizar la simulación del sistema con un programa de análisis y comportamiento de líneas de tubería de alta presión, para un estudio más profundo de los materiales y configuraciones que se utilizaron para el rediseño del sistema de agua potable.

LISTA DE REFERENCIAS

- [1] R. Angarita y M. Melendez, «Fuentes de abastecimiento,» Universidad Santa Maria, Guayaquil, 2012.
- [2] J. Orellana, «Abastecimientos de Agua Potable,» UTN, Ibarra, 2005.
- [3] B. Stauffer y D. Sphuler, «Captacion de rios, lagos y embalses (reservorios),» 2020. [En línea]. Available: <https://sswm.info/es/gass-perspective-es/tecnologias-de/tecnologias-de-abastecimiento-de-agua/captacion/captaci%C3%B3n-de-r%C3%ADos%2C-lagos-y-embalses-%28reservorios%29>. [Último acceso: 2021].
- [4] Comosion Nacional del Agua, «Diseño de redes de distribucion de agua potable,» SEMARNAT, Coyoacán.
- [5] M. F. Castellón Zelaya, «Metodo de aforos de fuentes superficiales,» Universidad Nacional de Ingeniería Sede Región Central Juigalpa, Juigalpa, 2014.
- [6] Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climatico , «Manual de medición de caudales,» ICC, Guatemala, 2017.
- [7] J. M. Hernández Krahe, MECÁNICA DE FLUIDOS Y MÁQUINAS HIDRÁULICAS, España: UNIVERSIDAD NACIONAL DE EDUCACIÓN A DISTANCIA , 2000.
- [8] E. Blanco, S. Velarde Suárez y J. Fernández Francos, SISTEMAS DE BOMBEO, Gijón: UNIVERSIDAD DE OVIEDO, 1994.
- [9] E. Blanco Marigorta, S. Velarde Suárez y J. Fernández Francos, «Sistemas de Bombeo,» ISBN, Gijón, 1994.

- [10] C. Mataix, MECANICA DE FLUIDOS Y MAQUINAS HIDRULICAS, Madrid: Ediciones del Castillo S.A, 1986.
- [11] J. J. Galvez Veintimilla y W. D. Torres García, INFLUENCIA DE LA RUGOSIDAD Y MATERIAL DEL IMPULSOR SOBRE LA ALTURA, POTENCIA Y RENDIMIENTO DE UNA BOMBA CENTRIFUGA PKM60 PEDROLLO, Trujillo, Perú: UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO, 2020.
- [12] B. R. Sabogal Abril, J. A. Palacios Peñaranda y C. L. Pantoja Tovar, «OPTIMIZACIÓN DE ENERGÍA EN SISTEMAS DE BOMBEO,» *Informador Tecnico*, vol. 77, nº 1, pp. 47-48, 2013.
- [13] A. Urgelles Aensio, CONSIDERACIONES EN EL AMBITO ELECTRICO PARA UN SISTEMA DE BOMBEO EFICIENTE, Navarra: UNIVERSIDAD PUBLICA DE NAVARRA, 2013.
- [14] D. F. Dominguez Valencia, «DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN SISTEMA DE SUCCIÓN Y FILTRACIÓN DE 8000 m³ PARA PURIFICAR EL AGUA EN LA COMUNIDAD DE TUNSHI EN LA PROVINCIA DE CHIMBORAZO.,» UPS, Quito, 2020.
- [15] G. Lujan Linares , «Curvas características de una bomba,» Universidad Nacional de Trujillo, Trujillo, 2011.
- [16] INSTITUTO ECUATORIANO DE OBRAS SANITARIAS, *AGUA POTABLE PARA CUENDINA PROVINCIA DE PICHINCHA*, Quito: INSTITUTO ECUATORIANO DE OBRAS SANITARIAS, 1994.
- [17] AL DIA, «¿Cómo Calcular el Diámetro Económico en Tuberías Abastecidas por Bombeo?,» 2022. [En línea]. Available:

<https://ingenieriacivil.tutorialesaldia.com/como-calcular-el-diametro-economico-en-tuberias-abastecidas-por-bombeo/>.

- [18] S. De las Heras, Fluidos, bombas e instalaciones hidráulicas, Barcelona: La Factoria, 2011.
- [19] E. Garcia Trisolini, MANUAL DE PROYECTOS DE AGUA POTABLE EN POBLACIONES RURALES, Lima: FONDO PERU-ALEMANIA DEUDA POR DESARROLLO, 2009.
- [20] INSTITUTO ECUATORIANO DE NORMALIZACIÓN, CÓDIGO ECUATORIANO DE LA CONSTRUCCIÓN C.E.C NORMAS PARA ESTUDIO Y DISEÑO DE SISTEMAS DE AGUA POTABLE Y DISPOSICIÓN DE AGUAS RESIDUAES PARA POBLACIONES MAYORES A 1000 HABITANTES, Quito: INEN, 1992.
- [21] D. Guevara Bonilla, Analisis de una planta de mezclado de gasolina con etanol, Quito: Universida San Francisco de Quito USFQ, 2017.
- [22] Grundfos, «Bombas horizontales de cámara partida,» Grundfos, Quito, 2021.
- [23] M. C. Gonzalez, G. D. J. Saldarriaga y O. Jaramillo, «Estimación de la demanda de agua,» IDEAM, 2010.
- [24] D. J. Romero Duran, «Curvas Características de las Bombas,» UIS, Santander.
- [25] A. Luszczweski, Redes industriales de tubería: bombas para agua, ventiladores y compresores, España: Reverté, 1999.

[26] J. Fernandez Fraile, «DISEÑO DEL RODETE DE UNA BOMBA CENTRIFUGA Y SU SIMULACION CON UN ANALISIS DE ELEMENTOS FINITOS,» UNIVERSIDAD DE CANTABRIA, CANTABRIA, 2021.

[27] T. A. S. o. M. Engineers, Tuberías de proceso (Código ASME para tuberías, B31), Nuevo York: The American Society of Mechanical Engineers, 2010.

ANEXOS

Anexo A

Dimensiones de tubería cedula 40

TABLA F. 1 Cédula 40

Tamaño nominal de la tubería		Diámetro exterior		Espesor de pared		Diámetro interior			Área de flujo	
NPS (in)	DN (mm)	(in)	(mm)	(in)	(mm)	(in)	(ft)	(mm)	(ft ²)	(m ²)
¼	6	0.405	10.3	0.068	1.73	0.269	0.0224	6.8	0.000 394	3.660 × 10 ⁻⁵
¼	8	0.540	13.7	0.088	2.24	0.364	0.0303	9.2	0.000 723	6.717 × 10 ⁻⁵
¾	10	0.675	17.1	0.091	2.31	0.493	0.0411	12.5	0.001 33	1.236 × 10 ⁻⁴
½	15	0.840	21.3	0.109	2.77	0.622	0.0518	15.8	0.002 11	1.960 × 10 ⁻⁴
¾	20	1.050	26.7	0.113	2.87	0.824	0.0687	20.9	0.003 70	3.437 × 10 ⁻⁴
1	25	1.315	33.4	0.133	3.38	1.049	0.0874	26.6	0.006 00	5.574 × 10 ⁻⁴
1¼	32	1.660	42.2	0.140	3.56	1.380	0.1150	35.1	0.010 39	9.653 × 10 ⁻⁴
1½	40	1.900	48.3	0.145	3.68	1.610	0.1342	40.9	0.014 14	1.314 × 10 ⁻³
2	50	2.375	60.3	0.154	3.91	2.067	0.1723	52.5	0.023 33	2.168 × 10 ⁻³
2½	65	2.875	73.0	0.203	5.16	2.469	0.2058	62.7	0.033 26	3.090 × 10 ⁻³
3	80	3.500	88.9	0.216	5.49	3.068	0.2557	77.9	0.051 32	4.768 × 10 ⁻³
3½	90	4.000	101.6	0.226	5.74	3.548	0.2957	90.1	0.068 68	6.381 × 10 ⁻³
4	100	4.500	114.3	0.237	6.02	4.026	0.3355	102.3	0.088 40	8.213 × 10 ⁻³
5	125	5.563	141.3	0.258	6.55	5.047	0.4206	128.2	0.139 0	1.291 × 10 ⁻²
6	150	6.625	168.3	0.280	7.11	6.065	0.5054	154.1	0.200 6	1.864 × 10 ⁻²
8	200	8.625	219.1	0.322	8.18	7.981	0.6651	202.7	0.347 2	3.226 × 10 ⁻²
10	250	10.750	273.1	0.365	9.27	10.020	0.8350	254.5	0.547 9	5.090 × 10 ⁻²
12	300	12.750	323.9	0.406	10.31	11.938	0.9948	303.2	0.777 1	7.219 × 10 ⁻²
14	350	14.000	355.6	0.437	11.10	13.126	1.094	333.4	0.939 6	8.729 × 10 ⁻²
16	400	16.000	406.4	0.500	12.70	15.000	1.250	381.0	1.227	0.1140
18	450	18.000	457.2	0.562	14.27	16.876	1.406	428.7	1.553	0.1443
20	500	20.000	508.0	0.593	15.06	18.814	1.568	477.9	1.931	0.1794
24	600	24.000	609.6	0.687	17.45	22.626	1.886	574.7	2.792	0.2594

Anexo B

Propiedades del agua

TABLA A.1 Unidades del SI (101 kPa (abs))

Temperatura (°C)	Peso específico γ (kN/m ³)	Densidad ρ (kg/m ³)	Viscosidad dinámica η (Pa·s)	Viscosidad cinemática ν (m ² /s)
0	9.81	1000	1.75×10^{-3}	1.75×10^{-6}
5	9.81	1000	1.52×10^{-3}	1.52×10^{-6}
10	9.81	1000	1.30×10^{-3}	1.30×10^{-6}
15	9.81	1000	1.15×10^{-3}	1.15×10^{-6}
20	9.79	998	1.02×10^{-3}	1.02×10^{-6}
25	9.78	997	8.91×10^{-4}	8.94×10^{-7}
30	9.77	996	8.00×10^{-4}	8.03×10^{-7}
35	9.75	994	7.18×10^{-4}	7.22×10^{-7}
40	9.73	992	6.51×10^{-4}	6.56×10^{-7}
45	9.71	990	5.94×10^{-4}	6.00×10^{-7}
50	9.69	988	5.41×10^{-4}	5.48×10^{-7}
55	9.67	986	4.98×10^{-4}	5.05×10^{-7}
60	9.65	984	4.60×10^{-4}	4.67×10^{-7}
65	9.62	981	4.31×10^{-4}	4.39×10^{-7}
70	9.59	978	4.02×10^{-4}	4.11×10^{-7}
75	9.56	975	3.73×10^{-4}	3.83×10^{-7}
80	9.53	971	3.50×10^{-4}	3.60×10^{-7}
85	9.50	968	3.30×10^{-4}	3.41×10^{-7}
90	9.47	965	3.11×10^{-4}	3.22×10^{-7}
95	9.44	962	2.92×10^{-4}	3.04×10^{-7}
100	9.40	958	2.82×10^{-4}	2.94×10^{-7}

Anexo C

Factores de conversión

TABLA K.1 Factores de conversión					
Masa Unidad estándar del SI: kilogramo (kg). Unidad equivalente: N·s ² /m.					
$\frac{14.59 \text{ kg}}{\text{slug}}$	$\frac{32.174 \text{ lb}_m}{\text{slug}}$	$\frac{2.205 \text{ lb}_m}{\text{kg}}$	$\frac{453.6 \text{ gramos}}{\text{lb}_m}$	$\frac{2000 \text{ lb}_m}{\text{ton}_m}$	$\frac{1000 \text{ kg}}{\text{ton}_m \text{ métrica}}$
Fuerza Unidad estándar del SI: newton (N). Unidad equivalente: kg·m/s ² .					
$\frac{4.448 \text{ N}}{\text{lb}_f}$	$\frac{10^3 \text{ dinas}}{\text{N}}$	$\frac{4.448 \times 10^3 \text{ dinas}}{\text{lb}_f}$	$\frac{224.8 \text{ lb}_f}{\text{kN}}$		
Longitud					
$\frac{3.281 \text{ ft}}{\text{m}}$	$\frac{39.37 \text{ in}}{\text{m}}$	$\frac{12 \text{ in}}{\text{ft}}$	$\frac{1.609 \text{ km}}{\text{mi}}$	$\frac{5280 \text{ ft}}{\text{mi}}$	$\frac{6076 \text{ ft}}{\text{milla náutica}}$
Área					
$\frac{144 \text{ in}^2}{\text{ft}^2}$	$\frac{10.76 \text{ ft}^2}{\text{m}^2}$	$\frac{645.2 \text{ mm}^2}{\text{in}^2}$	$\frac{10^6 \text{ mm}^2}{\text{m}^2}$	$\frac{43\,560 \text{ ft}^2}{\text{acre}}$	$\frac{10^4 \text{ m}^2}{\text{hectárea}}$
Volumen					
$\frac{1728 \text{ in}^3}{\text{ft}^3}$	$\frac{231 \text{ in}^3}{\text{gal}}$	$\frac{7.48 \text{ gal}}{\text{ft}^3}$	$\frac{264.2 \text{ gal}}{\text{m}^3}$	$\frac{3.785 \text{ L}}{\text{gal}}$	$\frac{35.31 \text{ ft}^3}{\text{m}^3}$
$\frac{28.32 \text{ L}}{\text{ft}^3}$	$\frac{1000 \text{ L}}{\text{m}^3}$	$\frac{61.02 \text{ in}^3}{\text{L}}$	$\frac{1000 \text{ cm}^3}{\text{L}}$	$\frac{1.201 \text{ U.S. gal}}{\text{galón imperial}}$	
Rapidez del flujo de volumen					
$\frac{449 \text{ gal/min}}{\text{ft}^3/\text{s}}$	$\frac{35.31 \text{ ft}^3/\text{s}}{\text{m}^3/\text{s}}$	$\frac{15\,850 \text{ gal/min}}{\text{m}^3/\text{s}}$	$\frac{3.785 \text{ L/min}}{\text{gal/min}}$		
$\frac{60\,000 \text{ L/min}}{\text{m}^3/\text{s}}$	$\frac{2119 \text{ ft}^3/\text{min}}{\text{m}^3/\text{s}}$	$\frac{16.67 \text{ L/min}}{\text{m}^3/\text{h}}$	$\frac{101.9 \text{ m}^3/\text{h}}{\text{ft}^3/\text{s}}$		
Densidad (masa/unidad de volumen)					
$\frac{515.4 \text{ kg/m}^3}{\text{slug/ft}^3}$	$\frac{1000 \text{ kg/m}^3}{\text{gramos/cm}^3}$	$\frac{32.17 \text{ lb}_m/\text{ft}^3}{\text{slug/ft}^3}$	$\frac{16.018 \text{ kg/m}^3}{\text{lb}_m/\text{ft}^3}$		
Peso específico (peso/unidad de volumen)					
$\frac{157.1 \text{ N/m}^3}{\text{lb}_f/\text{ft}^3}$	$\frac{1728 \text{ lb}_f/\text{ft}^3}{\text{lb}_f/\text{in}^3}$				
Presión Unidad estándar del SI: pascal (Pa). Unidades equivalentes: N/m ² o kg/m·s ²					
$\frac{144 \text{ lb}_f/\text{ft}^2}{\text{lb}_f/\text{in}^2}$	$\frac{47.88 \text{ Pa}}{\text{lb}_f/\text{ft}^2}$	$\frac{6895 \text{ Pa}}{\text{lb}_f/\text{in}^2}$	$\frac{1 \text{ Pa}}{\text{N/m}^2}$	$\frac{100 \text{ kPa}}{\text{bar}}$	$\frac{14.50 \text{ lb}_f/\text{in}^2}{\text{bar}}$
$\frac{27.68 \text{ inH}_2\text{O}}{\text{lb}_f/\text{in}^2}$	$\frac{249.1 \text{ Pa}}{\text{inH}_2\text{O}}$	$\frac{2.036 \text{ inHg}}{\text{lb}_f/\text{in}^2}$	$\frac{3386 \text{ Pa}}{\text{inHg}}$	$\frac{133.3 \text{ Pa}}{\text{mmHg}}$	$\frac{51.71 \text{ mmHg}}{\text{lb}_f/\text{in}^2}$
$\frac{14.696 \text{ lb}_f/\text{in}^2}{\text{Atmósfera estándar}}$	$\frac{101.325 \text{ kPa}}{\text{Atmósfera estándar}}$	$\frac{29.92 \text{ inHg}}{\text{Atmósfera estándar}}$	$\frac{760.1 \text{ mmHg}}{\text{Atmósfera estándar}}$		

TABLA K.1 Factores de conversión (continuación)

Nota: Los factores de conversión basados en la altura de una columna de líquido (por ejemplo, inH₂O y mmHg) consideran un campo gravitacional estándar ($g = 9.80665 \text{ m/s}^2$), una densidad del agua igual a 1000 kg/m^3 y una densidad del mercurio igual a 13595.1 kg/m^3 , son llamados a veces valores convencionales para una temperatura cercana a 0°C . Las medidas reales para dichos fluidos pueden variar debido a diferencias en la gravedad y la temperatura locales.

Energía Unidad estándar del SI: joule (J). Unidades equivalentes: N·m o $\text{kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}^2$.

$\frac{1.356 \text{ J}}{\text{lb}\cdot\text{ft}}$	$\frac{1.0 \text{ J}}{\text{N}\cdot\text{m}}$	$\frac{8.85 \text{ lb}\cdot\text{in}}{\text{J}}$	$\frac{1.055 \text{ kJ}}{\text{Btu}}$	$\frac{3.600 \text{ kJ}}{\text{W}\cdot\text{h}}$	$\frac{778.17 \text{ ft}\cdot\text{lb}}{\text{Btu}}$
---------------------------------------------------	-----------------------------------------------	--------------------------------------------------	---------------------------------------	--------------------------------------------------	------------------------------------------------------

Potencia Unidad estándar del SI: watt (W). Unidad equivalente: J/s o N·m/s.

$\frac{745.7 \text{ W}}{\text{hp}}$	$\frac{1.0 \text{ W}}{\text{N}\cdot\text{m/s}}$	$\frac{550 \text{ lb}\cdot\text{ft/s}}{\text{hp}}$	$\frac{1.356 \text{ W}}{\text{lb}\cdot\text{ft/s}}$	$\frac{3.412 \text{ Btu/h}}{\text{W}}$	$\frac{1.341 \text{ hp}}{\text{kW}}$
-------------------------------------	-------------------------------------------------	----------------------------------------------------	-----------------------------------------------------	----------------------------------------	--------------------------------------

Viscosidad dinámica Unidad estándar del SI: Pa·s o N·s/m² (cP = centipoise)

$\frac{47.88 \text{ Pa}\cdot\text{s}}{\text{lb}\cdot\text{s/ft}^2}$	$\frac{10 \text{ poise}}{\text{Pa}\cdot\text{s}}$	$\frac{1000 \text{ cP}}{\text{Pa}\cdot\text{s}}$	$\frac{100 \text{ cP}}{\text{poise}}$	$\frac{1 \text{ cP}}{1 \text{ mPa}\cdot\text{s}}$
---------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------	--------------------------------------------------	---------------------------------------	---------------------------------------------------

Viscosidad cinemática Unidad estándar del SI: m²/s (cSt = centistoke)

$\frac{10.764 \text{ ft}^2/\text{s}}{\text{m}^2/\text{s}}$	$\frac{10^4 \text{ stoke}}{\text{m}^2/\text{s}}$	$\frac{10^6 \text{ cSt}}{\text{m}^2/\text{s}}$	$\frac{100 \text{ cSt}}{\text{stoke}}$	$\frac{1 \text{ cSt}}{1 \text{ mm}^2/\text{s}}$	$\frac{10^6 \text{ mm}^2/\text{s}}{\text{m}^2/\text{s}}$
------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------	------------------------------------------------	----------------------------------------	-------------------------------------------------	----------------------------------------------------------

Consulte la sección 2.6.5 para ver las conversiones que implican segundos Universal Saybolt.

Enfoque general para aplicar los factores de conversión. Disponga el factor de conversión de la tabla de manera que cuando se multiplique por la cantidad dada, las unidades originales se anulen y queden las unidades deseadas.

Ejemplo 1 Convierta $0.24 \text{ m}^3/\text{s}$ a unidades de gal/min:

$$(0.24 \text{ m}^3/\text{s}) \frac{15\,850 \text{ gal/min}}{\text{m}^3/\text{s}} = 3804 \text{ gal/min}$$

Ejemplo 2 Convierta 150 gal/min a unidades de m³/s:

$$(150 \text{ gal/min}) \frac{1 \text{ m}^3/\text{s}}{15\,850 \text{ gal/min}} = 9.46 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$$

Conversiones de temperatura (consulte la sección 1.6)

Dada la temperatura Fahrenheit T_F en °F, la temperatura Celsius T_C en °C es

$$T_C = (T_F - 32)/1.8$$

Dada la temperatura T_C en °C, la temperatura Fahrenheit T_F en °F es

$$T_F = 1.8 T_C + 32$$

Dada la temperatura T_C en °C, la temperatura absoluta T_K en K (grados Kelvin) es

$$T_K = T_C + 273.15$$

Dada la temperatura T_F en °F, la temperatura absoluta T_R en °R (grados Rankine) es

$$T_R = T_F + 459.67$$

Dada la temperatura T_F en °F, la temperatura absoluta T_K en K es

$$T_K = (T_F + 459.67)/1.8 = T_R/1.8$$

Anexo D

Rugosidad de tuberías cedula 40

TABLA 8.2 Rugosidad de la tubería —valores de diseño

Material	Rugosidad ϵ (m)	Rugosidad ϵ (ft)
Vidrio	Liso	Liso
Plástico	3.0×10^{-7}	1.0×10^{-6}
Tubo estirado; cobre, latón, acero	1.5×10^{-6}	5.0×10^{-6}
Acero, comercial o soldado	4.6×10^{-5}	1.5×10^{-4}
Hierro galvanizado	1.5×10^{-4}	5.0×10^{-4}
Hierro dúctil —revestido	1.2×10^{-4}	4.0×10^{-4}
Hierro dúctil —sin revestir	2.4×10^{-4}	8.0×10^{-4}
Concreto, bien hecho	1.2×10^{-4}	4.0×10^{-4}
Acero remachado	1.8×10^{-3}	6.0×10^{-3}

Anexo E

Factor de fricción en la zona de turbulencia para tubería cedula 40 y resistencias en válvulas y accesorios

TABLA 10.4 Resistencia en válvulas y accesorios expresada como la longitud equivalente en diámetros de tubería, L_e/D

Tipo	Longitud equivalente en diámetros de tubería L_e/D
Válvula de globo —totalmente abierta	340
Válvula de ángulo —totalmente abierta	150
Válvula de compuerta —totalmente abierta	8
—abierta $\frac{3}{4}$	35
—abierta $\frac{1}{2}$	160
—abierta $\frac{1}{4}$	900
Válvula de retención —tipo oscilante	100
Válvula de retención —tipo bola	150
Válvula de mariposa —totalmente abierta, 2-8 in	45
—10-14 in	35
—16-24 in	25
Válvula de pie —tipo disco de vástago	420
Válvula de pie —tipo disco de bisagras	75
Codo estándar de 90°	30
Codo de 90° y radio largo	20
Codo de 90° para calle	50
Codo estándar de 45°	16
Codo de 45° para calle	26
Doble de retorno cerrado	50
Te estándar —con flujo por la línea principal	20
—con flujo por la ramificación	60

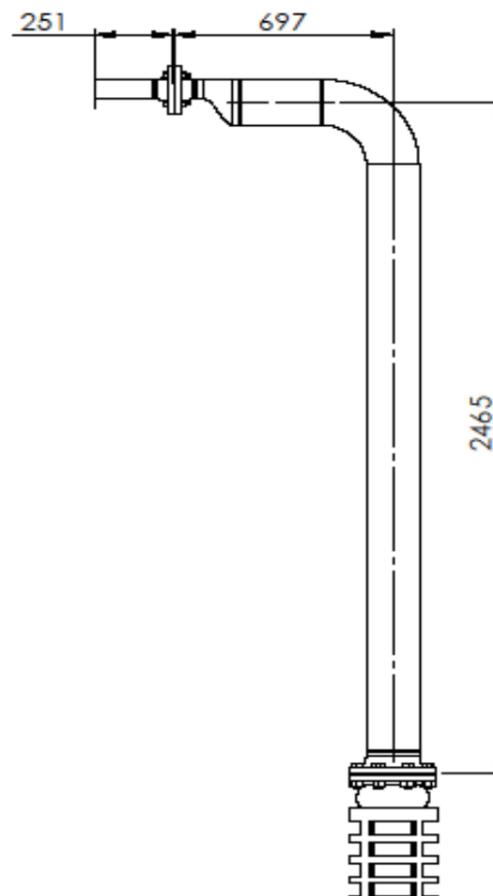
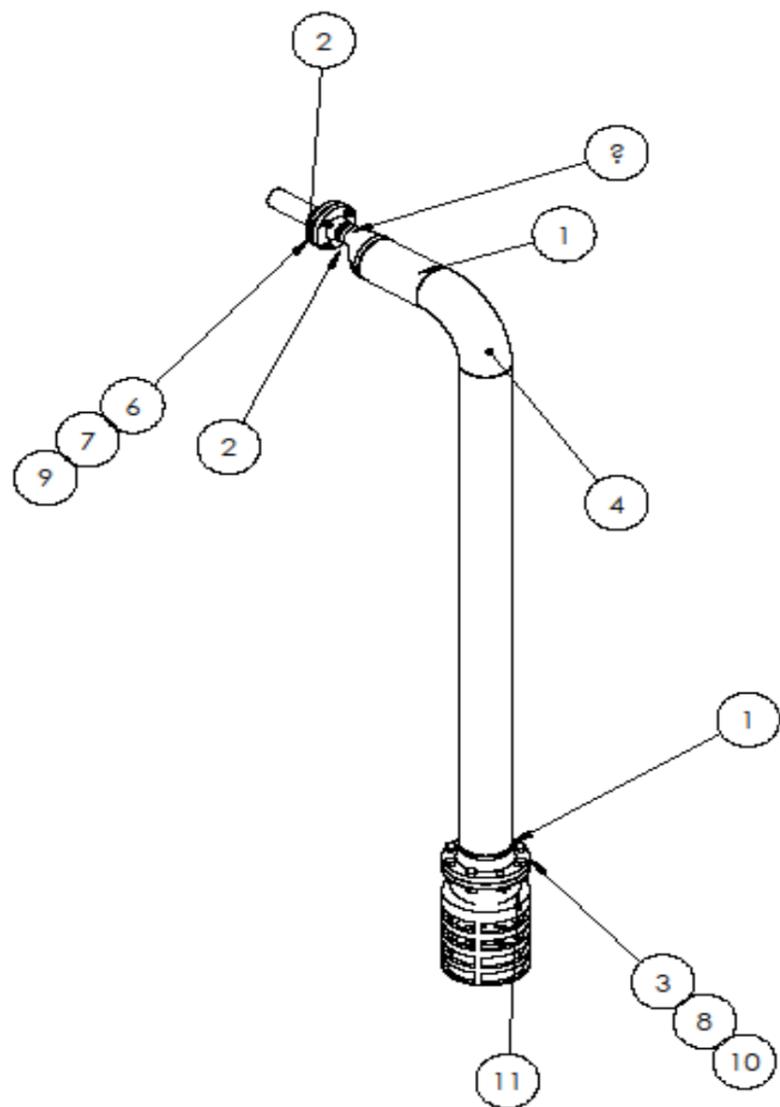
(Reproducido con autorización de Crane Co. *Flow of Fluids through Valves, Fittings and Pipe*, artículo técnico núm. 410, 2011. Todos los derechos reservados).

TABLA 10.5 Factor de fricción en la zona de turbulencia completa para tubería de acero comercial, cédula 40, nueva y limpia

Tamaño nominal de la tubería			Tamaño nominal de la tubería		
Estados Unidos (in)	Métrico (mm)	Factor de fricción, f_f	Estados Unidos (in)	Métrico (mm)	Factor de fricción, f_f
½	DN 15	0.026	3, 3½	DN 80, DN 90	0.017
¾	DN 20	0.024	4	DN 100	0.016
1	DN 25	0.022	5, 6	DN 125, DN 150	0.015
1¼	DN 32	0.021	8	DN 200	0.014
1½	DN 40	0.020	10-14	DN 250 a DN 350	0.013
2	DN 50	0.019	16-22	DN 400 a DN 550	0.012
2½	DN 65	0.018	24-36	DN 600 a DN 900	0.011

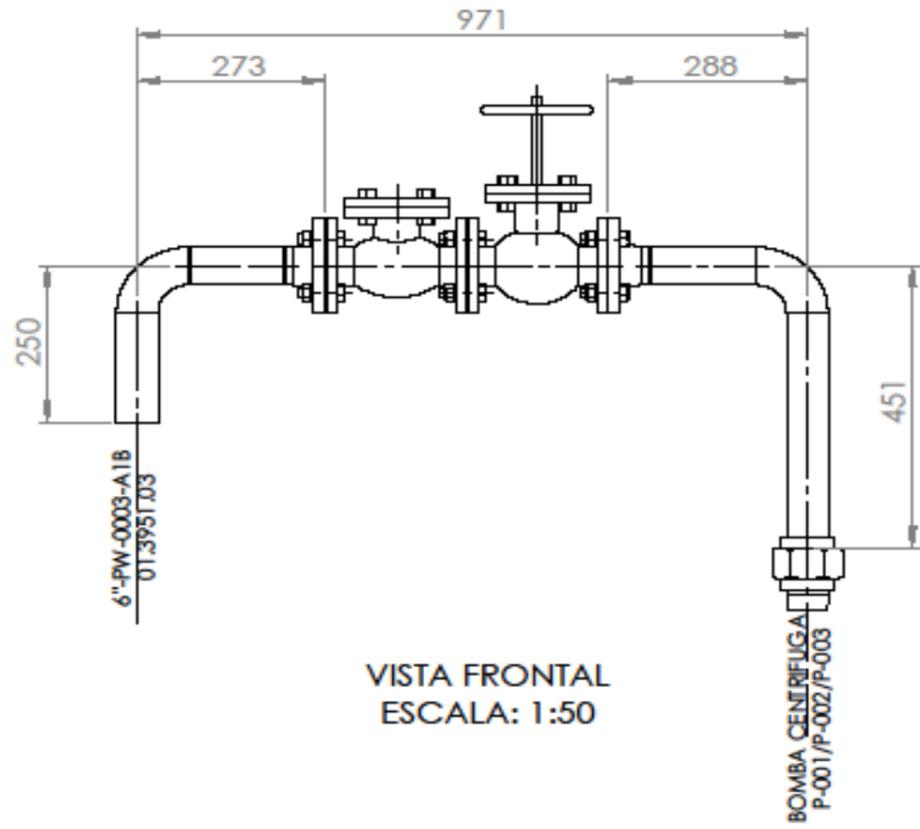
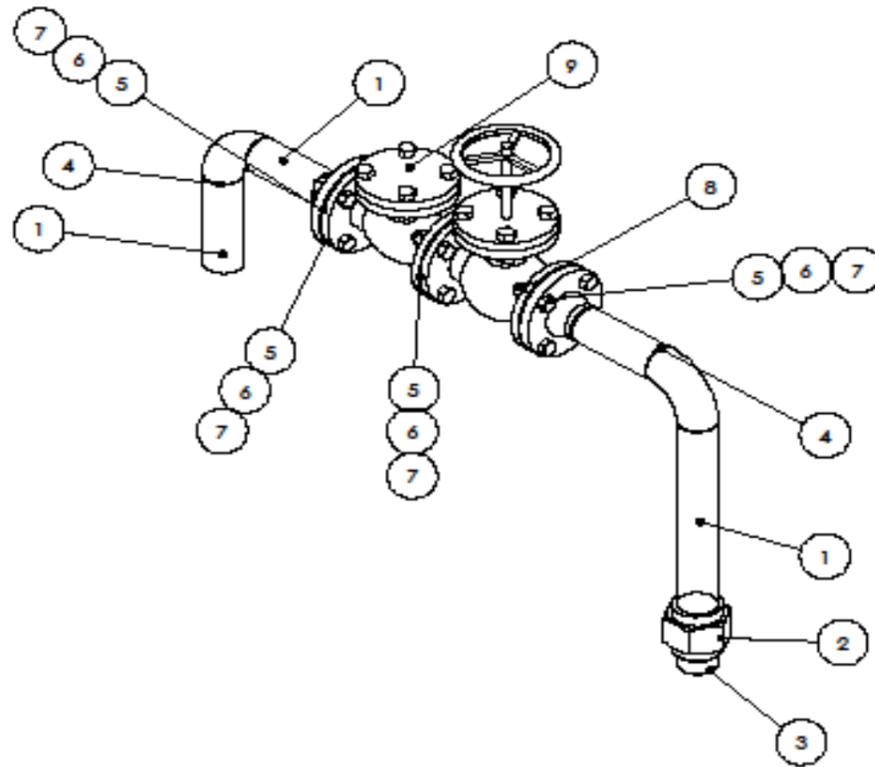
Anexo F

Planos de conjunto y despiece del rediseño del sistema bombeo.



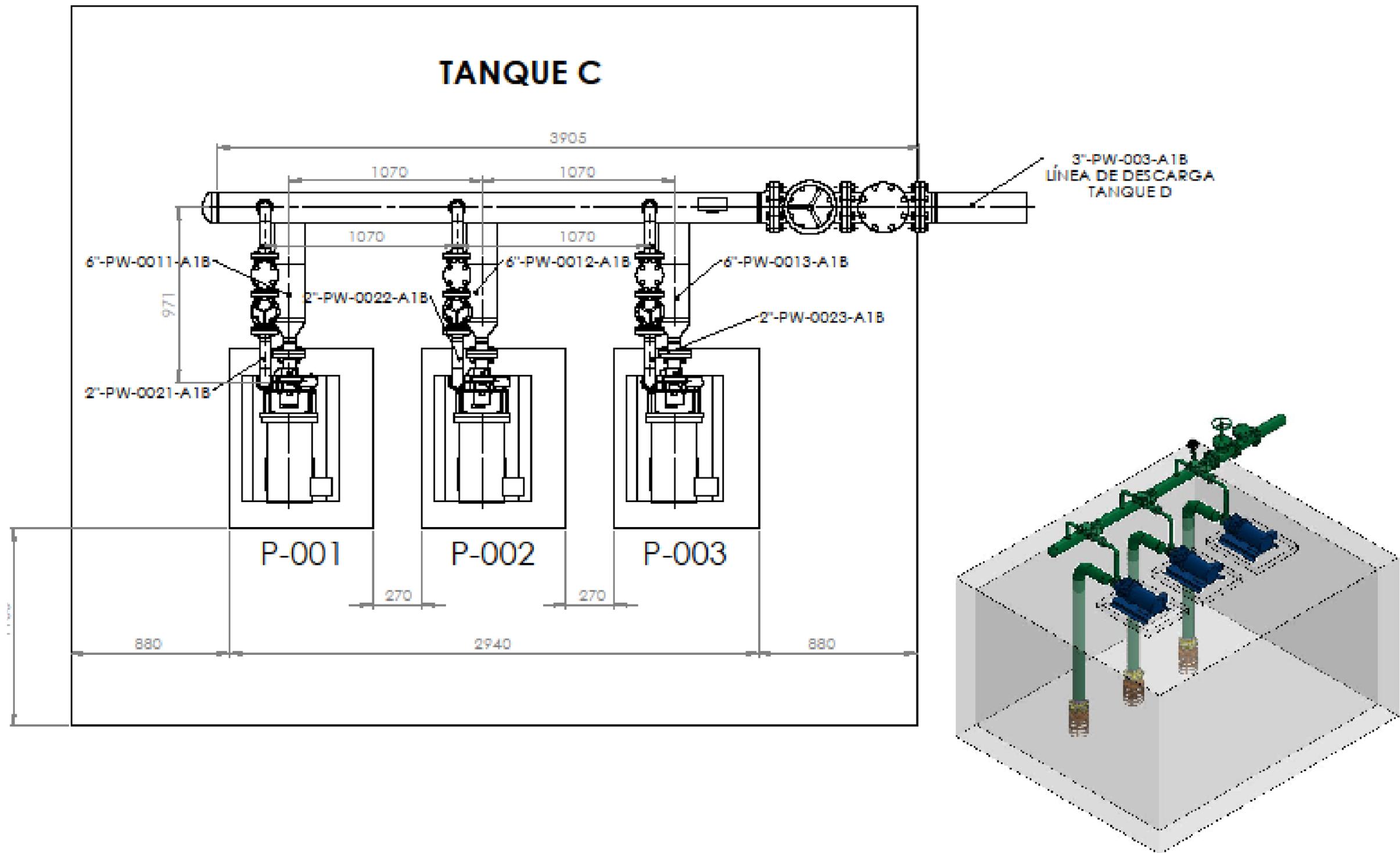
N.º de elemento	Descripción	ND	Cantidad
Tubería			
1	Tubo, sin costura, gr b, be, a-106, SCH 40 (estándar), ANSI B36.10	2-1/2"	182.5mm
2	Tubo, sin costura, GR B, A-106, SCH 40 (estándar), ANSI B36.10	6"	2060mm
Accesorios			
3	Reductor excéntrico, SCH 40(STD), MSS-SP95	6"x2-1/2"	8
4	Codo LR, SCH 40(STD), ASME B16.9, A234	6"	1
Bridas			
5	Brida WN, SCH 40, 150 LB, A105, RF, ASME B16.5	2-1/2"	2
6	Brida WN, SCH 40, 150 LB, A105, RF, ASME B16.5	6"	1
Sujetadores			
7	Espárrago, A193 B7 recubierto de fluorocarbono, con 2 tuercas A194 GR2H tuercas hexagonales pesados y arandelas	5/8"x90mm	4
8	Espárrago, A193 B7 recubierto de fluorocarbono, con 2 tuercas A194 GR2H tuercas hexagonales pesados y arandelas	3/4"x100 mm	
9	Empaque 150# RF, ANILLO 1/8", 304SS Enrollado en espiral, material de relleno (flexible grafito FG) con CS Anillo exterior	2-1/2"	2
10	Empaque 150# RF, ANILLO 1/8", 304SS Enrollado en espiral, material de relleno (flexible grafito FG) con CS anillo exterior	6"	2
Válvulas			
11	Válvula de pie de canastilla ANSI 150#, RF	Válvulas de clapeta, con 6"	1

Tratamiento térmico:	NA	Material:	NA	Dim. brutas:	NA
Recubrimiento:	NA	UPS		Diseño:	Guanaliquín/Simbaña 18/11/2021
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA				Dibujó:	Guanaliquín/Simbaña 18/11/2021
		PIPING LAYOUT SISTEMA DE AGUA POTABLE JAPSC		Revisó:	Ing. Maldonado Carlos 18/11/2021
Escola:	SE			Código:	02.3951.01



N.º de elemento	Descripción	ND	Cantidad
1	Tubo, sin costura, GR B, BE, A-106, SCH 40 (estándar), ANSI B36.10	2"	814 mm
2	Union universal, 3000LB, FPT, MSS-SP-83	2"	1
3	Boquilla, A106 GRB sin costura, 160 B36.10 PLXTHD	2"	1
4	Codo 90LR, SCH 40, BW, A-234 GR WPB, ASME B16.9	2"	2
5	Brida WN, SCH 40, 150 LB, A105, RF, ASME B16.5	2"	2
6	Espárrago, A193-B7 recubierta de fluorocarbono, con 2 tuercas A194 gr2h tuercas hexagonales pesadas y arandelas	5/8"x85mm	12
7	Empaque 150# RF, anillo 1/8", 304SS enrollado en espiral, material de relleno (flexible grafito FG) con CS anillo exterior	2"	3
8	Válvula de globo (ASME B16.34), extremo con brida, clase 150, NPS 6, RF	2"	1
9	Válvula de retención de oscilación (ASME B16.34), extremo con brida, clase 150, NPS 6, RF	2"	1

Tratamiento térmico:	NA	Material:	NA	Dim. brutas:	NA	
Recubrimiento:	NA	Diseño:	Guanoliquin/Simbaña	18/06/2022		
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA		UPS		Dibujó:	Guanoliquin/Simbaña	18/06/2022
				Revisó:	Ing. Maldonado Carlos	18/06/2022
LINEA DE AGUA POTABLE 2"-PW-002-A1B		Escala:	SE	Código:	01.3951.02	Tol. Gral.: ±0.1



Tratamiento térmico:	NA	Material:	NA	Dim. brutas:	NA
Recubrimiento:	NA				
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA		UPS	Diseño:	Guanaliquin/Simbaña	18/11/2021
			Dibujó:	Guanaliquin/Simbaña	18/11/2021
			Revisó:	Ing. Maldonado Carlo	18/11/2021
PIPING LAYOUT SISTEMA DE AGUA POTABLE JAPSC		Escala:	Código:	02.3951.01	Tol. Gral.: ±0.1
		SE			

Anexo G

Ejemplos Piping Class

Table 5.1 - Material Selection Menu for Piping Systems

Product	Carbon steel Type 235 ¹⁾	Carbon steel Type 235LT impact tested	Carbon steel Type 360LT impact tested	Stainless steel Type 316	Stainless steel Type 6Mo ¹⁾	Stainless steel Type 22Cr Duplex	Stainless steel Type 25Cr Duplex	Nickel alloy	Titanium
Pipes Seamless	A 106 Grade B	A 333 Grade 6	API 5L Grade XS2	A 312 Grade TP 316	A 312 UNS S31354	A 790 UNS S31803	A790 UNS S32550 A790 UNS S 32750 A790 UNS S 32760	B775 UNS N06625	B 337 Grade 2
Pipes Welded	API 5L Grade B	A 671 Grade CC60 Class 12, 22	A 671 Grade CC70 Class 12, 22	A 312 Grade TP316 A 358 Grade 316 Class 1, 3, 4	A 358 UNS S31254 Class 1, 3, 5	A 358 UNS S31803 Class 1, 3, 5	A358 UNS S 32550 A358 UNS S 32750 A358 UNS S 32760 Class 1, 3 and 5	B775 UNS N06625	B 337 Grade 2
Fittings	A 234 Grade WPB	A 420 Grade WPL 6	A 860 Grade WPHY 52	A 403 Grade WP 316 Class S, W, WX	A 403 Grade WP S31254 Class S, W, WX	A 815 UNS S31803 Class S, W, WX	A815 UNS S32550 A815 UNS S 32750 A815 UNS S 32760 Class S, W, WX	B366 UNS N06625	B 363 Grade WPT2W B 363 Grade WPT2
Forgings	A 105	A 350 Grade LF2	A 694 Grade F52	A 182 Grade F316	A 182 Grade F44	A 182 Grade F51	A182 UNS S32550 A182 UNS S 32750 A182 UNS S 32760	B564 UNS N06625	B 381 Grade F2

Anexo H

Coeficiente de Hazen Williams

TABLA 8.3 Coeficiente de Hazen-Williams C_h

Tipo de tubería	C_h	
	Promedio para tubería nueva y limpia	Valor de diseño
Acero, hierro dúctil o hierro fundido con cemento aplicado en forma centrifuga o revestimiento bituminoso	150	140
Plástico, cobre, latón, vidrio	140	130
Acero, hierro fundido, sin revestir	130	100
Concreto	120	100
Acero corrugado	60	60