

Diseño de un sistema de abastecimiento de agua potable para las comunidades del municipio de
Suaita, Santander

Camilo Andrés Pulido Garzón y Ricardo José Olayo Granados

Plan de proyecto de Grado para Optar al Título de Ingeniero mecánico

Director

Manuel de Jesús Martínez

PhD Mecánica Computacional

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Mecánica

Bucaramanaga

2026

Dedicatoria

A Dios,

por ser el fundamento de mi vida, mi fuente de fortaleza y el guía que iluminó cada paso de este camino. Gracias por darme la sabiduría para superar los desafíos, la perseverancia para no rendirme y la oportunidad de ver hecho realidad este gran sueño. A ti encomiendo cada logro, porque sin tu voluntad y bendición nada de esto habría sido posible.

A mi madre,

por ser mi ejemplo más grande de fortaleza, amor y perseverancia. Gracias por nunca rendirte, por luchar incansablemente para darme lo mejor y por ser el pilar que ha sostenido cada paso de mi camino. Este logro también es tuyo, porque sin tu esfuerzo y sacrificio nada de esto habría sido posible. Así mismo a todos mis familiares que sembraron un granito de arena para así impulsarme y seguir luchando.

A mi abuelo,

que desde lo más alto sé que me acompaña y sonrío orgulloso al verme cumplir este sueño. Aunque no estés físicamente, tu recuerdo, tus enseñanzas y tu fe en mí han sido una guía constante. Este triunfo es también un homenaje a tu memoria.

A nuestro director de tesis,

por su valioso acompañamiento, su orientación constante y su compromiso durante todo este proceso. Gracias por compartir su conocimiento y por guiarnos con paciencia y dedicación para alcanzar este importante objetivo.

Y a la Universidad Industrial de Santander,

por ser el espacio donde crecí profesional y personalmente, donde los retos se transformaron en aprendizajes y los sueños en logros. Gracias por brindarme las herramientas y el conocimiento que hoy hacen posible este resultado.

Ricardo Olayo

A la Universidad Industrial de Santander, por haberme brindado la oportunidad de formarme como profesional en una institución que representa la excelencia académica, el compromiso social y la búsqueda constante del conocimiento. Gracias por ser el espacio donde pude crecer no solo intelectualmente, sino también como persona, aprendiendo el valor del esfuerzo, la disciplina y la responsabilidad.

Agradezco de manera muy especial al profesor Manuel de Jesús Martínez, director de este trabajo de grado, por su guía, su paciencia y su dedicación a lo largo de todo el proceso de investigación. Sus conocimientos, orientación y compromiso fueron fundamentales para el desarrollo de este proyecto, así como para mi formación académica y profesional. Su acompañamiento constante y su disposición para compartir su experiencia dejaron en mí una huella invaluable.

A todos los docentes y compañeros que hicieron parte de esta etapa, gracias por su apoyo, sus enseñanzas y por contribuir, de una u otra manera, a la culminación de este logro que representa el esfuerzo de todos estos años.

Camilo Pulido

Agradecimientos

Principalmente, a nuestros padres, por su dedicación, fe y paciencia en nosotros, a nuestros amigos, que su compañía y cariño nos dieron un empujón cada vez que no podíamos continuar con el proyecto, a nuestra escuela por brindarnos las bases necesarias para este logro y a nuestro director de tesis, por brindarnos la oportunidad de desarrollar y completar este objetivo.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción.....	15
1. Descripción del problema.....	16
2. Alcance del proyecto.....	17
3. Objetivos.....	18
3.1 Objetivo general.....	18
3.2 Objetivos específicos.....	18
4. Marco Teórico.....	19
4.1 Planta de tratamiento de agua potable.....	19
4.2 Sistemas de abastecimiento de agua.....	20
4.2.1 Captación.....	20
4.2.2 Bocatomas.....	21
4.2.3 Bocatomas directas.....	21
4.2.4 Bocatoma de rejilla.....	21
4.2.5 Conducción (sistema de bombeo).....	22
4.2.6 Tratamiento.....	23
4.2.7 Distribución.....	23
4.2.8 Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico (RAS).....	24
4.2.9 Proyecciones poblacionales.....	24
4.2.10 Proyección de la población según el nivel de complejidad.....	25
4.2.11 Método de cálculo según la densidad poblacional del municipio.....	26

4.2.12 Criterios de diseño.....	28
5. Metodología.....	31
5.1 Variables de estudio.....	32
5.2 Instrumentos de medición.....	32
5.3 Análisis estadístico.....	33
6. Desarrollo del proyecto.....	34
6.1 Diagnosticar las condiciones de la planta de abastecimiento de agua.....	37
6.2 Levantamiento de la información sobre infraestructura hídrica existente.....	39
6.3 Evaluación del rendimiento del sistema de abastecimiento mediante auditoría interna.....	43
6.3.1 Parámetros de auditoría.....	46
6.4 Topografía.....	49
6.4.1 Distancia entre el río Tolotá y Suaita.....	50
6.5 Calidad del agua.....	50
6.6 Análisis de la demanda actual.....	50
6.6.1 Caudal consumido por habitante.....	51
6.6.2 Dotación neta.....	51
6.6.3 Nivel de pérdidas:.....	54
6.6.4 Dotación bruta.....	55
6.6.5 Demanda.....	56
6.6.6 Caudal medio diario.....	56
6.6.7 Caudal máximo diario.....	57
6.6.8 Caudal máximo horario.....	58
6.7 Determinación de la demanda para el año 2040.....	58

6.7.1 Caudal consumido por habitante, dotación neta y cálculo según nivel de complejidad	59
6.8 Caudal de diseño	61
7. Alternativas	61
7.1 Criterios de selección	62
7.2 Relación de consumo	62
7.3 Diámetro de tubería	62
7.3.1 Longitud y material de la tubería.	64
7.4 Condiciones proyectadas del sistema	68
8. Alternativas para el sistema de Bombeo	69
8.1 Cálculo de parámetros hidráulicos y mecánicos	70
9. Diseño del sistema de bombeo	74
9.1 Selección de bomba y sistema de control	75
10. Selección del sistema de control	81
10.1 Definición del sistema de alimentación y conductores eléctricos	85
10.2 Análisis del golpe de ariete	87
10.2.1 Cálculo del golpe de ariete	91
11. Análisis hidráulico con Software de simulación	96
12. Evaluación técnica y económica	97
12.1 Generación de alternativas al sistema de bombeo	98
12.2 Alternativa 1: 1 bomba de gran capacidad	98
12.3 Alternativa 2: 2 bombas de capacidad media conectadas en serie	98
12.4 Comparación de alternativas mediante análisis multicriterio.	99
13. Estimaciones de consumo energético y estrategias ambientales.	102

13.1 Estimación del consumo energético.....	102
14. Impacto ambiental (Huella de carbono)	103
15. Elaboración de presupuestos.....	104
15.1 Comparación de alternativas.....	104
16. Selección de la mejor opción	105
17. Conclusiones	106
Referencias Bibliográficas.....	108
Apéndices	110

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Resultados de búsqueda documental	39
Tabla 2. Análisis FODA.....	48
Tabla 3. Tamaños de tuberías según el flujo volumétrico.....	70
Tabla 4. Cálculo de pérdidas por tuberías y accesorios a la descarga	71
Tabla 5. Cálculo de pérdidas en la succión	72
Tabla 6. Cálculo del OPEX a 15 años.....	101
Tabla 7. Matriz de evaluación multicriterio cuantitativa	104
Tabla 8. Tabla de cálculo de indicadores financieros	106

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Planta de tratamiento de agua potable	20
Figura 2. Foto de la toma de rejilla de la planta de Suaita	22
Figura 3. Métodos de cálculo autorizados según los niveles de complejidad de la población.....	26
Figura 4. Método según la densidad poblacional	27
Figura 5. Ubicación de Suaita.....	35
Figura 6. Distribución de los tipos de viviendas del municipio de Suaita	36
Figura 7. Distribución de los servicios públicos en el municipio de Suaita.....	36
Figura 8. Esquema de captaciones de agua	41
Figura 9. Diagrama de procesos de tratamiento de la PTAP	42
Figura 10. Flujograma de trabajo.....	47
Figura 11. Mapa topográfico de Suaita	49
Figura 12. Nivel de complejidad del sistema	51
Figura 13. Dotación neta según el clima	52
Figura 14. Dotaciones según complejos.....	52
Figura 15. Consumo de agua según cada tipo de instalación	53
Figura 16. Coeficiente de consumo máximo diario	56
Figura 17. Coeficiente de consumo máximo horario	57
Figura 18. Velocidad máxima aceptable en las tuberías de succión, según diámetro	64
Figura 19. Cálculo de las pérdidas de altura de la tubería en la herramienta Omni calculator	65
Figura 20. Detalles en una línea de descarga.....	67

Figura 21. Datos de la bomba	75
Figura 22. Plano de montaje de la bomba C-10B	76
Figura 23. Tabla de dimensiones de la bomba C-10B	76
Figura 24. Gráfica de la bomba	77
Figura 25. Tabla de datos de bomba RNI.....	78
Figura 26. Plano de la bomba RNI-65-20	79
Figura 27. Gráfica de la bomba RNI-60-20.....	80
Figura 28. Conexión delta y conexión estrella	82
Figura 29. Cantidad de cable para arranque delta estrella a 400V	83
Figura 30. Variador de frecuencia VARIACHE 3	84
Figura 31. Ejemplo del golpe de ariete	88
Figura 32. Módulo de elasticidad.....	92
Figura 33. Valores de K en función de la longitud	93
Figura 34. Valores de C según la inclinación	94
Figura 35. Simulación de alternativa 1 en Hidroflo 3.....	96
Figura 36. Simulación de la alternativa 2 a través de Hidroflo 3	97

Lista de Apéndices

	Pág.
Apéndice A. Pozo de captación	110
Apéndice B. Pozo de cribado.....	111
Apéndice C. Pozo de decantado	112
Apéndice D. Cuarto de bombas	113
Apéndice E. Tanque de almacenamiento	114
Apéndice F. Fichas de diseño inicial de la infraestructura de la planta de tratamiento. (Documentación histórica)	115
Apéndice G. Hoja de Excel de definición de formulas para la herramienta de cálculo	118
Apéndice H. Reporte Hidroflo 3 para la alternativa 2	119
Apéndice I. Reporte Hidroflo alternativa 1	124

Resumen

Título: Diseño de un sistema de abastecimiento de agua del municipio de Suaita, Santander*

Autores: Camilo Andrés Pulido Garzón y Ricardo José Olayo Granados **

Palabras Clave: Sistema de bombeo, agua potable, Suaita, Santander, escasez hídrica, diseño hidráulico, proyección de demanda, eficiencia energética, PTAP.

Descripción

El presente trabajo aborda el diseño de un sistema de bombeo moderno para la Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP) en el municipio de Suaita, Santander, con el objetivo primordial de asegurar el suministro continuo y eficiente de agua potable a la población hasta el año 2040. La motivación de este proyecto surge de la crisis hídrica que enfrenta el municipio, caracterizada por la disminución del caudal de los ríos y el aumento de la demanda, exacerbada por factores como el cambio climático, la deforestación y la deficiente infraestructura hídrica actual. La solución propuesta se centra en la captación de agua del río Tolotá mediante un nuevo sistema de bombeo, el cual se proyecta para transportar el recurso hídrico a la PTAP existente. El estudio se sustenta en un enfoque cuantitativo y descriptivo, abarcando un diagnóstico exhaustivo de las condiciones actuales del sistema, la proyección de la demanda de agua hasta el horizonte de diseño, y el diseño detallado de la configuración espacial y la selección de equipos hidráulicos. Se incluyen análisis de eficiencia energética y una evaluación técnico-económica de las alternativas. Este enfoque integral busca no solo mitigar la escasez actual, sino también establecer una infraestructura hídrica resiliente que satisfaga las necesidades futuras de la comunidad de Suaita, contribuyendo al desarrollo sostenible y al bienestar de sus habitantes.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica, Director: Manuel de Jesús Martínez
PhD Mecánica Computacional

Abstract

Title: Design of a water supply system for the municipality of Suaita, Santander*

Authors: Camilo Andrés Pulido Garzón y Ricardo José Olayo Granados **

Key Words: Pumping system, drinking water, Suaita, Santander, water scarcity, hydraulic design, demand projection, energy efficiency, DWTP.

Description

This study focuses on the design of a modern pumping system for the Drinking Water Treatment Plant (DWTP) in the municipality of Suaita, Santander, with the primary goal of ensuring a continuous and efficient supply of drinking water to the population until the year 2040. The motivation for this project stems from the water crisis facing the municipality, characterized by decreasing river flows and increasing demand, exacerbated by factors such as climate change, deforestation, and deficient current water infrastructure. The proposed solution centers on water abstraction from the Tolotá River using a new pumping system, projected to transport the water resource to the existing DWTP. The study is based on a quantitative and descriptive approach, encompassing a comprehensive diagnosis of the current system's conditions, projection of water demands up to the design horizon, and the detailed design of the spatial configuration and selection of hydraulic equipment. Energy efficiency analyses and a technical-economic evaluation of alternatives are included. Integrated rated approach aims not only to mitigate current water scarcity but also to establish a resilient water infrastructure that meets the future needs of the Suaita community, contributing to sustainable development and the well-being of its inhabitants.

* Work of Grade

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica, Director: Manuel de Jesús Martínez
PhD Mecánica Computacional

Introducción

El acceso al agua potable es un pilar fundamental para la salud pública, el desarrollo económico y la calidad de vida de cualquier comunidad. Sin embargo, en la actualidad, numerosas poblaciones alrededor del mundo enfrentan desafíos significativos para garantizar un suministro constante y seguro de este recurso vital. El municipio de Suaita, ubicado en el departamento de Santander, Colombia, no es ajeno a esta problemática. Durante los últimos años, la región ha experimentado una creciente crisis hídrica, evidenciada por la disminución progresiva del caudal de sus fuentes naturales y un aumento sostenido en la demanda de agua por parte de sus habitantes y las actividades productivas. Esta situación ha derivado en cortes frecuentes y prolongados del servicio, afectando directamente el bienestar de la población y el desarrollo local.

Factores como el cambio climático, que altera los patrones de precipitación, la deforestación, que reduce la capacidad de retención de agua del suelo, y una infraestructura hídrica deficiente y envejecida, sumado a la contaminación de las fuentes existentes, han agravado la vulnerabilidad del sistema de abastecimiento de Suaita. Ante este panorama, surge la imperante necesidad de implementar soluciones innovadoras y sostenibles que permitan asegurar la disponibilidad de agua potable a mediano y largo plazo.

Este proyecto de investigación se enfoca en el diseño de un sistema de bombeo moderno para la Planta de Tratamiento de Agua Potable de Suaita. La estrategia propuesta consiste en captar agua del río Tolotá, una fuente identificada con caudal suficiente incluso en temporadas secas, para transportarla eficientemente hasta la PTAP municipal. El objetivo principal es garantizar la distribución continua de agua potable, satisfaciendo las necesidades actuales y futuras de la

población proyectadas hasta el año 2040. Para lograrlo, se realizará un diagnóstico exhaustivo de la infraestructura existente, un análisis demográfico para estimar la demanda futura, y un diseño detallado de la configuración espacial y la selección de equipos hidráulicos, incorporando criterios de eficiencia energética y sostenibilidad.

La relevancia de este estudio radica en su potencial para ofrecer una solución concreta y viable a una problemática crítica que afecta directamente la calidad de vida de los habitantes de Suaita. Al modernizar y optimizar el sistema de abastecimiento de agua, se busca no solo resolver la escasez actual, sino también establecer las bases para un desarrollo sostenible del municipio, alineándose con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas, particularmente el ODS 6: Agua Limpia y Saneamiento. Este documento presenta de manera estructurada el planteamiento del problema, los objetivos, el marco teórico que fundamenta la propuesta, la metodología de investigación, y una propuesta de estructuración de alternativas, culminando con las conclusiones y recomendaciones derivadas del estudio.

1. Descripción del problema

El municipio de Suaita, Santander, se enfrenta a una grave crisis en su suministro de agua debido a la disminución del caudal de los ríos y el aumento en la demanda de recursos hídricos. Esta problemática ha resultado en cortes prolongados y recurrentes. Las principales causas de esta crisis incluyen el cambio climático, la deforestación, la infraestructura hídrica deficiente y la contaminación de las fuentes de agua (González & Pérez, 2019; CAS, 2020; Martínez et al., 2021). Según González & Pérez (2019), el cambio climático ha alterado los patrones de precipitación, lo

que ha contribuido significativamente a la reducción del caudal de los ríos en la región. CAS (2020) destaca que la deforestación ha reducido la capacidad de retención de agua de los suelos, exacerbando aún más la escasez hídrica. Por otro lado, Martínez et al. (2021) señalan que la infraestructura hídrica deficiente y la contaminación de las fuentes de agua han agravado la situación, dificultando el acceso a agua potable para los habitantes del municipio.

Para enfrentar esta situación, hemos propuesto la implementación de un sistema de bombeo que captará agua del río Tolotá, el cual cuenta con un buen caudal en las temporadas más secas del año. Este proyecto transportará el agua a la planta de tratamiento del municipio, asegurando un suministro más constante, especialmente durante la temporada seca, cuando las fuentes hídricas tradicionales son menos confiables. Este sistema no solo ayudará a mitigar la escasez de agua, sino que también mejorará la distribución en toda la región, permitiendo atender la creciente demanda impulsada tanto por el crecimiento demográfico como por la expansión agrícola (Parra & Gómez, 2020; Rivera, 2019).

2. Alcance del proyecto.

El presente proyecto se encuentra limitado a desarrollar las labores competentes a la carrera de ingeniería mecánica necesarias para el sistema de abastecimiento de agua, distinguiendo principalmente que se planea mejorar el sistema existente, no reestructurarlo desde cero, teniendo en cuenta que la estructura de dicho sistema se basa en las siguientes fases: Captación, Conducción, Tratamiento o potabilización, Almacenamiento y Distribución.

El siguiente proyecto se encuentra orientado a los diseños correspondientes a las fases de captación, conducción y almacenamiento (dando prioridad al sistema de bombeo) debido a que la que las fases de tratamiento y distribución son fases que se pertenecen a los rubros de ingeniería ambiental e ingeniería civil, a la par, no se realizarán estudios de influencia social debido a que son correspondientes del rubro de sociología y no son contribuyentes a los objetivos del proyecto, en cambio, se revisará la influencia social de forma preliminar.

También se menciona que los diseños relacionados a obras civiles o planos eléctricos tampoco se van a desarrollar debido a que la tesis se centra exclusivamente en lo referente a la ingeniería mecánica.

3. Objetivos

3.1 Objetivo general

Diseñar un sistema de bombeo moderno para el municipio de Suaita (Santander) que garantice la distribución continua de agua potable, satisfaciendo las necesidades actuales y futuras de la población hasta el año 2040

3.2 Objetivos específicos

Diagnosticar las condiciones del sistema de bombeo actual en operación.

Examinar los datos demográficos para estimar la demanda futura de agua potable proyectada hasta el año 2040.

Diseñar la configuración espacial óptima de los equipos dentro de la estación de bombeo.

Identificar y decidir los equipos y componentes hidráulicos que requieren reemplazo en la actualización del sistema.

Determinar los parámetros técnicos hidráulicos y mecánicos necesarios para la implementación de la nueva estación de bombeo.

4. Marco Teórico

4.1 Planta de tratamiento de agua potable

Son estructuras cuyo objetivo primordial es realizar un tratamiento y adecuación del recurso hídrico para sea apto para el consumo humano, en pro de este propósito, se deben diseñar plantas de tratamiento con la capacidad de trabajar con la composición física, química y biológica del agua a tratar, logrando así, tener conocimiento de los componentes a tratar y cuales se deben adicionar para obtener un recurso eficiente para su consumo diario.

Planta de tratamiento de agua potable convencional.

Son plantas de tratamiento en donde cada proceso presente en la potabilización del agua se desarrolla en estructuras diferentes. La planta se encuentra conformada por canales, floculadores, sedimentadores y filtros.

Por lo general, tiempos de residencia del recurso son elevados y generalmente este tipo de plantas son empleadas para abastecer del recurso a ciudades de alta urbanización o algunos municipios.

Figura 1.

Planta de tratamiento de agua potable



Nota. Tomado de: Plantas de tratamiento de agua (2016) *Plantas de tratamiento de agua potable.*

<https://plantasdetratamientodeagua.blogspot.com/2016/05/plantas-de-tratamiento-de-agua-potable.html>

4.2 Sistemas de abastecimiento de agua

4.2.1 Captación

El sistema de captación es el sistema encargado de la retención inicial del agua a potabilizar, este sistema se encuentra en el cauce de ríos o áreas circundantes de lagos y desde ese

punto se extrae el agua a través de distintos sistemas para llegar al tanque inicial de almacenamiento para la realización de los procesos de potabilización.

4.2.2 Bocatomas

Son las obras cuyo propósito es derivar el agua desde la fuente hídrica que alimenta el sistema. Esta fuente puede ser una corriente natural del cauce del río, un embalse o el agua subterránea de un acuífero.

4.2.3 Bocatomas directas

Son estructuras que se diseñan para cursos de agua de fuerte pendiente, tienen el inconveniente de que el lecho del río puede variar debido a la sedimentación lo cual puede obstruir y dejar la toma sin agua, igualmente en las épocas de estiaje, al disminuir el tirante de agua en el río puede disminuir considerablemente el ingreso de agua en la toma.

4.2.4 Bocatoma de rejilla

Tipo de captación que se encuentra en ríos ubicados en áreas montañosas mayoritariamente, se utilizan cuando se cuenta con terreno rocoso o una base sólida, así como en situaciones donde se presenten cambios significativos en el caudal de cursos pequeños de agua. Este método de captación se basa en el uso de una estructura estable de formas variadas, siendo la más común la rectangular. La estructura, ya sea en forma de canal o con tubos perforados

posicionados en el lecho del río, se debe encontrar de forma perpendicularmente al flujo de la corriente y debe estar equipada con una rejilla metálica para retener los sedimentos de un tamaño determinado.

Figura 2.

Foto de la toma de rejilla de la planta de Suaita



4.2.5 Conducción (sistema de bombeo)

Los accesorios y elementos que componen un sistema de bombeo varían en dependencia del tipo de bomba que trabaja, así como de las condiciones de cotas de alturas, distancia, transporte, almacenamiento, disponibilidad, succión y descarga del sistema. Algunos de los accesorios a mencionar son los siguientes:

- Accesorios de Tuberías (Codos, Tees, Registros, Universales, Manómetro, Válvula Check, Válvula de compuerta, Válvula reguladoras de caudal, Válvulas de Pie, Uniones, Tubería de distribución y succión).

- Elementos de Control (Tablero de control, Protecciones térmicas, Supervisión de Tensión, breakers, variadores de velocidad, elementos de mando y señales, pilotos y testigos, sensores de nivel).

- Disponibilidad Energética: responde a todos los elementos que componen la acometida y la red tensión alta o media de donde se tomara el voltaje para el sistema de bombeo, los componentes de control y el cuarto de máquinas (Contador, Poste de luz, Transformador, Cableado de diferente numeración, varillas de anclaje, varillas para aterrizaje a tierra, breakers, conectores, tablero de distribución).

4.2.6 Tratamiento

El tratamiento de potabilización del agua se realiza en la Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP) la cuál es un sistema de infraestructura que somete el agua de las fuentes naturales a procesos químicos, físicos o biológicos para lograr la eliminación de contaminantes y lograr que sea apta para el consumo humano.

4.2.7 Distribución

Es la red de tuberías, estructuras y accesorios que se encargan de transportar el agua tratada desde las plantas de tratamiento hasta los usuarios finales, su función principal es entregar el recurso hídrico cumpliendo tres criterios: Calidad, cantidad y presión, garantizando la llegada al punto de consumo en condiciones óptimas.

4.2.8 Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico (RAS)

El reglamento técnico del sector de agua potable es la norma técnica regente en Colombia la cual define los parámetros operativos mínimos que toda planta de tratamiento de agua potable debe tener a la hora de la realización del diseño, construcción, transporte, puesta en marcha, y mantenimiento de una planta de tratamiento de agua potable (PTAP) en los municipios y ciudades de Colombia, esta norma permite generar parámetros para diseñar y adelantar estos proyectos teniendo en cuenta parámetros de cuidado ambiental en la toma o captación del recurso, hídrico, de su aprovechamiento, demanda y almacenamiento, así como de la calidad del recurso hídrico entregado en términos de potabilidad para el consumo humano a corto, mediano y largo plazo.

4.2.9 Proyecciones poblacionales

La proyección de una población se realiza en proyectos en los cuales las poblaciones a futuro presentan dinámicas de reducción o crecimiento que permitieran definir parámetros de trabajo del proyecto a desarrollar, en este caso para un sistema de distribución de agua definiría el caudal y los parámetros de operación que debe manejar el sistema para que en la proyección futura el sistema no termine siendo obsoleto o deficiente para la suplencia del recurso hídrico de la comunidad y garantice años de operación, disponibilidad y calidad a la población.

Para llevar a cabo la proyección de la población objetivo, se deben tener en cuenta las proyecciones de entes descentralizados de estadística del gobierno como el DANE que se encarga del seguimiento estadístico de la población y sus dinámicas económicas, de salud, educación y elementos que definen y garantizan la calidad de vida de la población como lo es la cobertura y

calidad del agua potable y el alcantarillado en la extensión de Colombia, para el caso de la proyección de la población, se puede iniciar realizando un análisis de las proyecciones o dinámicas de crecimiento poblacional o mortalidad que el DANE posee para la época actual (2025) lo cual define la densidad poblacional del municipio de Suaita, en el departamento de Santander.

4.2.10 Proyección de la población según el nivel de complejidad

De acuerdo con RAS, el método de cálculo para la proyección de la población depende del nivel de complejidad del sistema, como se indica en la tabla B.2.1. del RAS 2017.

Para determinar la proyección poblacional, se hace necesario utilizar uno de los siguientes modelos matemáticos: aritmético, geométrico o exponencial. Según lo anterior, se seleccionará el modelo que mejor se ajuste al comportamiento histórico de la población.

Es importante tener en cuenta los datos de población flotante y migratoria al realizar los cálculos los cuales se pueden determinar a través del DANE.

En caso de ausencia de datos, se recomienda realizar una revisión de las proyecciones disponibles en poblaciones aledañas que presenten un comportamiento de crecimiento similar al de la población objeto de este proyecto.

Figura 3.

Métodos de cálculo autorizados según los niveles de complejidad de la población

Método por emplear	Nivel de Complejidad del Sistema			
	Bajo	Medio	Medio alto	Alto
Aritmético, geométrico y exponencial	X	X		
Aritmético, geométrico, exponencial, otros			X	X
Por componentes (demográfico)			X	X
Detallar por zonas y detallar densidades			X	X
Método gráfico	X	X		

Nota. Tomado de: Reglamento Técnico del sector de agua potable y Saneamiento. (RAS)

4.2.11 Método de cálculo según la densidad poblacional del municipio

La RAS realiza recomendaciones para el cálculo de la proyección de la población según el nivel de complejidad del sistema, esto permite relacionar el método matemático a ejecutar según la densidad de habitantes en el municipio.

Para esto, se hace necesario conocer la densidad poblacional actual del municipio, según el DANE, Suaita posee una población actual de 8771 habitantes los cuales aumentan a 10031 habitantes teniendo en cuenta la población total ajustada por omisión (Población visitante o aledaña), siendo la omisión total de 12.6% (DANE, 2025).

Para fines del trabajo a realizar se va a tomar como dato de evaluación la mayor cantidad de habitantes (10031) para definir el método a usar según la siguiente figura:

Figura 4.*Método según la densidad poblacional*

Método	Población (habitantes)			
	Hasta 5000	De 5001 a 20000	De 20001 a 100000	Mayores a 100000
Aritmético	X	X		
Geométrico	X	X	X	X
Exponencial	X (2)	X (2)	X (1)	X
Curva Logística				X

(1) Optativo, recomendable

(2) Sujeto a justificación

Nota. Tomado de: Reglamento Técnico del sector de agua potable y Saneamiento

Al revisar la tabla, se puede determinar que se pueden usar 3 métodos debido a que la población se encuentra en el rango de 5001 a 20000 habitantes, estos métodos son: Aritmético, Geométrico y Exponencial. Para efectos del proyecto, se planea usar el método geométrico debido a que es recomendable ya que el crecimiento poblacional no es lineal y no se ve limitado a las condiciones del método exponencial.

El método geométrico.

Este método supone que el crecimiento poblacional es proporcional al tamaño de esta, En dicho caso, el patrón de crecimiento es parecido al del método aritmético. Este método se recomienda para periodos de tiempo cortos (10-15 años) y poblaciones que se encuentra en pleno desarrollo.

La ecuación es la siguiente:

Ecuación 1*Método geométrico*

$$P_d = P_a (1 + r)^t$$

Donde:

P_d = Población destino. (Hab)

P_a = Población actual. (Hab)

r = Tasa de crecimiento anual. (%)

t = Periodo de diseño. (años)

Para determinar la tasa de crecimiento anual se utiliza la siguiente ecuación:

Ecuación 2

Tasa de crecimiento anual

$$r = \left(\frac{P_t}{P_{t-n}} \right)^{1/n} - 1$$

Donde:

P_t = Población obtenida de último censo.

P_{t-n} = Población obtenida desde el último censo y el primero.

n = Periodo entre el último censo y el primero.

4.2.12 Criterios de diseño.

Después de realizar una revisión de las diversas publicaciones y actualizaciones del RAS (Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico Título B – Sistemas de Acueducto), se va a relacionar algunos de los conceptos y parámetros a tener en cuenta en la proyección de los sistema de bombeo, y de las condiciones actuales de la PTAP, los afluentes, las bocatomas y los ecosistemas donde se encuentran estas zonas de captación, es importante resaltar que aunque el proyecto le otorga prioridad a la estructuración del sistema de bombeo como motor de impulsión para el transporte y aprovechamiento del recurso hídrico para mejorar con esto la

calidad y disponibilidad de este, hay varios parámetros meteorológicos, del calentamiento global, hidrográficos, ambientales, sociales, características de consumo, de infraestructura, que hacen parte del correcto funcionamiento, la calidad del servicio que ofrece, la calidad de vida de los habitantes del casco urbano y la disponibilidad sin comprometer sus ecosistemas, sus fuentes hídricas y en el caso más severo, la vida humana, varios de estos aspectos técnicos se nombran en el RAS y serán tratados en el transcurso del desarrollo de este proyecto.

Como lo indica el capítulo 4 del RAS en lo que compete a los criterios básicos para la captación en fuentes superficiales, los siguientes parámetros deben ser tenidos en cuenta para la elaboración de un diseño o reestructuración del mismo, se debe resaltar que este proyecto se encuentra dirigido a la mejora y no a la reestructuración de un proyecto desde cero, relacionaremos los aspectos a considerar en la infraestructura que conforma en el actual sistema de acueducto del municipio y que posiblemente se puedan corregir.

Facilidad de operación y mantenimiento.

La RAS recomienda que, al diseñar las estructuras de captación, es necesario incluir mecanismos para aliviar o liberar el exceso de agua. Además, es importante establecer medidas para la prevención de la entrada de materiales u objetos no deseados. En caso de presentarse la necesidad, se debe considerar la instalación de un desarenador después de la estructura de captación. También es fundamental contar con métodos de limpieza y control de los caudales tanto en el desarenador como de la conducción del agua. En cualquier caso, es fundamental diseñar la estructura de captación de forma que requiera el mínimo mantenimiento para su correcto funcionamiento. En cuanto a este aspecto se realizará una revisión para determinar si las zonas de captación cuentan con su respectivo desarenador, así como algunos componentes hidráulicos de la

red de distribución para la limpieza, purga y remoción de sedimentos en la tubería como en las rejillas de la bocatoma.

Lejanía de toda fuente de contaminación.

Es necesario seleccionar un lugar acorde y alejado de cualquier foco o fuente de contaminación para la ubicación de las estructuras de captación. En la medida de lo posible, la norma recomienda que las captaciones se sitúen aguas arriba de las áreas habitadas, evitando así el contacto con las descargas de aguas residuales domésticas e industriales. En cuanto a este aspecto se debe revisar que el cauce que desarrolla las quebradas desde su nacimiento hasta la zona de captación no están siendo intervenidas por aguas servidas o escorrentías de agua que puedan contaminar el afluente, esto complementará a la respectiva ronda hídrica de 30 metros según Decreto 2245 de 2017 del gobierno nacional designada para los afluentes.

Aprovechamiento de la estructura existente.

Este proyecto implica la ampliación de un sistema de acueducto ya existente, es importante mencionar que el consultor evalúe la viabilidad de utilizar la infraestructura de captación existente. En caso de decidir aprovechar estas estructuras, se debe planificar cuidadosamente las obras de manera que se minimicen las interrupciones en el servicio. De acuerdo con los objetivos de este documento se debe realizar una revisión de cada uno de los componentes de la infraestructura construida, los cuales constituyen el actual sistema de acueducto y sus componentes, esto con el fin de buscar mejorías o corregir aspecto que impidan al sistema y sus operadores el debido funcionamiento.

Cerramientos.

Es necesario que la zona de la bocatoma posea las medidas de protección y cercado para evitar el ingreso de personas y animales no autorizados.

En relación con este aspecto, se revisará el cumplimiento de la normativa correspondiente a las áreas de protección cercanas a cuerpos de agua, considerando también los elementos de protección instalados y dispuestos en la bocatoma y sus alrededores, en línea con las previas consideraciones acerca de mantener distancia de fuentes de contaminación.

Accesos.

Las estructuras de captación deben ubicarse en áreas que sean de fácil acceso humano, facilitando de esta forma las labores de reparación, limpieza y mantenimiento.

En caso de que no existan accesos adecuados, se debe diseñar considerando la construcción de las vías necesarias para permitir el acceso.

En caso de reaprovechar la infraestructura existente, se debe verificar si los accesos se pueden mejorar.

5. Metodología

En este proyecto se llevarán a cabo varios elementos de investigación exploratoria, documental y de diseño, las cuales permitirá recopilar datos, parámetros de las problemáticas y la realización del análisis respectivo de los datos obtenidos, se puede realizar las respectivas recomendaciones, proyecciones e implementación de las alternativas basadas en los parámetros que el RAS recomienda para los municipios de Colombia, en las distintas bibliográficas y cibergráficas sobre el tema tratado, y en los conocimientos del director del proyecto y los diferentes

conceptos aprendidos en las asignaturas adelantadas del programa de ingeniería mecánica de la UIS.

5.1 Variables de estudio

Durante la realización de este proyecto, se tendrán en cuenta principalmente si las alternativas cumplen con la capacidad de mantener la estabilidad del servicio durante los siguientes 15 años previos al año de desarrollo de este proyecto (2025), también, se debe tener concordancia con los objetivos a desarrollar durante el trabajo, por lo tanto, se le otorgará prioridad a la estación de bombeo, por lo tanto, los aspectos a considerar son: El estado y la posibilidad de reutilización de las instalaciones actuales, la tasa de crecimiento poblacional y la demanda futura, la posibilidad de rediseñar de la estación de bombeo y el análisis de los componentes hidráulicos y mecánicos de la estación de bombeo, el impacto económico.

Campos como la influencia social o ambiental se tendrán en cuenta más no serán prioritarios en el desarrollo del proyecto.

5.2 Instrumentos de medición

Para el desarrollo de este proyecto se hace necesario implementar instrumentos de medición adecuados a los requerimientos, dichos instrumentos deben permitir el análisis y la comparativa en pro de complementar los objetivos establecidos, un instrumento de medición adecuado es el que permite el registro de datos observables que representan en veracidad los

conceptos o variables que se poseen, estos instrumentos deben ser de carácter confiable, válido y objetivo (Hernández & Fernández, 2014).

El instrumento de medición escogido o primordial serán las escalas, ya que permiten comparar numéricamente los valores otorgados por las distintas alternativas a desarrollar, otros instrumentos de recolección de datos a utilizar son la observación y el análisis de los datos obtenidos para verificar el cumplimiento de los objetivos propuestos.

5.3 Análisis estadístico

Es el proceso de recolección, organización, interpretación y análisis de datos para el descubrimiento de patrones, tendencias y la extracción de conclusiones significativas. Sus componentes principales son la recopilación y organización, el análisis descriptivo, el análisis inferencial y el análisis multivariado.

De los distintos tipos de análisis existentes (Descriptivo, Inferencial, Predictivo, Prescriptivo y Exploratorio) se determina que el tipo que más se adecúa a los fines definidos es el descriptivo el cual es el utilizado para describir las características de un conjunto de datos. La data suele ser sintetizada en tablas, cuadros y gráficos.

Para realizar el análisis de datos, se deben seguir los siguientes pasos:

- Definir un problema: Es la necesidad que se quiere satisfacer, a partir de ese punto es de donde se puede enfocar los esfuerzos, optimizar los recursos y analizar datos de forma eficiente.
- Diseño de estrategia de recopilación de datos.
- Organizar los datos obtenidos: Es la homogenización de la información, en esta fase se separan los datos según su utilidad.

- Analizar los resultados: Es la determinación de los resultados de los datos.
- Conclusiones.

Estos pasos serán desarrollados durante la aplicación del proyecto.

6. Desarrollo del proyecto

Para iniciar el proyecto, es necesario aclarar el contexto geográfico, ambiental y socioeconómico del municipio de Suaita en el departamento de Santander.

Suaita es un municipio colombiano ubicado en el departamento de Santander. Es fundamental describir su localización exacta (coordenadas geográficas), altitud, clima predominante (temperaturas medias, patrones de precipitación), hidrografía (mencionar los ríos principales, especialmente el río Tolotá y las fuentes actuales de abastecimiento), tipo de suelo y topografía. Estos elementos influyen directamente en el diseño hidráulico y la viabilidad del proyecto, para el proyecto, es necesario mencionar que la planta de tratamiento de agua potable (PTAP) se alimenta del río Tolotá. (Ministerio de Ambiente y Desarrollo sostenible, 2022)

Figura 5.*Ubicación de Suaita*

Nota. Tomado de: Colombia map.

Continuando con el contexto, es necesario detallar la población actual (según DANE, 2022), las principales actividades económicas (agricultura, ganadería, comercio, turismo), y el nivel de desarrollo de los servicios públicos básicos. Conocer las dinámicas económicas y sociales permite comprender la demanda hídrica y las necesidades de la comunidad, el municipio cuenta con una población aproximada de 8771 habitantes los cuales aumentan a 10031 habitantes teniendo en cuenta la población total ajustada por omisión, siendo la omisión total de 12.6% (DANE, 2025), datos que fueron mencionados con anterioridad pero que se hace necesario mencionarlos nuevamente debido a la necesidad para el cálculo y compactación de la información.

Esta población se encuentra distribuida en aproximadamente 4845 unidades de vivienda en el casco urbano del municipio de los cuales aproximadamente 3201 del total de las viviendas se encuentran ocupadas por personas presentes. La distribución de las unidades de vivienda es la siguiente:

Figura 6.*Distribución de los tipos de viviendas del municipio de Suaita**Nota.* Tomado de: DANE, (2025)

Luego de conocer la distribución de las viviendas, es necesario conocer cuales es la distribución de los servicios públicos debido a que gran parte de la población no cuenta con servicio de acueducto debido a que pertenecen a 4 corregimientos rurales de Suaita, esta condición los exime del servicio debido a estar este centralizado en el casco urbano:

Figura 7.*Distribución de los servicios públicos en el municipio de Suaita**Nota.* Tomado de: DANE, (2025)

En el gráfico se presenta el porcentaje de las unidades de vivienda totales que cuentan con los servicios públicos mencionados, dicha unidades se encuentra en su gran mayoría en el casco urbano, es decir, el 98.7% de las unidades de vivienda totales cuenta con servicio de energía

eléctrica y el 62.4% cuenta con servicio de acueducto, esta información permite determinar la cantidad de unidades de vivienda que poseen distintos servicios.

Luego de definidos estos datos, se procede a calcular el número de edificios que cuentan con el servicio de acueducto debido a que el 62.6% de las unidades de viviendas (casas, edificios, cuartos, entre otros) cuenta con servicio de acueducto, para ello, se realiza la siguiente operación:

$$\#de\ edif\ con\ acueducto = \#viviendas\ ocupadas * \% \text{ Un de vivienda con acueducto} \#de\ edif\ con\ acueducto = 3201 * 62.6\%$$

$$\#de\ edif\ con\ acueducto = 2004\ unidades\ de\ viviendas$$

Ya teniendo el número de edificios que presentan el servicio de acueducto, se procede a buscar el mapa de acueducto del municipio para identificar la red hídrica de la zona y entender las necesidades del proyecto, este apartado, será tratado más adelante.

Teniendo en cuenta las condiciones del sistema de acueducto del municipio, se plantea que el siguiente proyecto se ha diseñado atendiendo las principales actividades a desarrollar durante el transcurso del proyecto según los objetivos planteados. Conforme a ello, se desarrollan las siguientes actividades:

6.1 Diagnosticar las condiciones de la planta de abastecimiento de agua

Esta fase inicial sigue el modelo de evaluación propuesto por (Gonzales F., 2004), estableciendo un diagnóstico exhaustivo para cualquier intervención.

Para esto, se establecen los siguientes pasos:

- 1- Levantamiento de la información sobre infraestructura hidráulica existente

- Revisión documental: Recopilación de planos, informes técnicos, estudios previos, registros de operación y mantenimiento de la PTAP, el sistema de bombeo actual y la red de distribución.

- Visitas de campo: Inspección de las instalaciones de captación (bocatoma actual), estación de bombeo (si existe), línea de aducción/impulsión y la PTAP para evaluar su estado físico, capacidad operativa, nivel de deterioro y problemas de funcionamiento. Se realizarán entrevistas con el personal operativo.

2- Evaluación del rendimiento de equipos de bombeo actuales mediante auditoría energética (Martínez-López, 2022).

- Medición de parámetros operativos: Caudal, presión de succión y descarga, consumo de energía eléctrica (voltaje, corriente, potencia), altura dinámica total.

- Cálculo de eficiencia de las bombas: Determinación de la eficiencia global del sistema para identificar oportunidades de mejora y cuantificar las pérdidas energéticas (Martínez, 2022).

3- Identificación de puntos críticos mediante modelado hidráulico (Sánchez-Molina et al., 2021).

- Mapeo de la red: Creación o actualización de un esquema georreferenciado de la red de tuberías.

- Simulación inicial (ej. EPANET): Utilización de software especializado para identificar tramos con bajas presiones, altas velocidades, pérdidas excesivas o cuellos de botella en la distribución y bombeo (Sánchez-Molina et al., 2021).

Según la OPS (2022) se confirma que el enfoque de este diagnóstico permite determinar deficiencias técnicas y operativas que afectan la continuidad del servicio. Luego de obtener los datos de la planta de distribución, se puede realizar el análisis y diagnóstico del estado en el que

se encuentra, por lo tanto, se busca el histórico de data de la planta para establecer la línea base de evaluación y diagnóstico inicial, esto permite conocer las posibles falencias presentes para futuras correcciones o reformulaciones.

La empresa dispone de un banco de información en su mayoría en papel, la componente digital se encuentra limitada, lo cual dificulta la transferencia de archivos, por lo tanto, la mayoría de la documentación leída posee información dispersa.

6.2 Levantamiento de la información sobre infraestructura hídrica existente

En la revisión documental inicial de las fuentes de información y data de la empresa, se plantean las siguientes preguntas para la realización de una evaluación inicial del estado de la planta de distribución de agua potable:

1- ¿Existen planos de la estructura y de distribución de las bombas documentados adecuadamente?

2- ¿La reingeniería se encuentra alineada con los objetivos de negocio de la empresa?

Para resolver estas cuestiones, es necesario disponer de documentos como los planos de la planta, el historial de mantenimiento, el programa y control de mantenimiento, las ordenes de servicio, las hojas de vida de las bombas. Realizando la búsqueda documental se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 1.

Resultados de búsqueda documental

Nº	Documento	Cantidad	Medio
1	Hoja de vida de las bombas	1	Físico/Papel

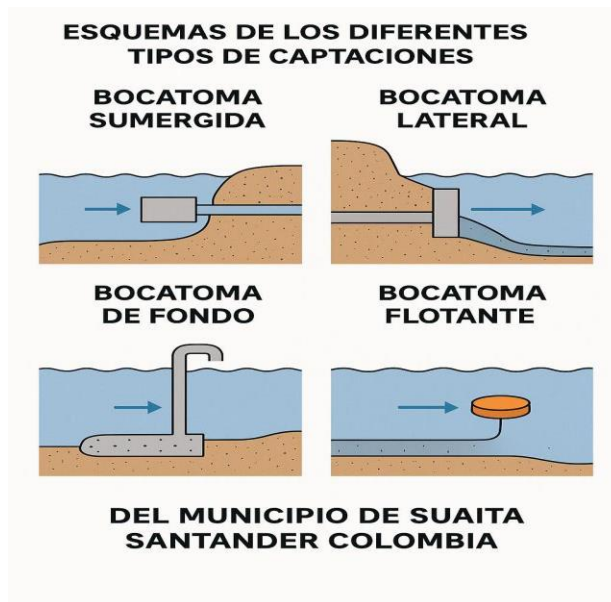
N°	Documento	Cantidad	Medio
2	Cronograma de mantenimiento preventivo	0	Físico/Papel
3	Ordenes de servicio de mantenimiento	0	-
4	Planos de la planta de distribución de agua potable	5	Físico/Papel

En la Tabla 1, se muestran los resultados obtenidos luego de la revisión documental de la planta, se puede observar que no se encuentran registros de ordenes de mantenimiento, esto se debe a que el registro de las acciones realizadas durante las actividades de mantenimiento se registran en distintos documentos, se observa que el historial de fechas de realización de actividades de mantenimiento se registra en el cronograma, los planos de la captación fueron proporcionados a fin facilitar la realización del proceso. Esto permite denotar una falencia inicial debido a que hay dispersión en la información, realizando la consulta, se explica que la data se encuentra dispersa debido a que distintos funcionarios internos poseen distintos datos según sus especialidades.

Durante la visita de campo se aclaró que la información de hoja de vida de las bombas se encontraba extraviada, se realizó inspección de las instalaciones de captación de agua, se pudo evidenciar que manejan 4 tipos de bocatomas separadas como se puede evidenciar en la siguiente imagen:

Figura 8.

Esquema de captaciones de agua



En la figura se observan los 4 tipos de captación de agua que posee la planta, estos se encuentran ubicados de la siguiente manera: 2 en el cauce de río y 2 en el lago, estas bocatomas desembocan en las pocetas de cribado para realizar los procesos de purificación en la PTAP, procesos que son descritos en el siguiente diagrama:

Figura 9.

Diagrama de procesos de tratamiento de la PTAP



La figura nos permite evidenciar todos los procesos desarrollados en orden, estos procesos se realizan para lograr la purificación y condicionamiento, de forma rápida se explican cada fase:

- 1- Captación: Fase en donde se extrae el agua de la fuente hídrica. (Anexo 1)
- 2- Cribado: Proceso mecánico de eliminación de objetos grandes y residuos sólidos del agua, es la etapa preliminar que permite proteger los equipos frente a cuerpos o residuos presentes durante la captación, en la planta objeto del proyecto se usa una rejilla que atrapa los sólidos de mayor tamaño. (Anexo 2)
- 3- Mezcla: Fase en donde se busca desestabilizar las partículas pequeñas que se encuentran suspendidas en el agua.
- 4- Floculación: Se realiza mediante la aplicación de productos al agua los cuales tienen el propósito de formar flóculos en el agua los cuales son masas de partículas presentes en el agua que se agrupan formando cuerpos los cuales son retirados mediante el proceso de decantación.
- 5- Decantación: Proceso en el cual el agua se deja en una piscina durante un periodo de tiempo para que los flóculos se acumulen en la base de esta y el agua pretratada sea retirada sin la presencia de estos. (Anexo 3)

6- Filtración: Proceso en el cual el agua atraviesa una serie de filtros de granulometría 0.9 mm que retiene las partículas y vuelve transparente el agua.

7- Desinfección: Proceso que sucede mediante la cloración la cual consiste en agregar cantidades de cloro al agua mientras se realiza un proceso de mezclado lento, se usa el cloro por su efecto residual.

Nota: Los pasos anteriormente mencionados, se extrajeron de la guía docente: Los servicios de agua y saneamiento. (Ministerio de obras públicas de Argentina, 2017)

Durante la visita, se realizó una entrevista a los funcionarios para captar información relevante la cual permita el progreso del proyecto, el personal informa que la planta recibió mejoras recientes (año 2024) las cuales actualizaron parte del sistema de bombeo (sistema eléctrico del cuarto de máquinas) y el sistema de tuberías, también se mencionó y se visitó el tanque de almacenamiento de agua el cual se encuentra en la Vereda Gad, a 850 metros de la cucuteña, el tanque, cuyas medidas son 2.5m de ancho, 3m de alto y 4m de largo, se encuentra justo al lado del cuarto de máquinas, el cual es un cuarto de 4x2 metros el cual posee 4 bombas centrífugas de 25Hp las cuales están ubicadas en serie y se encargan de funcionar en un sistema 2n+1 en el cual la bomba sobrante queda como de reserva, estas bombas se encuentran comandadas mediante un gabinete eléctrico y usando un logo de automatización que se encarga de las rutinas de encendido. (ANEXOS 4,5,6)

6.3 Evaluación del rendimiento del sistema de abastecimiento mediante auditoría interna

Para la realización de la auditoría de funcionamiento y gestión es necesario, inicialmente, establecer parámetros y estrategias en pro de realizar una evaluación completa e integral, para ello,

se deben establecer los fundamentos del proyecto, los cuales deben ser muy racionales y de sentido común permitiendo así el espacio a la imaginación y la habilidad para estructurar y re-estructurar los patrones actuales del sistema.

Para lograr lo anteriormente se decide usar la estrategia de proyecto Seis Sigma, la estrategia se define como un proceso muy basado en el sentido común y muy organizado que puede conducir a logros fuera de lo común, se centra en analizar a fondo las necesidades de los clientes y los procesos que dan cumplimiento y satisfacción a esas necesidades.

Ya definidos los preceptos de la metodología Seis Sigma, se establecen los siguientes pasos o Sigmas:

1. Fase 1: Identificación del problema.

Es primordial identificar, definir y cuantificar con exactitud el problema o situación a mejorar con sus indicadores correspondientes.

2. Fase 2: Establecer las bases.

Luego del diagnóstico, se establecen flujos que parten de unas bases iniciales (cuantificación de recursos, bases metodológicas, riesgos de partida, etc..)

3. Fase 3: Seis Sigma MECE (Mutuamente Exclusivo Colectivamente Exclusivo).

Implica que el equipo de trabajo debe confiar en el proyecto y este debe ser lo suficientemente esclarecedor y específico para que los temas relevantes se consideren de forma exclusiva.

4. Fase 4: Exposición.

Implica exponer el proyecto a los encargados para definir el apoyo y subsanar dudas.

5. Fase 5: Diseño del proyecto Seis Sigma.

Se definen actividades del proyecto, el progreso, los responsables de cada actividad y la concatenación de estas con el resto.

6. Fase 6: Análisis de correcciones y experiencias.

Cuando se finaliza el proyecto exitosamente, es crucial realizar un análisis de este cerrándolo formalmente, reconociendo los actores principales (stakeholders).

Siguiendo los pasos anteriormente mencionados a fines del desarrollo del proyecto, se procede a aplicarlos de la siguiente manera:

1. Fase 1: El problema que se desea resolver es el mejoramiento de la planta de captación de agua al cuál se le realizará seguimiento a través de mediciones de parámetros como el consumo eléctrico general, condiciones de operación y trabajo, control técnico de instalaciones, caudal, presión de succión y descarga y altura dinámica total.

2. Fase 2: Para establecer las bases del proyecto, se debe entender lo existente, los precedentes, luego del análisis inicial, se lograron evidenciar algunas falencias la principal fue que luego de la actualización del sistema no solucionó el problema de suministro debido a la caída general del caudal del río, por lo tanto, se fundamenta el proyecto en la corrección y el mejoramiento de la planta de distribución de agua potable.

3. Fase 3: El equipo de ingeniería de la PTAP de Suaita se encuentra comprometido a disponer toda su información y conocimiento para el desarrollo de esta estrategia, por lo cual, se dispone de toda la información documental posible.

4. Fase 4: Se propone una reunión para exponer los puntos y los objetivos del plan, se informa al equipo de las fases del proyecto y se resuelven dudas, se realiza una investigación histórica del problema y se definen oportunidades de mejoras.

5. Fase 5: Se definen los siguientes pasos de aplicación:

- Investigación histórica y revisión de documentación por parte HSE.
- Visita de campo a la sede de la PTAP de Suaita.
- Evaluación del estado del cuarto de bombas.
- Auditoría de la PTAP.
- Análisis de resultados.

6. Fase 6: Correcciones y resultados.

Para la aplicación de la fase 5 y 6, es necesario hablar de los parámetros de la auditoría, por lo tanto, deben comprender lo siguiente:

1- Adecuación de las bombas de distribución: Compete a la organización y adecuación de las bombas de distribución.

2- Medición de parámetros operativos: Compete a los rangos de caudal, presión de succión y descarga, consumo de energía eléctrica y altura dinámica total.

Para la realización de la auditoría se utilizan rangos de medición ideales según sistemas de distribución existentes.

6.3.1 Parámetros de auditoría

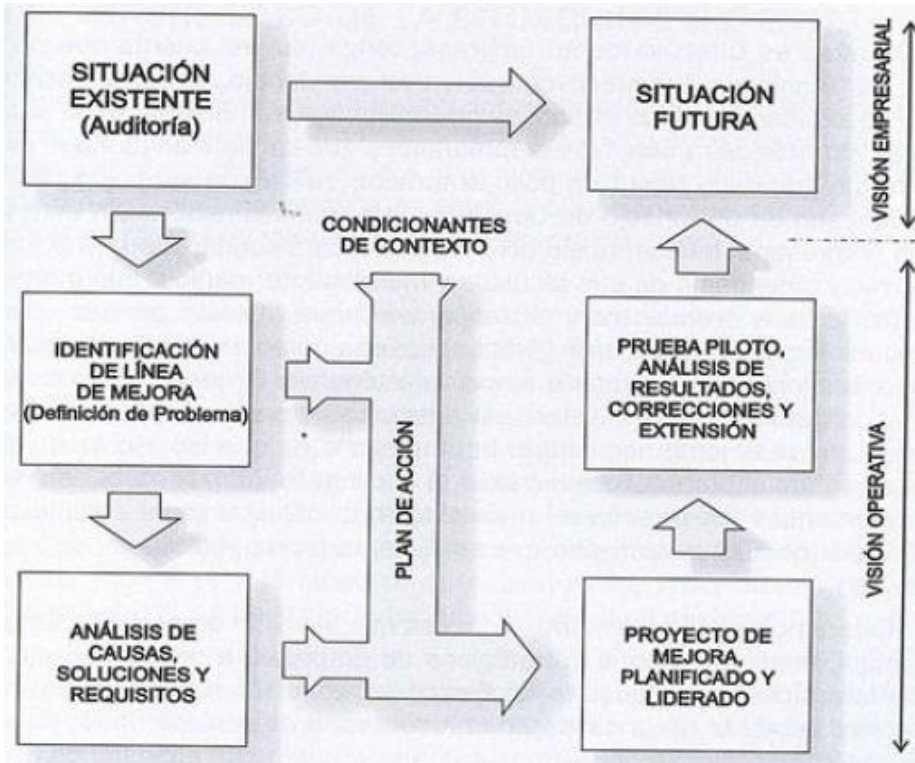
Al presentarse la necesidad de identificar y definir indicadores claros para los objetivos que se establecieron anteriormente en el proceso de mejora, se debe iniciar a partir de los datos contrastados sobre la situación existente, con su grado de problema correctamente medido.

Los diagnósticos deben concretarse y medirse matemáticamente debido a que el diferencial de mejora respecto a la situación actual será el resultado del proyecto, resultado que justificará la

realización del trabajo, por lo tanto, se establece el siguiente flujograma que establece la guía de procesos a realizar para concretar los objetivos.

Figura 10.

Flujograma de trabajo



Nota. Tomado de: Fernández, F, (2004) *Auditoría e indicadores de gestión*

Teniendo ya definida la guía de trabajo, se hace necesario identificar las áreas de mejoras, para ello, se realiza un proceso de análisis de causa a través de un análisis FODA (Fortalezas, Oportunidades, Debilidades, Amenazas) el cual busca esclarecer los campos potencialmente mejorables (además de los ya identificados) , es muy conveniente analizar el entorno que condiciona de forma tanto positiva como negativa cada campo de evaluación y, por tanto, las posibilidades de éxito de los objetivos de mejora a determinar.

Tabla 2.

Análisis FODA

Campos por mejorar	
Auditoría del sistema de abastecimiento de agua	
Fortaleza	<p>Alto cabezal de descarga</p> <p>La PTAP se encuentra en condiciones óptimas para afrontar el crecimiento de la demanda debido a varias piscinas de cribado y decantación inactivas (2)</p>
Oportunidad	<p>Las tuberías de distribución se encuentran adaptadas para el crecimiento poblacional debido a que hay varios nodos disponibles</p> <p>La incorporación de variadores de velocidad en las bombas permite ajustar la presión de salida con mayor precisión, procurando una presión constante y optimizando la eficiencia energética.</p> <p>Para alcanzar presiones altas, este arreglo puede ser más económico que adquirir una sola bomba multi-etapas de gran potencia.</p>
	<p>La falla de una sola bomba podría comprometer la operación de todo el sistema debido a las pérdidas generadas por la baja de la bomba.</p> <p>El sistema se encuentra optimizado para proporcionar un caudal específico a la población debido a los sistemas de control del cuarto de máquinas. Si la demanda fluctúa, este sistema no puede ajustar su caudal de salida con facilidad sin sistemas de control adicionales.</p> <p>Demoras en la construcción de nuevas tuberías de distribución orientadas a las zonas que están siendo recientemente habitadas. (circundantes al municipio)</p> <p>Un aumento no proyectado en la población de la zona o en el consumo neto puede saturar la capacidad del sistema, requiriendo una inversión a la prevista para su ampliación.</p> <p>La presencia de sedimentación podría afectar el sistema provocando la parada de las bombas o la falla en el suministro.</p>
	Debilidad
	Amenaza

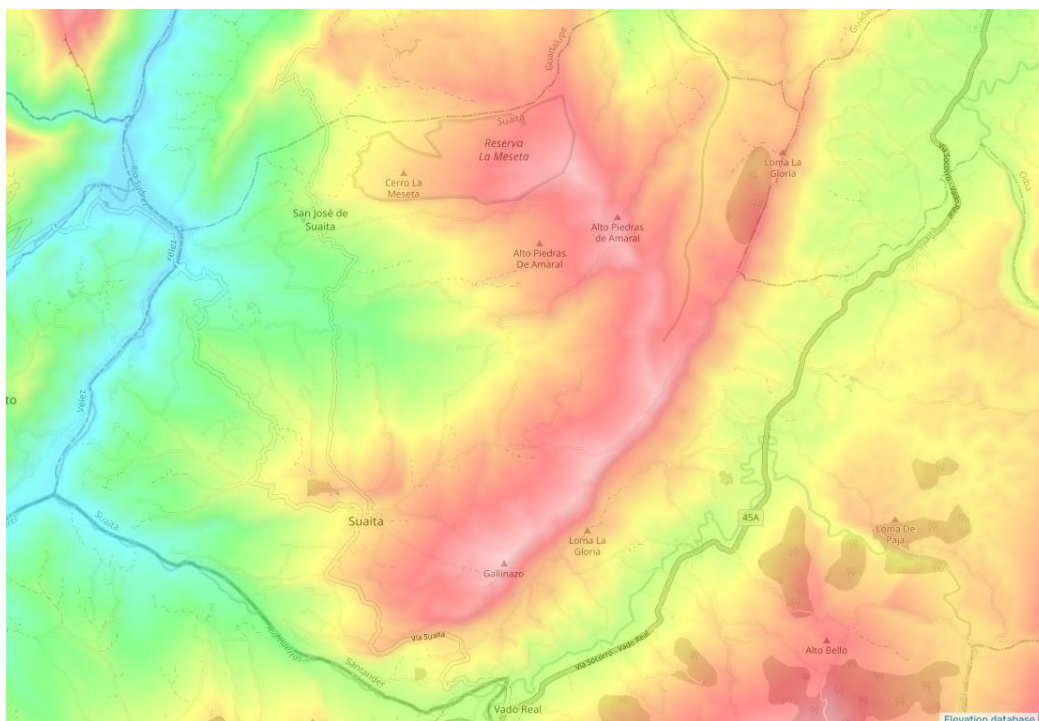
La tabla permite identificar a cuáles áreas es necesario enfocar esfuerzos para lograr fortalecer los campos débiles, por lo tanto, se justifica la aplicación de una evaluación y análisis inicial orientada a la reingeniería de la planta de distribución de agua potable.

6.4 Topografía

La topografía del municipio de Suaita, Santander, se caracteriza por un relieve de carácter quebrado con pendientes moderadas a fuertes taludes, con alturas presentes superiores a los 50 metros. La altitud media del área es de 1668 metros sobre el nivel del mar (msnv). Este relieve facilita la presencia de varios pisos térmicos, distribuyéndose de la siguiente forma: Cálido a lo largo de 55 kilómetros cuadrados, medio a lo largo de 100 kilómetros cuadrados que es el punto donde se encuentra el área urbana que posee 34 kilómetros cuadrados de la extensión total y frío que se extiende por 10 kilómetros cuadrados. (Topographic map, 2025)

Figura 11.

Mapa topográfico de Suaita



Nota. Tomado de: Topographic Map, (s.f.) Página Oficial www.Topographic-map.com

6.4.1 Distancia entre el río Tolotá y Suaita

La distancia en línea recta entre el río Tolotá y el municipio de Suaita es de aproximadamente 27 kilómetros, este río no es principal, es un arroyo o afluente presente en la región. (Ministerio de Vivienda, 2021).

6.5 Calidad del agua

Según los datos proporcionados por los encargados del acueducto, se realiza mensualmente estudios de aguas tratadas y sin tratar, esto con el propósito de revisar la calidad del servicio y las mejoras posibles en el tratamiento que les permitan ofrecer y entregar en su operación resultados ajustados a la normativa de consumo potable del acueducto y sus estándares mínimos que define la superintendencia de servicios públicos al verificar en su operación que no comprometan la calidad de vida de los habitantes del casco urbano.

Si bien no se poseen datos estadísticos de casos puntuales de enfermedades relacionadas a la calidad del agua, los porcentajes referentes de la cobertura de acueducto y alcantarillado reflejan posibles problemáticas que se pueden desatar si no se mejoran las condiciones de almacenamiento, el tratamiento de aguas servidas y la disponibilidad hídrica para el futuro y con esta su calidad.

6.6 Análisis de la demanda actual

De acuerdo con los datos del DANE recopilados en el censo poblacional del 2025, la población reportada del Suaita es de 10031 habitantes los cuales se encuentran en 2004 unidades

de vivienda, esto permite la realización del calculo de demanda actual siguiendo los parámetros de la RAS.

6.6.1 Caudal consumido por habitante

Debido a que se conoce la densidad poblacional actual, se procede a hallar el nivel de complejidad según la población a través de la siguiente tabla:

Figura 12.

Nivel de complejidad del sistema

NIVEL DE COMPLEJIDAD	POBLACIÓN	CAPACIDAD ECONÓMICA DE LOS USUARIOS
BAJO	MENOR A 2.500	BAJA
MEDIO	2.501 A 12.500	BAJA
MEDIO ALTO	12.501 A 60.000	MEDIA
ALTO	> 60.000	ALTA

Nota. Tomado de: Guia RAS-001

Debido a que la densidad poblacional es de 10031 habitantes, se determina un nivel de complejidad medio (Ministerio de Vivienda, 2021).

6.6.2 Dotación neta

El calculo de la dotación neta se trabaja de acuerdo con la resolución 2320 del 2009 la cual define los criterios de dotación neta máxima para las poblaciones según el clima, para determinar

la dotación actual, se conoce que el clima de Suaita es templado-frío, siguiendo los lineamientos de la resolución, se aplica la siguiente tabla:

Figura 13.

Dotación neta según el clima

NIVEL DE COMPLEJIDAD DEL SISITEMA	DOTACIÓN NETA MÁXIMA PARA POBLACIONES CON CLIMA FRIO O TEMPLADO (L/hab.día)	DOTACIÓN NETA MÁXIMA PARA POBLACIONES CON CLIMA CÁLIDO (L/hab.día)
BAJO	90	100
MEDIO	115	125
MEDIO ALTO	125	135
ALTO	140	1500

Nota. Tomado de Resolución 2320 de 2009

El nivel de complejidad determinado es medio, por lo tanto, se define que la dotación neta es de 115 L/hab día. El valor de dotación neta máxima nos permite definir los porcentajes de consumo destinados, dichos porcentajes se dividen en dotación residencial: 90%, dotación comercial: 6%, dotación institucional: 4%, lo cual nos permite definir la dotación neta real por habitante de la zona como se evidencia en la siguiente tabla:

Figura 14.

Dotaciones según complejos

NIVEL DE COMPLEJIDAD	DOTACIÓN RESIDENCIAL (L/hab.día)	DOTACIÓN COMERCIAL (L/hab.día) (6%)	DOTACIÓN INSTITUCIONAL (L/hab.día) (4%)	DOTACIÓN NETA (L/hab.día)
MEDIO	115	6,9	4,6	126,5

Nota. Tomado de: Resolución 2320 de 2009

También, se procede a calcular el consumo de instalaciones, teniendo en cuenta que es una zona rural, por ende, su cantidad de instalaciones es limitada pero no se puede ignorar, según la norma RAS nos entrega las siguientes tablas para instalaciones:

Figura 15.

Consumo de agua según cada tipo de instalación

Tipo de instalación	Consumo de agua
Oficinas (cualquier tipo)	20 L/m ² /día
Locales comerciales	6 L/m ² /día
Mercados	100 L/local/día
Lavanderías de autoservicio	40 L/kilo de ropa seca
Clubes deportivos y servicios privados	150 L/asistente/día
Cines y teatros	6 L/asistente/día

Tipo de instalación	Consumo de agua
Entretenimiento (teatros públicos)	6 L/asiento/día
Deportes al aire libre, con baño y vestidores	150 L/asistente/día
Recreación social (deportivos municipales)	25 L/asistente/día

Tipo de instalación	Consumo de agua
Educación elemental	20 L/alumno/jornada
Educación media y superior	25 L/alumno/jornada

Tipo de instalación		Consumo de agua
Salud	Hospitales, clínicas y centros de salud	800 L/cama/día
	Orfanatos y asilos	300 L/huésped/día
Seguridad	Cuarteles	150 L/persona/día
	Cárceles	150 L/interno/día

Nota. Tomado de: Norma RAS 2017

Teniendo en cuenta que el municipio de Suaita posee un hospital con 30 camas, dos colegios de básica primaria con capacidad de 120 estudiantes cada uno, un colegio de educación media con capacidad de 250 estudiantes, y un cuartel de la policía con 50 activos, se procede a hacer el cálculo del caudal consumido.

Realizando la suma de los caudales:

$$d_{inst} = 800(25) + 150(50) + 2(20)(120) + 25(250) = 38550 \frac{L}{día}$$

Este valor debe dividirse entre el número de habitantes para que las unidades sean concordantes (L/hab*día), por lo tanto:

$$d_{inst} = \frac{38550}{10031} = 3.84 \frac{L}{hab * día}$$

6.6.3 Nivel de pérdidas:

Hallada la dotación, se procede a determinar las pérdidas debido a factores implícitos en el sistema de bombeo.

- Pérdidas por abducción:

La norma RAS 2017 establece que las pérdidas permitidas por la tubería de abducción rondan entre el 3% y el 5%, para efectos del ejercicio se utilizará el valor máximo.

- Pérdidas en la conducción:

Las pérdidas por conducción se refieren a las pérdidas producidas por las tuberías de conducción, la norma RAS 2017 establece que las pérdidas máximas permitidas son del 5% por lo tanto, se usará dicho valor en el cálculo.

- Pérdidas técnicas del sistema de acueducto:

La guía RAS-001 establece que el porcentaje de perdidas técnicas no debe superar el 25% para sistemas de complejidad media, por lo tanto, se adoptará dicho porcentaje para el cálculo.

6.6.4 Dotación bruta

Según lo establecido en la guía RAS-001 inciso 4 en donde se hace uso del valor de perdidas técnicas del sistema para realizar el cálculo de la dotación bruta con la siguiente formula:

$$d_{bruta} = \frac{d_{neta}}{1 - \%p}$$

En donde:

d_{bruta} : Dotación bruta.

d_{neta} : Dotación neta.

$\%p$: Porcentaje perdidas técnicas del sistema.

La dotación neta del municipio entonces será la suma de la dotación neta por habitante, la dotación de las instalaciones y la dotación del conjunto propuesto la cual es, lo cual nos daría:

$$d_{neta} = d_{hab} + d_{inst} = 126.5 + 3.84 = 130.34 \left(\frac{L}{hab * día} \right)$$

Aplicando la formula:

$$d_{bruta} = \frac{130.34}{1 - 25\%} = 173.79 \left(\frac{L}{hab * día} \right)$$

6.6.5 Demanda

Se determina la demanda del sistema mediante la aplicación de las fórmulas de caudal medio diario, caudal máximo diario y caudal máximo horario.

6.6.6 Caudal medio diario

Es el promedio de los consumos diarios y se calcula usando la ecuación presentada en el numeral 4.2.1 de la guía RAS-001.

$$Q_{nd} = \frac{p * d_{bruta}}{86400}$$

P corresponde a la población servida.

$$Q_{nd} = \frac{10031 * 173.79}{86400} = 20.17(Ls /)$$

- Coeficientes de consumo máximo diario y máximo horario:

La guía RAS-001 en su numeral 4.4.1 establece el coeficiente de consumo diario (K1) en función de la complejidad, tal como se muestra en la tabla:

Figura 16.

Coeficiente de consumo máximo diario

NIVEL DE COMPLEJIDAD DEL SISTEMA	COEFICIENTE DE CONSUMO MAXIMO DIARIO (k1)
Bajo	1,3
Medio	1,3
Medio-Alto	1,2
Alto	1,2

Nota. Tomado de: Guia RAS-001

Se utiliza un K1 de 1,2 para complejidad media-alto.

Utilizando el mismo proceso anterior, se puede definir K2 en la tabla del numeral 4.4.2 de la guía RAS-001:

Figura 17.

Coefficiente de consumo máximo horario

NIVEL DE COMPLEJIDAD DEL SISTEMA	RED DE DISTRIBUCION MENOR	RED SECUNDARIA	RED MATRIZ
BAJO	1,6	-	-
MEDIO	1,6	1,5	-
MEDIO-ALTO	1,5	1,45	1,4
ALTO	1,5	1,45	1,4

Nota. Tomado de: Guia RAS-001

Se adopta un valor de 1,4 para la red de distribución de la zona a trabajar.

6.6.7 Caudal máximo diario

Mediante la formula del numeral 4.4.1 de la guía RAS-001 se puede hallar el caudal máximo diario a partir del valor K1:

$$Q_{MD} = Q_{md} * K1$$

Aplicando la formula:

$$Q_{MD} = 20.17 * 1,2 = 24.21(L/s)$$

6.6.8 Caudal máximo horario

Aplicando la formula del numeral 4.4.2 de la Guía se encuentra la siguiente formula:

$$Q_{MH} = Q_{MD} * K2$$

Aplicando la formula:

$$Q_{MH} = 24.21 * 1,4 = 33.9(L/s)$$

Definiendo así el caudal máximo horario y diario.

6.7 Determinación de la demanda para el año 2040

De acuerdo con los datos del DANE, las proyecciones poblacionales del departamento de Suaita para el periodo 2025-2040 se espera una subida en la población para el año 2040 (DANE, s.f.), a partir de estos datos se calcula la tasa promedio anual de crecimiento para el municipio usando las ecuaciones 1 y 2:

Teniendo en cuenta que, para el año 2023, la población del municipio era de 10592 según el DANE, se procede a usar este dato para calcular la tasa de crecimiento poblacional, se realiza el cálculo:

Aplicando la ecuación 2:

$$r = \left(\frac{10592}{10031} \right)^{1/2} - 1 = 0.027$$

Aplicando la ecuación 1:

$$p_{d=} = 10031(1 - 0.027)^{1.5} = 14959 \text{ habitantes}$$

Según el DANE, las viviendas en el municipio de Suaita se encuentran habitadas por 4 personas en promedio, por lo tanto, se procede a calcular el número de viviendas aproximadas para el 2040:

$$N_{viviendas} = \frac{14959}{4} = 3740 \text{ viviendas}$$

Ya teniendo estos, datos y en consonancia a que ya se realizó con anterioridad el cálculo de dotación, se procede a calcular las dotaciones proyectadas:

6.7.1 Caudal consumido por habitante, dotación neta y cálculo según nivel de complejidad

Retomando la tabla 3, se define un nivel de complejidad medio alto. (Ministerio de Vivienda, 2021)

Revisando la tabla 4 para determinar la dotación, se determina según el clima frío templado, que la dotación por habitante es de 125 L/día.

Se procede a calcular la dotación según complejidad:

$$d_{comp} = 125 + 6\% + 4\% = 136.25 \frac{L}{hab * día}$$

Luego de hallar la dotación según complejidad, se procede a hallar la dotación de las instituciones:

$$d_{inst} = 800(25) + 150(50) + 2(20)(120) + 25(250) = 38550 \frac{L}{día}$$

Este valor se divide entre el número de habitantes ya que, para hallar la dotación neta, se necesita calcular en unidades de L/hab*día, por lo tanto:

$$d_{inst} = \frac{38550}{14959} = 2.57 \frac{L}{hab * día}$$

Se procede a hallar la dotación neta:

$$d_{neta} = 136.25 + 2.57 = 138.82 \frac{L}{hab * día}$$

Ahora, manteniendo el nivel de pérdidas según lo sugerido por la RAS, se procede a hallar la dotación bruta:

$$d_{bruta} = \frac{138.82}{1 - 0.25} = 185.1 \frac{L}{hab * día}$$

Luego de hallar la dotación bruta, se procede a calcular los siguientes caudales: Caudal medio diario:

$$Q_{md} = \frac{14959 * 185.1}{86.400} = 32.04 \frac{L}{s}$$

Se procede a definir los coeficientes de consumo máximo diario y de consumo máximo horario para poder calcular el caudal máximo diario:

En la tabla 7, con un nivel de complejidad medio-alto, se define un K1 de 1.2.

En la tabla 8, con un nivel de complejidad medio-alto, se define un K2 de 1.4 ya que se trabaja con la red matriz.

Teniendo los valores de las constantes, se procede a calcular el caudal máximo diario y el caudal máximo horario:

$$Q_{MD} = 32.04 * 1.2 = 38.45 \frac{L}{s}$$

$$Q_{MH} = 38.45 * 1.4 = 53.83 \frac{L}{s}$$

Ya con estos datos, se denota que el aumento de la demanda futura en un 37% frente a la demanda actual, entonces, se procede a calcular el caudal de diseño.

6.8 Caudal de diseño

Se procede a calcular el caudal de diseño, dicho caudal nos permite determinar las decisiones de diseño y consideraciones necesarias para el sistema.

El caudal de diseño se calcula multiplicando el caudal máximo diario por el número de horas de servicio que, para efectos del ejercicio serían 20 horas:

$$Q_{dis} = Q_{MH} * \left(\frac{24 \text{ horas}}{20 \text{ horas}} \right)$$

Aplicando la formula:

$$Q_{dis} = 53.83 * \left(\frac{24}{20} \right) = 64.60 \left(\frac{L}{s} \right) = 0.0646 \frac{m^3}{s}$$

Obteniendo así el caudal proyectado para el año 2040.

7. Alternativas

En el siguiente capítulo, se proyectarán las posibles alternativas de sistemas de bombeo que permitirán darle disponibilidad hídrica a la población proyectada para el casco urbano del municipio de Suaita para el año 2040, como paso inicial, se definen algunos criterios de selección que permitirán elegir qué tipo de sistema de bombeo. Se pueden emplear según las condiciones actuales de la bocatoma, su ubicación, las condiciones del terreno, tiempo de operación y altimetría con respecto a la PTAP.

7.1 Criterios de selección

Inicialmente se definirán algunos parámetros fundamentales de la proyección que permitirá establecer cuáles son los puntos de operación mínimos para la selección de cualquier tipo o sistema de bombeo.

7.2 Relación de consumo

Para establecer la relación de consumo como criterio fundamental de selección, se debe calcular el caudal medio diario, cosa que ya se realizó en el apartado anterior, por lo tanto, se procede a buscar una bomba que mínimo permita entregar un caudal de $0.0646\text{m}^3/\text{s}$ a la PTAP, entendiendo que este valor es la razón de consumo en el casco urbano de agua tratada de los tanques de almacenamiento por segundo, esto permite garantizar la disponibilidad constante del agua que se consume y que el equipo de bombeo proporcionaría.

7.3 Diámetro de tubería

Otro de los criterios de selección se encuentra relacionado con el diámetro de la tubería necesario para mover el caudal de diseño de la proyección realizada, para este caso, se aplicará la siguiente fórmula para bombeos discontinuos de Bresse:

Ecuación 3

Ecuación de Bresse

$$D = 5873 * N^{0.25} * (Q_{dis})^{\frac{1}{2}}$$

Donde:

D= Diámetro interior aproximado. (m)

N= Número de horas de bombeo al día

Q_dis= Caudal de diseño (m³/s)

Se procede a calcular:

$$D = 1.3 * \left(\frac{20}{24}\right)^{0.25} * (0.0646)^{\frac{1}{2}} = 0.3156m = 12.2 \text{ in}$$

Este valor permite determinar el diámetro de tubería que se va a emplear es aproximadamente de 12.2 pulgadas para la red de conducción como mínimo debe ser de 12 pulgadas dentro de los parámetros comerciales del material y dimensiones de las tuberías.

Ahora, ya que tenemos definido el diámetro de la tubería de descarga, se hace necesario definir el diámetro de la tubería de succión:

Se procede a calcular la velocidad:

$$V_i = \frac{Q_{dis}}{A_t}$$

Siendo:

A_t = Área del tubo en m²

Resolviendo:

$$V_i = \frac{0.0646}{n * (0.3156)^2} = 0.20 \frac{m}{s}$$

Este valor se confirma que está entre el rango correcto de velocidades, según lo expuesto en la siguiente tabla.

Figura 18.

Velocidad máxima aceptable en las tuberías de succión, según diámetro

Díámetro de la tubería de succión	Velocidad máxima
50 mm	0.75 m/s
75 mm	1.00 m/s
100 mm	1.30 m/s
150 mm	1.45 m/s
200 mm	1.60 m/s
250 mm	1.60 m/s
300 mm	1.70 m/s
Mayor que 400 mm	1.80 m/s

Nota. Tomado de: RAS 2017

Vemos que la velocidad que tenemos nos da para un diámetro de tubería de succión mayor a 400 mm. (Ministerio de Vivienda, 2017)

7.3.1 Longitud y material de la tubería.

Ahora bien, es necesario afirmar las longitudes de tubería necesarias para llevar el agua desde la toma de fondo hasta el tanque de almacenamiento, vale recordar que la altura requerida es de 1700 m.s.n.m

En cuanto a los materiales, existe una variedad de tuberías en el mercado, sin embargo, se decidió por escoger la tubería de acero industrial, debido a sus características debido a que es un material con buena maleabilidad, además que puede soportar grandes tensiones y deformaciones antes de la rotura. Hay que tener presente que las tuberías de impulsión y descarga, las tuberías

metálicas no pueden estar en contacto directo con el agua, para ello se utiliza un recubrimiento interno y externo en mortero.

Para reflejar las pérdidas por recorrido de la tubería en el lado de la descarga, se utiliza la herramienta web Omni calculator la cual es una calculadora de pérdidas de altura y presión de tuberías, se puede encontrar en la web: <https://www.omnicalculator.com/es/fisica/calculadora-de-perdidas-por-friccion-en-una-tuberia>

Se tiene en cuenta el diámetro obtenido será acercado a los 300 mm y la extensión de la línea de distribución es de 400 metros, al ingresar los datos en la calculadora, se obtuvo lo siguiente:

Figura 19.

Cálculo de las pérdidas de altura de la tubería en la herramienta Omni calculator

The image shows a screenshot of the Omni calculator web tool interface. It displays several input fields for calculating pipe losses. The parameters entered are: Diameter of the pipe (0,30 m), Length of the pipe (400 m), Volumetric flow rate (0,0646 m³ / seg), Material (Acero, corrugado), and Pipe roughness coefficient (60). The resulting hydraulic friction loss is shown as 4,789 m de agua.

Parameter	Value	Unit
Diámetro de la tubería	0,30	m
Longitud de la tubería	400	m
Caudal volumétrico	0,0646	m³ / seg
Material	Acero, corrugado	
Coefficiente de rugosidad del tubo	60	
Pérdida de carga hidráulica por fricción	4,789	m de agua

Nota. Tomado de: Omni calculator, <https://www.omnicalculator.com/es/fisica/calculadora-de-perdidas-por-friccion-en-una-tuberia>

Teniendo ya definidas las pérdidas de las tuberías de distribución (Estos datos serán utilizados más adelante), se procede a detallar la línea de succión y la línea de descarga.

- Detalles en la línea de succión:

Se refiere a las partes del sistema que se encuentran desde la fuente de extracción de agua hasta la entrada de la bomba. Normalmente, debido a que el fluido no es muy limpio, se debe instalar un filtro en la entrada o cualquier lugar del tubo para evitar que partículas entren a la bomba. Una válvula de pie en la entrada permite el libre flujo hacia la bomba, pero cesa si la bomba se detiene, esto se hace para mantener una columna de líquido sobre la bomba y elimina la necesidad de iniciar la bomba cada vez que arranca. Si se emplea una válvula cerca de la bomba, es preferible que sea una válvula de compuerta, pues ofrece muy poca resistencia al flujo si está abierta por completo. El vástago de la válvula debe estar en posición horizontal para evitar la formación de bolsas de aire. Aunque el tamaño del tubo para la línea de succión nunca debe ser más pequeño que la conexión de entrada sobre la bomba puede ser algo mayor para reducir la velocidad de flujo y las pérdidas por fricción. La alineación de la tubería debe eliminar la posibilidad de que se formen burbujas o bolsas de aire en la línea de succión, porque esto haría que la bomba perdiera capacidad. Las tuberías largas deben tener pendiente hacia arriba, en dirección de la bomba y debe evitarse los codos en un plano horizontal.

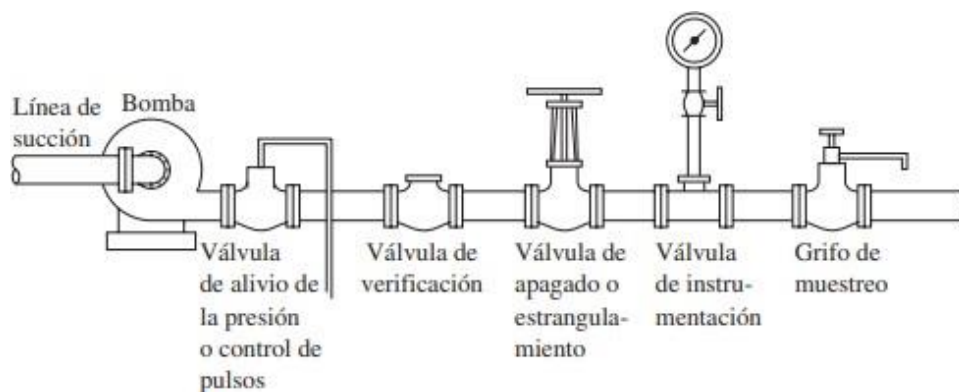
- Detalles en la línea de descarga:

Se recomienda una línea de descarga corta y directa, para minimizar la carga sobre la bomba. Los codos deben ser del tipo estándar o de radio largo. Debe seleccionarse el tamaño de la tubería de acuerdo con la velocidad o las pérdidas por fricción permisibles. Debe contener una válvula cerca de la bomba para permitir que se dé servicio a esta o se reemplace. La válvula actúa con la otra que se encuentra en la línea de succión para aislar la bomba. Por razones de resistencia

baja, es preferible una válvula de mariposa. Si el flujo debe regularse durante el servicio, es mejor emplear una válvula de globo porque permite un estrangulamiento suave de la descarga. De acuerdo con las necesidades es posible agregar los elementos que se requiera a la línea de descarga. Una válvula de alivio de la presión protege la bomba y al resto del equipo, en caso de un bloqueo del flujo o falla accidental de una válvula. Una válvula de verificación impide que el flujo regrese a la bomba cuando no esté en funcionamiento. Es necesario ubicar una válvula de verificación entre la válvula de apagado y la bomba. Si se usa una expansión para el puerto de descarga de la bomba, debe colocarse entre la válvula de verificación y la bomba. Un grifo de muestreo permite extraer una cantidad pequeña de fluido si es necesario para realizar pruebas sin interrumpir la operación.

Figura 20.

Detalles en una línea de descarga



Nota. Tomado de: Mott, R. L. (s.f.) *Mecánica de fluidos*

Ya conociendo los detalles, se procede a revisar las condiciones proyectadas del sistema.

7.4 Condiciones proyectadas del sistema

Otras de las consideraciones que se deben tener en cuenta para la proyección del sistema de bombeo que se va a seleccionar van de la mano de las siguientes recomendaciones

- Tipo de PTAP: Se mencionó comentado que la PTAP del municipio posee la capacidad para ser ampliada, y la capacidad de tratamiento actual es de 20 l/s, razón por la cual se debe proyectar el cambio de la PTAP, pasar de una PTAP compacta a una convencional, que mejore la capacidad de agua tratada a entregar y con este la calidad de esta debido a los diferentes ciclos de tratamiento, mejoras en su mantenimiento, Acceso a su dependencias y componentes, y años de servicio.

- Capacidad de reserva: Otra solicitud a proyectar para la PTAP es la ampliación de la capacidad de almacenamiento del tanque de reserva de agua tratada ya que posee una capacidad limitada (20000 L), entendiéndose que el caudal proyectado supera en un 37% de la capacidad actual de almacenamiento, y en el posible caso de no operación de la PTAP con razones asociadas a algún daño, o mantenimiento pudiera garantizar por algunos días la necesidad hídrica mientras se reanuda la operación de la planta.

- Capacidad de reserva bocatomas: Para el caso de las bocatomas, se decide que se pueden utilizar las actuales que se encuentran en operación ya que suplen la necesidad de capacidad.

- Tiempo de Operación: para el tiempo de operación se debe contemplar la posibilidad de operar la PTAP en durante 24 horas, para lograr esto se debe adelantar procesos de automatización de los componentes de la PTAP, desde el sistema de bombeo, el monitoreo constante de los procesos, el suministro de insumos para su tratamiento, y el servicio de entrega a la población del casco urbano.

- Población proyectada casco urbano: 14959 habitantes para el año 2040.

8. Alternativas para el sistema de Bombeo

En este punto se proyectará el sistema de bombeo para la zona de captación del afluente del río Tolotá, ya que este por ahora es la única zona de captación que por su ubicación y altimetría, requiere de un sistema de bombeo que permita transportar el recurso hídrico que captan sus bocatomas y que es almacenado en un tanque de 25.000 litros, recurso hídrico que luego será transportada hasta la PTAP del casco urbano.

Esta zona de captación y como se especificó en el análisis actual del punto, es un afluente que se emplea, pero debido a las épocas de sequía, a veces reduce el caudal de entrega en ciertas épocas del año, y que desde su operación se ha venido empleando un sistema de bombas centrífugas que se ve alterado cuando disminuye la cantidad de líquido disponible.

Para el cálculo de los parámetros de diseño del sistema de bombeo, las pérdidas por recorrido de los tramos de la red de distribución, la pérdida de los accesorios del sistema de bombeo, la presión de trabajo del sistema, y el caudal de entrega de la electrobomba, se planea diseñar una matriz de cálculos, que permita realizar la proyección de los requerimientos del sistema proporcionando algunos parámetros de diseño.

8.1 Cálculo de parámetros hidráulicos y mecánicos

El sistema de suministro de agua que se propone consiste en elevar el agua una cota de 20 metros a través de terreno montañoso, siguiendo un recorrido paralelo al sistema en funcionamiento por lo cual tendrá la misma longitud que el actualmente instalado $L=400\text{m}$ para la tubería de descarga. Este flujo se conduce hacia un tanque de almacenamiento para luego ser tratado y conducido por gravedad a las diferentes instancias del espacio urbano para su utilización, en vista de las proyecciones demográficas a 15 años de la zona, y el análisis del uso que se da al agua en entornos rurales semi-urbanos, se determinó que el caudal a transportar deberá ser de 20 gal/min

El agua es bombeada a temperatura cercana al ambiente en promedio 28°C , de modo que su viscosidad cinemática es $\nu=8.5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$,

Según la tabla 6.2 del mott se propone una tubería de descarga mínima de 2 in, y 2 ½ in a la succión, siendo la tubería de cedula 40 en acero. (Mott, 2014)

Tabla 3.

Tamaños de tuberías según el flujo volumétrico

Flujo volumétrico		Línea de succión			Línea de descarga		
		Tamaño de tub. (pulg)	Velocidad		Tamaño de tub. (pulg)	Velocidad	
gal/min	m ³ /h		pie/s	m/s		pie/s	m/s
10	2.3	1	3.7	1.1	¾	6.0	1.8
100	22.7	2½	6.7	2.0	2	9.6	2.9
500	114	5	8.0	2.4	3½	16.2	4.9
2000	454	8	12.8	3.9	6	22.2	6.8

Nota. Tomado de: Mott, R. L. (s.f.) Mecánica de fluidos

Usando una herramienta diseñada propiamente en Excel, se proceden a calcular las pérdidas en la succión y en la descarga y el NPSH disponible.

Para la succión tenemos los siguientes resultados:

Tabla 4.

Cálculo de pérdidas por tuberías y accesorios a la descarga

DATOS DE ENTRADA		
Q _{real}	28,095	m ³ /min
v	8,50E-07	m ² /s
p ₂	689476	Pa
L	400	m
Características de tubería		
Tamaño de tubería	2,50	in
D	0,0635	m
A	0,00137	m ²
ε	4,60E-05	m
Características de flujo		
v	0,2	m/s
v ² /2g	0,00203874	m/s
D/ε	1,38E+03	
Nr	17937,8531	

Pérdidas en tuberías			
Tubería	L/D	6299,212598	
Pérdidas en accesorios			
Descripción	Le/D	Cant	Total individual
Válvula de mariposa abierta por compuerta	45	3	135
Válvula de verificación de tipo giratorio	100	2	200
Codo estandar a 90 grados	30	3	90
			0
		Total	425
Pérdidas en accesorios			
f _{tubería}	0,02936464	Ecuación de Colebrook-Haaland	
f _{accesorios}	0,09983979		

Pérdidas en tuberías		
h _L	4.78	m
h _v	0,00020355	m
NPSH _{disp}	7,57883792	m
p _l	101500	Pa
p _v	316000	Pa

Ahora se calcula a la succión

Tabla 5.

Cálculo de pérdidas en la succión

DATOS DE ENTRADA			
Q _{real}	28,095	m ³ /min	
v	8,50E-07	m ² /s	
p ₂	689476	Pa	
L	3	m	
Características de tubería			
Tamaño de tubería	2,00	in	
D	0,0508	m	
A	0,00137	m ²	
ε	4,60E-05	m	
Características de flujo			
v	0,2	m/s	
v ² /2g	0,00203874	m/s	
D/ε	1,10E+03		
Nr	14350,2825		
Pérdidas en tuberías			
Tubería	L/D	59,05511811	
Perdidas en accesorios			
Descripción	Le/D	Cant	Total individual
Válvula de mariposa abierta por compuerta	45	3	135
Válvula de verificación de tipo giratorio	100	2	200
Codo estandar a 90 grados	30	3	90
			0
		Total	425

Pérdidas en accesorios		
f_tubería	0,03119921	Ecuación de Colebrook-Haaland
f_accesorios	0,10607731	
h_L	0,00375632	m
h_v	0,00021626	m
NPSH_disp	4,57883792	m
p1	101500	Pa
pv	316000	Pa

Todas las formulas utilizadas se encuentran en el documento automatizado para el cálculo, con el fin de agilizar los procesos, en el ANEXO 7 se puede encontrar la hoja de Excel que contiene el registro de las fórmulas.

Luego de calcular, se procede a hallar las perdidas:

$$H_o = \frac{P_2 - P_1}{\gamma} + (z_2 - z_1)$$

Teniendo en cuenta que la presión del aire es igual a la entrada que a la salida.

$$H_o = z_2 - z_1$$

Tenemos una altura inicial de 30 metros y una altura final de 20 metros, por lo tanto:

$$H_o = 30 - 20 = 10m$$

También se calcula la carga dinámica total:

$$h_a = \frac{P_2 - P_1}{\gamma} + (z_2 - z_1) + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} + hl$$

Debido a que la tubería es la misma, la velocidad también es la misma:

$$h_a = 10 + 4.78 = 14.78 m$$

Dando como resultado unas pérdidas de 14.78 m.

9. Diseño del sistema de bombeo

Para rediseñar la estación, hay que tener en cuenta que lo que se busca es entregar presión debido a la geografía del terreno en parte es montañosa, por lo tanto, un sistema de bombas en serie sería óptimo frente a un sistema de bombas en paralelo debido a que la característica principal de estos sistemas es entregar presión no solo por la estructura del terreno sino también por la distancia que hay desde la planta hasta la línea de acueducto que alimenta el municipio de Suaita (400 metros) mientras que un sistema en paralelo entrega principalmente un alto caudal. Aunque suena llamativo inclinarse por el sistema en serie, tiene una dificultad la cual motiva este proyecto, las variaciones de caudal debido a las variaciones del río Tolotá, esta dificultad debe ser subsanada con un método que permita mantener el servicio.

Para ello, inicialmente se procede a proponer en lugar de un sistema de 3 bombas conectadas en serie con una bomba auxiliar, un sistema de dos bombas con otra auxiliar conectada en serie, por lo tanto, esto reduciría el tiempo de mantenimiento y consumo de insumos, debido a que realizar mantenimiento a cuatro bombas suele ser más costoso que a tres, dependiendo de la complejidad de estas, además que al tener tres bombas, se puede aprovechar el espacio designado para las bombas y se abre la posibilidad de utilizar un sistema de control de velocidad a través de variadores lo cual permite ajustar la presión de salida, mejorando la eficiencia energética.

Así que se tomará como propuesta inicial el uso de dos bombas y una bomba auxiliar conectadas en serie

9.1 Selección de bomba y sistema de control

Para seleccionar el sistema de bombeo, es necesario tener en cuenta varias opciones, para el sistema propuesto, se tiene la siguiente bomba:

- Bomba centrífuga C-4B Colbombas

La estación por rediseñar se encuentra en el municipio de Suaita en Colombia, esta se encuentra en operación con 4 bombas en serie, siendo una de estas de reserva, inicialmente, se propone un sistema de 3 bombas en serie, siendo una de estas de reserva.

Del catálogo se extraen las siguientes características de la bomba:

Figura 21.

Datos de la bomba

PARÁMETROS DE DESEMPEÑO n = 1750 rpm.											
NRO	TIPO	MODELO	PUNTO DE MÁXIMA EFICIENCIA				INTERVALO RECOMENDABLE DE OPERACIÓN Efic. >=0.8 de la max.				DIAM. IMPULSOR (pulg)
			Q (gpm)	CDT (pies)	BHP (hp)	EFIC. MAX %	Q (gpm)	CDT (pies)	BHP (hp)	EFIC. %	
1	PRESIÓN	C-4B	900	172	49	80	460-1100	192-152	33-56	66-76	13. 1/2
2		C-5B	1000	315	105	74	500-1100	360-300	70-125	60-74	17 7/8
3		C-5E	1100	350	150	70	720-1300	400-335	115-150	60-70	19 7/8
4		C-6N	1580	180	80	80	800-2000	2210-140	63-100	70-80	14 ½
5		C-6A	2100	215	150	80	1200-2500	230-182	100-172	64-80	13. 13/16
6		C-6BA	2600	215	200	88	1250-3750	250-150	125-200	70-88	15 ½
7	CAUDAL	C-6B	1400	168	68	80	720-1700	188-140	52-80	65-78	13 ½
8		C-6BM	1500	160	75	84	750-2100	105-190	50-80	70-84	13 ½
9		C-8B	3300	115	115	82.5	2000-3750	135-100	85-125	66-82.5	12 1/8
10		C-10B	4500	87	125	80	2750-5000	98-80	110-130	64-80	9 ½ x 12 1/8

Q- CAUDAL

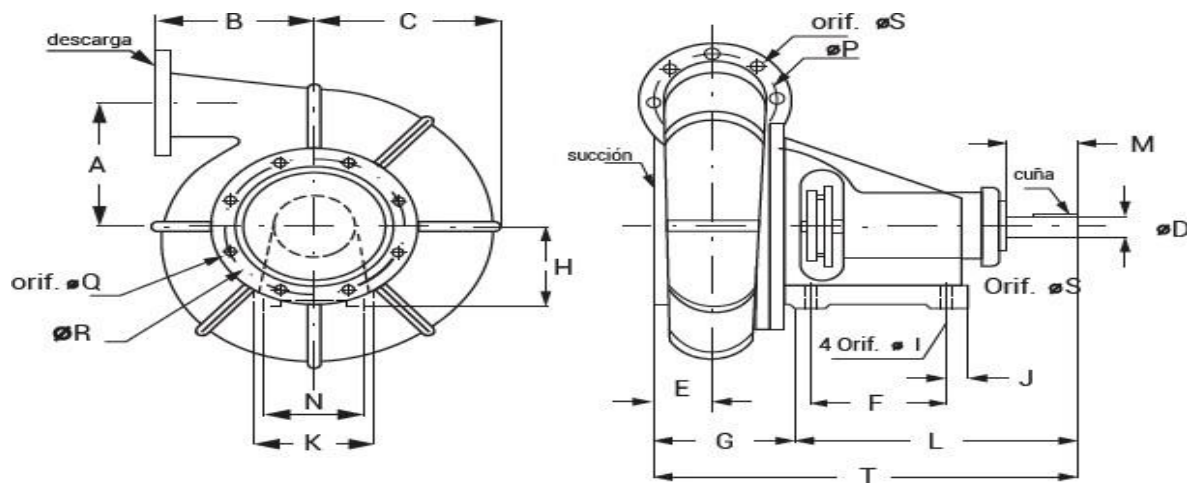
CDT- CABEZA DINÁMICA TOTAL.

BHP- POTENCIA AL FRENO

Nota. Tomado de: Colbombas

Figura 22.

Plano de montaje de la bomba C-10B



Nota. Tomado de: Colbombas

Figura 23.

Tabla de dimensiones de la bomba C-10B

DIMENSIONES (Pulg.)	MODELOS BOMBAS CENTRIFUGAS TIPO B					
	C-4B	C-5B	C-6B	C-6BM	C-8B	C-10B
∅ succión	5 x 10	5. x 10	8 x 13. 1/2	8 x 13. 1/2	10x16	12x19
∅ descarga	4 x 9	4. 3/4 x 10	6. x 11	6. x 11	8 x 13. 1/2	10x16
A	8	10. 1/2	8. 3/4	8. 3/4	9. 7/8	9. 19/32
B	9	12	11	11	12 -3/4	12. 7/8
C	9. 5/16	13. 1/8	10. 5/8	10. 5/8	12. 3/8	11.11/16
∅D	1.8745	1.8745	1.8745	1.8745	1.8745	1.8745
E	2. 5/8	5. 1/2	3	3	4	4. 3/8
F	9. 7/8	9. 7/8	9. 7/8	9. 7/8	9. 7/8	9. 7/8
G	7. 3/4	9	8. 5/8	8. 5/8	10. 1/8	11. 1/4
H	7	7	7	7	7	7
∅I	3/4	3/4	3/4	3/4	3/4	3/4
J	7/8	7/8	7/8	7/8	7/8	7/8
K	8. 3/4	8. 3/4	8. 3/4	8. 3/4	8. 3/4	8. 3/4
L	19. 1/2	19 1/2	19. 1/2	19. 1/2	19. 1/2	19. 1/2
M	5	5	5	5	5	5
N	7	7	7	7	7	7
∅P	7. 1/2	8. 1/2	9. 1/2	9. 1/2	11. 3/4	14. 1/4
∅Q	3/4 (8 orif.)	5/8 (8 orif.)	3/4 (8 orif)	3/4 (8 orif)	3/4 (8 orif)	7/8 (12 orif)
∅R	8. 1/2	15. 3/16	11. 3/4	11. 3/4	14. 1/4	17
∅S	3/4 (8 orif.)	7/8 (8 orif.)	7/8 (8 orif)	7/8 (8 orif)	7/8 (8 orif)	1 (12 orif)
T	25. 13/16	28. 3/16	26. 11/16	26. 1/16	28. 3/16	29. 5/16
CUÑA	1/2 x 4	1/2 x 4	1/2 x 4	1/2 x 3. 3/4	1/2 x 4	1/2 x 4
PESO NETO (kg)	140	222	176	176	222	224

Nota. Tomado de: Colbombas

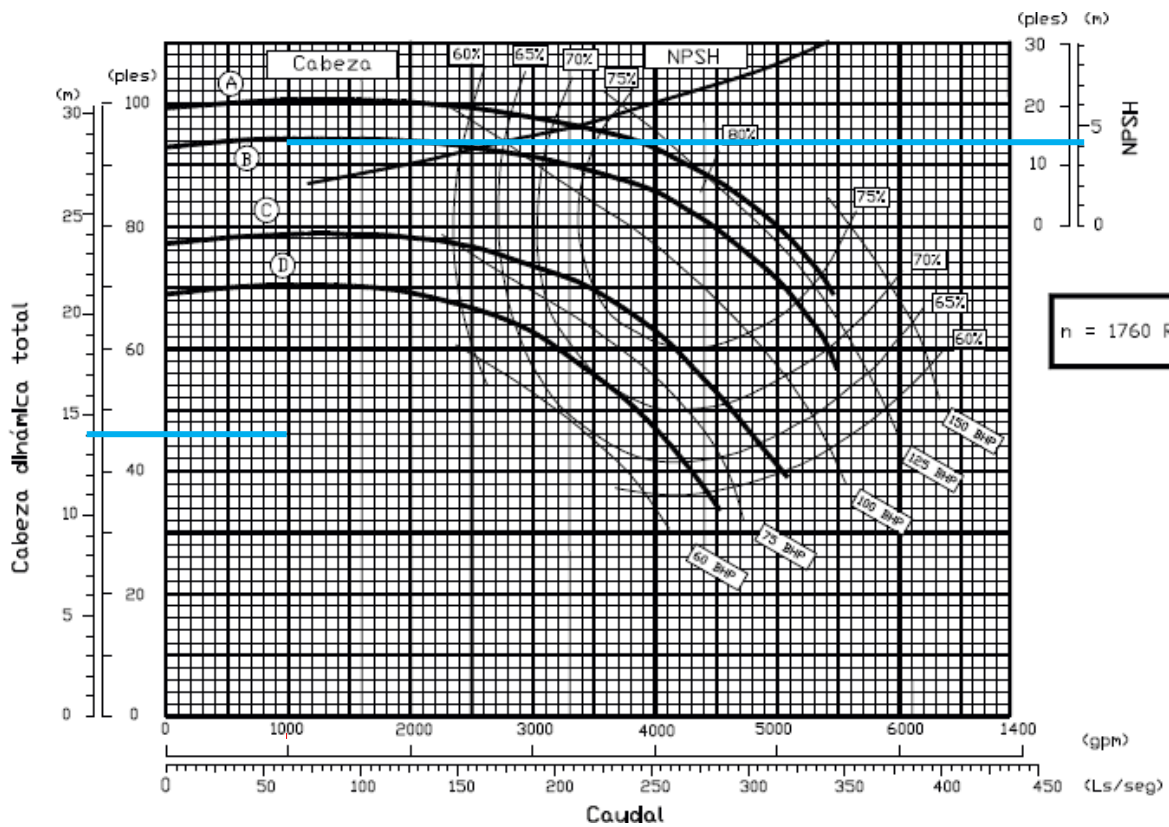
- Parámetros de operación de la bomba C-4B

Rodete de 8 3/4''x10 3/4'', de una etapa, 1760 rpm, potencia de 100hp, caudal de 1000 gpm a una cabeza dinámica de 24.5 m mediante una tubería de acero de 10 pulgadas.

La longitud de la tubería actual es de L=400m, D=10'', Schedule 40, material: Acero comercial.

Figura 24.

Gráfica de la bomba



Nota. Tomado de: Colbombas

De la gráfica se puede obtener datos como el NPSH del sistema el cual tiene un valor 4m y una eficiencia de 80%, datos que son útiles para corroborar al mantener el sistema en la configuración en serie.

- Bomba RNI -65-20 de bombas ideal

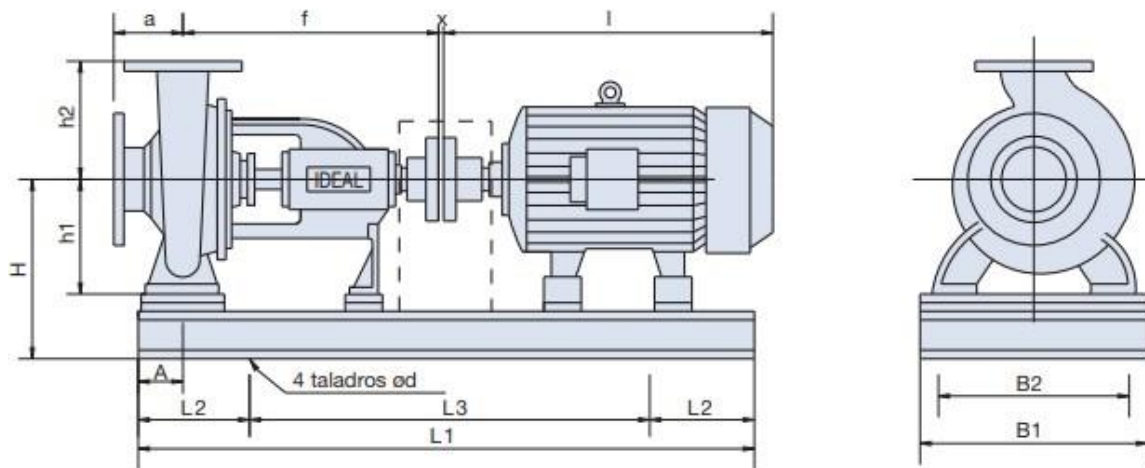
Para este sistema se propone un sistema de dos bombas en serie, siendo una de reserva, en este sistema, se usa una bomba vertical que suple toda la necesidad del sistema, estas bombas son consideradas optimas robustas y de alto rendimiento, diseñadas para altas exigencias y alto caudales, por lo tanto, se presentan los datos de la bomba.

Figura 25.

Tabla de datos de bomba RNI

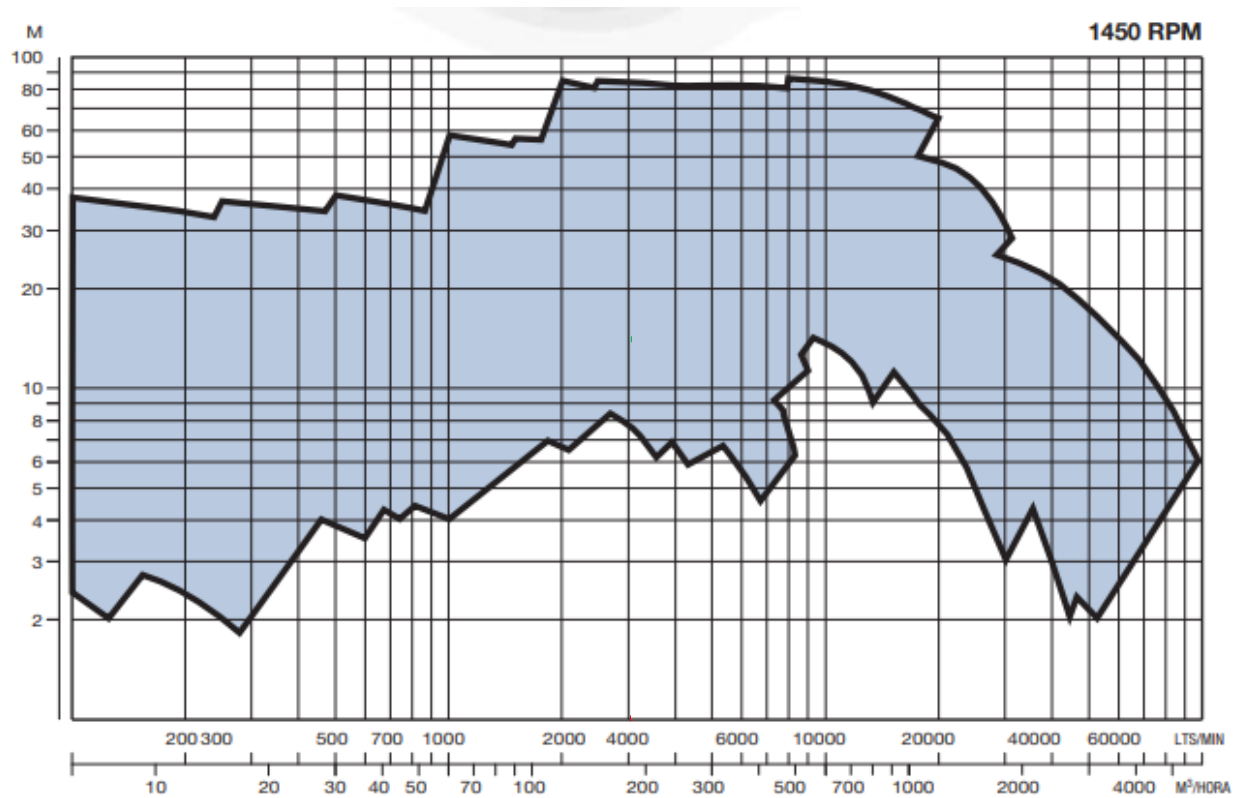
Tipo	Motor	CV (HP)	Dimensiones														ASP	IMP	Kg
			a	f	x	l	A	L1	L2	L3	B1	B2	d	H	h1	h2			
RNI 65-20	100 L	3-4	100	360	5	370	75	800	130	540	340	310	18	278	180	225	80	65	132
	112 M	5,5	100	360	5	385	75	800	130	540	340	310	18	278	180	225	80	65	139
	132 S	7,5	100	360	5	450	75	800	130	540	340	310	18	278	180	225	80	65	164
	160 M	15-20	100	360	5	600	75	1000	170	660	340	310	18	278	180	225	80	65	249
	160 L	25-30	100	360	5	640	75	1000	170	660	340	310	18	278	180	225	80	65	259
	180 M	30	100	360	5	680	75	1000	170	660	340	310	18	278	180	225	80	65	284
	200 L	40-50	100	360	5	800	75	1000	170	660	430	400	18	318	180	225	80	65	274
RNI 65-26 h	100 L	3-4	100	470	5	370	90	1000	170	660	430	400	18	318	200	250	80	65	217
	112 M	5,5	100	470	5	385	90	1000	170	660	430	400	18	318	200	250	80	65	224
	132 S	7,5	100	470	5	450	90	1000	170	660	430	400	18	318	200	250	80	65	249
	132 M	10	100	470	5	480	90	1000	170	660	430	400	18	318	200	250	80	65	254
	160 L	25-30	100	470	5	640	90	1200	200	800	430	400	18	318	200	250	80	65	324
	180 M	30-40	100	470	5	680	90	1200	200	800	430	400	18	318	200	250	80	65	349
	180 L	50	100	470	5	720	90	1200	200	800	430	400	18	318	200	250	80	65	374
	200 M	60	100	470	5	77	90	1200	200	800	430	400	18	318	200	250	80	65	429
	200 M	40-50-75	100	470	5	800	90	1200	200	800	430	400	18	318	200	250	80	65	439
	225 M	60-100	100	470	5	840	90	1400	230	940	600	560	18	363	200	250	80	65	554
	250 M	75	100	470	5	930	90	1400	230	940	600	560	18	388	200	250	80	65	654
	280 M	100	100	470	5	990	90	1400	230	940	600	570	23	418	200	250	80	65	707

Nota. Tomado de: Bombas ideal.

Figura 26.*Plano de la bomba RNI-65-20**Nota.* Tomado de: Bombas ideal

-Parámetros de operación de la bomba RNI-60-20

Rodete de 305mm, de una etapa, 1450 rpm, caudal de 4000 L/min mediante una tubería de acero de 10 pulgadas. La longitud de la tubería actual es de $L=400\text{m}$, $D=100\text{mm}$, Schedule 40, material: Acero comercial.

Figura 27.*Gráfica de la bomba RNI-60-20**Nota.* Tomado de. Bombas ideal

La gráfica muestra el funcionamiento arriba de los 28000 L/min (3000 L/min), lo cual permite subsanar la demanda del sistema, la contraparte de esto es que la bomba posee dimensiones muy amplias, es decir, la bomba ocupa mucho espacio, además que su precio es elevado.

Por lo tanto, se escoge el sistema de 3 bombas (2 de servicio, 1 auxiliar) como base para el proyecto debido a su versatilidad y comodidad.

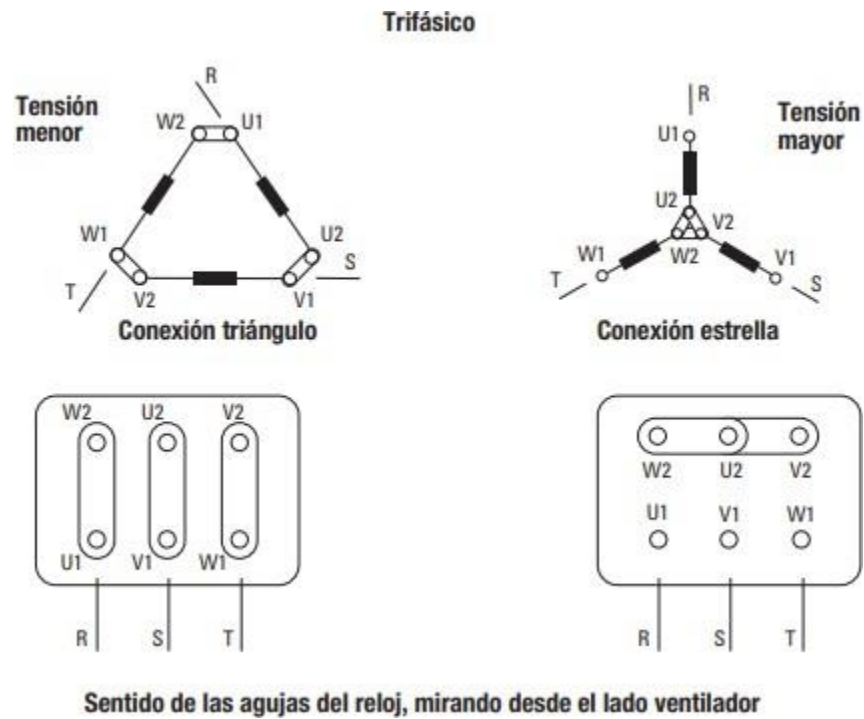
10. Selección del sistema de control

Para establecer un sistema de control de las bombas, es necesario delimitar las condiciones de operación, para el sistema propuesto, es necesario tener en cuenta las condiciones de variabilidad del río Tolotá,, por lo tanto, se hace necesario ejercer control de la presión del sistema, esto quiere decir que es necesario controlar la velocidad de las bombas, ahora, el sistema escogido de bombas de la marca Colbombas, se basa en motores trifásicos, por lo tanto, se requiere una conexión trifásica, la conexión escogida es la delta estrella debido a que es la sugerida por el fabricante, por lo tanto, para el funcionamiento de las bombas se requiere un voltaje de 400 y el esquema combinado delta estrella resalta de la siguiente forma:

- Para el arranque, se hace una conexión en estrella con el fin de reducir el voltaje de entrada, garantizando así un arranque lento y controlado del equipo.
- Cuando el motor entra en condición de operación se pasa a una conexión delta para mantener el voltaje a plena capacidad, generando así, la estabilidad en la operación.

Figura 28.

Conexión delta y conexión estrella



Nota. Tomado de: Colbombas

Luego de conocer el tipo de conexión, el fabricante sugiere una cantidad de cable permisible para la conexión que se expresa en la siguiente tabla:

Figura 29.*Cantidad de cable para arranque delta estrella a 400V*

Potencia motor		400 VOLT. 3 ~ (trifásico Y/Δ)															
		2 cables cuatrifilar de 4 x ... mm ²								7 cables cuatrifilar de 1 x ... mm ²							
		1,5	2,5	4	6	10	16	25	35	50	70	95	120	150	185	240	
CV	KW	Longitud máxima de cable en metros															
10	7,5	58	96	154	232	386											
12,5	9,2	47	79	126	189	316											
15	11		66	106	159	264	423										
17,5	13		56	90	134	224	359										
20	15		49	78	117	195	311	487									
25	18,5			63	95	158	253	396									
30	22			53	80	134	214	334	468								
35	26			45	68	113	182	284	398								
40	30				59	99	158	247	346								
45	33					90	144	225	315	451							
50	37					81	129	202	282	404							
60	45					67	107	167	234	334	468						
70	51,5						94	147	206	294	412						
80	59						83	129	181	259	362	491					
90	66							116	163	233	326	442					
100	75							103	145	207	289	393	496				
125	92								120	171	240	325	411	514			
150	110									146	204	277	350	437	539		
180	132									124	173	235	297	372	458	595	

Nota. Tomado de: Colbombas

Para efectos del proyecto, se propone usar una conexión de 145 metros con 2 cables cuatrifilar de 4x35 mm², esto se hace con el fin de mantener una conexión estable y permitir la ubicación de la caja de control en los alrededores del cuarto de máquinas.

Para el apartado de control de presión, se propone el uso de variadores de velocidad o frecuencia de la serie VARIACHE 3 los cuales son variadores inteligentes diseñados para el control de bombas dedicadas al suministro de agua a presión constante, los cuales trabajan a potencias entre 1.5 a 120 Hp con una alimentación monofásica de 1-230V o trifásica de 3-400V los cuales ofrecen control y regulación de hasta 6 horas trifásicas y arranques o paros mediante rampas suaves con el fin de no ejercer sobrepresiones en el sistema, estos variadores son

autoventilados y tienen la capacidad de conservar los parámetros si se presenta un fallo en la alimentación y el equipo re-arranca cuando el servicio se reestablece, además, ofrece multifunción, por lo tanto, pueden utilizarse para otras aplicaciones adicionales como presión programable por tramos horarios o bombeo a distinta frecuencia según el nivel del agua (Bombas ideal).

Figura 30.

Variador de frecuencia VARIACHE 3



Nota. Tomado de: Bombas ideal

Un único variador de frecuencia puede controlar hasta 6 bombas, lo cual lo hace ideal para la aplicación deseada.

10.1 Definición del sistema de alimentación y conductores eléctricos.

Para definir el sistema de alimentación, se hará uso de una subestación eléctrica, una Subestación Eléctrica es un conjunto de equipos utilizados para transferir el flujo de energía en un sistema de potencia y se encarga de garantizar la seguridad del sistema por medio de dispositivos de protección.

Una Subestación puede estar asociada con una central de generación, controlando directamente el flujo de potencia al sistema, con transformadores de potencia convirtiendo la tensión de suministro a niveles más altos o bajos.

Debido a que se requiere suministrar una cantidad considerable de energía constante a las bombas y el resto de los dispositivos presentes en la estación de bombeo, se hace necesario tener una subestación cerca.

Todo lo relacionado con este tema, se puede encontrar en el código eléctrico Colombiano NTC 2050.

Para el apartado de los conductores eléctricos, los grupos con motor eléctrico necesitan de cables conductores, a través de los cuales se suministra la energía necesaria para su funcionamiento. Estos conductores, debido a las condiciones desfavorables de trabajo, deben ajustarse a la legislación vigente. Este tipo de cable lleva un aislamiento de goma etileno-propileno con cubierta de policloruro de vinilo (PVC). Los conductores han de ser de cobre, con campo eléctrico radial, a partir de una tensión nominal 6/10 K V. La sección del cable depende esencialmente de la intensidad de corriente que ha de soportar y de su longitud.

El suministro de agua es una parte esencial de las sociedades modernas. Cualquier interrupción del suministro conlleva costosas consecuencias en la producción agrícola, la

producción industrial o el confort doméstico. Una integración inadecuada entre los componentes electromecánicos, los sensores y la electrónica de control ha sido origen de recurrentes problemas en los sistemas de bombeo. Las protecciones de ajuste amperimétrico protegen contra los riesgos de sobrecarga mientras los fusibles protegen contra el cortocircuito. El funcionamiento en vacío se evita mediante sondas de agua o por control de coseno. La norma UNE-EN-60204-1 determina en su punto 5.3 la obligatoriedad de un dispositivo de seccionamiento que debe cumplir con la norma IEC 947-3 garantizando el aislamiento del equipo eléctrico.

Se realizarán los caminos de cables necesarios para la potencia y alumbrado, junto con el suministro eléctrico de los diferentes receptores, según la zona de aplicación se utilizará un tipo diferente de canalización. Toda la instalación eléctrica se realizará bajo canalización cerrada estanca, utilizándose, para terminales, empalmes y conexiones de estas, sistemas o dispositivos que presenten el grado de protección correspondiente a las proyecciones de agua. Los tubos serán de PVC y se instalarán manteniendo la continuidad, con los accesorios necesarios desde el cuadro general de baja tensión hasta la caja de bornas del elemento a alimentar.

- Canalizaciones eléctricas:

Las canalizaciones eléctricas son una parte fundamental de cualquier instalación eléctrica. Son esencialmente tubos de distintos materiales y características cuyo objetivo principal es proteger los conductores de cualquier daño, ya sea mecánico o derivado de la acción de otros agentes del medio, como la corrosión. Las canalizaciones además limitan de forma general el desgaste natural de los conductores.

- Canalizaciones de PVC

El PVC es un tipo de material termoplástico, sus siglas provienen de su nombre Policloruro de Vinilo. Entre sus principales características: son resistentes a la par que ligeros, de carácter

rígido o flexibles, la acción de diferentes químicos, además no son auto extingüibles y no se corroen.

o **Ámbito de aplicación:**

Se suelen utilizar ocultos, empotrados en techos y paredes o enterrados bajo el suelo, bajo materiales como el concreto.

En zonas con un ambiente húmedo.

10.2 Análisis del golpe de ariete

El golpe de ariete es una de las principales causas de daños en las tuberías y en los sistemas hidráulicos. Cuando ocurre el golpe de ariete, la presión podría cambiar momentáneamente de manera abrupta por más de 100 bar dentro de la tubería.

Este impacto puede dañar seriamente la tubería, equipo o cubierta de la maquinaria, resultando en daños no solo para las juntas en las uniones, pero también en las bridas de válvulas o las válvulas mismas. Esto puede llegar a ser muy peligroso.

Figura 31.

Ejemplo del golpe de ariete



Al acudir a la RAS nos menciona que en el diseño de una bomba tenemos que contar con el golpe de ariete con el fin de verificar que en ninguna de las tuberías que conforman la red se produzcan presiones por encima de las admisibles para los materiales de las tuberías y evitar así posibles estallidos.

El análisis del golpe de ariete en las tuberías de aducción o conducción debe hacerse para las condiciones normales de operación, deben tomarse medidas preventivas para las condiciones excepcionales de posibles emergencias o por la falta de dispositivos de protección

1. Condiciones normales de operación por bombeo

- El funcionamiento adecuado de los dispositivos de protección y control de golpe de ariete previsto desde la etapa de diseño.

- La interrupción súbita del bombeo.

- El inicio del bombeo

- Las maniobras de cierre o apertura de válvulas de control o de cierre existentes en la línea.

- Al encender una bomba adicional a la que está funcionando.

2. Condiciones excepcionales en aducciones o conducciones por bombeo

- La falla en cualquiera de los dispositivos de protección y control del golpe de ariete.

- Las maniobras inadecuadas en las válvulas, en desacuerdo con las reglas de operación especificadas para el proyecto.

- La ruptura de la tubería en la sección de máxima presión bajo régimen de flujo permanente.

- El cierre retardado de una de las válvulas de retención de la descarga de las bombas antes o simultáneamente con la máxima velocidad de reversa, ocurrida posteriormente a la interrupción del bombeo.

En la RAS nombran las presiones máximas y esfuerzos absorbidos, y esto es indispensable debido a que se relaciona con las propiedades del material de diseño. (Ministerio de Vivienda, 2021)

Las presiones internas máximas de trabajo en la tubería no podrán exceder los siguientes valores:

- Para las condiciones normales de operación, las presiones internas no podrán exceder el valor de la presión de trabajo admisible para cada material y para cada clase de tuberías y de conexiones, juntas, bombas, válvulas y todos los demás accesorios presentes en la tubería.

- En las condiciones normales y excepcionales, las presiones utilizadas para el cálculo de los empujes aplicados a las estructuras de anclaje de las tuberías, conexiones y equipos

- Para materiales metálicos, la presión que produce la máxima tensión de tracción debe ser menor a 0.5 veces el esfuerzo de fluencia, para otros materiales diferentes a los metálicos, la presión de prueba hidráulica, dividida por un coeficiente de seguridad no menos a 2.5.

En aquellas instalaciones que sean proyectadas sin dispositivos de control, los esfuerzos originados por el fenómeno del golpe de ariete no podrán ser absorbidos por el material del que están hechas las tuberías y las conexiones, ni por las juntas, los anclajes, los accesorios y los equipos de la instalación, a menos que se verifiquen las siguientes condiciones:

- Las presiones internas máximas debidas al flujo no permanente sean inferiores a las presiones de servicio especificadas para cada tipo de material y clase de tubería, conexiones, accesorios, equipos y todo tipo de juntas.

- No existen condiciones de operación excepcionales o de emergencia.

- La presión interna máxima no excede 1.25 veces la presión de servicio en fenómenos transitorios que ocurran máximo dos veces por año.

10.2.1 Cálculo del golpe de ariete

Como cualquier efecto oscilatorio el fenómeno del golpe de ariete presenta una frecuencia en la que se repite una situación o acción, en dicho caso, es efecto de la sobrepresión o depresión de la onda que se desplaza de un extremo al otro del sistema.

La frecuencia es el inverso del periodo, que es el tiempo transcurrido entre dos puntos equivalentes de la onda, es decir entre dos máximos o dos mínimos con lo cual el periodo (y la frecuencia) dependerán de lo extensa o larga que sea la conducción de la instalación y de su celeridad, lo cual es la velocidad de propagación de la onda de presión a través del agua del interior de la tubería. (Hidro Ing, 2022)

La ecuación para calcular la frecuencia es la siguiente:

Ecuación 4

Frecuencia

$$\frac{2L}{a} = F$$

Siendo:

F: Frecuencia.

L: Longitud de la conducción.

a: Celeridad de la conducción.

La celeridad se calcula con la siguiente ecuación:

Ecuación 5

Celeridad

$$a = \frac{9900}{\left(48.3 + K * \frac{D}{e}\right)^{\frac{1}{2}}}$$

Siendo:

D: Diámetro de la conducción (mm)

e: Espesor (mm)

K: Coeficiente representativo de la elasticidad del material. (kg/m²)

K se calcula mediante la ecuación:

Ecuación 6

Coeficiente representativo de la elasticidad del material

$$K = \frac{10^{10}}{\varepsilon}$$

Siendo ε el módulo de elasticidad cuyos valores se obtienen de la siguiente tabla:

Figura 32.

Módulo de elasticidad

Material	ε (kg/m ²)
Fundición	17x10 ⁹
Acero	21x10 ⁹
Hormigón	3x10 ⁹
PCV-U	3x10 ⁸
PE	10 ⁸
PRFV	2x10 ⁹

Nota. Tomado de: Hidro ing

También es necesario calcular el tiempo de parada del agua el cual se haya mediante la ecuación:

Ecuación 7*Tiempo de parada del agua*

$$T = C + \frac{K * L * v}{g * H_m}$$

Siendo:

L: Longitud de la conducción (m)

v: Velocidad de circulación del agua (m/s)

H_m: Altura manométrica de la instalación

K: Inercia del equipo de bombeo.

C: Efecto de otras energías en el cálculo en función de la pendiente hidráulica de la instalación.

C y K poseen sus tablas, las cuales son:

Figura 33.*Valores de K en función de la longitud*

L (m)	K
< 500	2
≈ 500	1,75
500 < L < 1500	1,5
≈ 1500	1,25
> 1500	1

Nota. Tomado de: Hidro Ing

Figura 34.*Valores de C según la inclinación*

i	C
< 20%	1
≈ 25%	0,8
≈ 30%	0,6
≈ 40%	0,4
> 50%	0

Nota. Tomado de: Hidro Ing

Luego de hallar el tiempo de parada y la celeridad, se puede hallar la longitud crítica de instalación, la cual es la distancia crítica de operación del sistema se calcula mediante la ecuación:

Ecuación 8*Longitud crítica de instalación*

$$L_c = \frac{aT}{2}$$

Nota. Tomado de: Hidro Ing

Teniendo todas las ecuaciones, se procede a aplicarlas:

Primero se halla la celeridad teniendo en cuenta que el material es acero:

$$K = \frac{10^{10}}{21 \times 10^9} = 0.476$$

$$a = \frac{9900}{\left(48.3 + 0.476 * \frac{304.8}{10}\right)^{\frac{1}{2}}} = 1249.20m/s$$

Ahora se halla el tiempo de parada teniendo en cuenta que la inclinación es menor al 20% y la longitud es menor a 500m:

$$T = 1 + \frac{2 * 400 * 0.6064}{9.81 * 14.24} = 4.47s$$

Ahora se halla la longitud crítica:

$$L_c = \frac{4.47 * 1249.20}{2} = 2791.92m$$

Teniendo estos datos, se puede inferir que el tiempo de parada del agua es mayor que la frecuencia (0.64 s^{-1}) y que la longitud de la instalación es menor que la longitud crítica. Para estos casos, para calcular el golpe de ariete y obtener el incremento de presión producido es la siguiente relación:

$$\text{Si } L < L_c \text{ (impulsión corta) y } T > 2 * \frac{L}{a} \text{ entonces } \Delta H = \frac{2 * L * v}{g * T}$$

Aplicando la relación:

$$\Delta H = \frac{2 * 400 * 0.6064}{9.81 * 4.47} = 11.06m$$

Se aplica la ecuación de Allievi para hallar la presión de sobrecarga:

Ecuación 9

Ecuación de Allievi

$$\Delta P = \rho * a * v$$

Noa. Tomado de: Hidro ing

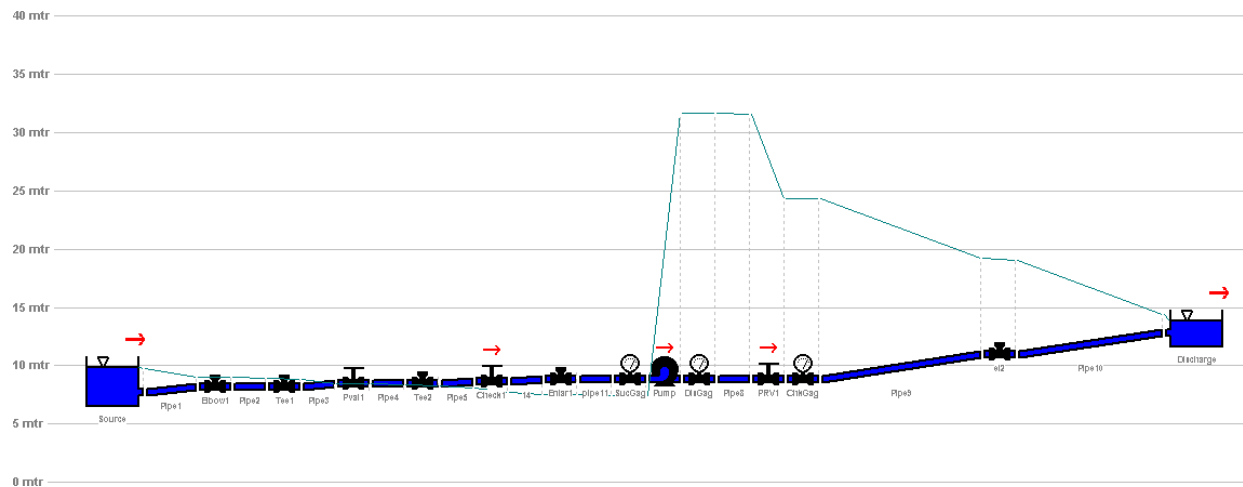
Resolviendo:

$$\Delta P = 1000 * 1249.2 * 0.6064 = 757.5kPa$$

Teniendo calculado el golpe de ariete, se deben escoger tuberías que resistan el cambio súbito de presión este rango de sobrepresión es tolerable para las tuberías seleccionadas.

Figura 36.

Simulación de la alternativa 2 a través de Hidroflo 3



Luego de realizada la simulación con su correspondiente reporte, se procede a avanzar a la fase final.

12. Evaluación técnica y económica

Esta fase es crucial para la toma de decisiones debido a que permite determinar la viabilidad del proyecto, además de que permite determinar la mejor opción para la implementación del sistema, para ello, se establecen los siguientes procesos:

12.1 Generación de alternativas al sistema de bombeo

Para desarrollar este apartado, se proponen dos alternativas para el sistema de bombeo, estas alternativas buscan subsanar las fallas presentes en el sistema actual, permitiendo así la mejoría de la prestación del servicio de distribución de agua.

12.2 Alternativa 1: 1 bomba de gran capacidad

Para esta alternativa, se establece un sistema de 2 bombas conectadas en serie las cuales la primera es la bomba principal y la segunda es la bomba de reserva, estas bombas estarán controladas por un variador de velocidad, este sistema busca ser robusto y compacto debido a que no requiere de muchos accesorios para funcionar.

12.3 Alternativa 2: 2 bombas de capacidad media conectadas en serie

Para esta alternativa, se establece un sistema de 3 bombas conectadas en serie las cuales las dos iniciales son las bombas iniciales y la tercera es la bomba de reserva, este sistema será controlado por un variador de velocidad para procurar mantener la presión del sistema aunque se presenten variaciones de caudal, también, este sistema permite la rotación entre las bombas permitiendo que una descansa cada x tiempo procurando así alargar la vida útil de las bombas al no mantener la exigencia únicamente en los equipos principales.

12.4 Comparación de alternativas mediante análisis multicriterio.

Con el fin de desarrollar comparaciones, es necesario establecer métricas que permitan dicho proceso, por lo tanto, se establecen los siguientes criterios comparativos:

1- Criterios técnicos: Evalúa campos como la eficiencia energética, la confiabilidad, la facilidad de mantenimiento, la vida útil de los equipos.

2- Criterios económicos: Compete a campos como el costo de inversión inicial (CAPEX), los costos operativos y de mantenimiento (OPEX), el valor actual neto (VAN) y la tasa interna de retorno (TIR).

3- Criterios ambientales: Evalúa campos relacionados al impacto ambiental y el beneficio social.

Para desarrollar esta comparativa, se establece la siguiente valorativa para cada criterio:

- Criterio técnico: 40%
- Criterio económico: 45%
- Criterio ambiental: 15%

Estos porcentajes se definen con el objetivo de establecer un rango de prioridad de cada criterio a la hora de desarrollar el proyecto, por lo tanto, se procede a explicar cada campo con sus correspondientes ítems de evaluación.

1. Criterio técnico:

- Eficiencia energética: Para establecer la eficiencia energética de las alternativas, nos remitimos a los datos otorgados por los fabricantes, por lo tanto, las bombas rigen la gran mayoría de la eficiencia energéticas del sistema, para la alternativa 1, Bombas ideal establece que la

eficiencia energética del 70% y para la alternativa 2, Colbombas establece que la eficiencia energética de sus bombas es del 80%.

- Confiabilidad: Al momento de realizar mantenimiento, se busca que los sistemas sean robustos y adaptables, por lo tanto, establecer sistemas con menor cantidad de piezas, garantiza que dichas piezas o componentes perduren más debido a que hay menos rango de error, por lo tanto, se establece que la alternativa 1 (sistema de 1 bomba robusta) posee una confiabilidad mayor que la alternativa 2 (sistema de dos bombas en serie), por lo tanto, presenta mayor facilidad para la realización de labores de mantenimiento.

- Vida útil: Las bombas de bomba ideal están diseñadas para trabajar durante aproximadamente 20 años frente a las bombas de Colbombas que se encuentran en el rango de los 10-15 años.

2. Criterio económico:

- Costo de inversión inicial (CAPEX) y Operative Expenses (OPEX): Para hallar el CAPEX, es necesario calcular los costos de adquisición y puesta en marcha de equipos, realizando consultas con los equipos asesores de Colbombas y Bombas ideal, se obtuvo lo siguiente:

1- Costo de adquisición de las bombas: La serie RNI 60-20 de bombas ideal tiene un costo de \$36'662.950 COP por unidad mientras que la serie C-10B de Colbombas tiene un precio de \$12'890.565 COP, el costo del variador VARIACHE 3 es de \$1'508.722 COP. Al contactar con las empresas, ambas ofrecieron sus servicios para la cotización e instalación de los sistemas, por un lado, bombas ideal estableció un costo de \$10.850.492 COP en costos de accesorios y un precio de \$1'302.060 COP de costos de instalación en promoción a la adquisición de las bombas y los accesorios, mientras que Colbombas estableció un precio de \$12'722.532 COP en costos de

accesorios y un costo de \$4'340.125 COP por costos de instalación en promoción por adquirir las bombas y los accesorios con la empresa, por lo tanto, los CAPEX de la alternativa 1 y 2 son:

$$CAPEX_1 = (36662950 * 2) + 1508722 + 10850492 + 1302060$$

$$CAPEX_1 = \$86'987.174 \text{ COP}$$

$$CAPEX_2 = (12890565 * 3) + 1508722 + 12722532 + 4340125$$

$$CAPEX_2 = \$57'243.074 \text{ COP}$$

Teniendo el CAPEX, se puede establecer el OPEX, este se podría definir como un porcentaje del CAPEX, por lo tanto, no puede superar a este sino no sería rentable la actividad, por lo tanto, se define el OPEX como el 27% del CAPEX, por lo tanto:

$$OPEX_1 = 86987174 * 0.27 = \$23'486.537 \text{ COP}$$

$$OPEX_2 = 57243074 * 0.27 = \$15'556.630 \text{ COP}$$

Ahora, si se proyecta el OPEX durante la duración del proyecto (15 años) a una tasa de inflación del 5% nos daría:

Tabla 6.

Cálculo del OPEX a 15 años

Proyección a 15 años con 5% de inflación			
Año		Alternativa 1(cop)	Alternativa 2(cop)
1	\$	23.486.537,00	\$ 15.556.630,00
2	\$	24.660.863,85	\$ 16.334.461,50
3	\$	25.893.907,04	\$ 17.151.184,58
4	\$	27.188.602,39	\$ 18.008.743,80
5	\$	28.548.032,51	\$ 18.909.180,99
6	\$	29.975.434,14	\$ 19.854.640,04
7	\$	31.474.205,85	\$ 20.847.372,05
8	\$	33.047.916,14	\$ 21.889.740,65
9	\$	34.700.311,95	\$ 22.984.227,68
10	\$	36.435.327,54	\$ 24.133.439,06

Proyección a 15 años con 5% de inflación				
Año	Alternativa 1(cop)		Alternativa 2(cop)	
11	\$	38.257.093,92	\$	25.340.111,02
12	\$	40.169.948,62	\$	26.607.116,57
13	\$	42.178.446,05	\$	27.937.472,40
14	\$	44.287.368,35	\$	29.334.346,02
15	\$	46.501.736,77	\$	30.801.063,32
Total	\$	506.805.732,12	\$	335.689.729,67

Teniendo el OPEX definido, se puede evidenciar que la alternativa 2 es más rentable en el periodo de 15 años propuestos.

13. Estimaciones de consumo energético y estrategias ambientales.

13.1 Estimación del consumo energético.

Para realizar las estimaciones de consumo energético para el establecimiento de estrategias ambientales, es necesario mencionar que se deben tener en cuenta campos como la eficiencia energética o las fallas de consumo para poder determinar cual alternativa presenta la mayor eficiencia, para ello, se realiza el cálculo del consumo energético anual teniendo en cuenta que la alternativa 1 presenta un consumo total de 53025.87 kWh/año y la alternativa 2 presenta un consumo de 24024.91kWh/año.

Para poder determinar el ahorro (en términos económicos que a su vez se traducen a términos de consumo) se necesita multiplicar el valor de consumo por el valor COP/kWh otorgado

por parte de la ESSA en las tablas de costos del presente año en el cual, para Suaita, el valor es de \$735.17 COP/kWh:

$$\text{Consumo}_1 = 63025.87 * 735.17 = \$46'334.729 \frac{\text{COP}}{\text{año}}$$

$$\text{Consumo}_2 = 2 * 24024.91 * 735.17 = \$35'324.787 \frac{\text{COP}}{\text{año}}$$

Teniendo los consumos, se puede determinar el ahorro mediante la diferencia de estos:

$$\text{Ahorro} = 46334729 - 35324787 = \$4'280.942 \text{COP/año}$$

Lo cual se traduce como un ahorro del 12.1%.

14. Impacto ambiental (Huella de carbono)

Para determinar la huella de carbono, es necesario consultar en las plataformas del ministerio de ambiente el factor de emisión por consumo eléctrico, el cuál se estableció el año 2023 con un valor 0.177 tCO₂eq/MWh, por lo tanto, este valor multiplicado por el valor consumo, permite determinar las emisiones de carbono del sistema:

$$\text{Emisiones alternativa 1} = 63025.87 * \frac{0.177}{1000} = 11.15 \frac{\text{tCO}_2\text{eq}}{\text{año}}$$

$$\text{Emisiones alternativa 2} = 24024.91 * \frac{0.177}{1000} = 4.25 \frac{\text{tCO}_2\text{eq}}{\text{año}}$$

Teniendo las emisiones, se puede calcular la reducción de emisiones mediante la diferencia de las emisiones:

$$\text{Reducción} = 11.15 - 4.25 = 6.9 \frac{\text{tCO}_2\text{eq}}{\text{año}}$$

Lo cual se traduce a una reducción de 38.11%

15. Elaboración de presupuestos.

Para calcular el presupuesto inicial, se puede facilitar el cálculo mediante la obtención del CAPEX, ya teniendo este valor, se conoce el presupuesto necesario para dar inicio al proyecto.

15.1 Comparación de alternativas

Para realizar la comparación de todos datos obtenidos, se realizó la siguiente tabla:

Tabla 7.

Matriz de evaluación multicriterio cuantitativa

Matriz de evaluación multicriterio cuantitativa					
Criterio	Peso	Alternativa 1	Puntuación	Alternativa 2	Puntuación
Técnicos	40%				
Eficiencia energética	15%	70%	10,5	80%	12,00
Confiabilidad	10%	Alta(pocas piezas)	9	Alta (redundancia)	9
Facilidad mantenimiento	8%	Complejo (Especializado)	5	Sencillo (estándar)	7,5
Vida útil	7%	20 años	9	10-15años	7
Económicos	45%				
CAPEX	20%	\$ 86.978.174,00	12	\$57.243.074,00	15
OPEX	15%	\$23.486.537,00	10	\$15.556.630,00	12

Matriz de evaluación multicriterio cuantitativa					
Criterio	Peso	Alternativa 1	Puntuación	Alternativa 2	Puntuación
Eficiencia costos	10%	Baja	6	Alta	8,5
Ambientales	15%				
Consumo energético	10%	63,025 kWh/año	6	24024,91 kWh/año	9
Huella carbono	5%	11,15tCO ₂ eq/año	6	4,25tCO ₂ eq/año	8
Total	100%		73,5		88,00

Siguiendo los datos de la tabla, se permite la comparación entre las alternativas, las puntuaciones se encuentran delimitadas desde el 1 al 15, este sistema de puntuaciones prioriza el componente económico como participante en el 45% de la decisión, el componente técnico en el 40% y el componente ambiental para el 15%, esto facilita la interpretación de los datos y los agrupa a modo de generar un análisis más exhaustivo y rápido.

16. Selección de la mejor opción

Para seleccionar la mejor opción, a parte de la tabla de comparación, se hace necesario, hacer una tabla de indicadores financieros debido a que esta permite comprar la viabilidad del proyecto y permite estimar valores como la tasa interna de retorno, el valor presente neto y el periodo de recuperación de la inversión.

Tabla 8.*Tabla de cálculo de indicadores financieros*

Tabla de cálculo de indicadores financieros			
Parámetro	Alternativa 1	Alternativa 2	Diferencial
CAPEX	\$86.978.174,00	\$57.243.074,00	\$29.735.100,00
OPEX (15 años)	\$506.805.732,12	\$335.689.729,67	\$171.116.002,45
Costo de energía 15 años	\$695.020.935,00	\$529.871.805,00	\$165.149.130,00
Costo total 15 años	\$1.288.804.841,12	\$922.804.608,67	\$366.000.232,45
VPN	\$1.227.433.182,02	\$878.861.532,07	
TIR	18%	25%	
Periodo recuperación	5,8 Años	4,2 Años	

Al analizar la tabla, se puede concluir que la alternativa 2 supera en todos los campos a la alternativa 1, por lo tanto, se selecciona esta alternativa como la más factible para el proyecto ya que, aunando los datos de las dos tablas anteriores, se puede concluir que la alternativa optima es la 2 (dos bombas en serie) ya que supera en todos los campos a la alternativa 1, esto no quiere decir que la alternativa 1 no sea funcional sino que esta alternativa está proyectada a un mayor tiempo de operación que el escogido para este proyecto (15 años).

17. Conclusiones

La configuración del sistema de abastecimiento impulsado por dos bombas en serie y una de reserva demostró ser técnicamente superior ya que se adecúa a la disponibilidad de actualización y mejoramiento de la PTAP, el sistema de captación es funcional a los fines del proyecto y la tubería de distribución es la adecuada para suplir las necesidades de la propuesta. Esta ventaja

operativa se complementa con mayor confiabilidad al eliminar puntos críticos de falla y permitir mantenimiento sin interrupción del servicio.

El análisis económico reveló que, aunque la alternativa seleccionada (alternativa 2) requiere una inversión inicial menor a su contraparte, esto genera ahorros acumulados de \$366 millones COP en 15 años, con un periodo de recuperación de 4.2 años y TIR superior al 25%. La optimización del consumo energético compensa ampliamente los mayores costos de mantenimiento, demostrando excelente relación costo-beneficio, a su vez, la comparación técnica permite identificar que es la opción factible al periodo de tiempo definido para el proyecto (15 años).

La solución implementada cumple integralmente con los objetivos de sostenibilidad y resiliencia del proyecto, garantizando suministro continuo de agua potable hasta 2040 mientras reduce significativamente el impacto ambiental. Las características modulares del sistema permiten futuras expansiones y adaptaciones a cambios demográficos, estableciendo las bases para un desarrollo comunitario sostenible en Suaita ya que se beneficiarían cerca de 500 habitantes del servicio de agua potable.

Referencias Bibliográficas

- DANE. (s.f.). *Departamento Administrativo Nacional de Encuestas*. www.DANE.com.co
- Gonzales, F. (2004). *Auditoría del mantenimiento e indicadores de gestión*. FC Editorial.
- Hernández , R., & Fernández, C. (2014). *Metodología de la investigación*. México: McGrawHill.
- Hidro Ing. (2022). *Hidro Ing*. Obtenido de Cómo identificar y calcular el golpe de ariete:
<https://www.hidrojing.com/como-calcular-el-golpe-de-ariete/>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo sostenible. (2022). *Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible*. Obtenido de Recursos hídricos: <http://minambiente.gov.co/gestion-integral-del-recurso-hidrico/>
- Ministerio de obras públicas de Argentina. (2017). *Guía docente: Los servicios de agua y saneamiento*. Argentina.
- Ministerio de Vivienda. (2017). *Reglamento técnico sector agua potable y saneamiento básico*. Colombia: MinVivienda.
- Ministerio de Vivienda. (2021). *Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento*. Obtenido de <https://www.minvivienda.gov.co/viceministerio-de-agua-y-saneamiento-basicoreglamento-tecnico-sector-manuales>
- Ministerio de Vivienda. (2021). *Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico*. Obtenido de <https://www.minvivienda.gov.co/viceministerio-de-agua-y-saneamiento-basicoreglamento-tecnico-sector-manuales>
- Mott, R. L. (2014). *Mecánica de fluidos*. México: Pearson.

Topographic map. (2025). *Topographic map*. Obtenido de <https://es-co.topographic-map.com/map-tt751/Suaita/?center=5.74991%2C-73.49304&zoom=9>

Apéndices

Apéndice A. Pozo de captación



Apéndice B. Pozo de cribado



Apéndice C. Pozo de decantado

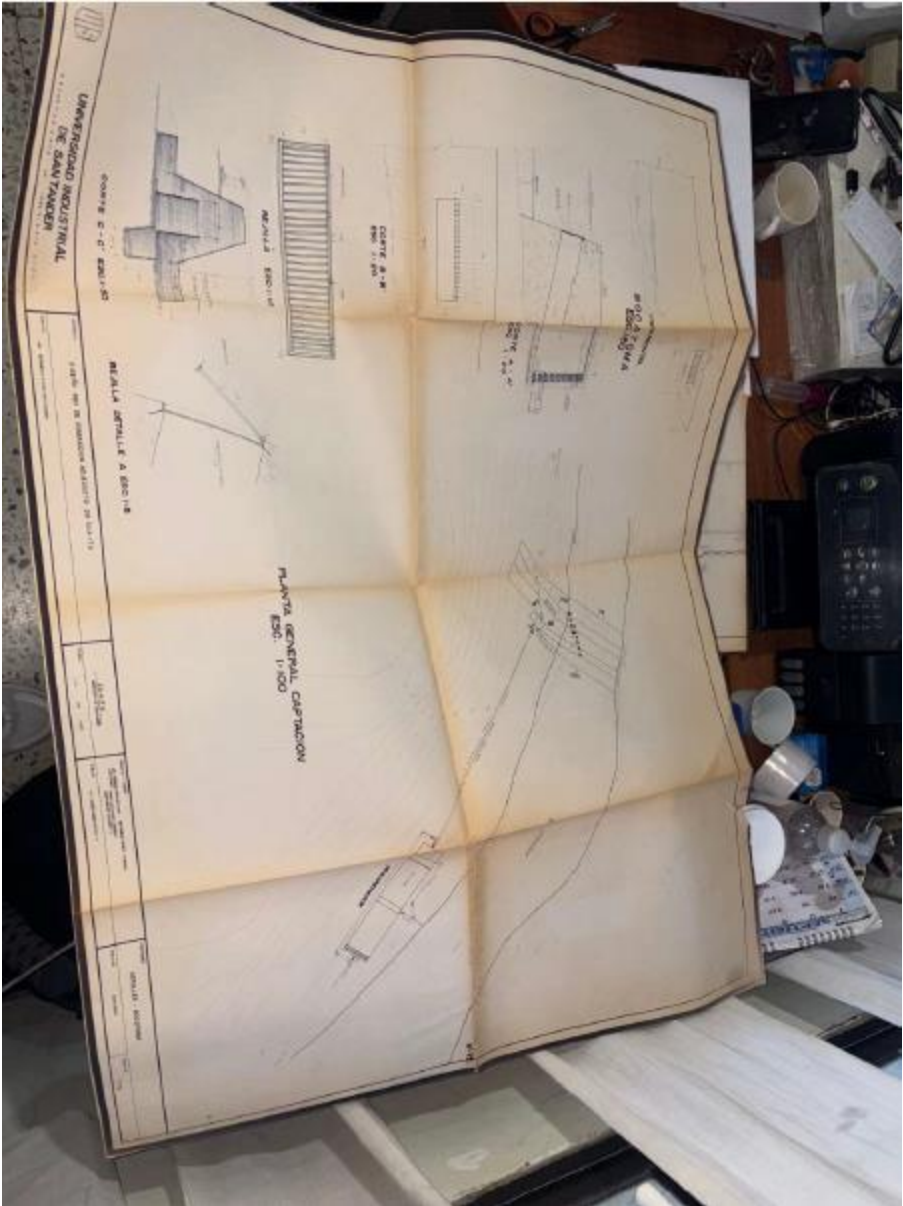


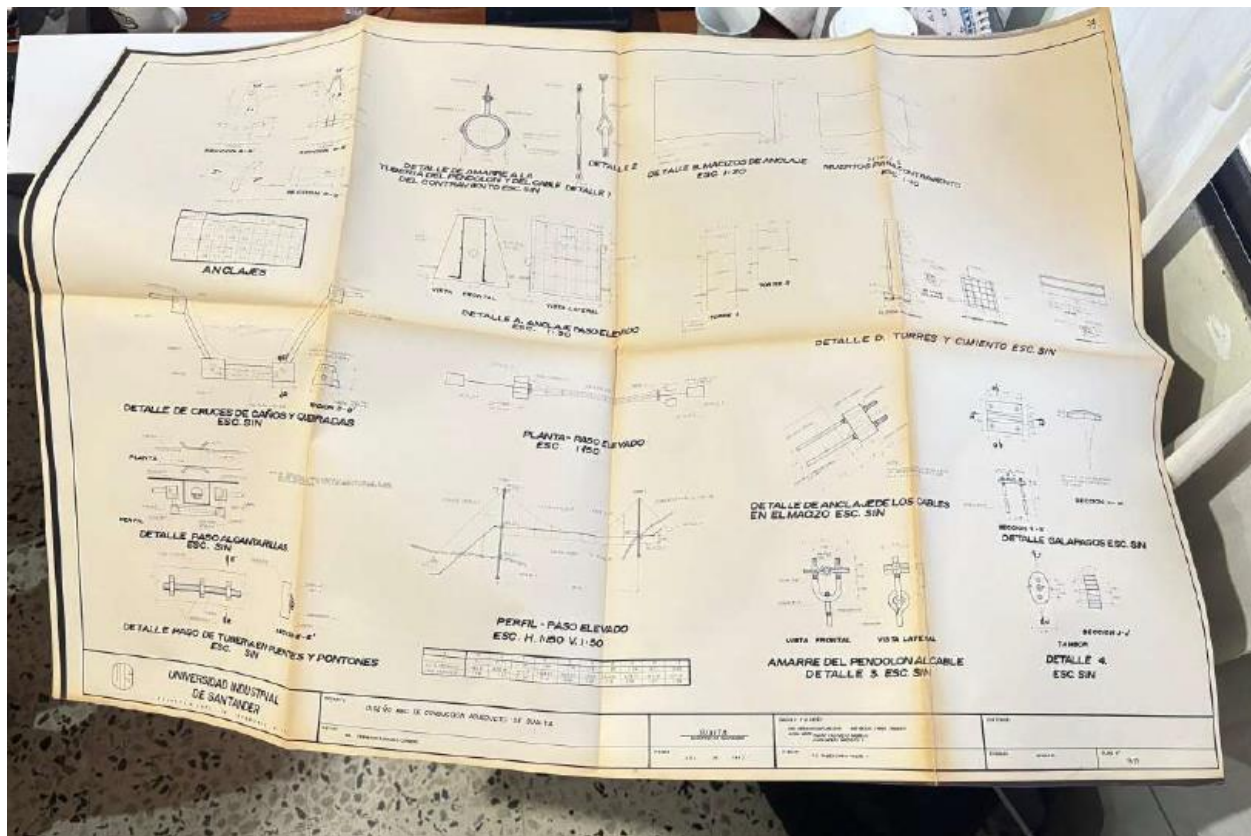
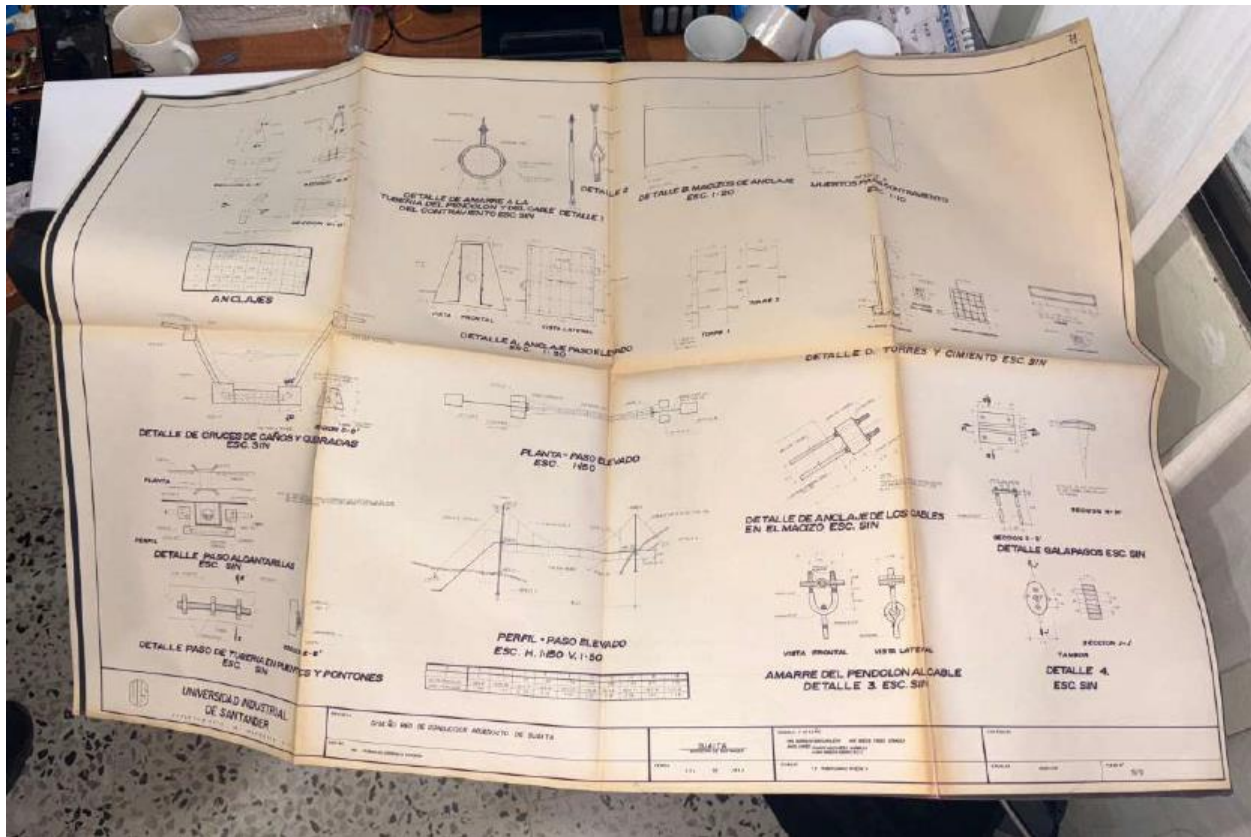
Apéndice D. Cuarto de bombas



Apéndice E. Tanque de almacenamiento







Apéndice G. Hoja de Excel de definición de formulas para la herramienta de cálculo

1	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y
2																									
3																									
4																									
5																									
6																									
7																									
8																									
9																									
10																									
11																									
12																									
13																									
14																									
15																									
16																									
17																									
18																									
19																									
20																									
21																									
22																									
23																									
24																									
25																									
26																									
27																									
28																									
29																									
30																									
31																									
32																									
33																									
34																									
35																									
36																									
37																									
38																									
39																									
40																									
41																									
42																									
43																									
44																									
45																									

Friction Factor = $\frac{8fL}{gD^5} \Delta P$

Si la instalación es en carga:

$$NPSH_{disp} = 10^5 * \frac{(p_l - p_v)}{\rho * g} + H_a - h_a$$

Para una instalación en aspiración:

$$NPSH_{disp} = 10^5 * \frac{(p_l - p_v)}{\rho * g} - H_a - h_a$$

Donde,

p_l es la presión sobre el líquido en el depósito de aspiración. Si el agua que se bombea se almacena al aire libre, p_l será la presión atmosférica. Este valor depende de la altura como se verá más adelante.

p_v es la presión de vapor del líquido. La tensión de vapor o presión de vapor a una temperatura determinada equivale a la presión bajo la cual el agua comienza a desprender burbujas. En la tabla siguiente se dan los valores.

Temperatura (°C)	0	4	10	20	30	40	50	60	80	100
Tensión de vapor (atm)	0.06	0.08	0.12	0.24	0.43	0.75	1.26	2.03	4.83	10.33
Densidad (kg/m³)	999.9	999.7	999.7	998.2	995.7	992.2	988.1	983.2	971.8	958.4

1 bar = 10 mca.

Diagrama de Moody Formulas

Apéndice H. Reporte Hidroflo 3 para la alternativa 2

Complete Report
Project file: PROB3.FLO - Not solved

Project Information

Project: Sample Problem 3
Client:
Engineer:
Firm:
Address:

Phone:
Fax:
email:

Static Head Data

Source Elev: 9,89 mtr
Source Pressure: 0,00 Bars
Source HGL: 9,89 mtr
Discharge Elev: 13,83 mtr
Discharge Pressure: 0,00 Bars
Discharge HGL: 13,83 mtr
Total Static Head: 3,94 mtr

System Information

Pipe Head Loss Eq.: Hazen-Williams
Tolerance: 6,31E-05 ftr/s
Atmospheric Press: 1,01 Bars
Total Elements: 27
Total Parallels: 0

Liquid Properties

Temperature: NA
Specific Gravity: 1,00
Viscosity: 1,13 cpoises
Vapor Pressure: 0,02 Bars (abs)
Specific Heat: 1,00 Cal/grC

Element Data by type...

Res/pipe ID	Type	Pressure (Bars)	Elev (mtr)
Source	reservoir/tank (open)	0,00	9,89
Inlet/Exit: pipe inlet-flush,skwp-w, Elev=7,72 mtra, dia=12,000 in			
Tank at source	reservoir/tank (open)	0,00	13,83
Inlet/Exit: pipe exit-all types, Elev=12,85 mtra, dia=10,000 in			
Tank at discharge			

Pipe ID	Type	Length (mtr)	File MW C	Run D (mtr)	In Dia (mtr)
pipe1	US04	26,55	100	12	11,940
pipe from source tank to first bend					
pipe2	US04	1,45	100	12	11,940
2nd pipe length					
pipe3	US04	13,41	100	12	11,940
2nd length of pipe					
pipe4	US04	1,45	100	12	11,940
short run of pipe					
pipe5	US04	4,54	100	12	11,940
run of pipe before check valve					
14	US04	10,50	100	12	11,940
pipe6	US04	1,17	100	12	11,940
short sect discharge pipe					
pipe9	US04	60,22	100	10	10,020
1st long sect discharge pipe					
pipe10	US04	72,17	100	10	10,020
2nd long sect discharge pipe					
pipe10	US04	1,50	100	12	11,940
pipe11	US04	1,50	100	12	11,940
Pipe specifications...					
US04 = steel, seamless, sch 40, ANSI B36.10, B31.1					

Valve & Fittings ID	Description	File R	Diameter (mtr)	Direction
K1bow1	standard elbow (45 deg)	0,21	12,000	-90D
first bend				
Tee1	standard tee (thru flow)	0,26	12,000	
system expansion tee				
Val1	plug valve straightway	0,23	12,000	
Tee2	standard tee (thru flow)	0,26	12,000	
expansion tee				

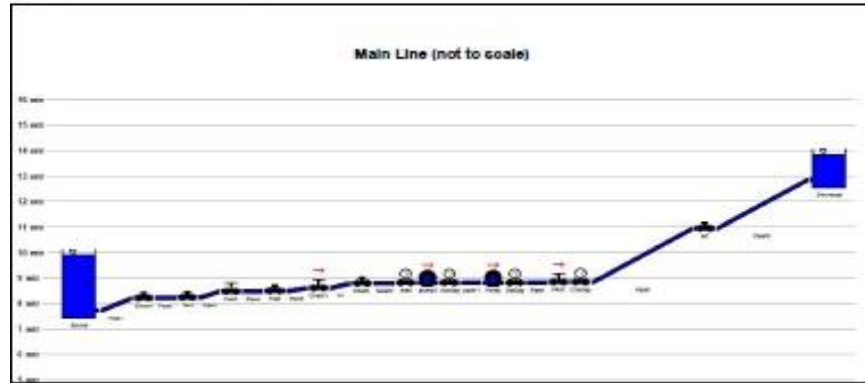
Element Data by type...

Valves & Fittings:		Flow	Diameter	Direction			
ID	Description	K	(inch)	->ID			
check1	swing check valve (L/D=100)	1,30	12,000	->14			
enlarc1	back flow preventer						
	Enlarge/Contract (Angle=45)						
PRV1	PRV (max press=1,52 bars)		10,000	->chk0ag			
el1	PRV for safety						
	std elbow (long radius 90 deg)	0,22	10,000				
	head in discharge						
Pumps:		Flow rate	Head hd	2nd	3rd	4th	Direction
ID		(L/s)	(Meters)	(Meters)	(Meters)	(Meters)	->ID
ump		450,00	2,39	2,67	2,12	1,94	->chk0ag
ump2		450,00	2,39	2,27	2,12	1,94	->chk0ag
Gauges:		Elevation	Demand				
ID		(meters)	(L/s)				
su0ag	suction gauge	8,62	0,00				
di0ag	discharge gauge	8,62	0,00				
chk0ag	gauge for PRV operation check	8,64	0,00				
sed	gauge	8,62	0,00				

Element Data in sequence...

Elements in sequence		Pressure	Elev
ID	Type	(Meters)	(meters)
source	Supply Reservoir/Tank (open)	0,00	8,99
	Tank at source		
Pipe1	Pipe		
	Steel, Seamless, Sch 40, ANSI B36.10, B31.1		
	pipe from source tank to first bend		
Elbow1	Fitt		
	Standard elbow (45 deg)		
Pipe2	Pipe		
	Steel, Seamless, Sch 40, ANSI B36.10, B31.1		
	2nd pipe length		
Tee1	Fitt		
	Standard tee (thru flow)		
Pipe3	Pipe		
	Steel, Seamless, Sch 40, ANSI B36.10, B31.1		
	3rd length of pipe		
Valv1	Valve		
	Plug valve straightway		
Pipe4	Pipe		
	Steel, Seamless, Sch 40, ANSI B36.10, B31.1		
	short run of pipe		
Tee2	Fitt		
	Standard tee (thru flow)		
Pipe5	Pipe		
	Steel, Seamless, Sch 40, ANSI B36.10, B31.1		
	run of pipe before check valve		
check1	Valve		
	swing check valve (L/D=100)		
14	Pipe		
	Steel, Seamless, Sch 40, ANSI B36.10, B31.1		
enlarc1	Fitt		
	Enlarge/Contract (Angle=45)		
tube10	Pipe		
	Steel, Seamless, Sch 40, ANSI B36.10, B31.1		
sed	Gauge		
			8,92
ump2	Pump		
	Defined pump curve		8,92
su0ag	Gauge		
	Suction gauge		8,92
pipe11	Pipe		
	Steel, Seamless, Sch 40, ANSI B36.10, B31.1		
ump	Pump		
	Colbomb 1		
di0ag	Gauge		
	discharge gauge		8,92
Pipe9	Pipe		
	Steel, Seamless, Sch 40, ANSI B36.10, B31.1		
	short sect discharge pipe		
PRV1	Valve		
	PRV (max press=1,52 bars)		
chk0ag	Gauge		
	gauge for PRV operation check		8,94
Pipe9	Pipe		
	Steel, Seamless, Sch 40, ANSI B36.10, B31.1		
	1st long sect discharge pipe		
el1	Fitt		
	std elbow (long radius 90 deg)		
Pipe10	Pipe		
	Steel, Seamless, Sch 40, ANSI B36.10, B31.1		
	2nd long sect discharge pipe		
Discharge	Supply Reservoir/Tank (open)	0,00	11,93
	Tank at discharge		
	End of Main line...		

Project: Sample Problem 3



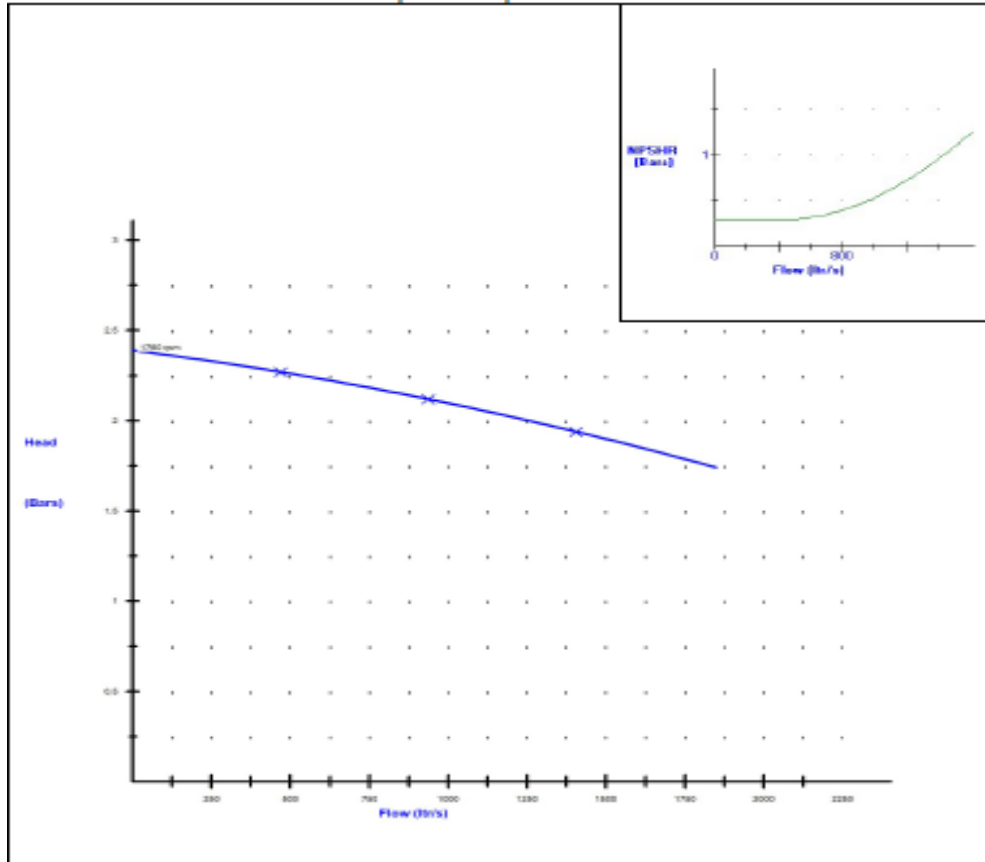
Sample Problem 3

Client:
Engineer:
Firm:
Address:
Phone:

Liquid Properties

Temperature: NA
Specific Gravity: 1,00
Viscosity: 1,13 cpolises
Vapor Pressure: 0,02 Bars (abs)
Specific Heat: 1,00 Cal/grC

Pump ID: Pump - Colbomb 1



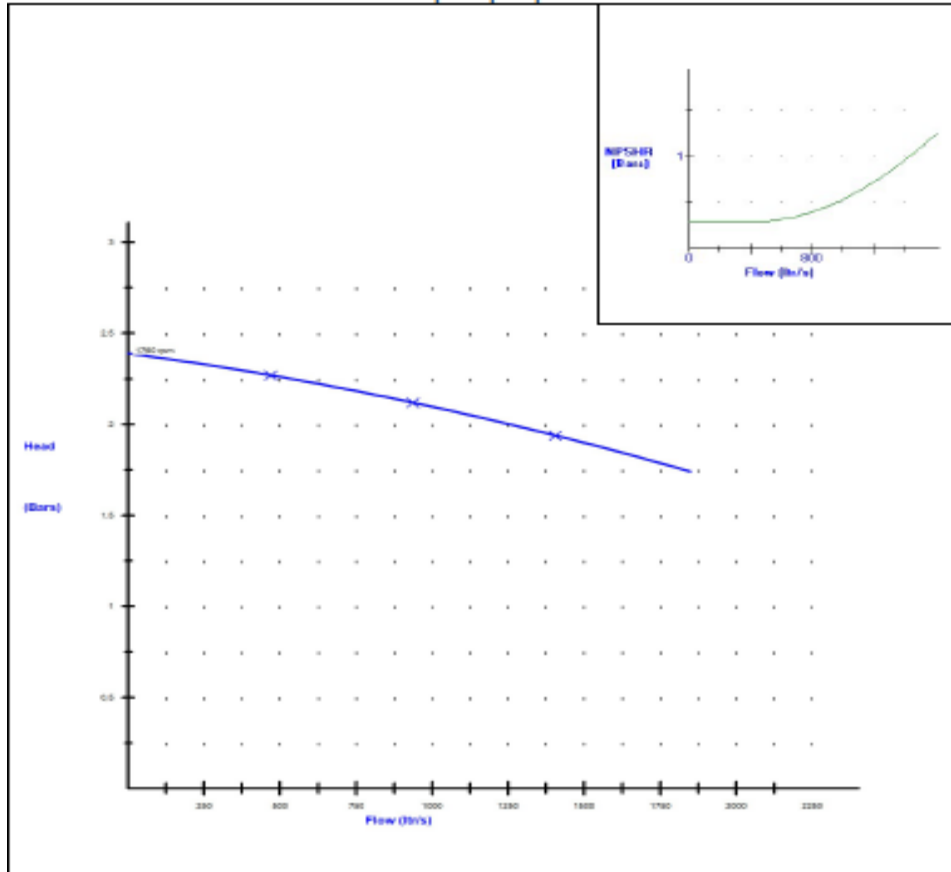
Sample Problem 3

Liquid Properties

Client:
Engineer:
Firm:
Address:
Phone:

Temperature: NA
Specific Gravity: 1,00
Viscosity: 1,13 cpoles
Vapor Pressure: 0,02 Bars (abs)
Specific Heat: 1,00 Cal/grC

Pump ID: pump2 -



Apéndice I. Reporte Hidroflo alternativa 1

Copyright 2010 (c) All Rights Reserved. www.tahoe-software.com Unregistered Trial Version

Complete Report
Project file: tesis 1.flo - Solved

<p>Project Information</p> <p>Project: Sample Problem 3 Client: Engineer: Firm: Address: Phone: Fax: email:</p>	<p>Static Head Data</p> <p>Source Elev: 9.89 mtr Source Pressure: 0.00 Kpa Source HGL: 9.89 mtr Discharge Elev: 13.83 mtr Discharge Pressure: 0.00 Kpa Discharge HGL: 13.83 mtr Total Static Head: 3.94 mtr</p>
<p>System Information</p> <p>Pipe Head Loss Eq.: Hazen-Williams Tolerance: 6.31E-05 ft/s Atmospheric Press: 1.01 Bars Total Elements: 24 Total Parallels: 0j</p>	<p>Liquid Properties</p> <p>Temperature: NA Specific Gravity: 1.00 Viscosity: 1.13E-06 m2/s Vapor Pressure: 0.02 Bars (abs) Specific Heat: 1.00 Cal/grC</p>

Element Data by type...

Supply:	Type	Pressure (Kpa)	Elev (mtr)	Flow (L/s)	In/Out (mtr)	HGL
Source	reservoir/tank (open)	0.00	9.89	172.27	out	9.89
	Inlet/Exit: pipe inlet-flush, sharp-e, Elev=7.72 mtr, dia=12,000 in, si=1.39 Kpa tank at source					
Discharge	reservoir/tank (open)	0.00	13.83	172.27	in	13.83
	Inlet/Exit: pipe exit-all types, Elev=12.85 mtr, dia=12,000 in, si=5.77 Kpa tank at discharge					

Pipes:	ID	Spec	Length (mtr)	Frict MW C	Min D (inch)	In Dia (inch)	Flow (L/s)	Direction	Vel (ft/s)	Head Loss (ft)
Pipe1	1804	14.05	100	12	11,940	172.27	->elbow1	2.38	0.96	
Pipe2	1804	1.45	100	12	11,940	172.27	->tee1	2.38	0.44	
Pipe3	1804	13.41	100	12	11,940	172.27	->swell	2.38	3.58	
Pipe4	1804	1.44	100	12	11,940	172.27	->tee2	2.38	0.39	
Pipe5	1804	6.54	100	12	11,940	172.27	->check1	2.38	1.75	
14	1804	10.00	100	12	11,940	172.27	->elbow1	2.38	2.67	
Pipe9	1804	1.17	100	12	11,940	172.27	->flv1	2.38	0.31	
Pipe8	1804	80.52	100	10	10,020	172.27	->cell2	3.39	50.28	
Pipe10	1804	72.37	100	10	10,020	172.27	->discharge	3.39	45.48	
Pipe11	1804	1.00	100	12	11,940	172.27	->tee3	2.38	0.27	
Pipe specifications... 1804 = Steel, Seamless, Sch 40, ANSI A36.10, R31-1										

Valves & Fittings:	ID	Description	Frict K	Diameter (inch)	Flow (L/s)	Direction	Head Loss (ft)
Elbow1		standard elbow (45 deg)	0.21	12,000	172.27	->pipe2	0.59
tee1		standard tee (thru flow)	0.26	12,000	172.27	->pipe3	0.70
swell		system expansion tee	0.23	12,000	172.27	->pipe4	0.64
tee2		standard tee (thru flow)	0.26	12,000	172.27	->pipe5	0.72
check1		swing check valve (L/D=100) back flow prevent	1.30	12,000	172.27	->14	3.60

Project file: tesis 1.flo - Solved

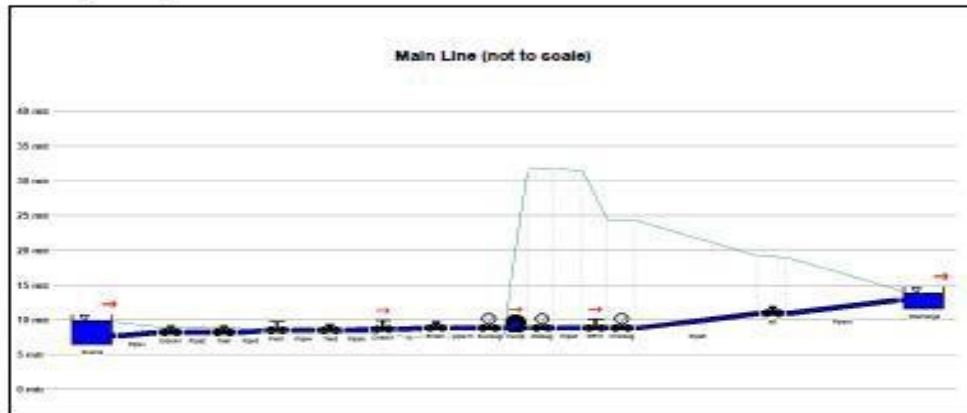
Element Data by type...

Valves & Fittings		Friction	Diameter	Flow	Direction	Head Loss		
ID	Description	K	(inches)	(ft/s)	-SID	(ft/s)		
K11a1	Enlarge/Contract (Angle=45)	0,00	11,940	170,27	-@Pipe11	0,00		
PKV1	PKV (max press=151,65 kpa)	10,37	10,000	170,27	-@Ch04g	71,34		
e12	Std elbow (long radius 90 deg)	0,22	10,000	170,27	-@Pipe10	1,27		
Head in discharge								
Pumps		Flow loss	Start hd	End	4th	Flow Direction	Open Head	
ID	(ft/s)	(m/s)	(ft/s)	(ft/s)	(ft/s)	(ft/s)	(ft/s)	
Pump	437,00	24,41	53,19	31,65	19,62	170,27	-@Ch04g	24,19
Elev = 9,92 mtr, Speed = 1760 rpm, NPSHR points = 2,94, 4,90, 9,70 mtr								
SPSRR = 2,90 mtr								
SFRSA = 9,74 mtr								
Colbomb 1								
Gauges		Elevation	Demand	Pressure	Head			
ID		(mtr)	(ft/s)	(ft/s)	(mtr)			
Ch04g	suction gauge	9,92	0,00	-13,25	7,47			
Ch04g	discharge gauge	9,92	0,00	22,55	31,65			
Ch04g	gauge for PKV operation check	9,94	0,00	151,67	24,33			

Element Data in sequence...

Elements in sequence		Pressure	Elev	Head Change	Head
ID	Type Desc	(ft/s)	(mtr)	(ft/s)	(ft/s)
Start of Main line - source side...					
Source	Supply reservoir/tank (open)	0,00	9,99		9,99
	Inlet/Exit: Type=pipe inlet-flush,sharp-edged			-0,14	9,85
	Tank at source				9,85
Pipe1	Pipe Steel, Seamless,Sch 40, ANSI B36.10,B31.1			-0,71	9,14
	pipe from source tank to first bend				9,14
K1bow1	Fitt Standard elbow (45 deg)			-0,06	8,99
Pipe2	Pipe Steel, Seamless,Sch 40, ANSI B36.10,B31.1			-0,04	8,93
	2nd pipe length				8,93
Tee1	Fitt Standard tee (thru flow)			-0,07	8,86
Pipe3	Pipe Steel, Seamless,Sch 40, ANSI B36.10,B31.1			-0,07	8,79
	3rd length of pipe				8,79
Valv1	Valve Plug valve straightway			-0,07	8,72
Pipe4	Pipe Steel, Seamless,Sch 40, ANSI B36.10,B31.1			-0,04	8,38
	short run of pipe				8,38
Tee2	Fitt Standard tee (thru flow)			-0,07	8,31
Pipe5	Pipe Steel, Seamless,Sch 40, ANSI B36.10,B31.1			-0,19	8,14
	run of pipe before check valve				8,14
Check1	Valve Swing check valve (L/S=100)			-0,37	7,77
14	Pipe Steel, Seamless,Sch 40, ANSI B36.10,B31.1			-0,07	7,49
K1a1	Fitt Enlarge/Contract (Angle=45)			0,00	7,49
Pipe11	Pipe Steel, Seamless,Sch 40, ANSI B36.10,B31.1			-0,03	7,47
Gaug1	Gauge Suction gauge				7,47
Pump	Pump Colbomb 1	-1,35	9,92	24,19	31,65
Ch04g	Gauge discharge gauge	22,63	9,92		31,65
Pipe6	Pipe Steel, Seamless,Sch 40, ANSI B36.10,B31.1			-0,03	31,62
	short sect discharge pipe				31,62
PKV1	Valve PKV (max press=151,65 kpa)			-7,29	24,33
Ch04g	Gauge Gauge for PKV operation check	15,49	9,94		24,33
Pipe9	Pipe Steel, Seamless,Sch 40, ANSI B36.10,B31.1			-5,14	19,20
	1st long sect discharge pipe				19,20
e12	Fitt Std elbow (long radius 90 deg)			-0,13	19,07
Pipe10	Pipe Steel, Seamless,Sch 40, ANSI B36.10,B31.1			-1,65	18,42
	2nd long sect discharge pipe				18,42
Discharge	Inlet/Exit: Type=pipe exit-all types	0,00	13,93	-0,09	13,83
	Supply reservoir/tank (open)				13,83
	Tank at discharge				13,83
End of Main line - discharge side...					

Project: Sample Problem 3



Sample Problem 3

Client:
Engineer:
Firm:
Address:
Phone:

Liquid Properties

Temperature: NA
Specific Gravity: 1,00
Viscosity: 1,13E-06 m2/s
Vapor Pressure: 0,02 Bars (abs)
Specific Heat: 1,00 Cal/grC

Operating Results

TDH: 24,19 mtr liq
Flow: 172,27 ltr/s
NPSHA: 8,74 mtr liq
NPSHR: 9,71 mtr liq
Tot Static Hdt: 3,94 mtr liq

Pump ID: Pump - Colbomb 1

