



Diseño y simulación hidráulica del sistema de refrigeración en una planta de procesamiento de spodumene a hidróxido de litio: análisis de escenarios representativos y filosofía de operación

Felipe Ruiz Zea

Informe de práctica presentado para para optar al título de Ingeniero Mecánico

Asesor

Junes Abdul Villarraga Ossa, MsC en Ingeniería mecánica

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Ingeniería mecánica

Medellín

2023



| Cita  | Felipe Ruiz Zea [1]  |
|---|--|
| <b>Referencia</b><br><br>Estilo IEEE (2020) | [1] F. Ruiz Zea “Diseño y simulación hidráulica del sistema de refrigeración en una planta de procesamiento de spodumene a hidróxido de litio: análisis de escenarios representativos y filosofía de operación”, Trabajo de grado profesional, Ingeniería mecánica, Universidad de Antioquia, Medellín, Antioquia, Colombia, 2023. |



**Centro de documentación de ingeniería- CENDOI**

**Repositorio Institucional:** <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - [www.udea.edu.co](http://www.udea.edu.co)

**Rector:** John Jairo Arboleda Céspedes

**Decano/Director:** Jesús Francisco Vargas Bonilla.

**Jefe departamento:** Pedro León Simanca

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

## **Dedicatoria**

A mis queridos profesores, les agradezco de corazón por impartir sus conocimientos y ser guías en mi formación académica. Su dedicación y paciencia durante mi proceso de aprendizaje han sido invaluable para mi crecimiento personal y profesional. A mis padres Beatriz y Jorge, y a mis dos hermanos ingenieros, les agradezco por un ejemplo como los grandes seres humanos que son. Además, quisiera dedicar un agradecimiento especial a mi abuelo, quien, aunque ya no se encuentra con nosotros, siempre estuvo presente y pendiente de nuestra educación y desarrollo además de su apoyo incondicional como ese abuelito que fue.

## **Agradecimientos**

Quiero agradecer de manera especial a mi familia por su apoyo constante durante mi carrera universitaria. A mi madre, mi padre, mis hermanos y demás seres queridos, gracias por creer en mí y por motivarme a dar lo mejor de mí en cada paso que he dado. Además, quiero expresar mi agradecimiento a mi profesor Junes quien me brindó la oportunidad de conocer esta grandiosa empresa. Gracias a su orientación y apoyo, pude tener acceso a esta experiencia única que me permitió aprender y crecer como profesional. También quiero agradecer a los trabajadores de la empresa HATCH quienes me han brindado su confianza para participar en este proyecto. Gracias por compartir sus conocimientos y experiencia conmigo, por su paciencia y por permitirme ser parte de su equipo.

## TABLA DE CONTENIDO

|                          |    |
|--------------------------|----|
| RESUMEN                  | 8  |
| ABSTRACT                 | 9  |
| I. INTRODUCCIÓN          | 10 |
| II. OBJETIVOS            | 11 |
| A. Objetivo general      | 11 |
| B. Objetivos específicos | 11 |
| III. MARCO TEÓRICO       | 12 |
| IV. METODOLOGÍA          | 21 |
| V. RESULTADOS Y ANÁLISIS | 30 |
| VII. CONCLUSIONES        | 35 |
| REFERENCIAS              | 37 |
| ANEXOS                   | 38 |

## LISTA DE TABLAS

|  |    |
|--|----|
| Tabla 1 Referencias de las correlaciones en los accesorios Tee y Wye ..... | 16 |
| Table 2 Escenarios proporcionados.....                                     | 29 |

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Fig 1 Sistemas de enfriamiento típicos en la industria actual .....   | 13 |
| Fig 2 Nomenclatura de Idelchik para el flujo divergente y convergente a través de la unión Tee/Wye.....           | 15 |
| Fig 3 Usuario típico del sistema de refrigeración de la planta.....   | 17 |
| Fig 4 Efecto de la disminución de la velocidad de la bomba con una variación en la apertura de sus válvulas ..... | 19 |
| Fig 5. Resumen de diagrama de procesos con los códigos de corrientes .....  | 22 |
| Fig 6 Ejemplo de información que se encuentra en los P&Id (Torre de enfriamiento) .....                           | 24 |
| Fig 7. Parte de un área de la planta de litio donde se muestra las longitudes de tubería.....                     | 25 |
| Fig 8. Parte de un área de la planta de litio donde se muestra las longitudes de tubería.....                     | 25 |
| Fig 9. Parte de un área de la planta donde se ve el sistema de refrigeración modelado en OpenPlant.....           | 26 |
| Fig 10 Herramientas AFT Fathom .....  | 28 |
| Fig 11 Modelo AFT Fathom .....  | 31 |
| Fig 12 Curva de la bomba seleccionada y sus puntos de operación .....   | 32 |
| Fig 13 Porcentaje de apertura de válvula obtenido con la curva de bomba original.....                             | 33 |
| Fig 14 Aumento de la eficiencia de la bomba en los diferentes escenarios con un variador de velocidad.....        | 34 |

## SIGLAS, ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

**ASME**: The American Society of Mechanical Engineers

**ANSI**: American National Standards Institute

**PFD**: Diagrama de Flujo de procesos

**P&ID**: Diagrama de tubería e instrumentación

**BEP**: Punto de mejor eficiencia

**POR**: región de Operación preferida

**AOR**: región de operación permitida

**K Factor**: Perdida de Carga

---

## RESUMEN

Este trabajo se llevó a cabo con el fin de analizar del sistema de refrigeración de una planta de procesamiento de litio empleando la herramienta de simulación AFT Fathom. Para ello, se extrajo información del diagrama de flujo del proceso (PFD) y del diagrama de tubería e instrumentación (P&ID), lo que permitió modelar el comportamiento hidráulico de los equipos y las tuberías. A partir de esta información, se seleccionó una bomba que cumpliera con los requerimientos de caudal y presión del sistema, y se evaluaron diferentes escenarios para simular la operación de las válvulas y el comportamiento del sistema bajo distintos cambios de presión. Se llevó a cabo una búsqueda del mejor punto de rendimiento de la curva de la bomba más un estudio de la variación de velocidad nominal de la misma para lograr una mayor eficiencia del sistema. El modelo final se enfocó mucho en aproximar lo mejor posible las características de los equipos y sus condiciones de operación a las definitivas para así tener datos más fiables en la toma de decisiones finales del diseño.

***Palabras clave*** — Piping, AFT Fathom, escenarios de operación, sistema de agua de refrigeración, curva del sistema.

---

## ABSTRACT

This work was carried out in order to analyze the cooling system of a lithium processing plant using the simulation tool AFT Fathom. To do this, information was extracted from the process flow diagram (PFD) and the piping and instrumentation diagram (P&ID), which allowed for an accurate modeling of the hydraulic behavior of the equipment and pipes. Based on this information, a pump that met the flow and pressure requirements of the system was selected, and different operating scenarios were evaluated to simulate the operation of the valves and the behavior of the system under different pressure changes. A search was conducted for the best efficiency point on the pump curve, which allowed for a reduction in the nominal speed of the pump and achieved greater system efficiency. It is important to emphasize the importance of taking into account the characteristics of the equipment and the operating conditions to ensure optimal and safe performance of the cooling system in mineral processing plants.

***Keywords: Piping, AFT Fathom, Operating scenarios, Cooling Water System, System curve.***

---

## I. INTRODUCCIÓN

La transición energética y el desarrollo de energías renovables requieren de tecnologías innovadoras y sostenibles en todos los ámbitos, desde la generación hasta la transformación de materias primas. En este contexto, el litio se ha convertido en un mineral clave para el desarrollo de baterías de alta capacidad y la electrificación del transporte y la industria[1].

Este trabajo de grado está enfocado en la validación y simulación hidráulica de un sistema de refrigeración para una planta de procesamiento de spodumene a hidróxido de litio. Para ello, se utilizará el software AFT Fathom, que es uno de los estándares actuales en la industria para estos procesos de ingeniería. Esta herramienta permite analizar cómo se comporta el sistema al cambiar los requerimientos de caudal de los usuarios, proporcionando la característica hidráulica reales. Con la ayuda de este software, se podrá simular diversas configuraciones de usuarios, optimizarlo según las necesidades de estas configuraciones y realizar un análisis de los diferentes escenarios y su filosofía operación.

Además de las herramientas de simulación, se realizó una búsqueda bibliográfica sobre el diseño hidráulico de sistemas de refrigeración en diversas plantas tales como libros especializados y artículos científicos, con el objetivo de comprender la fenomenología fluidodinámica, las ecuaciones y sistemas similares que se han estudiado en la actualidad.

El sistema de enfriamiento de estudio se encuentra en una etapa de desarrollo intermedia, con aproximadamente un 85% de avance. Debido a que algunos equipos aún no han sido adquiridos, el diseño se ha realizado con ciertas suposiciones basadas en especificaciones de otros proyectos similares. Es necesario, por lo tanto, después llevar a cabo un modelado más detallado del sistema con el fin de validar y ajustar las suposiciones realizadas en esta etapa de diseño, y garantizar que el sistema hidráulico cumpla con los requerimientos del proceso en términos de eficiencia, sostenibilidad y fiabilidad.

Es importante destacar que el diseño ha implicado la colaboración y trabajo en equipo de diferentes áreas y especialidades. Por ejemplo, en el proceso que se ha llevado a cabo, diversos equipos han sido responsables de proporcionar al equipo de tubería los PFD con los balances de masa, caudales e información de las corrientes para el diseño del sistema y partir de esto, el equipo de Piping e instrumentación han elaborado múltiples P&ID con diámetros aproximados. Por otro

---

lado, el equipo de diseño ha plasmado esto en los modelos 3D, utilizando programas como OpenPlant y sugieren ruteos posibles que cumplan todos los estándares establecidos por la empresa y que cumpla con las buenas prácticas de diseño.

Este trabajo pretende por medio de la simulación hidráulica permitir avanzar en la especificación y licitación de las bombas y equipos complementarios para el sistema de enfriamiento de agua en la planta de procesamiento de spodumene a hidróxido de litio. Sin embargo, es necesario realizar la validación del modelo con las características reales de los equipos que se adquirirán en la etapa final del proyecto, como marcas, tamaños y curvas de operación, para así garantizar que el diseño del sistema siga cumpliendo con los requerimientos de presión y caudal en el proceso productivo.

## II. OBJETIVOS

### *A. Objetivo general*

Validar y optimizar con la información más reciente el diseño hidráulico del sistema de refrigeración en una planta de procesamiento de litio mediante el análisis detallado del comportamiento hidráulico de los equipos y las tuberías. Esto incluye la revisión preliminar del modelo 3D, la selección de una bomba adecuada y la evaluación de diferentes escenarios de funcionamiento para determinar el punto óptimo de rendimiento en la curva de la bomba a través de variadores de velocidad.

### *B. Objetivos específicos*

Obtener información relevante de los diagramas PFD y P&ID del sistema de refrigeración de la planta de procesamiento de litio, y modelar el comportamiento hidráulico de los equipos y tuberías mediante la herramienta de simulación AFT Fathom.

Seleccionar una bomba que cumpla con los requerimientos de caudal y presión del sistema de refrigeración, y buscar el punto de mejor rendimiento de su curva optimizándola mediante el análisis de la variación de su velocidad nominal.

---

Analizar la influencia de las características de los equipos y las condiciones de operación en el rendimiento del sistema de refrigeración de la planta de procesamiento de litio, y establecer recomendaciones para mejorar el diseño hidráulico del sistema de refrigeración basado en los resultados de la simulación y análisis realizados.

### III. MARCO TEÓRICO

Un correcto diseño de un sistema de refrigeración implica tener en cuenta las condiciones de temperatura y presión esperadas durante los diferentes escenarios de operación para asegurar que el sistema de tubería este calculado correctamente y la bomba a seleccionar trabaje en un rango de operación adecuado.

Los estándares ASME B31.1 "Power Piping", ASME B31.3 "Process Piping" y ASME B31.9 "Building Services Piping" son normas de gran importancia en la industria y se deben tener en cuenta en todas las etapas del diseño dentro de una planta de procesos. La norma ASME B31.9, en particular, abarca varias áreas importantes, como la selección de materiales, el diseño y construcción de tuberías, la prevención de la corrosión, la protección contra incendios y explosiones, la evaluación y reparación de daños en las tuberías, y la capacitación del personal. Es crucial que los accesorios del sistema de tuberías se diseñen para soportar las condiciones de presión y temperatura esperadas durante el servicio y que se utilicen materiales adecuados y de alta calidad para la construcción de los componentes, tal como se establece en estos estándares[2]–[4].

Pasando a otro aspecto, los sistemas de agua de enfriamiento son una parte esencial de múltiples procesos industriales a nivel mundial, ya que permite mantener los equipos mecánicos a una temperatura óptima de funcionamiento por medio del intercambio de energía en forma de calor entre los diferentes flujos de trabajo. Existen muchos tipos de sistemas de agua de enfriamiento, pero los sistemas básicos son los sistemas de un solo paso, de circulación cerrada (No evaporativa), de recirculación abierta (evaporativa). En la Fig 1 se muestra el principio de operación básico de ellos. El sistema abierto permite que el agua fluya solo una vez a través de los equipos. Por otro lado, el sistema cerrado involucra que el agua absorba el calor del proceso y lo libere en otro intercambiador de calor sin la necesidad de una torre de enfriamiento. Finalmente, el sistema abierto de recirculación es el más utilizado en la industria y fue seleccionado para la planta en

cuestión. Este sistema mantiene el caudal mediante bombas y dirige el agua a través de los intercambiadores de calor, donde luego es enfriada mediante evaporación en las torres de enfriamiento[5], [6].

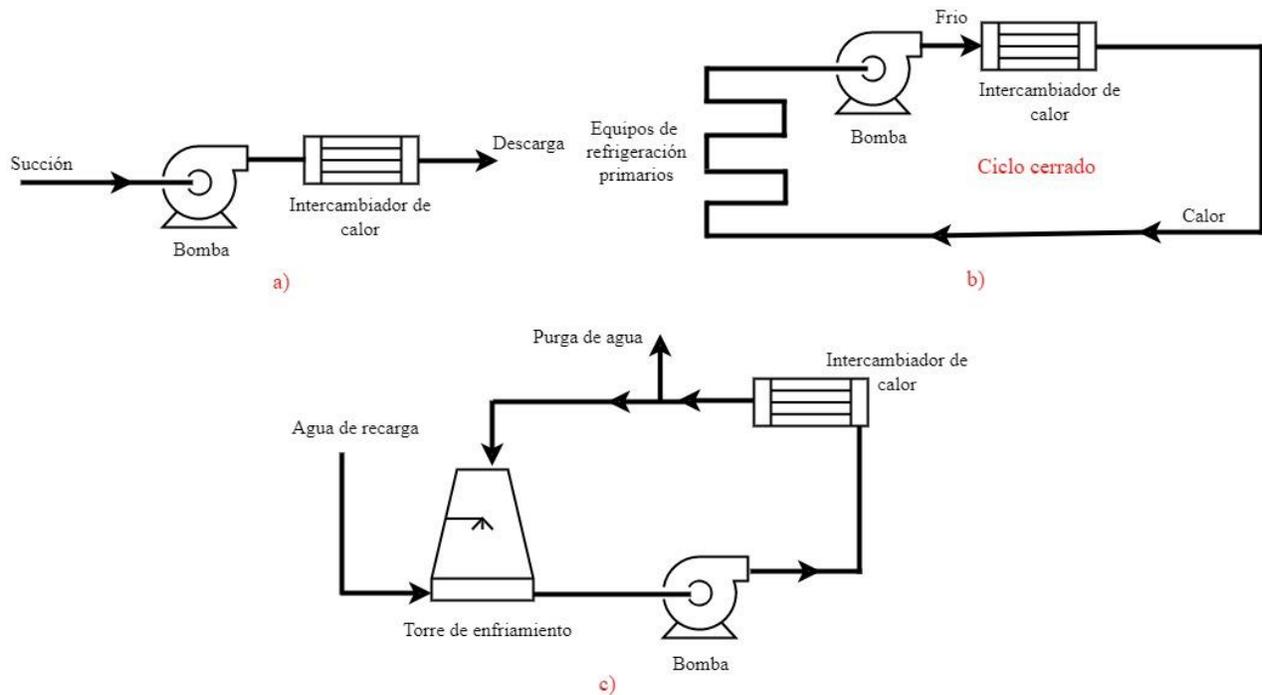


Fig 1 Sistemas de enfriamiento típicos en la industria actual

Para un diseño de refrigeración que puede tener kilómetros de servicio y decenas de usuarios la pérdida de carga o presión es un factor crítico que se debe calcular correctamente, esta pérdida de carga se debe a la resistencia al flujo de líquido a medida que se mueve a través de las tuberías, lo que resulta en una pérdida de presión o cabeza. La cantidad de pérdida de cabeza para un sistema dado depende de las características del líquido que se maneja, como la viscosidad, el tamaño de la tubería, la condición (rugosidad) de la superficie interior de la tubería y la longitud del recorrido, así como las pérdidas a través de diversas válvulas y accesorios. La comprensión de la pérdida de carga y su relación con los sistemas de enfriamiento de agua es esencial para garantizar un funcionamiento óptimo y eficiente de estos sistemas.

Para entender estos fenómenos se ha llevado a cabo múltiples investigaciones acerca de cómo medir la pérdida de fricción para diferentes condiciones, y se han desarrollado diversas

expresiones basadas en datos experimentales para calcular este valor. La expresión más comúnmente utilizada en la práctica actual y en la que se basan muchas tablas en la literatura es la ecuación de Darcy-Weisbach. Esta fórmula reconoce que la fricción de la tubería depende de la condición (rugosidad de la superficie interior de la tubería), el diámetro interno de la tubería, la velocidad del líquido y su viscosidad[7]. Se expresa como:

$$h_f = f \frac{L V^2}{D 2g} \quad \text{ecuación 1}$$

$h$  = pérdida por fricción

$L$  = longitud de tubería

$D$  = diámetro interior promedio de la tubería

$V$  = velocidad promedio de la tubería

$g$  = constante gravitacional

$f$  = factor de fricción

Otro concepto importante es el número de Reynolds, este es un parámetro usado en la ingeniería de fluidos que se debe tener en cuenta en el diseño para caracterizar el tipo de flujo que ocurre en un fluido al moverse a través de un conducto. En sistemas de refrigeración, el flujo de refrigerante a través de las tuberías puede ser laminar o turbulento, lo que afecta la eficiencia y el rendimiento del sistema. El número de Reynolds se calcula en función de la velocidad del fluido, el diámetro interno de la tubería y la viscosidad del fluido. Cuando el número de Reynolds es bajo, el flujo es laminar y las partículas del fluido se mueven en líneas paralelas, mientras que, en los números de Reynolds altos, el flujo es turbulento y las partículas se mueven en patrones caóticos[8]. El conocimiento del número de Reynolds es crucial para el diseño adecuado de sistemas de refrigeración, ya que permite dimensionar correctamente las tuberías y seleccionar las bombas y otros equipos necesarios para lograr el flujo deseado.

$$R = \frac{VD}{\nu} \quad \text{ecuación 2}$$

$V = \text{Velocidad promedio}$

$D = \text{Diámetro interno promedio del tubo}$

$\nu = \text{Viscosidad cinemática del fluido}$

En cuanto a las pérdidas de presión del sistema, los accesorios son un factor crucial a tener en cuenta para conocer las pérdidas que debe vencer la bomba a la hora de operar el servicio de refrigeración. Estos accesorios, como válvulas, codos, tes, reducciones, entre otros, pueden crear obstáculos en el flujo del fluido y aumentar significativamente la resistencia, lo que resulta en una pérdida de energía en forma de una disminución de la presión. [7], [8].

El software implementado utiliza múltiples formas de iteración para hallar las pérdidas de presión de diferentes elementos que tienen en cuenta muchos parámetros. Los factores de pérdida calculados para las uniones en T y Y que utilizan el modelo de pérdida detallado implican correlaciones que dependen de la distribución de flujo, la relación de las áreas de flujo y el ángulo de las tuberías conectadas. Los modelos utilizados por el software se toman principalmente del Capítulo 7 del Manual de Resistencia Hidráulica de Idelchik (Idelchik 2007). Las ecuaciones no se mostrarán, pero en la Tabla 1 se muestran las referencias que da el manual del software de estas. Todas las uniones en T y Y tienen flujos divergentes o convergentes. Se requieren dos conjuntos de ecuaciones para cada configuración. La Figura 1 representa la nomenclatura de estos accesorios. Los subíndices del factor K se refieren a la referencia del área base y la ubicación en la T. Por ejemplo,  $K_{c,s}$  representa el factor K para la rama lateral (s) referenciado al área de flujo de la tubería combinada (c)[9].

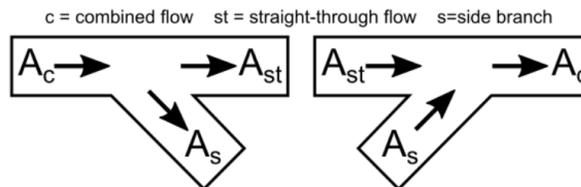


Fig 2 Nomenclatura de Idelchik para el flujo divergente y convergente a través de la unión Tee/Wye.

Nota: Tomado del manual de usuario de AFT Fathom

Tabla 1 Referencias de las correlaciones en los accesorios Tee y Wye

| <b>Geometry</b>              | <b>Type</b>    | <b>Direction</b> | <b>Reference</b> | <b>Page</b> |
|------------------------------|----------------|------------------|------------------|-------------|
| <b>Constant Area</b>         | Diverging Tee  | Branch           | Idelchik 2007    | 523         |
|                              | Diverging Tee  | Run              | Idelchik 2007    | 525         |
|                              | Converging Tee | Branch           | Idelchik 2007    | 501-504     |
|                              | Converging Tee | Run              | Idelchik 2007    | 501-504     |
|                              | Splitting Tee  | From Branch      | Miller 1990      | 323         |
|                              | Combining Tee  | To Branch        | Miller 1990      | 316         |
| <b>Constant Area, r/D =1</b> | Diverging Tee  | Branch           | Idelchik 2007    | 531-533     |
|                              | Diverging Tee  | Run              | Idelchik 2007    | 526         |
|                              | Converging Tee | Branch           | Idelchik 2007    | 512-514     |
|                              | Converging Tee | Run              | Idelchik 2007    | 512-514     |
|                              | Splitting Tee  | From Branch      | Miller 1990      | 323         |
|                              | Combining Tee  | To Branch        | Miller 1990      | 315         |
| <b>Area Sum, Sharp</b>       | Diverging Tee  | Branch           | Idelchik 2007    | 524         |
|                              | Diverging Tee  | Run              | Idelchik 2007    | 526-527     |
|                              | Converging Tee | Branch           | Idelchik 2007    | 505-509     |
|                              | Converging Tee | Run              | Idelchik 2007    | 512-514     |
|                              | Splitting Tee  | From Branch      | Miller 1990      | 323         |
|                              | Combining Tee  | To Branch        | Miller 1990      | 315         |
| <b>Wye</b>                   | Diverging Wye  | From Branch      | Idelchik 2007    | 523         |
|                              | Converging Wye | To Branch        | Idelchik 2007    | 545         |

Acerca de las pérdidas de los equipos, en general en una planta después de la destilación, la transferencia de calor es la operación más importante dentro de los procesos que se tienen [10]. Además, en este caso que se está tratando de un sistema de enfriamiento la mayor parte de la transferencia de calor se lleva a cabo en intercambiadores de calor de carcasa y tubos con efectos considerables en la pérdida de carga. Estas pérdidas de carga, como practica de diseño se establece de que no estén por encima de entre 7psi-10 psi [11] dependiendo del tamaño. Como explicación del funcionamiento básico de este intercambiador en la Fig 3 se muestra como este sistema se compone de una carcasa que es el recipiente que tendrá tubos en el interior por donde pasará uno de los dos fluidos. Los tubos son largos conductos que permiten que los corrientes fluyan a través de ellos. El fluido caliente se transfiere al fluido frío a través de las paredes de los tubos. El fluido

caliente entra en los tubos en un extremo y fluye a través de ellos, cediendo su calor a medida que fluye hacia el otro extremo. Al mismo tiempo, el fluido frío fluye alrededor de los tubos dentro de la carcasa, absorbiendo el calor del fluido caliente a medida que avanza a través del intercambiador. Para mejorar la transferencia de calor, se pueden agregar aletas o protuberancias en la superficie de los tubos. Estas aletas aumentan la superficie del tubo en contacto con el fluido y, por lo tanto, aumentan la transferencia de calor.

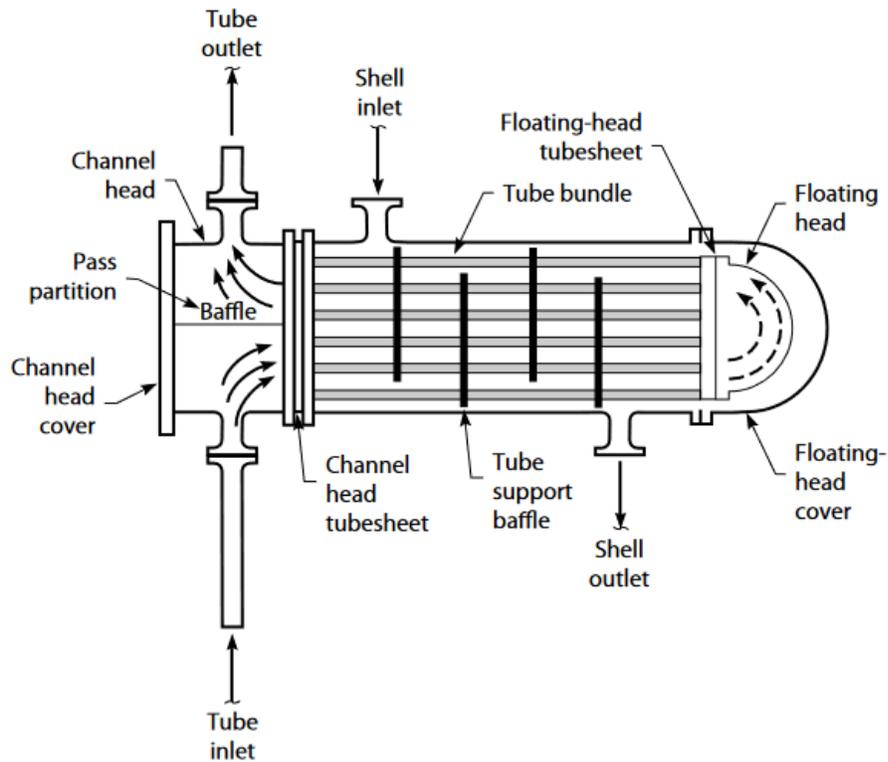


Fig 3 Usuario típico del sistema de refrigeración de la planta

Nota : Fuente a Working guide to process equipment, Shell-and-Tube Heat Exchangers

si se quiere cuantificar la pérdida total de energía en el sistema este se va a componer de dos partes: la energía estática y la energía dinámica. La energía dinámica incluye las pérdidas de energía debidas a la fricción (pérdidas mayores) y las pérdidas menores debido a los componentes del sistema. La carga estática se refiere a la elevación y la diferencia de presión entre el punto de suministro y el punto de destino del sistema. Por lo general, esto no depende de la velocidad del fluido y es constante para la curva del sistema[12].

$$\Delta h_{stat} = (z_i - z_0) + \left(\frac{P_i - P_0}{\rho g}\right) \text{ Ecuación 3}$$

Las pérdidas de energía debidas a la fricción varían con la velocidad del flujo y se pueden calcular para los componentes del sistema, como tuberías, válvulas, codos y equipos finales. Estas pérdidas suelen variar proporcionalmente al cuadrado de la velocidad. La ecuación de Darcy-Weisbach se utiliza para calcular las pérdidas de energía por fricción en las tuberías, y el factor de fricción se puede determinar utilizando la ecuación de Colebrook-White.

La ecuación de Hazen-Williams es otra forma de calcular las pérdidas de energía en las tuberías, pero solo es válida para agua. Las pérdidas menores se producen cuando el fluido pasa por accesorios, válvulas, cambios de sección o entra o sale de tanques. Estas pérdidas se pueden calcular utilizando una constante, K, que se tabula para diferentes componentes del sistema. Las pérdidas menores a menudo son la pérdida dominante en un sistema de tuberías[12].

$$\Delta h_{system} = (z_i - z_0) + \left(\frac{P_i - P_0}{\rho g}\right) + \left(\frac{fL}{D} + \sum k\right)\left(\frac{v^2}{2g}\right) \text{ ecuación 4}$$

Ahora con respecto al tema de las bombas que deben suplir estas pérdidas mencionadas anteriormente es común encontrar una selección inadecuada de estas en la industria, incluso en redes simples de transporte de agua, lo que resulta en un aumento de los costos que pueden pasar desapercibidos hasta que afecten el proceso productivo. Por lo general, estas bombas se eligen a partir de las propuestas de diferentes proveedores o de datos técnicos de catálogos, pero estas máquinas se producen en serie y se adaptan a las condiciones del sistema del usuario. Por lo tanto, no es posible evaluar la calidad del equipamiento propuesto solo con estos datos. Para seleccionar la mejor opción, el usuario necesita elementos adicionales que permitan considerar la calidad del diseño, la fabricación y los datos técnicos disponibles [13].

El mejor punto de eficiencia (BEP) de una bomba es donde su eficiencia es máxima para un cierto caudal y cabeza. Es importante que la bomba opere en este punto para reducir la vibración, el ruido y la recirculación dentro del impulsor. La región de operación preferida (POR) es un rango de caudales a ambos lados del BEP donde la eficiencia y la confiabilidad no se ven afectadas significativamente. Por otro lado, la región de operación permitida (AOR) es el rango de caudal en

el que la bomba puede funcionar con una vida útil aceptable, y está limitada por diversos criterios como la cavitación, el calentamiento, la vibración y la fatiga. La cabeza de cierre y el punto de funcionamiento máximo son puntos de prueba importantes que deben evitarse durante la operación normal de la bomba, ya que pueden causar graves problemas mecánicos[12].

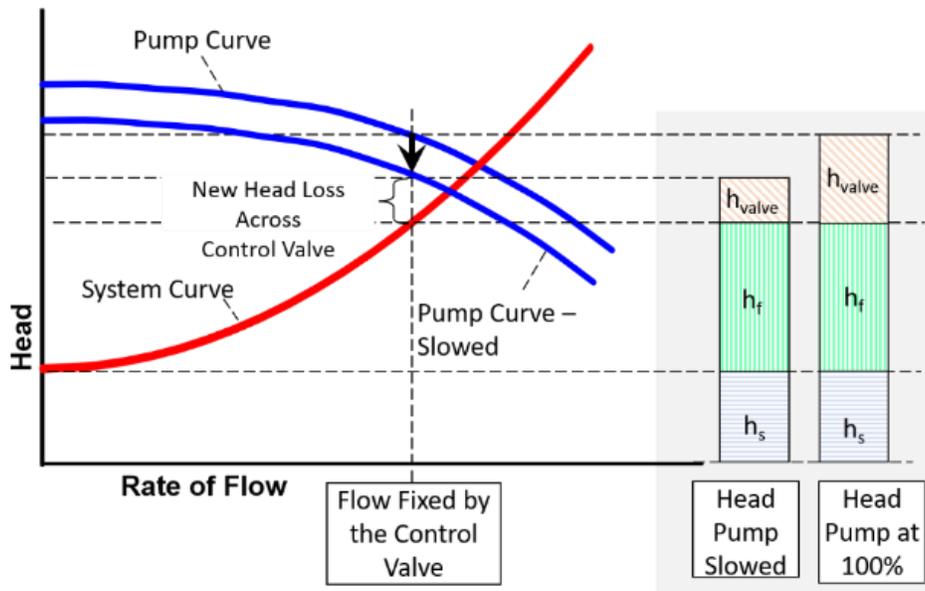


Fig 4 Efecto de la disminución de la velocidad de la bomba con una variación en la apertura de sus válvulas

Nota: Fuente a Working guide to process equipment, Shell-and-Tube Heat Exchangers

Una válvula de control activa es aquella que cambia continuamente su posición para mantener un flujo o presión constante sin intervención humana. Debido a que varían continuamente su posición, no hay una sola válvula en un rango de flujos del sistema y no se incluyen en la curva del sistema. En un gráfico del sistema de la bomba, la válvula de control activa se muestra como la diferencia entre las dos curvas en el punto de operación. El gráfico también es útil para determinar el margen disponible en la válvula de control. La carga de la bomba requerida con la válvula de control en el sistema es la suma de la carga estática, las pérdidas por fricción y la pérdida a través de la válvula de control, y el flujo en el sistema es menor que el flujo en el sistema sin la válvula de control.

Las Reglas de Afinidad son un conjunto de relaciones matemáticas que establecen cómo cambian las características de una bomba al cambiar su velocidad de rotación o el tamaño de su

impulsor mientras se mantiene constante la eficiencia. En otras palabras, estas reglas permiten a los ingenieros predecir cómo la bomba se comportará en diferentes condiciones de operación sin necesidad de realizar pruebas reales en el campo.

La primera parte de las reglas de afinidad se aplica cuando se cambia la velocidad de rotación de la bomba mientras se mantiene constante el tamaño del impulsor. En este caso, se establece que el caudal, la carga y la potencia son todas proporcionales a la velocidad de rotación. Por ejemplo, si se duplica la velocidad de rotación de la bomba, el caudal, la carga y la potencia también se duplicarán.

La segunda parte de las reglas de afinidad se aplica cuando se cambia el tamaño del impulsor de la bomba mientras se mantiene constante la velocidad de rotación. En este caso, se establece que el caudal, la carga y la potencia son todas proporcionales al tamaño del impulsor. Por lo tanto, si se reduce el tamaño del impulsor a la mitad, el caudal, la carga y la potencia también se reducirán a la mitad.

En la práctica, los ingenieros pueden utilizar las reglas de afinidad para tomar decisiones informadas sobre cómo operar y diseñar sistemas de bombeo en diferentes situaciones. Por ejemplo, si se desea reducir la velocidad de la bomba para ahorrar energía, se puede utilizar la primera parte de las reglas de afinidad para calcular el nuevo caudal, carga y potencia de la bomba. Si se necesita cambiar el tamaño del impulsor para adaptar la bomba a una nueva aplicación, se puede utilizar la segunda parte de las reglas de afinidad para predecir cómo cambiarán las características de la bomba.

#### Cambio de velocidad

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{n_2}{n_1} \quad \text{Ecuación 5} \quad \frac{H_2}{H_1} = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 \quad \text{Ecuación 6} \quad \frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^3 \quad \text{Ecuación 7}$$

#### Cambio del tamaño del Rodete

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{D_2}{D_1} \quad \text{Ecuación 8}; \quad \frac{H_2}{H_1} = \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^2 \quad \text{Ecuación 9}; \quad \frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^3 \quad \text{Ecuación 10}$$

---

#### IV. METODOLOGÍA

Es importante destacar que, en esta etapa del proyecto y del modelo que se va a realizar, se debe tener en cuenta el porcentaje de definición de los usuarios, es decir, qué tanto se ha concretado en cuanto a los equipos que se van a utilizar y que información técnica tenemos de ellos. En este caso, como se observa en el Resumen del PFD realizado en la Fig 5 se sabe que aproximadamente el 85% de los usuarios han sido definidos, lo que representa un avance significativo y una buena base para realizar estas simulaciones y que tengan validez. Sin embargo, para el resto de los usuarios que aún no han sido definidos se deben considerar en las fases posteriores para posibles alternativas de diseño y actualizaciones que sigan garantizando un modelo fiable.

En la Fig 5 se pueden observar también el código de los rectángulos azules, que identifican las propiedades de la corriente de entrada, y los rectángulos amarillos que identifican las propiedades de la corriente de salida. Es importante destacar que estas propiedades se refieren únicamente a balances de masa y caudales primarios. La caída de presión no es un dato proporcionado por el equipo de procesos al momento de realizar el estudio de la planta, ya que esta depende de factores como la longitud de la tubería, los accesorios utilizados y las especificaciones del equipo de enfriamiento.

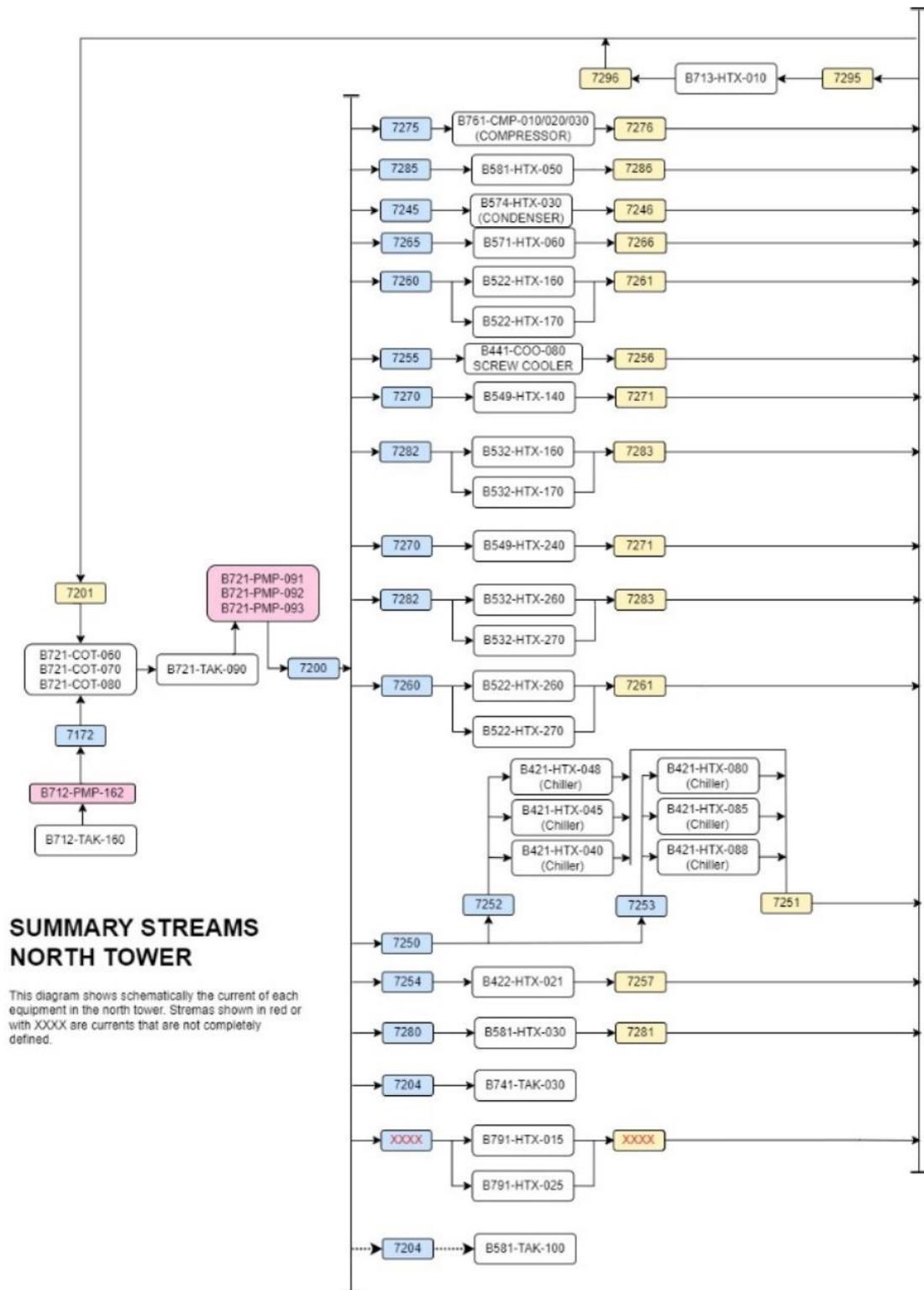


Fig 5. Resumen de diagrama de procesos con los códigos de corrientes

---

Después de obtener una base con la información detallada del proceso del agua de enfriamiento, el equipo encargado del diseño de los P&ID procede a agregar las válvulas que deben ser utilizadas en las diferentes partes del sistema, de acuerdo con los requisitos de caudal y presión previamente establecidos. Posteriormente, se lleva a cabo una exhaustiva extracción de estos elementos, la cual debe ser confrontada con el modelo 3D para asegurar su exactitud. Ambas partes del proceso se realizan en paralelo, ya que tanto el modelo 3D como el P&ID son complementarios. Es decir, si se requiere un cambio de equipo en la planta física, puede ser necesario agregar diferentes accesorios en el P&ID para que estos concuerden, y si se debe agregar un instrumento o una válvula en el P&ID debido a requerimientos normativos, se debe actualizar el modelo 3D en consecuencia.

Un ejemplo del tipo de información que se extrae durante el proceso de validación del diseño como se ve en Fig 6 es la evaluación de la llegada de una torre de enfriamiento. Para ello, se analiza la información que suministra como el diámetro de la tubería preliminar, la reducción de 600 x 250 y la válvula VBF-102 indicándonos que se trata de una válvula de mariposa. Asimismo, se considera la salida de spray dentro de la torre que nos dice que se debe garantizar una cierta presión de salida para que el sistema funcione de manera eficiente. Todos estos datos son sometidos a un análisis detallado para garantizar que el diseño hidráulico del sistema de refrigeración cumpla con los requerimientos específicos del proceso y se ajuste a las condiciones operativas previstas.

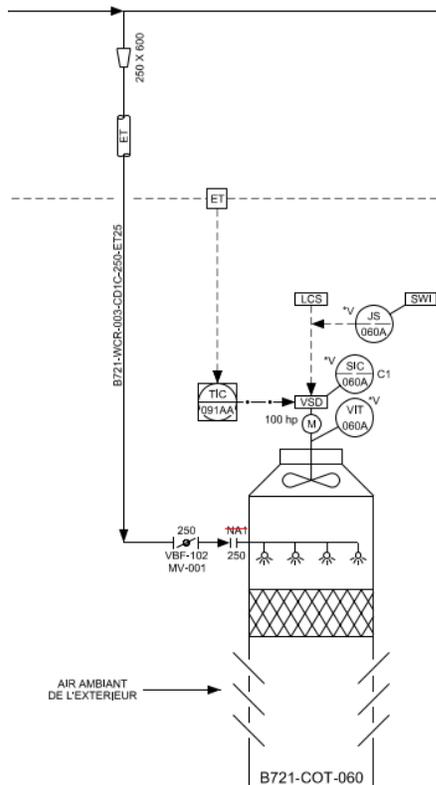


Fig 6 Ejemplo de información que se encuentra en los P&Id (Torre de enfriamiento)

Después de la etapa de diseño preliminar, se llevó a cabo un seguimiento de la ubicación real de los equipos y se realizó un análisis de la caída de presión en el sistema. Como se mencionó en el marco teórico, las caídas de presión son una consideración importante en el diseño de sistemas hidráulicos debido a la longitud de la tubería y las pérdidas por fricción que ocurren en ella.

Para abordar esta consideración, se marcaron en los planos del modelo todas las ubicaciones de los usuarios del sistema, como se muestra en la Fig 7, y se identificó la longitud de la tubería correspondiente, como se muestra en la Fig 8. De esta manera, se pudo realizar un cálculo de la caída de presión y asegurar que el modelo del sistema cumpla con los requisitos de eficiencia y rendimiento.

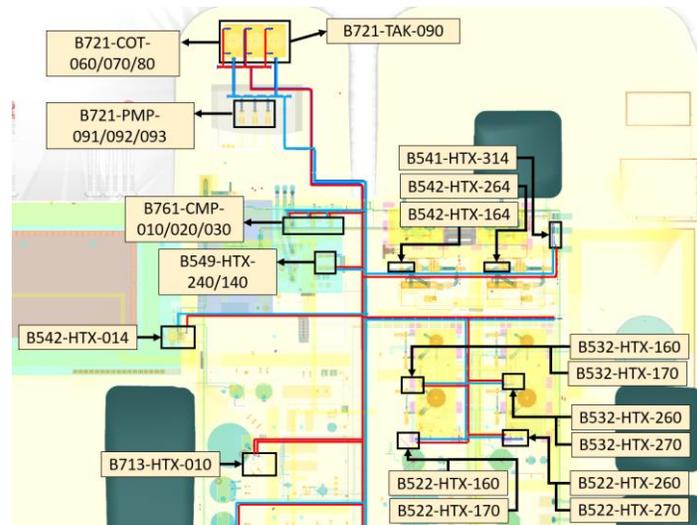


Fig 7. Parte de un área de la planta de litio donde se muestra las longitudes de tubería

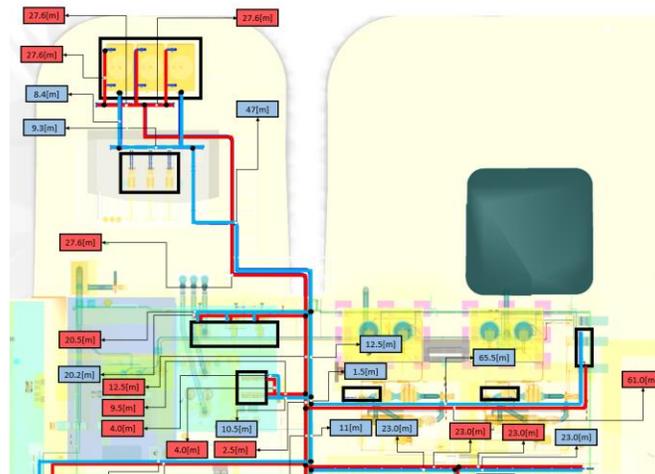


Fig 8. Parte de un área de la planta de litio donde se muestra las longitudes de tubería

Otro aspecto importante en la ecuación de caída de presión en los sistemas de tuberías es la diferencia de altura entre los diferentes puntos del sistema. Aunque los equipos en la planta no varían mucho en altura, es necesario tener en cuenta este factor al hacer el modelo. Es importante tener en cuenta que la disposición en planta de la planta y las ubicaciones de los equipos están determinadas por las necesidades del proceso, las capacidades de espacio, las necesidades de obras civiles, entre otros factores. En la Fig 9 se puede observar cómo se extrajo la información sobre la entrada y salida del agua de enfriamiento de cada usuario para incorporar estos datos al modelo de AFT Fathom.

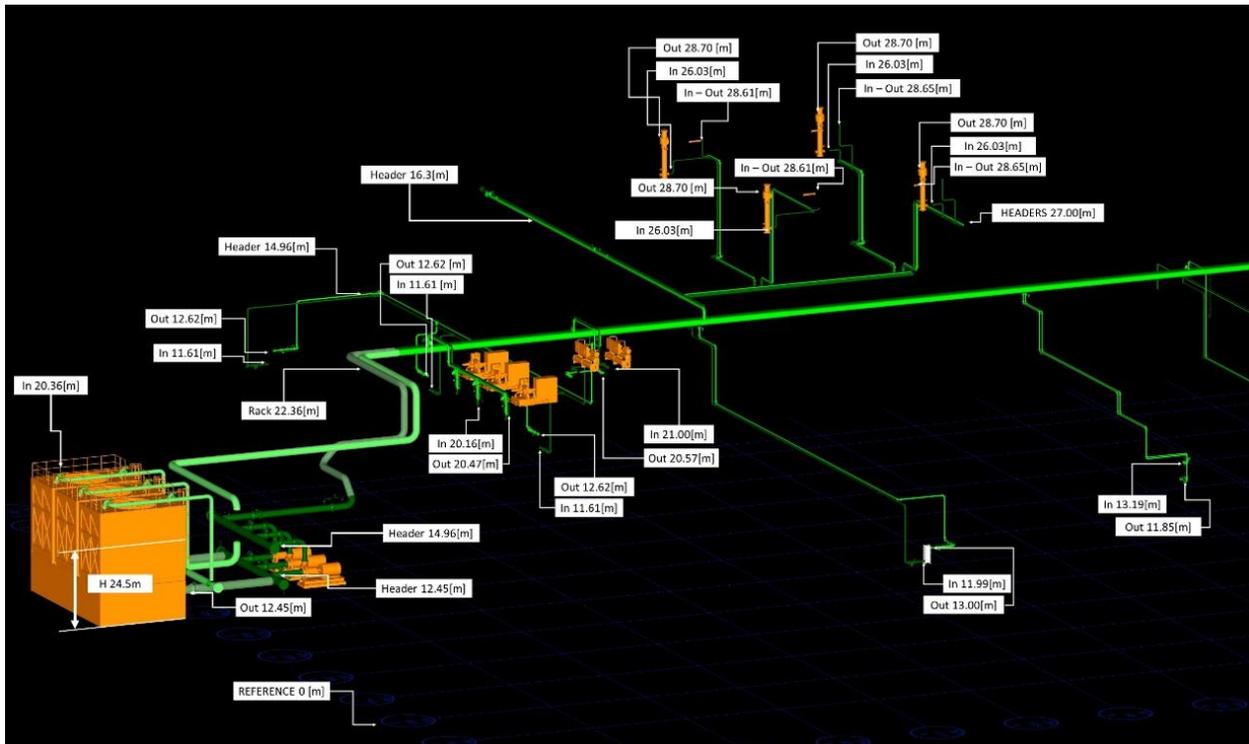


Fig 9. Parte de un área de la planta donde se ve el sistema de refrigeración modelado en OpenPlant

A la izquierda de la imagen se pueden observar las torres de enfriamiento junto a su tanque de almacenamiento. también, se puede apreciar una línea verde oscura y otra línea verde clara. La línea verde oscura representa la línea de alta presión que llevará el agua a los diferentes equipos. También se pueden ver las tres bombas del sistema, dos de las cuales se pretenden utilizar en paralelo y la otra como repuesto. En la imagen, se puede observar que la diferencia de altura entre la salida del tanque y la entrada de las torres de refrigeración es de 20.36 metros menos 12.45 metros, lo que equivale a la cabeza estática que debe superar la bomba sin tener en cuenta las pérdidas de presión por fricción. Es importante tener en cuenta la diferencia de altura en la ecuación de caída de presión en los sistemas de tuberías para asegurarse de que se está considerando correctamente la energía necesaria para mover el agua a través del sistema.

Una vez se cuenta con la información necesaria para construir el modelo, se procede a utilizar las herramientas que proporciona el software en su modulo que resuelve ecuaciones en estado estable. Aunque también puede resolver ecuaciones en estado transitorio, esto no es parte del alcance de este estudio y se dejara desactivado para estudio más detallados en las próximas

---

etapas. En la Fig 10 se presenta un resumen de los elementos utilizado y asignados a el modelo a realizar:

**Bombas (1):** AFT Fathom permite dimensionar la bomba necesaria para el sistema, sumando las necesidades de caudal de cada usuario y agregando un porcentaje de rendimiento. Una vez que se tiene la curva del sistema y se ha seleccionado la bomba, se puede proporcionar una curva real para ver el comportamiento del sistema cuando se abren o cierran válvulas de los usuarios.

**Dead End (2):** Esta característica permite modelar de mejor manera los headers que tienen los diferentes ramales y ramificaciones en el sistema.

**Placas de orificio (3):** Las placas de orificio pueden ser utilizadas para ayudar a balancear el sistema o para simular de manera más precisa un instrumento de medición. Es necesario especificar el área o el porcentaje de reducción deseado para este elemento.

**Válvulas de control (4):** son uno de los elementos más útiles de este software, ya que nos permiten establecer el caudal de operación deseado y arrojar como resultado el valor de Kv necesario para satisfacerlo. En este trabajo se utilizaron tanto válvulas de bola como de mariposa con una curva específica. Además, esta herramienta nos permite conocer el porcentaje de apertura que debe tener la válvula para que el sistema esté funcionando según los requerimientos del escenario correspondiente.

**Reducciones, Tees y codos (5):** Estas características nos permiten simular de manera precisa las pérdidas que tendrán estos accesorios en nuestro modelo de acuerdo con los diámetros y caudales que pasan a través de ellos.

**Reservorios (6):** Estos elementos proporcionan una presión inicial en función de la altura del tanque, de acuerdo con la ecuación del delta P. Es importante tener en cuenta también las pérdidas que se producen en los nozzles. El software nos permite configurar estos parámetros.

**Presión Asignada (7):** Este elemento permite asignar una presión que se supone que debe tener un punto de entrada o salida del sistema en condiciones normales de operación. La presión asignada se utiliza como un valor fijo en el modelo del sistema de tuberías para resolver las ecuaciones de flujo y determinar las presiones y caudales en los diferentes puntos del sistema.

Tubería (8): Se pueden especificar diferentes propiedades de la tubería, como la longitud, el diámetro, el material y las características rugosas de la superficie interior. Estas propiedades influyen en la pérdida de carga y en la velocidad del fluido que fluye a través de la tubería. También se pueden modelar accesorios como codos, tees y reducciones para tener en cuenta sus efectos en la pérdida de carga. En general, el elemento tubería es fundamental para modelar la red de tuberías en un sistema hidráulico y simular su comportamiento hidráulico.

Válvula (9): Las válvulas se pueden colocar en cualquier punto de la tubería y se pueden definir con diferentes características, como el Kv, la curva característica de la válvula, el tipo de válvula (por ejemplo, bola, mariposa, globo, etc.), el diámetro de la válvula, la posición de la válvula (abierta/cerrada) y el porcentaje de apertura. Al utilizar estas características, se puede simular cómo se comportará el sistema cuando se abran o se cierren las válvulas en diferentes posiciones. Además, el software permite calcular la pérdida de presión a través de la válvula en función del flujo y la posición de la válvula.

Válvula Check (10): se utiliza para modelar una válvula que solo permite el flujo en una dirección, evitando el flujo en sentido contrario. Estas válvulas se pueden modelar en el software seleccionando la opción "Válvula Check" en la biblioteca de elementos. Se puede especificar el diámetro de la válvula, el tipo de disco de la válvula, la posición de la válvula (abierta o cerrada) y la presión de apertura de la válvula si se desea modelar la operación de esta en un sistema transitorio. La válvula check es útil en situaciones donde se necesita proteger el sistema de retrocesos o para evitar la inversión de flujos en el sistema.



Fig 10 Herramientas AFT Fathom

La evaluación de diferentes escenarios de operación es crucial para garantizar el correcto funcionamiento del sistema en diferentes condiciones. El escenario D, por ejemplo, es un caso de bajo caudal que representa casi la mitad del caudal requerido en el escenario de diseño. Por lo tanto, es importante evaluar las condiciones del sistema en este escenario específico para asegurar su funcionamiento óptimo.

Table 2 Escenarios proporcionados

| Área                           | Descripción        | Diseño | Nominal | Escenario A | Escenario B | Escenario C | Escenario D |
|--------------------------------|--------------------|--------|---------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| <b>B421-1</b>                  | Chiller            | Max    | Nom     | Min         | Max         | Min         | Min         |
| <b>B421-2</b>                  | Chiller            | Max    | Nom     | Min         | Max         | Min         | Min         |
| <b>B422</b>                    | Chiller            | Max    | Nom     | Min         | Max         | Min         | Min         |
| <b>B441</b>                    | Chiller            | Max    | Nom     | Max         | Max         | Max         | Max         |
| <b>B522-1</b>                  | Condenser          | Max    | Nom     | Min         | Max         | Min         | Max         |
| <b>B522-2</b>                  | Condenser          | Max    | Nom     | Max         | Max         | Max         | Min         |
| <b>B532-1</b>                  | Condenser          | Max    | Nom     | Min         | Max         | Min         | Max         |
| <b>B532-2</b>                  | Condenser          | Max    | Nom     | Max         | Max         | Max         | Min         |
| <b>B549-1</b>                  | Plate & Frame      | Max    | Nom     | Min         | Max         | Min         | Max         |
| <b>B549-2</b>                  | Plate & Frame      | Max    | Nom     | Max         | Max         | Max         | Min         |
| <b>B571</b>                    | Plate & Frame      | Max    | Nom     | Max         | Max         | Min         | Max         |
| <b>B574</b>                    | Condenser          | Max    | Nom     | Max         | Max         | Max         | Min         |
| <b>B581-A</b>                  | Plate & Frame      | Max    | Nom     | Max         | Min         | Max         | Min         |
| <b>B581-B</b>                  | Plate & Frame      | Max    | Nom     | Max         | Min         | Min         | Min         |
| <b>B761</b>                    | Chiller Compressor | Nom    | Nom     | Nom         | Nom         | Nom         | Nom         |
| <b>Total [m<sup>3</sup>/h]</b> |                    | 620.7  | 462.1   | 305.2       | 501.6       | 457.9       | 330.4       |

En total, se consideraron más de 100 escenarios posibles en este estudio, de los cuales se seleccionaron los 5 o 6 más relevantes que se muestran en la Table 2.

---

## V. RESULTADOS Y ANÁLISIS

La aplicación de la metodología permitió obtener resultados en la optimización del sistema de distribución de agua potable. En primer lugar, se logró dimensionar y calibrar la velocidad de más de 2 km de tuberías, asegurando que la velocidad interna se mantuviera cercana a la velocidad de diseño asignada en el proyecto, que era de 2.5 m/s. Además, se identificaron y resolvieron diversos problemas en la red, como equipos mal ubicados que impedían la adecuada presión de trabajo, tuberías con diámetro mayor al recomendado o con velocidades demasiado altas.

La simulación del modelo en AFT Fathom permitió visualizar de manera clara y detallada el comportamiento hidráulico del sistema, lo que facilitó la toma de decisiones en cuanto a la selección de equipos y la definición de estrategias de operación y mantenimiento. Gracias a esto, se obtuvo un diseño óptimo y eficiente del sistema, lo que contribuyó a mejorar el suministro de agua potable a los usuarios finales.

Cabe destacar que el modelo generado es fácil de adaptar a medida que se avanza en el diseño, permitiendo realizar cambios en las pérdidas de presión de los equipos o ajustes en la longitud de las tuberías debido a una reubicación de los usuarios. En resumen, la aplicación de la metodología permitió obtener importantes resultados en la optimización del sistema de distribución de agua de enfriamiento, lo que se tradujo en una mejora significativa en la optimización de este servicio.

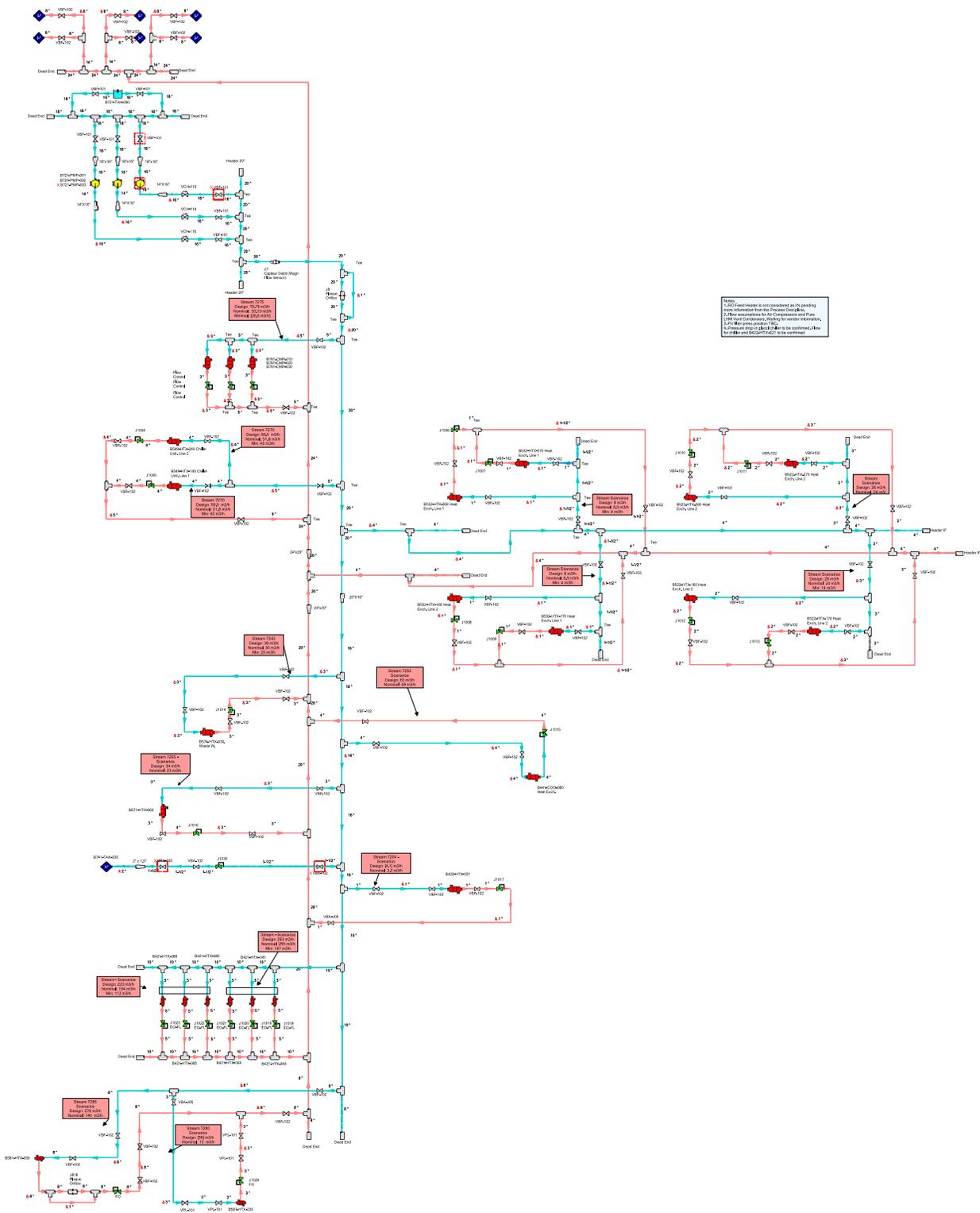


Figura 11 Modelo AFT Fathom

Como otro resultado, se destaca que, gracias a la ayuda de software especializados de selección de bombas, en este caso de la empresa KSB, se logró obtener la curva de una bomba que se ajusta perfectamente a las necesidades del sistema de distribución de agua de enfriamiento. La bomba seleccionada fue la KWP k 200-200, la cual presenta una eficiencia del 81.54 % en su carga nominal, lo cual es un valor satisfactorio. Es importante mencionar que la correcta selección de la bomba permite mejorar la eficiencia energética del sistema y reducir costos operativos a largo plazo.

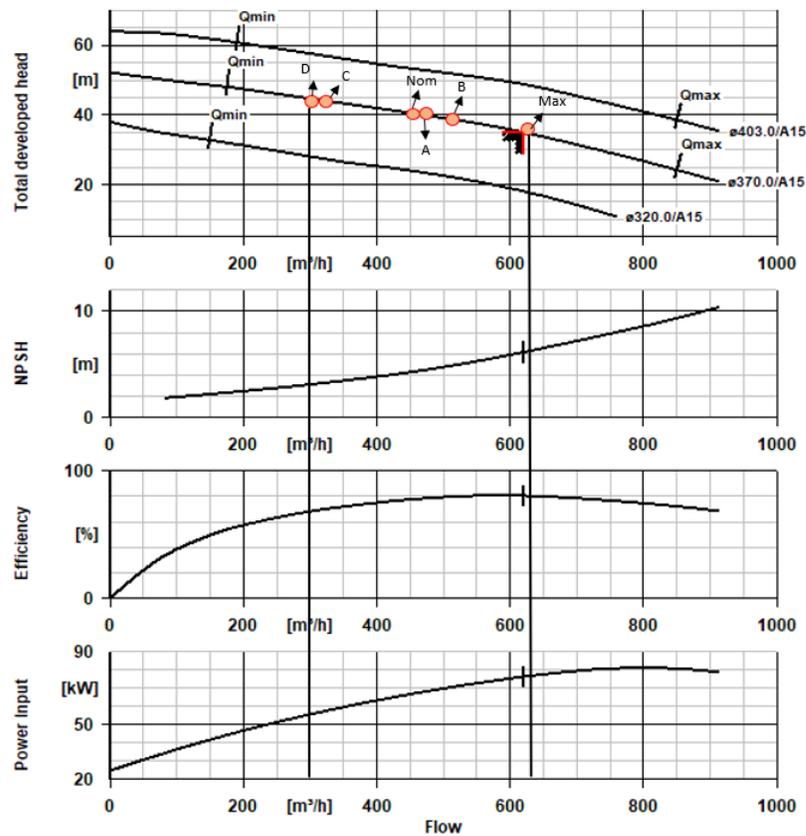


Fig 12 Curva de la bomba seleccionada y sus puntos de operación

Otra observación adicional significativa fue la obtención de los porcentajes de apertura de las válvulas del sistema de enfriamiento, así como el valor Kv de cada una de ellas. Estos datos proporcionan una visión más amplia del sistema, lo que permite seleccionar la válvula adecuada para cada punto de operación. Además, si se desea mantener las válvulas ya preseleccionadas, los porcentajes de apertura obtenidos facilitan el control y la regulación de la red de enfriamiento. De

esta manera, se asegura un flujo adecuado y una presión óptima en cada punto del sistema, lo que se traduce en un funcionamiento eficiente y confiable del proceso de enfriamiento de agua.

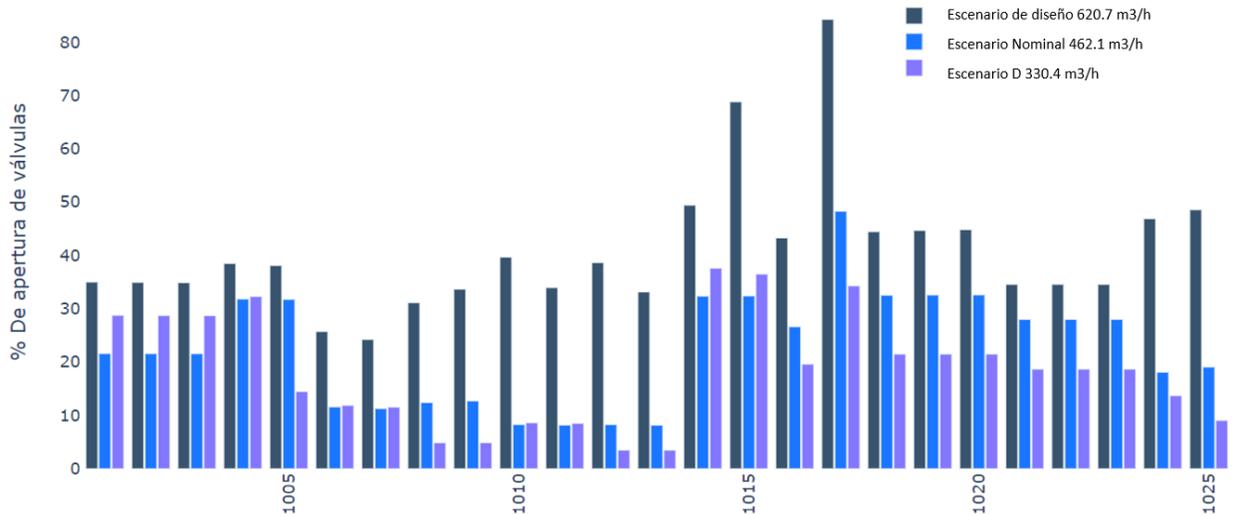


Fig 13 Porcentaje de apertura de válvula obtenido con la curva de bomba original

El análisis que se puede obtener es que la obtención de los porcentajes de apertura de las válvulas del sistema de enfriamiento y el valor Kv de cada una de ellas es fundamental para seleccionar la válvula adecuada para cada punto de operación y para facilitar el control y la regulación de la red de enfriamiento. Estos datos permiten asegurar un flujo adecuado y una presión óptima en cada punto del sistema, lo que se traduce en un funcionamiento eficiente y confiable del proceso de enfriamiento de agua. El valor Kv, en particular, es un parámetro importante en la selección de válvulas ya que indica la capacidad de caudal que pueden suministrar, lo que permite seleccionar la válvula adecuada para el caudal requerido. En resumen, estos datos proporcionan una visión más amplia del sistema de enfriamiento, permitiendo seleccionar y controlar adecuadamente las válvulas para lograr un funcionamiento óptimo y confiable del proceso de enfriamiento de agua

Para los resultados de la evaluación de los diferentes escenarios se obtuvo de la simulación una mejora significativa de algunos al reducir la velocidad nominal de las bombas. En particular, se logró reducir la velocidad en un 20% utilizando las bombas actuales, lo que permitió ajustar la curva a puntos más eficientes. En escenarios anteriores, se redujo la velocidad hasta el punto en

que la bomba no pudo suministrar la presión necesaria. Estos resultados se muestran claramente en la figura 12, lo que permitió tomar decisiones informadas sobre el rendimiento de las bombas y su velocidad óptima de operación. Esta información es fundamental para el mantenimiento y la operación del sistema de distribución de agua de enfriamiento, ya que permite reducir los costos de energía y mejorar el rendimiento del sistema.

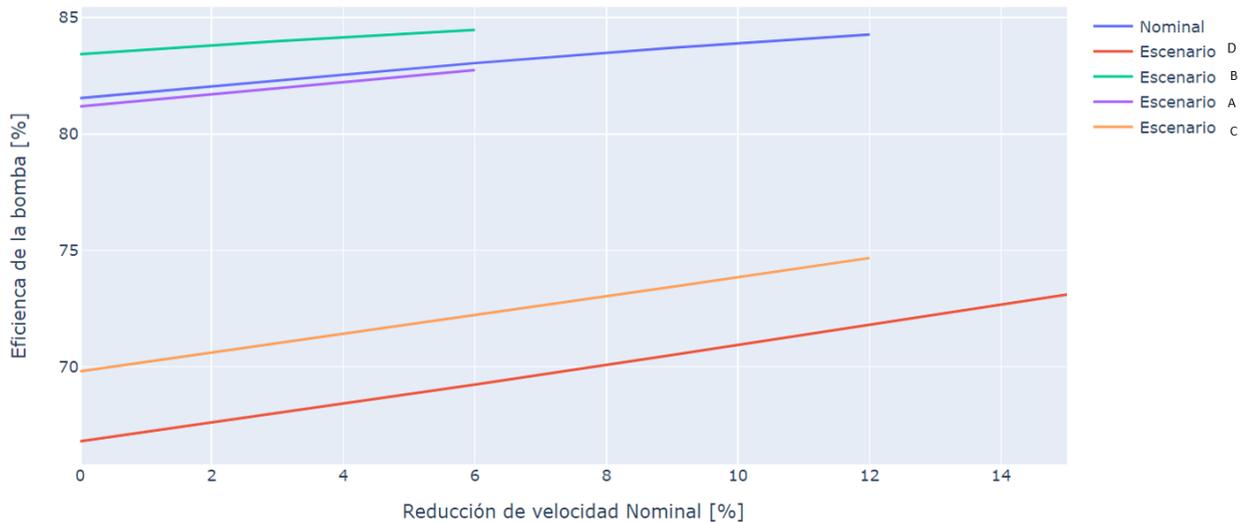


Fig 14 Aumento de la eficiencia de la bomba en los diferentes escenarios con un variador de velocidad

Este resultado es significativo ya que como se observa en la Fig 14 la gráfica de velocidad se realizó hasta el punto en que la bomba no pudo suministrar la presión necesaria, lo que evidencia la importancia de encontrar la velocidad óptima de operación de las bombas. Esto permite tomar decisiones informadas sobre el rendimiento de las bombas y su velocidad óptima de operación, lo que es fundamental para el mantenimiento y la operación del sistema de distribución de agua de enfriamiento. La reducción en la velocidad de las bombas también permite reducir los costos de energía y mejorar el rendimiento del sistema, lo que se traduce en una mejora en la eficiencia y en la rentabilidad del proceso de enfriamiento de agua. En resumen, la simulación permitió identificar la velocidad óptima de operación de las bombas, lo que permitió mejorar la eficiencia del sistema y reducir los costos operativos a largo plazo.

## VII. CONCLUSIONES

Conclusión 1: La aplicación de la metodología permitió la optimización del sistema de distribución de agua de refrigeración esto incluye el dimensionamiento y calibración de la velocidad de más de 2 km de tuberías, la reubicación de varios usuarios que permitió una mejor respuesta del sistema en cuanto a la presión de entrada y.

Conclusión 2: La simulación del modelo en AFT Fathom permitió una visualización clara y detallada del comportamiento hidráulico del sistema. Gracias al modelo que se creó, que cuenta con una gran cantidad de información de las curvas de cada usuario y el comportamiento de sus pérdidas se puede aproximar a un diseño final y ayudar con la toma de decisiones futuras en cuanto la definición de estrategias de operación y mantenimiento.

Conclusión 4: La bomba seleccionada (KWP k 200-200) con una eficiencia del 81,54% en su carga nominal, es una bomba que cumple con las necesidades actuales del proyecto. Esta bomba frente a los distintos escenarios se comportó de forma eficiente y su punto de operación más crítico fue en el escenario D con un 74%. En una etapa cercana es posible agregar loop de recirculación para que el caudal no disminuya tanto y analizar si es posible mejorar la eficiencia energética del sistema y reducir los costos operativos a largo plazo.

Conclusión 5: La obtención de los porcentajes de apertura de la válvula y el valor Kv es importante para obtener información de si se está seleccionando la válvula adecuada, si esta trabajando en los puntos de operación óptimos o si es necesario cambiar la curva de la válvula por otra que se ajuste mejor. Las válvulas seleccionadas se han comportan de forma adecuada y han mantenido la presión óptima en cada punto y lograr una operación eficiente y confiable del proceso de enfriamiento de agua.

---

## VIII. RECOMENDACIONES

Es importante actualizar el modelo a medida que se obtenga nueva información relevante, por ejemplo, en caso de adición o modificación de equipos o cañerías. De esta manera, se asegura que el modelo sea lo más preciso y representativo posible del sistema real.

Además, se recomienda continuar con los estudios de esfuerzos en programas especializados, con el objetivo de garantizar un análisis completo del diseño del sistema. Esto permitirá identificar y prevenir posibles fallas o problemas de seguridad, y asegurar que el sistema funcione de manera confiable y segura.

Estas recomendaciones son esenciales para garantizar la optimización continua del sistema de distribución de agua de enfriamiento, y garantizar su funcionamiento óptimo y confiable. Como ingenieros de piping, es nuestro deber seguir evaluando y mejorando el diseño del sistema a medida que se obtiene nueva información y se identifican áreas de mejora.

---

## REFERENCIAS

- [1] T. Tran and V. T. Luong, “Lithium Production Processes,” in *Lithium Process Chemistry*, Elsevier, 2015, pp. 81–124. doi: 10.1016/B978-0-12-801417-2.00003-7.
- [2] ASME B31.1: building services piping. American Society of Mechanical Engineers.
- [3] ASME B31.4: building services piping. American Society of Mechanical Engineers.
- [4] ASME B31.9: building services piping. American Society of Mechanical Engineers.
- [5] A. S. Al-Ghamdi, “Performance Analysis of Automated Control System for Condenser Water Treatment Unit,” *Engineering*, vol. 04, no. 01, pp. 55–67, 2012, doi: 10.4236/eng.2012.41008.
- [6] H. W. Stanford, *HVAC water chillers and cooling towers: fundamentals, application, and operation*. in Mechanical engineering. New York: Marcel Dekker, Inc, 2003.
- [7] M. L. Nayyar, Ed., *Piping handbook*, 7th ed. in McGraw-Hill handbooks. New York: McGraw-Hill, 2000.
- [8] J. P. Ellenberger, *Piping and pipeline calculations manual: construction, design fabrication and examination*, Second edition. Amsterdam; Boston: Elsevier/Butterworth, 2014.
- [9] “AFT Fathom Quick Start Guide - English Units”.
- [10] N. P. Lieberman and E. T. Lieberman, *A working guide to process equipment*, Fourth edition. New York: McGraw-Hill, 2014.
- [11] R. Mukherjee, “Effectively Design Shell-and-Tube Heat Exchangers,” *ND*, 1998.
- [12] “Pump Fundamentals: Head & Flow,” *Pumps.org*. <https://edl.pumps.org/pump-fundamentals/combined.html> (accessed Apr. 10, 2023).
- [13] R. P. Barreto, “Procedimiento para evaluar y seleccionar bombas centrifugas,” 2004.

---

## ANEXOS

Los siguientes anexos contienen documentos de interés para el proceso de trabajo de grado, así como trucos y recomendaciones que surgen constantemente en la elaboración de un documento en Word.

*Anexo A. Archivo de la simulación “North Cooling Water System”*

*Anexo B. Diagramas de usuarios, longitudes de tubería, elevaciones de usuarios, Resumen de PFD y diagrama de simulación*