



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

**Cálculos hidráulicos y simulación para optimizar la capacidad operativa de bombas
centrifugas en una planta de potasio bajo los requerimientos actuales de producción**

Daniela De La Rosa Hernández

Informe de práctica presentado para optar al título de Ingeniero Mecánico

Asesor

Luis Fernando Córdoba Henao, Magíster (MSc) en Antropología

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería
Ingeniería Mecánica
Medellín, Antioquia, Colombia
2025



Cita

De La Rosa Hernández [1]

Referencia

Estilo IEEE (2020)

- [1] De La Rosa Hernández, “Cálculos hidráulicos y simulación para optimizar la capacidad operativa de bombas centrífugas en una planta de potasio bajo los requerimientos actuales de producción”, Trabajo de grado profesional, Ingeniería Mecánica, Universidad de Antioquia, Medellín, Antioquia, Colombia, 2024



Biblioteca Carlos Gaviria Díaz

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

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

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 padres, por su amor incondicional, su apoyo y por ser mi mayor inspiración en cada paso de este camino. A mi familia y amigos, por acompañarme en momentos complejos y que contribuyeron a que este sueño se hiciera realidad.

Agradezco profundamente a mis profesores y asesores, por su guía, conocimiento y paciencia durante este proceso. A la empresa Hatch- Medellín, por brindarme la oportunidad de aprender y crecer profesionalmente. A mis compañeros de estudio y trabajo, por su colaboración y por hacer de esta experiencia algo invaluable.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	7
ABSTRACT	8
I. INTRODUCCIÓN	9
II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	11
Antecedentes:	11
III. JUSTIFICACIÓN.....	12
IV. OBJETIVOS	13
A. Objetivo general	13
B. Objetivos específicos	13
VI. MARCO TEÓRICO.....	14
A. Contexto	14
B. Fundamentos Matemáticos	14
C. Normas.....	15
D. Recursos	16
VII. METODOLOGÍA Y ANÁLISIS.....	18
A. Fase 1: Recopilación de datos	18
B. Segunda Fase: Cálculos Hidráulicos	23
C. Tercera Fase: Simulación	23
VIII. RESULTADOS	25
X. CONCLUSIONES.....	32
XI. RECOMENDACIONES.....	33
REFERENCIAS	34
XIII. ANEXOS.....	35

LISTA DE TABLAS

TABLA I CAPACIDADES DE LAS BOMBAS	19
TABLA II PROPIEDADES DE LAS BOMBAS	19
TABLA III RESULTADOS DE LAS BOMBAS.....	25
TABLA IV VELOCIDADES DE FLUJO	28
TABLA V VELOCIDADES DE FLUJO CALCULADAS VS OPTIMAS.....	29
TABLA VI RESULTADOS OPTIMOS DE LAS BOMBAS	30

LISTA DE FIGURAS

Fig. 1. Sistema de bombas en Simple en Área de tanques.....	17
Fig. 2. Fases del proyecto.....	18
Fig. 3. Área de la planta donde se ve el sistema de bombas modelado en OpenPlant.....	20
Fig. 4. Consolidado de sistemas de bombeo calculados en PFD. [Modificado].....	21
Fig. 5. Consolidado de sistemas de bombeo calculados en P&ID. [Modificado	22
Fig. 6. Imagen bombas BQ-3012RC-01@03 calculadas en Fathom.	25
Fig. 7. Imagen bombas BQ-3013RC-13@15 calculadas en Fathom.	26
Fig. 8. Imagen bombas BQ-3016RC-07 y BQ-7060RC-14 calculadas en Fathom.	26
Fig. 9. Imagen bombas BQ-3015RC-01/02/08/09 calculadas en Fathom.....	27

SIGLAS, ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

PFD	Diagramas de Flujos de Procesos
PI&D	Diagramas de Tuberías e Instrumentación
ASME	The American Society of Mechanical Engineers
ANSI	American National Standards Institute
INDISA	Ingenieros Diseñadores Asociados SA
MEL	Listado de Equipos Mecánicos

RESUMEN

Este documento presenta una propuesta integral para calcular y validar la capacidad operativa de las bombas centrífugas del área de tanques en una planta de potasio en Río Colorado, Argentina. Originalmente diseñada para una producción de 4.35 MTPA (millones de toneladas por año) en 2012, el proyecto enfrentó interrupciones y una reducción de capacidad a 1.4 MTPA en 2017, lo que llevó a su suspensión. Con la reactivación del proyecto en 2025 bajo la misma capacidad operativa (1.4 MTPA) y en fase de cotización, surge la necesidad de verificar si las bombas cumplen con los requerimientos, dada la falta de documentación técnica que valide las especificaciones actuales. Mediante cálculos hidráulicos y simulaciones de software, se determinó las especificaciones de las bombas y verificó su capacidad para transportar de forma segura. La metodología implicó un detallado proceso de recopilación de datos y simulación lo que permitió modelar el comportamiento hidráulico de los equipos y las tuberías. A partir de esta información, se obtuvieron las capacidades de las bombas bajo los requerimientos de caudal del sistema. Los resultados determinaron si las especificaciones de los equipos actualmente son los adecuados para garantizar el funcionamiento óptimo del sistema y servirá de base para que la empresa tome decisiones futuras y la considere en la ingeniería detallada del proyecto.

***Palabras clave* — Bombas centrífugas, pérdidas de carga, cálculo hidráulico, sistema de bombeo, AFT Fathom.**

ABSTRACT

This document presents a comprehensive proposal for calculating and validating the operational capacity of the centrifugal pumps in the tank area of a potassium plant in Rio Colorado, Argentina. Originally designed for a production capacity of 4.35 MTPA (million tons per year) in 2012, the project faced disruptions and a capacity reduction to 1.4 MTPA in 2017, leading to its suspension. With the project's reactivation in 2025 under the same operational capacity (1.4 MTPA) and in the quotation phase, there is a need to verify whether the pumps meet the current requirements, given the lack of technical documentation validating the updated specifications. Through hydraulic calculations and software simulations, this study aims to determine the pump specifications and verify their ability to safely transport the required flow. The methodology involves a detailed data collection process and simulation, enabling the modeling of the hydraulic behavior of the equipment and pipelines. Based on this information, the pump capacities were assessed according to the system's flow requirements. The results determined whether the current equipment specifications are adequate to ensure optimal system performance and will serve as a basis for the company's future decision-making and will be considered in the project's detailed engineering phase.

Keywords — Centrifugal pumps, pressure drops, hydraulic calculation, pump system
Fathom.

I. INTRODUCCIÓN

Hatch, una firma global de ingeniería con presencia en más de 15 países y reconocida por su enfoque multidisciplinario en sectores como minería, energía e infraestructura, ha desempeñado un papel clave en el desarrollo de proyectos industriales de gran escala. En Medellín, su alianza con la firma INDISA ha potenciado la participación de profesionales colombianos en proyectos internacionales. La empresa se centra la mayor parte del tiempo en proyectos mineros, incluyendo el desarrollo de la planta de potasio de Río Colorado en Argentina.

En la industria química y agrícola, las plantas de producción de potasio desempeñan un papel crucial, porque este elemento es esencial para la fabricación de fertilizantes y otros productos industriales. Según la International Fertilizer Association (IFA), el potasio es uno de los tres macronutrientes primarios (junto con el nitrógeno y el fósforo) que garantizan la seguridad alimentaria global, con una demanda anual que supera los 45 millones de toneladas métricas (IFA, 2023). El diseño eficiente de estos sistemas, incluyendo el cálculo preciso de parámetros en bombas y tuberías, es fundamental para optimizar la producción. Sin embargo, el sector industrial enfrenta desafíos significativos cuando los proyectos experimentan cambios en su capacidad operativa.

Este trabajo está enfocado en los cálculos y simulación hidráulica del sistema de bombeo del área de tanques en una planta de potasio, cuyo diseño original data del año 2012 para una producción de 4.35 millones de toneladas por año (MTPA). Sin embargo, debido a circunstancias externas, el proyecto fue suspendido en su fase de ejecución, dejando parte de los equipos ya instalados. Posteriormente fue retomado en el año 2017, con una capacidad reducida a 1.4 MTPA.

El principal problema radica en la falta de documentación técnica que valide las capacidades del MEL de 2017 ¹. Esto genera incertidumbre sobre si las especificaciones actuales son las óptimas o si, por el contrario, podrían llevar a un sobredimensionamiento energético o riesgos operativos. Además, dado que el proyecto se reactivó en 2025 bajo la misma capacidad (1.4

¹ MEL: Listado de Equipos Mecánicos.

MTPA), y el proyecto actualmente se encuentra en cotización, se identificó como prioritario el desarrollo de un estudio que permita validar los cálculos hidráulicos y verificar, si las bombas cumplen con los requerimientos actuales.

Para garantizar la precisión y fiabilidad de los equipos, se abordaron los cálculos hidráulicos, criterios de diseño de las bombas, caracterización de materiales y fluidos, análisis y tratamiento de datos, las consideraciones sobre mecánica de fluidos y otros conceptos relacionados. Estos conceptos, basados en principios de ingeniería mecánica, sirven de fundamento matemático y base práctica para la ejecución final de las bombas. Se emplearon herramientas de simulación avanzadas (AFT Fathom) y metodologías de cálculo basadas en normas internacionales (ASME², Crane) para obtener una visión detallada del comportamiento del sistema. El análisis consideró variables como caudal, altura manométrica, pérdida de presión y velocidades límite. Los hallazgos permitirán a la empresa tomar decisiones informadas sobre la adecuación de las bombas y proponer ajustes en el diseño del sistema.

² ASME: The American Society of Mechanical Engineers

II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En plantas de procesos industriales, el correcto dimensionamiento de los sistemas de bombeo es fundamental para garantizar la eficiencia operativa, la seguridad y la rentabilidad del proceso. En este caso, el proyecto actualmente no cuenta con cálculos técnicos suficientes que validen si las bombas seleccionadas en ese ajuste son realmente las óptimas para la operación actual. Esta incertidumbre plantea riesgos como:

- Sobredimensionamiento energético: Si las bombas operan muy por debajo de su punto de eficiencia, consumirán más energía de la necesaria, incrementando costos operativos.
- Desgaste acelerado de componentes: Velocidades de flujo excesivas en tuberías pueden causar erosión en materiales como la fibra de vidrio, reduciendo su vida útil.
- Fallas en la instrumentación: Válvulas, medidores de flujo y otros accesorios podrían no funcionar correctamente si el sistema opera fuera de sus rangos de diseño.

Por lo tanto, este trabajo busca resolver el siguiente interrogante: *¿Las bombas actualmente instaladas o propuestas pueden manejar eficientemente los nuevos caudales sin comprometer su integridad mecánica?* La respuesta a esta pregunta asegurará la confiabilidad del sistema en estudio.

Antecedentes:

Diversos estudios han demostrado que el correcto dimensionamiento de sistemas de bombeo es esencial para garantizar la eficiencia energética y la durabilidad de los equipos en plantas industriales. Por ejemplo, Herrán-Sandoval (2014) desarrolló una metodología para calcular la capacidad óptima de tanques hidroneumáticos mejorando su eficiencia operativa. En su estudio aplicado a una planta de vidrio en Bogotá, se evidenció que un mal dimensionamiento no solo incrementa el consumo energético, sino que también acelera el desgaste de los componentes del sistema, lo cual es coherente con los riesgos identificados en el presente proyecto. Este antecedente resalta la importancia de validar técnicamente la selección de los equipos en función de las condiciones reales de operación, especialmente en industrias donde los ajustes de capacidad son frecuentes y críticos para la continuidad del proceso productivo.

III. JUSTIFICACIÓN

Este proyecto surge de la necesidad crítica de validar técnicamente el desempeño de las bombas centrífugas en la planta de potasio tras la reducción de su capacidad operativa, ya que operar con parámetros no verificados podría comprometer el rendimiento del sistema y la integridad de los equipos. Por lo tanto, al integrar metodologías de cálculo hidráulico y aprovechando las herramientas de simulaciones, este estudio garantizó la confiabilidad del sistema de bombeo bajo las nuevas condiciones y también optimiza los parámetros operativos para maximizar la eficiencia y prolongar la vida útil de los equipos. Adicionalmente, contribuye a la sostenibilidad de las operaciones reduciendo riesgos operacionales, asegurando así que la planta mantenga alto los estándares de seguridad y productividad en su nueva capacidad de producción.

IV. OBJETIVOS

Considerando toda la contextualización anterior, específicamente la problemática, el objetivo principal de este trabajo que determina su alcance, es:

A. Objetivo general

Calcular la capacidad operativa de las bombas del área de tanques para la nueva capacidad de producción de la planta, mediante conceptos hidráulicos y simulación en AFT Fathom, para validar su funcionamiento óptimo de los equipos bajo la configuración actual.

B. Objetivos específicos

Para el objetivo general, es fundamental seguir algunos pasos explicados en los siguientes ítems como objetivos específicos:

1. Obtener información relevante de los diagramas PFD³ y P&ID⁴ del sistema de bombas (2012) y las modificaciones propuestas (2017), incluyendo caudales, características de tuberías y propiedades de los fluidos.
2. Calcular las pérdidas de carga totales (por fricción y accesorios) y la potencia para cada bomba del sistema cálculos hidráulicos, considerando los nuevos caudales de operación.
3. Simular el comportamiento hidráulico en AFT Fathom para validar los cálculos manuales, identificando posibles discrepancias o riesgos operativos.
4. Comparar los resultados obtenidos con las especificaciones técnicas actuales, evaluando la viabilidad de mantener las bombas existentes o requerir ajustes en su operación.
5. Proponer recomendaciones técnicas para optimizar el sistema de bombeo, incluyendo posibles modificaciones y parámetros de operación que aseguren un rendimiento eficiente y seguro.

³ PFD: Diagrama de Flujo de Procesos

⁴ P&ID: Diagramas de Tuberías e Instrumentación

VI. MARCO TEÓRICO

El presente trabajo se desarrolla dentro del contexto de sistemas de bombeo industrial para plantas de procesamiento de potasio, sustentado en un fundamento matemático basado en la mecánica de fluidos y ecuaciones hidráulicas fundamentales. Además, se ajusta a las normas establecidas en la disciplina, utilizando recursos como modelado para garantizar rigor técnico en la evaluación del sistema.

A. Contexto

Los sistemas de bombeo en plantas industriales, como la de potasio en estudio, representan componentes críticos para el transporte eficiente de fluidos con propiedades específicas. Este trabajo se centra específicamente en el análisis del área de tanques de una planta, para el caso específico de bombas centrífugas en plantas de procesamiento de potasio, el rendimiento hidráulico está determinado por tres variables críticas: el caudal (Q), la altura manométrica (H) y la potencia requerida (P), relacionadas mediante la ecuación 5. La reducción de capacidad operativa desde los 4.35 MTPA iniciales hasta los actuales 1.4 MTPA ha generado la necesidad de reevaluar completamente los parámetros hidráulicos, considerando no solo los caudales reducidos, sino también los cambios realizados en el modelo de la planta 3D. Este análisis se sustenta en principios fundamentales de mecánica de fluidos, complementados con herramientas computacionales avanzadas que permiten simular diversos escenarios operativos, garantizando así que las soluciones propuestas mantengan su validez bajo distintas condiciones de trabajo. La comprensión integral de estos fenómenos es fundamental para optimizar los equipos del sistema, asegurar su operación eficiente y prolongar la vida útil de las bombas en un entorno industrial exigente.

B. Fundamentos Matemáticos

El análisis hidráulico de sistemas de bombeo en plantas industriales se fundamenta en principios clásicos de la mecánica de fluidos y en expresiones matemáticas que permiten caracterizar el comportamiento del fluido en movimiento, las pérdidas de energía y el

dimensionamiento adecuado de los componentes del sistema. A continuación, se describen las ecuaciones más relevantes utilizadas en este estudio que incluye altura manométrica total, presión hidrostática, número de Reynolds, Pérdidas por fricción, Pérdidas locales y potencia. La información completa está en el Anexo 1, de donde se sacan las siguientes consideraciones:

- Dado que no se dispone de información sobre la variación de la cabeza de la bomba con el caudal, no se considera el análisis de curvas del sistema y rendimiento de la bomba.
- De acuerdo con lo reportado en (Harlan H & H. Bengtson), las pérdidas en medidores de flujo magnético y sónicos son despreciables [8]. Por esta razón, no fueron consideradas en los cálculos realizados en este trabajo. La mejor fuente para estimar pérdidas en un medidor es un manual técnico del fabricante, ya que proporciona curvas o valores típicos basados en pruebas experimentales.


C. Normas


Este estudio se desarrolló con base en normas internacionales para asegurar que el diseño y la evaluación cumplieran con los más altos estándares técnicos. Entre ellas se destaca:


- **Crane:** El desarrollo de los cálculos hidráulicos se basó en la metodología establecida en el manual Crane - Flow of Fluids Through Valves, Fittings, and Pipe [2], referencia fundamental para el diseño de sistemas de tuberías industriales. Referencia clásica en el análisis de pérdida de carga en sistemas de flujo, utilizada para determinar factores de fricción, coeficientes de accesorios y metodología de cálculo.
- Las velocidades recomendadas se verificaron en el documento **Piping Design Criteria** de la empresa, el cual establece guías para el diseño hidráulico de sistemas de tuberías. Estas recomendaciones están alineadas con estándares internacionales como: ASME B31.3 (Process Piping): Para criterios generales de diseño y presión permitida. API RP 14E (Offshore Production Platform Piping): Para velocidades en servicios de hidrocarburos. Las velocidades específicas para fluidos se basaron en las tablas 7-1 y 7-2.


D. Recursos


El software AFT Fathom se ha consolidado como uno de los estándares industriales más confiables para la simulación y análisis de sistemas hidráulicos de flujo incompresible. Esta herramienta permite modelar con precisión el comportamiento de bombas, tuberías y accesorios, proporcionando una visión detallada de las características hidráulicas del sistema bajo condiciones reales de operación. Para llevar a cabo la simulación, fue necesario comprender en detalle la estructura del sistema de bombeo. Con base en esta comprensión, se procedió a construir un modelo digital completo del sistema, incorporando las siguientes funcionalidades del software:


Bombas  : AFT Fathom permite dimensionar las bombas requeridas en función del caudal total demandado por los usuarios del sistema. Una vez definida la curva del sistema, se pueden generar curvas reales de operación para analizar el comportamiento frente a la apertura o cierre de válvulas.

Dead End  : Herramienta útil para simular terminaciones de ramales o headers no conectados que influyen en la distribución del flujo.


Placas de orificio  : Se emplean para balancear el sistema o representar instrumentos de medición. Se puede especificar el área o porcentaje de reducción deseado.


Válvulas de control  : Permiten establecer caudales deseados, entregando como resultado el coeficiente de paso K_v^5 necesario para cumplir con dicho caudal. Cabe aclarar que actualmente no se cuenta con información detallada sobre el sistema de control de válvulas debido a que el proyecto se encuentra detenido en una ingeniería básica de diseño. En caso de reanudarse, será necesario definir el esquema de control para cada área operativa.


Reducciones, Tees y codos  : Estos accesorios se modelan considerando las pérdidas localizadas que generan, según sus diámetros, materiales y velocidades de flujo.

Reservorios  : Representan fuentes o receptores de presión, calculando automáticamente la presión en función de la altura del fluido (ΔP), e incluyendo pérdidas por boquillas si es necesario.

⁵ K_v : Coeficiente de flujo de válvula.

Tubería : El software permite definir la longitud, diámetro, material y rugosidad interna, factores que afectan directamente las pérdidas de carga y la velocidad del fluido. También se modelan accesorios como codos, tees y reducciones.

Válvula : Las válvulas pueden configurarse en cualquier punto de la red, con atributos como tipo (bola, mariposa, globo, etc.), diámetro, posición (abierta o cerrada) y porcentaje de apertura. Se calcula automáticamente la pérdida de presión en función del flujo.

Válvula Check : Diseñadas para permitir el flujo en una sola dirección, previniendo el retroceso. Se puede definir su diámetro, tipo de disco y presión de apertura para sistemas con condiciones transitorias.

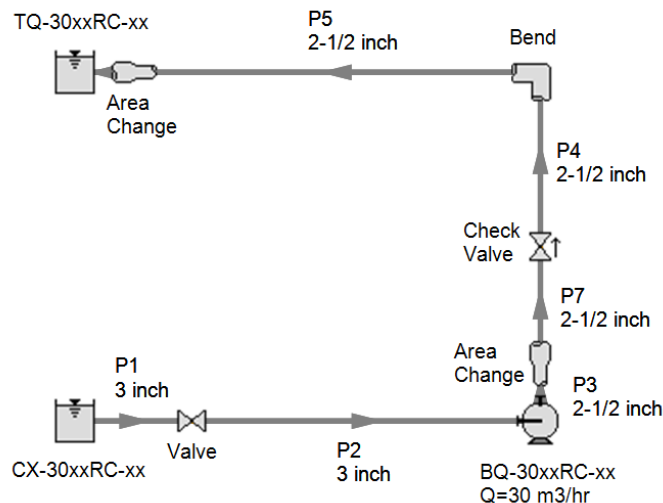


Fig. 1. Sistema de bombas en Simple en Área de tanques.

Se creó un modelo digital del sistema ingresando las propiedades físicas de los fluidos, la geometría exacta de las tuberías (incluyendo diámetros, longitudes y materiales), y la configuración completa de accesorios. El software permitió verificar las pérdidas de carga calculadas manualmente y evaluar el comportamiento del sistema bajo diferentes condiciones operativas. Adicionalmente, se realizó un análisis comparativo entre los resultados obtenidos en Excel y Fathom para garantizar la coherencia de los cálculos, identificando y corrigiendo posibles discrepancias en los valores de velocidad, presión y potencia.

VII. METODOLOGÍA Y ANÁLISIS

La metodología del proyecto se fundamentó en un proceso de análisis hidráulicos, estructurado en cinco fases principales: recolección de datos, cálculos hidráulicos y validación computacional para analizar y garantizar el funcionamiento eficiente de los equipos. Por último, se documentaron los hallazgos, recomendaciones y conclusiones en el informe.



Fig. 2. Fases del proyecto.

A. Fase 1: Recopilación de datos

En la primera fase, fue fundamental filtrar los datos, que se recogieron de varias fuentes, incluidos modelo 3D, diagramas detallados de la planta facilitados por la empresa, información sobre las propiedades físicas de los fluidos, incluidas la densidad, la viscosidad, la gravedad específica y las condiciones de temperatura, procedentes de bases de datos de procesos.

Cada sistema calculado necesitaba un paquete de documentos específico compuesto por:

- MEL⁶ (2017), donde se tienen los caudales, alturas manométrica y potencias de las bombas actuales.
- Los diagramas de flujo del proceso (PFD), que ofrecen una visión general del proceso.
- Los diagramas de tuberías e instrumentación (P&ID) relevantes para el sistema.

⁶ MEL: Listado de Equipos Mecánicos.

- Un documento de especificaciones (clase de tubería) que describa las características de materiales específicos y las propiedades de los fluidos del sistema.
- Medidas de distancia extraídas del modelo 3D, proporcionadas como coordenadas.
- Un documento de criterios de diseño, utilizado para determinar las velocidades admisibles a lo largo de la tubería.

El punto de partida consistió en la extracción de parámetros operacionales desde los diagramas de flujo de proceso (PFD), donde se identificaron los caudales nominales para cada bomba. Un resumen de ambos puede verse en la **TABLA I**.

TABLA I
CAPACIDADES DE LAS BOMBAS

TAG No.	Unidad	BQ-3012RC-01@03	BQ-3013RC-13@15	BQ-3015RC-01/02	BQ-3015RC-08	BQ-3015RC-09	BQ-3016RC-07	BQ-7060RC-14
Producción de 4.35 MTPA (Datos Anteriores)								
Caudal (Q)	m³/h	400	1365	70	30	15	-	-
Altura Manométrica (H)	mca	20	28	9	20	6	-	-
Potencia	kW	45	185	4	7.5	3	-	-
Estado del equipo	-	Instalado	Nuevo	Instalado	Nuevo	Nuevo	Nuevo	Nuevo
Producción de 1.4 MTPA (Datos Actuales - Por validar)								
Caudal (Q)	m³/h	400	1006	11	11	11	39	39
Altura Manométrica (H)	mca	20	28	9	20	6	57	30
Potencia	kW	32	120	0.3	1	0.2	8	4
Producción de 1.4 MTPA (Calculados)								
Caudal de diseño (Q)	m³/h	280	735	15	30	15	31	31

Nota: variación de las especificaciones de las bombas.

Luego, en el documento de especificaciones se verificaron las propiedades fisicoquímicas de los fluidos transportados de la **TABLA II**, los valores como la viscosidad y la densidad son necesarios para realizar los cálculos.

TABLA II
PROPIEDADES DE LAS BOMBAS

TAG No.	Unidad	BQ-3012RC-01@03	BQ-3013RC-13@15	BQ-3015RC-01/02	BQ-3015RC-08	BQ-3015RC-09	BQ-3016RC-07	BQ-7060RC-14
Propiedades								
Material de tubería	-	Fibra de Vidrio.	Fibra de Vidrio.	Acero al carbono.	Acero al carbono.	Acero al carbono.	Acero al carbono.	Acero al carbono.
Fluido	-	SSE	SPP	OIP	OIP	OIP	ARE	ARE
Característica del Fluido	-	Early Brine (Salmuera inicial).	Salmuera de Producción conteniendo petróleo.	Aceite de Inyección en los Pozos.			Agua Recuperada.	Agua Recuperada.
Clase de Presión	psi	150#	150#	150#	150#	150#	150#	150#
Gravedad Específica	S.G	1.15	1.23	0.9	0.9	0.9	1	1
Temperatura	°C	30	53	20	20	20	15	15
Densidad	kg/m³	1150	1230	900	900	900	1000	1000
Viscosidad Dinámica	Pa·s	3.6E-03	2.0E-03	5.0E-03	5.0E-03	5.0E-03	1.0E-03	1.0E-03

Nota: Información extraída de diamagras.

La determinación de las características geométricas del sistema se realizó mediante el análisis del modelo 3D de la **Fig. 3**, extrayendo las longitudes de tubería (L). Se extrajeron los diámetros nominales (D) y configuraciones de accesorios especificados en el P&ID de la **Fig. 5**.

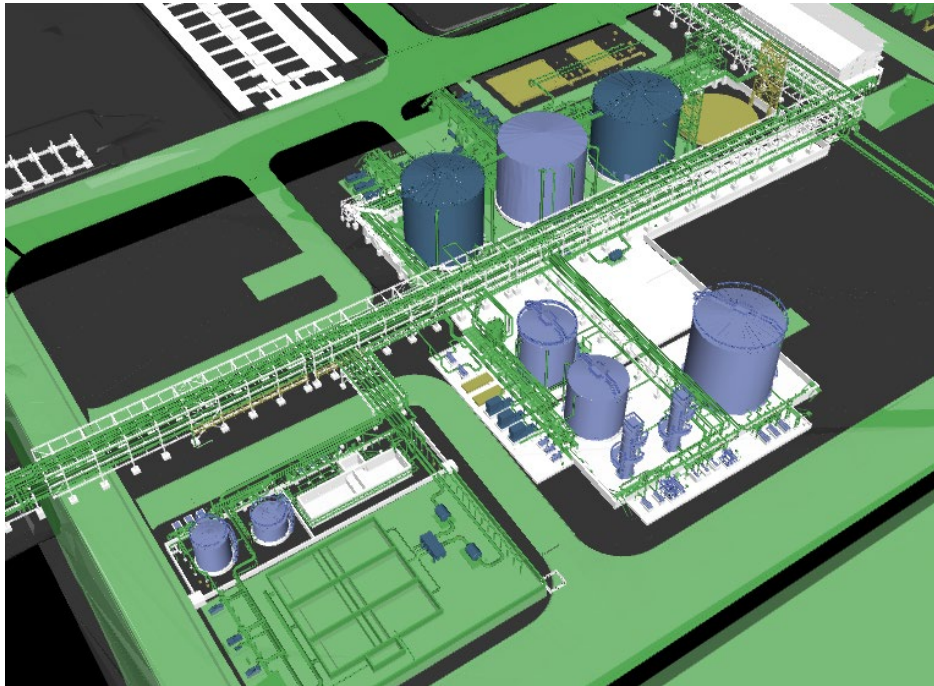


Fig. 3. Área de la planta donde se ve el sistema de bombas modelado en OpenPlant.

Se delimitó el espacio calculado ya que no se contaba con información suficiente de algunas bombas de esta área que interconectan con otras o fuera de la planta de procesos. El análisis se limitó a cinco sistemas independientes dentro de la planta, abarcando diferentes tipos de fluidos. Este enfoque permitió evaluar detalladamente el comportamiento de siete bombas, asegurando un cálculo preciso de sus parámetros operativos dentro de los límites de información disponible.

Esta fase duró aproximadamente cuatro semanas, tiempo durante el cual no solo se recolectó la información, sino que también se realizó un proceso de aprendizaje fundamental de conceptos teóricos, fortaleciendo mis competencias en análisis de sistemas de bombas.

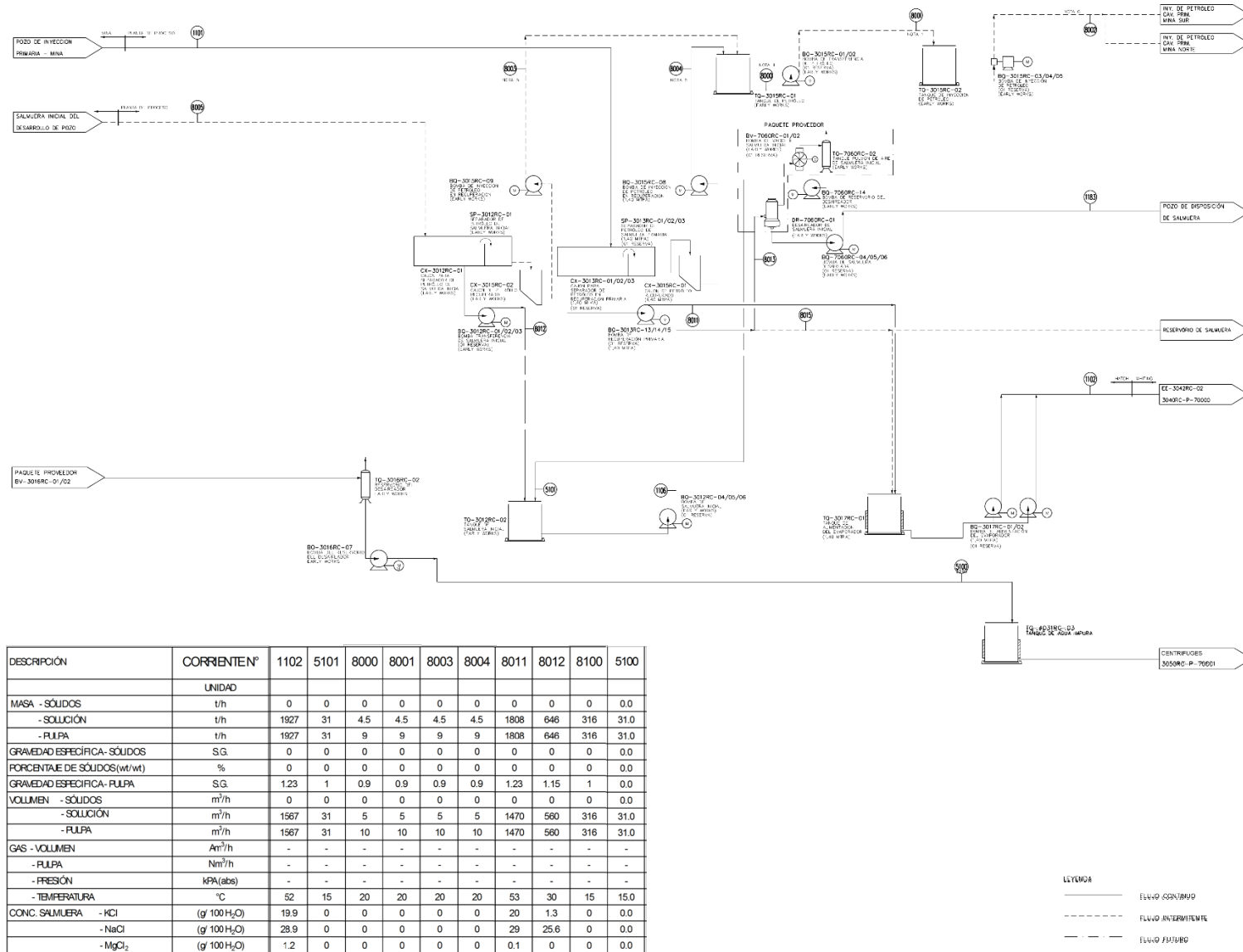


Fig. 4. Consolidado de sistemas de bombeo calculados en PFD. [Modificado]

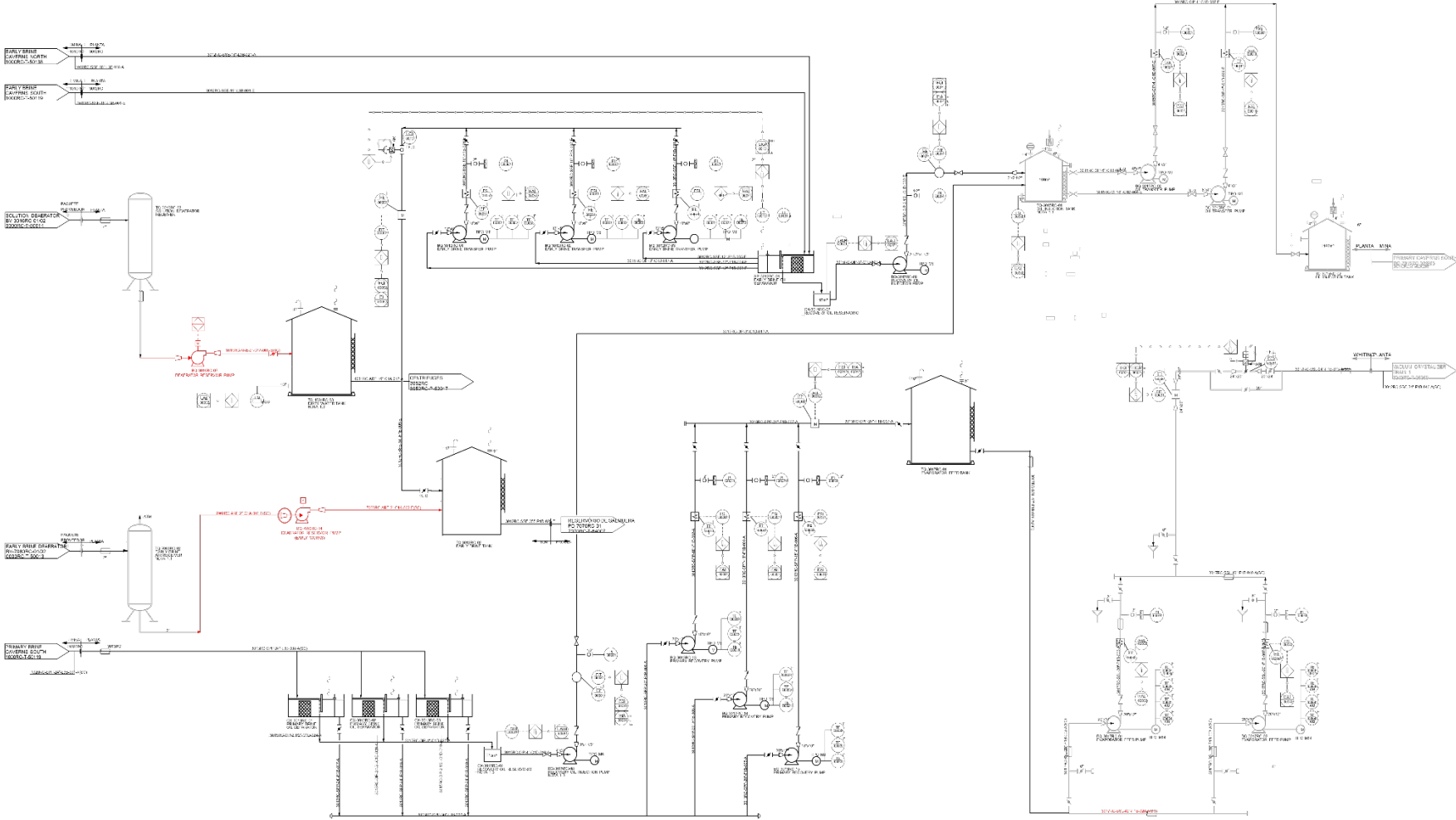


Fig. 5. Consolidado de sistemas de bombeo calculados en P&ID. [Modificado]

B. Segunda Fase: Cálculos Hidráulicos

La segunda fase correspondió al desarrollo de los cálculos hidráulicos, combinando fundamentos teóricos con aplicaciones prácticas. Luego de calcular las velocidades en cada tramo de las tuberías de los sistemas se identificaron las pérdidas por fricción, se implementó la ecuación de Darcy-Weisbach (7), determinando los factores de fricción mediante el diagrama de Moody, considerando el régimen de flujo mediante el número de Reynolds y la rugosidad relativa de cada tubería según el material de estas.

El análisis de pérdidas locales se realizó mediante el método de coeficientes K estandarizados según el manual Crane. Este procedimiento requirió la identificación y catalogación detallada de cada accesorio en el sistema (válvulas, codos, tes, reducciones), asignando los coeficientes correspondientes según su tipo, diámetro y configuración específica. Se consideraron configuraciones estándar en accesorios ya que no se contaba con información detallada de estos.

Esta fase duró aproximadamente cinco semanas y resultó fundamental para comprender a profundidad los principios que posteriormente se modelarían en AFT Fathom. Al desarrollar manualmente los cálculos, se ganó un entendimiento detallado de cómo el software procesa y resuelve las interacciones hidráulicas en sistemas complejos. La experiencia permitió verificar que las metodologías implementadas en el software siguen los mismos fundamentos teóricos, pero con capacidad de manejar sistemas más complejos mediante algoritmos numéricos avanzados.

C. Tercera Fase: Simulación

En la tercera fase se implementó un modelo computacional en AFT Fathom. Como en el programa no es posible simular varios fluidos en un mismo escenario, se evaluaron diferentes escenarios para simular el comportamiento de los sistemas bajo los distintos fluidos con los que contamos en el proyecto. Esta validación fue clave para verificar que las bombas operen dentro de

los rangos aceptables de presión, velocidad y eficiencia. Las consideraciones iniciales para usar el software fueron las siguientes:

1. Como en todos los cálculos, se tuvieron en cuenta algunos supuestos para lograr una simulación satisfactoria. Algunas de ellas fueron:
 - Se consideraron configuraciones estándar en accesorios ya que no se contaba con información detallada de estos.
 - Para estimar la potencia de las bombas, se supone una eficiencia estándar del 75%.
 - Para Tees y Wyes, no se utilizó la corrección laminar para evitar advertencias no aplicables en el modelo Fathom.
2. A continuación, se configuró el modelo creando cada escenario según el fluido.

Una vez creado el modelo, se procedió a ingresar las propiedades físicas de los fluidos, la geometría de las tuberías (longitud, diámetro y material) y todos los elementos del sistema. Posteriormente, se realizaron las simulaciones bajo distintos escenarios operativos. Esto permitió verificar los resultados obtenidos en los cálculos y realizar un análisis comparativo. De esta manera, se logró identificar y corregir posibles riesgos operativos en las especificaciones de las bombas, asegurando la coherencia y validez técnica de los resultados. Los entregables del trabajo son una memoria de cálculo detallada y una tabla comparativa especificaciones vs resultados. Estos resultados permiten tomar decisiones basadas en evidencia técnica, asegurando la confiabilidad del sistema de bombas en la operación actual.

VIII. RESULTADOS

Después de seguir todos los pasos descritos en este documento, podemos resumir los siguientes resultados y analizarlos.

El objetivo principal era determinar los valores óptimos de operación de las bombas. Para ello, se analizaron la memoria de cálculo y los resultados de la simulación para establecer la configuración para cada bomba. Inicialmente, al identificar los caudales requeridos para las bombas se confirma que estos valores no fueron extraídos adecuadamente en el listado de equipos actual, sugiriendo la necesidad de una revisión exhaustiva antes de continuar con el proyecto. Los valores de operación calculados para cada bomba se resumen en la **TABLA III**.

TABLA III
RESULTADOS DE LAS BOMBAS

TAG No.	Unidad	BQ-3012RC-01@03	BQ-3013RC-13@15	BQ-3015RC-01/02	BQ-3015RC-08	BQ-3015RC-09	BQ-3016RC-07	BQ-7060RC-14
Producción de 1.4 MTPA (Calculados)								
Caudal de diseño (Q)	m³/h	280	735	15	30	15	31	31
Altura Manométrica Total (H)	m	9.1	13	2.8	5	4	24	19
Potencia	kW	11	42	0.14	0.5	0.2	2.7	2

Nota. Extraído de la memoria de cálculos en Excel.

Asimismo, en la validación que se realizó mediante AFT Fathom se verificaron siguientes las capacidades operativas:

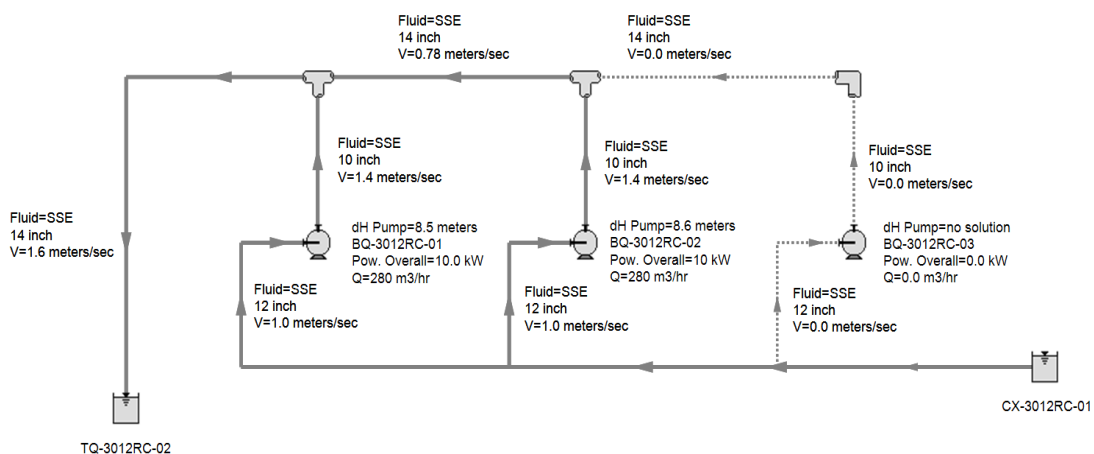


Fig. 6. Imagen bombas BQ-3012RC-01@03 calculadas en Fathom.

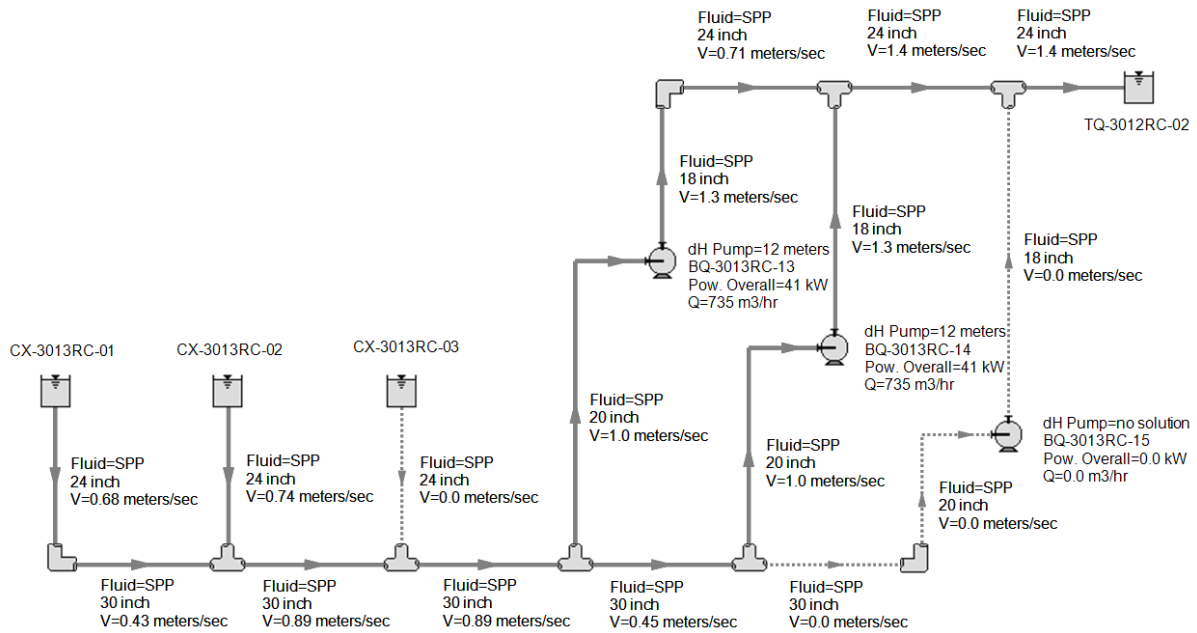


Fig. 7. Imagen bombas BQ-3013RC-13@15 calculadas en Fathom.

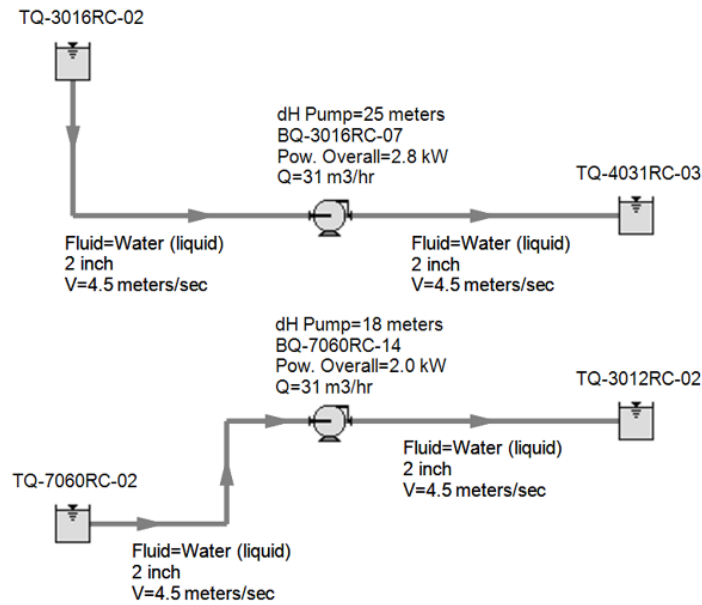


Fig. 8. Imagen bombas BQ-3016RC-07 y BQ-7060RC-14 calculadas en Fathom.

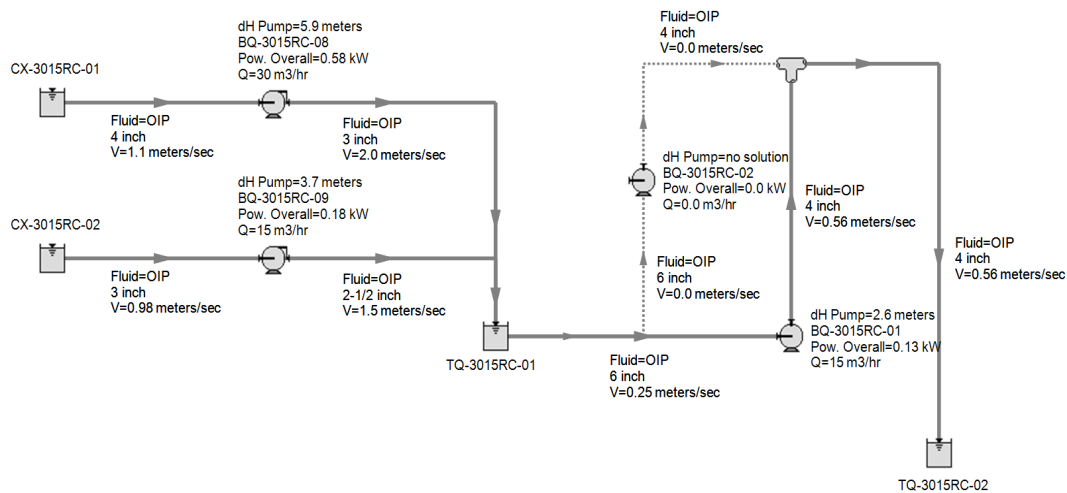


Fig. 9. Imagen bombas BQ-3015RC-01/02/08/09 calculadas en Fathom.

Mediante el uso del software, el estudio proporcionó una comprensión de las características de operación de las bombas del sistema, se analizó cómo el software calcula pérdidas por fricción, modela accesorios mediante coeficientes K y determina puntos de operación de bombas. En las Figuras 6, 7, 8 y 9 se observan los resultados de las simulaciones hidráulicas, donde se evidencia que las alturas manométricas requeridas por el sistema son significativamente menores que las registradas en los datos actuales de las bombas. Esta diferencia indica que los equipos instalados están operando con un sobredimensionamiento en su capacidad de carga, lo que conlleva a un consumo energético excesivo y posibles puntos de operación fuera de la zona de máxima eficiencia. Por lo tanto, se recomienda adecuar el desempeño de las bombas a las condiciones reales de operación, optimizando así el consumo energético y prolongando la vida útil de los equipos. Además, en los equipos que aún no han sido adquiridos, es fundamental modificar las hojas de datos técnicas (datasheets) para ajustar las especificaciones a los nuevos requerimientos operativos.

En la **TABLA IV** se observan las velocidades de los tramos en cada sistema. Según el documento de Criterios de Diseño del sistema proporcionados y los resultados obtenidos en las simulaciones, realizo el siguiente análisis considerando los límites admisibles definidos por los criterios de diseño de 2,0 m/s a 4 m/s en fluidos como agua y aceite, 1.5 m/s a 3 m/s para salmueras (un poco más bajo debido a los cristales). También se tiene en cuenta dentro de la verificación que según la norma ISO 4413:2012, se recomienda una velocidad máxima de 1.5 m/s en la línea de

succión de bombas hidráulicas para prevenir el fenómeno de la cavitación. Se evidenciaron velocidades críticas muy por debajo el límite recomendado, por lo tanto, es crucial evaluar las velocidades de flujo en las tuberías.

TABLA IV
VELOCIDADES DE FLUJO

TAG No.	Unidad	BQ-3012RC- 01@03	BQ-3013RC- 13@15	BQ-3015RC- 01/02	BQ-3015RC- 08	BQ-3015RC- 09	BQ-3016RC- 07	BQ-7060RC- 14
Velocidad de flujo	m/s	1.1	0.7	0.2	1.06	0.8	4.4	4.4
Velocidad de flujo	m/s	-	0.5	-	-	-	-	-
Velocidad de flujo	m/s	-	0.9	-	-	-	-	-
Velocidad de flujo	m/s	-	1	-	-	-	-	-
Velocidad de flujo	m/s	1.58	1.23	0.53	1.66	1.5	4.39	4.39
Velocidad de flujo	m/s	0.76	1.40	-	-	-	-	-
Velocidad de flujo	m/s	1.53	1.40	-	-	-	-	-
Material de tubería	-	Fibra de Vidrio.	Fibra de Vidrio.	Acero al carbono.	Acero al carbono.	Acero al carbono.	Acero al carbono.	Acero al carbono.
Fluido	-	SSE	SPP	OIP	OIP	OIP	ARE	ARE
Característica del Fluido	-	Early Brine (Salmuera inicial).	Salmuera de Producción conteniendo petróleo.	Aceite de Inyección en los Pozos.			Agua Recuperada.	Agua Recuperada.

Nota. Extraído de la memoria de cálculos en Excel.

En los dos primeros sistemas bombas de **salmuera** se obtienen velocidades de entre 0.5 m/s y 0.9 m/s por debajo del rango, favoreciendo el riesgo de sedimentación de sólidos en las tuberías. Se recomienda ajustar el flujo para mantener velocidades alrededor de 2.0 m/s, equilibrando así el riesgo de sedimentación y erosión en las tuberías.

En el sistema de bombas de **aceite** también se obtienen velocidades oscilan entre 0.2 m/s y 1.66 m/s. Sin embargo, los resultados muestran que el sistema opera con velocidades significativamente más bajas, especialmente en BQ-3015RC-01/02 (0.2 m/s), lo que aumenta el riesgo de acumulación de sedimentos. Por otro lado, las bombas BQ-3015RC-08 y 09 presentan velocidades más cercanas al rango adecuado (1.06 m/s, 1.66 m/s), aunque aún por debajo del mínimo recomendado. Se recomienda revisar el diseño para optimizar las velocidades hacia 2 m/s, mejorando así la eficiencia del transporte sin aumentar el riesgo de erosión.

En el sistema de las bombas que manejan **agua recuperada**, operan con una velocidad constante de 4.4 m/s, superando el límite máximo recomendado de 4 m/s para líquidos en tuberías de acero. Este exceso incrementa significativamente las pérdidas por fricción y el riesgo de erosión,

especialmente en codos y accesorios. Dado que el fluido no es altamente corrosivo, el principal problema es el desgaste mecánico acelerado. La solución más efectiva sería aumentar el diámetro de la tubería para reducir la velocidad a un valor seguro.

TABLA V
VELOCIDADES DE FLUJO CALCULADAS VS OPTIMAS

TAG No.	Diámetro		Velocidad		H Optima (mca)	Potencia Optima kW
	in	m/s	Optimo in	Optima m/s		
BQ-3012RC-01@03	12	1.1	12	1.1	11	13
	10	1.6	8	2.2		
	14	0.8	8	2.2		
	14	1.5	12	2.0		
BQ-3013RC-13@15	24	0.7	16	1.6	18	60
	30	0.5	20	1		
	30	0.9	24	1.4		
	20	1	16	1.6		
	18	1.2	12	2.7		
	24	1.4	16	3.1		
	24	1.4	16	3.1		
BQ-3015RC-01/02	6	0.2	3	1	8.5	0.4
	4	0.5	2	2.2		
BQ-3015RC-08	4	1.1	4	1.1	6	0.6
	3	2.0	3	2		
BQ-3015RC-09	3	0.8	3	0.8	6.6	0.3
	2.5	1.5	2	2.2		
BQ-3016RC-07	2	4.4	3	2	10	1.2
	2	4.4	3	2		
BQ-7060RC-14	2	4.4	3	2	8	1
	2	4.4	3	2		

Nota. Se anexa la nueva cabeza y potencia de las bombas calculadas.

La **TABLA V** presenta los resultados de las velocidades de flujo ajustadas tras la modificación de los diámetros de tubería, donde se evidencia el cumplimiento de los rangos óptimos establecidos en los criterios de diseño. Finalmente, la tabla final presenta una comparación entre los parámetros operativos iniciales (4.35 MTPA), actuales (1.4 MTPA por validar), los calculados (1.4 MTPA) y optimizados para 1.4 MTPA, donde se evidencia que:

TABLA VI
RESULTADOS OPTIMOS DE LAS BOMBAS

TAG No.	Unidad	BQ-3012RC-01@03	BQ-3013RC-13@15	BQ-3015RC-01/02	BQ-3015RC-08	BQ-3015RC-09	BQ-3016RC-07	BQ-7060RC-14
Producción de 4.35 MTPA (Datos Anteriores)								
Caudal (Q)	m³/h	400	1365	70	30	15	-	-
Altura Manométrica (H)	mca	20	28	9	20	6	-	-
Potencia	kW	45	185	4	7.5	3	-	-
Estado del equipo	-	Instalado	Nuevo	Instalado	Nuevo	Nuevo	Nuevo	Nuevo
Producción de 1.4 MTPA (Datos Actuales - Por validar)								
Caudal (Q)	m³/h	400	1006	11	11	11	39	39
Altura Manométrica (H)	mca	20	28	9	20	6	57	30
Potencia	kW	32	120	0.3	1	0.2	8	4
Producción de 1.4 MTPA (Calculados)								
Caudal de diseño (Q)	m³/h	280	735	15	30	15	31	31
Altura Manométrica Total (H)	m	9.1	13	2.8	5	4	24	19
Potencia	kW	11	42	0.14	0.5	0.2	2.7	2
Producción de 1.4 MTPA (Optimizados)								
Caudal de diseño (Q)	m³/h	280	735	15	30	15	31	31
Altura Manométrica Total (H)	m	11	18	8.5	6	6.6	10	8
Potencia	kW	13	60	0.4	0.6	0.3	1.2	1

Nota. Se anexa especificaciones iniciales.

De las siete bombas evaluadas, dos ya se encuentran instaladas en la planta. Para estas bombas, se proponen las siguientes soluciones.

Para la bomba BQ-3012RC-01@03, se observa una reducción significativa en sus parámetros operativos: el caudal disminuyó un 30% (de 400 a 280 m³/h), la altura manométrica se redujo un 45% (de 20 a 11 mca) y la potencia requerida bajó un 71% (de 45 a 13 kW). Para optimizar su operación, se recomienda:

- Cambio del variador de frecuencia: Esta modificación permite un control más preciso de la velocidad de operación de la bomba, ajustando el caudal según las necesidades del proceso.
- Instalación de un impeller adecuado (menor): Se sugiere reemplazar o ajustar el impeller para que se adapte mejor a las condiciones hidráulicas actuales.
- Colocación de una válvula de globo en la descarga: Esta válvula permitirá un control más fino del caudal de salida, facilitando la regulación del sistema y asegurando una presión adecuada en la línea, especialmente durante condiciones transitorias o de mantenimiento.

Adicionalmente, se debe considerar que por los cristales de la salmuera existe el riesgo de que se formen sedimentos de cristales de sal al interior de las tuberías. Por esta razón, es fundamental que los soportes estructurales de las tuberías sean diseñados considerando no solo el peso del fluido en operación, sino también la posible acumulación de sólidos, garantizando así la integridad mecánica del sistema a largo plazo.

En el caso de la bomba BQ-3015RC-01/02, los cambios son más drásticos: el caudal disminuyó un 79% (de 70 a 15 m³/h), mientras que la altura manométrica apenas varió (de 9 a 8.5 mca), resultando en un consumo de potencia extremadamente bajo (0.42 kW frente a los 4 kW inicialmente). Esta situación plantea un grave riesgo de operación fuera del rango recomendado, con posibilidad de recirculación interna y daños al equipo. Por ello, la solución más adecuada sería reemplazar completamente esta bomba por una unidad de menor capacidad, específicamente diseñada para operar en este nuevo rango de caudal.

X. CONCLUSIONES

En este estudio, se describió exhaustivamente el proceso de simulación para determinar los puntos de operación. Tras completar todas las fases necesarias, se concluye lo siguiente para comprender el alcance final del trabajo.

- Tener buenos cálculos desde la ingeniería básica de un proyecto es fundamental porque permite tomar decisiones técnicas acertadas desde el inicio, asegurando que el sistema sea seguro, eficiente y viable económicamente. Establecer una base técnica sólida facilita la integración entre disciplinas, reduce incertidumbres en etapas detalladas y mejora la planificación de compras y construcción. Cada etapa del proceso, desde la recopilación de datos y la configuración de la simulación hasta el análisis y la documentación de los resultados, se ejecutó para cumplir las normas de ingeniería y los requerimientos actuales del proyecto.
- Las simulaciones realizadas demostraron que las bombas actualmente instaladas no son adecuadas para operar bajo la capacidad reducida de 1.4 MTPA, ya que presentan sobredimensionamiento energético y riesgos de cavitación en algunos escenarios. Los resultados obtenidos mediante Fathom confirmaron que las bombas deben ajustarse a las nuevas especificaciones calculadas para garantizar un funcionamiento óptimo.
- Los caudales utilizados en los cálculos no coinciden con los registrados en los PFDs actualizados, lo que subraya la necesidad de una revisión exhaustiva de los datos de proceso antes de proceder con la compra e instalación de equipos. Se recomienda actualizar los diagramas de flujo, listado de equipos mecánicos y validar los requerimientos con el equipo de ingeniería de proceso para evitar errores en la implementación.
- Este trabajo no solo cumple con los objetivos académicos, sino que optimiza decisiones técnicas en el proyecto, evitando costos por equipos sobredimensionados u operaciones ineficientes. Demuestra que incluso análisis parciales (como el realizado aquí) pueden revelar inconsistencias críticas que, de no corregirse, afectarían la productividad y seguridad de la planta.

- Es importante actualizar la información actual del MEL, 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.
- Este trabajo pretende por medio de la simulación hidráulica permitir validar la especificación de las bombas para el sistema. 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.

Lecciones Aprendidas: El manejo de AFT Fathom fue fundamental para el desarrollo del trabajo, ya que permitió simular el comportamiento hidráulico del sistema de bombeo bajo diferentes condiciones operativas. Por esta razón, fue necesario aprender a utilizar el software, comprender su interfaz, los datos de entrada requeridos y la interpretación de los resultados, lo cual representó una valiosa experiencia que fortaleció mis competencias en análisis de sistemas de tuberías y herramientas de simulación hidráulica.

XI. RECOMENDACIONES

Debido a restricciones de tiempo, el estudio se limitó al área de tanques, pero la metodología aplicada debe replicarse en todas la planta de procesos para garantizar consistencia en el diseño.

REFERENCIAS

- [1] Y. A. Çengel and J. M. Cimbala, “*Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications*”, 5th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill Education, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://bit.ly/4jQ3Sj6>
- [2] Crane Co, “*Flow of Fluids Through Valves, Fittings, and Pipe*”, 2013.
- [3] “AFT Fathom | Fluid Dynamic Simulation Software”, AFT | Pipe Flow Modeling Software for Engineers. [En línea]. Disponible en: <https://www.aft.com/products/fathom>.
- [4] N. M. L, Ed., “*Piping handbook*”, 7th ed. New York: McGraw-Hill, 2000.
- [5] Larock, B. E., Jeppson, R. W., & Watters, G. Z. (1999). Hydraulics of pipeline systems. In *CRC Press eBooks*. <http://bit.ly/4eh05Kw>
- [6] ASME B73.1 - Spec. for Horizontal End Suction Centrifugal Pump – ASME, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://bit.ly/4l4Nufo>
- [7] ASME, ASME B31.3 - Process Piping, The American Society of Mechanical Engineers, 2020.
- [8] Harlan H. Bengtson, “*Flow Measurements in Pipes and Ducts*”
- [9] International Fertilizer Association (IFA). (2023). Potash Market Outlook. Disponible en: www.fertilizer.org.
- [10] M. L. Nayyar, Ed., Piping handbook, 7th ed. in McGraw-Hill handbooks. New York: McGraw-Hill, 2000.
- [11] Cosmos, *Tubería de Fibra de Vidrio (FRP y PRFV)*. <http://bit.ly/4niZBYm>
- [12] *ISO 4413:2010*. (n.d.). ISO. <https://www.iso.org/standard/44781.html>

XIII. ANEXOS

Anexo 1. Formulas

Ecuación de continuidad: Garantiza la conservación del caudal en el sistema y permite calcular la velocidad del fluido en diferentes tramos, además de validar los diámetros seleccionados para las tuberías [2]. Se describe como:

$$A_1 \cdot v_1 = A_2 \cdot v_2 \quad (1)$$

Donde:

A es el área transversal de la tubería
v es la velocidad del fluido.

La altura manométrica total: Es la energía total que la bomba debe entregar al fluido para superar diferencias de presión, elevación y pérdidas por fricción. La fórmula general se expresa como:

$$H_m = \Delta z + \frac{\Delta P}{\rho \cdot g} + \frac{\Delta v^2}{2g} + \sum H_f + \sum H_{loc} [m] \quad (2)$$

Donde:

Δz es la diferencia de altura entre descarga y succión ($z_{desc} - z_{suc}$)
 $\Delta P/\rho g$ es la diferencia de presión y succión ($P_{desc} - P_{suc}$)
 $\Delta v^2/2g$ es el cambio de energía cinética (si hay variación de velocidad en el sistema)
 $\sum H_f$ son las pérdidas por fricción en tuberías.
 $\sum H_{loc}$ son las pérdidas locales (válvulas, codos, etc)

Presión hidrostática y absoluta: es la presión ejercida por un fluido en reposo debido a su propio peso [2], y se calcula como:

$$P_h = \rho \cdot g \cdot h \quad (3)$$

Donde:

ρ es la densidad del fluido (kg/m^3)
 g es la aceleración debido a la gravedad (aproximadamente 9.81 m/s^2)
 h es la altura de la columna de fluido (m)

A partir de esta, se obtiene la presión absoluta como:

$$P_{abs} = P_h + P_{atm} \quad (4)$$

Potencia: Es una variable fundamental que cuantifica la energía transferida por la bomba al fluido para vencer resistencias hidráulicas [2]. Se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$P = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H}{\eta} \quad (5)$$

Donde:

P es la potencia de la bomba en kilowatts [kW].

Q es el caudal volumétrico (m³/h).

H es la cabeza de la bomba (m) o el diferencial de presión a través de la bomba.

η la eficiencia de la bomba (adimensional).

Número de Reynolds: El número de Reynolds es un parámetro adimensional que permite determinar el régimen de flujo (laminar, transicional o turbulento) en función de las propiedades del fluido y la geometría del conducto. 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 [2].

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} \quad (6)$$

Dónde:

v es la velocidad del fluido (m/s)

D es el diámetro de una tubería (m)

μ es la viscosidad dinámica del fluido (Pa-s).

Pérdidas por fricción – Ecuación de Darcy-Weisbach: Describe la pérdida de carga (caída de presión) en una tubería debido a la fricción. Se utiliza habitualmente en mecánica de fluidos e ingeniería hidráulica. 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. El factor de rozamiento de Darcy (f) depende del número de Reynolds y de la rugosidad de la tubería. [10]. Se expresa como:

$$H_f = \frac{fLv^2}{2gD} \quad (7)$$

Donde

H_f es la pérdida de carga (caída de presión) en metros.

f es el factor de fricción de Darcy (adimensional).

L es la longitud de la tubería (m).

v es la velocidad del fluido (m/s).

Pérdidas locales – Método del coeficiente K: Para el cálculo de las pérdidas menores en accesorios, se empleó el método de los coeficientes K descrito en el Capítulo 2 de Crane:

$$H_a = \frac{Kv^2}{2g} \quad (8)$$

Pérdidas en medidores de flujo tipo Coriolis: Es un dispositivo altamente preciso para medir el flujo masico de un fluido, basado en el efecto Coriolis, tienen un diseño de flujo libre, por lo que las pérdidas de carga son mínimas, puede calcularse mediante:

$$\Delta P = \frac{\rho \cdot f \cdot L \cdot v^2}{2 \cdot D} \quad ; \quad h_L = \frac{\Delta P}{\rho g} \quad ; \quad K = \frac{2\Delta P}{\rho v^2}$$

Donde:

h_L es la pérdida de carga (m)

ΔP es la pérdida de presión (Pa)

f es el factor de fricción (adimensional, dependen del número de Reynold).

L es la longitud del tubo del medidor.

K coeficiente del medidor de Coriolis para Fathom.

Para sistemas complejos con múltiples tramos, la teoría de redes hidráulicas (Larock et al., 1999) establece que el caudal total en configuraciones paralelas es la suma de caudales individuales, mientras que las pérdidas de carga deben igualarse en cada ramal. Este principio resulta crítico en el área de tanques analizada, donde coexisten bombas en serie y paralelo [5].

El diseño óptimo de conductos en sistemas de bombeo requiere seleccionar velocidades de flujo (v) que equilibren eficiencia energética y viabilidad técnica. Como se establece en los criterios de diseño, las tuberías deben dimensionarse para transportar el fluido a la velocidad más económica, minimizando tanto el consumo energético de las bombas como la turbulencia, lo que exige rugosidades relativas (ε/d) reducidas y el uso de velocidades de referencia validadas por la disciplina de procesos. Alineándose con estándares como ASME B31.3 para sistemas de tuberías.

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

Las bombas que manejan salmuera deben operar a velocidades bajas para minimizar el desgaste y la erosión en las tuberías y componentes del sistema. Esto se debe a que, a altas velocidades, las partículas sólidas contenidas en el fluido impactan con mayor energía contra las paredes internas, acelerando el deterioro. Por ello, en estos sistemas se recomienda mantener un flujo moderado, garantizando así la eficiencia de la bomba sin comprometer la vida útil de la instalación.

En cuanto a materiales, Según Cosmos las tuberías de fibra de vidrio, también llamadas tuberías FRP, son estructuras usadas como alternativa a la tubería metálica, son altamente resistentes a la corrosión y gracias a sus materiales pueden ser enterradas o estar expuestas a ambientes salinos o corrosivos [11]. Con la siguiente fórmula se calculó la rugosidad relativa de la tubería:

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon_a}{D}$$

Anexo 2. Archivo de la simulación “Bombas”