



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Propuesta de rehabilitación
del acueducto El Cuchillo –
Monterrey I**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero Civil

P R E S E N T A

Jhonny David Pérez Bolom

DIRECTOR DE TESIS

M.I. Alejandro Sánchez Huerta



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2024



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Agradecimientos

A mi familia:

A través de este trabajo deseo expresar mi profundo agradecimiento a cada uno de ustedes. Mi familia, fuente de amor, apoyo y comprensión, ha sido mi motivación durante este viaje lleno de desafíos y logros. Cada uno de ustedes ha sido un pilar fundamental en mi camino, brindándome aliento incondicional, paciencia infinita y un respaldo constante.

A lo largo de este arduo proceso, he experimentado no solo un crecimiento académico, sino también personal. Mi familia ha sido testigo de mis altibajos, celebrando mis triunfos y apoyándome en los momentos difíciles. A cada uno de ustedes, les agradezco por ser mi apoyo y por brindarme la fuerza necesaria para superar los desafíos.

Con todo mi cariño y agradecimiento.

M.I. Alejandro Sánchez Huerta:

Te agradezco respetado asesor, por tu paciencia, por desafiarme constantemente a alcanzar nuevas metas y por creer en mi capacidad para alcanzar el éxito. Tu guía ha sido invaluable, y el conocimiento adquirido bajo tu supervisión ha dejado una marca muy importante en mi formación académica.

Agradezco sinceramente al Instituto de Ingeniería de la UNAM por brindarme el apoyo invaluable a través de la beca que me permitió llevar a cabo mi tesis. Su respaldo ha sido fundamental en mi trayectoria académica.

OBJETIVO GENERAL

El objetivo general de este trabajo es realizar el análisis del funcionamiento hidráulico del acueducto El Cuchillo – Monterrey I en condiciones de flujo permanente, considerando sus características actuales. Posteriormente, se propone un plan de rehabilitación que incluye una serie de acciones destinadas a garantizar la eficiencia operativa de esta infraestructura en el futuro.

OBJETIVOS PARTICULARES

- Destacar la importancia del acueducto El Cuchillo – Monterrey I como infraestructura hidráulica para el suministro de agua en el Área Metropolitana de Monterrey.
- Presentar una descripción del acueducto El Cuchillo – Monterrey I, abarcando sus características y funcionamiento desde la toma hasta la ubicación de la entrega, incluyendo la línea de conducción, los equipos de bombeo y los tanques de sumergencia instalados.
- Proponer la realización de trabajos de limpieza de la línea de conducción mediante la técnica conocida como “pigging” y la instalación de nuevos equipos de bombeo para mejorar la eficiencia del acueducto.
- Realizar y analizar las simulaciones del funcionamiento hidráulico considerando tres estrategias para garantizar el funcionamiento adecuado del acueducto:
 - Maniobras de paro y arranque de los equipos de bombeo
 - Implementar la instalación y operación válvulas de paso anular
 - Variar la velocidad de giro de los equipos de bombeo
- Determinar la estrategia más adecuada para lograr el funcionamiento hidráulico óptimo del sistema y proponer acciones concretas para llevar a cabo la rehabilitación del acueducto.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	1
I ANTECEDENTES.....	3
I.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL ESTADO DE NUEVO LEÓN.....	3
I.2 CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL ÁREA METROPOLITANA DE MONTERREY....	4
I.3 FUENTES DE AGUA PARA EL ÁREA METROPOLITANA DE MONTERREY.....	6
I.4 EL DESARROLLO DE LA INFRAESTRUCTURA HIDRÁULICA EN EL ÁREA METROPOLITANA DE MONTERREY	8
I.4.1 PRESA LA BOCA	8
I.4.2 PROYECTOS MONTERREY I – MONTERREY VI.....	8
I.4.3 PRESA LA LIBERTAD	11
II CONCEPTOS FUNDAMENTALES.....	12
II.1 ECUACIÓN DE CONTINUIDAD	12
II.3 PÉRDIDA DE CARGA.....	13
II.4 POTENCIA DEL AGUA EN UN SISTEMA HIDRÁULICO Y EFICIENCIA	14
II.5 ECUACIONES DE SIMILITUD (VARIACIÓN DE LA VELOCIDAD DE GIRO).....	15
II.6 CURVAS CARACTERÍSTICAS DE LA BOMBA	15
II.7 CAVITACIÓN Y CARGA DE SUCCIÓN POSITIVA NETA (CSPN)	16
II.8 COMPONENTES DE UN SISTEMA DE BOMBEO.....	17
II.9 CURVAS DE CARGAS DE LA INSTALACIÓN Y DE LA BOMBA (PUNTO DE OPERACIÓN).....	19
II.10 SISTEMAS DE BOMBEO EN PARALELO	21
II.11 SISTEMAS DE BOMBAS EN SERIE.....	22
III DESCRIPCIÓN DEL ACUEDUCTO.....	23
III.1 PRESA EL CUCHILLO Y GENERALIDADES DEL SISTEMA DE BOMBEO	24
III.2 TRAMO DE LA PRESA EL CUCHILLO AL TANQUE DE SUMERGENCIA 1.....	25
III.3 TRAMO DEL TANQUE DE SUMERGENCIA 1 AL TANQUE DE SUMERGENCIA 2	26
II.4 TRAMO DEL TANQUE DE SUMERGENCIA 2 AL TANQUE DE SUMERGENCIA 3.....	27
III.5 TRAMO DEL TANQUE DE SUMERGENCIA 3 AL TANQUE DE SUMERGENCIA 4	28
III.6 TRAMO DEL TANQUE DE SUMERGENCIA 4 AL TANQUE DE AGUAS CRUDAS	29

IV PROPUESTA DE REHABILITACIÓN	31
IV.1 LIMPIEZA DE TUBERÍAS POR MEDIO DE “DIABLOS” O “PIGS”	31
IV.2 CURVA DEL SISTEMA	33
IV.2.1 TRAMO DE PRESA EL CUCHILLO AL TANQUE DE SUMERGENCIA 1	33
IV.2.2 TRAMO DE TANQUE DE SUMERGENCIA 1 AL TANQUE DE SUMERGENCIA 2 ..	35
IV.2.3 TRAMO DE TANQUE DE SUMERGENCIA 2 AL TANQUE DE SUMERGENCIA 3 ..	36
IV.2.4 TRAMO DE TANQUE DE SUMERGENCIA 3 AL TANQUE DE SUMERGENCIA 4 ..	37
IV.2.5 TRAMO DE TANQUE DE SUMERGENCIA 4 AL TANQUE DE AGUAS CRUDAS ...	38
IV.3 SELECCIÓN DE EQUIPOS DE BOMBEO	40
IV.3.1 PLANTA DE BOMBEO 0	41
IV.3.2 PLANTA DE BOMBEO 1	43
IV.3.3 PLANTA DE BOMBEO 2	45
IV.3.4 PLANTA DE BOMBEO 3	47
IV.3.5 PLANTA DE BOMBEO 4	49
IV.4 REVISIÓN DE LAS BOMBAS POR CAVITACIÓN	51
V ANÁLISIS HIDRÁULICOS	53
V.1 MANIOBRAS DE PARO Y ARRANQUE DE EQUIPOS DE BOMBEO	53
V.2 ESTRANGULAMIENTO DE VÁLVULAS	61
V.3 CONTROL DE LA VELOCIDAD DE GIRO DE LOS EQUIPOS DE BOMBEO	67
VI CONCLUSIONES	70
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	74

INTRODUCCIÓN

Es imprescindible cubrir la necesidad de agua para las diferentes actividades que realizan los habitantes de una población, lo que implica considerar las diferentes fuentes de las cuales se puede extraer este recurso. En México existen varias ciudades que, por sus características fisiográficas y climatológicas desfavorables, la disponibilidad del líquido vital resulta escasa, de tal manera que se han incorporado fuentes de suministro ubicadas a una distancia considerablemente lejanas de las zonas urbanas, este es el caso del Área Metropolitana de Monterrey (AMM).

El organismo operador encargado de proporcionar los servicios de agua en el Área Metropolitana de Monterrey es Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey (SADM), el cual ha estado activo en el desarrollo de infraestructura hidráulica desde 1956 para satisfacer las demandas de la población.

La evaluación de las condiciones y el funcionamiento del acueducto El Cuchillo – Monterrey I es fundamental dada su importancia como uno de los principales componentes de la infraestructura hidráulica del Área Metropolitana de Monterrey. Esto permitirá identificar cualquier necesidad de mantenimiento correctivo para garantizar su operación adecuada durante un periodo prolongado.

Para el desarrollo de este trabajo se presenta en primera instancia el capítulo I que corresponde a los antecedentes, donde se presentan de forma general las características del estado de Nuevo León y del Área Metropolitana de Monterrey, se exponen las fuentes de agua con las que cuenta esta región, la distribución, usos, así como la infraestructura hidráulica que se ha desarrollado a lo largo de los años, esto con el fin de demostrar la conexión que existe entre los distintos elementos que conforman la infraestructura hidráulica en el AMM.

En el capítulo II se exponen los conceptos necesarios para el análisis hidráulico del funcionamiento en flujo permanente del acueducto. Se presentan las ecuaciones fundamentales de la hidráulica, como la ecuación de continuidad y la ecuación de la energía, que rigen el comportamiento del sistema. Estos conceptos son determinantes para comprender como interactúa la línea de conducción y las bombas en un sistema de bombeo de agua. Además, se aborda la carga de succión positiva neta, cuya determinación es decisiva para prevenir daños por cavitación en las bombas. También se proporciona la base teórica necesaria para entender el funcionamiento de los equipos de bombeo cuando trabajan en conjunto, ya sea en configuración en serie o en paralelo.

En el capítulo III se proporciona una descripción del acueducto El Cuchillo I, utilizando la información proporcionada por el Grupo de Hidromecánica del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México. Se presentan las características principales del acueducto, incluyendo las longitudes de la línea de conducción, el material de construcción de las tuberías y el área de la sección transversal de las mismas. Además, se presentan las especificaciones de las bombas utilizadas originalmente en el sistema. También se proporciona información sobre el cadenamiento y la elevación de las estaciones de bombeo a lo largo del acueducto. Esta información es fundamental para la creación de un modelo que permita simular la operación del acueducto en condiciones de flujo permanente.

En el capítulo IV se presenta la propuesta de rehabilitación para el acueducto, que comienza con la remoción de material adherido en la línea de conducción mediante la implementación del mecanismo de

limpieza conocido como “pigging”. Este proceso tiene como objetivo reducir las pérdidas de energía causadas por la fricción en las tuberías.

Posteriormente, utilizando el nuevo factor de fricción obtenido después de la limpieza, se procede a construir la curva del sistema para cada tramo del acueducto. Estas curvas son fundamentales para seleccionar los equipos de bombeo que puedan satisfacer tanto la demanda de carga como el gasto necesario para la operación del sistema.

Una vez seleccionadas las bombas adecuadas, se construye la curva equivalente para cada estación de bombeo que opera en paralelo. Obtenida la curva equivalente en paralelo para las bombas y la curva del sistema para cada tramo del acueducto, se determina el punto de operación. Por último, se verifica la posible presencia de cavitación en los equipos de bombeo.

En el capítulo V se llevan a cabo los análisis hidráulicos utilizando el software EPANET (Environmental Protection Agency Network Evaluation Tool), el cual permite realizar simulaciones en flujo permanente. Se consideran tres propuestas para los análisis hidráulicos:

- Maniobras de paros y arranques de los equipos de bombeo
- Implementación de válvulas de paso anular
- Variación de la velocidad de giro de los equipos de bombeo

El objetivo de estos análisis es garantizar que durante el periodo de simulación no se presenten condiciones de vaciado o derrame en los tanques de sumergencia. Por lo cual se deben de considerar los diferentes niveles en los que puede operar la presa y el número de equipos de bombeo en cada planta. Mediante estas simulaciones, se busca determinar la alternativa que permita mantener los niveles de agua dentro de los límites establecidos en todas las condiciones consideradas.

En el capítulo VI se presentan las conclusiones derivadas de los resultados obtenidos en los análisis hidráulicos realizados en el capítulo V. Estas conclusiones se basan en la evaluación de las tres propuestas analizadas para mantener los niveles de agua dentro de los límites establecidos en los tanques de sumergencia. Se identifica la alternativa más efectiva y práctica para garantizar el funcionamiento adecuado del sistema de bombeo en diversas condiciones de operación.

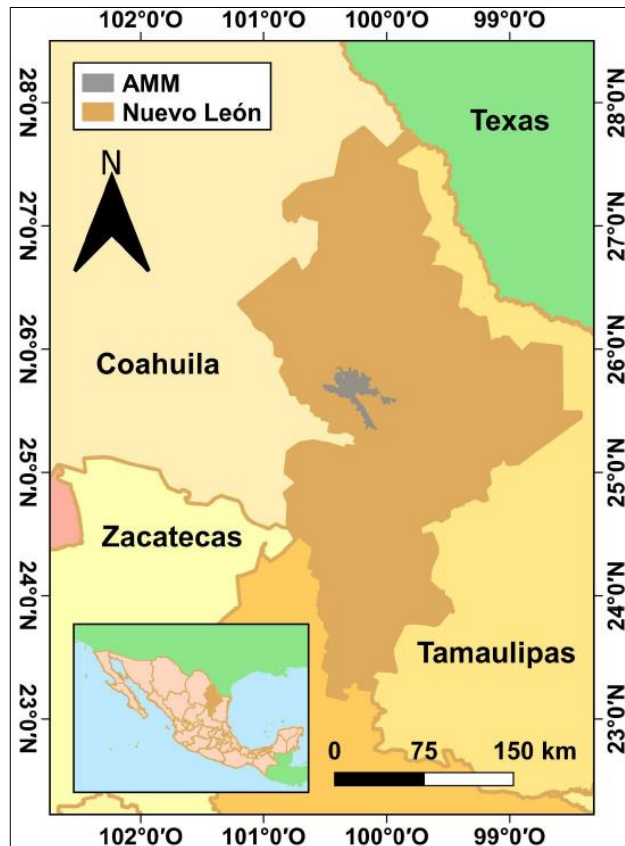
I ANTECEDENTES

En este capítulo se presenta información general del estado de Nuevo León, principalmente del Área Metropolitana de Monterrey. Se destacan los factores involucrados en la administración del agua, además se exponen las condiciones actuales y los trabajos que se han realizado para lograr satisfacer la demanda de agua de la población, para lo cual se hace un recuento de los proyectos de infraestructura hidráulica más relevantes desde el año de 1965 a la fecha. La información presentada para la elaboración del presente capítulo fue recopilada de las publicaciones “Plan Hídrico Nuevo León 2050”, publicado por el Fondo de Agua Metropolitano de Monterrey, y de “Agua para Monterrey Logros, retos y oportunidades para Nuevo León y México”, publicado por el Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey (ITESM).

I.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL ESTADO DE NUEVO LEÓN

El estado de Nuevo León se ubica al noreste de la República Mexicana, colinda al norte con el estado de Coahuila, Tamaulipas y en su límite internacional con Estados Unidos de América. En la zona poniente limita con los estados de Coahuila, San Luis Potosí y Zacatecas. Al sur colinda con San Luis Potosí y al oriente con Tamaulipas. En la *figura 1.1* se puede observar la ubicación del estado de Nuevo León dentro de la República Mexicana.

Figura 1.1 Ubicación geográfica del estado de Nuevo León



Fuente: *Logros, retos y oportunidades para Nuevo León y México*, ITESM, 2021

El estado cuenta con una superficie de 64 924 km², representando el 3.27% del territorio nacional mexicano.

De acuerdo con el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) a través de la publicación “Panorama sociodemográfico de Nuevo León: Censo de Población y Vivienda 2020”, para el año 2020 contaba con una población total de 5 784 442 habitantes, lo cual supuso el 4.6% de la población total nacional. Se compone de un total de 51 municipios, los tres municipios más poblados del estado de Nuevo León para el año 2020 fueron: Monterrey (1 142 994 habitantes), Apodaca (656 464 habitantes) y Guadalupe (643 143 habitantes), municipios que se encuentran dentro del Área Metropolitana de Monterrey. Cabe mencionar que el 35% de los municipios que conforman el estado de Nuevo León se encuentran dentro del AMM, lo cual resulta de especial atención, pues conforme a su población esta demanda mayor cantidad de agua.

En el año 2018 el estado de Nuevo León reportó un uso total de agua de 2 091 hm³ (1 hm³ equivale a un millón de m³), de estos, 1 202 hm³ provinieron de fuentes superficiales y 889 hm³ de fuentes subterráneas, representado el 57% y 43%, respectivamente del total consumido por el estado.

Durante el año 2018 el uso de agua en la entidad federativa se distribuyó en las siguientes actividades: 4% para la industria abastecida, 26% para abastecimiento público y un 70% para el sector agrícola.

Con base en los datos presentados anteriormente, el caudal consumido en el estado de Nuevo León fue de 38.11 m³/s provenientes de fuentes superficiales, mientras que de las fuentes subterráneas requirió de 28.19 m³/s, sumando un total de 66.30 m³/s. Con una distribución de 2.65 m³/s para la industria autoabastecida, 17.24 m³/s para el abastecimiento público y 46.41 m³/s para el sector agrícola.

I.2 CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL ÁREA METROPOLITANA DE MONTERREY

De acuerdo con el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) a través de la publicación “Delimitación de las zonas metropolitanas de México” (2015), el Área Metropolitana de Monterrey se conforma por 18 municipios pertenecientes al estado de Nuevo León. En la **tabla 1.1** se enlistan los municipios que integran esta área. Según el Censo de Población y Vivienda 2020 realizado por el INEGI, la población total de esta área metropolitana es de 5 341 177 habitantes. En la **figura 1.1** se puede observar la ubicación del AMM con respecto al estado de Nuevo León, resaltada en color gris en la figura mencionada.

Tabla 1.1 Conformación por municipios del Área Metropolitana de Monterrey

1	Abasolo	10	Guadalupe
2	Apodaca	11	Juárez
3	Cadereyta de Jiménez	12	Monterrey
4	Carmen	13	Pesquería
5	Ciénega de Flores	14	Salinas Victoria
6	García	15	San Nicolás de los Garza
7	San Pedro Garza García	16	Hidalgo
8	General Escobedo	17	Santa Catarina
9	General Zuazua	18	Santiago

Fuente: *Delimitación de las zonas metropolitanas de México, INEGI, 2015*

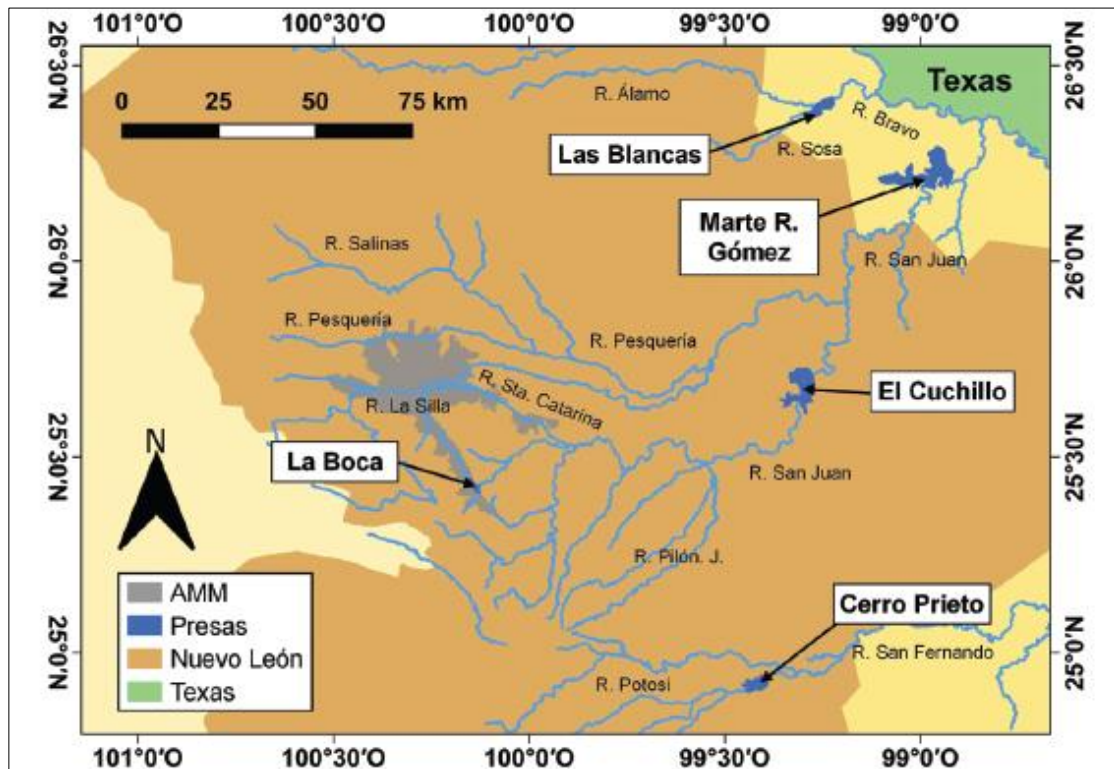
De acuerdo con la clasificación del clima de Koppen, el AMM está ubicada en una zona semiárida (Bsh), la cual se caracteriza por una disponibilidad de agua muy baja. Respecto a la cantidad de lluvia, se tiene que el 31% de los años observados el nivel de las lluvias presentadas fue menor que 500 mm, con un promedio anual de alrededor de 617 mm. En contraparte, solo en el 8% de los años analizados se presentaron lluvias por encima de los 1 000 mm (según registro histórico de lluvia, 1940 - 2017). La distribución de la precipitación está marcada por un periodo de estiaje el cual se presenta desde el mes de noviembre hasta abril.

Dentro del AMM, se encuentran corrientes de agua como ríos, arroyos y cañadas. Destacando como principal corriente dentro la zona urbana el río Santa Catarina, el cual inicia su trayectoria en la Sierra Madre Oriental. El río Santa Catarina cruza de oeste a este la zona urbana y a continuación se une al río San Juan, el cual es el que alimenta de agua al vaso de la presa El Cuchillo. En la zona norte del AMM se ubica el río Pesquería, este cuerpo de agua recibe las descargas de las aguas residuales previamente tratadas de la zona urbana. El río Pesquería se une con el río San Juan aguas abajo de la presa El Cuchillo, y continua su recorrido hasta la presa Marte R. Gómez, ubicada en el vecino estado de Tamaulipas. La descripción anterior se puede observar en la *figura 1.2*.

El AMM ha experimentado un incremento muy marcado de la población a lo largo de las décadas. En 1950, la población era de menos de medio millón de habitantes, la cifra se elevó a 2.6 millones de habitantes en 1980 y alcanzó los 4.5 millones de habitantes para el año 2010.

El incremento poblacional ha generado un crecimiento del área urbana de alrededor de 10 hectáreas por semana en el Área Metropolitana de Monterrey. Esta expansión conlleva a una mayor demanda de servicios urbanos, siendo el suministro de agua potable uno de los aspectos de mayor relevancia que deberá ser atendido para satisfacer esta creciente necesidad.

Figura 1.2 Hidrografía del Área Metropolitana de Monterrey



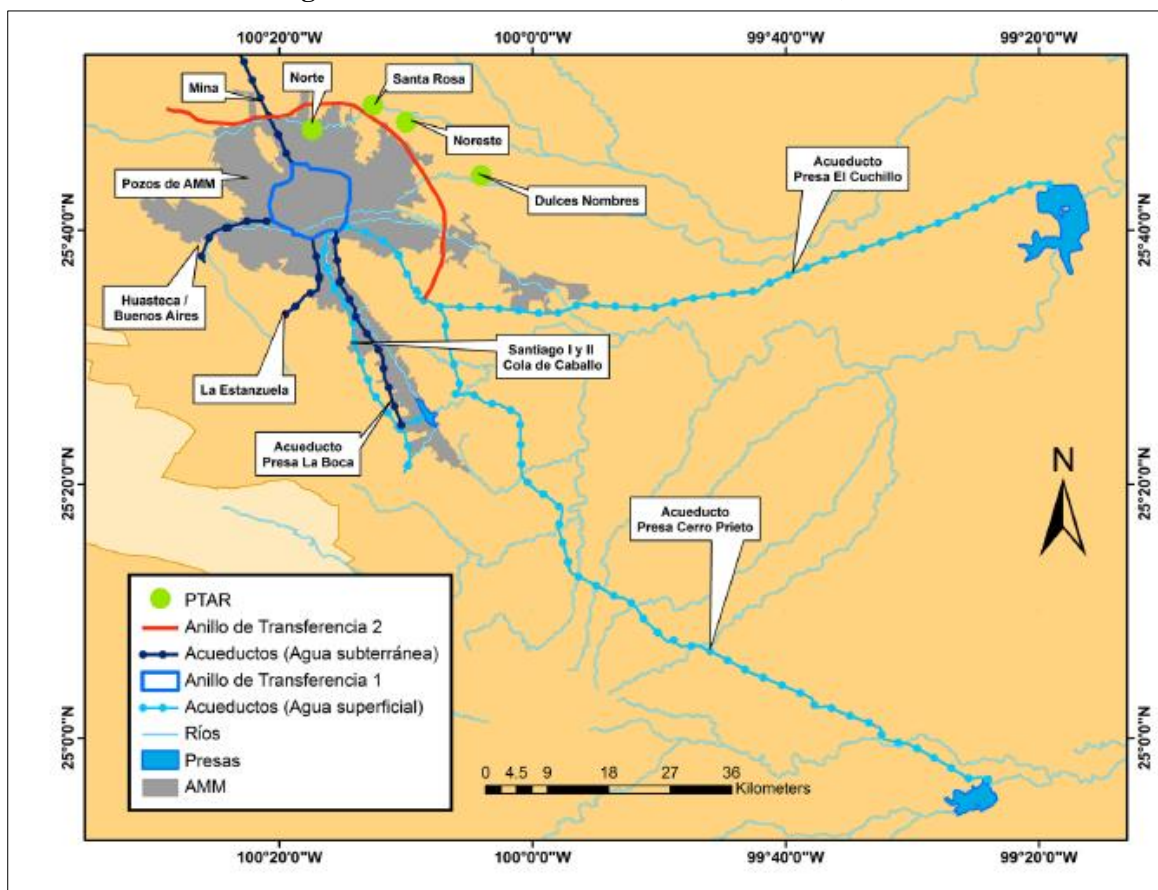
Fuente: *Logros, retos y oportunidades para Nuevo León y México, ITESM, 2021*

I.3 FUENTES DE AGUA PARA EL ÁREA METROPOLITANA DE MONTERREY

Como se ha mencionado anteriormente, la poca disponibilidad de agua en el AMM ha resultado en la construcción de infraestructura hidráulica destinada al almacenamiento y distribución del recurso hídrico. En la **figura 1.3** se observa la configuración del sistema de infraestructura hidráulica integrada en el AMM. Posteriormente se mostrarán las características de los componentes que la conforman.

Para el mes de diciembre de 2017 el caudal suministrado al AMM se calculó en 12 599 l/s (equivalente a 12.6 m³/s), este suministro se conformó con un 62% (8.4 m³/s) provenientes de fuentes superficiales y un 38% (4.2 m³/s) provenientes de fuentes subterráneas. Tres presas contribuyen como las fuentes superficiales hacia el AMM: presa Rodrigo Gómez - La Boca, presa José López Portillo - Cerro Prieto y presa El Cuchillo – Solidaridad. las cuales se incorporaron al sistema de infraestructura hidráulica en los años de 1965, 1984 y 1994 respectivamente, las cuales proporcionan capacidades útiles de almacenamiento del orden de 39.5 hm³, 300 hm³ y 1 123 hm³ respectivamente. La capacidad total sumada de las tres presas mencionadas es de 1 462.5 hm³, se destaca que la presa El Cuchillo posee la mayor capacidad de almacenamiento, superando significativamente a las otras dos presas. En forma de complemento a las fuentes antes mencionadas se tienen las aportaciones de otras como son el manantial La Estanzuela y los túneles Cola de Caballo I, Cola de Caballo II y San Francisco (también conocidos como Santiago I y Santiago II).

Figura 1.3 Infraestructura Hidráulica del AMM, 2020



Fuente: *Logros, retos y oportunidades para Nuevo León y México, ITESM, 2021*

En cuanto a las fuentes subterráneas, estas comprenden 44 pozos profundos que se distribuyen en tres sistemas, los cuales son: Mina, Buenos Aires y Monterrey. Entre las características de estos pozos se puede mencionar que cuentan con una profundidad de entre 600 a 2 000 metros. También se realiza el aprovechamiento de 50 pozos someros, las profundidades de estos pozos no superan los 100 metros. El agua extraída de estas fuentes es transportada a través de acueductos hacia el AMM. Entre los principales acueductos existentes para cubrir la demanda de agua en el AMM se tiene El Cuchillo – Monterrey y Cerro Prieto – Monterrey.

Entre los años de 1986 a 2017, la extracción de agua de las fuentes de abastecimiento revela que el campo Buenos Aires ha contribuido con un promedio de 2.08 m³/s, mientras que del sistema Santiago y La Estanzuela se han extraído 1.13 m³/s. Por otro lado, los pozos profundos del AMM han aportado 0.62 m³/s y del Campo Mina se han extraído 0.60 m³/s.

Para los sistemas Campo Topo Chico y Los Elizondo, Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey (SADM) cuenta con volúmenes asignados, pero los aprovechamientos se han detenido debido a factores relacionados con la mala calidad del agua, así como por la desfavorable relación costo-beneficio.

El agua proveniente de todas estas fuentes se integra en dos anillos de transferencia con las siguientes características generales:

- Anillo 1 (Monterrey III) cuenta con una longitud de 70 km y con una capacidad para transportar 3.0 m³/s
- Anillo 2 (Monterrey V) cuenta con una longitud de 73 km y con una capacidad para transportar 6.0 m³/s

I.4 EL DESARROLLO DE LA INFRAESTRUCTURA HIDRÁULICA EN EL ÁREA METROPOLITANA DE MONTERREY

Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey (SADM) se estableció en el año de 1956 bajo la dirección del gobierno de Nuevo León, el propósito de la empresa era suministrar el servicio municipal de agua y drenaje a los habitantes de la ciudad de Monterrey, aun así, se dejó abierta la posibilidad de otorgar el suministro de estos servicios a otros municipios próximos. A partir de esto, SADM a lo largo del tiempo ha ido agregando, ampliado y dado mantenimiento a la infraestructura hidráulica necesaria para poder cubrir con la demanda de agua. A continuación, se presentan los componentes del sistema que funcionan en conjunto con el fin de otorgar el servicio de agua al AMM, destacando sus características y su incorporación cronológica.

I.4.1 PRESA LA BOCA

En 1955, la Comisión de Agua Potable y Drenaje de Monterrey consideró utilizar las aguas de la presa La Boca para abastecer de agua a la ciudad, que en ese momento los derechos estaban bajo dominio privado. Con la incorporación de la presa, se realizaron modificaciones para aumentar su capacidad de embalse, pasó de 7 hm³ a aproximadamente 40 hm³, lo que proporcionó un caudal de 1 200 l/s para la ciudad. Entre las características de esta presa se tienen las siguientes: se encuentra localizada a aproximadamente 30 km del AMM, cuenta con una capacidad de almacenamiento de 39.5 hm³ en el nivel de Aguas Máximas Ordinarias (NAMO), de este volumen solo son útiles 34.0 hm³, de acuerdo con el histórico de datos de CONAGUA de 2005 a 2014, aportó 1.38 m³/s al AMM, el gasto promedio asignado al SADM es de 0.92 m³/s.

I.4.2 PROYECTOS MONTERREY I – MONTERREY VI

- **MONTERREY I**

Se desarrolló entre los años 1971 a 1973. Entre los componentes de este proyecto se incluyen: planta potabilizadora La Boca, tres estaciones de bombeo, tanques almacenamiento, redes de agua primaria de agua potable y drenaje sanitario para cubrir las necesidades del AMM.

- **MONTERREY II**

Se puso en marcha entre los años de 1974 a 1978. Este proyecto tuvo por objetivo la construcción y ampliación de acueductos y tanques de almacenamiento. Entre los otros componentes que integraron a dicho proyecto se pueden mencionar los siguientes: instalación de estaciones de bombeo, de los sistemas de pozos Mina y Buenos Aires, además se realizaron labores de perforación, equipamiento e interconexión de los pozos.

- **MONTERREY III**

El proyecto se llevó a cabo entre los años de 1980 y 1984. Como parte de la primera etapa, se construyó el primer anillo de transferencia del Área Metropolitana de Monterrey (AMM), la planta potabilizadora San Roque y se completó la construcción de la presa Cerro Prieto.

El proyecto Monterrey III se destacó por la construcción de la presa Cerro Prieto en el municipio de Linares, dentro de la cuenca del río San Fernando. El acueducto asociado a esta presa cuenta con 6 estaciones de bombeo y la planta de potabilización San Roque. Inicialmente, la planta de potabilización San Roque tenía una capacidad para tratar 5.0 m³/s, aunque su diseño contemplaba una capacidad potencial de hasta 12.0 m³/s a largo plazo.

Entre las principales características de la presa Cerro Prieto se pueden mencionar que se ubica a unos 20 km al noreste del municipio de Linares, Nuevo León, y a unos 135 km de la ciudad de Monterrey. En su nivel de aguas máximas ordinarias (NAMO) puede almacenar alrededor de 300 hm³, pero su capacidad útil comprende un volumen de 249 hm³. De acuerdo con CONAGUA, con datos de diez años a partir de 2005 se calcula que ha aportado un caudal promedio de 2.056 m³/s. El caudal aportado por esta presa hacia el AMM puede mostrar ciertas diferencias cuando se considera un periodo diferente de estudio, para el periodo de 1983 a 2016 el gasto hacia el AMM fue de 1.90 m³/s. De esta presa SADM tiene una asignación de gasto de 5.33 m³/s.

- **MONTERREY IV**

En el año de 1990 el AMM contaba con una población de aproximadamente 2.6 millones de habitantes, lo que incrementó la demanda de agua en la región. En el año de 1989 se proyectó la construcción de una presa para abastecer de agua a Monterrey, además de tener como objetivo la regulación de avenidas extraordinarias en la cuenca del río San Juan, estas obras se realizaron entre los años de 1990 a 1994.

Mediante el proyecto Monterrey IV, se construyó la presa El Cuchillo-Solidaridad, la cual se encuentra ubicada en el cauce del río San Juan, en el municipio de China, estado de Nuevo León, a unos 120 km del Área Metropolitana de Monterrey (AMM). Entre las características principales de la presa se puede mencionar que su cortina es de 45 metros de altura máxima, cuenta con un bordo libre de aproximadamente 11 km y su capacidad en el nivel máximo de operación (NAMO) es de unos 1 123 hm³, en tanto su capacidad de almacenamiento útil es de unos 921 hm³.

La construcción de las obras relacionadas con este proyecto se llevó a cabo mediante un acuerdo en el cual el gobierno del estado, a través de SADM, desarrolló el acueducto El Cuchillo – Monterrey I, con una longitud de 108 km, además de otras obras relacionadas con la conducción y distribución del agua. Entre estas obras se destaca la ampliación de la planta de potabilización de San Roque, que operaría a una capacidad de 12 m³/s.

El costo total del desarrollo del proyecto fue de 469.4 millones de dólares, y fue inaugurado el 17 de octubre de 1994.

Desde que la presa comenzó a operar, ha suministrado un gasto promedio de 2.60 m³/s. Sin embargo, como se ha mencionado anteriormente, el caudal puede variar dependiendo del periodo de tiempo analizado. Por ejemplo, para el periodo de 2005 a 2014, se estimó un gasto extraído de 2.95 m³/s. De esta presa SADM tiene una asignación de gasto promedio de 4.78 m³/s.

En este proyecto se contempló la posibilidad de incorporar en una fase posterior otro acueducto con la misma ubicación de extracción y descarga de agua que funcionara en paralelo con El Cuchillo I, denominado acueducto El Cuchillo II. A mediados de 2022, el gobierno federal en conjunto con el gobierno de Nuevo León acordó la construcción de esta infraestructura hidráulica. La incorporación de este nuevo acueducto permitirá añadir un caudal aproximado de 5.0 m³/s. Entre las características generales de este nuevo acueducto se incluyen un diámetro de 84 pulgadas en su línea de conducción, con una longitud total de aproximadamente 100 kilómetros. Además, contará con cinco plantas de bombeo, una carga de bombeo de 485 metros y se estima un costo de alrededor de 10 400 millones de pesos. Se espera que con la operación conjunta de El Cuchillo I y El Cuchillo II, se pueda extraer un caudal de hasta 10 m³/s de la presa, dependiendo del volumen de agua disponible en el almacenamiento.

- **MONTERREY V**

En 2007 se implementó el proyecto Monterrey V con el objetivo de extender la cobertura de los servicios municipales de agua en las áreas periféricas del Área Metropolitana de Monterrey (AMM), especialmente en las zonas norte y oriente.

El propósito del programa Monterrey V fue abordar la creciente demanda de servicios de agua debido al aumento de la población del AMM, mediante la construcción de infraestructura hidráulica planificada para los siguientes 20 años.

En este proyecto se desarrolló un segundo anillo de transferencia de agua potable con una longitud de 73 km, se ampliaron 28 km de la red de agua potable, se construyeron 7 tanques de almacenamiento y 6 estaciones de bombeo, se añadieron de 28 km de colectores y subcolectores para el drenaje sanitario, y se amplió la capacidad de tratamiento de aguas. Las labores de este proyecto se concluyeron en 2010. Se puede observar la ubicación del Proyecto Monterrey V dentro de la infraestructura hidráulica del AMM en la *figura 1.3*.

- **MONTERREY VI**

Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey desde el año 2004 consideraba incorporar nuevas fuentes para cubrir la demanda en el abasto de agua, por lo cual se creó el Comité Interinstitucional para la Evaluación de Nuevas Fuentes de Abastecimiento de Agua para el Área Metropolitana de Monterrey (CIENFAM), varias fueron los integrantes que participaron entre los que se pueden destacar el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA); la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL), el Instituto del Agua del Estado de Nuevo León (IANL) y Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey (SADM).

De las posibles opciones que se presentaron, se consideró aquella en la cual el diseño consistía en conducir agua desde la cuenca del río Pánuco hasta el AMM. Se planteaba transportar el agua desde el estado de San Luis Potosí, en su trayectoria pasaría por los estados de Veracruz y Tamaulipas, para que su destino final

fuera en conexión con el acueducto Cerro Prieto - Monterrey, ubicado en el municipio de Linares en el estado de Nuevo León.

Debido a que existía un gran número de opiniones encontradas acerca de la repercusión del proyecto en diferentes rubros como los costos, beneficios y financiamiento, además de una indefinición acerca del mismo, el proyecto Monterrey VI fue cancelado.

I.4.3 PRESA LA LIBERTAD

Durante la administración estatal de 2015 a 2021, se contempló la construcción de la presa la Libertad, como parte de los planes hídricos para 2023 y 2050 de Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey y del Fondo de Agua y Drenaje de Monterrey, respectivamente. Se estima que la presa tendrá un costo de 5 129 millones de pesos y se ubicará sobre el cauce del río Potosí.

Este proyecto de presa incluye la construcción de un acueducto que se extenderá desde la obra de toma de la presa La Libertad hasta el tanque de sumergencia 2 (TS2) del acueducto Linares – Monterrey. Estas obras se realizan con el objetivo de contar con dos fuentes de agua: la presa la Libertad y la presa Cerro Prieto, lo que permitirá un mayor control en la administración del agua para el Área Metropolitana de Monterrey (AMM).

El acueducto asociado a la presa La Libertad se diseñará para transportar 2 m³/s, 4 m³/s, o 6 m³/s, mientras que el caudal proveniente de la presa Cerro Prieto podrá ser de 4 m³/s, 2 m³/s o 0 m³/s. La suma de los caudales de cada acueducto en su punto de encuentro permitirá que el acueducto Linares – Monterrey, desde TS2 al AMM, opere con una capacidad de 6 m³/s. Además, se está evaluando la posibilidad de operar el acueducto de la presa La Libertad en sentido inverso para evitar posibles excesos de volumen de agua en la presa Cerro Prieto.

II CONCEPTOS FUNDAMENTALES

En este capítulo se presentan los conceptos fundamentales utilizados para la realización de los análisis hidráulicos del acueducto El Cuchillo – Monterrey I, estas consideraciones rigen el funcionamiento hidráulico de los componentes del sistema de bombeo que permiten su operación en flujo permanente. La información consultada para la elaboración de este capítulo se basa en el libro “Sistemas de bombeo”, publicado por profesores de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México.

II.1 ECUACIÓN DE CONTINUIDAD

A partir de la **figura 2.1** se aprecia que entre la sección 1 de entrada y la sección 2 de salida de un conducto donde se presenta flujo incompresible se cumple que:

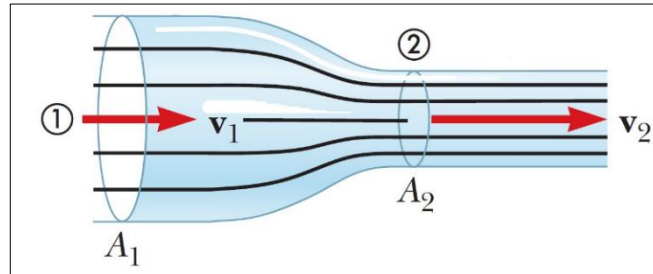
$$Q_1 = Q_2 \quad (2.1)$$

$$A_1V_1 = A_2V_2 \quad (2.2)$$

En donde:

Q	Gasto o caudal
A	Área de la sección transversal
V	Velocidad

Figura 2.1 Representación de la ecuación de continuidad



Fuente: Serway, R. A. (2015). *Física para ciencias e ingeniería*

II.2 ECUACIÓN DE LA ENERGÍA

La ecuación de la energía entre dos secciones de análisis en el cual el flujo es permanente, unidimensional e incompresible, se expresa como:

$$z_1 + \frac{\rho_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} = z_2 + \frac{\rho_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + h_r \quad (2.3)$$

Cada término de la **expresión 2.3** representa lo siguiente:

z	Carga de posición, medida desde un plano horizontal de comparación
$\frac{\rho}{\gamma}$	Carga de presión
$\frac{V^2}{2g}$	Carga de velocidad
h_r	Pérdida de carga entre dos secciones o pérdida de energía

La carga total en un punto de análisis se conoce como H , la cual representa la suma de la carga de posición, la carga de presión y la carga de velocidad, se expresa como:

$$H = z + \frac{\rho}{\gamma} + \frac{V^2}{2g} \quad (2.4)$$

Cuando una bomba añade energía al fluido, la **expresión 2.3** se modifica y se escribe como:

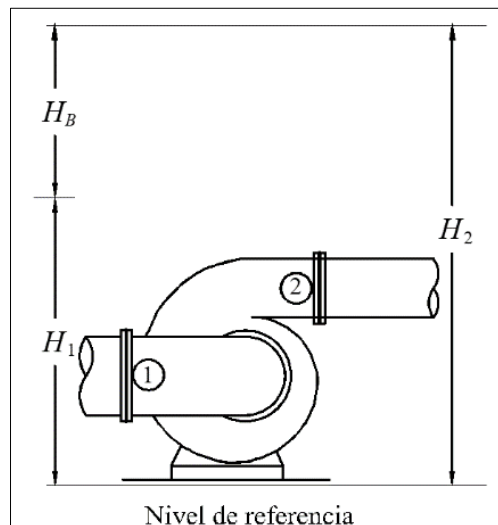
$$z_1 + \frac{\rho_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + H_B = z_2 + \frac{\rho_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + h_r \quad (2.5)$$

Donde H_B representa la carga o energía que adiciona una bomba.

En la **figura 2.2** se observa el esquema de adición de energía de una bomba, la sección 1 pertenece a la brida de succión mientras que la sección 2 pertenece a la brida de descarga. Del esquema se observa que se cumple la siguiente expresión:

$$H_1 + H_B = H_2 \quad (2.6)$$

Figura 2.2 Carga adicionada por una bomba



Fuente: Cafaggi Félix, A. A., Rodal Canales, E. A., & Sánchez Huerta, A. (2021). *Sistemas de bombeo*.

II.3 PÉRDIDA DE CARGA

En la **sección II.2** se mencionó que h_r representa la pérdida de energía entre dos secciones del flujo. La pérdida de carga h_r a su vez representa la suma de las pérdidas por fricción h_f y las pérdidas locales h_l .

$$h_r = h_f + h_l \quad (2.7)$$

El cálculo de las pérdidas por fricción se puede realizar con la ecuación de Darcy – Weisbach y se calcula como:

$$h_f = f \frac{L V^2}{D 2g} \quad (2.8)$$

En donde

D	Diámetro del conducto
L	Longitud del conducto
f	Factor de fricción (adimensional)

Las pérdidas locales se calculan como:

$$h_l = k \frac{V^2}{2g} \quad (2.9)$$

Las pérdidas locales se calculan por medio de un coeficiente de pérdida adimensional k que depende del tipo de accesorio que se encuentre en el recorrido del flujo, el coeficiente de pérdida es multiplicado por la carga de velocidad aguas abajo de la zona de perturbación del flujo.

II.4 POTENCIA DEL AGUA EN UN SISTEMA HIDRÁULICO Y EFICIENCIA

En un sistema de bombeo, la rapidez con la cual una bomba adiciona energía al agua representa la potencia hidráulica y se calcula como:

$$P_H = \gamma Q H_B \quad (2.10)$$

En donde:

γ	Peso específico del agua
H_B	Carga que proporciona la bomba

La transferencia de potencia hidráulica se inicia cuando el motor recibe energía eléctrica. Posteriormente, el motor convierte esta energía eléctrica en potencia mecánica a través de un eje. Luego, la potencia mecánica se transfiere a la bomba, la cual a su vez entrega esta potencia al agua, concluyendo así el proceso.

Durante el proceso de transferencia de potencia hidráulica, se observa una pérdida de energía útil debido a que, en cada etapa, desde la recepción de potencia eléctrica por el motor hasta la entrega de potencia hidráulica por parte de la bomba, se producen pérdidas de energía.

Por consiguiente, es necesario conocer la eficiencia de la bomba y el motor eléctrico, estas eficiencias se determinan de la siguiente manera:

- La eficiencia del motor eléctrico se define como la relación entre la potencia mecánica transferida a través del eje del motor y la potencia eléctrica suministrada al motor. Se expresa mediante la siguiente fórmula:

$$\eta_{ME} = \frac{P_{mec}}{P_E} \quad (2.11)$$

- La eficiencia de la bomba se define como la relación entre la potencia hidráulica finalmente entregada al agua y la potencia mecánica proporcionada por la flecha que impulsa el funcionamiento de la bomba. Se expresa mediante la siguiente fórmula:

$$\eta_B = \frac{P_H}{P_{mec}} \quad (2.12)$$

II.5 ECUACIONES DE SIMILITUD (VARIACIÓN DE LA VELOCIDAD DE GIRO)

La teoría de la similitud propuesta por Kline señala que: “Si dos sistemas obedecen al mismo grupo de ecuaciones y condiciones gobernantes, y si los valores de todos los parámetros y las condiciones se hacen idénticas, los dos sistemas deben exhibir comportamientos similares con tal de que exista una solución única para el grupo de ecuaciones y condiciones”.

Con base en la teoría de la similitud, es posible analizar el funcionamiento de una bomba bajo diversas condiciones de velocidad de giro N . Esto implica que, aunque los diámetros D_1 y D_2 son iguales, las velocidades de giro N_1 y N_2 son distintas. Las expresiones resultantes de la teoría de la similitud que permiten relacionar el gasto y la carga de la bomba con la velocidad de giro son las siguientes:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right) \quad (2.13)$$

$$\frac{H_{B1}}{H_{B2}} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \quad (2.14)$$

Los subíndices indican, la condición 1 y la condición 2 de funcionamiento.

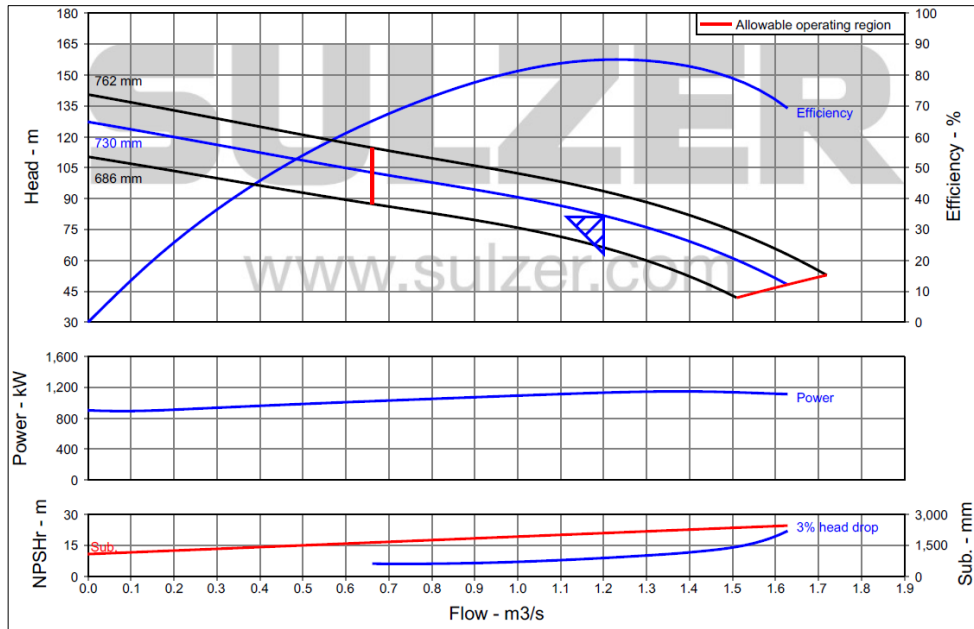
II.6 CURVAS CARACTERÍSTICAS DE LA BOMBA

El comportamiento real de una bomba no puede determinarse con precisión únicamente a partir de la teoría que rige su funcionamiento. Por lo tanto, para comprender su operación de manera adecuada, se requieren pruebas que generen información confiable y real. Estas pruebas son llevadas a cabo por los fabricantes, y los valores obtenidos se proporcionan a los proyectistas para la selección apropiada de la bomba según las condiciones específicas del sistema de bombeo. Los resultados de estas pruebas se presentan a través de curvas, siendo de importancia para los análisis posteriores en este trabajo las siguientes:

- Gasto – Carga de la bomba, $Q - H_B$
- Gasto – Eficiencia, $Q - \eta_B$
- Gasto – Potencia mecánica, $Q - P_{mec}$
- Gasto – Carga de succión positiva neta, $Q - CSPN$

En la **figura 2.3** se presentan a manera de ejemplo las curvas características de una bomba.

Figura 2.3 Curvas características de una bomba



Fuente: Fabricante de equipos de bombeo SULZER

II.7 CAVITACIÓN Y CARGA DE SUCCIÓN POSITIVA NETA (CSPN)

La cavitación en una bomba ocurre cuando se forman burbujas de vapor en regiones donde la presión absoluta es menor que la presión de vapor del agua. Este fenómeno suele ocurrir en el ojo del impulsor. El flujo de agua transporta estas burbujas hacia áreas donde la presión absoluta aumenta, superando la presión de vapor del agua. Como consecuencia, las burbujas colapsan violentamente, provocando daños en el equipo de bombeo.

Para prevenir la cavitación en una bomba, se debe de evaluar y analizar la relación entre la carga de succión positiva neta disponible (CSPN_D) en el sistema de bombeo y la carga de succión positiva requerida por la bomba para su protección, según las indicaciones del fabricante.

Para el planteamiento del cálculo de la CSPN_D, se presenta el esquema de la **figura 2.4** donde $z_1 > z_2$, por lo cual Δz siempre es positivo. En el esquema se observan las características de la sección 1 y la sección 2 de análisis, la sección 1 hace referencia al nivel del almacenamiento del agua, mientras que para la sección 2 corresponde a la brida de succión de la bomba.

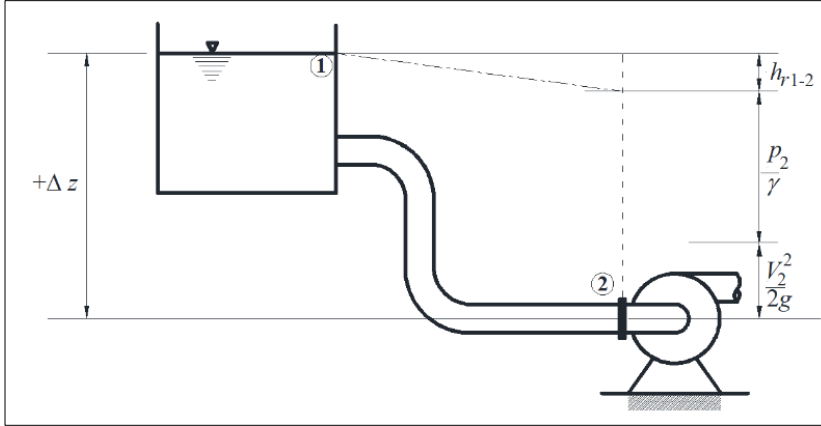
La carga de succión positiva neta disponible en el sistema de bombeo escrita en términos de presión absoluta se expresa como:

$$CSPN_D = \Delta z + \frac{p_{2ab} - p_v}{\gamma} - h_{r1-2} \quad (2.15)$$

En donde:

- p_{ab} Presión absoluta en la brida de succión de la bomba
- p_v Presión de vaporización del agua

Figura 2.4 Instalación de una bomba en carga



Fuente: Cafaggi Félix, A. A., Rodal Canales, E. A., & Sánchez Huerta, A. (2021). *Sistemas de bombeo*.

El fabricante del equipo de bombeo suministra el valor necesario de la CSPN en función del gasto bombeado para prevenir la cavitación a través de una curva. Esta curva puede referirse a una de las dos situaciones siguientes:

1. La curva $CSPN_{3\%}$ (carga de succión positiva neta al 3%) comprende los valores donde la operación del equipo de bombeo resultará en una pérdida del 3% de la carga que puede suministrar, lo que indica cavitación severa. Por otra parte, la $CSPN_D$, definida por la configuración del sistema de bombeo, debe ser mayor que la $CSPN_{3\%}$ establecida por la bomba. Por lo tanto, para evitar la cavitación en la bomba, la $CSPN_{3\%}$ debe afectarse por un factor de seguridad denominado factor de cavitación (f_{cav}), los valores recomendados para este factor suelen estar en el rango de entre 4 a 5. Esta condición se puede expresar como:

$$CSPN_D \geq f_{cav}(CSPN_{3\%}) \quad (2.16)$$

2. La curva $CSPN_R$ (carga de succión positiva neta realmente requerida o necesaria) incorpora el factor de cavitación f_{cav} , que ajusta a la $CSPN_{3\%}$, lo que garantiza la operación segura del equipo de bombeo en esta curva. Esta relación se puede expresar como:

$$CSPN_R = f_{cav}(CSPN_{3\%}) \quad (2.17)$$

Sustituyendo la *expresión 2.17* en la *expresión 2.16* se obtiene que:

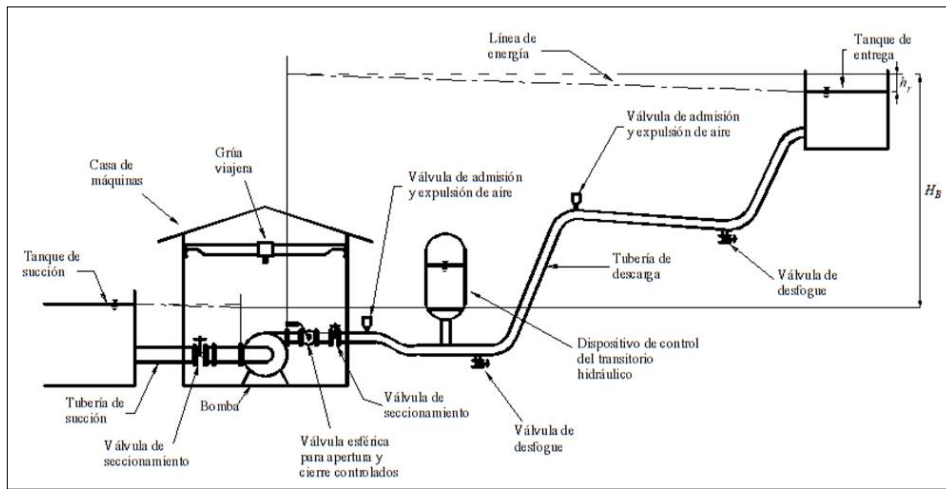
$$CSPN_D \geq CSPN_R \quad (2.18)$$

II.8 COMPONENTES DE UN SISTEMA DE BOMBEO

El objetivo de un sistema de bombeo consiste en conducir agua de un punto de origen a un lugar de destino específico, asegurando que los parámetros que se deben de satisfacer, gasto y la carga, se mantengan dentro de los rangos requeridos para garantizar un suministro adecuado de agua.

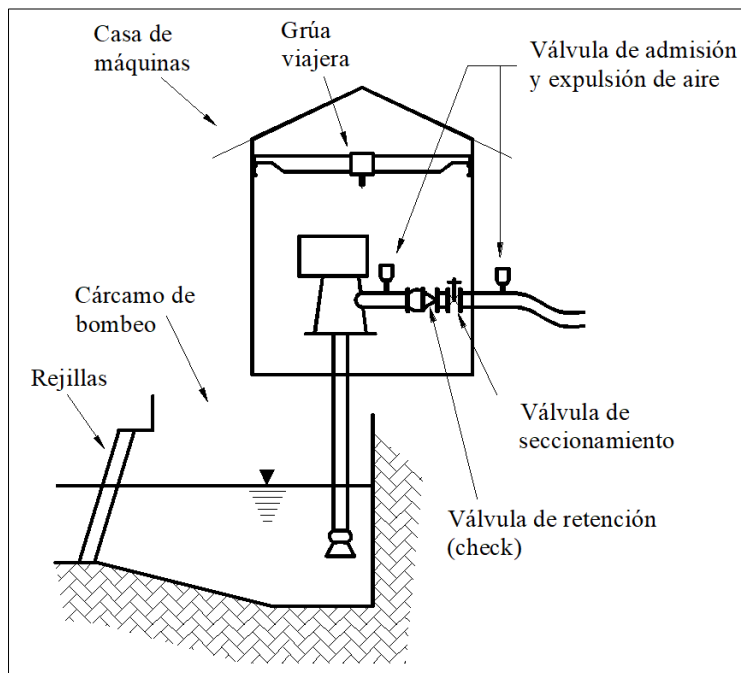
En la **figura 2.5** y la **figura 2.6** se representan los distintos elementos que componen un sistema de bombeo. En la **figura 2.5** se muestra la instalación para una bomba horizontal, mientras que en la **figura 2.6** se presenta la instalación de una bomba vertical. Se pueden identificar algunas variaciones en los componentes desde la toma hasta la válvula de seccionamiento aguas arriba de la descarga de la bomba; sin embargo, a partir de ese punto, la disposición del sistema es prácticamente la misma. El término H_E , representa la carga estática calculada como la diferencia de niveles entre los tanques de succión y de entrega. También se visualiza la línea de energía representado por una línea punteada.

Figura 2.5 Esquema general de una estación de bombeo con bomba de eje horizontal



Fuente: Cafaggi Félix, A. A., Rodal Canales, E. A., & Sánchez Huerta, A. (2021). *Sistemas de bombeo*.

Figura 2.6 Esquema general de una estación de bombeo con bomba de eje vertical



Fuente: Cafaggi Félix, A. A., Rodal Canales, E. A., & Sánchez Huerta, A. (2021). *Sistemas de bombeo*.

II.9 CURVAS DE CARGAS DE LA INSTALACIÓN Y DE LA BOMBA (PUNTO DE OPERACIÓN)

La representación de la ecuación de la energía en el sistema de bombeo presentado en la **figura 2.7**, considerando los niveles de la superficie libre del agua en el tanque de succión y de entrega, se expresa como:

$$H_{B\text{ SIS}} = H_E + \sum h_r \quad (2.19)$$

En donde

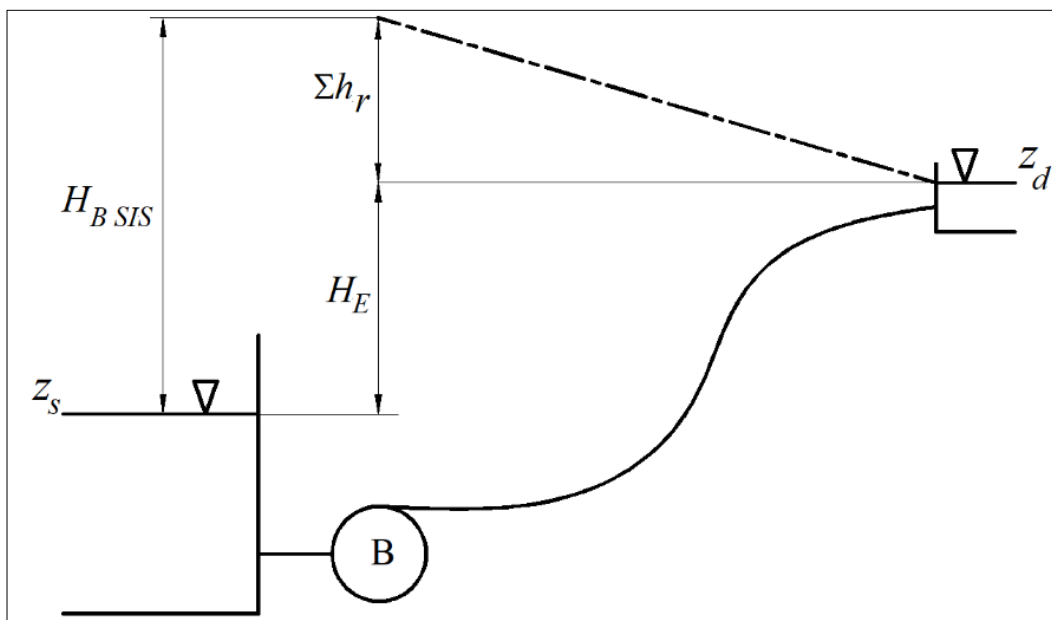
$H_{B\text{ SIS}}$ Carga total que debe proporcionar la bomba al sistema
 H_E Carga estática

En la **figura 2.7** y en la **expresión 2.19**, el término $\sum h_r$ representa la suma de pérdidas totales por fricción h_f y locales h_l en el sistema hidráulico. A partir de lo expuesto sobre la pérdida de carga en la **sección II.3** y utilizando la ecuación de continuidad presentada en la **sección II.1**, se llega a la siguiente expresión:

$$\sum h_r = \sum_{i=1}^n \left[\left(f \frac{L}{D} + \sum_{j=1}^m k \right) \frac{1}{2gA^2} \right] Q^2 \quad (2.20)$$

Donde n representa el número de tramos de tuberías y m representa el número de accesorios presentes en cada uno de los n tramos de análisis.

Figura 2.7 Carga dinámica que requiere el sistema



Fuente: Cafaggi Félix, A. A., Rodal Canales, E. A., & Sánchez Huerta, A. (2021). *Sistemas de bombeo*.

De la **expresión 2.20**, se determina el coeficiente global de pérdida K_{SIS} con unidades de s^2/m^5 y se define como:

$$K_{SIS} = \sum_{i=1}^n \left[\left(f \frac{L}{D} + \sum_{j=1}^m k \right) \frac{1}{2gA^2} \right] \quad (2.21)$$

Sustituyendo la **expresión 2.21** en la **expresión 2.20**, las pérdidas totales en el sistema también se pueden calcular como:

$$\sum h_r = K_{SIS}Q^2 \quad (2.22)$$

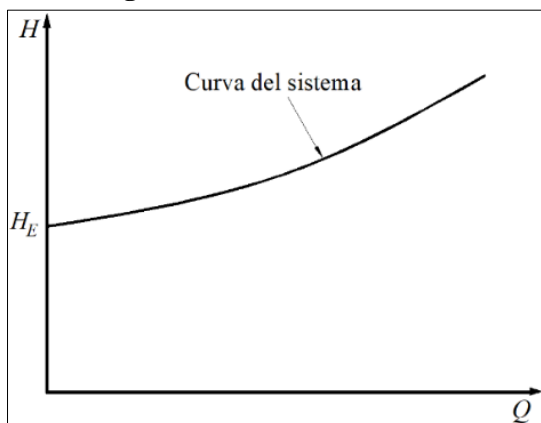
Por último, la **expresión 2.19** puede escribirse nuevamente como:

$$H_{B SIS} = H_E + K_{SIS}Q^2 \quad (2.23)$$

La **expresión 2.23** define la curva del sistema y se puede representar gráficamente como aparece en la **figura 2.8**. Esta figura representa el funcionamiento propiamente del sistema, incluyendo todos los accesorios, así como las características geométricas y físicas del sistema de bombeo.

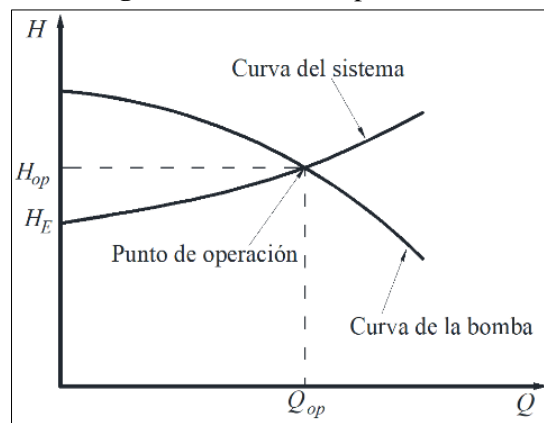
La bomba es el elemento encargado de suministrar la energía necesaria al sistema para que pueda cumplir con el gasto y la carga demandada. El desempeño de una bomba se puede observar por medio de su curva característica gasto – carga de la bomba ($Q - H_B$). Al graficar la curva característica de la bomba y la curva del sistema en un mismo plano y con las mismas unidades, se intersecan en un punto denominado punto de operación. En esta intersección se determina el gasto de operación Q_{op} y la carga de operación H_{op} , donde se busca alcanzar la mayor eficiencia del equipo de bombeo. La explicación anterior se puede observar en la **figura 2.9**.

Figura 2.8 Curva del sistema



Fuente: Cafaggi Félix, A. A., Rodal Canales, E. A., & Sánchez Huerta, A. (2021). *Sistemas de bombeo*.

Figura 2.9 Punto de operación



Fuente: Cafaggi Félix, A. A., Rodal Canales, E. A., & Sánchez Huerta, A. (2021). *Sistemas de bombeo*.

II.10 SISTEMAS DE BOMBEO EN PARALELO

Un sistema de bombeo en paralelo consiste en la disposición de dos o más bombas en una misma planta, compartiendo el mismo punto de succión y descarga. Generalmente, estos sistemas incluyen $n+1$ bombas, donde n representa el número de bombas necesarias para el funcionamiento normal y una adicional como reserva para cubrir cualquier eventualidad.

Para este arreglo de bombas, la carga que suministra cada una de ellas es la misma, lo cual se puede expresar como:

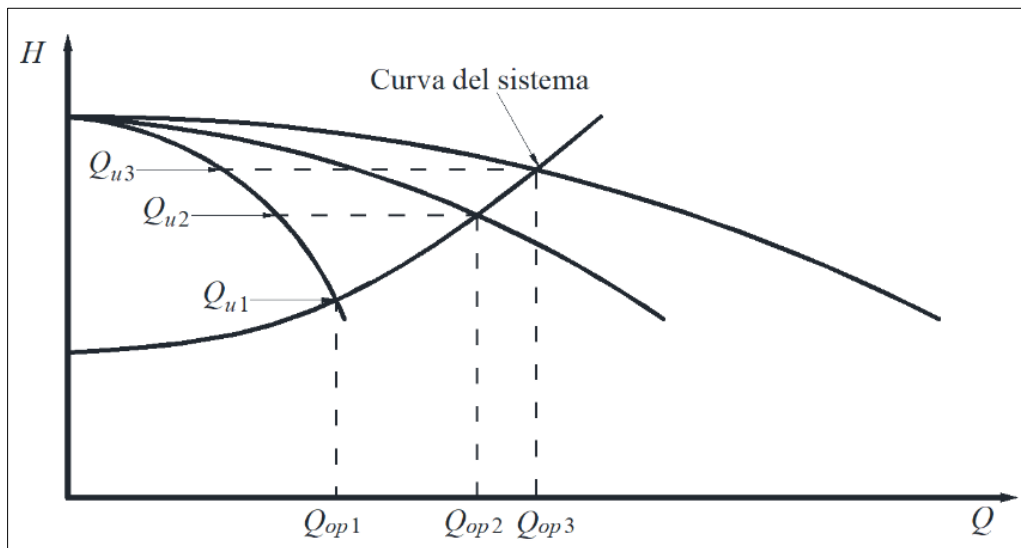
$$H_{B1} = H_{B2} = H_{Bn} \quad (2.24)$$

En cuanto al comportamiento del gasto, este resulta ser la suma de los gastos de cada una de las n bombas operando, expresado como:

$$Q_{op\ n} = \sum_{i=1}^n Q_i \quad (2.25)$$

En la **figura 2.10** se muestra la construcción de la curva equivalente que representa el funcionamiento de 1 hasta 3 equipos de bombeo en paralelo. El gasto de operación Q_{op} se relaciona con el número n de equipos funcionando, mientras que el gasto que aporta cada bomba Q_u está determinado por el punto de intersección con la curva del sistema para el respectivo número de bombas en funcionamiento. Se observa que el incremento en el gasto total en función del número de bombas en operación no es directamente proporcional. Por el contrario, el gasto que finalmente aporta cada bomba disminuye a medida que un mayor número de equipos se encuentra en funcionamiento, esto en función de la curva del sistema.

Figura 2.10 Gasto bombeado al variar el número de equipos de operación



Fuente: Cafaggi Félix, A. A., Rodal Canales, E. A., & Sánchez Huerta, A. (2021). *Sistemas de bombeo*.

II.11 SISTEMAS DE BOMBAS EN SERIE

En un sistema en serie, las bombas están dispuestas de manera que la descarga de la bomba i se convierte en el punto de succión de la bomba $i+1$, como se observa en la **figura 2.11**.

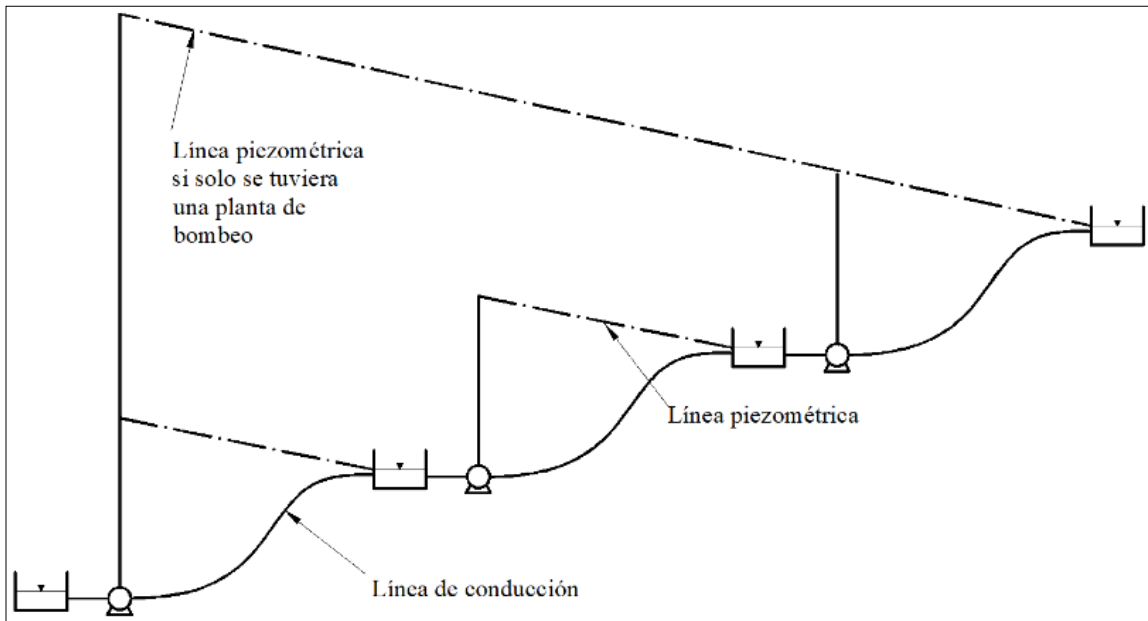
Partiendo de la **sección II.1**, donde se expone la ecuación de continuidad, en un acueducto donde no se tienen alguna otra entrada o salida en toda la línea de conducción, se cumple que el gasto es igual en las n bombas en operación:

$$Q_1 = Q_2 = Q_3 = Q_n \quad (2.26)$$

En cuanto a la carga total de un sistema en serie, esta será la suma de la carga de bombeo de las n bombas en funcionamiento, se puede escribir como:

$$H_{BT} = \sum_{i=1}^n H_B \quad (2.27)$$

Figura 2.11 Sistema de bombeo en serie

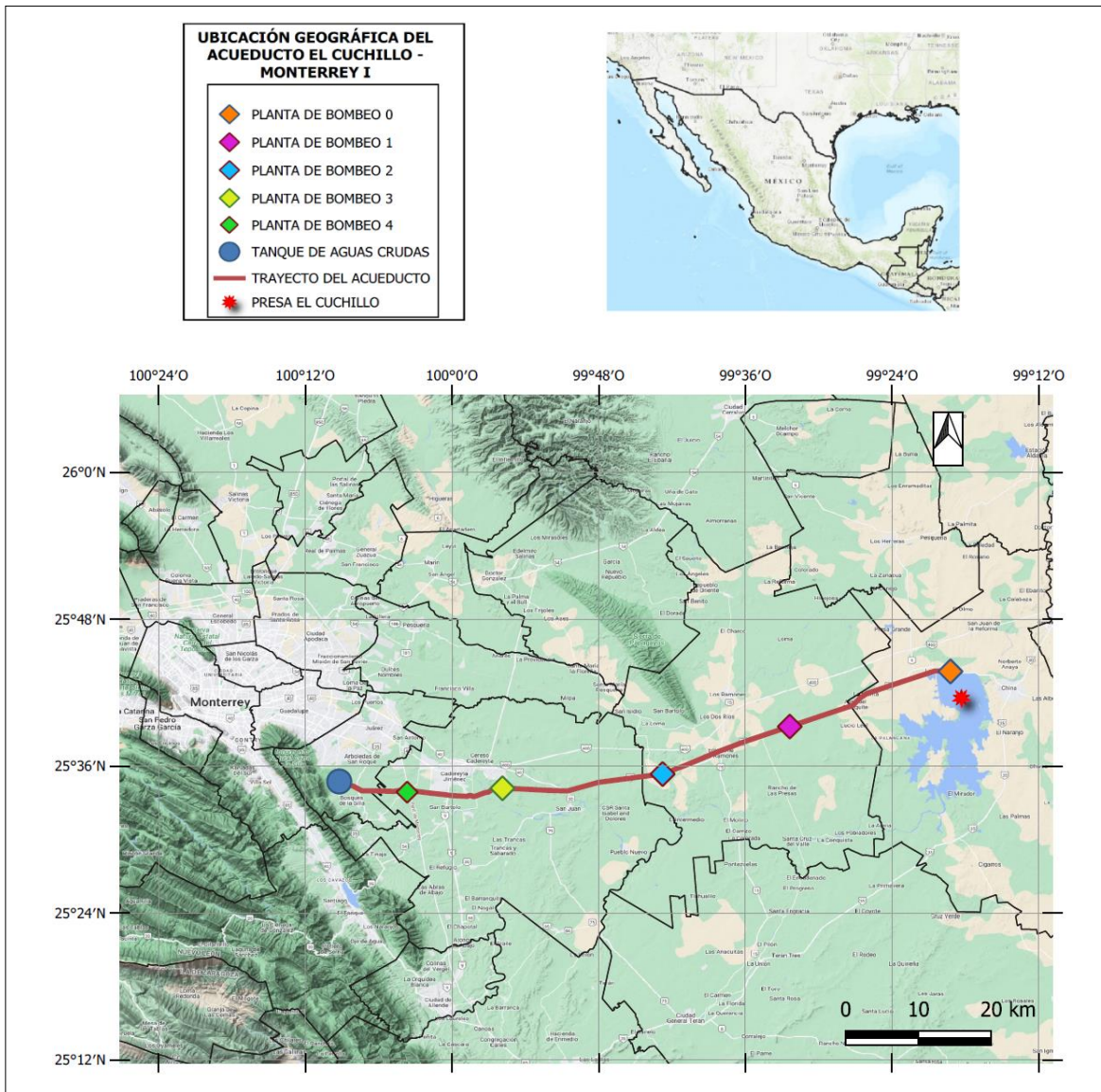


Fuente: Cafaggi Félix, A. A., Rodal Canales, E. A., & Sánchez Huerta, A. (2021). *Sistemas de bombeo*.

III DESCRIPCIÓN DEL ACUEDUCTO

En este capítulo se presentan las principales características del acueducto El Cuchillo – Monterrey I, incluyendo las longitudes de los tramos, los diámetros de las tuberías, los perfiles de elevaciones, así como los niveles de la presa y los tanques de sumergencia. La información presentada en este capítulo se obtuvo gracias al trabajo del Grupo de Hidromecánica del Instituto de Ingeniería de la UNAM, a partir de los informes: “Puesta en operación del acueducto El Cuchillo – Monterrey” publicado en mayo de 1994, y “Acueducto El Cuchillo – Monterrey. Revisión de la operación de las cámaras de aire y puesta en marcha del sistema con 5 equipos de bombeo en cada una de sus plantas”, publicado en noviembre de 1999.

Figura 3.1 Ubicación del acueducto El Cuchillo – Monterrey I



Fuente: *Elaboración propia con datos de Google Maps*

III.1 PRESA EL CUCHILLO Y GENERALIDADES DEL SISTEMA DE BOMBEO

El acueducto El Cuchillo – Monterrey I inicia su recorrido desde la toma ubicada en la presa del mismo nombre, El Cuchillo, localizada en el municipio de China, Nuevo León. Esta presa es alimentada por el río San Juan, cuyo origen se encuentra en la Sierra Madre Oriental y desemboca en el río Bravo. En la *figura 3.1* se observa la ubicación geográfica del sistema de bombeo, sus plantas de bombeo y su trayecto.

La presa El Cuchillo cuenta con los siguientes niveles de almacenamiento en su vaso:

- **NAMINO:** El nivel de aguas mínimas de operación se refiere al nivel mínimo en el cual la obra de toma de la presa funciona de forma adecuada. Es el nivel mínimo que puede proporcionar un gasto determinado para el tipo de aprovechamiento de la presa. Este nivel se encuentra a 150.75 msnm.
- **NAMO:** El nivel de aguas máximas ordinarias o de operación es el nivel máximo que la presa puede manejar de forma segura en su operación. El volumen almacenado entre el NAMINO y el NAMO es el volumen de almacenamiento que se puede aprovechar de la presa. La cota de este nivel se encuentra a 162.35 msnm.
- **NAME:** El nivel de aguas máximas extraordinarias representa el nivel crítico que la presa puede almacenar como máximo. Este nivel puede alcanzarse en caso de presentarse una avenida importante. El volumen almacenado entre el NAMO y el NAME representa la cantidad de agua que es capaz regular la presa. La cota de este nivel se encuentra a 166.66 msnm.

El acueducto El Cuchillo – Monterrey I fue construido para abastecer de agua a la Zona Metropolitana de Monterrey con un caudal de diseño 6.0 m³/s. Este caudal se logra mediante la operación de 5 bombas en cada planta, es decir, cada bomba funcionando con un gasto unitario de diseño de 1.2 m³/s. Este gasto se suministra al tanque de aguas crudas ubicado en la planta potabilizadora de San Roque, como se muestra en la *figura 3.1*.

El sistema de bombeo general funciona con la combinación de sistemas de bombeo en paralelo y en serie. En cada una de las plantas de bombeo se utiliza una configuración en paralelo de 5 + 1 bombas para su operación, es decir, 5 bombas en funcionamiento normal y una de reserva. En cuanto al funcionamiento en serie, el gasto bombeado por cada planta se almacena en los tanques de sumergencia, ubicados antes de cada estación de bombeo.

El acueducto consta de 5 estaciones de bombeo, numeradas desde la planta de bombeo 0 hasta la planta de bombeo 4. En la estación de bombeo 0 se utilizan bombas de eje vertical, mientras que en las plantas de bombeo 1 hasta la planta de bombeo 4 se emplean bombas de eje horizontal.

Los tanques de sumergencia presentan diferentes tirantes, los cuales se mencionarán posteriormente. Cada tanque ocupa un área de 2500 m². Debido a que el tirante de los tanques de sumergencia es diferente, el volumen que pueden almacenar cada uno no es el mismo

El material de las tuberías que componen la línea de conducción corresponde a acero. La longitud total de la línea de conducción es de unos 88.84 kilómetros, desde la toma en la presa El Cuchillo hasta el tanque de aguas crudas. En los siguientes apartados se detalla la conformación de los diferentes tramos de la línea de conducción.

Debido al funcionamiento continuo de la línea de conducción a lo largo del tiempo, los factores de fricción han experimentado un aumento. Los factores de fricción medidos por el Grupo de Hidromecánica del Instituto de Ingeniería de la UNAM en el año de 1999 son los que se muestran en la **tabla 3.1**.

Tabla 3.1 Factor de fricción de la línea de conducción

Tramo	Factor de fricción, f
Presa El Cuchillo – Tanque de sumergencia 1	0.0198
Tanque de sumergencia 1 – Tanque de sumergencia 2	0.0208
Tanque de sumergencia 2 – Tanque de sumergencia 3	0.0232
Tanque de sumergencia 3 – Tanque de sumergencia 4	0.0214
Tanque de sumergencia 4 – Tanque de aguas crudas	0.0218

Las características de las bombas originales con las cuales se diseñó el sistema de bombeo para cada planta son las mostradas en la **tabla 3.2**.

Tabla 3.2 Características de las bombas de cada planta

Planta de bombeo	Carga, H_B (m)	Gasto, Q (m^3/s)	Eficiencia, η_B	Velocidad de giro, N (rpm)	Nivel de piso de instalación (msnm)
Planta de bombeo 0	80.12	1.40	86.60	1180	151.00
Planta de bombeo 1	81.82	1.20	89.10	1180	195.50
Planta de bombeo 2	79.32	1.20	89.50	1180	239.00
Planta de bombeo 3	83.42	1.20	89.30	1180	297.00
Planta de bombeo 4	100.76	1.20	88.10	1180	375.00

Desde la elevación de referencia del vaso de la presa, que se encuentra en el nivel intermedio definido por el NAMINO y el NAMO ubicado a 156.55 msnm, hasta el nivel de entrega en el tanque de aguas crudas en la elevación a 477.00 msnm en la planta de potabilización de San Roque, existe una diferencia de aproximadamente 320.45 m.

El acueducto Cuchillo – Monterrey I está compuesto por las siguientes estructuras en su funcionamiento. Se detallan sus componentes y sus respectivos cadenamientos en los siguientes apartados.

III.2 TRAMO DE LA PRESA EL CUCHILLO AL TANQUE DE SUMERGENCIA 1

La longitud total de este tramo es de aproximadamente 23 203.20 m. El trayecto inicia en la presa El Cuchillo y termina en el tanque de sumergencia 1. La carga estática que existe entre el nivel intermedio definido por el NAMINO y el NAMO, ubicado en la cota 156.55 msnm, y el nivel medio del tanque de sumergencia 1, con la cota 215.39 msnm, es de 58.84 m. El volumen máximo que puede almacenar el tanque de sumergencia 1, considerando que su tirante es de 4.42 m, es de 11 050.00 m^3 . Respecto al tanque de sumergencia 1, el nivel del piso se encuentra en la cota 213.18 msnm, mientras que el nivel de su corona se sitúa en la cota de 217.60 msnm. La **figura 3.2** se muestra el perfil elevaciones para el tramo en función del cadenamiento y los componentes presentes, mientras que en la **tabla 3.3** se detallan las características de la línea de conducción.

Figura 3.2 Perfil de elevaciones para el tramo de la presa El Cuchillo al tanque de sumergencia 1

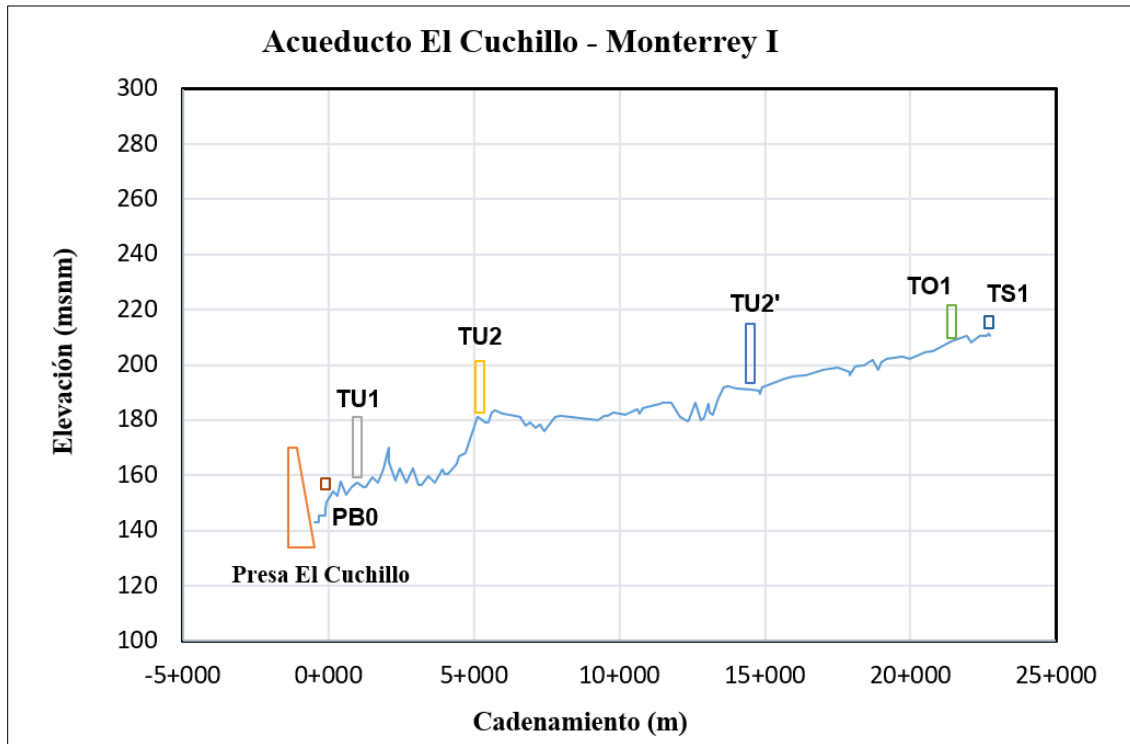


Tabla 3.3 Longitudes que componen el trayecto de la presa El Cuchillo al tanque de sumergencia 1

Tramo	Longitud (m)	Diámetro (m)
Presa El Cuchillo - Planta de bombeo 0	384.00	2.13
Planta de bombeo 0 - Cámara de aire	100.00	2.13
Cámara de aire - Tanque unidireccional 1	997.80	2.13
Tanque unidireccional 1 – Tanque unidireccional 2	4 200.00	2.13
Tanque unidireccional 2 - Tanque unidireccional 2'	9 300.00	2.13
Tanque unidireccional 2' – Torre de oscilación 1	6 900.00	2.13
Torre de oscilación 1 – Tanque de sumergencia 1	1 321.40	2.13

III.3 TRAMO DEL TANQUE DE SUMERGENCIA 1 AL TANQUE DE SUMERGENCIA 2

La longitud total de este tramo es de aproximadamente 18 178.60 m. El trayecto comienza en el tanque de sumergencia 1 y termina en el tanque de sumergencia 2. La carga estática que existe entre el nivel medio del tanque de sumergencia 1, ubicado en la cota 215.39 msnm, y el nivel medio del tanque de sumergencia 2, con la cota de 275.30 msnm, es de 59.91 m. El volumen máximo que puede almacenar el tanque de sumergencia 2, considerando que su tirante es de 4.60 m, es de 11 500.00 m³. Para el tanque de sumergencia 2, el nivel del piso se encuentra en la cota 273.00 msnm y el nivel de su corona se ubica en la cota 277.60 msnm. En la *figura 3.3* se muestra el perfil elevaciones para el tramo en función del cadenamiento y los componentes existentes, mientras que en la *tabla 3.4* se presentan las características de la línea de conducción.

Figura 3.3 Perfil de elevaciones para el tramo del tanque de sumergencia 1 al tanque de sumergencia 2

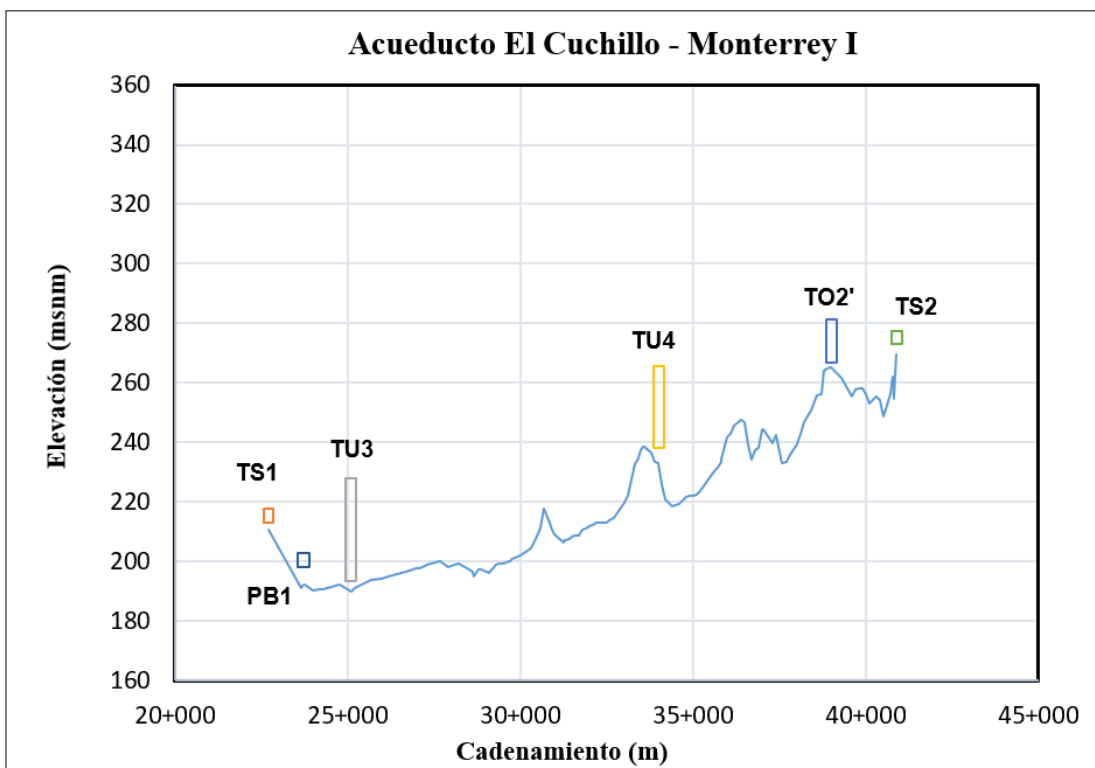


Tabla 3.4 Longitudes que componen el tramo del tanque de sumergencia 1 al tanque de sumergencia 2

Tramo	Longitud (m)	Diámetro (m)
Tanque de sumergencia 1 – Planta de bombeo 1	1 002.60	2.50
Planta de bombeo 1 – Cámara de aire	100.00	2.13
Cámara de aire – Tanque unidireccional 3	1 266.00	2.13
Tanque unidireccional 3 – Tanque unidireccional 4	8 910.00	2.13
Tanque unidireccional 4 – Torre de oscilación 2'	5 000.00	2.13
Torre de oscilación 2' – Tanque de sumergencia 2	1 900.00	2.13

II.4 TRAMO DEL TANQUE DE SUMERGENCIA 2 AL TANQUE DE SUMERGENCIA 3

La longitud total de este tramo abarca aproximadamente 23 039.00 m. El recorrido inicia en el tanque de sumergencia 2 y culmina en el tanque de su sumergencia 3. La carga estática que existe entre el nivel medio del tanque de sumergencia 2, ubicado en la cota 275.30 msnm, y el nivel medio del tanque de sumergencia 3, que encuentra en la cota 325.35 msnm, es de 50.05 m. El volumen máximo que puede almacenar el tanque de sumergencia 3, considerando que su tirante es de 12.70 m, es de 31 750.00 m³. Para el tanque de sumergencia 3, el nivel del piso se encuentra en la cota 319.00 msnm y el nivel de su corona se ubica en la cota 331.70 msnm. En la *figura 3.4* se presenta el perfil elevaciones para este tramo, mostrando el cadenamamiento y los componentes existentes, mientras que en la *tabla 3.5* se presentan las características de la línea de conducción.

Figura 3.4 Perfil de elevaciones para el tramo del tanque de sumergencia 2 al tanque de sumergencia 3

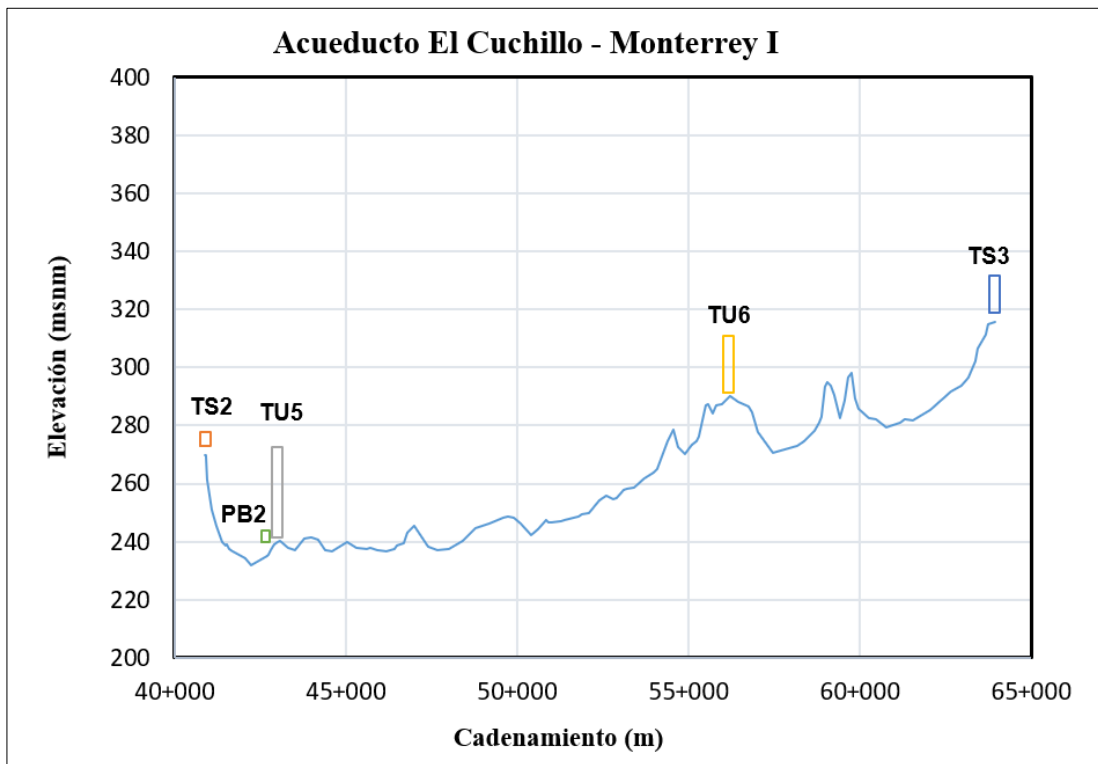


Tabla 3.5 Longitudes que componen el tramo del tanque de sumergencia 2 al tanque de sumergencia 3

Tramo	Longitud (m)	Diámetro (m)
Tanque de sumergencia 2 – Planta de bombeo 2	1 820.00	2.50
Planta de bombeo 2 – Cámara de aire	100.00	2.13
Cámara de aire – Tanque unidireccional 5	180.00	2.13
Tanque unidireccional 5 – Tanque unidireccional 6	13 167.00	2.13
Torre unidireccional 6 – Tanque de sumergencia 3	7 772.00	2.13

III.5 TRAMO DEL TANQUE DE SUMERGENCIA 3 AL TANQUE DE SUMERGENCIA 4

La longitud total de este tramo abarca aproximadamente 14 645.00 m, iniciando en el tanque de sumergencia 3 y culminando en el tanque de sumergencia 4. La carga estática que existe entre el nivel medio del tanque de sumergencia 3, ubicado en la cota 325.35 msnm, y el nivel medio del tanque de sumergencia 4, con la cota 394.33 msnm, es de 68.98 m. El volumen máximo que puede almacenar el tanque de sumergencia 4, considerando que su tirante es de 4.55 m, es de 11 375.00 m³. Para el tanque de sumergencia 4 el nivel del piso se encuentra en la cota 392.05 msnm y el nivel de su corona se ubica en la cota 396.60 msnm. La *figura 3.5* se muestra el perfil elevaciones para el tramo en función del cadenamiento y los componentes existentes, mientras que en la *tabla 3.6* se presentan las características de la línea de conducción.

Figura 3.5 Perfil de elevaciones para el tramo del tanque de sumergencia 3 al tanque de sumergencia 4

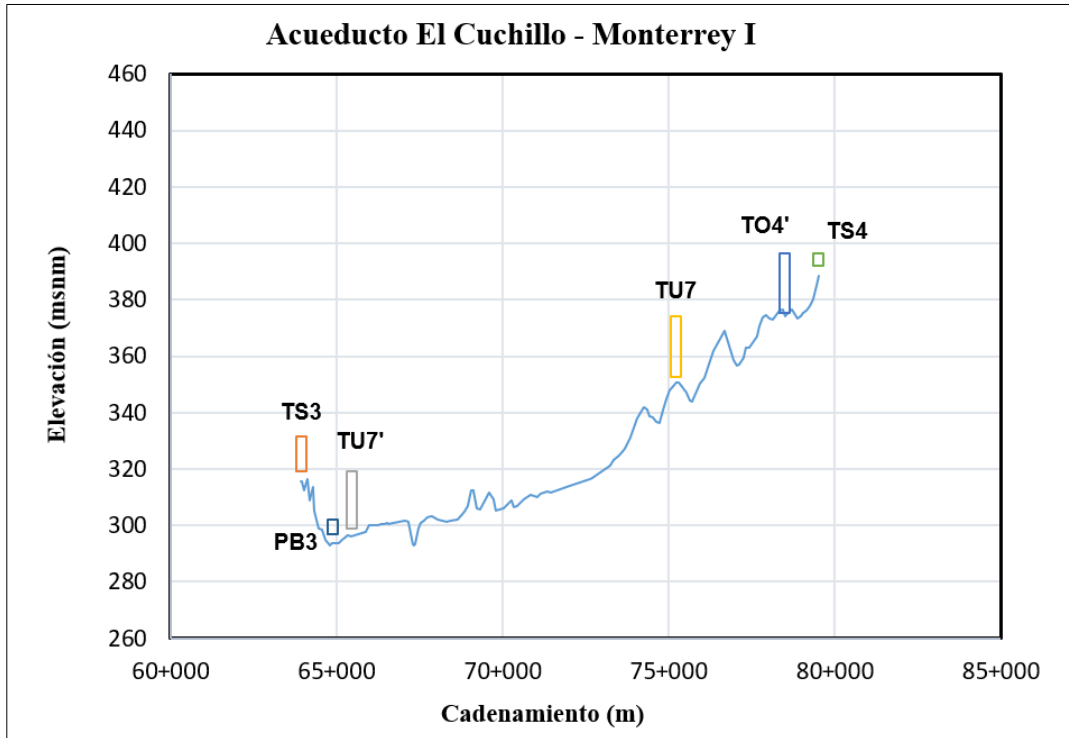


Tabla 3.6 Longitudes que componen el tramo del tanque de sumergencia 3 al tanque de sumergencia 4

Tramo	Longitud (m)	Diámetro (m)
Tanque de sumergencia 3 – Planta de bombeo 3	950.00	2.50
Planta de bombeo 3 – Cámara de aire	100.00	2.13
Cámara de aire – Tanque unidireccional 7'	478.00	2.13
Tanque unidireccional 7' - Tanque unidireccional 7	9 750.00	2.13
Torre unidireccional 7 – Torre de oscilación 4'	3 267.00	2.13
Torre de oscilación 4' – Bifurcación	100.00	2.50
Bifurcación – Tanque de sumergencia 4	952.00	2.13

III.6 TRAMO DEL TANQUE DE SUMERGENCIA 4 AL TANQUE DE AGUAS CRUDAS

La longitud total de este tramo es de aproximadamente 9 774.92 metros, iniciando en el tanque de sumergencia 4 y finalizando en el tanque de aguas crudas. La carga estática que existe entre el nivel medio del tanque de sumergencia 4, ubicado en la cota 394.33 msnm, y el nivel de entrega del tanque de aguas crudas, que se encuentra en la cota 477.00 msnm, es de 82.68 metros. Para el tanque de aguas crudas el nivel del piso se encuentra en la cota 475.00 msnm y el nivel de entrega se ubica en la cota 477.00 msnm. La *figura 3.6* se muestra el perfil elevaciones para el tramo en función del cadenamamiento y los componentes existentes, mientras que en la *tabla 3.7* se presentan las características de la línea de conducción.

Figura 3.6 Perfil de elevaciones para el tramo del tanque de sumergencia 4 al tanque de aguas crudas

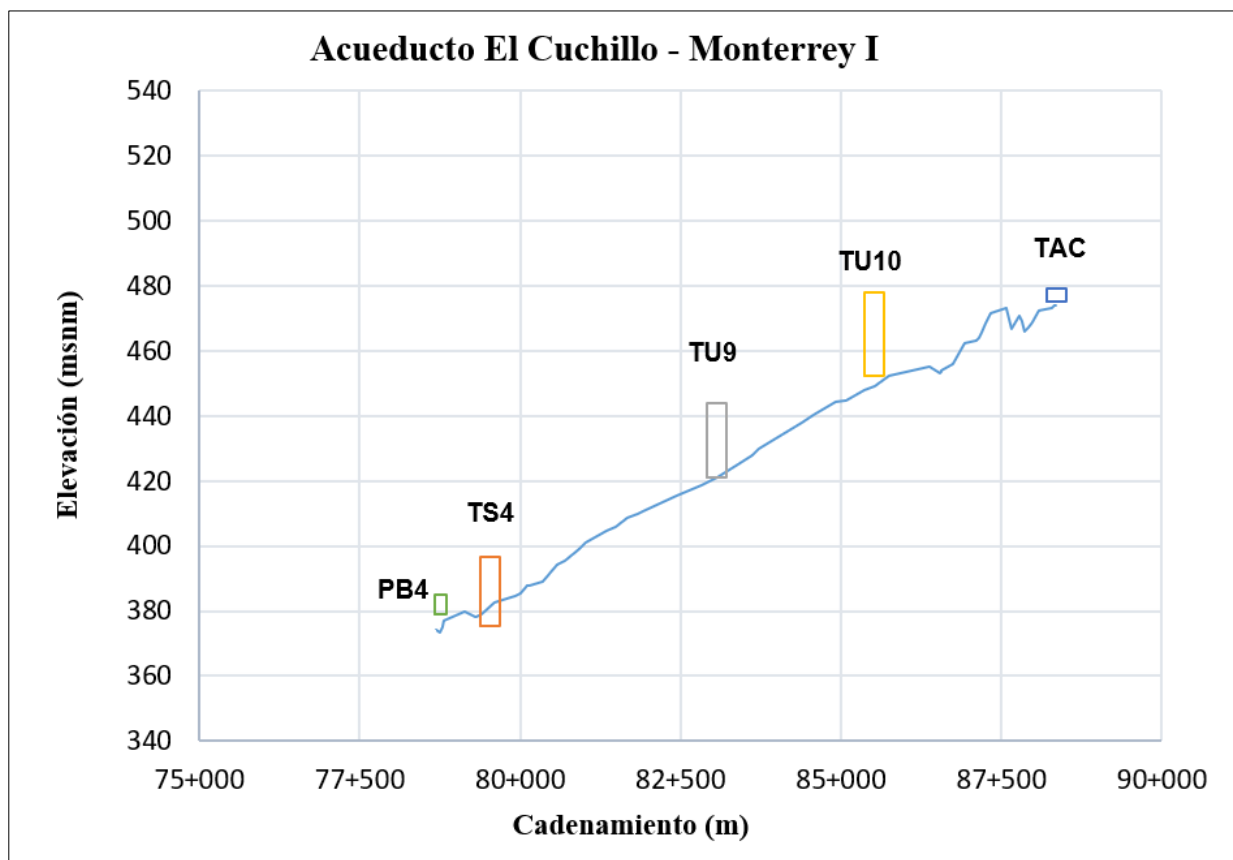


Tabla 3.7 Longitudes que componen el tramo del tanque de sumergencia 4 al tanque de aguas crudas

Tramo	Longitud (m)	Diámetro (m)
Tanque de sumergencia 4 – Bifurcación	952.00	2.13
Bifurcación – Planta de bombeo 4	108.00	2.50
Planta de bombeo 4 – Cámara de aire	100.00	2.13
Cámara de aire – Tanque unidireccional 9	4 267.00	2.13
Tanque unidireccional 9 – Tanque unidireccional 10	2 460.00	2.13
Tanque unidireccional 10 – Tanque de aguas crudas	2 839.92	2.13

IV PROPUESTA DE REHABILITACIÓN

En este capítulo se presenta la propuesta de rehabilitación del acueducto El Cuchillo – Monterrey I. Para comenzar con la exposición de los aspectos que se deben de considerar, es conveniente mencionar la importancia de esta infraestructura hidráulica. El acueducto El Cuchillo – Monterrey I ha contribuido significativamente desde su entrada en funcionamiento en 1994, suministrando un gasto promedio de 2.94 m³/s de agua a la Zona Metropolitana de Monterrey, a pesar de que su capacidad de diseño sea de 6 m³/s. Dada la creciente demanda de agua y el aumento en el número de habitantes del AMM, resulta fundamental realizar las labores de mantenimiento adecuadas en el sistema de bombeo para garantizar su correcto funcionamiento y continuar proporcionando agua al AMM en los años venideros.

En la **sección 1.4** se mencionó que en el año 2022 se proyectó la construcción del acueducto El Cuchillo – Monterrey II, para el año 2024 las obras relacionadas con esta infraestructura hidráulicas se consideran finalizadas. El planteamiento del proyecto del nuevo acueducto El Cuchillo II contempla la colaboración conjunta de los dos acueductos que provienen de la presa El Cuchillo. La operación simultánea de estos puede ofrecer beneficios futuros a la población en crecimiento del Área Metropolitana de Monterrey. Por tal razón, se sustenta la propuesta de rehabilitación del acueducto El Cuchillo – Monterrey I, lo que garantizará su capacidad para operar de manera adecuada cuando se requiera.

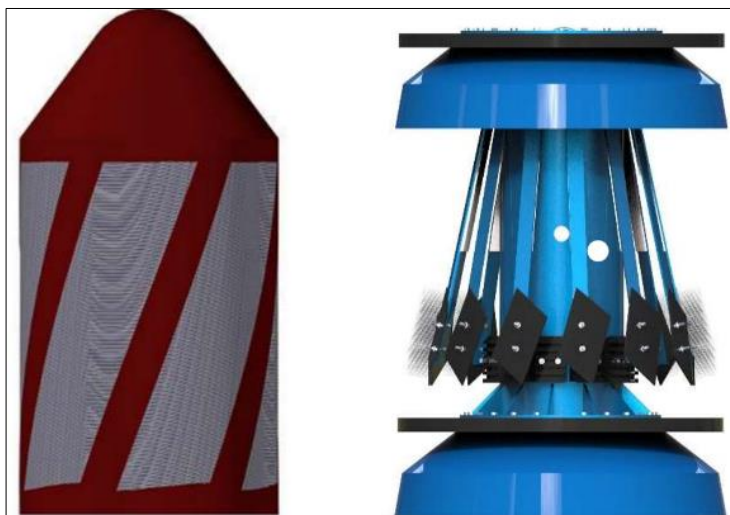
Las acciones propuestas para la rehabilitación comienzan con la limpieza de las tuberías que conforman la línea de conducción mediante el uso de dispositivos conocidos como “diablos” o “pigs”. Estos dispositivos tienen la función de limpiar las tuberías, reducir las pérdidas por fricción y mejorar la capacidad hidráulica del sistema. Posteriormente, se analizan las curvas del sistema de cada tramo de la línea de conducción, considerando los niveles medios de la presa y de los tanques de sumergencia. A partir de estas curvas del sistema, se propone la selección de nuevos equipos de bombeo que puedan satisfacer la demanda. Finalmente, se lleva a cabo una revisión por cavitación de los equipos de bombeo propuestos para garantizar su correcto funcionamiento.

IV.1 LIMPIEZA DE TUBERÍAS POR MEDIO DE “DIABLOS” O “PIGS”

Para la limpieza de la línea de conducción, se propone la implementación de artefactos denominados “diablos” o “pigs”. Estos dispositivos se utilizan para eliminar el material que se ha adherido a lo largo del tiempo en el interior de las tuberías. El agua transporta minerales que pueden quedar incrustados en las paredes de la línea de conducción, lo que provoca una disminución en la eficiencia del sistema. Estas incrustaciones aumentan la rugosidad de la sección transversal por donde fluye el caudal, lo que resulta en un incremento del factor de fricción. Como consecuencia, las pérdidas por fricción aumentan y el caudal entregado disminuye.

Estos dispositivos están compuestos principalmente por espuma de poliuretano de alta calidad. Dependiendo de su uso específico, pueden estar equipados con cepillos adicionales para mejorar la eficacia de la limpieza. Estos artefactos tienen la forma de un cilindro o bala, como se muestra en la **figura 4.1**, y son impulsados mediante la aplicación de presión dentro del conducto. Al pasar por las tuberías, estos dispositivos remueven el material no deseado adherido a las paredes. El material removido es conducido hacia la salida del conducto, facilitando así la limpieza completa de la línea de conducción.






Figura 4.1 Diablos o pigs



Fuente: *Introducción a las herramientas de limpieza en ductos, LIMPRO*

El procedimiento que se realiza para este método de limpieza se presenta de forma resumida en la **tabla 4.1**.

Tabla 4.1 Tabla de programa progresivo de limpieza

	<p>Prueba de flujo Es la diferencia entre el volumen de entrada con respecto al volumen de salida y brinda una idea del grado de obstrucción</p>
	<p>Pig de prueba (inspección) Su función es determinar el tamaño y cantidad de elementos de limpieza a utilizar</p>
	<p>1er corrida La función es la de remoción de la obstrucción gradualmente aumentando progresivamente los diámetros de los elementos, así como densidades</p>
	<p>Última corrida Se efectúa un barrido con un elemento de limpieza correspondiente al diámetro de la línea y se realiza la inspección final de cero residuos</p>
	<p>Prueba final de flujo Comparativa de presiones y flujos antes y después de las corridas, así como el flujo de diseño</p>

Fuente: *Introducción a las herramientas de limpieza en ductos, LIMPRO*

De acuerdo con el documento “Acueducto Río Colorado – Tijuana. Estudio para recuperación de la capacidad de bombeo” elaborado por el Grupo de Hidromecánica del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México en el año de 1997, el procedimiento descrito se realizó en algunos de los tramos que conforman la línea de conducción del mencionado acueducto. Los resultados obtenidos fueron satisfactorios, lo que demuestra la efectividad del método de limpieza mediante el uso de “pigs”.

Los resultados del estudio comparativo muestran que el factor de fricción calculado en el acueducto Río Colorado – Tijuana en octubre de 1996, para el tramo que va de la torre de oscilación 1 al tanque de sumergencia 2, con un diámetro de 48 pulgadas y acero como material de la tubería, y con el funcionamiento de dos equipos de bombeo, fue de $f = 0.0378$. Posteriormente, después de realizar las labores de limpieza en junio de 1997, se obtuvo un factor de fricción de $f = 0.0185$ para las mismas condiciones. Esto representa una disminución del 50% en comparación con el valor medido en octubre de 1996.

Con base en lo presentado en la **sección III.1**, el factor de fricción más alto registrado en el acueducto El Cuchillo para el tramo que va del tanque de sumergencia 2 al tanque de sumergencia 3 fue de $f = 0.0232$. En este trabajo, se propone utilizar un valor de $f = 0.014$ para la realización de los análisis hidráulicos. Este valor es un 35% menor en comparación con el valor máximo registrado de $f = 0.0232$. Esta elección se fundamenta en el hecho de que el uso “pigs” para la limpieza de tuberías puede reducir el valor original del factor de fricción hasta un 50%. Sin embargo, para este caso, se prefiere utilizar un valor conservador en cuanto al porcentaje de reducción esperado.

IV.2 CURVA DEL SISTEMA

A continuación, se presenta la construcción de la curva del sistema correspondiente a cada tramo del acueducto. Para elaborar la curva del sistema, se consideraron tanto el nivel medio de la presa El Cuchillo como el nivel medio de cada tanque de sumergencia.

IV.2.1 TRAMO DE PRESA EL CUCHILLO AL TANQUE DE SUMERGENCIA 1

Para la construcción de la curva del sistema de cada tramo de análisis, se consideran los niveles medios en la succión y la descarga, obteniendo de esta forma la carga estática total presentada a continuación.

Carga en la succión $H_S = 156.55$ m

Carga en la descarga $H_D = 215.39$ m

Carga estática total $H_{ET} = 58.84$ m

Para el cálculo de las pérdidas por fricción, se considera un valor constante de $f = 0.014$ en todos los tramos de análisis. Para el cálculo de las pérdidas locales en la rama de succión (salida de la presa), se considera un coeficiente de salida de $k = 1$. Para las pérdidas locales en la rama de descarga (entrada del tanque de sumergencia 1), se considera un coeficiente de entrada con un valor de $k = 0.5$.

El tramo de la rama de succión tiene una longitud total de 384.00 m y un diámetro de tubería de 2.13 m, lo que implica un área de la sección transversal de 3.563 m².

El tramo de la rama de descarga tiene una longitud total de 22 819.20 m y un diámetro de tubería de 2.13 m, lo que implica un área de la sección transversal de la tubería de 3.563 m².

Uno de los parámetros importantes a considerar en el cálculo de las pérdidas de energía es el valor de la aceleración de la gravedad, ya que está involucrada en el cálculo de la carga de velocidad. En este caso, se utiliza un valor estándar de la gravedad de $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ en todos los cálculos.

A partir de la **expresión 2.20**, se calcula la pérdida total en la rama de succión, que resulta ser de 0.51 m. La pérdida total en la rama de descarga es de 21.75 metros. Por lo cual, el valor de la suma de pérdidas totales en el sistema es de $\sum h_r = 22.26 \text{ m}$.

De acuerdo con la **expresión 2.21**, el valor del coeficiente global de pérdida es de $K_{SIS} = 0.6182 \frac{\text{s}^2}{\text{m}^5}$.

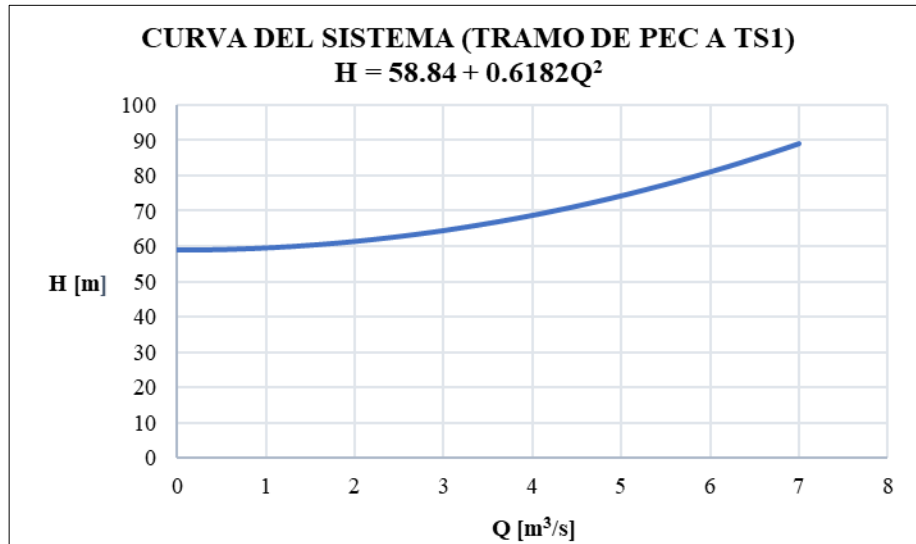
El gasto de diseño en el sistema es de $Q = 6 \text{ m}^3/\text{s}$. Este valor será utilizado para todos los cálculos posteriores en los siguientes tramos de análisis.

Para obtener la ecuación que describe el funcionamiento del sistema, se sustituyen los valores obtenidos en la **expresión 2.23**. La expresión resultante es:

$$H_{B \text{ SIS}} = 58.84 + 0.6182 Q^2$$

La curva del sistema para este tramo de análisis se presenta en la **figura 4.2**.

Figura 4.2 Curva del sistema (Tramo: presa El Cuchillo al tanque de sumergencia 1)



IV.2.2 TRAMO DE TANQUE DE SUMERGENCIA 1 AL TANQUE DE SUMERGENCIA 2

Para la construcción de la curva del sistema de este tramo, se consideran los niveles medios en la succión y la descarga, obteniendo la carga estática total presentada a continuación.

Carga en la succión $H_S = 215.39$ m

Carga en la descarga $H_D = 275.30$ m

Carga estática total $H_{ET} = 59.91$ m

El cálculo de las pérdidas locales en la rama de succión, que corresponde a la salida del tanque de sumergencia 1, se realiza considerando un coeficiente de salida de $k = 1$. Por otro lado, en cuanto a las pérdidas locales en la rama de descarga, que corresponde a la entrada del tanque de sumergencia 2, se utiliza un coeficiente de entrada con un valor de $k = 0.5$.

El tramo de la rama de succión tiene una longitud total de 1 002.60 m y un diámetro de tubería de 2.50 m, lo que implica un área de la sección transversal de 4.909 m².

Por otro lado, el tramo de la rama de descarga tiene una longitud total de 17 176.00 m y un diámetro de tubería de 2.13 m, lo que implica un área de la sección transversal de la tubería de 3.563 m².

La pérdida total en la rama de succión resulta ser de 0.50 m, mientras que la pérdida total en la rama de descarga es de 16.39 m. Por lo tanto, el valor de la suma de pérdidas totales en el sistema es de $\sum h_r = 16.89$ m.

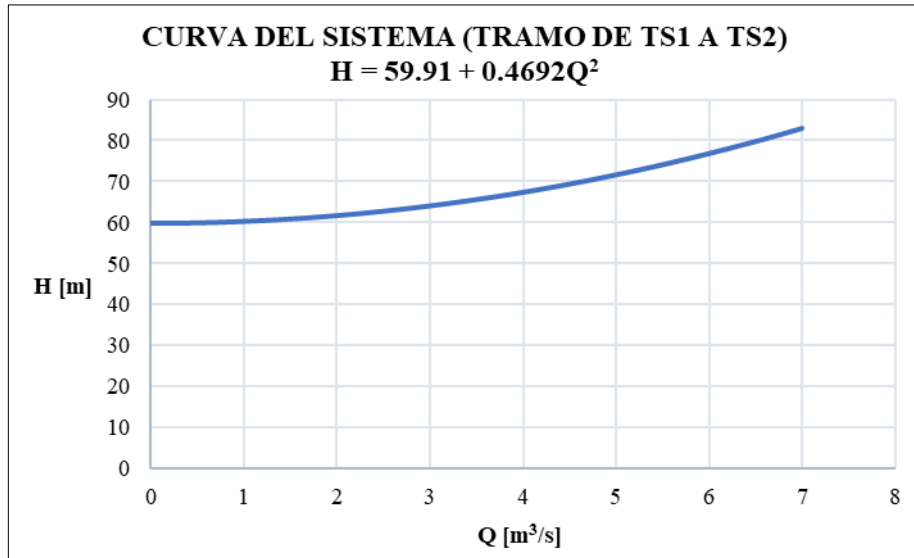
El valor del coeficiente global de pérdida se establece en $K_{SIS} = 0.4692 \frac{s^2}{m^5}$.

La expresión que define la curva del sistema para este tramo es:

$$H_{B\ SIS} = 59.91 + 0.4692 Q^2$$

La curva del sistema para este tramo de análisis se ilustra en la **figura 4.3**.

Figura 4.3 Curva del sistema (Tramo: tanque de sumergencia 1 al tanque de sumergencia 2)



IV.2.3 TRAMO DE TANQUE DE SUMERGENCIA 2 AL TANQUE DE SUMERGENCIA 3

Para la construcción de la curva del sistema de este tramo, se consideran los niveles medios en la succión y la descarga, obteniendo la carga estática total presentada a continuación.

Carga en la succión	$H_S = 275.30$ m
Carga en la descarga	$H_D = 325.35$ m
Carga estática total	$H_{ET} = 50.05$ m

Referente al cálculo de las pérdidas locales en la rama de succión, que corresponde a la salida del tanque de sumergencia 2, se realiza considerando un coeficiente de salida de $k = 1$. Para el cálculo de las pérdidas locales en la rama de descarga, que corresponde a la entrada del tanque de sumergencia 3, se considera un coeficiente de entrada con un valor de $k = 0.5$.

El tramo de la rama de succión tiene una longitud total de 1 820.00 m, con diámetro de la tubería de 2.50 m, lo que implica un área de la sección transversal de 4.909 m².

Por otro lado, el tramo de la rama de descarga tiene una longitud total de 21 219.00 m, con diámetro de tubería de 2.13 m, lo que implica un área de la sección transversal de la tubería de 3.563 m².

La pérdida total en la rama de succión resulta ser de 0.85 m, mientras que la pérdida total en la rama de descarga es de 20.23 m. Por lo tanto, el valor de la suma de pérdidas totales en el sistema es de $\sum h_r = 21.08$ m.

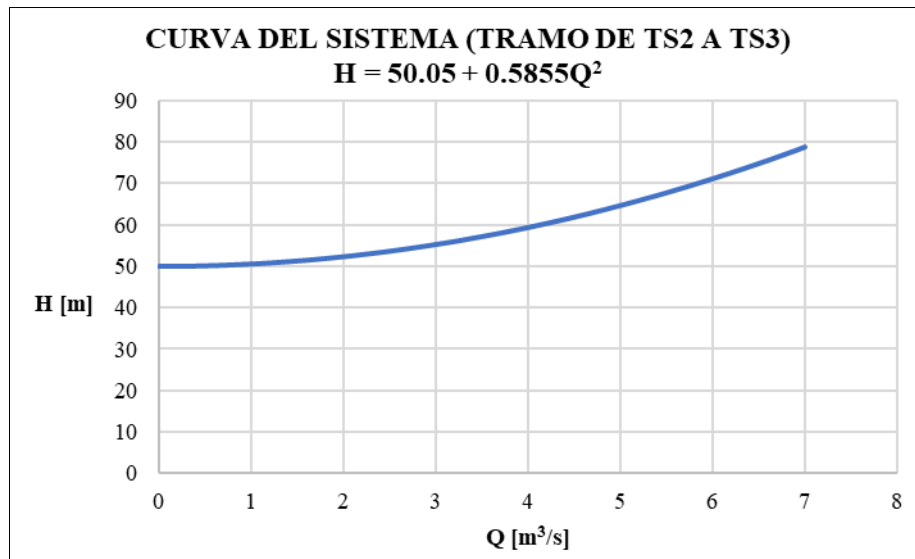
El valor del coeficiente global de pérdida se establece de $K_{SIS} = 0.5855 \frac{s^2}{m^5}$.

La expresión que define la curva del sistema para el presente tramo es:

$$H_{B\ SIS} = 50.05 + 0.5855 Q^2$$

La curva del sistema para este tramo de análisis se presenta en la *figura 4.4*.

Figura 4.4 Curva del sistema (Tramo: tanque de sumergencia 2 al tanque de sumergencia 3)



IV.2.4 TRAMO DE TANQUE DE SUMERGENCIA 3 AL TANQUE DE SUMERGENCIA 4

Para la construcción de la curva del sistema de este tramo, se consideran los niveles medios en la succión y la descarga, obteniendo la carga estática total presentada a continuación.

Carga en la succión $H_S = 225.35$ m

Carga en la descarga $H_D = 394.33$ m

Carga estática total $H_{ET} = 68.98$ m

Referente al cálculo de las pérdidas locales en la rama de succión, que corresponde a salida del tanque de sumergencia 3, se considera un coeficiente de salida de $k = 1$. En cuanto a las pérdidas locales en la rama de descarga, que corresponde a la entrada del tanque de sumergencia 4, se considera un coeficiente de entrada con un valor de $k = 0.5$.

El tramo de la rama de succión tiene una longitud total de 950.00 m, con diámetro de la tubería de 2.50 m, lo que implica un área de la sección transversal de 4.909 m^2 .

Por otro lado, el tramo de la rama de descarga se conforma por dos subtramos: la primera parte cuenta con una longitud de 13 595 m, con un diámetro de tubería de 2.13 m, lo que implica un área de la sección transversal de la tubería de 3.563 m². Para la segunda parte, se tiene una longitud de 100.00 m, con diámetro de la tubería de 2.50 m, lo que implica un área de la sección transversal de la tubería de 4.909 m².

La pérdida total en la rama de succión resulta de 0.48 m, mientras que la pérdida total en la rama de descarga es de 12.99 m. por lo tanto, el valor de la suma de pérdidas totales en el sistema es de $\sum h_r = 13.47 \text{ m}$.

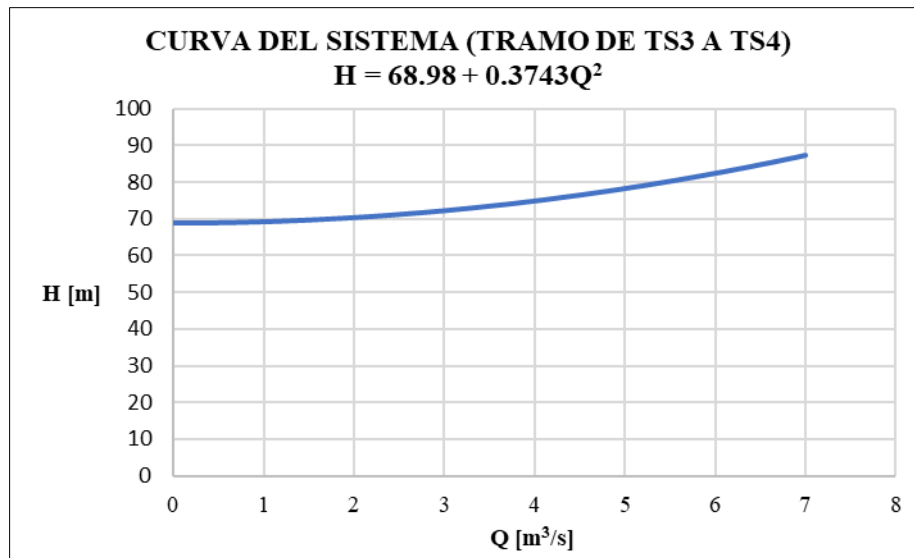
El valor del coeficiente global de pérdida es de $K_{SIS} = 0.3743 \frac{s^2}{m^5}$.

La expresión que define la curva del sistema del presente tramo es:

$$H_{B\text{ SIS}} = 68.98 + 0.3743 Q^2$$

La curva del sistema para este tramo de análisis se ilustra en la **figura 4.5**.

Figura 4.5 Curva del sistema (Tramo: tanque de sumergencia 3 al tanque de sumergencia 4)



IV.2.5 TRAMO DE TANQUE DE SUMERGENCIA 4 AL TANQUE DE AGUAS CRUDAS

Para la construcción de la curva del sistema de este tramo, se consideran los niveles medios en la succión y la descarga, obteniendo la carga estática total presentada a continuación.

Carga en la succión	$H_S = 394.33 \text{ m}$
Carga en la descarga	$H_D = 477.00 \text{ m}$
Carga estática total	$H_{ET} = 82.67 \text{ m}$

Referente al cálculo de las pérdidas locales en la rama de succión, que corresponde a la salida del tanque de sumergencia 4, se considera un coeficiente de salida de $k = 1$. En cuanto a las pérdidas locales en la rama de descarga, correspondiente a la entrada al tanque de aguas crudas, se considera un coeficiente de entrada con un valor de $k = 0.5$.

El tramo de la rama de succión tiene una longitud total de 108.00 m y un diámetro de la tubería de 2.50 m, lo que implica un área de la sección transversal de 4.909 m².

El tramo de la rama de descarga tiene una longitud total de 9 666.92 m y un diámetro de la tubería de 2.13 m, lo que implica un área de la sección transversal de la tubería de 3.563 m².

La pérdida total en la rama de succión resulta de 0.12 m y la pérdida total en la rama de descarga es de 9.25 m. Por lo tanto, el valor de la suma de pérdidas totales en el sistema es de $\sum h_r = 9.38$ m.

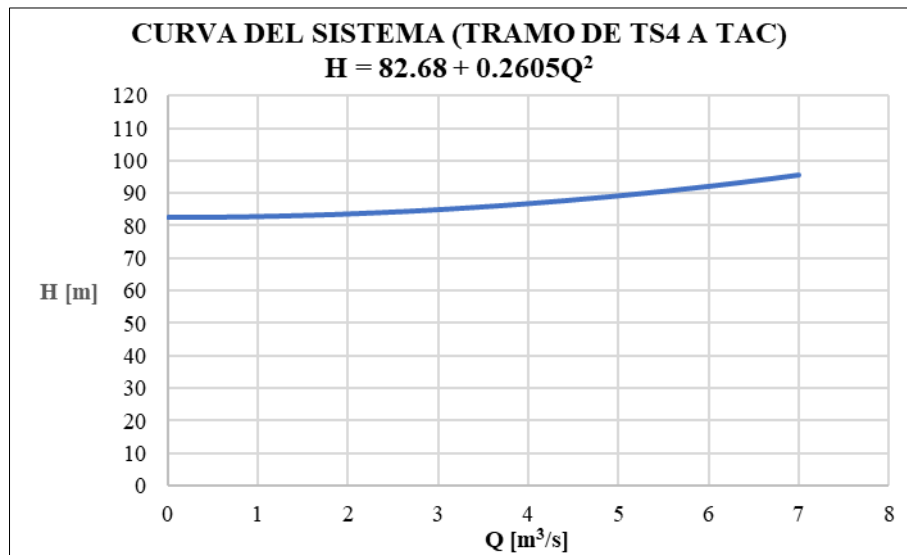
El valor del coeficiente global de pérdida es de $K_{SIS} = 0.2605 \frac{s^2}{m^5}$.

La expresión que define la curva del sistema del presente tramo es:

$$H_{B\ SIS} = 82.68 + 0.2605 Q^2$$

La curva del sistema para este tramo de análisis se presenta en la **figura 4.6**.

Figura 4.6 Curva del sistema (Tramo: tanque de sumergencia 4 al tanque de aguas crudas)

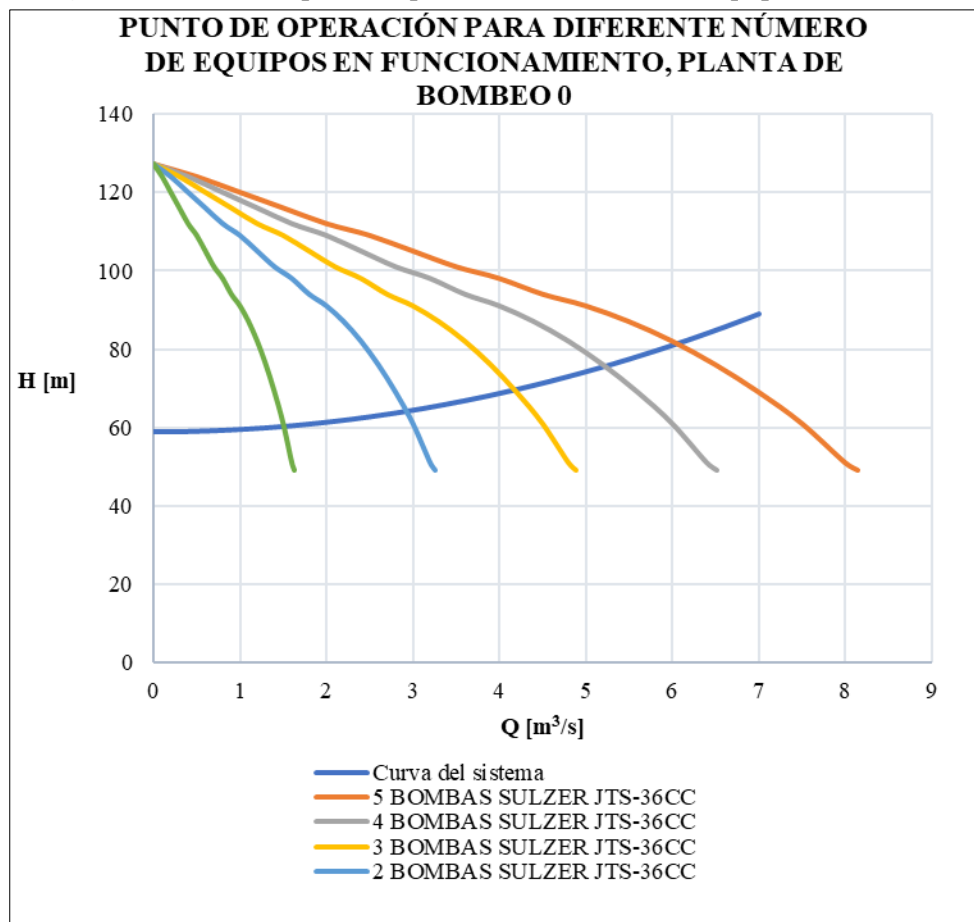


IV.3 SELECCIÓN DE EQUIPOS DE BOMBEO

En este apartado se presentan los valores de la carga dinámica o carga de bombeo que debe de proporcionar cada uno de los equipos correspondiente a cada tramo en el sistema.

A partir de la *expresión 2.19*, se calcula el valor de la carga dinámica que requiere cada tramo en función de la carga estática total y de las pérdidas de energía. Según lo expuesto en la *sección II.10*, la construcción del sistema en paralelo implica que, a medida que aumenta el número de equipos en funcionamiento, el caudal aportado por cada uno se reduce significativamente, debido a la configuración de la curva del sistema con la cual se interseca. Se observa que, a medida que el caudal bombeado aumenta, la curva del sistema tiende a elevarse, ya que esta curva se define mediante una función de segundo grado. Por lo tanto, se busca que, a partir del caudal de diseño con el cual se plantea el sistema de bombeo, los equipos funcionen en el punto de operación que ofrezca la mayor eficiencia posible, garantizando que el caudal y la carga entregada sean los requeridos por el sistema.

Figura 4.7 Punto de operación para diferente número de equipos funcionando



Para este trabajo, se considera un gasto de diseño de $6.0 \text{ m}^3/\text{s}$ para el sistema de bombeo, con la operación de 5 equipos en cada planta. Esto implica que el gasto unitario de cada equipo debe ser de $1.2 \text{ m}^3/\text{s}$. Por lo tanto, en el punto de operación de cada bomba se requiere cumplir con este gasto mencionado, variando la carga dinámica, ya que la carga estática total para niveles medios y las pérdidas de energía a vencer son diferentes para cada estación de bombeo. En la **figura 4.7** se presenta, a manera de ejemplo, el comportamiento del funcionamiento de diferentes números de equipos de bombeo en paralelo para la planta de bombeo 0.

En la búsqueda de equipos de bombeo a través de fabricantes que cumplan con las condiciones requeridas por el sistema, se obtuvieron los siguientes resultados:

- Para la planta de bombeo 0, se cumplen los requerimientos con bombas de eje vertical del fabricante SULZER, considerando el gasto por bomba y la carga de bombeo correspondiente.
- Para la planta de bombeo 1 a la 4, los equipos seleccionados corresponden al fabricante RUHRPUMPEN, siendo bombas de eje horizontal.

La información fue obtenida de las plataformas de ayuda de selección de equipos de bombeo disponibles en la página de internet de cada fabricante mencionado.

IV.3.1 PLANTA DE BOMBEO 0

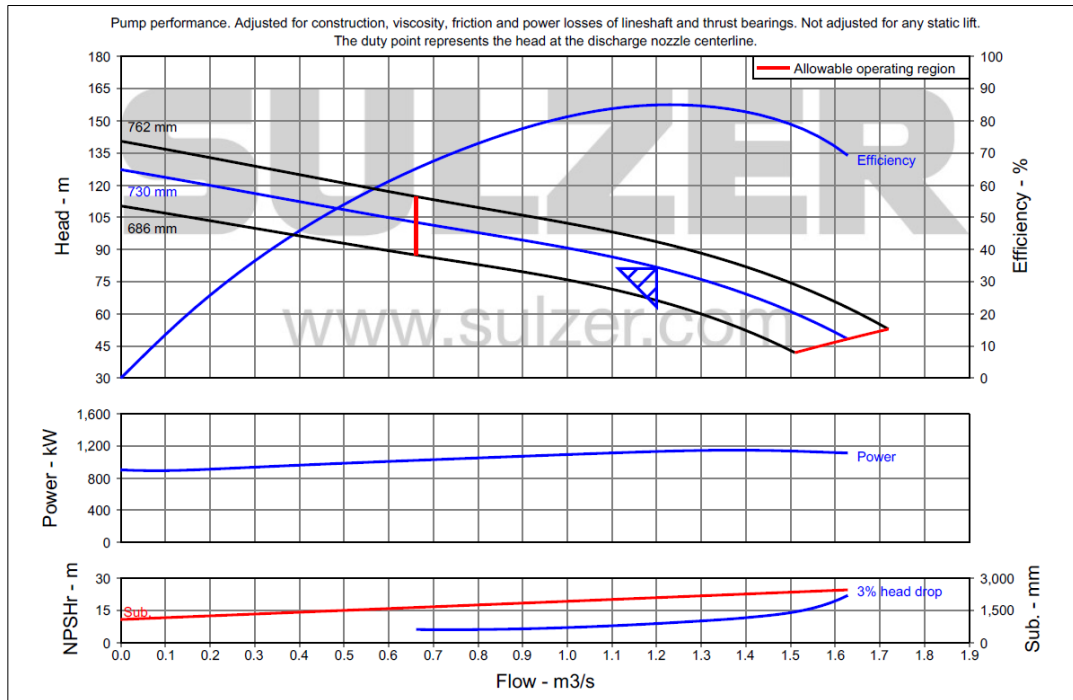
En la **figura 4.2** se presentó la curva del sistema para el tramo de la presa El Cuchillo al tanque de sumergencia 1, donde opera la planta de bombeo 0. De acuerdo con la figura mencionada, para la selección adecuada de los equipos de bombeo en esta planta, es necesario cumplir con dos condiciones: el gasto total en el sistema debe ser $Q = 6.00 \text{ m}^3/\text{s}$ y la carga de bombeo debe ser $H_B = 81.10 \text{ m}$.

El modelo de equipo seleccionado para esta estación de bombeo es del fabricante SULZER modelo JTS-36CC. Las características de este equipo se detallan en la **tabla 4.2**, y en la **figura 4.8** se muestra la curva característica correspondiente. En la **figura 4.9** se puede observar la construcción de la curva equivalente con el funcionamiento de 5 equipos de bombeo y, a su vez, la curva del sistema correspondiente. El punto de intersección de estas dos curvas, ubicado en la intersección de las líneas punteadas en color rojo, corresponde al punto de operación. Cabe destacar que el gasto unitario correspondiente a cada bomba es de $Q_u = 1.2 \text{ m}^3/\text{s}$.

Tabla 4.2 Características de la bomba SULZER JTS-36CC para PB0

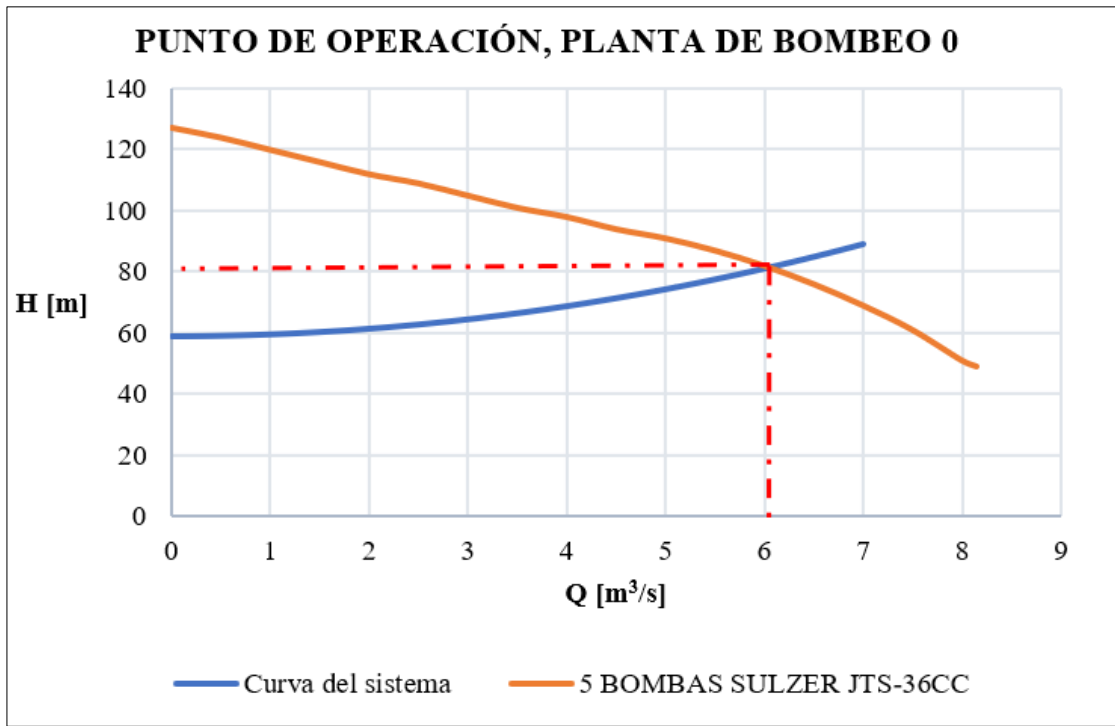
Carga de bombeo	$H_B = 81.10 \text{ m}$
Gasto unitario	$Q_u = 1.2 \text{ m}^3/\text{s}$
Velocidad de giro	$N = 890 \text{ rpm}$
Número de pasos	2
Eficiencia de paso	86.25%
Eficiencia de la bomba	84.94%
Gasto máximo	$Q_{\max} = 1.63 \text{ m}^3/\text{s}$
Relación Q_{\max}/Q_u	1.36
Frecuencia de suministro del sitio (Hz)	60

Figura 4.8 Curvas características de la bomba SULZER JTS-36CC para la planta de bombeo 0



Fuente: Fabricante de equipos de bombeo SULZER

Figura 4.9 Punto de operación para la planta de bombeo 0



IV.3.2 PLANTA DE BOMBEO 1

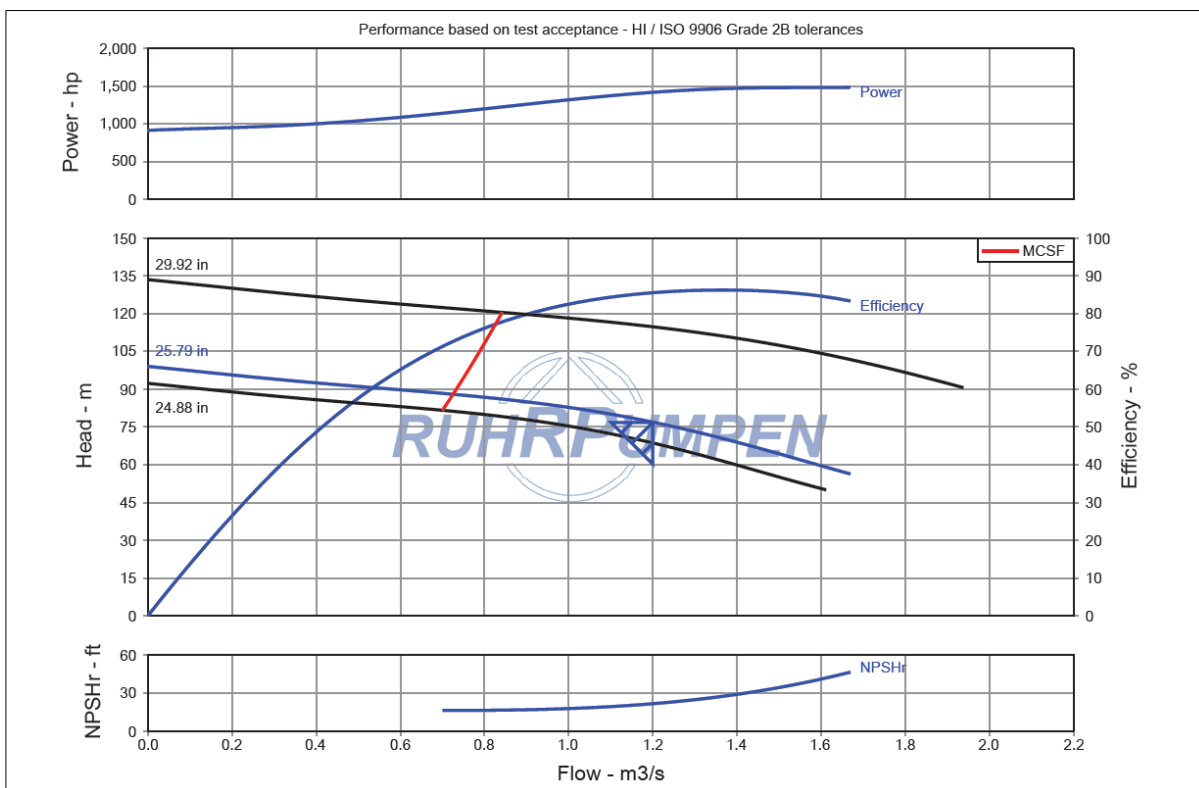
En la *figura 4.3* se presentó la curva del sistema para el tramo del tanque de sumergencia 1 al tanque de sumergencia 2, donde opera la planta de bombeo 1. De acuerdo con la figura mencionada, para la selección adecuada de los equipos de bombeo en esta planta, es necesario cumplir con dos condiciones: el gasto total en el sistema debe ser $Q = 6.00 \text{ m}^3/\text{s}$ y la carga de bombeo debe ser $H_B = 76.80 \text{ m}$.

El modelo de equipo seleccionado para esta estación de bombeo es del fabricante RUHRPUMPEN modelo 26X20X30 (A). Las características de este equipo se detallan en la *tabla 4.3*, y en la *figura 4.10* se muestra la curva característica correspondiente. En la *figura 4.11* se puede observar la construcción de la curva equivalente con el funcionamiento de 5 equipos de bombeo y, a su vez, la curva del sistema correspondiente. El punto de intersección de estas dos curvas, ubicado en la intersección de las líneas punteadas en color rojo, corresponde al punto de operación. Cabe destacar que el gasto unitario correspondiente a cada bomba es de $Q_u = 1.2 \text{ m}^3/\text{s}$.

Tabla 4.3 Características de la bomba RUHRPUMPEN ZW 26X20X30 (A) para PB1

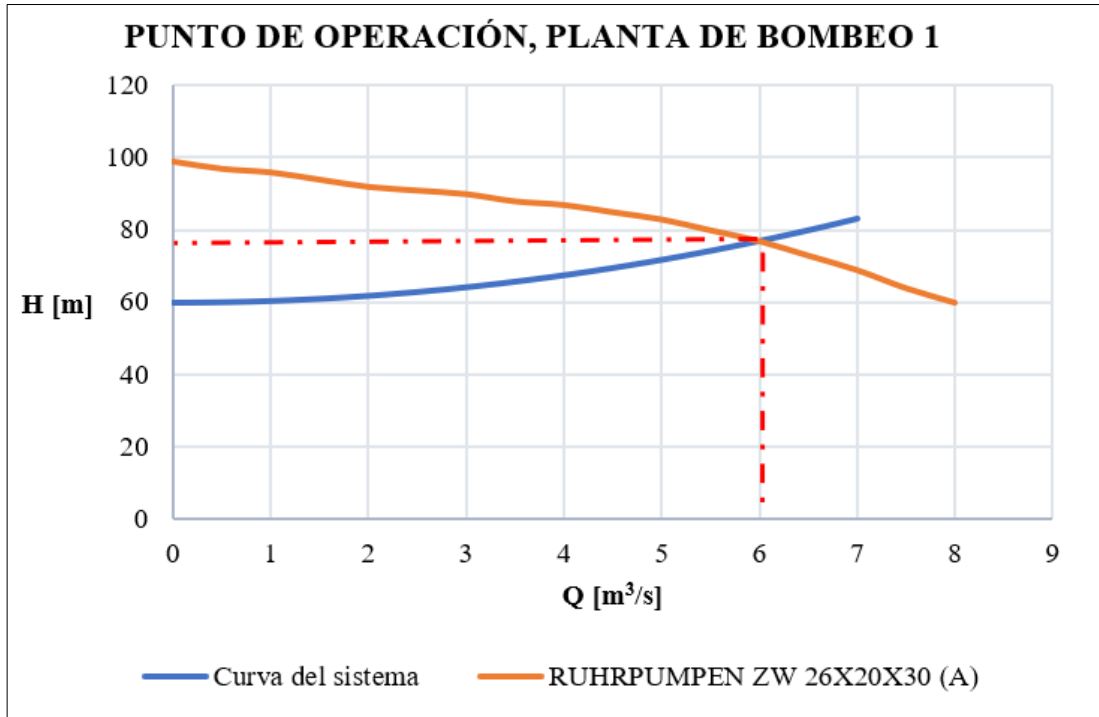
Carga de bombeo	$H_B = 76.80 \text{ m}$
Gasto unitario	$Q_u = 1.2 \text{ m}^3/\text{s}$
Velocidad de giro	$N = 1180 \text{ rpm}$
Número de pasos	1
Eficiencia de paso	85.52 %
Eficiencia de la bomba	85.52%
Gasto máximo	$Q_{\max} = 1.67 \text{ m}^3/\text{s}$
Relación Q_{\max}/Q_u	1.39
Frecuencia de suministro del sitio (Hz)	60

Figura 4.10 Curvas características de la bomba RUHRPUMPEN ZW 26X20X30 (A) para PB1



Fuente: Fabricante de equipos de bombeo RUHRPUMPEN

Figura 4.11 Punto de operación para la planta de bombeo 1



IV.3.3 PLANTA DE BOMBEO 2

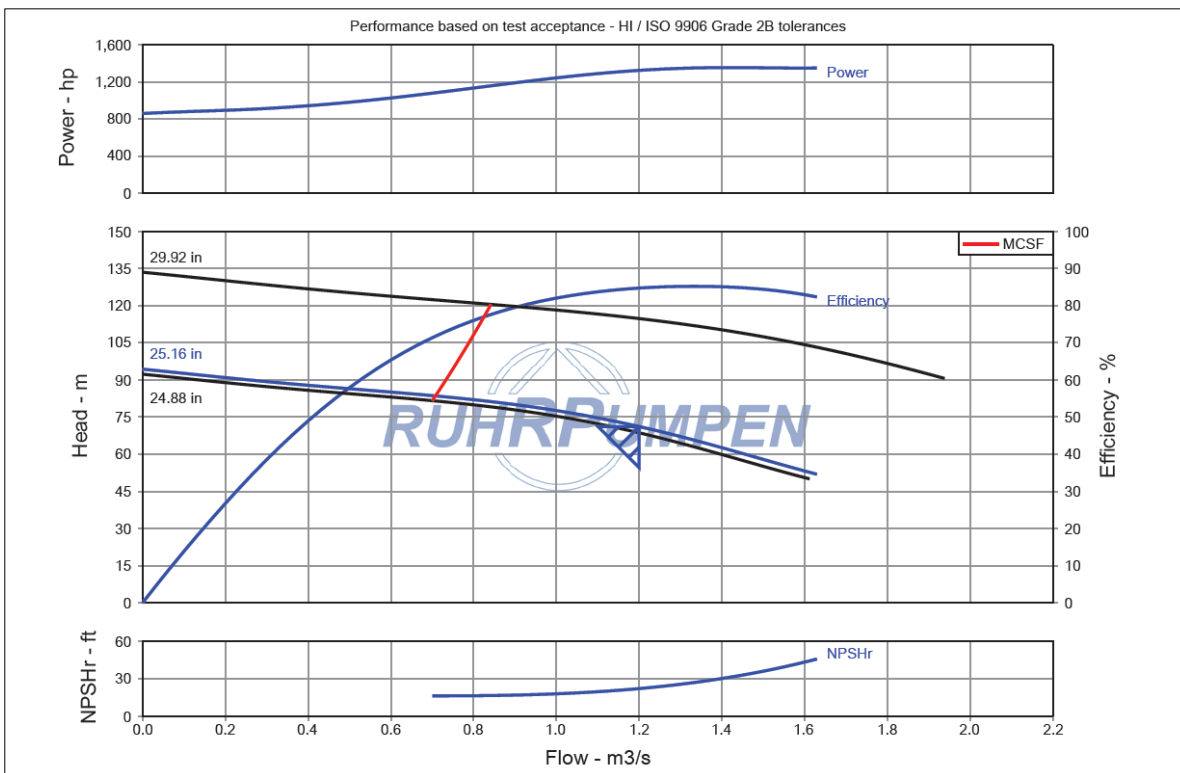
En la *figura 4.4* se presentó la curva del sistema para el tramo del tanque de sumergencia 2 al tanque de sumergencia 3, donde opera la planta de bombeo 2. De acuerdo con la figura mencionada, para la selección adecuada de los equipos de bombeo en esta planta, es necesario cumplir con dos condiciones: el gasto total en el sistema debe ser $Q = 6.00 \text{ m}^3/\text{s}$ y la carga de bombeo debe ser $H_B = 71.13 \text{ m}$.

El modelo de equipo seleccionado para esta estación de bombeo es del fabricante RUHRPUMPEN modelo 26X20X30 (A). Las características de este equipo se detallan en la *tabla 4.4*, y en la *figura 4.12* se muestra la curva característica correspondiente. En la *figura 4.13* se puede observar la construcción de la curva equivalente con el funcionamiento de 5 equipos de bombeo y, a su vez, la curva del sistema correspondiente. El punto de intersección de estas dos curvas, ubicado en la intersección de las líneas punteadas en color rojo, corresponde al punto de operación. Cabe destacar que el gasto unitario correspondiente a cada bomba es de $Q_0 = 1.2 \text{ m}^3/\text{s}$.

Tabla 4.4 Características de la bomba RUHRPUMPEN ZW 26X20X30 (A) para PB2

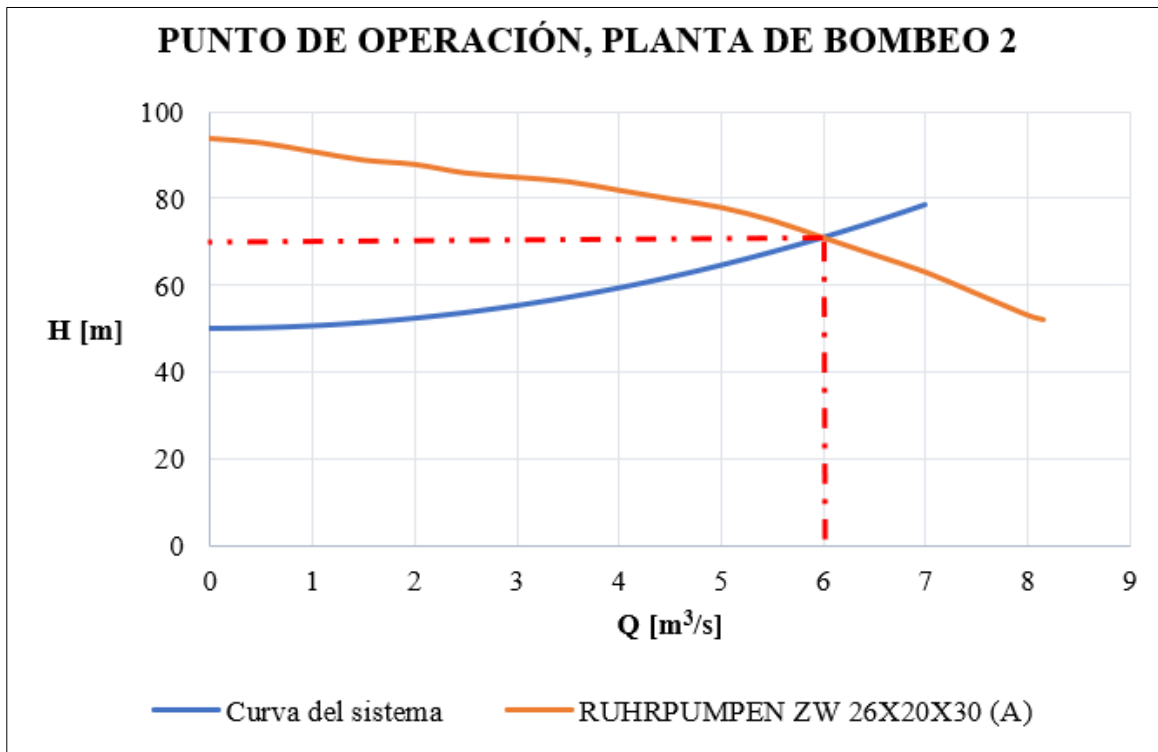
Carga de bombeo	$H_B = 71.13\text{m}$
Gasto	$Q_u = 1.2\text{ m}^3/\text{s}$
Velocidad de giro	$N = 1180\text{ rpm}$
Número de pasos	1
Eficiencia de paso	84.72 %
Eficiencia de la bomba	84.72%
Gasto máximo	$Q_{\text{max}} = 1.63\text{ m}^3/\text{s}$
Relación Q_{max}/Q_u	1.36
Frecuencia de suministro del sitio (Hz)	60

Figura 4.12 Curvas característica de la bomba RUHRPUMPEN ZW 26X20X30 (A) para PB2



Fuente: Fabricante de equipos de bombeo RUHRPUMPEN

Figura 4.13 Punto de operación para la planta de bombeo 2



IV.3.4 PLANTA DE BOMBEO 3

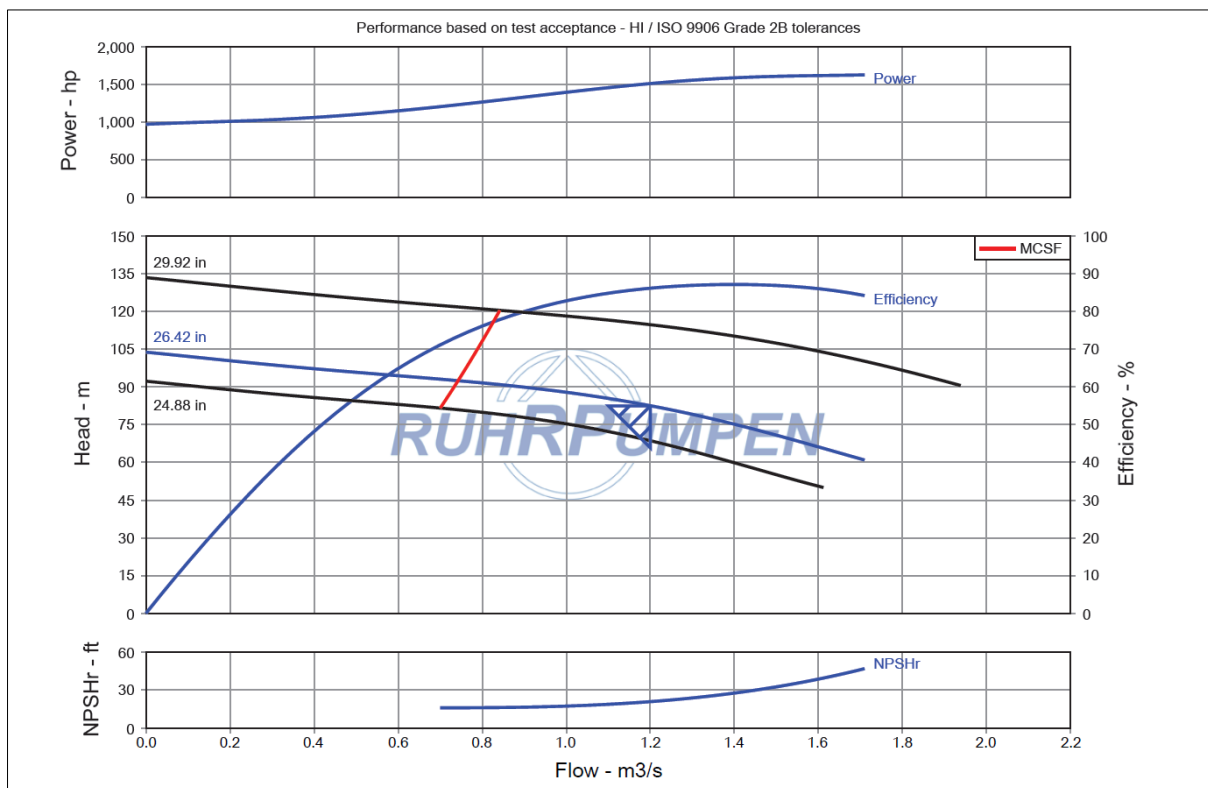
En la **figura 4.5** se presentó la curva del sistema para el tramo del tanque de sumergencia 3 al tanque de sumergencia 4, donde opera la planta de bombeo 3. De acuerdo con la figura mencionada, para la selección adecuada de los equipos de bombeo en esta planta, es necesario cumplir con dos condiciones: el gasto total en el sistema debe ser $Q = 6.00 \text{ m}^3/\text{s}$ y la carga de bombeo debe ser $H_B = 82.45 \text{ m}$.

El modelo de equipo seleccionado para esta estación de bombeo es del fabricante RUHRPUMPEN modelo 26X20X30 (A). Las características de este equipo se detallan en la **tabla 4.5**, y en la **figura 4.14** se muestra la curva característica correspondiente. En la **figura 4.15** se puede observar la construcción de la curva equivalente con el funcionamiento de 5 equipos de bombeo y, a su vez, la curva del sistema correspondiente. El punto de intersección de estas dos curvas, ubicado en la intersección de las líneas punteadas en color rojo, corresponde al punto de operación. Cabe destacar que el gasto unitario correspondiente a cada bomba es de $Q_u = 1.2 \text{ m}^3/\text{s}$.

Tabla 4.5 Características de la bomba RUHRPUMPEN ZW 26X20X30 (A) para PB3

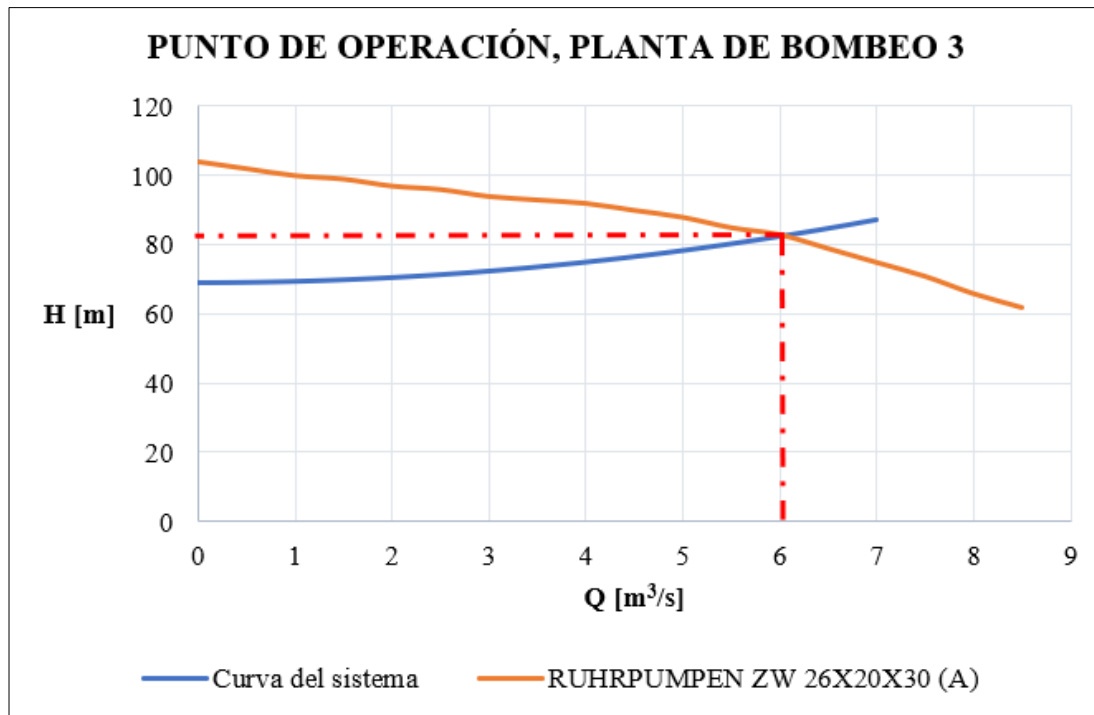
Carga de bombeo	$H_B = 82.45 \text{ m}$
Gasto	$Q_u = 1.2 \text{ m}^3/\text{s}$
Velocidad de giro	$N = 1180 \text{ rpm}$
Número de pasos	1180
Eficiencia de paso	86.17 %
Eficiencia de la bomba	86.17 %
Gasto máximo	$Q_{\max} = 1.70 \text{ m}^3/\text{s}$
Relación Q_{\max}/Q_u	1.42
Frecuencia de suministro del sitio (Hz)	60

Figura 4.14 Curva característica de la bomba RUHRPUMPEN ZW 26X20X30 (A) para PB3



Fuente: Fabricante de equipos de bombeo RUHRPUMPEN

Figura 4.15 Punto de operación para la planta de bombeo 3



IV.3.5 PLANTA DE BOMBEO 4

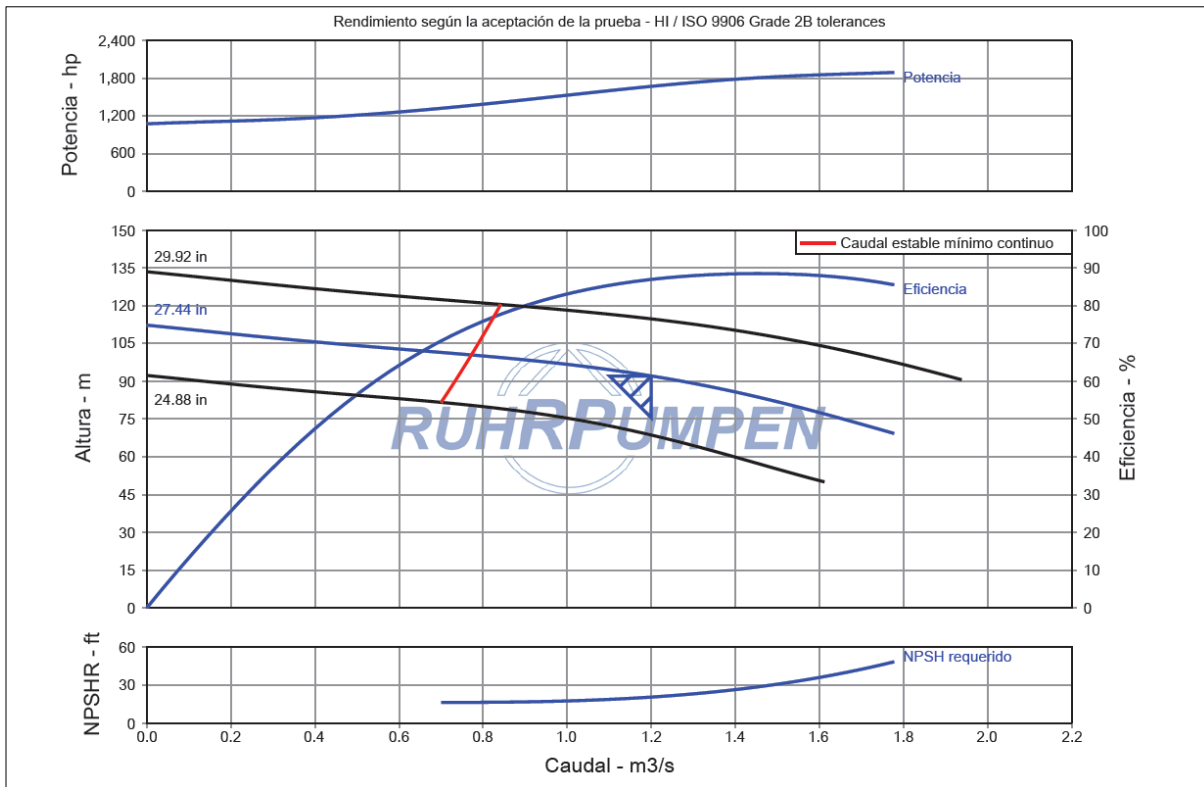
En la *figura 4.6* se presentó la curva del sistema para el tramo del tanque de sumergencia 4 al tanque de aguas crudas, donde opera la planta de bombeo 4. De acuerdo con la figura mencionada, para la selección adecuada de los equipos de bombeo en esta planta, es necesario cumplir con dos condiciones: el gasto total en el sistema debe ser $Q = 6.00 \text{ m}^3/\text{s}$ y la carga de bombeo debe ser $H_B = 92.05 \text{ m}$.

El modelo de equipo seleccionado para esta estación de bombeo es del fabricante RUHRPUMPEN modelo 26X20X30 (A). Las características de este equipo se detallan en la *tabla 4.6*, y en la *figura 4.16* se muestra la curva característica correspondiente. En la *figura 4.17* se puede observar la construcción de la curva equivalente con el funcionamiento de 5 equipos de bombeo y, a su vez, la curva del sistema correspondiente. El punto de intersección de estas dos curvas, ubicado en la intersección de las líneas punteadas en color rojo, corresponde al punto de operación. Cabe destacar que el gasto unitario correspondiente a cada bomba es de $Q_u = 1.2 \text{ m}^3/\text{s}$.

Tabla 4.6 Características de la bomba RUHRPUMPEN ZW 26X20X30 (A) para PB4

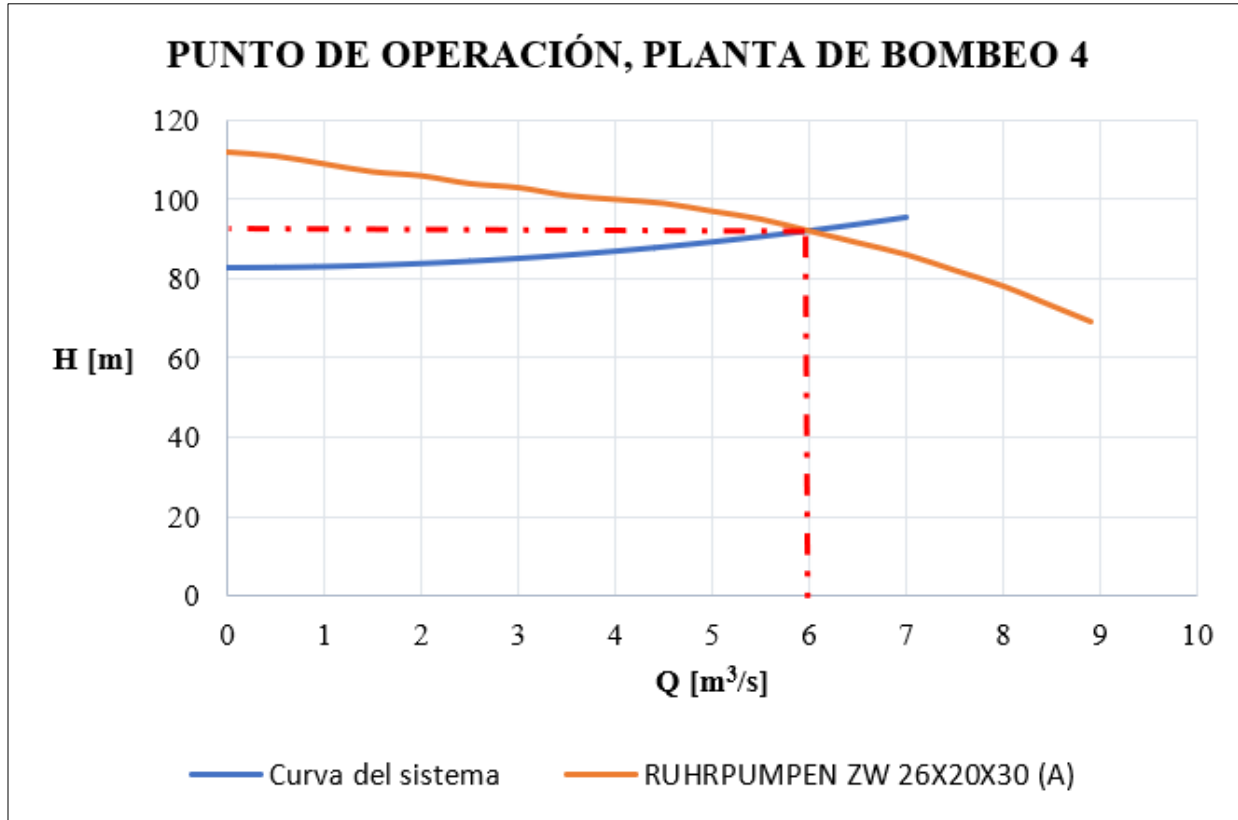
Carga de bombeo	$H_B = 92.05 \text{ m}$
Gasto	$Q = 1.2 \text{ m}^3/\text{s}$
Velocidad de giro	$N = 1180 \text{ rpm}$
Etapas	1
Eficiencia de paso	86.95 %
Eficiencia de la bomba	86.95 %
Gasto máximo	$Q_{\max} = 1.78 \text{ m}^3/\text{s}$
Relación Q_{\max}/Q	1.48
Frecuencia de suministro del sitio (Hz)	60

Figura 4.16 Curva característica de la bomba RUHRPUMPEN ZW 26X20X30 (A) para PB4



Fuente: Fabricante de equipos de bombeo RUHRPUMPEN

Figura 4.17 Punto de operación para la planta de bombeo 4



IV.4 REVISIÓN DE LAS BOMBAS POR CAVITACIÓN

Para garantizar un funcionamiento adecuado y seguro de las bombas, es necesario el cálculo del factor de cavitación con el que opera cada equipo de bombeo, en función de la estación donde se encuentre. Las plantas de bombeo poseen diferentes características que son relevantes en la determinación de este factor. Uno de los elementos que afecta el valor del factor de cavitación es el tirante de cada tanque de sumergencia. Los tanques de sumergencia se ubican en una elevación mayor que la estación de bombeo que alimentan, lo cual implica que todas las plantas se encuentren configurados en carga, como se mencionó en la *sección II.7*.

En la *tabla 4.7* se muestran los valores de cada uno de los términos que son necesarios para obtener el factor de cavitación. Es importante mencionar que en la planta de bombeo 0 se tienen equipos de eje vertical, lo cual implica que para el nivel de succión se deba considerar de forma práctica 5.0 m por debajo del nivel de piso de la planta de bombeo. Este término se involucra en la obtención de la diferencia de niveles entre el tanque de suministro y la succión de la bomba (Δ_Z). Para la planta de bombeo 1 a la 4, se tienen equipos de eje horizontal los cuales son del mismo modelo, considerando que esto puede permitir un mejor control en el mantenimiento de las bombas.

En la *sección IV.3* se presentaron las curvas características de los equipos de bombeo, donde también se aprecian las curvas de la carga de succión positiva neta requerida según el fabricante.

En la **tabla 4.7** se muestran los términos involucrados que se consideran para el cálculo del factor de cavitación. En el caso de la planta de bombeo 0 se realizó la revisión para las diferentes condiciones del nivel del agua que se pueden presentar en la presa El Cuchillo, desde la situación más favorable cuando el nivel en la presa es el máximo hasta la condición menos favorable cuando el nivel de la presa es el mínimo. Para las demás estaciones de bombeo, se consideró el análisis únicamente para los niveles medios de los tanques de sumergencia que alimentan a cada planta de bombeo correspondiente.

Para un gasto de 1.2 m³/s bombeado por cada equipo, se observa que en todos los casos estos trabajan con un factor de seguridad mayor que 1. Donde cada uno de los elementos a los que se hace referencia su elevación son:

- PEC: Presa El Cuchillo
- PB: Planta de bombeo
- TS: Tanque de sumergencia

Tabla 4.7 Cálculo del factor de cavitación f_{cav}

Planta de bombeo		Elevación (msnm)	Δz (m)	$\frac{P_{atm}}{\gamma}$ (m)	h_{rsuc} (m)	$\frac{P_{vap}}{\gamma}$ (m)	$NPSH_{DISP}$ (m)	$NPSH_{fabricate}$ (m)	f_{cav}
PBO (Nivel máximo en la presa)	PEC	161.50	15.50	10.15	0.51	0.24	24.90	8.77	2.84
	PB0	151.00							
PBO (Nivel medio en la presa)	PEC	156.55	10.55	10.15	0.51	0.24	19.55	8.77	2.27
	PB0	151.00							
PBO (Nivel mínimo en la presa)	PEC	151.50	5.50	10.15	0.51	0.24	14.90	8.77	1.70
	PB0	151.00							
PB1	TS1	215.39	19.89	10.09	0.50	0.24	29.24	6.52	4.48
	PB1	195.50							
PB2	TS2	275.30	36.30	10.04	0.85	0.24	45.25	6.67	6.78
	PB2	239.00							
PB3	TS3	325.35	28.35	9.97	0.48	0.24	37.60	6.39	5.88
	PB3	297.00							
PB4	TS4	394.33	17.33	9.88	0.12	0.24	26.84	6.20	4.33
	PB4	377.00							

V ANÁLISIS HIDRÁULICOS

En esta sección se presentan los análisis hidráulicos realizados con ayuda del software EPANET. Este programa permite realizar análisis en flujo permanente, utilizando los fundamentos teóricos presentados en el *capítulo II*. EPANET permite realizar simulaciones del comportamiento del sistema de bombeo a lo largo del tiempo, implementar válvulas y variar la velocidad de giro de los equipos de bombeo.

Los análisis hidráulicos se llevaron a cabo considerando tres propuestas:

- Maniobras de paro y arranque de los equipos de bombeo
- Implementación de válvulas de paso anular
- Variación de la velocidad de giro de los equipos de bombeo

A continuación, se presentan los resultados obtenidos mediante estas alternativas para el funcionamiento del sistema, teniendo en cuenta las diferentes condiciones en las que puede funcionar el sistema de bombeo. El objetivo del funcionamiento buscado es asegurar que durante el periodo de la simulación, en todos los tanques de sumergencia, no se presenten condiciones de vaciado o derrame, considerando los diferentes niveles en los que puede operar la presa y del número equipos de bombeo funcionando en cada planta.

V.1 MANIOBRAS DE PARO Y ARRANQUE DE EQUIPOS DE BOMBEO

Como se mencionó en la *sección III.1*, el acueducto tiene una longitud total de aproximadamente 88.0 kilómetros y posee una carga estática de alrededor de 320.0 metros. Debido a esta longitud y carga estática, se necesitó el diseño de varias plantas de bombeo para garantizar un mejor control del sistema y evitar que las tuberías trabajen con presiones muy altas.

La implementación de varias plantas de bombeo conlleva a la instalación de tanques de sumergencia en cada una de las estaciones. Estos tanques permiten que la línea de descarga de una estación de bombeo no esté directamente conectada con la línea de succión de la estación siguiente.

Además, otra ventaja proporcionada por la instalación de los tanques de sumergencia es la capacidad de regulación. Esta capacidad está determinada por el gasto bombeado y del número de equipos en funcionamiento en cada planta de bombeo. Estos factores determinan el tiempo de respuesta para las maniobras de paro y arranque de las bombas en las estaciones.

En esta sección se presentan los análisis hidráulicos realizados efectuando maniobras de paro y arranque de los equipos de bombeo. Los valores iniciales ingresados a EPANET son los referentes al nivel medio de la presa, para los tanques de sumergencia los niveles iniciales se situaron a la mitad del tirante de cada uno. El objetivo de la realización de este análisis es lograr mantener un nivel aceptable en los tanques de sumergencia, por lo cual se debe evitar el vaciado de todos los tanques mantenido un tirante mínimo de 0.5 m por encima del nivel del piso y para evitar el derrame conservando el nivel de todos los tanques de sumergencia 0.5 m por debajo de su nivel de corona.

En la *tabla 5.1* se presentan, en orden de izquierda a derecha, los niveles mínimo y máximo, con respecto al piso en los cuales se permiten las fluctuaciones del nivel del agua en los tanques de sumergencia. En la

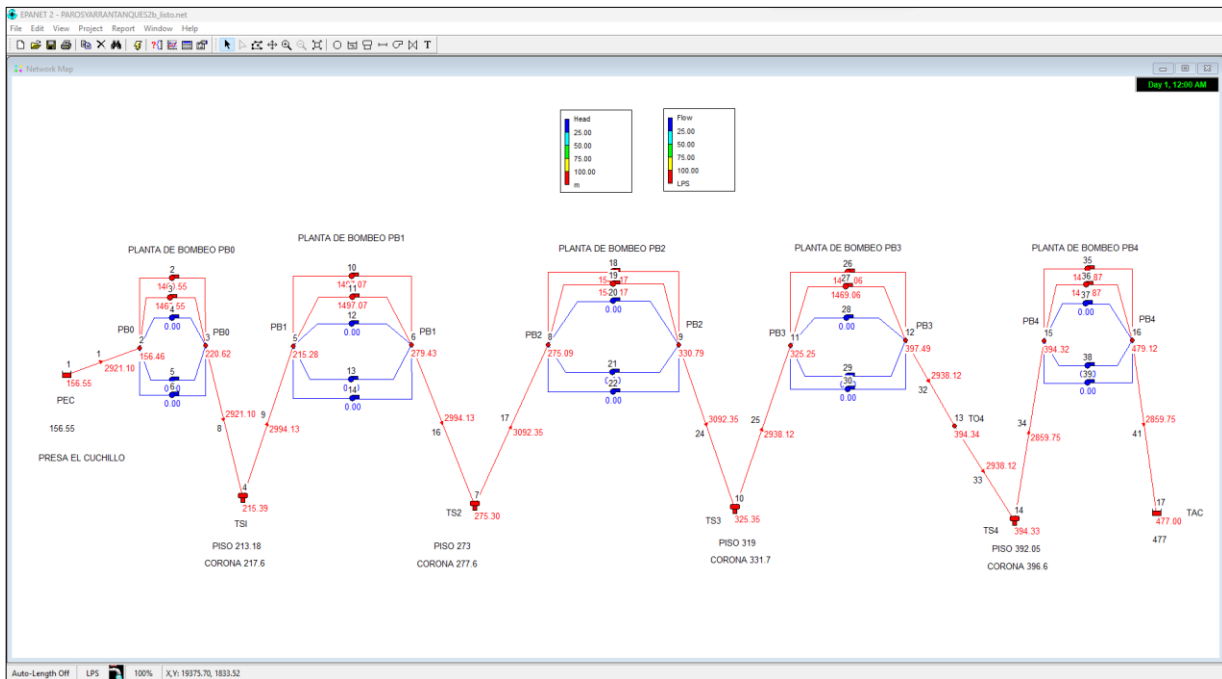
cuarta y quinta columna se muestran las alturas piezométricas correspondientes a los niveles mencionados, tomando como siempre el nivel del mar como referencia.

Tabla 5.1 Niveles aceptados en los tanques de sumergencia para las simulaciones

	Nivel mínimo con respecto al piso (m)	Nivel máximo con respecto al piso (m)	Carga mínima (msnm)	Carga máxima (msnm)
Tanque de sumergencia 1	0.50	2.92	213.68	217.10
Tanque de sumergencia 2	0.50	3.10	273.50	277.10
Tanque de sumergencia 3	0.50	11.20	319.50	331.20
Tanque de sumergencia 4	0.50	3.05	392.55	396.10

A partir de estas condiciones, se procedió a ingresar los niveles mencionados en EPANET y realizar la simulación con una duración de 168 horas (1 semana). Es importante destacar que los cálculos hidráulicos se llevaron a cabo minuto a minuto para observar detalladamente los cambios en los niveles de los tanques de sumergencia. La interfaz del programa EPANET y la construcción del modelo se pueden observar en la *figura 5.1*.

Figura 5.1 Interfaz de EPANET y modelo del sistema de bombeo



Para la construcción del modelo en EPANET, la presa El Cuchillo se simuló como un “Reservoir”, caracterizado por mantener un nivel de agua constante, lo que equivale a considerarlo una fuente infinita. Por otro lado, los tanques de sumergencia se modelaron como “Tank”, donde se especifica un nivel inicial de agua que se encuentre entre el nivel del piso y la corona.

Se considera el nivel medio de la presa como condición inicial en el modelo. Esto se hace con el objetivo de observar el comportamiento del sistema bajo el cual se realizó la curva del sistema para cada tramo de análisis. La **tabla 5.2** presenta los resultados obtenidos para una condición específica, Esta condición implica el nivel medio en la presa El Cuchillo (156.55 msnm) con la operación inicial de dos equipos de bombeo en todas las plantas. Esto se basa en que, para las operaciones de 5, 4 y 3 equipos de bombeo funcionando inicialmente, los valores permanecen dentro de los límites establecidos para los niveles de los tanques de sumergencia indicados en la **tabla 5.1**, esto implica que no se realizan maniobras en estas condiciones.

Para la construcción de la **tabla 5.2**, se observó la presencia de niveles fuera de los límites aceptables en todos los tanques de sumergencia. Cuando esto ocurría, se examinaba la condición un minuto antes de este evento. Se determinaba el instante del tiempo, se revisaban los niveles en los tanques de sumergencia y se consideraban como las condiciones iniciales para la siguiente simulación. Luego se procedía a realizar la maniobra adecuada y continuar con el proceso. La metodología empleada consistió en apagar un equipo en la planta de bombeo 3 (PB3) alimentada por el tanque de sumergencia 3 (TS3) en riesgo de vaciarse. En caso de derrame del tanque de sumergencia 3 (TS3), se procedía encender el equipo de bombeo previamente apagado. Estas acciones se repetían a lo largo del tiempo de la simulación, como se muestra en la **tabla 5.2**. La tabla muestra el tiempo durante la simulación en el cual se realiza la maniobra necesaria de acuerdo con los niveles en los tanques de sumergencia, así como el tiempo transcurrido entre una maniobra y otra.

Tabla 5.2 Maniobras de paro y arranque con dos equipos de bombeo en cada planta para el nivel medio (156.55 msnm) de la presa El Cuchillo

Condición inicial: 2 bombas funcionando en cada planta de bombeo						
Tiempo (hora: minuto)	Altura piezométrica en el tanque de sumergencia (msnm)				Maniobra	Tiempo entre maniobras (hora: minuto)
	TS1	TS2	TS3	TS4		
00:00	215.39	275.30	325.35	394.33		
27:19	213.76	274.24	327.58	396.09	APAGAR 1 EQUIPO EN PB3	27:19
29:14	213.73	274.40	331.19	392.63	ENCENDER 1 EQUIPO EN PB3	1:54
41:50	213.80	274.82	328.54	396.09	APAGAR 1 EQUIPO EN PB3	12:35

Continua

Tiempo (hora: minuto)	Altura piezométrica en el tanque de sumergencia (m)				Maniobra	Tiempo entre maniobras (hora: minuto)
43:14	213.81	274.89	331.19	393.52	ENCENDER 1 EQUIPO EN PB3	1:23
52:43	213.94	275.14	329.04	396.09	APAGAR 1 EQUIPO EN PB3	9:28
53:51	213.95	275.19	331.19	393.99	ENCENDER 1 EQUIPO EN PB3	1:07
61:42	214.06	275.36	329.36	396.09	APAGAR 1 EQUIPO EN PB3	7:50
62:39	214.07	275.39	331.17	394.31	ENCENDER 1 EQUIPO EN PB3	00:56
69:25	214.16	275.52	329.58	396.09	APAGAR 1 EQUIPO EN PB3	6:45
70:16	214.17	275.54	331.20	394.50	ENCENDER 1 EQUIPO EN PB3	0:50
76:20	214.24	275.64	329.76	396.09	APAGAR 1 EQUIPO EN PB3	6:03
77:05	214.25	275.66	331.19	394.68	ENCENDER 1 EQUIPO EN PB3	0:44
82:32	214.31	275.74	329.89	396.09	APAGAR 1 EQUIPO EN PB3	5:26
83:13	214.32	275.75	331.19	394.80	ENCENDER 1 EQUIPO EN PB3	00:40
88:14	214.37	275.82	329.99	396.09	APAGAR 1 EQUIPO EN PB3	5:00
88:51	214.38	275.83	331.17	394.92	ENCENDER 1 EQUIPO EN PB3	00:36
93:27	214.42	275.88	330.08	396.09	APAGAR 1 EQUIPO EN PB3	4:35
94:02	214.42	275.89	331.19	394.99	ENCENDER 1 EQUIPO EN PB3	00:34
98:22	214.46	275.94	330.15	396.09	APAGAR 1 EQUIPO EN PB3	4:19
98:54	214.46	275.95	331.17	395.08	ENCENDER 1 EQUIPO EN PB3	00:31
102:55	214.49	275.98	330.21	396.09	APAGAR 1 EQUIPO EN PB3	04:00
103:25	214.49	275.99	331.17	395.14	ENCENDER 1 EQUIPO EN PB3	00:29
107:13	214.52	276.02	330.27	396.09	APAGAR 1 EQUIPO EN PB3	03:47
107:42	214.52	276.03	331.19	395.17	ENCENDER 1 EQUIPO EN PB3	00:28

Continúa

Tiempo (hora: minuto)	Altura piezométrica en el tanque de sumergencia (m)				Maniobra	Tiempo entre maniobras (hora: minuto)
111:23	214.55	276.06	330.31	396.09	APAGAR 1 EQUIPO EN PB3	03:40
111:50	214.55	276.06	331.17	395.23	ENCENDER 1 EQUIPO EN PB3	00:26
115:18	214.57	276.08	330.35	396.09	APAGAR 1 EQUIPO EN PB3	03:27
115:44	214.57	276.08	331.18	395.27	ENCENDER 1 EQUIPO EN PB3	00:25
119:03	214.59	276.10	330.39	396.09	APAGAR 1 EQUIPO EN PB3	03:18
119:28	214.59	276.10	331.19	395.30	ENCENDER 1 EQUIPO EN PB3	00:24
122:40	214.61	276.12	330.42	396.09	APAGAR 1 EQUIPO EN PB3	03:11
123:04	214.61	276.12	331.19	395.33	ENCENDER 1 EQUIPO EN PB3	00:23
126:09	214.62	276.14	330.45	396.09	APAGAR 1 EQUIPO EN PB3	03:04
126:32	214.62	276.14	331.18	395.36	ENCENDER 1 EQUIPO EN PB3	00:22
129:31	214.63	276.16	330.47	396.09	APAGAR 1 EQUIPO EN PB3	2:58
129:53	214.63	276.16	331.17	395.39	ENCENDER 1 EQUIPO EN PB3	00:21
132:45	214.64	276.18	330.49	396.09	APAGAR 1 EQUIPO EN PB3	2:51
133:07	214.64	276.18	331.19	395.39	ENCENDER 1 EQUIPO EN PB3	00:21
135:58	214.65	276.19	330.51	396.09	APAGAR 1 EQUIPO EN PB3	2:50
136:19	214.65	276.19	331.18	395.42	ENCENDER 1 EQUIPO EN PB3	00:20
139:04	214.66	276.20	330.52	396.09	APAGAR 1 EQUIPO EN PB3	02:44
139:25	214.66	276.20	331.19	395.42	ENCENDER 1 EQUIPO EN PB3	00:20
142:09	214.67	276.21	330.54	396.09	APAGAR 1 EQUIPO EN PB3	02:43
142:29	214.67	276.21	331.18	395.45	ENCENDER 1 EQUIPO EN PB3	00:19
145:07	214.68	276.22	330.55	396.09	APAGAR 1 EQUIPO EN PB3	02:37

Continúa

Tiempo (hora: minuto)	Altura piezométrica en el tanque de sumergencia (m)				Maniobra	Tiempo entre maniobras (hora: minuto)
145:27	214.68	276.22	331.19	395.45	ENCENDER 1 EQUIPO EN PB3	00:19
148:05	214.69	276.23	330.56	396.09	APAGAR 1 EQUIPO EN PB3	02:37
148:24	214.69	276.23	331.17	395.48	ENCENDER 1 EQUIPO EN PB3	00:18
150:55	214.70	276.24	330.57	396.09	APAGAR 1 EQUIPO EN PB3	2:30
151:14	214.70	276.24	331.18	395.48	ENCENDER 1 EQUIPO EN PB3	00:18
153:45	214.71	276.25	330.58	396.09	APAGAR 1 EQUIPO EN PB3	2:30
154:04	214.71	276.25	331.19	395.48	ENCENDER 1 EQUIPO EN PB3	00:18
156:35	214.72	276.26	330.59	396.09	APAGAR 1 EQUIPO EN PB3	02:30
156:53	214.72	276.26	331.17	395.52	ENCENDER 1 EQUIPO EN PB3	00:17
159:15	214.72	276.27	330.61	396.09	APAGAR 1 EQUIPO EN PB3	02:21
159:33	214.72	276.27	331.18	395.52	ENCENDER 1 EQUIPO EN PB3	00:17
161:55	214.73	276.28	330.62	396.09	APAGAR 1 EQUIPO EN PB3	02:21
162:13	214.73	276.28	331.19	395.52	ENCENDER 1 EQUIPO EN PB3	00:17
164:34	214.73	276.29	330.63	396.09	APAGAR 1 EQUIPO EN PB3	02:20
164:51	214.73	276.29	331.17	395.55	ENCENDER 1 EQUIPO EN PB3	00:16
167:06	214.74	276.30	330.64	396.09	APAGAR 1 EQUIPO EN PB3	02:14
167:23	214.74	276.30	331.18	395.55	ENCENDER 1 EQUIPO EN PB3	00:16
168:00	214.74	276.31	331.01	395.72		

La simulación reveló que el tanque de sumergencia 3 (TS3), que alimenta los equipos en la planta de bombeo 3 (PB3), requirió intervención desde la primera maniobra. En 27 horas con 19 minutos de la simulación, se debió apagar un equipo de bombeo en la planta de bombeo 3 porque el tanque de sumergencia 3 estaba en riesgo de vaciarse. Esto implicaba la necesidad de reducir el gasto que salía del tanque de sumergencia 3 para compensar el nivel en ese tanque, lo que llevó a la planta de bombeo 3 a trabajar durante 1 hora con 54 minutos con un solo equipo de bombeo.

Durante el tiempo de simulación de 29 horas con 14 minutos, se llevó a cabo la segunda maniobra que consistía en encender 1 equipo de bombeo en la planta de bombeo 3. Con esto, la planta de bombeo 3 operaba con 2 equipos de bombeo, una medida tomada debido al riesgo de derrame en el tanque de sumergencia 3. Esta situación requería bombear un gasto mayor para evitar el posible desbordamiento del tanque. Estas acciones se repetían de forma cíclica, aunque los intervalos entre ellas no mostraban una tendencia definida. Es evidente, que a pesar de su mayor tirante de 12.70 metros, el tanque de sumergencia 3 jugaba un papel crítico en la operación del acueducto, ya que requería constantes intervenciones. Por esta razón, los equipos de la planta de bombeo 3 fueron los manipulados a lo largo de toda la simulación.

Los resultados de la **tabla 5.2** revelan que los intervalos entre las maniobras disminuyen progresivamente a lo largo de la simulación, lo que indica que estas se vuelven cada vez más frecuentes. Este patrón sugiere que no se logra alcanzar una estabilidad en los tiempos transcurridos entre las acciones, lo que conduce a un número excesivo de maniobras a lo largo de la simulación. Para abordar esta situación, se realizaron los ajustes en la planta de bombeo 3, ya que se identificó como la estación crítica para el funcionamiento del sistema de bombeo. Intervenir en otras plantas de bombeo habría implicado realizar un gran número de permutaciones en las maniobras, lo que resultaría poco práctico.

En relación con el caudal que llega al tanque de aguas crudas de San Roque, este varía según el número de equipos en operación en la planta de bombeo 3 después de la maniobra realizada. La **tabla 5.3** muestra los gastos suministrados al tanque de aguas crudas en función de las condiciones iniciales correspondientes a la **tabla 5.2**. Se calculó que cuando operan dos equipos en la planta de bombeo 3, el gasto promedio es de 2 923.39 l/s, mientras que con solo un equipo en funcionamiento, el caudal promedio es de 2862.15 l/s. A partir de estos datos, se obtiene un caudal promedio de 2 892.77 l/s para el tiempo de simulación mostrado. Estos promedios se calcularon con los datos disponibles hasta el tiempo de simulación de 103 horas y 24 minutos, momento en el cual el intervalo entre una maniobra y otra fue ligeramente inferior a 30 minutos.

Tabla 5.3 Gasto que llega al tanque de aguas crudas para la operación de 2 equipos de bombeo en cada planta como condición inicial

Tiempo de simulación (horas: minutos)	Bombas funcionando en la planta de bombeo 3	Gasto (l/s)
27:18	2	2859.75
29:13	1	2776.41
41:49	2	2941.83
43:13	1	2802.82
52:42	2	2821.99
53:50	1	2845.11
61:41	2	2941.74
62:38	1	2860.41
69:24	2	2941.72

Continúa

Tiempo de simulación (horas: minutos)	Bombas funcionando en la planta de bombeo 3	Gasto (l/s)
70:15	1	2868.90
76:19	2	2941.74
77:04	1	2877.40
82:31	2	2941.77
83:12	1	2883.11
88:13	2	2941.71
88:50	1	2882.82
93:26	2	2941.67
94:01	1	2891.72
98:21	2	2941.70
98:53	1	2896.03
102:54	2	2941.65
103:24	1	2898.93

La condición evaluada en la **tabla 5.2** se basa en el nivel medio de la presa El Cuchillo, sin embargo, los resultados obtenidos no son satisfactorios. Es importante destacar que cuando el nivel en la presa sea inferior al nivel medio, el comportamiento del sistema será diferente, lo que probablemente genere una mayor inestabilidad en los intervalos entre maniobras. Los cambios en el nivel de la presa afectarán el valor de la carga estática, lo que su vez modificará la ecuación que define la curva del sistema. Esto se debe a que el acueducto analizado es una combinación de sistemas en serie y en paralelo.

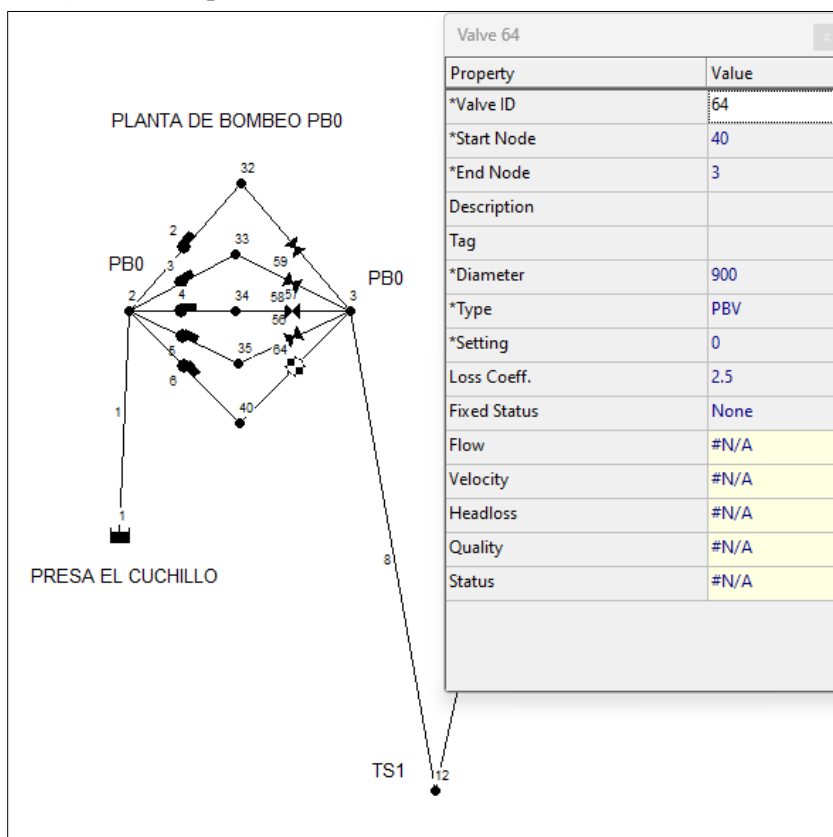
Además, cualquier modificación en las condiciones iniciales de operación de la planta de bombeo 1 tendrá un impacto en el comportamiento de las demás plantas de bombeo subsecuentes. Es fundamental considerar que, aunque se mantenga un nivel medio en la presa durante un tiempo determinado, la disponibilidad de agua debe ser un factor primordial para tener en cuenta. Como se mencionó en el **capítulo I**, la región donde se localiza la presa experimenta una precipitación muy escasa, lo que dificulta enormemente mantener los niveles adecuados en la presa. Estas condiciones adversas hacen que el funcionamiento del sistema de bombeo sea complejo.

Lo anterior indica que las maniobras de paros y arranques no son una opción práctica, ya que de llevar a cabo estas acciones se pueden ocasionar daños a los componentes de los equipos de bombeo. Además, los resultados obtenidos no son satisfactorios cuando se opera con un solo equipo de bombeo en cada estación como condición inicial aun para el nivel medio de la presa. Por estas razones, se considera necesario estudiar el funcionamiento del sistema de bombeo utilizando las alternativas como el empleo de válvulas de paso anular y la variación de la velocidad de giro de los equipos de bombeo.

V.2 ESTRANGULAMIENTO DE VÁLVULAS

El segundo planteamiento para analizar el funcionamiento del acueducto es mediante la utilización de las válvulas de paso anular. Estas válvulas se integran en el modelo de EPANET después de la descarga de cada una de las bombas. Estos componentes permiten ajustar el gasto bombeado en cada estación, con el propósito de mantener los niveles en los tanques de sumergencia dentro de los límites establecidos en la *tabla 5.1*. En la *figura 5.2* se puede apreciar la implementación de las válvulas en el modelo de EPANET, junto con el cuadro de diálogo para ingresar las características de las válvulas a simular, donde se requiere ingresar el diámetro de la válvula, el tipo y el coeficiente de pérdida para realizar los análisis correspondientes.

Figura 5.2 Implementación de válvulas en el modelo de EPANET



Las válvulas utilizadas en las simulaciones del modelo de EPANET son del tipo PBV (pressure breaker valve, en español válvula de rotura de carga), caracterizadas por mantener una caída de presión constante. Para regular los niveles de agua en los tanques de sumergencia, se introduce un coeficiente de pérdida de carga que varía en función del gasto o carga que se desee disminuir. Este coeficiente se relaciona con el porcentaje de apertura de la válvula según una curva específica denominada “coeficiente de pérdida – porcentaje de apertura”, suministrada por el fabricante. La curva generalmente representa el porcentaje de apertura en el eje de las abscisas, utilizando una escala aritmética, mientras que en el eje de las ordenadas se

muestra el coeficiente de pérdida de carga utilizando una escala logarítmica. Esto implica que la variación en el coeficiente de pérdida no guarda una relación directamente proporcional con el porcentaje de apertura de la válvula.

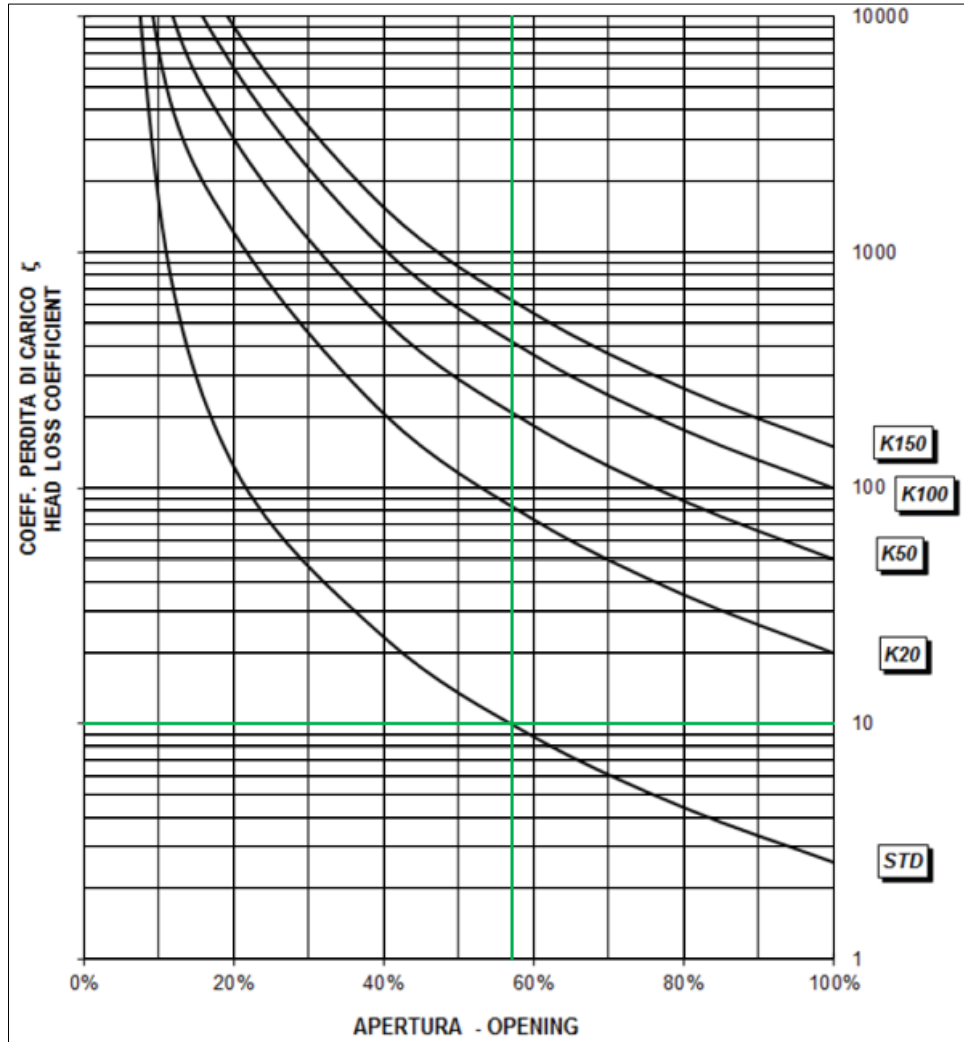
En este trabajo, se utilizan las válvulas del fabricante Saint – Gobain, modelo VÁLVULA ANULAR NGL – VERSIÓN ESTANDAR, con un diámetro nominal de 900 mm. La ficha técnica de esta válvula está disponible en la página web del fabricante. En la *figura 5.3* se muestra la curva de esta válvula, donde se puede determinar el porcentaje de apertura necesario para un determinado coeficiente de pérdida trazando una línea horizontal desde el valor de pérdida de carga en el eje vertical hasta la curva STD (estándar), y luego una línea vertical desde el punto de intersección hasta el eje horizontal, donde se lee el porcentaje de apertura correspondiente. En la figura se ilustra un ejemplo donde, para lograr un coeficiente de pérdida de 10, se requiere un porcentaje de apertura del 57%.

Durante la realización de los análisis hidráulicos asociados a esta alternativa, se observó el comportamiento de los niveles en cada uno de los tanques de sumergencia. En caso de que se detectara derrame o vaciado en cualquiera de ellos, se introdujo en el modelo de EPANET un coeficiente de pérdida apropiado en las válvulas correspondientes. El objetivo era ajustar este coeficiente para mantener los niveles de agua dentro de los límites permitidos en los tanques.

Para observar el comportamiento de la altura piezométrica en los tanques de sumergencia mediante el programa EPANET, se utilizaron componentes denominados nudos o conexiones. Estos componentes no imponen un límite en el nivel en el que se puede encontrar la altura piezométrica, lo que permite identificar en que tanque de sumergencia es necesario realizar ajustes. Por consiguiente, se puede determinar el coeficiente de pérdida necesario para ingresar y así mantener los niveles de agua dentro de los límites requeridos.

Es importante señalar que, en caso de necesitar el uso de válvulas, estas debían de operar en todos los equipos de bombeo de acuerdo con las condiciones iniciales de la simulación y con el mismo coeficiente de pérdida de carga para todas las válvulas en operación en la estación de bombeo correspondiente.

Figura 5.3 Curva: % de apertura – coeficiente de pérdida de la válvula de flujo anular NGL – versión estándar de 900 mm de diámetro nominal, del fabricante SAINT - GOBAIN



En la **tabla 5.4** se presentan los resultados de los análisis efectuados para los tres niveles de operación de la presa El Cuchillo. De acuerdo con lo mencionado en la **sección V.1**, mediante la realización de las maniobras de paros y arranques, la operatividad del sistema de bombeo bajo el nivel medio de la presa (156.55 msnm) exhibía resultados satisfactorios en cuanto a los niveles de agua en los tanques de sumergencia. Esta condición se cumplía con la operación de inicial de 5, 4 y 3 bombas en cada planta de bombeo. Sin embargo, para la implementación de las válvulas, es necesario la instalación de estas en todas las bombas de cada planta, según los requisitos para el funcionamiento óptimo bajo los niveles máximo y mínimo de la presa. Por consiguiente, se debe tener en cuenta el coeficiente de pérdida de carga correspondiente, incluso cuando la válvula está completamente abierta (con un porcentaje de apertura del 100%), siendo este valor de 2.5 según la curva correspondiente mostrada en la **figura 5.3**.

En la **tabla 5.4** se muestran los análisis realizados para los niveles máximo, medio y mínimo de la presa, considerados en este trabajo. De izquierda a derecha, en la cuarta columna se muestra el porcentaje de apertura de la válvula correspondiente. La sexta columna presenta el porcentaje de pérdida de carga existente, comparando el valor de la carga proporcionada por la bomba medida en la brida de descarga y el valor en la descarga de la válvula de paso anular. Se observa que el valor máximo de diferencia en el porcentaje del valor de la carga antes y después de la válvula es del 6.60%, presentándose cuando la presa opera en su nivel máximo y con la operación de un equipo de bombeo en la planta de bombeo 0.

Tabla 5.4 Resultados de la operación del sistema de bombeo para diferentes condiciones realizando estrangulamiento en las válvulas de paso anular

Nivel de la presa El Cuchillo	Bombas funcionando	Planta de bombeo	Porcentaje de apertura de la válvula	Pérdida de carga (m)	% de pérdida de carga	Gasto (l/s)
Máximo (161.50 msnm)	5	0	40	4.20	4.57	6023.60
		1	100	0.46	0.47	
		2	100	0.46	0.43	
		3	100	0.46	0.41	
		4	100	0.45	0.40	
	4	0	44	3.84	4.46	5210.54
		1	100	0.54	0.57	
		2	100	0.53	0.51	
		3	100	0.54	0.50	
		4	100	0.54	0.49	
	3	0	51	3.18	3.99	4185.44
		1	76	1.23	1.36	
		2	100	0.61	0.61	
		3	66	1.72	1.61	
		4	100	0.61	0.57	
	2	0	44	4.74	6.26	2893.38
		1	52	3.16	3.60	
		2	70	1.58	1.62	
		3	44	4.74	4.45	
		4	100	0.66	0.63	
1	0	45	4.76	6.60	1491.96	
	1	52	3.36	3.92		
	2	57	2.81	2.92		
	3	42	5.61	5.32		
	4	100	0.70	0.68		

Continúa

Nivel de la presa El Cuchillo	Bombas funcionando	Planta de bombeo	Porcentaje de apertura de la válvula	Pérdida de carga (m)	% de pérdida de carga	Gasto (l/s)
Medio (156.55 msnm)	5	0	100	0.45	0.52	6006.33
		1	100	0.45	0.46	
		2	100	0.45	0.42	
		3	100	0.45	0.41	
		4	100	0.46	0.41	
	4	0	100	0.53	0.65	5189.57
		1	100	0.53	0.57	
		2	100	0.53	0.51	
		3	100	0.53	0.49	
		4	100	0.53	0.48	
	3	0	100	0.61	0.81	4178.36
		1	100	0.61	0.69	
		2	100	0.61	0.62	
		3	100	0.61	0.58	
		4	100	0.61	0.57	
	2	0	100	0.66	0.94	2903.47
		1	83	1.06	1.23	
		2	76	1.33	1.36	
		3	44	4.77	4.47	
		4	100	0.66	0.63	
1	0	100	0.70	1.04	1489.82	
	1	57	2.80	3.29		
	2	55	3.07	3.19		
	3	42	5.59	5.31		
	4	100	0.69	0.67		
Mínimo (151.50 msnm)	5	0	100	0.43	0.51	5839.52
		1	49	2.40	2.50	
		2	42	3.43	3.23	
		3	83	0.69	0.63	
		4	100	0.43	0.39	
	4	0	100	0.50	0.64	5041.32
		1	47	2.99	3.23	
		2	42	4.00	3.90	
		3	83	0.80	0.75	
		4	100	0.50	0.46	
	3	0	100	0.50	0.64	4051.75
		1	44	2.99	3.23	
		2	42	4.00	3.90	
		3	100	0.80	0.75	
		4	57	0.50	0.46	

Continúa

Nivel de la presa El Cuchillo	Bombas funcionando	Planta de bombeo	Porcentaje de apertura de la válvula	Pérdida de carga (m)	% de pérdida de carga	Gasto (l/s)
Mínimo (151.50 msnm)	2	0	100	0.62	0.90	2819.93
		1	44	4.50	5.17	
		2	44	4.51	4.62	
		3	51	3.26	3.10	
		4	57	2.50	2.35	
	1	0	100	0.67	1.03	1456.52
		1	42	5.34	6.31	
		2	42	5.34	5.63	
		3	49	3.74	3.63	
		4	70	1.60	1.54	

Se puede observar que, para el nivel máximo de la presa, la operación es posible con el funcionamiento de 5 hasta 1 equipo de bombeo por estación. Para esta condición el valor mínimo del porcentaje de apertura de las válvulas corresponde a 40% en PB0, cuando funcionan los 5 equipos de bombeo en la estación correspondiente. Los coeficientes de pérdida de carga ingresados a EPANET varían dependiendo de la planta de bombeo donde se encuentre la válvula, con valores que van desde 2.5 hasta 23.

El coeficiente de pérdida de 2.5 indica que la válvula está completamente abierta dentro del modelo (porcentaje de apertura del 100%), lo que implica una cierta pérdida de energía debido a su instalación como accesorio. Además, se presenta el porcentaje de pérdida de carga entre la descarga de la bomba y la descarga de la válvula. Este valor es importante destacar, porque el accionamiento de la válvula implica la disipación de energía suministrada al equipo de bombeo, transformada en potencia hidráulica, para lograr el control en los niveles de los tanques de sumergencia.

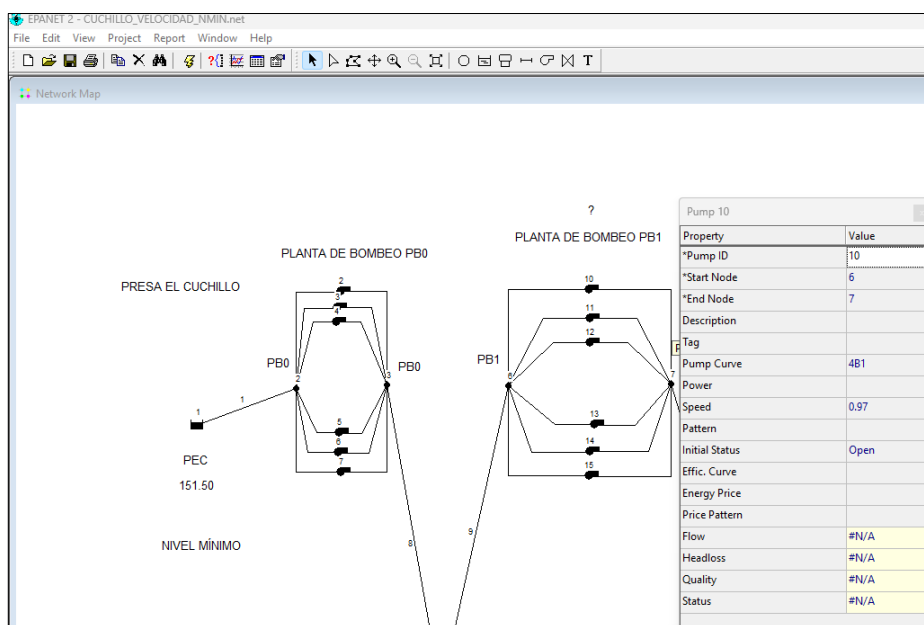
De los resultados obtenidos para el nivel medio de la presa, también se observa que la operación es adecuada para el funcionamiento de 5 hasta 1 equipo de bombeo trabajando simultáneamente por estación. En este caso, el funcionamiento de 5 hasta 3 equipos de bombeo no requiere el accionamiento de las válvulas, una situación similar a la alternativa de paros y arranques. Sin embargo, para el funcionamiento de 2 y 1 equipo de bombeo por estación, se hace necesario activar las válvulas en alguna de las plantas de bombeo. El mayor porcentaje de pérdida de carga para estas condiciones corresponde a 5.31%, se registra cuando opera solo 1 bomba en cada estación, específicamente en la planta de bombeo 3.

En cuanto al nivel mínimo de la presa, los resultados muestran que también es factible lograr el funcionamiento del sistema de bombeo. La operación puede llevarse a cabo con 5 hasta 1 equipo de bombeo por estación. Se observa que para esta condición se requiere activar las válvulas en más estaciones de bombeo y haciendo menor el porcentaje de apertura. El mayor porcentaje de pérdida de carga corresponde a 6.31%, se registra cuando opera solo 1 bomba en cada estación, específicamente en la planta de bombeo 1.

V.3 CONTROL DE LA VELOCIDAD DE GIRO DE LOS EQUIPOS DE BOMBEO

En la **sección II.5** se explicó que, a partir de la teoría de la similitud, es posible modificar el gasto o la carga suministrada por una bomba al variar la velocidad de giro del equipo. En este caso, EPANET facilita esta función mediante la introducción de una velocidad de giro relativa en el cuadro de diálogo correspondiente a las propiedades de la bomba, como se puede observar en la **figura 5.4**.

Figura 5.4 Cuadro de diálogo de las propiedades de la bomba en EPANET



La velocidad de giro relativa ingresada a EPANET para mantener los niveles en los tanques de sumergencia dentro de los límites establecidos de la **tabla 5.1** se determina a partir de la relación entre las velocidades de giro $\frac{N_1}{N_2}$, donde N_1 representa la nueva condición para lograr el nivel adecuado en los tanques de sumergencia y N_2 representa la velocidad de giro original del funcionamiento de la bomba. A partir de las simulaciones realizadas se observa que la velocidad de giro relativa necesaria para obtener resultados aceptables en todos los casos es menor que la unidad, lo que indica que la velocidad de giro requerida para el funcionamiento adecuado es menor que la establecida en las curvas características de las bombas.

En la **tabla 5.5** se muestran los resultados obtenidos al variar la velocidad de giro de los equipos de bombeo. Es relevante destacar que la modificación se llevó a cabo únicamente en un equipo de bombeo de la estación correspondiente donde se requiere la intervención. Además, se presenta el caudal que el sistema de bombeo es capaz de entregar a la planta potabilizadora de San Roque, en función de las diversas condiciones de funcionamiento.

Tabla 5.5 Variación de la velocidad de giro para las diferentes condiciones de funcionamiento del sistema de bombeo

Nivel de la presa	Bombas en operación	Estación de bombeo donde se modifica la velocidad de giro	Velocidad de giro relativa	Gasto (l/s)	
Nivel máximo (161.50 msnm)	5	PB0	0.93	6056.42	
	4	PB0	0.95	5246.12	
	3	PB0	0.97	4232.97	
	2	PB0	PB0	0.97	2920.37
			PB1	0.98	
			PB2	0.99	
			PB3	0.96	
	1	PB0	PB0	0.98	1499.43
			PB1	0.98	
			PB2	0.99	
PB3			0.98		
Nivel medio (156.55 msnm)	2	PB1	0.99	2940.80	
		PB3	0.98		
	1	PB1	0.98	1509.31	
		PB2	0.98		
Nivel mínimo (151.50 msnm)	5	PB1	0.97	5869.24	
		PB2	0.91		
	4	PB1	0.95	5063.58	
		PB2	0.91		
	3	PB1	0.95	4053.01	
		PB2	0.91		
	2	PB1	0.95	2830.08	
		PB2	0.91		
1	PB1	0.97	1454.79		
	PB2	0.94			

Para el nivel máximo de la presa, los resultados reflejan que es posible la operación del sistema de bombeo. Para esta condición, la variación de la velocidad de giro se lleva a cabo en PBO, PB1, PB2 y PB3. La mayor variación de la velocidad de giro se observa en PBO cuando funcionan 5 equipos por estación, con un valor de 0.93.

En el caso del nivel medio de la presa, la variación de la velocidad de giro se aplica para la operación de 1 y 2 equipos de bombeo por estación. En esta situación, la variación de la velocidad de giro se realiza en PB1, PB2 y PB3. La mayor variación de la velocidad de giro registrada es de 0.98. Para el funcionamiento de 5, 4 y 3 equipos de bombeo por estación, los resultados son idénticos a los presentados en las maniobras de paros y arranques. Esto se debe a que el motovariador no se considera un accesorio implicado en el sistema de bombeo, por lo que no hay pérdidas de energía en la implementación de este dispositivo.

Para el nivel mínimo de la presa, los resultados indican que la operación del sistema de bombeo es factible. En esta situación, la variación de la velocidad de giro se aplica en PB1 y PB2. La mayor variación de la velocidad de giro se registra en PB2 cuando funcionan de 5 a 2 equipos por estación, con un valor de 0.91.

Mediante el uso motovariadores, se observa que se logran resultados satisfactorios para la operación del acueducto en todas las posibles condiciones de funcionamiento. La ventaja de esta alternativa sobre la implementación de válvulas de paso anular radica en que no se desaprovecha energía de forma intencional durante su uso. Para los niveles de agua en la presa (máximo, medio y mínimo), se registran porcentajes de pérdida de carga promedio de 2.28%, 1.22% y 2.38% respectivamente implementado el uso de las válvulas de paso anular. Aunque estos porcentajes pueden parecer pequeños, son críticos en sistemas de bombeo, ya que la energía suministrada a estos sistemas influye en la selección de la mejor alternativa para su operación.

VI CONCLUSIONES

Como resultado de los análisis hidráulicos realizados, se presentan las conclusiones pertinentes respecto a cada alternativa propuesta para el funcionamiento del acueducto.

Maniobras de paro y arranque de equipos de bombeo:

Las maniobras de paros y arranques de los equipos de bombeo analizados mostraron un comportamiento impráctico para llevar a cabo en una situación real. Los intervalos de tiempo entre estas acciones se redujeron progresivamente a lo largo de la simulación. Inicialmente, la primera maniobra se registró a las 27 horas con 19 minutos, donde se apagó un equipo de bombeo en PB3 para evitar el vaciado de TS3, lo que implicaba extraer menos agua de ese tanque. Luego, tras un tiempo de 1 hora con 54 minutos, se realizó la siguiente maniobra, se encendió un equipo en PB3 para evitar el derrame de TS3 por lo cual extrajo más agua de este tanque. Estas acciones sugieren que TS3 tendió a llenarse rápidamente, pero tardó más en vaciarse, lo cual indicó que el derrame de TS3 es la condición crítica de esta simulación.

La **tabla 5.2** presentó todas las maniobras ejecutadas durante el periodo completo de la simulación (168 horas). Los resultados obtenidos indicaron que no se logró una convergencia en los intervalos entre las maniobras, o al menos no se observaron tiempos consistentes para alcanzar el funcionamiento práctico del sistema de bombeo.

Los resultados obtenidos a través del programa EPANET permitieron visualizar la altura piezométrica en los tanques de sumergencia, lo que posibilitó la formulación de una probable estrategia para lograr resultados aceptables mediante las maniobras de paros y arranques. Sin embargo, estas acciones fueron complicadas, ya que implicaron ajustes en las elevaciones del nivel de piso y de la corona de los tanques de sumergencia. Modificar la elevación de la corona implica aumentar el tirante, mientras que ajustar los niveles del piso requiere en la realidad realizar excavaciones para situarlos por debajo de los actuales. Esta estrategia se considera poco práctica como propuesta de rehabilitación, dado que implica la construcción de nuevos tanques.

Con base en estos análisis, se concluye que las maniobras de paros y arranques de los equipos de bombeo no representan la alternativa adecuada.

Estrangulamiento de válvulas:

La segunda estrategia de análisis del acueducto para mantener un funcionamiento adecuado implicaba la implementación de válvulas de paso anular. Como se detalló en la **sección V.2**, el propósito de esta alternativa es garantizar niveles apropiados en todos los tanques de sumergencia. Los resultados de esta alternativa, presentados en la **tabla 5.4**, abarcaban todas las condiciones operativas del sistema de bombeo. Se consideraron tanto el nivel máximo, medio y mínimo de la presa, así como la cantidad de bombas que podían operar en cada estación de bombeo.

A partir de los resultados presentados para las diversas condiciones de operación, se concluye que la implementación de válvulas de paso anular para controlar los niveles de los tanques de sumergencia parece ser una opción práctica. Sin embargo, uno de los aspectos críticos que deben considerar es la cantidad de energía disipada a través de las válvulas, ya que este costo energético influye significativamente en la

elección de la mejor opción. Para tomar una decisión adecuada, es necesario comparar estos resultados con los obtenidos mediante la alternativa de la variación de la velocidad de giro de los equipos de bombeo.

Variación de la velocidad de giro:

En la *sección II.5* se detalló cómo la teoría de la similitud permite ajustar la velocidad de giro de una bomba para modificar su capacidad de suministro de agua. Con el software EPANET, se llevaron a cabo simulaciones para evaluar el funcionamiento del sistema de bombeo al variar la velocidad de giro de las bombas. Los resultados de estas simulaciones se mostraron en la *tabla 5.5*. Es muy importante destacar que el valor de la velocidad de giro ingresado en el modelo de EPANET para controlar los niveles de los tanques de sumergencia se aplicó únicamente a una bomba, sin importar el número de equipos que funcionaron en conjunto por estación. Por lo tanto, implementar esta alternativa en la práctica requiere instalar el motovariador en una sola bomba de cada estación de bombeo (además de la instalación en la bomba de reserva).

Conclusión general:

Del análisis de las tres alternativas presentadas, en primera instancia se descartaron las maniobras de paros y arranques de los equipos de bombeo. Por lo tanto, se comparan las alternativas de estrangulamiento de las válvulas con la variación de la velocidad de giro de las bombas. Para esta comparación, se presenta en la *tabla 6.1* el gasto que el sistema de bombeo fue capaz de entregar hacia el tanque de aguas crudas de acuerdo con las dos alternativas restantes. Esta tabla abarca todos los escenarios mencionados anteriormente en los que operó el sistema de bombeo.

Se presentan las diferencias entre los gastos que cada una de las alternativas fue capaz de entregar. Estas diferencias se calcularon como: (Gasto aplicando el control de la velocidad de giro de las bombas) – (Gasto aplicando el estrangulamiento de las válvulas de paso anular).

Tabla 6.1 Comparación del gasto entregado al TAC

		Alternativa			
		Variación de la velocidad de giro de las bombas	Estrangulamiento de las válvulas de paso anular		
Nivel en la presa	Bombas funcionando	Gasto (l/s)	Gasto (l/s)	Diferencia de gasto entre las alternativas (l/s)	Diferencia de gasto entre las alternativas %
Máximo (161.50 msnm)	5	6056.42	6023.60	32.82	0.54
	4	5246.12	5210.54	35.58	0.68
	3	4232.97	4185.44	47.53	1.12
	2	2920.37	2893.38	26.99	0.92
	1	1499.43	1491.96	7.47	0.50

Continúa

		Alternativa			
		Variación de la velocidad de giro de las bombas	Estrangulamiento de las válvulas de flujo anular		
Nivel en la presa	Bombas funcionando	Gasto (l/s)	Gasto (l/s)	Diferencia de gasto entre las alternativas (l/s)	Diferencia de gasto entre las alternativas %
Medio (156.55 msnm)	5	6039.20	6006.33	32.87	0.54
	4	5223.66	5189.57	34.09	0.65
	3	4209.99	4178.36	31.63	0.75
	2	2940.80	2903.47	37.33	1.27
	1	1509.31	1489.82	19.49	1.29
Mínimo (151.50 msnm)	5	5869.24	5839.52	29.72	0.51
	4	5063.58	5041.32	22.26	0.44
	3	4053.01	4051.75	1.26	0.03
	2	2830.08	2819.93	10.15	0.36
	1	1454.79	1456.52	-1.73	-0.12

De la **tabla 6.1** se observa que la alternativa que entregó un gasto ligeramente mayor hacia el destino final del acueducto, el tanque de aguas crudas, fue la que involucró el control de la velocidad de giro de los equipos de bombeo.

Se concluye entonces que la mejor alternativa para la operación del sistema de bombeo es la implementación de motovariadores. Esto se fundamenta en que no se provoca disipación de energía de forma intencionada para la regulación de los niveles de agua en los tanques de sumergencia, y como se observó, con esta alternativa se entregó un gasto ligeramente mayor al destino final del acueducto para prácticamente todas las condiciones. Por último, su instalación es versátil y se requiere en una sola bomba funcionando a velocidad de giro reducida en cada planta de bombeo además de la instalación en la bomba de reserva.

Las acciones recomendadas para la rehabilitación del acueducto analizado en este trabajo, basadas en los análisis de los resultados obtenidos a partir de las simulaciones realizadas, son las siguientes:

- Realizar la limpieza de las tuberías implementando el método de limpieza denominado “pigging”, con el objetivo de reducir el factor de fricción actual y con ello disminuir las pérdidas de energía por fricción
- Realizar la renovación de los equipos de bombeo que cumplan con los requerimientos del sistema (gasto y carga)
- Realizar la operación del sistema de bombeo instalando variadores de la velocidad de giro en al menos dos equipos de bombeo en cada planta

Como una segunda fase de este trabajo se pueden analizar los costos y beneficios que se obtienen de la alternativa elegida. Por lo tanto, para analizar los costos y beneficios de la implementación de motovariadores como la mejor alternativa para la operación del sistema de bombeo, se puede dividir el análisis en dos partes principales: los costos asociados con la instalación y operación de los motovariadores, y los beneficios esperados en términos de eficiencia energética y rendimiento del sistema. De esta forma se pueden considerar los siguientes aspectos

Costos:

- Costo de adquisición e instalación de motovariadores
- Costos de mantenimiento
- Costos operativos

Beneficios:

- Ahorro de energía
- Mejora del rendimiento del sistema
- Reducción de costos de mantenimiento

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilar Barajas, I., & Ramírez Orozco, A. (2021). *Agua para Monterrey Logros, retos y oportunidades para Nuevo León y México* (2.^a ed.). Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey.
- Carmona Paredes, R. B., Sánchez Huerta, A., Rodal Canales, E. A., Carmona Paredes, G., Sánchez Huerta, J. A., & Sámano García, A. (1994). *Puesta en operación del acueducto El Cuchillo, Monterrey*. Instituto de Ingeniería de la UNAM.
- Carmona Paredes, R., Carmona Paredes, G., Sánchez Huerta, A., Rodal Canales, E., Ramos Tapia, S., & Sámano García, A. (1997). *Acueducto Río Colorado - Tijuana. Estudio para recuperación de la capacidad de bombeo*. Instituto de Ingeniería de la UNAM.
- Carmona Paredes, R., Carmona Paredes, L., Sánchez Huerta, A., Carmona Paredes, G., García Sánchez, A., Ramos Tapia, S., Zarco Hernández, J. Á., & Velázquez Ávalos, F. (1998). *Acueducto El Cuchillo - Monterrey. Revisión de la operación de las cámaras de aire y puesta en marcha del sistema con 5 equipos de bombeo en cada una de sus plantas*. Instituto de Ingeniería de la UNAM.
- Clariond Reyes, E., & Garza Garza, A. (2017). *Plan Hídrico Nuevo León 2050* (1.^a ed.). Fondo de Agua Metropolitano de Monterrey. <https://famm.mx/wp-content/uploads/2018/10/Plan-H%C3%ADdrico-NL-2050.pdf>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2015). *Delimitación de las zonas metropolitanas de México*. https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/historicos/1329/702825010048/702825010048_1.pdf
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2020). *Panorama sociodemográfico de México*. https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/702825197926.pdf

- LIMPRO NACIONAL. (2016). Introducción a las Herramientas de Limpieza.
<https://limpronacional.com/>. Recuperado 1 de enero de 2024, de <https://limpronacional.com/wp-content/uploads/2016/07/Introducci%C3%B3n-a-las-Herramientas-de-Limpieza-de-Ductos.pdf>
- Rossman, L. (2000). *EPANET 2 Users Manual*. United States Environmental Protection Agency.
<https://www.epa.gov/water-research/epanet>
- Sánchez Huerta, A., Rodal Canales, E., & Cafaggi Félix, A. (2021). *Sistemas de Bombeo* (2.^a ed.). Facultad de Ingeniería de la UNAM.
[https://www.ingenieria.unam.mx/deptohidraulica/publicaciones/pdf_publicaciones/Sistemas%20de%20bombeo%20\(dig-2021\)%201.pdf](https://www.ingenieria.unam.mx/deptohidraulica/publicaciones/pdf_publicaciones/Sistemas%20de%20bombeo%20(dig-2021)%201.pdf)