

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL COMAHUE

FACULTAD DE INGENIERÍA



PROYECTO INTEGRADOR PROFESIONAL

**SIMULACIÓN DE TRANSITORIOS HIDRÁULICOS PARA UN
SISTEMA DE BOMBEO DE UN ACUEDUCTO EN LA INDUSTRIA
DEL LITIO**

Autor: Lagos Pino Lucía Belén

Director Académico: Mg. Ing. Orlando Aníbal Audisio

Co-Director Académico: Ing. Ariel Ricardo Marchegiani

Carrera: Ingeniería Química

Neuquén, 2026

Resumen

El presente trabajo tiene por objeto el análisis y la simulación del comportamiento hidráulico de un sistema de bombeo, tanto en régimen permanente como durante eventos transitorios asociados a cierres de válvulas, arranque y parada de bombas.

La evaluación se realiza a partir de un modelo hidráulico basado en las condiciones de operación en estado estacionario, sobre el cual se analizan distintos escenarios transitorios y la evolución temporal de presiones y velocidades en la conducción.

A partir de los resultados obtenidos, se identifican sectores hidráulicamente críticos del sistema, caracterizados tanto por caídas significativas de presión durante los transitorios —con potencial aparición de fenómenos de cavitación y separación de columna— como por incrementos de presión asociados a la propagación y reflexión de ondas, que pueden generar sobrepresiones relevantes en determinados tramos de la conducción.

En función de este diagnóstico, se analizan alternativas de mitigación orientadas a reducir los efectos del golpe de ariete y mantener las variables hidráulicas dentro de los rangos admisibles de operación, proponiendo la ubicación y el tipo de dispositivos de protección más adecuados.

Palabras clave: Transitorio hidráulico, golpe de ariete, cavitación, separación de columna, Método de las características.

Abstract

This work aims to analyze and simulate the hydraulic behavior of a pumping system, both under steady-state conditions and during transient events associated with valve closures, pump start-up, and pump shutdown.

The evaluation is based on a hydraulic model developed from steady-state operating conditions, upon which different transient scenarios are analyzed, as well as the temporal evolution of pressure and velocity along the pipeline.

Based on the results obtained, hydraulically critical sections of the system were identified, characterized by significant pressure drops during transient events—with potential occurrence of cavitation and column separation phenomena—as well as by pressure increases associated with wave propagation and reflection, which may generate relevant overpressures in certain sections of the pipeline.

According to this diagnosis, mitigation alternatives are analyzed in order to reduce the effects of water hammer and maintain hydraulic variables within admissible operating ranges, proposing suitable protection devices and their strategic location within the system.

Keywords: Hydraulic transients, water hammer, pumping system, cavitation, column separation, Method of Characteristics.

Lista de abreviaturas

NPSH: Net Positive Suction Head

BEP: Best efficiency point.

POR: Preferred Operating Region (set by standards).

AOR: Allowable Operating Region (set by manufacturer).

VFD: Variador de frecuencia.

PAD: Pileta principal de agua de distribución.

TDP: Tanque de agua de suministro.

PR: Válvula reductora de presión

PFD: Diagrama de flujo de procesos.

PTP: Presión de Trabajo Permitida.

PTMO: Presión Total Máxima Ocasional.

Lista de símbolos

H – Altura piezométrica (m)

V – Velocidad media del fluido (m/s)

Q – Caudal volumétrico (m³/s)

P – Potencia absorbida (W)

a – Velocidad de propagación de onda (m/s)

L – Longitud de la tubería (m)

E – Módulo de Young del material (Pa)

K – Módulo volumétrico del líquido (Pa)

D – Diámetro interno de la tubería (mm)

N – Velocidad de rotación de la bomba (rpm)

e – Espesor de la tubería (mm)

I – Momento de inercia del conjunto bomba-motor (kg·m²)

ω – Velocidad angular (rad/s)

ρ – Densidad del líquido (kg/m³)

c_1 – Coeficiente de empotramiento de cañería (–)

f – Factor de fricción de Darcy (–)

k – Coeficiente adimensional de pérdida localizada

g – Aceleración de la gravedad (m/s²)

Reconocimiento y dedicatoria

El presente Proyecto Integrador Profesional representa la culminación de una etapa fundamental en mi formación como Ingeniera Química. Su concreción no hubiera sido posible sin el acompañamiento, la guía y el apoyo de personas que han sido esenciales en este recorrido.

Agradezco profundamente a mis directores, Mg. Ing. Orlando Aníbal Audisio e Ing. Ariel Ricardo Marchegiani, por su orientación académica, sus aportes técnicos y su disposición constante para el intercambio de ideas. Su acompañamiento fue clave para el desarrollo y la consolidación de este trabajo.

Expreso también mi sincero agradecimiento a mi jefa, Eugenia Atencio, por su confianza, su apoyo profesional y por brindarme la oportunidad de desarrollar este proyecto a partir de un caso real de aplicación, lo cual enriqueció significativamente el alcance y la profundidad del análisis realizado. Su acompañamiento fue fundamental para integrar la experiencia profesional con la formación académica.

A mi padre, por su esfuerzo incansable, por enseñarme el valor del trabajo y por estar siempre presente.

A mi madre, quien, aunque ya no se encuentra físicamente entre nosotros, sigue siendo mi guía y mi fuerza. Este logro también es suyo.

A mis hermanos, María y Antonio, por su acompañamiento incondicional y por compartir conmigo cada paso de este camino.

Y a Pablo, mi compañero de vida, por su paciencia, su apoyo constante y por caminar a mi lado en cada desafío.

A todos ellos, gracias por ser parte de este logro.

1 INTRODUCCIÓN	1
2 OBJETIVOS	2
2.1 Objetivo General	2
2.2 Objetivos específicos.....	2
3 MARCO TEÓRICO.....	3
3.1 Sistemas de bombeo y transitorios hidráulicos	3
3.1.1 Régimen permanente y régimen transitorio	3
3.1.2 Transitorios hidráulicos en sistemas de bombeo	3
3.1.3 Arranque y parada de bombas como eventos transitorios	4
3.2 Análisis del sistema en régimen estacionario.....	4
3.2.1 Balance energético y continuidad de conducciones	4
3.2.2 Pérdidas de carga distribuidas y localizadas	4
3.2.3 Curva característica del sistema	5
3.3 Bombas centrífugas	6
3.3.1 Curva Característica de una bomba.....	6
3.3.2 Punto de funcionamiento.....	7
3.3.3 Comportamiento de la bomba durante el arranque y la parada	7
3.3.4 NPSH y condiciones de cavitación en la succión.....	8
3.3.5 Inercia del conjunto bomba-motor	9
3.3.6 Semejanza hidráulica.....	9
3.4 Válvulas.....	10
3.4.1 Válvulas retención.....	10
3.4.2 Válvulas reductoras de presión (PR).....	11
3.5 Materiales de tuberías y su influencia en los transitorios.....	11
3.5.1 Tuberías rígidas y flexibles	11
3.5.2 Influencia del módulo elástico en la respuesta hidráulica	12
3.5.3 Tuberías poliméricas en sistemas de conducción de agua.....	12
3.6 Golpe de ariete.....	13
3.6.1 Fundamentos físicos del fenómeno	13
3.6.2 Celeridad de onda.....	14
3.6.3 Tiempo característico y tipos de cierre.....	14
3.7 Fenómenos asociados a los transitorios.....	15
3.7.1 Inversión de flujo.....	15
3.7.2 Rotación inversa de bombas.....	16
3.8 Cavitación y separación de columna	17
3.8.1 Cavitación: definición y condiciones de ocurrencia.....	17

3.8.2	Presión de vapor y caídas de presión.....	17
3.8.3	Separación de columna en sistemas extensos.....	17
3.8.4	Consecuencias hidráulicas de la cavitación.....	18
3.9	Resolución numérica de transitorios	19
3.9.1	Resolución de transitorios mediante el Método de las Características.....	19
3.9.2	Implementación en el software AFT Impulse	19
3.10	Medidas de protección frente a transitorios hidráulicos.....	20
3.10.1	Principios generales de mitigación.....	20
3.10.2	Dispositivos de protección hidráulica	20
3.10.3	Estrategias operativas y tiempos de maniobra.....	21
4	METODOLOGÍA	23
4.1	Modelado en régimen permanente	23
4.2	Modelado y simulación transitoria	23
4.3	Análisis de resultados	23
4.4	Evaluación de medidas de mitigación	24
5	DESARROLLO	25
5.1	Caracterización general del sistema	25
5.1.1	Ubicación	25
5.1.2	Traza y perfil	26
5.1.3	Condiciones Ambientales.....	27
5.1.4	Caracterización del fluido	27
5.2	Descripción hidráulica del sistema.....	28
5.3	Análisis en régimen estacionario.....	29
5.3.1	Verificación de velocidades	30
5.3.2	Verificación de presiones	31
5.3.3	Análisis de cavitación en succión (NPSH).....	32
5.4	Selección y verificación de equipos	33
5.4.1	Bombas.....	33
5.4.2	Válvulas reductoras de presión.....	43
5.5	Análisis transitorio.....	47
5.5.1	Justificación del caso de estudio.....	47
5.5.2	Modelado en AFT Impulse.....	47
5.5.3	Determinación de la velocidad de onda.....	48
5.5.4	Resistencia del material frente a sobrepresiones	49
5.5.5	Definición de casos simulados	50
5.5.6	Modelado dinámico de bombas.....	51

5.5.7 Inercia rotacional.....	51
5.5.8 Cierre de válvulas.....	52
5.5.9 Arranque de bombas.....	52
6 RESULTADOS.....	53
6.1 Criterio de evaluación.....	53
6.1.1 Parada simultánea de bombas.....	53
6.1.2 Paradas individuales de bombas.....	58
6.1.3 Cierre de válvulas.....	65
6.1.4 Arranque de bombas.....	70
6.2 Comparación global de todos los eventos transitorios.....	71
7 CONCLUSIONES.....	72
7.1 Evaluación estructural frente a sobrepresiones.....	72
7.2 Evaluación hidráulica.....	72
7.3 Impacto operativo.....	72
7.4 Limitaciones del modelo.....	72
8 RECOMENDACIONES.....	73
8.1 Propuesta de ubicación y tipo de dispositivos anti ariete.....	73
9 BIBLIOGRAFÍA.....	76
10 ANEXOS.....	77
10.1 Anexo 1 - Memoria de Cálculo.....	77
10.2 Anexo 2 - Altimetría y clase de las cañerías.....	77
10.3 Anexo 3 - Datos de las bombas.....	79
10.4 Anexo 4 - Hojas de datos válvulas reductoras.....	80
10.5 Anexo 5 – Cálculo de verificación de válvulas.....	81

1 Introducción

El presente trabajo tiene como objeto el análisis de los transitorios hidráulicos en el Acueducto Mariana – Salar de Llullaillaco, ubicado en la provincia de Salta, destinado al transporte de agua fresca desde los pozos de producción hasta las áreas de almacenamiento del sistema. El estudio se centra en la evaluación del comportamiento hidráulico del sistema tanto en régimen permanente como durante eventos transitorios asociados a arranques y paradas de bombas, así como maniobras de válvulas.

Para el caso estudiado, el sistema de bombeo tiene la particularidad de que las líneas de impulsión son de material sintético, de características muy flexibles y de una gran longitud, lo que condiciona de manera significativa la respuesta del sistema frente a eventos transitorios.

La motivación del presente Proyecto Integrador Profesional surge a partir de una necesidad planteada por la empresa operadora del sistema, orientada a verificar el desempeño hidráulico del sistema ya diseñado en estado estacionario frente a eventos transitorios. A partir del análisis y la simulación de distintos escenarios operativos, se identifican sectores críticos y se evalúan alternativas de mitigación destinadas a reducir los efectos del golpe de ariete y a mantener las variables hidráulicas dentro de rangos admisibles de operación.

2 Objetivos

2.1 Objetivo General

Analizar el comportamiento hidráulico del Acueducto Mariana – Salar de Llullaillaco frente a eventos transitorios, mediante la simulación del sistema en régimen permanente y transitorio, con el fin de identificar condiciones operativas críticas y evaluar medidas de mitigación que permitan mantener las variables hidráulicas dentro de rangos admisibles de operación.

2.2 Objetivos específicos

- 1) Modelar el sistema de bombeo en régimen permanente a partir de las condiciones de operación de diseño, estableciendo el estado estacionario de referencia para el análisis transitorio.
- 2) Simular escenarios transitorios representativos del sistema, tales como arranques y paradas de bombas y maniobras de válvulas, analizando la evolución temporal de presiones y velocidades en la conducción.
- 3) Identificar sectores hidráulicamente críticos asociados a sobrepresiones, caídas significativas de presión y potencial aparición de fenómenos de cavitación y separación de columna.
- 4) Evaluar alternativas de mitigación y estrategias operativas orientadas a reducir los efectos del golpe de ariete y a mantener las variables hidráulicas dentro de rangos admisibles de operación frente a los escenarios analizados.

3 Marco teórico

En esta sección se presentan los principales temas abordados en el presente proyecto integrador profesional, considerando las particularidades asociadas al problema analizado en cuestión.

3.1 Sistemas de bombeo y transitorios hidráulicos

3.1.1 Régimen permanente y régimen transitorio

En el análisis de sistemas hidráulicos se distingue entre régimen permanente y régimen transitorio según sea la variación temporal como una de las variables que describen el flujo. En régimen permanente, el caudal, la presión y la velocidad permanecen constantes en el tiempo, permitiendo caracterizar el estado de operación normal del sistema bajo condiciones estables.

En régimen transitorio, dichas variables varían con el tiempo como consecuencia de cambios en las condiciones de operación, tales como el arranque o la parada de bombas, maniobras de válvulas o fallas en el suministro eléctrico. En sistemas de bombeos donde la longitud de la cañería de impulsión es importante y consecuentemente el tiempo característico de la instalación ($T_c=2.L/a$) es alto, estos eventos adquieren especial relevancia debido a la propagación de ondas de presión, que pueden generar sobrepresiones o caídas significativas de presión.

Por este motivo, el análisis de régimen permanente constituye la condición inicial para el estudio de los transitorios hidráulicos.

3.1.2 Transitorios hidráulicos en sistemas de bombeo

En los sistemas de bombeo, los transitorios hidráulicos adquieren particular relevancia debido a las variaciones rápidas de caudal y presión asociadas tanto al arranque y la parada de bombas como la manipulación de válvulas y otros dispositivos de control. Estos eventos generan ondas de presión que se propagan a lo largo de la conducción y pueden dar lugar a sobrepresiones, caídas significativas de presión, inversión de flujo y, en determinadas condiciones, a fenómenos de vaporización súbita del fluido.

La interacción entre la bomba, la tubería y los dispositivos de control condiciona la respuesta transitoria del sistema, por lo que el análisis conjunto de estos elementos resulta fundamental para garantizar una operación segura y confiable.

3.1.3 Arranque y parada de bombas como eventos transitorios

Durante el arranque de una bomba, el sistema evoluciona desde una condición de caudal nulo hasta el punto de operación correspondiente, atravesando estados intermedios que dependen de la interacción entre la bomba, la conducción y los dispositivos de control. En estas circunstancias este transitorio es factible amortiguarlo y mantenerlo bajo control haciendo uso de controladores eléctricos como ser los arrancadores suaves con rampa de arranque y parada programables.

De manera análoga, la parada de la bomba (por ejemplo, un corte en el suministro de energía eléctrica), ya sea controlada o abrupta, genera una desaceleración del flujo asociada a la inercia del fluido y del conjunto rotante, lo que puede dar lugar a caídas de presión, inversión del flujo y otros fenómenos transitorios. En sistemas extensos, estos eventos pueden inducir a condiciones críticas que requieren ser evaluadas mediante un análisis transitorio específico.

3.2 Análisis del sistema en régimen estacionario

3.2.1 Balance energético y continuidad de conducciones

El análisis del sistema en régimen estacionario se basa en la aplicación de las ecuaciones de continuidad y energía para definir la relación entre caudal, presión y altura del sistema, caracterizando el estado de funcionamiento normal de la instalación.

Este estado constituye la condición inicial a partir de la cual se desarrollan los análisis de los eventos transitorios, por lo que una adecuada representación del régimen estacionario resulta fundamental para obtener resultados consistentes en la simulación hidráulica posterior.

3.2.2 Pérdidas de carga distribuidas y localizadas

En sistemas de bombeo extensos, las pérdidas de carga distribuidas y localizadas desempeñan un rol fundamental en la definición del régimen estacionario de operación. Las pérdidas distribuidas asociadas a la fricción del fluido con las paredes de la tubería, se evalúan mediante la formulación de Darcy-Weisbach, mientras que las pérdidas localizadas, originadas en válvulas, accesorios y cambios geométricos, se representan mediante coeficientes adimensionales.

La pérdida de carga total del sistema puede expresarse como la suma de las pérdidas distribuidas y localizadas, tal como se presenta en la Ecuación (1). Al desarrollar esta relación, se obtiene la expresión general indicada en la Ecuación (2), en la cual el

primer término corresponde a las pérdidas distribuidas y el segundo a las pérdidas localizadas.

La suma de ambos aportes permite determinar la pérdida de carga total del sistema y constituye un elemento clave para la construcción de la curva característica del sistema, que define el punto de operación inicial a partir del cual se desarrollan los análisis transitorios.

$$\Delta J_{\text{total}} = \Delta J_{\text{distribuidas}} + \Delta J_{\text{localizada}} \quad (1)$$

$$\Delta J_{\text{total}} = f\left(\frac{L}{D}\right) \frac{v^2}{2g} + k \frac{v^2}{2g} = k_{\text{global}} \frac{v^2}{2g} \quad (2)$$

3.2.3 Curva característica del sistema

La curva característica del sistema constituye una herramienta fundamental para describir el comportamiento hidráulico de una instalación de tuberías en régimen estacionario, ya que representa la variación de la altura requerida por el sistema en función del caudal circulante. Dicha curva está determinada por la diferencia de niveles estáticos y por las pérdidas de carga asociadas al flujo.

En sistemas de conducción, las pérdidas de carga presentan un comportamiento aproximadamente cuadrático con el caudal, lo que permite expresar la curva del sistema mediante una relación del tipo:

$$H_n = H_B + k_{\text{global}} Q^2 \quad (3)$$

Donde H_B representa la diferencia de niveles estáticos entre los depósitos y el término cuadrático agrupa las pérdidas de cargas distribuidas y localizadas del sistema.

La curva característica del sistema permite determinar el punto de operación en régimen permanente al interceptarse con la curva característica de la bomba. Ese punto define las condiciones iniciales de funcionamiento, fundamentales para el análisis posterior de los transitorios hidráulicos.

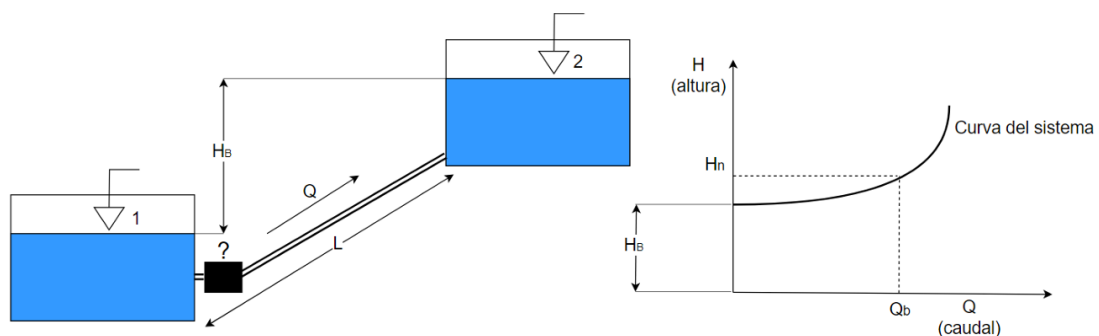


Figura 1. Esquema de curva del sistema entre dos depósitos.

3.3 Bombas centrífugas

3.3.1 Curva Característica de una bomba

Una curva característica de una bomba centrífuga representa la relación entre el caudal y la altura manométrica desarrollada por la bomba, constituyendo una herramienta fundamental para describir su comportamiento hidráulico en régimen permanente. Esta curva permite analizar la respuesta de la bomba frente a distintas condiciones de operación y su interacción con el sistema hidráulico.

Según Crane Co. (2010), las curvas características de una bomba centrífuga incluyen, además de la relación altura-caudal, las curvas de potencia absorbida, eficiencia y NPSH requerido. Estas curvas permiten determinar el punto de funcionamiento del conjunto bomba-sistema en régimen permanente. Dicho punto constituye la condición inicial a partir de la cual se desarrollan los análisis transitorios.

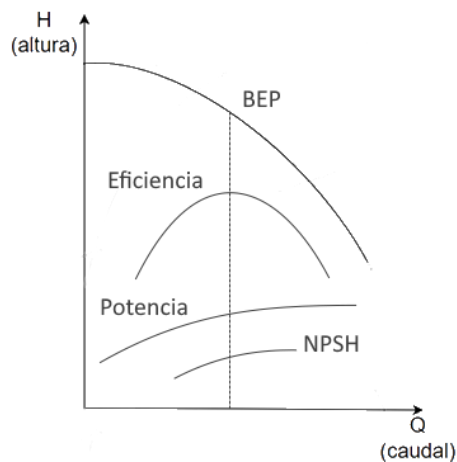


Figura 2. Esquema de Curva Característica de una bomba centrífuga.

La velocidad de giro de la bomba influye directamente en la altura desarrollada para un mismo caudal, dando lugar a familias de curvas características asociadas a distintos rpm, tal como se esquematiza en la Figura 3.

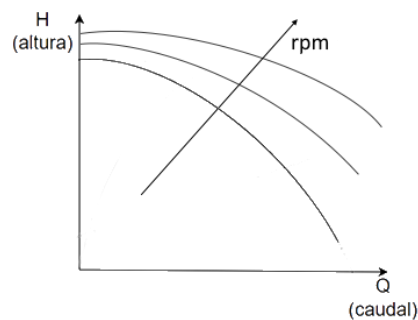


Figura 3. Curvas características de una bomba a diferentes rpm.

Asimismo, las condiciones hidráulicas aguas abajo, como el estrangulamiento en la línea de descarga mediante válvulas, modifican la curva del sistema y, en consecuencia, el punto de operación del conjunto bomba-sistema tal como se muestra en la Figura 4.

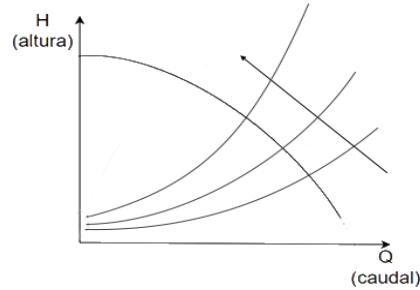


Figura 4. Efecto del estrangulamiento en la línea de descarga.

3.3.2 Punto de funcionamiento

El caudal que circula a través de la bomba y la altura de elevación que esta proporciona al sistema están determinados por la interacción entre la bomba y el sistema hidráulico. El punto de funcionamiento (Q_b, H_n) se define como la intersección entre la Curva del Sistema y la Curva Característica de la bomba. La altura generada por la bomba se utiliza para vencer las pérdidas de carga a lo largo del sistema y, en caso de existir una diferencia de altura entre los depósitos, para superarla, definiendo así las condiciones iniciales a partir de las cuales se desarrollan los eventos transitorios.

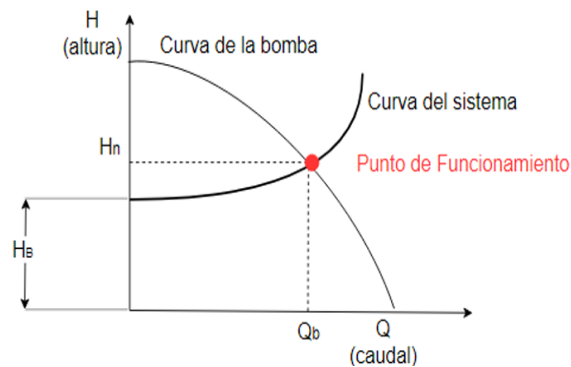


Figura 5. Punto de funcionamiento.

3.3.3 Comportamiento de la bomba durante el arranque y la parada

Durante el arranque de una bomba, el sistema atraviesa un régimen transitorio en el cual el punto de operación evoluciona desde una condición inicial de caudal nulo hasta el estado de funcionamiento correspondiente al régimen permanente. Esta evolución depende de la interacción entre la curva característica de la bomba, la curva del sistema y las condiciones hidráulicas de la conducción.

En los sistemas de bombeo pueden presentarse distintos escenarios de arranque, tales como el arranque con válvula de descarga cerrada, con la tubería de descarga llena o contra una válvula antirretorno cerrada. En todos los casos, la bomba opera inicialmente a caudal reducido o nulo, y se incrementa la altura desarrollada hasta que las condiciones hidráulicas permiten el establecimiento del caudal. En la Figura 6 se ilustran esquemáticamente estos comportamientos para distintos regímenes de operación.

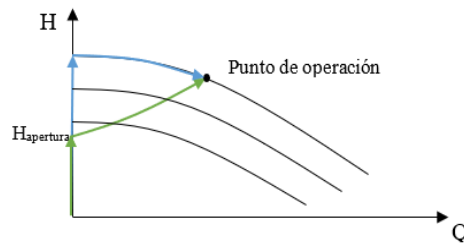


Figura 6. Comportamiento de la bomba en distintos escenarios de arranque: arranque con válvula cerrada o tubería llena (azul) y arranque contra válvula antirretorno cerrada (verde).

Durante la parada de la bomba, el sistema también experimenta un régimen transitorio, en el cual el caudal disminuye progresivamente hasta anularse. La evolución de este proceso depende del tipo de parada (controlada o abrupta), de la inercia del conjunto rotante y de las condiciones del sistema. Una parada brusca puede generar variaciones rápidas de presión, mientras que una parada controlada permite una desaceleración más gradual de flujo, reduciendo la severidad de los transitorios asociados. Los fenómenos vinculados a la parada de bombas se analizan en mayor detalle en secciones posteriores del presente trabajo.

3.3.4 NPSH y condiciones de cavitación en la succión

El NPSH (Net Positive Suction Head), o ANPA disponible, representa la altura neta de carga disponible en la succión de una bomba y constituye un criterio fundamental para garantizar las condiciones adecuadas de operación en régimen permanente, evitando la cavitación en la entrada del equipo. Para un funcionamiento correcto, el NPSH disponible debe ser superior al NPSH requerido por el fabricante.

Si bien el cumplimiento del criterio del NPSH resulta esencial para la operación de la bomba en régimen estacionario, durante eventos transitorios pueden producirse caídas de presión en otros sectores del sistema que no están directamente asociadas a la succión de la bomba. Estas condiciones requieren un análisis específico del comportamiento hidráulico del sistema en su conjunto, más allá de la verificación del NPSH.

3.3.5 Inercia del conjunto bomba-motor

Durante el funcionamiento de una bomba centrífuga, el conjunto formado por el rodete, el eje, el acoplamiento y el motor almacena energía cinética asociada a su movimiento de rotación. Adicionalmente, una fracción del fluido contenido en la bomba contribuye a la energía cinética total del sistema rotativo. La energía cinética almacenada en un sistema rotativo puede expresarse de forma general como:

$$E_{cin} = \frac{1}{2} I \omega^2 \quad (4)$$

Donde I es el momento de inercia total del conjunto bomba-motor y ω es la velocidad angular de rotación.

En eventos transitorios asociados a la parada de la bomba, la inercia del conjunto rotativo condiciona la velocidad de desaceleración del sistema. Una mayor inercia implica una disminución más gradual de la velocidad de giro, lo que retrasa la reducción del caudal impulsado y modifica la evolución temporal de presiones en la conducción.

En el análisis de transitorios hidráulicos, el momento de inercia del conjunto bomba-motor constituye un parámetro relevante del modelo, el cual suele ser provisto por el fabricante. En ausencia de información específica, pueden emplearse estimaciones basadas en correlaciones empíricas ampliamente utilizadas en la literatura técnica, considerando que dichos valores representan aproximaciones.

3.3.6 Semejanza hidráulica

En el presente trabajo, la semejanza hidráulica se emplea para representar el comportamiento de una misma bomba centrífuga cuando se modifica su velocidad de rotación, como ocurre en sistemas controlados mediante variadores de frecuencia (VFD).

Para una bomba geoméricamente constante, las denominadas leyes de afinidad establecen que el caudal, la altura desarrollada y la potencia absorbida se relacionan con la velocidad de giro de la siguiente manera:

$$\frac{Q_m}{Q_p} = \frac{N_m}{N_p} \quad ; \quad \frac{H_m}{H_p} = \left(\frac{N_m}{N_p} \right)^2 \quad ; \quad \frac{P_m}{P_p} = \left(\frac{N_m}{N_p} \right)^3 \quad (5)$$

En este contexto, resulta conveniente definir un factor adimensional de variación de velocidad, α , expresado como:

$$\alpha = \frac{N_m}{N_p} \quad (6)$$

donde N_m corresponde a la velocidad de operación del modelo y N_p a la velocidad nominal del prototipo.

Este coeficiente permite escalar las curvas características originales de la bomba cuando se opera mediante variadores de frecuencia, facilitando su implementación en el modelado hidráulico.

Estas relaciones permiten extrapolar curvas características para distintas velocidades de operación a partir de un conjunto reducido de datos nominales, fundamento utilizado en el modelo de las bombas en el presente trabajo.

En este marco, un parámetro fundamental asociado a la semejanza hidráulica es la velocidad específica, N_s , la cual permite caracterizar el tipo de bomba y su comportamiento hidráulico en condiciones nominales. Bombas con igual velocidad específica presentan, en general, curvas características de forma similar. Este parámetro resulta relevante tanto en la clasificación hidráulica de la bomba como en la representación de su comportamiento dinámico bajo condiciones transitorias.

3.4 Válvulas

3.4.1 Válvulas retención

Las válvulas de retención permiten el paso del fluido en una dirección, y evitan el retroceso del fluido, protegiendo equipos como bombas frente a daños asociados al flujo inverso. Su funcionamiento se basa en el cierre automático ante la detención del flujo o la tendencia de la inversión del mismo.

Existen distintos tipos de válvulas de retención, tales como las de elevación, de bola y de bisagra, cada una con un comportamiento dinámico particular frente a los cambios rápidos de caudal. En la Figura 7 se muestran los tipos comunes de válvulas de retención.

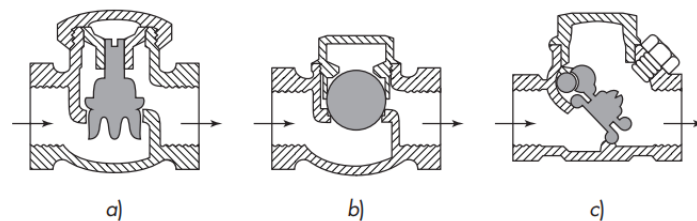


Figura 7. Válvulas de retención: a) retención por elevación; b) retención de bola; c) retención por bisagra.

En el contexto de los transitorios hidráulicos, el cierre de una válvula de retención resulta relevante, ya que puede generar variaciones bruscas de velocidad y presión en la conducción. En sistemas de bombeo, este comportamiento adquiere particular

importancia durante la parada de bombas o ante eventos que inducen inversión del flujo, por lo que su correcta representación resulta fundamental para el análisis del sistema.

3.4.2 Válvulas reductoras de presión (PR)

Las válvulas reductoras de presión (PR) son válvulas de control hidráulico cuya función principal es reducir una presión elevada aguas arriba y mantener un valor de presión menor y aproximadamente constante aguas abajo de la válvula. Su operación es automática y se basa en un mecanismo interno que ajusta la apertura del obturador en función de la presión aguas abajo.

En el análisis de transitorios hidráulicos resulta necesario considerar el comportamiento dinámico de las PR, ya que durante eventos transitorios pueden cerrarse total o parcialmente, generando variaciones significativas de caudal y presión en el sistema. El cierre de una PR puede producirse por distintas causas operativas y de control, tales como la ausencia de demanda aguas abajo, la insuficiencia de presión de entrada o fallas en el sistema de control de la válvula.

Independiente de su causa específica, el cierre de una PR genera una modificación abrupta de las condiciones hidráulicas del sistema, pudiendo provocar caídas significativas de presión aguas abajo y contribuir a la aparición de condiciones críticas, como cavitación o separación de columna.

3.5 Materiales de tuberías y su influencia en los transitorios

3.5.1 Tuberías rígidas y flexibles

El comportamiento de un sistema de conducción frente a eventos transitorios se encuentra fuertemente influenciado por las características mecánicas del material de la tubería. En términos generales, es posible distinguir entre tuberías rígidas y tuberías flexibles, las cuales presentan respuestas hidráulicas diferentes ante variaciones rápidas de caudal y presión.

Las tuberías rígidas, como las metálicas o de hormigón, presentan elevados valores de módulo elástico, lo que limita la deformación de la pared frente a cambios de presión. Como consecuencia, las ondas de presión se propagan con mayor velocidad pudiendo generar picos de sobrepresión más elevados durante eventos transitorios.

Por el contrario, las tuberías flexibles permiten una mayor deformación de la pared del ducto, ante perturbaciones hidráulicas. Esta interacción fluido-estructura contribuye a reducir la velocidad de propagación de la onda de presión y atenuar parcialmente la

magnitud de las variaciones de presión, lo que resulta particularmente relevante en sistemas de conducción extensos.

3.5.2 Influencia del módulo elástico en la respuesta hidráulica

El módulo elástico del material de la tubería constituye un parámetro determinante en la respuesta hidráulica del sistema frente a transitorios, ya que interviene directamente en la velocidad de propagación de las ondas de presión. Valores elevados del módulo elástico se asocian a conducciones más rígidas y a mayores celeridades de onda, mientras que materiales con menor módulo elástico presentan respuestas más amortiguadas.

En tuberías poliméricas, el módulo elástico no es constante, sino que depende de la temperatura y del tiempo de aplicación de la carga. De acuerdo con la información técnica del fabricante de tuberías PEXGOL, el módulo aparente disminuye con el aumento de temperatura, lo que se traduce en una menor rigidez hidráulica del sistema.

Esta reducción del módulo elástico contribuye a disminuir la magnitud de las sobrepresiones generadas durante eventos transitorios, aunque no elimina la posibilidad de que se produzcan caídas significativas de presión o fenómenos asociados a condiciones críticas del flujo.

En conducciones enterradas, la interacción entre la tubería y el suelo circundante influye en la respuesta dinámica del sistema, al modificar la rigidez efectiva del conjunto y, en consecuencia, la velocidad de propagación de las ondas de presión. El confinamiento lateral proporcionado por el suelo restringe la deformación circunferencial de la tubería, incrementando su rigidez hidráulica equivalente. En el presente trabajo, este efecto fue considerado de manera indirecta mediante la adopción de parámetros mecánicos coherentes con las condiciones reales de instalación, sin incorporar una opción explícita de “enterramiento” en el software utilizado.

3.5.3 Tuberías poliméricas en sistemas de conducción de agua

Las tuberías de polietileno reticulado tipo PE-Xa (PEXGOL), utilizadas en el sistema analizado, presentan un comportamiento mecánico flexible y viscoelástico que influye directamente en la propagación de ondas de presión durante eventos transitorios. Su menor módulo de elasticidad respecto a materiales metálicos reduce la celeridad de onda y contribuye a atenuar parcialmente las sobrepresiones asociadas al golpe de ariete.

Las propiedades físicas y mecánicas relevantes del material fueron obtenidas del catálogo técnico del fabricante. Dichas propiedades incluyen parámetros vinculados a resistencia mecánica, estabilidad térmica y comportamiento frente a presión interna.

De acuerdo con la información técnica del fabricante, las tuberías pueden admitir incrementos transitorios de presión por encima de la presión de diseño en régimen permanente, siempre que se mantengan dentro de los límites establecidos para la temperatura de operación correspondiente.

No obstante, en sistemas de gran extensión y con perfiles topográficos variables, la flexibilidad del material no garantiza por sí sola la ausencia de condiciones críticas durante eventos transitorios severos. Por este motivo, resulta necesario evaluar el comportamiento hidráulico del sistema mediante simulaciones específicas, considerando tanto las propiedades del material como las condiciones operativas adoptadas en el modelo.

3.6 Golpe de ariete

3.6.1 Fundamentos físicos del fenómeno

El golpe de ariete es un fenómeno hidráulico transitorio que se produce cuando el flujo en una tubería experimenta una variación brusca de velocidad, generando ondas de presión que se propagan a lo largo del sistema. Estas variaciones pueden originarse por el cierre de válvulas, el arranque o parada de bombas, o cambios súbitos en las condiciones de operación.

Desde el punto de vista físico, el fenómeno se debe a la conversión repentina de la energía cinética del fluido en energía de presión. La perturbación generada se transmite como una onda elástica cuya magnitud puede producir sobrepresiones o depresiones significativas, capaces de provocar fallas estructurales, cavitación o colapso de la conducción (Wylie y Streeter, 1978).

El régimen transitorio se describe mediante la aplicación de la ecuación de continuidad y de la ecuación de cantidad de movimiento a un elemento diferencial de fluido, considerando la variación temporal de presión y velocidad, así como la elasticidad del líquido y de la tubería.

Las variables dependientes son la altura piezométrica $H=H(x,t)$ y la velocidad media $V=V(x,t)$, mientras que las variables independientes son la posición axial x y el tiempo t .

Las ecuaciones fundamentales del fenómeno (formulación de Allievi) pueden expresarse como:

$$\frac{\partial H(p)}{\partial x} = -\frac{1}{g} \left(\frac{\partial V(Q)}{\partial t} + V \frac{\partial V(Q)}{\partial x} \right) \quad (7)$$

$$\frac{\partial H(p)}{\partial t} + V \frac{\partial V(Q)}{\partial x} = -\frac{a^2}{g} \left(\frac{\partial V(Q)}{\partial x} \right) \quad (8)$$

Este sistema constituye un conjunto de ecuaciones diferenciales parciales no lineales cuya solución analítica general no es viable, por lo que en la práctica se emplean métodos numéricos, como el Método de las Características.

Si se desprecian los términos convectivos (válido para pequeñas variaciones de velocidad), las ecuaciones se simplifican y su solución puede escribirse como:

$$H - H_0 = \Delta H(\Delta p) = F\left(t - \frac{x}{a}\right) + f\left(t + \frac{x}{a}\right) \quad (9)$$

$$V - V_0 = \Delta V(\Delta Q) = -\frac{g}{a} \left[F\left(t - \frac{x}{a}\right) - f\left(t + \frac{x}{a}\right) \right] \quad (10)$$

Donde F y f representan ondas que se propagan en sentidos opuestos con velocidad constante a . La presión en un punto determinado resulta de la superposición de ondas incidentes y reflejadas.

Cuando una onda de presión alcanza un punto singular (depósito, válvula cerrada, bifurcación), puede reflejarse total o parcialmente. En un sistema ideal sin fricción el proceso sería oscilatorio indefinido; en sistemas reales el rozamiento produce amortiguamiento progresivo.

3.6.2 Celeridad de onda

La perturbación de presión se propaga con una velocidad denominada celeridad de onda a , próxima a la velocidad del sonido en el fluido, pero modificada por la elasticidad de la tubería.

Para una tubería de pared delgada, la celeridad puede expresarse como:

$$a = \frac{\sqrt{\frac{K_{liq}}{\rho}}}{\sqrt{1 + \frac{K_{liq} D c_1}{E e}}} = \sqrt{\frac{g/\gamma}{\left(\frac{1}{K_{liq}} + \frac{D c_1}{E_{Mat} e}\right)}} \quad (11)$$

La celeridad aumenta con la rigidez del material y disminuye cuando la tubería es más flexible. Este parámetro resulta determinante en la magnitud de las sobrepresiones generadas.

3.6.3 Tiempo característico y tipos de cierre

El tiempo característico del sistema corresponde al tiempo necesario para que la onda recorra la tubería y regrese al punto de origen, el mismo se define como:

$$t_c = \frac{2L}{a} \quad (12)$$

Este parámetro permite clasificar el tipo de maniobra de cierre:

1) Cierre instantáneo

$$t_c = \frac{2L}{a} = 0 \quad (13)$$

2) Cierre brusco

$$t_c < \frac{2L}{a} \neq 0 \quad (14)$$

En ambos casos puede aplicarse la ecuación de Joukovsky para estimar la sobrepresión máxima:

$$\Delta H = -\frac{\Delta V a}{g} \quad (15)$$

3) Cierre límite

$$t_{\text{cierre límite}} = t_c \quad (16)$$

4) Cierre lento

$$t_{\text{Cierre lento}} > \frac{2L}{a} \quad (17)$$

Para cierre lento, la variación de presión puede estimarse mediante la expresión de Michaud:

$$\Delta H = \frac{2L \Delta V}{g T} \quad (18)$$

En la práctica, las válvulas presentan cierres graduales; sin embargo, si el tiempo de cierre es menor que el tiempo característico, la sobrepresión máxima será equivalente a la predicha por la ecuación de Joukovsky. El aumento del tiempo de cierre por encima del tiempo característico t_c constituye una estrategia efectiva para reducir la magnitud del golpe de ariete.

3.7 Fenómenos asociados a los transitorios

3.7.1 Inversión de flujo

La inversión de flujo puede producirse durante la parada de bombas cuando, tras la desaceleración del caudal, el fluido continúa moviéndose debido a la energía cinética

almacenada en la conducción o a diferencias de carga estática en el sistema. En estas condiciones, el caudal puede reducirse hasta anularse y posteriormente cambiar de sentido, generando un flujo inverso respecto al régimen normal de operación.

Este fenómeno adquiere especial relevancia en sistemas de bombeo extensos, donde la gran longitud de las conducciones y los desniveles topográficos favorecen la persistencia del movimiento del fluido una vez detenida la bomba. La inversión de flujo modifica la propagación de las ondas de presión y puede dar lugar a transitorios hidráulicos severos.

La ocurrencia de flujo inverso condiciona el comportamiento de dispositivos como las válvulas de retención, cuyo cierre puede generar sobrepresiones adicionales. Asimismo, constituye la condición previa para la eventual rotación inversa de la bomba, fenómeno que se analiza en el apartado siguiente.

3.7.2 Rotación inversa de bombas

La rotación inversa de una bomba puede producirse durante eventos de parada cuando el flujo del sistema, impulsado por la energía hidráulica remanente o por diferencias de carga estática, actúa sobre el impulsor en sentido contrario al de operación normal. En estas condiciones, la bomba deja de comportarse como un elemento impulsor y pasa a operar transitoriamente como una turbomáquina hidráulica arrastrada por el flujo.

La correcta representación de este fenómeno requiere considerar el comportamiento de la bomba en distintos cuadrantes de operación, contemplando combinaciones de caudal y velocidad de rotación tanto positivas como negativas. Para ello, los modelos de simulación transitoria emplean formulaciones basadas en el concepto de cuatro cuadrantes, que permiten extender las curvas características de la bomba más allá del régimen normal de funcionamiento.

En particular, el Método de Suter constituye una herramienta ampliamente utilizada para la representación adimensional del comportamiento de turbomáquinas bajo condiciones de flujo y rotación inversa. Este método permite reconstruir el comportamiento de la bomba en régimen transitorio a partir de un conjunto reducido de datos de referencia, evitando la necesidad de disponer de curvas experimentales completas para todos los cuadrantes de operación.

En el presente trabajo, este enfoque sustenta la simulación de eventos de parada de bombas y el análisis de condiciones de inversión de flujo y rotación inversa, tal como se implementa en el software AFT Impulse.

3.8 Cavitación y separación de columna

3.8.1 Cavitación: definición y condiciones de ocurrencia

La cavitación es un fenómeno hidráulico que ocurre cuando la presión local del fluido desciende por debajo de su presión de vapor, dando lugar a la formación de cavidades de vapor en el seno de la fase líquida. Este fenómeno puede presentarse tanto en equipos hidráulicos como en conducciones, y está asociado a variaciones rápidas de presión durante el funcionamiento del sistema.

En sistemas de bombeo, la cavitación puede originarse durante eventos transitorios como arranques y paradas de bombas o maniobras de válvulas. En conducciones extensas, estas condiciones pueden presentarse en puntos altos de la traza o en sectores donde se produce una desaceleración rápida del flujo. En estos casos, la cavitación puede constituir el paso inicial hacia la separación de columna, fenómeno que se analiza en apartados posteriores.

3.8.2 Presión de vapor y caídas de presión

La presión de vapor de un fluido es la presión a la cual el líquido entra en equilibrio con su fase vapor a una determinada temperatura. Para el agua este valor depende exclusivamente de la temperatura y constituye el umbral físico por debajo del cual el fluido comienza a vaporizar localmente.

En sistemas hidráulicos, la presión absoluta puede descender transitoriamente por debajo de la presión de vapor como consecuencia de variaciones rápidas de caudal y velocidad asociadas a eventos como parada de bombas o maniobras bruscas de válvulas. La propagación de ondas de presión puede generar depresiones significativas, particularmente en sistemas extensos con perfiles topográficos variables, donde la combinación de desaceleración del flujo, pérdidas de carga y elevaciones geométricas favorece que la presión local alcance valores críticos.

En tales condiciones se establecen las bases físicas para la aparición de cavitación y fenómenos asociados, cuya evolución depende de la magnitud y duración de la presión mínima alcanzada.

3.8.3 Separación de columna en sistemas extensos

La separación de columna se produce cuando la presión del fluido desciende hasta valores cercanos o inferiores a la presión de vapor durante un periodo suficientemente

prolongado, provocando la pérdida de continuidad del líquido en la conducción y la formación de regiones extensas de vapor o vacío parcial.

En sistemas de conducción extensos, este fenómeno puede presentarse durante eventos transitorios severos, como la parada brusca de bombas o maniobras rápidas de válvulas, especialmente en tramos elevados de la traza o en sectores donde se produce una desaceleración significativa del flujo. A diferencia de la cavidad incipiente, la separación de columna involucra volúmenes apreciables del fluido y genera discontinuidades en la respuesta hidráulica del sistema.

Desde el punto de vista del modelado numérico, la separación de columna introduce condiciones que desafían la hipótesis de continuidad del fluido en las que se basan los modelos hidráulicos convencionales. En herramientas de simulación de transitorios, como AFT Impulse, puede manifestarse mediante inestabilidades numéricas o resultados no físicamente representativos si no se adoptan estrategias de modelación adecuadas. Por ello, la identificación de condiciones propensas a este fenómeno resulta fundamental para la correcta interpretación de los resultados.

3.8.4 Consecuencias hidráulicas de la cavitación

La cavitación y la separación de columna tienen consecuencias hidráulicas relevantes durante eventos transitorios, ya que implican una alteración de la continuidad del flujo y modifican la propagación de las ondas de presión en la conducción.

Cuando las cavidades de vapor colapsan y el fluido restablece la continuidad de la columna líquida, puede generarse sobrepresiones locales significativas asociadas a la recombinación del flujo. Estas sobrepresiones pueden superar las registradas en transitorios sin cavitación, incrementando el riesgo de solicitaciones severas sobre tuberías, válvulas y equipos.

Asimismo, la presencia de cavitación puede inducir inestabilidades en el caudal, discontinuidades en los perfiles de velocidad y dificultades en la interpretación de los resultados de simulación, particularmente en sistemas extensos y con topografías complejas. Por ello, la identificación de zonas con presiones próximas a la presión de vapor resulta fundamental para evaluar el comportamiento global del sistema y definir medidas de protección adecuadas frente a transitorios hidráulicos.

3.9 Resolución numérica de transitorios

3.9.1 Resolución de transitorios mediante el Método de las Características

La simulación de los transitorios hidráulicos desarrollada en el presente trabajo se realiza mediante el software AFT Impulse, el cual utiliza el Método de las Características como base de cálculo. Este método es ampliamente empleado para la resolución de problemas de flujo no permanente en conducciones presurizadas.

El Método de las Características se fundamenta en la transformación de las ecuaciones de continuidad y cantidad de movimiento en ecuaciones definidas a lo largo de trayectorias características, lo que permite describir la propagación de ondas de presión y velocidad generadas por eventos transitorios, como arranques y paradas de bombas o maniobras de válvulas.

En el presente estudio, la implementación del método se realiza a través del software de simulación, sin desarrollar explícitamente el esquema numérico, permitiendo obtener la evolución temporal de las variables hidráulicas, tales como presión, caudal y velocidad, en los distintos puntos del sistema.

3.9.2 Implementación en el software AFT Impulse

AFT Impulse es un software especializado en el análisis y simulación de transitorios hidráulicos en sistemas de tuberías que transportan líquidos. En el presente trabajo se utiliza para evaluar la respuesta dinámica del sistema frente a distintos eventos transitorios.

El procedimiento de cálculo se desarrolla en dos etapas. En primer lugar, el software determina la condición de régimen estacionario del sistema mediante la resolución de las ecuaciones de conservación de masa y cantidad de movimiento. A partir de esta condición inicial, el análisis transitorio se realiza mediante el Método de las Características, ampliamente utilizado para la resolución de problemas de flujo no permanente en conducciones.

El modelo asume flujo unidimensional, sistema completamente lleno de líquido y una velocidad de propagación de la onda constante durante el transitorio. Asimismo, permite la incorporación de distintos dispositivos hidráulicos y condiciones operativas que influyen en la respuesta transitoria del sistema.

3.10 Medidas de protección frente a transitorios hidráulicos

3.10.1 Principios generales de mitigación

Las medidas de protección frente a transitorios hidráulicos tienen por finalidad controlar la respuesta dinámica del sistema, limitando sobrepresiones, evitando caídas excesivas de presión y reduciendo la probabilidad de fenómenos como cavitación, separación de columna o inversión de flujo. Estas medidas actúan modificando la respuesta dinámica del sistema, ya sea absorbiendo energía, controlando la admisión o expulsión de aire, o regulando la evolución temporal del caudal.

La selección de las protecciones adecuadas depende de las características del sistema, tales como la longitud de las conducciones, el perfil topográfico, el tipo de material de las tuberías y los eventos transitorios considerados.

3.10.2 Dispositivos de protección hidráulica

Entre los dispositivos utilizados para la protección de sistemas de bombeo frente a transitorios hidráulicos se encuentran las válvulas anticipadoras de onda, las válvulas de alivio, los depósitos hidroneumáticos y las válvulas de aire. Estos dispositivos actúan modificando la respuesta dinámica del sistema, ya sea limitando sobrepresiones, absorbiendo energía o regulando la admisión y expulsión de aire.

Válvulas anticipadoras de onda

Las válvulas anticipadoras de onda son dispositivos diseñados para actuar frente a transitorios asociados a la parada súbita de bombas o cortes de energía eléctrica. Su principio de funcionamiento se basa en la detección de una caída rápida de presión aguas arriba, lo que provoca su apertura anticipada antes de que la onda de sobrepresión generada por el retorno del fluido alcance valores críticos. De esta manera, la válvula permite la descarga controlada del fluido hacia un reservorio o línea de alivio, reduciendo la magnitud del pico de presión en el sistema.

A diferencia de una válvula de alivio convencional, que abre al alcanzar una presión determinada, la válvula anticipadora actúa en función de la variación temporal de la presión, anticipándose al fenómeno transitorio.

Válvulas de alivio

Las válvulas de alivio limitan la presión máxima en el sistema mediante la apertura cuando la presión supera un valor predeterminado. Su función principal es proteger la conducción y los equipos frente a sobrepresiones localizadas, disipando energía hidráulica mediante descarga controlada.

Válvulas de aire

En conducciones extensas, las válvulas de aire desempeñan un rol particularmente relevante, especialmente en puntos altos del trazado. Su función es permitir la expulsión de aire durante el llenado y operación normal, así como admitir aire ante caídas bruscas de presión o durante el vaciado del sistema, reduciendo el riesgo de formación de vacío. Según su diseño, pueden operar como válvulas de purga, válvulas de aire/vacío o válvulas combinadas.

La ubicación de válvulas de aire a lo largo de una conducción responde a criterios hidráulicos asociados al perfil topográfico y al comportamiento dinámico del sistema. La Figura 8 muestra un esquema general de localización recomendada según manuales técnicos como AWWA.

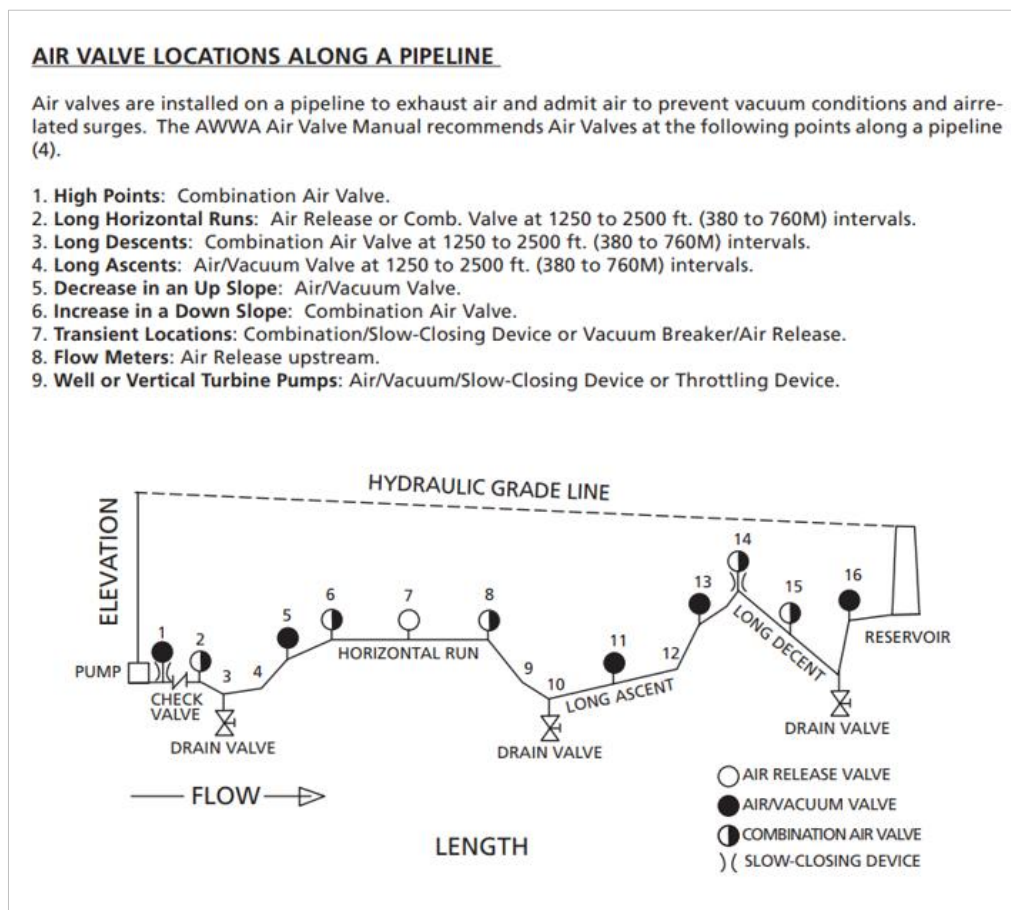


Figura 8. Disposición típica y tipos recomendados de válvulas de aire según la topografía del sistema.

3.10.3 Estrategias operativas y tiempos de maniobra

Además de los dispositivos físicos de protección, la mitigación de los transitorios hidráulicos puede lograrse mediante estrategias operativas adecuadas, tales como la optimización de los tiempos de arranque y parada de bombas, la secuenciación de

equipos, el control de velocidades mediante variadores de frecuencia y la coordinación con válvulas de control.

Estas estrategias permiten reducir la severidad de los transitorios sin necesidad de incorporar elementos adicionales, y resultan especialmente relevantes en sistemas existentes donde las modificaciones físicas pueden ser limitadas.

4 Metodología

La metodología de trabajo se desarrolló a partir de la recopilación y análisis de la información técnica disponible del Acueducto Mariana – Salar de Llullaillaco, tomando como referencia la memoria de cálculo en estado estacionario correspondiente a los casos 4A y 4B (Anexo 1 - Memoria de Cálculo).

El procedimiento se estructuró en las siguientes etapas:

4.1 Modelado en régimen permanente

Se realizó el modelado hidráulico del sistema en estado estacionario utilizando el software Aspen HYSYS, con el objetivo de validar los parámetros hidráulicos y operativos del sistema de bombeo, tales como caudales, pérdidas de carga y puntos de operación.

Este modelo constituyó la condición inicial para el análisis transitorio posterior.

4.2 Modelado y simulación transitoria

A partir del modelo validado en régimen permanente, se desarrolló la representación dinámica del sistema mediante el software AFT Impulse, el cual utiliza el Método de las Características para la resolución de transitorios hidráulicos.

Se simularon distintos escenarios representativos, incluyendo:

- Fallas por corte de suministro eléctrico.
- Parada abrupta por fallo en bomba.
- Cierre abrupto de válvulas.
- Arranque de bombas.

4.3 Análisis de resultados

Los resultados obtenidos fueron analizados en términos de evolución temporal de presión y caudal, identificando sectores críticos del ducto asociados a:

- Sobrepresiones.
- Caídas significativas de presión.
- Potencial aparición de cavitación.
- Separación de columna.

4.4 Evaluación de medidas de mitigación

A partir del análisis de resultados, se definieron alternativas de mitigación, incluyendo modificaciones operativas y la incorporación de dispositivos de protección hidráulica.

Las medidas seleccionadas fueron definidas en función del comportamiento hidráulico observado, proponiendo su tipo y ubicación estratégica a lo largo de la conducción. En el presente estudio no se realizó la modelación dinámica detallada de dichas protecciones, quedando su evaluación cuantitativa como instancia de desarrollo futuro.

5 Desarrollo

5.1 Caracterización general del sistema

5.1.1 Ubicación

El sistema de conducción y bombeo correspondiente al Acueducto Mariana se ubica en la provincia de Salta, Argentina, en la región del Salar de Llullaillaco. La instalación se emplaza en una zona de alta montaña, lo que implica condiciones particulares de altitud y presión atmosférica que influyen en el comportamiento hidráulico del sistema.

Las Figura 9 y Figura 10 muestran la localización general del proyecto, la planta de destino y la disposición relativa entre los pozos de captación, respectivamente.



Figura 9. Locación de la planta.



Figura 10. Localización de Pozos SRH-144/145 QDA.

5.1.2 Traza y perfil

La traza del acueducto fue definida a partir de información georreferenciada suministrada por el cliente, a partir de la cual se obtuvo el perfil altimétrico completo del sistema. El relevamiento permitió determinar las cotas y distancias necesarias para el modelado hidráulico.

La Figura 11 muestra la traza general del acueducto, indicando la ubicación de las estaciones de bombeo y el perfil de elevación a lo largo del recorrido.

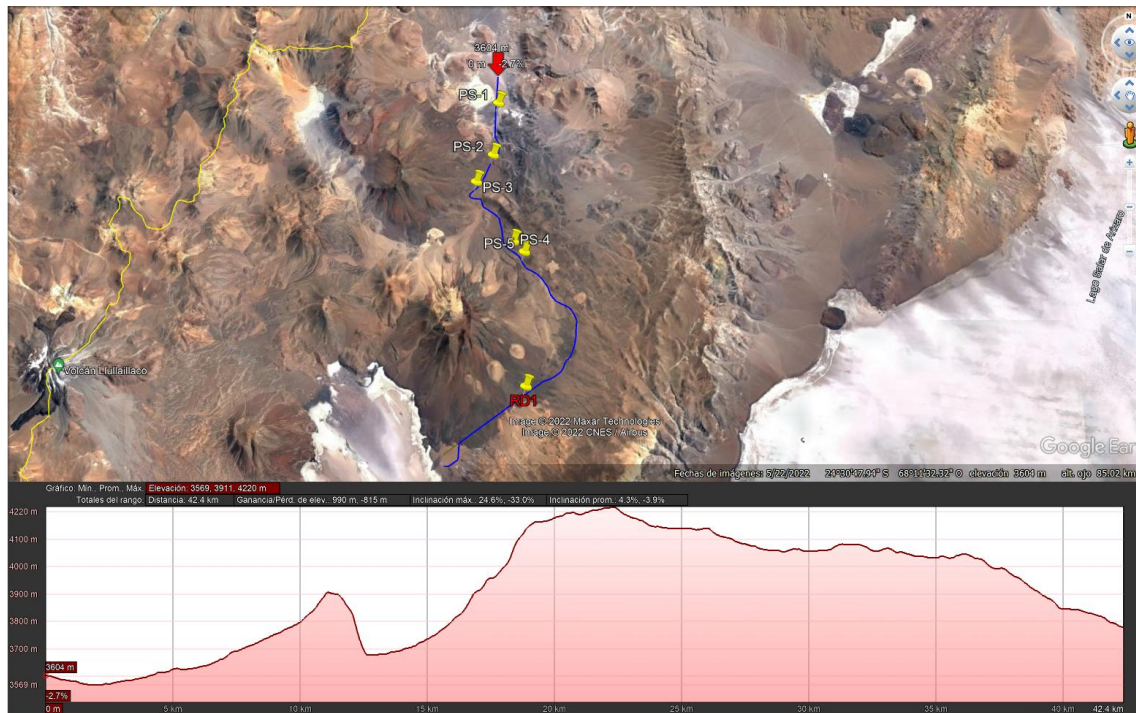


Figura 11. Traza y perfil de elevación del acueducto en Google Earth.

El sistema presenta una elevación máxima de 4.775 msnm, una elevación mínima de 3.754 msnm y una elevación promedio aproximada de 4.200 msnm.

En el tramo final, el ducto se divide en dos ramales independientes que abastecen a la Pileta de Agua de Distribución (PAD) y al Tanque de Agua de Proceso (TDP), según se muestra en la Figura 12.



Figura 12. Detalle de la división del ducto en dos ramales para ingresar a la pileta principal de agua de distribución (PAD) y al tanque de Agua de Suministro (TDP).

5.1.3 Condiciones Ambientales

Las condiciones ambientales relevantes para el análisis hidráulico del sistema están asociadas principalmente a la altitud de emplazamiento y al rango térmico de operación.

La presión atmosférica promedio en la zona es de aproximadamente 0,634 bar.

Las temperaturas registradas en la zona varían entre $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $25\text{ }^{\circ}\text{C}$.

5.1.4 Caracterización del fluido

El fluido transportado corresponde a agua, cuyas propiedades físicas fueron definidas en función de la temperatura promedio de operación ($10\text{ }^{\circ}\text{C}$) para su utilización en el modelado hidráulico.

En la Tabla 1 se presentan los parámetros considerados en las simulaciones, incluyendo densidad, viscosidad dinámica, presión de vapor y módulo volumétrico, este último empleado en el cálculo de la celeridad de la onda durante el análisis transitorio.

Tabla 1. Características del fluido¹.

Características		SSR-144 / SSR-145
Descripción	Unidad	Cantidad
Fluido	-	Agua
Temperatura del fluido	°C	10
Densidad	Kg/m ³	999,76
Presión de vapor	Bar	0,01175
Viscosidad del agua	cP	1,317
Módulo de Compresibilidad ²	GPa	1,94

5.2 Descripción hidráulica del sistema

El sistema está compuesto por un ducto troncal principal que transporta el caudal total proveniente de los pozos de producción hasta el área de almacenamiento final. Cada pozo se conecta al troncal mediante un ramal individual desde su correspondiente manifold.

El diseño considera como caudal de operación el total de los flujos máximos diarios reportados para los pozos de producción.

A lo largo de la traza se disponen cuatro estaciones de bombeo, cada una con una bomba en operación y una unidad de respaldo (stand-by). Las bombas son del tipo centrífuga y operan con variadores de frecuencia, permitiendo el control de velocidad y la regulación del sistema.

Dado que no se dispone de información detallada sobre los tramos previos a la primera estación de bombeo, el modelo hidráulico se define a partir de la progresiva 3 km, correspondiente a la succión de dicha estación, donde se establece la condición de borde de entrada al sistema.

Previo al ingreso a planta, el ducto principal se divide en dos ramales independientes que abastecen a la Pileta de Agua de Distribución (PAD) y al Tanque de Agua de Proceso (TDP). Ambos ramales cuentan con sistemas de regulación de presión que aseguran condiciones hidráulicas adecuadas a la entrada de los reservorios.

La Figura 13 muestra el esquema general del sistema, indicando estaciones de bombeo, válvulas reductoras y perfil altimétrico a lo largo de la progresiva analizada.

¹ Valores obtenidos a partir del programa AFT Impulse a 1 atm de presión y 10°C.

² El módulo de compresibilidad (K) de un material mide su resistencia a la compresión uniforme y, por tanto, indica el aumento de presión requerido para causar una disminución unitaria de volumen dado. Se define como $K = -\frac{\Delta p}{\frac{\Delta V}{V}}$, donde p y V son la presión y el volumen respectivamente.

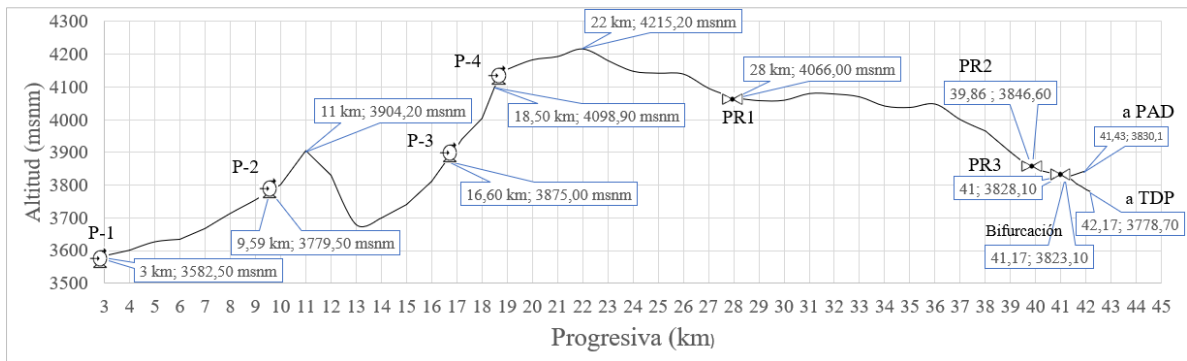


Figura 13. Esquema hidráulico del sistema analizado a partir de la progresiva 3 km.

En la Tabla 2 se resumen las progresivas, cotas y condiciones de borde consideradas en el modelado hidráulico.

Tabla 2. Progresivas, cotas y condiciones de borde del modelo hidráulico.

	Progresiva (km)	Altitud (msnm)	Tipo de condición	Valor
P-1	3,00	3582,50	Presión de succión	1 Bar
P-2	9,59	3779,50	Presión de succión	1 Bar
P-3	16,60	3875,00	Presión de succión	1 Bar
P-4	18,50	4098,90	Presión de succión	1 Bar
PR1	28,00	4066,00	Presión aguas abajo	10 Bar
PR2	39,86	3846,60	Presión aguas abajo	6 Bar
PR3	41,00	3828,10	Presión aguas abajo	5 Bar

5.3 Análisis en régimen estacionario

El análisis en régimen estacionario se desarrolló considerando los casos 4A y 4B de la memoria de cálculo, correspondientes a los caudales mínimo y máximo del sistema (118 m³/h y 180 m³/h, respectivamente).

Para ambos escenarios se modeló el sistema completo mediante el software Aspen HYSYS, determinando presiones, pérdidas de carga y condiciones de operación en cada estación de bombeo.

Las Figura 14 y Figura 15 presentan el modelo hidráulico correspondiente a cada caso.

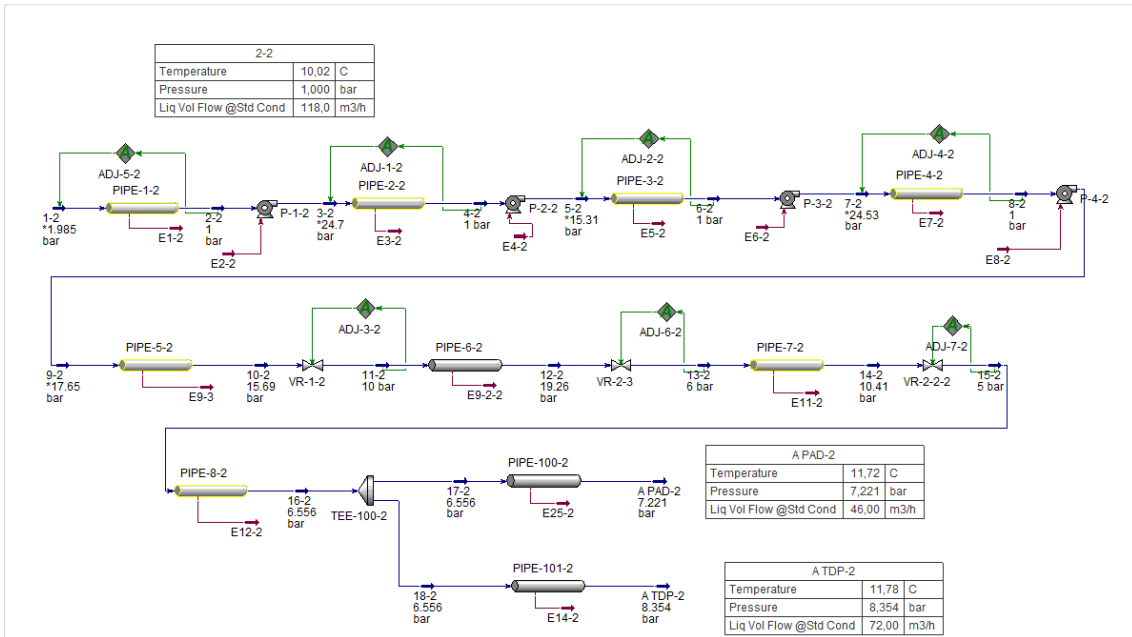


Figura 14. Modelo hidráulico en régimen estacionario – Caso 4A (caudal mínimo)

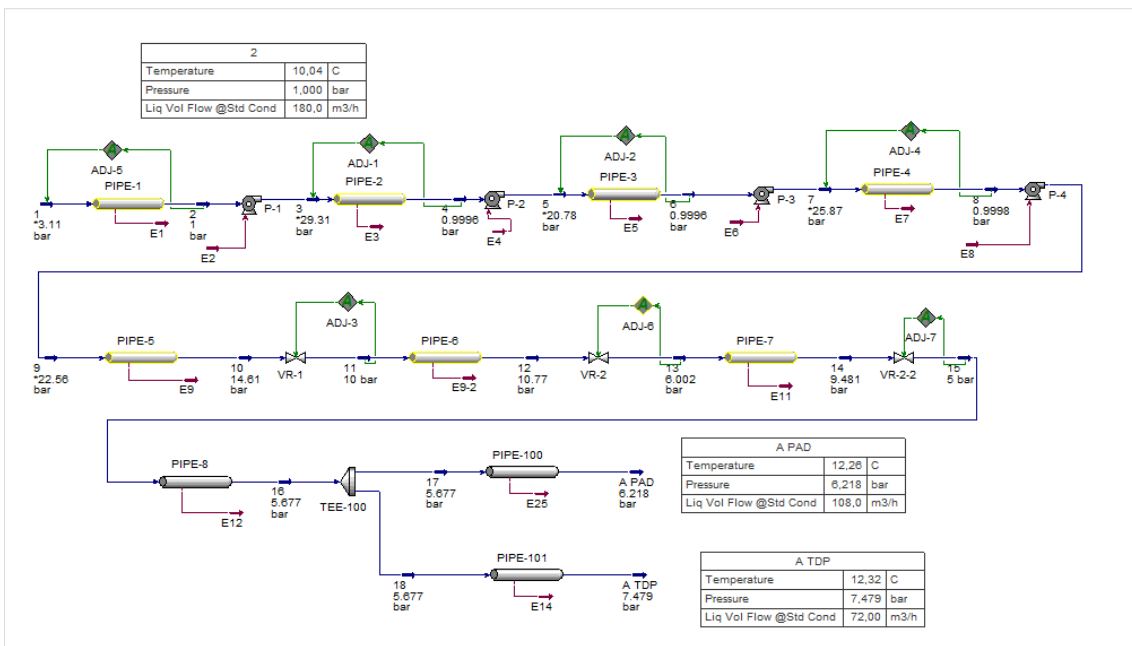


Figura 15. Modelo hidráulico en régimen estacionario – Caso 4B (caudal máximo).

5.3.1 Verificación de velocidades

Se construyó el perfil de velocidades para los caudales mínimo y máximo (Figura 16).

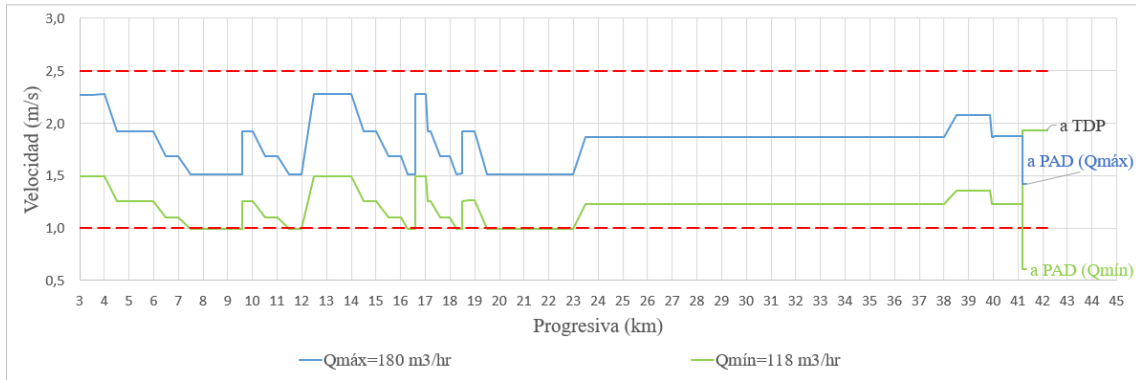


Figura 16. Perfil de velocidades.

Las velocidades obtenidas se mantienen dentro del rango recomendado por el fabricante (1,0–2,5 m/s), con un valor mínimo del orden de 0,6 m/s en el tramo posterior a la bifurcación hacia la PAD para el caso de caudal mínimo. Este valor, si bien inferior al rango óptimo, resulta técnicamente aceptable y no compromete el desempeño hidráulico del sistema.

5.3.2 Verificación de presiones

El dimensionamiento del acueducto contempla tramos de tubería Pexgol de distintas clases y diámetros, cuya distribución a lo largo de la traza se detalla en el Anexo 2 - Altimetría y clase de las cañerías.

La selección de la clase de cada tramo se verificó comparando las presiones máximas obtenidas en régimen estacionario con las presiones de trabajo permitidas (PTP) correspondientes a la temperatura de diseño adoptada (10 °C).

Las presiones máximas resultan inferiores a las PTP de cada clase (Tabla 3).

Tabla 3. Presiones de trabajo permitidas (PTP) para tuberías Pexgol enterradas a la temperatura de diseño adoptada (10 °C).

Clase	Diámetro Exterior (mm)	Diámetro Interior (mm)	T de Diseño (°C)	PTP (Bar)
Clase 15	250	204,6	10	17
Clase 15	225	184,2	10	17
Clase 15	140	114	10	17
Clase 15	200	163,8	10	17
Clase 19	250	194,2	10	21,4
Clase 19	225	175	10	21,4
Clase 19	140	108	10	21,4
Clase 24	250	181,6	10	26,9
Clase 30	250	167	10	33,9

La Figura 17 muestra el perfil de presiones del sistema junto con las presiones admisibles para cada tramo.

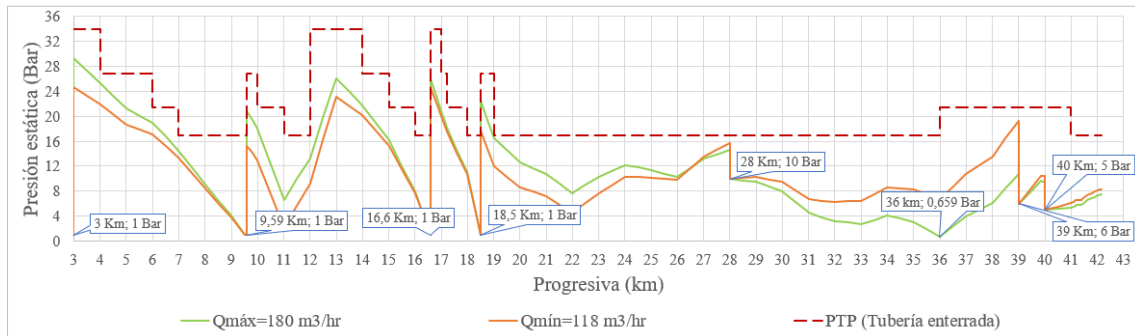


Figura 17. Perfil de presiones en régimen estacionario y comparación con la presión de trabajo permitida (PTP) para la condición de instalación adoptada.

5.3.3 Análisis de cavitación en succión (NPSH)

Con el fin de verificar el riesgo de cavitación en régimen permanente, se evaluó el NPSH disponible en la succión de las bombas.

El cliente exige una presión absoluta mínima de 1 bar en la brida de succión. Considerando una presión de vapor del agua de 0,01176 bar y la velocidad media en succión de 1 m/s (Figura 16), el NPSH disponible se estimó mediante:

$$NPSH_{disp} = \frac{P_s - P_{vap}}{\rho g} + \frac{V_s^2}{2g}$$

donde:

P_s : es la presión absoluta mínima en la brida de succión.

P_{vap} : es la presión de vapor del fluido.

V_s : es la velocidad media en la tubería de succión.

Dado que el requisito de 1 bar corresponde a la presión en la brida de succión, resultando un NPSH disponible aproximado de 10,13 m, valor significativamente superior al NPSH requerido (Figura 18).

El NPSH requerido fue tomado del fabricante y ajustado a la velocidad real de operación.

En la Figura 18 se presenta la comparación entre el NPSH disponible y el NPSH requerido para las cuatro bombas en función del caudal de operación.

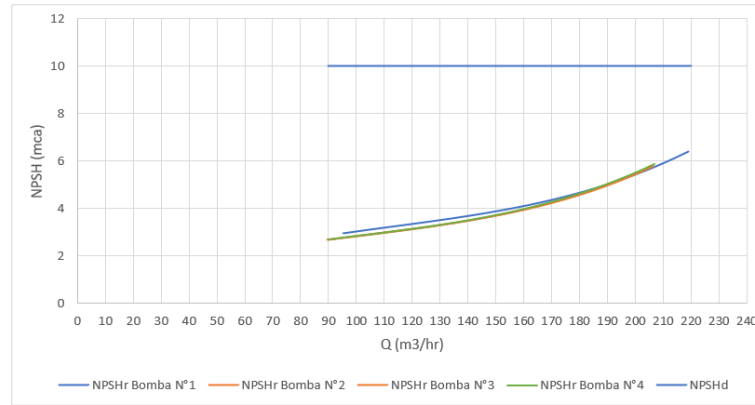


Figura 18. Comparación entre NPSH disponible y NPSH requerido para las bombas del sistema.

Del análisis se observa que:

- El NPSH disponible (≈ 10 m) se mantiene constante para el rango operativo.
- El NPSH requerido por el fabricante no supera los 6,5 m en el punto de mayor caudal.
- Se verifica un margen mínimo superior a 3 m en todo el rango de operación.

La condición de aceptación adoptada fue:

$$\text{NPSH}_{\text{disp}} = \text{NPSH}_{\text{requerido}} + 1 \text{ m}$$

En concordancia con ANSI/HI 9.6.1.

En consecuencia, no se prevé cavitación en la succión en régimen permanente.

Los posibles efectos durante eventos transitorios se analizan en el capítulo correspondiente.

5.4 Selección y verificación de equipos

5.4.1 Bombas

5.4.1.1 Selección adoptada

Del análisis de la memoria de cálculo se observa que los casos 4A y 4B empleaban configuraciones distintas de bombas para una misma estación. Dado que la única variación entre ambos escenarios es el caudal, se adopta la configuración correspondiente al caso 4B, asegurando que cada estación opere con un único modelo de bomba regulado mediante variación de frecuencia.

Tabla 4. Modelo de bomba adoptado en cada estación de bombeo.

Estación	Modelo adoptado
P-1	TMB80-125/5
P-2	TMB80-125/4
P-3	TMB80-125/5
P-4	TMB80-125/4

Las curvas características originales proporcionadas por el cliente se presentan en el Anexo 3 - Datos de las bombas.

5.4.1.2 Curvas y punto de operación

Las curvas características de las bombas fueron obtenidas a partir de los datos digitalizados del fabricante y ajustadas mediante las leyes de afinidad para distintas frecuencias.

Las Figura 19 y Figura 20 muestran las curvas de las bombas para los caudales mínimo y máximo.

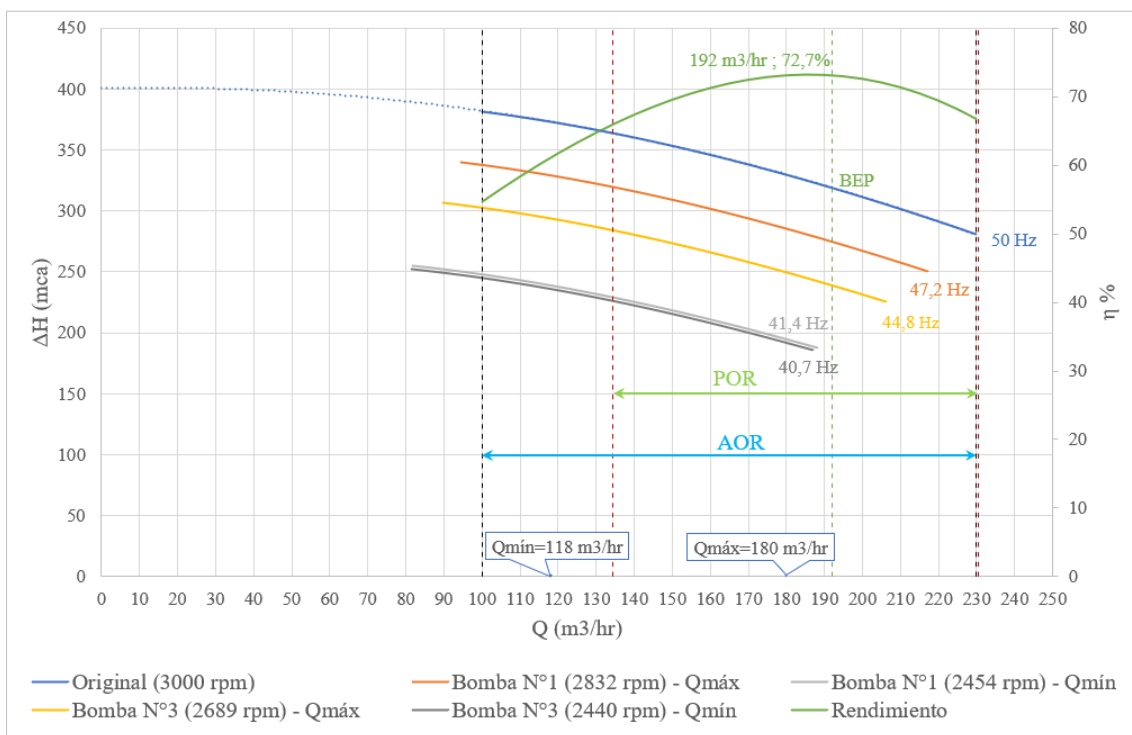


Figura 19. Curvas de las bombas P-1 y P-3 indicando punto de mejor rendimiento y caudales mínimo y máximo.

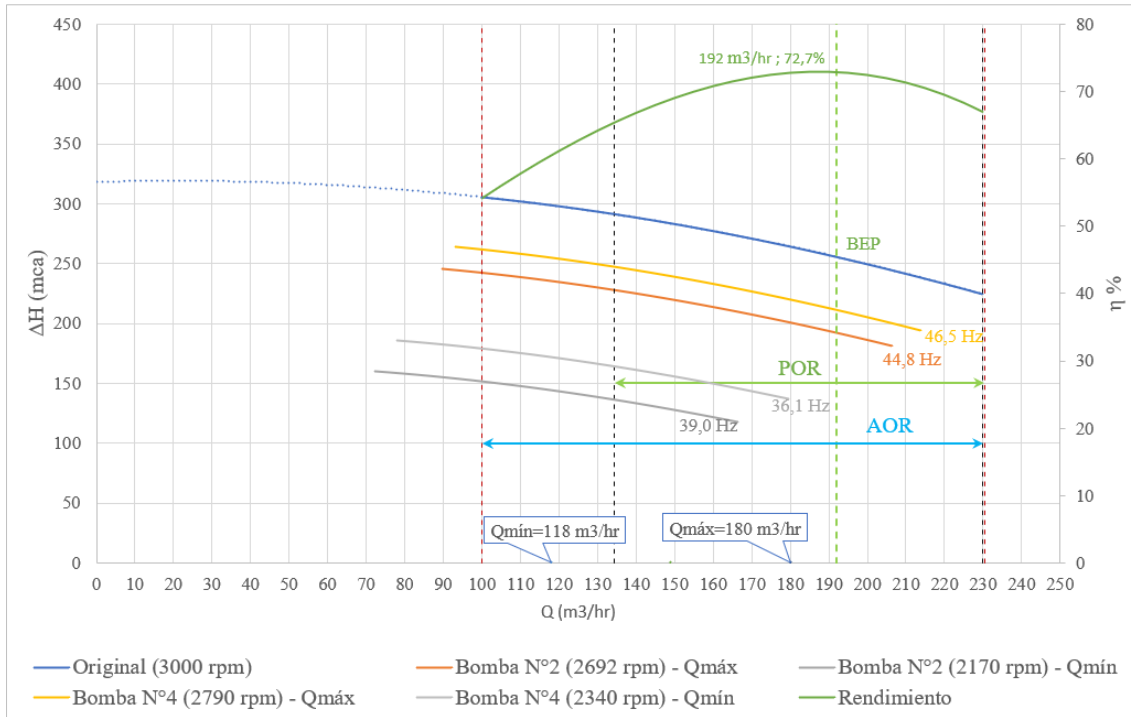


Figura 20. Curvas de las bombas P-2 y P-4 indicando punto de mejor rendimiento y caudales mínimo, nominal y máximo.

Se verifica que el caudal máximo se encuentra dentro de la Región de Operación Preferida (POR), mientras que el caudal mínimo opera dentro de la Región de Operación Aceptable (AOR).

Tabla 5. Presiones de succión y descarga en cada estación para $Q = 180 m^3/h$.

Estación	Frecuencia (Hz)	RPM	Bomba Saer	α	Psucc (Bar)	Pdesc (Bar)
Primera	47,20	2832	TMB80-125/5	0,944	1	29,31
Segunda	44,86	2692	TMB80-125/4	0,897	1	20,78
Tercera	44,82	2689	TMB80-125/5	0,896	1	25,87
Cuarta	46,50	2790	TMB80-125/4	0,930	1	22,56

Se observa que el punto de mayor rendimiento de la bomba se ubica en $192 m^3/h$, valor superior al caudal máximo de operación ($180 m^3/h$), lo que indica que el sistema no opera exactamente en el BEP para la condición más exigente.

5.4.1.3 Curvas de subsistemas

Para determinar la curva del sistema, el acueducto fue dividido en cuatro subsistemas correspondientes a los tramos comprendidos entre estaciones consecutivas. Las pérdidas distribuidas y localizadas fueron obtenidas mediante el modelo en Aspen HYSYS para los caudales máximo y mínimo.

Dado que el sistema presenta una longitud total del orden de 42 km, las pérdidas distribuidas resultan predominantes frente a las pérdidas localizadas convencionales, tales como accesorios (codos, tees, reducciones) y válvulas de seccionamiento en posición totalmente abierta.

Asimismo, no se disponía de información técnica detallada respecto a los coeficientes de pérdida (K) de dichas válvulas y accesorios. Considerando su contribución relativa reducida frente a la fricción distribuida en conducciones extensas, su influencia fue considerada despreciable en el análisis de las curvas del sistema.

En contraste, las pérdidas localizadas asociadas a las válvulas reductoras de presión (PR) fueron incorporadas explícitamente, dado que constituyen elementos de control cuyo objetivo es introducir una pérdida de carga significativa y regulada en la conducción.

Las curvas resultantes y el procedimiento detallado de cálculo para la determinación de los puntos de funcionamiento de las estaciones de bombeo se presentan a continuación.

Subsistema N°1

Se define el Subsistema N°1 a partir de la succión de la primera bomba hasta la succión de la segunda bomba.

Tabla 6. Diferencia de altura entre la primer y segunda bomba (H_B).

	Prog (km)	Alt (msnm)	HB
P-1	3,00	3582,50	197,00
P-2	9,59	3779,50	

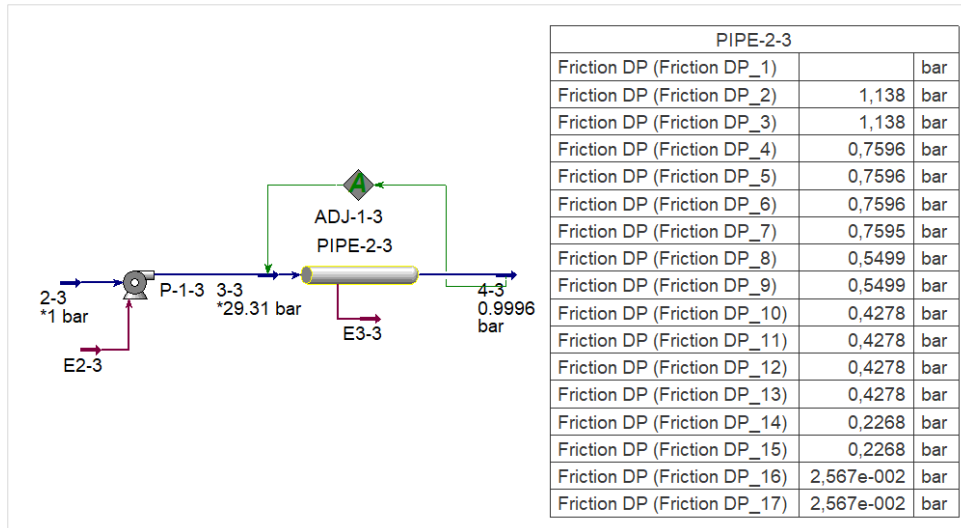


Figura 21. Pérdidas distribuidas obtenidas en Aspen HYSYS entre la primer y segunda bomba (P-1 y P-2) para un caudal de 180 m³/hr.

Tabla 7. Resultados del cálculo de pérdidas distribuidas a partir de datos obtenidos de la simulación en Aspen HYSYS.

Tramo	Q (m ³ /hr)	ΔJ (bar)	ΔJ (Pa)	ΔJ (mca)	k	H(m)
PIPE - 2	200	10,44	1044487,81	106,61	34540,68	303,61
	192	9,70	969980,68	99,00	34805,52	296,00
	180	8,63	862928,88	88,08	35230,39	285,08
	150	6,20	620396,11	63,32	36473,22	260,32
	120	4,15	414607,75	42,32	24374,88	224,08
	118	4,02	402226,62	41,05	53205,72	254,16
	100	2,98	298495,11	30,47	39484,33	227,47
	50	0,86	86140,07	8,79	45577,73	205,79

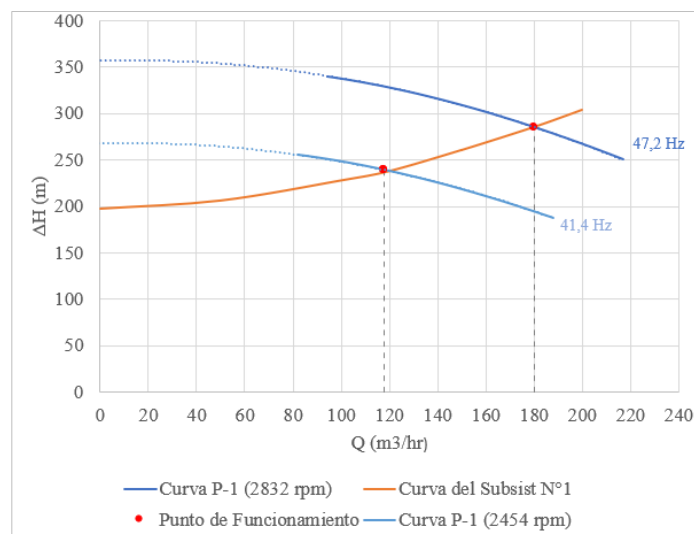


Figura 22. Curva de la bomba P-1 y del Subsistema N°1, con sus respectivos puntos de funcionamiento para caudal máximo y mínimo.

Subsistema N°2

Se define el Subsistema N°2 a partir de la succión de la segunda bomba hasta la succión de la tercera bomba.

Tabla 8. Diferencia de altura entre la segunda y tercera bomba (H_B).

	Prog (km)	Alt (msnm)	HB
P-2	9,59	3779,50	95,50
P-3	16,6	3875,00	

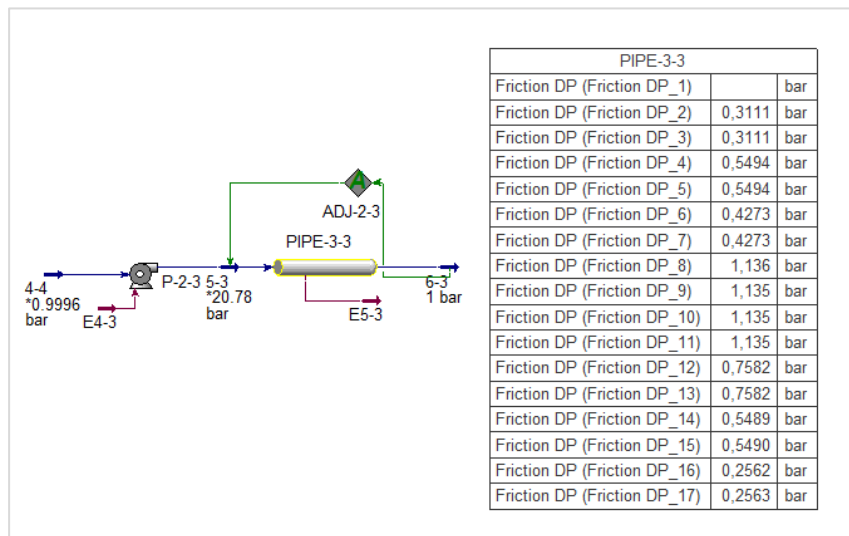


Figura 23. Pérdidas distribuidas obtenidas en Aspen HYSYS entre la primer y segunda bomba (P-2 y P-3) para un caudal de 180 m³/hr.

Tabla 9. Resultados del cálculo de pérdidas distribuidas a partir de datos obtenidos de la simulación en Aspen HYSYS.

Tramo	Q (m3/hr)	ΔJ (bar)	ΔJ (Pa)	ΔJ (mca)	k	H(m)
PIPE - 3	200	12,40	1240043,60	126,57	41007,61	222,07
	192	11,52	1151567,32	117,54	41321,34	213,04
	180	10,24	1024445,67	104,56	41824,57	200,06
	150	7,36	736451,28	75,17	43296,12	170,67
	120	4,92	492104,93	50,23	28930,95	127,65
	118	4,77	477404,74	48,73	28066,72	125,65
	100	3,54	354248,75	36,16	46859,30	131,66
	50	0,86	86157,59	8,79	45587,01	104,29

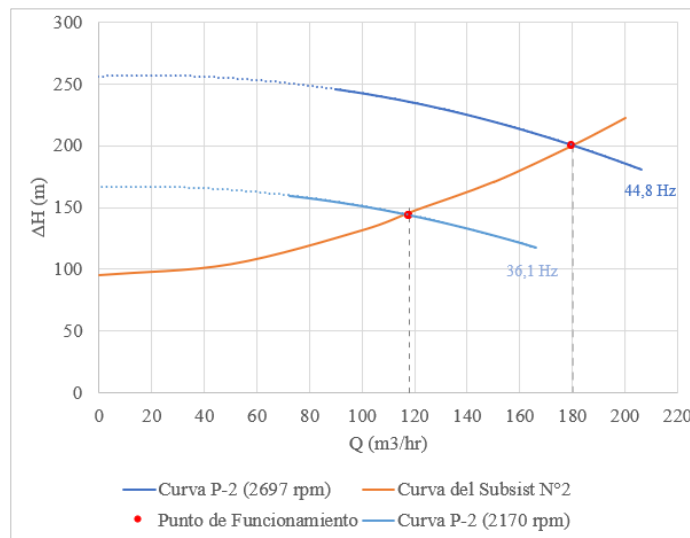


Figura 24. Curva de la bomba P-2 y del Subsistema N°2, con sus respectivos puntos de funcionamiento para caudal máximo y mínimo.

Subsistema N°3

Se define el Subsistema N°3 a partir de la succión de la tercera bomba hasta la succión de la cuarta bomba.

Tabla 10. Diferencia de altura entre la tercera y cuarta bomba (H_B).

	Prog (km)	Alt (msnm)	HB
P-3	16,60	3875,00	223,90
P-4	18,50	4098,90	

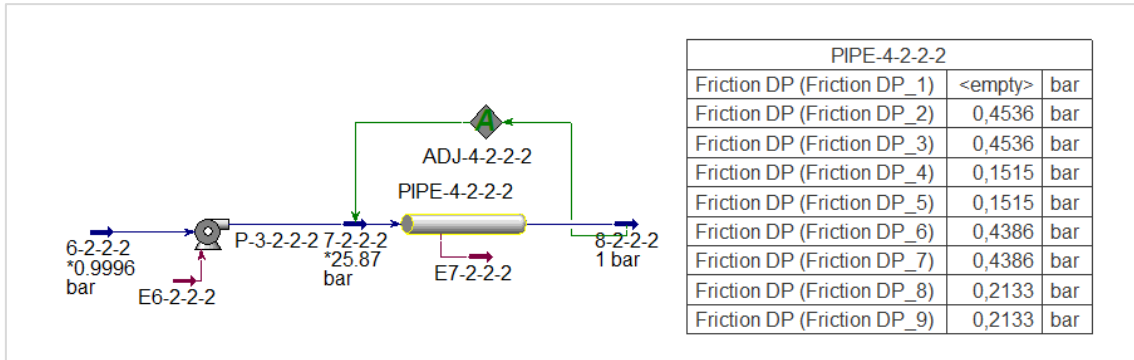


Figura 25. Pérdidas distribuidas obtenidas en Aspen HYSYS entre la tercera y cuarta bomba (P-3 y P-4) para un caudal de 180 m³/hr.

Tabla 11. Resultados del cálculo de pérdidas distribuidas a partir de datos obtenidos de la simulación en Aspen HYSYS.

Tramo	Q (m ³ /hr)	ΔJ (bar)	ΔJ (Pa)	ΔJ (mca)	k	H(m)
PIPE - 4	200	3,04	304347,03	31,06	10064,60	254,96
	192	2,83	282616,58	28,85	10141,04	252,75
	180	2,51	251398,81	25,66	10263,74	249,56
	150	1,81	180693,56	18,44	10623,01	242,34
	120	1,21	120724,55	12,32	7097,42	231,79
	118	1,17	117117,33	11,95	6885,35	231,30
	100	0,87	86899,08	8,87	11494,83	232,77
	50	0,25	25063,17	2,56	13261,22	226,46

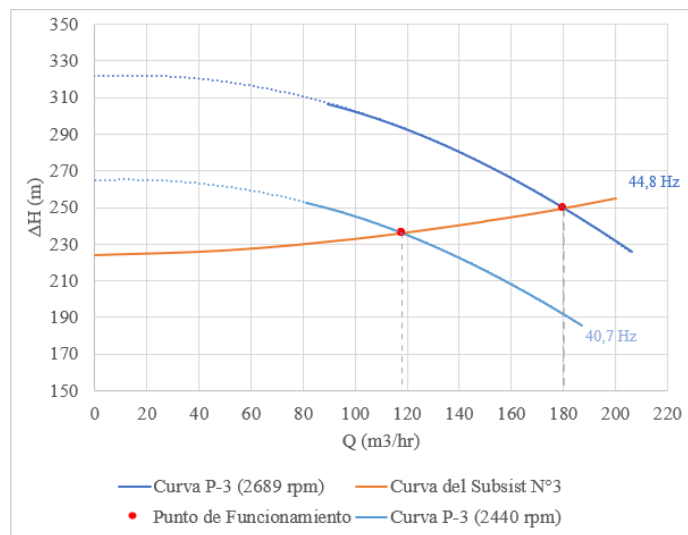


Figura 26. Curva de la bomba P-3 y del Subsistema N°3, con su respectivo punto de funcionamiento para Q=180m³/hr.

Subsistema N°4

Se define el Subsistema N°4 a partir de la succión de la tercera bomba hasta la descarga de la válvula PR-3.

Tabla 12. Diferencia de altura entre la cuarta bomba y la válvula PR-3 (H_B).

	Prog (km)	Alt (msnm)	HB
P-4	18,50	4098,90	-223,52
PR-3	41,00	3828,10	

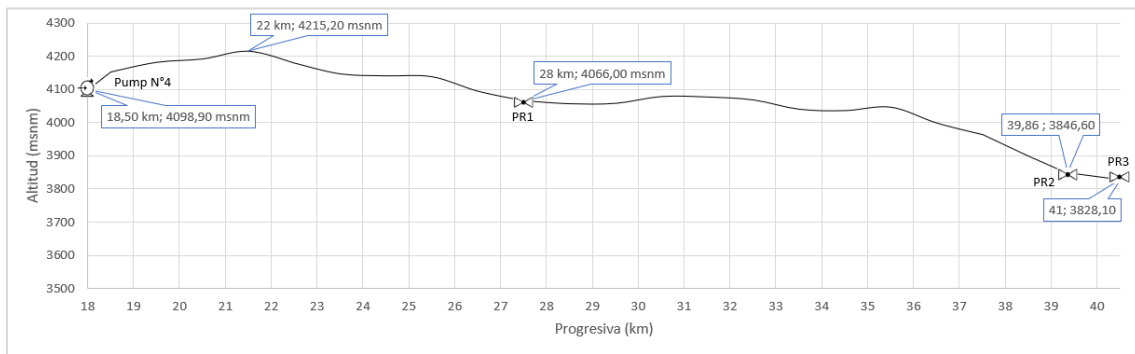


Figura 27. Subsistema N°4 para el cálculo de la curva del Subsistema.

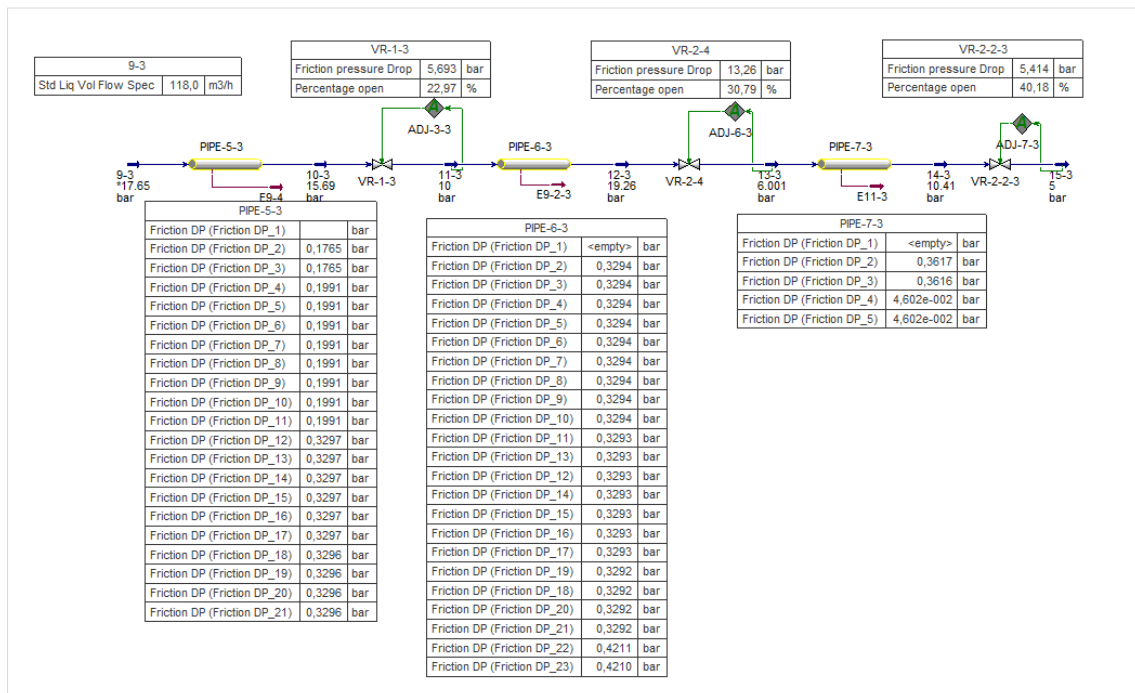


Figura 28. Pérdidas obtenidas en Aspen HYSYS entre la descarga de la cuarta bomba y la descarga de la tercera válvula con 118 m³/hr.

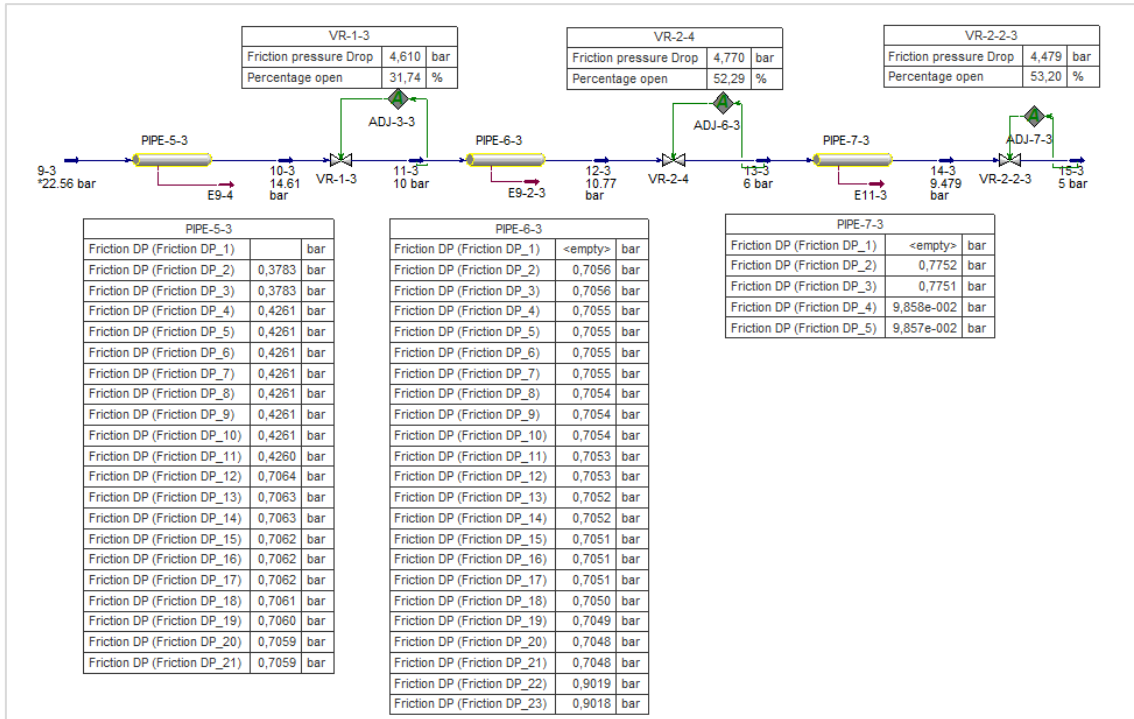


Figura 29. Pérdidas obtenidas en Aspen HYSYS entre la descarga de la cuarta bomba y la descarga de la tercera válvula con 180 m³/hr.

Tabla 13. Resultados del cálculo de pérdidas distribuidas a partir de datos obtenidos de la simulación en Aspen HYSYS.

Tramo	Q (m ³ /hr)	ΔJ (bar)	ΔJ (Pa)	ΔJ (mca)	k	H(m)
PIPE - 5 PIPE - 6 PIPE - 7	200	34,97	3496855,39	356,91	115639,23	133,40
	192	32,47	3247365,26	331,45	116524,22	107,93
	180	28,88	2888295,51	294,80	117919,09	71,28
	170	26,04	2604079,25	265,79	119191,11	42,27
	160	23,33	2333284,17	238,15	120563,32	14,63
	150	20,79	2078675,12	212,16	122205,74	-11,35
	120	13,88	1387798,75	141,65	127482,78	-81,87
	118	13,49	1348614,24	137,65	123883,30	-90,42
	100	9,99	999058,41	101,97	132153,42	-121,55
	50	2,88	288203,80	29,42	152492,05	-194,10

Tabla 14. Resultados del cálculo de pérdidas localizadas a partir de datos obtenidos de la simulación en Aspen HYSYS.

Válvula	Q (m ³ /hr)	ΔJ (bar)	ΔJ (Pa)	ΔJ (mca)
PR1	118	5,69	569000,00	58,06
PR2	118	13,26	1326000,00	135,31
PR3	118	5,41	541000,00	55,20
PR1	180	4,61	461000,00	47,04

Válvula	Q (m3/hr)	ΔJ (bar)	ΔJ (Pa)	ΔJ (mca)
PR2	180	4,77	477000,00	48,67
PR3	180	4,48	448000,00	45,71

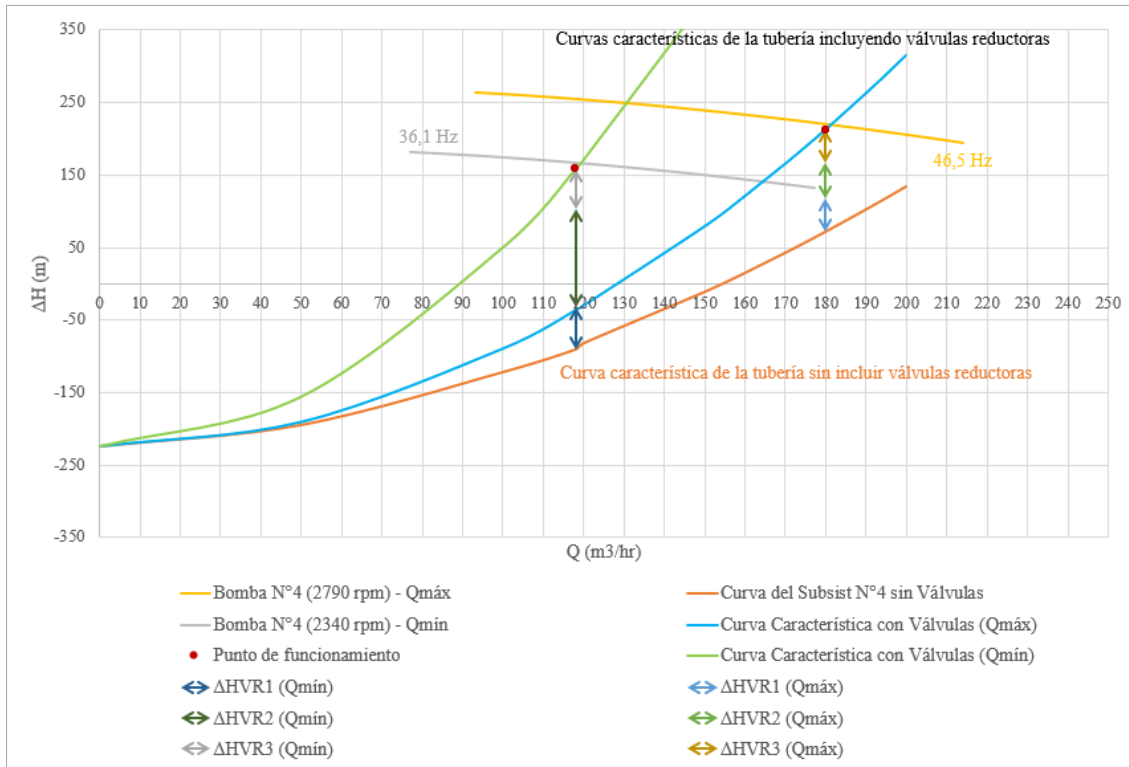


Figura 30. Curvas de la bomba P-4 y del Subsistema N°4, con sus respectivos puntos de funcionamiento para caudal mínimo y caudal máximo.

5.4.2 Válvulas reductoras de presión

Las válvulas instaladas en el sistema corresponden a válvulas reductoras de presión tipo globo, actuadas por diafragma, cuya función principal es mantener una presión constante aguas abajo independientemente de las variaciones de presión y caudal aguas arriba.

Las características técnicas principales de las válvulas PR1, PR2 y PR3 se presentan en la Tabla 15, mientras que sus hojas de datos se incluyen en el Anexo 4 - Hojas de datos válvulas reductoras.

Tabla 15. Características principales de las válvulas reductoras de presión marca Dorot.

Característica	PR1	PR2	PR3
Modelo	30 H0223IL1 PR1 v2	32 H0223IL1 PR2 v2	32 H0223IL1 PR3 v2
Función	Reducción de presión (2 vías)	Reducción de presión (2 vías)	Reducción de presión (2 vías)

Característica	PR1	PR2	PR3
Tipo	Globo, flujo recto, actuadas por diafragma.	Globo, flujo recto, actuadas por diafragma.	Globo, flujo recto, actuadas por diafragma.
Tamaño	6" / 150 mm	6" / 150 mm	6" / 150 mm
Conexión	Brida ISO PN16 RF	Brida ISO PN16 RF	Brida ISO PN16 RF
Presión nominal (PN)	PN16	PN25	PN16
Presión mínima de operación	7 m.c.a. / 10 psi	7 m.c.a. / 10 psi	7 m.c.a. / 10 psi
Presión mínima en descarga	100 m	50 m	50 m
Kv ; Cv	$407 \frac{\text{m}^3}{\text{hr bar}^{1/2}}$ $475 \frac{\text{gpm}}{\text{psi}^{1/2}}$	$165 \frac{\text{m}^3}{\text{hr bar}^{1/2}}$ $193 \frac{\text{gpm}}{\text{psi}^{1/2}}$	$165 \frac{\text{m}^3}{\text{hr bar}^{1/2}}$ $193 \frac{\text{gpm}}{\text{psi}^{1/2}}$
Temperatura de operación	1 – 80 °C	1 – 80 °C	1 – 80 °C
Fluido	Agua potable	Agua potable	Agua potable
Accesorios	Filtro, tobera, purga, piloto	Filtro, tobera, purga, piloto	Filtro, tobera, purga, piloto

5.4.2.1 Capacidad hidráulica y punto de operación

Para verificar la adecuación hidráulica de las válvulas seleccionadas, se analiza la intersección entre la curva característica de la bomba y la curva del sistema sin la intervención de las válvulas. Esta intersección determina un caudal máximo erogable Q_p , el cual debe ser superior al caudal máximo requerido por el sistema Q_M .

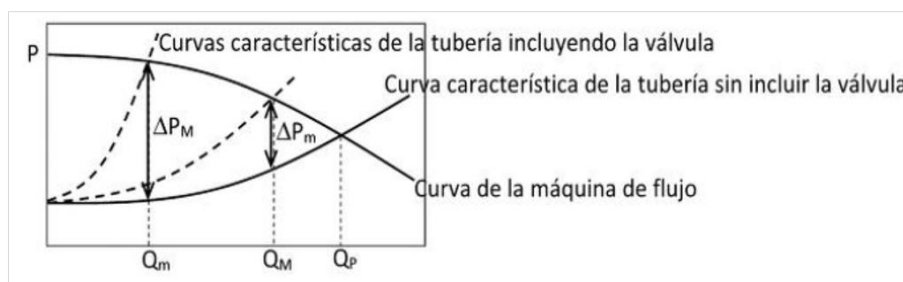


Figura 31. Regulación del sistema mediante el control de pérdidas. Q_M caudal máximo requerido, Q_P Caudal máximo posible.

La intersección entre la curva de la bomba y la curva del sistema se ilustra en la Figura 30.

El caudal del sistema puede regularse mediante:

- Variación de la velocidad de las bombas (modificación de la curva de bomba).
- Modulación del grado de apertura de las válvulas, que introduce una pérdida de carga variable.

Aunque su función principal es la regulación de presión aguas abajo, las válvulas influyen directamente en el caudal entregado al sistema, actuando como elemento de modulación hidráulica.

5.4.2.2 Verificación de ΔP y condición de estrangulamiento

La verificación cuantitativa para los caudales mínimo (118 m³/h) y máximo (180 m³/h) se calculó según el procedimiento detallado en el Anexo 5 – Cálculo de verificación de válvulas. Se presenta en la Tabla 16, donde se observa que el caudal máximo erogable por cada válvula es superior al caudal requerido, garantizando capacidad suficiente de regulación.

Se evaluó la caída de presión inducida por cada válvula y se comparó con la caída de presión crítica asociada a condición de flujo estrangulado (ΔP_{choke}).

Tabla 16. Verificación de la válvula de control.

Válvula	Progresiva (km)	Q (m ³ /hr)	Q _{máx} (m ³ /hr)	P1 (bar)	P2 (bar)	ΔP (bar)	ΔP_{choke} (bar)	% Apertura
PR1	28	118,00	1161,30	15,69	10,00	5,69	10,88	22,97
PR2	39,86	118,00	530,58	19,26	6,00	13,26	13,82	30,79
PR3	41	118,00	389,87	10,41	5,00	5,41	7,46	40,18
PR1	28	180,00	1120,59	14,61	10,00	4,61	10,13	31,75
PR2	39,86	180,00	462,07	10,77	6,00	4,77	10,48	52,29
PR3	41	180,00	372,03	9,48	5,00	4,48	6,79	53,20

Los resultados indican que:

- La caída de presión real (ΔP) es inferior a la caída de presión crítica (ΔP_{choke}).
- No se alcanzan condiciones de estrangulamiento.
- No se prevén fenómenos de cavitación ni flashing bajo las condiciones analizadas.

Esto garantiza que las válvulas operan dentro de límites hidráulicos seguros para ambos escenarios de caudal.

5.4.2.3 Análisis de rango de apertura operativo

Las curvas de coeficiente de caudal (Cv) en función del porcentaje de apertura fueron obtenidas mediante el software AFT Impulse, a partir de los datos hidráulicos de operación.

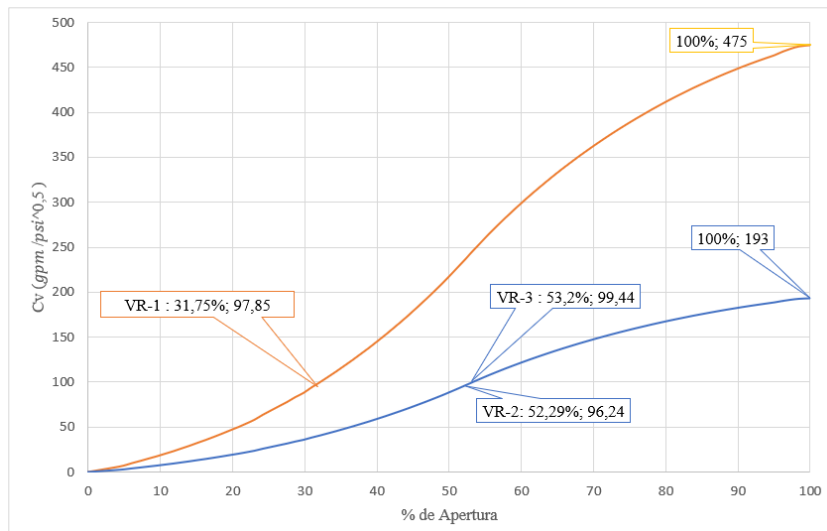


Figura 32. Cv vs porcentaje de apertura de las válvulas PR1, PR2 y PR3 y % de apertura para el caudal máximo.

Los resultados muestran que, para los caudales mínimo y máximo, las válvulas operan con aperturas comprendidas entre aproximadamente 23 % y 53 %.

De acuerdo con las recomendaciones del fabricante, el rango de operación adecuado para un control estable se encuentra entre 20 % y 80 % de apertura. Por lo tanto, las válvulas seleccionadas trabajan dentro del rango recomendado, garantizando estabilidad y margen de regulación.

5.4.2.4 Síntesis del análisis del régimen estacionario

A partir del análisis desarrollado, se verifica que la selección de bombas y válvulas permite operar el sistema dentro de condiciones hidráulicamente seguras en régimen estacionario. Las estaciones de bombeo trabajan próximas a su región de operación preferida para el caudal máximo y dentro de la región aceptable para el caudal mínimo, mientras que las válvulas reductoras cumplen con los requisitos de regulación sin alcanzar condiciones de flujo estrangulado ni superar las caídas de presión admisibles.

En consecuencia, el sistema presenta un comportamiento adecuado bajo condiciones permanentes, constituyendo una base consistente para el posterior análisis en régimen transitorio, donde se evaluará su respuesta frente a eventos dinámicos tales como arranques, paradas y variaciones abruptas de operación.

5.5 Análisis transitorio

5.5.1 Justificación del caso de estudio

El golpe de ariete es un fenómeno inercial cuya severidad aumenta con el caudal transportado, dado que la energía cinética almacenada en el fluido en movimiento es mayor.

Por este motivo, el análisis transitorio se desarrolla únicamente para el caudal máximo del sistema (180 m³/h), considerado el escenario más exigente desde el punto de vista hidráulico.

5.5.2 Modelado en AFT Impulse

La modelización del sistema se realizó mediante el software AFT Impulse, el cual utiliza el Método de las Características para la simulación de transitorios hidráulicos.

El método resuelve las ecuaciones de conservación de masa y cantidad de movimiento en forma explícita, empleando intervalos constantes de tiempo (Δt) y espacio (Δx).

Los resultados obtenidos previamente en régimen estacionario con Aspen HYSYS fueron replicados en AFT Impulse a fin de establecer las condiciones iniciales del sistema.

La Figura 33 muestra la simulación del estado estacionario en AFT Impulse, mientras que la Figura 34 presenta la comparación del perfil de presiones obtenido con ambos programas, verificando la consistencia del modelo.

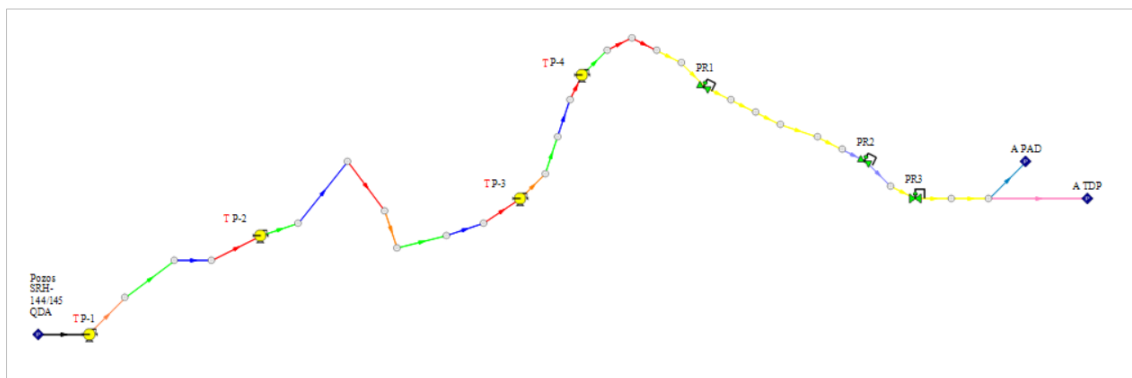


Figura 33. Simulación del estado estacionario con el programa AFT Impulse.

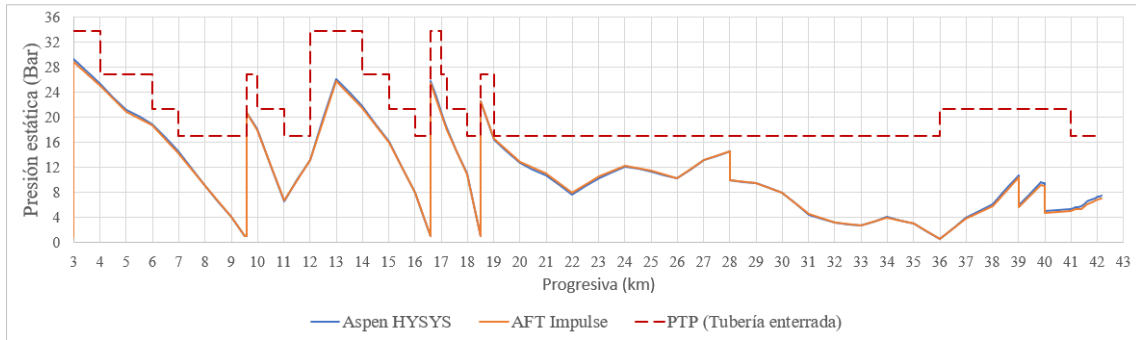


Figura 34. Comparación del perfil de presiones del sistema simulado con Aspen Hysys y AFT impulse.

5.5.3 Determinación de la velocidad de onda

La velocidad de propagación de la onda de presión se calculó para cada diámetro y clase de tubería mediante la expresión:

$$a = \frac{\sqrt{\frac{K_{liq}}{\rho}}}{\sqrt{1 + \frac{K_{liq} DC_1}{E e}}}$$

Donde a es la celeridad de la onda (m/s), K_{liq} el módulo volumétrico líquido (Pa), ρ la densidad del líquido (kg/m^3), E el módulo de Young del material de la tubería (Pa), D el diámetro cañería (m), e el espesor cañería (m) y c_1 el factor adimensional asociado a la condición de soporte de la tubería, definido por el modelo interno del software.

El módulo volumétrico del líquido se obtuvo a partir de las propiedades del agua a la temperatura de diseño, adoptándose $K_{liq} = 1,94$ GPa.

El módulo de elasticidad del material varía en función de la temperatura, conforme a los valores indicados en el catálogo del fabricante para tuberías enterradas (Tabla 17). Dado que la temperatura de diseño adoptada es de $10\text{ }^\circ\text{C}$, valor inferior al mínimo informado en el catálogo, se realizó una extrapolación lineal de los datos disponibles (Figura 35). En consecuencia, se adoptó un módulo de Young equivalente de $E=584$ MPa.

Tabla 17. Módulo de Elasticidad (MPa) de las cañerías Pexgol para distintos valores de temperatura ($^\circ\text{C}$) según catálogo.

Módulo de elasticidad (E) [MPa]	Temperatura [$^\circ\text{C}$]
465	20
350	30
228	40

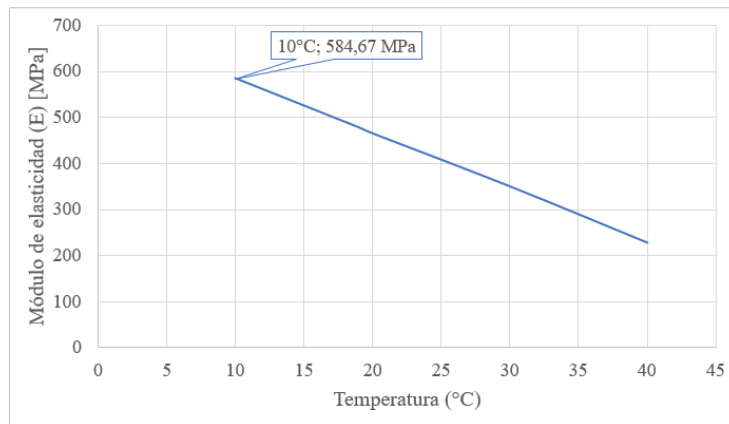


Figura 35. Módulo de elasticidad a distintas temperaturas.

Para modelar el efecto del confinamiento del suelo se adoptó un módulo de rigidez representativo de 200 kg/cm², correspondiente a un suelo granular compactado. El valor del factor adimensional c_1 fue determinado automáticamente por el software en función del modelo de soporte seleccionado. Asimismo, se adoptó un coeficiente de Poisson $\nu = 0,4$, valor típico para tuberías de PE-Xa según especificaciones técnicas del fabricante. Este parámetro es utilizado por el software en el cálculo de la celeridad cuando se emplea el modelo de velocidad de onda calculada.

Las velocidades de propagación obtenidas se presentan en la Tabla 18.

Tabla 18. Velocidad de propagación de la onda de presión obtenida mediante AFT Impulse para $E = 584$ MPa y tuberías enterradas.

	Diámetro Exterior (mm)	Diámetro Interior (mm)	Espesor (mm)	Velocidades de la onda de presión (m/s)
Clase 15	250	204,6	22,7	268,0
	225	184,2	20,4	268,0
	200	163,8	18,1	266,0
	140	114,6	12,7	349,0
Clase 19	250	194,2	27,9	291,0
	225	175	25	300,0
Clase 24	250	181,6	34,2	296,0
Clase 30	250	167	41,5	320,0

5.5.4 Resistencia del material frente a sobrepresiones

Para evaluar la capacidad resistente de las tuberías frente al golpe de ariete, se consideró que la presión total transitoria (presión de trabajo más presión pico) no debe superar la presión total máxima ocasional (PTMO) por el fabricante.

Las tuberías Pexgol pueden soportar presiones transitorias totales equivalentes a 2,5 veces la presión de diseño a la temperatura correspondiente.

Los valores adoptados para cada clase se presentan en la Tabla 19.

Tabla 19. Presión total máxima ocasional para las distintas clases.

Clase	T de Diseño [°C]	PTP [Bar]	PTMO [Bar]
Clase 15	10	17	42,5
Clase 19	10	21,4	53,5
Clase 24	10	26,9	67,25
Clase 30	10	33,9	84,75

5.5.5 Definición de casos simulados

Se definieron los siguientes casos de simulación transitoria (Tabla 20):

- Parada simultánea de bombas
- Parada individual de cada bomba
- Cierre de válvulas reductoras
- Arranque de bombas

Para la parada simultánea se analizaron dos escenarios:

- Escenario A: válvulas check operativas
- Escenario B: falla de válvulas check

Tabla 20. Casos a Simular para los transitorios hidráulicos.

Caso	Descripción	Escenario A	Escenario B
1	Parada simultánea de bombas	Con válvula check	Fallo de válvula check
2	Parada de bomba (falla P-1)	Con válvula check	Fallo de válvula check
3	Parada de bomba (falla P-2)	Con válvula check	Fallo de válvula check
4	Parada de bomba (falla P-3)	Con válvula check	Fallo de válvula check
5	Parada de bomba (falla P-4)	Con válvula check	Fallo de válvula check
6	Cierre de PR N°1	Con válvula check	Fallo de válvula check
7	Cierre de PR N°2	Con válvula check	Fallo de válvula check
8	Cierre de PR N°3	Con válvula check	Fallo de válvula check
9	Arranque de bombas	Con válvula check	Fallo de válvula check

5.5.6 Modelado dinámico de bombas

Cada estación de bombeo fue modelada con una válvula de retención instalada en la descarga. En la simulación, la válvula check se representó como integrada al modelo dinámico de la bomba en AFT Impulse.

Esta representación permite considerar automáticamente el cierre ante inversión de flujo y la posibilidad de operación en distintos cuadrantes según el escenario analizado.

A partir de esta configuración se definieron los siguientes escenarios de simulación:

5.5.6.1 Escenario A: Con válvula check operativa

Cada bomba fue modelada con válvula de retención incorporada en su descarga. En el modelo se adoptó una condición de reapertura a $\Delta H = 0$ mca y velocidad de cierre del fluido igual a 0 m/s, por lo que la bomba opera únicamente en el primer cuadrante. Esta configuración supone un comportamiento idealizado de la válvula de retención. En la práctica, las válvulas reales requieren una presión diferencial positiva mínima para iniciar la apertura; sin embargo, ante la falta de datos específicos del fabricante, se adoptó esta simplificación para el análisis transitorio.

Estas condiciones se aplicaron a todas las estaciones del sistema.

5.5.6.2 Escenario B: Falla de válvula check

En este escenario se asumió la falla de las válvulas de retención, permitiendo la rotación inversa de las bombas.

El comportamiento en los cuatro cuadrantes fue modelado mediante el método de Suter. Para ello se adoptó un número específico $N_s=0,46$, ajustado a partir del punto de operación de cada bomba.

5.5.7 Inercia rotacional

La inercia total del conjunto bomba-motor se determinó a partir de la ecuación desarrollada en la Sección 3.3.5, considerando tanto la contribución del rotor hidráulico como del motor eléctrico.

Los valores adoptados se presentan en la Tabla 21.

Tabla 21. Inercia de las bombas

Bomba	P (kW)	N (rpm)	I_{pump} (kg m ²)	I_{motor} (kg m ²)	I_{Total} (kg m ²)
P-1	195,84	2830	0,29	2,27	2,56

Bomba	P (kW)	N (rpm)	I _{pump} (kg m ²)	I _{motor} (kg m ²)	I _{Total} (kg m ²)
P-2	137,56	2690	0,24	1,45	1,69
P-3	173,11	2690	0,30	2,04	2,34
P-4	140,04	2700	0,24	1,48	1,72

Se consideró un corte de suministro eléctrico a los 5 s de iniciada la simulación.

5.5.8 Cierre de válvulas

El diámetro nominal de las válvulas es de 150 mm, por lo que el tiempo total de cierre teórico es de 11,8 s.

Dado que en régimen estacionario las válvulas operan a distintos porcentajes de apertura, el tiempo efectivo de cierre fue ajustado considerando un cierre lineal desde la posición inicial.

Los tiempos adoptados se presentan en la Tabla 22.

Tabla 22. Tiempo de cierre para cada válvula.

	PR1	PR2	PR3
CV	97,07	99,79	99,49
%	31,58	53,29	53,20
t (s)	3,79	6,12	6,31

5.5.9 Arranque de bombas

Para el arranque se asumió:

- Tubería completamente llena
- Ausencia de aire atrapado
- Caudal inicial nulo
- Equilibrio estático previo al arranque

La bomba fue modelada como una máquina centrífuga que acelera desde velocidad nula hasta su velocidad nominal, siguiendo la familia de curvas características.

El arranque modelado en este estudio corresponde al caso de arranque con la tubería completamente llena, tal como se describe en la Sección 3.3.3 del marco teórico.

Inicialmente, mientras la altura generada por la bomba no supera la presión aguas abajo, la válvula de retención permanece cerrada y el caudal es nulo. Una vez superado este umbral, la válvula abre y se inicia el flujo, manifestándose los efectos inerciales asociados a la aceleración de la masa de fluido.

6 Resultados

6.1 Criterio de evaluación

Se analizó la respuesta del sistema ante eventos transitorios considerando:

- La evolución temporal de la presión en puntos representativos.
- Los valores máximos y mínimos de presión alcanzados a lo largo de la traza durante todo el evento transitorio.
- La posible formación de vapor.
- La evolución de la velocidad del flujo.

En el cuerpo principal del presente PIP se incluyen los gráficos más representativos para la interpretación y fundamentación de las conclusiones.

6.1.1 Parada simultánea de bombas

6.1.1.1 Caso 1 - Escenario A

Para el caso de parada simultánea de las cuatro bombas por falla de suministro eléctrico, considerando válvulas de retención operativas (Escenario A), se analizó el perfil de presiones máximas y mínimas a lo largo de la traza (Figura 36), la velocidad en el punto más alto de la traza (Gif 1) y la evolución del volumen de vapor generado (Figura 37).

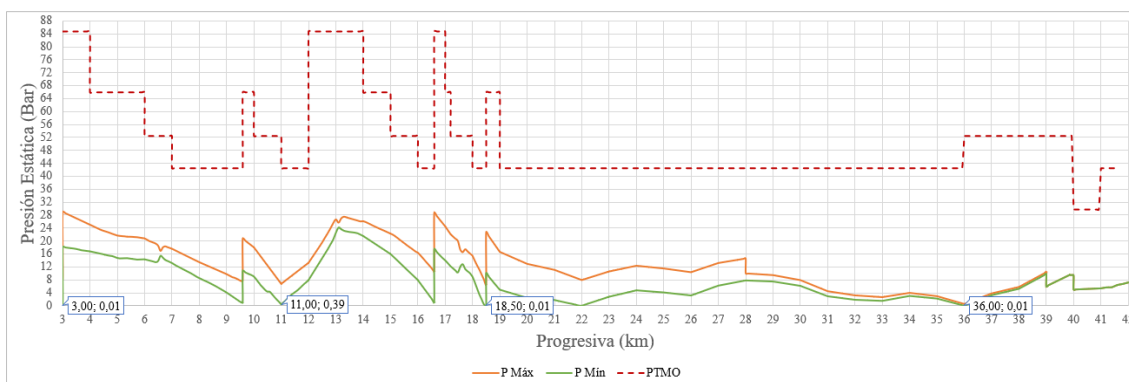
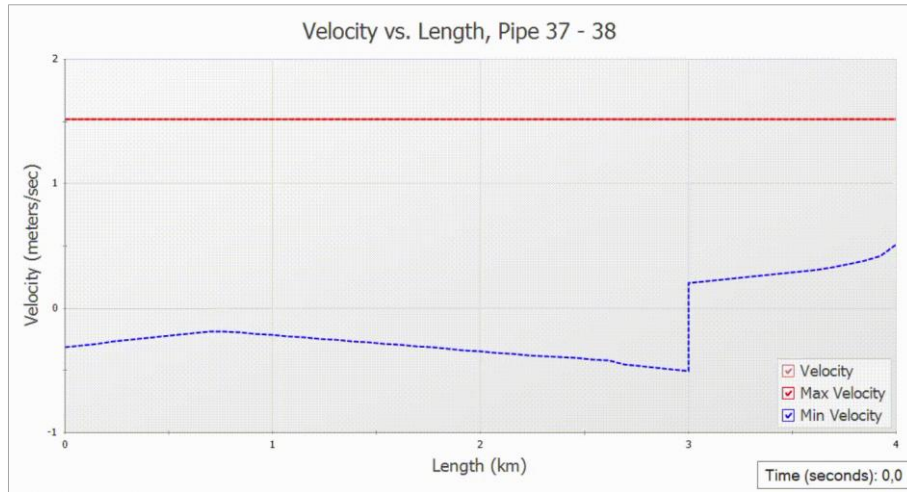


Figura 36. Perfil de presiones máximas y mínimas obtenidas en el transitorio Caso 1 – Escenario A.



Gif 1. Velocidad en el punto más alto de la progresiva según el tiempo (Progresiva 22 km).

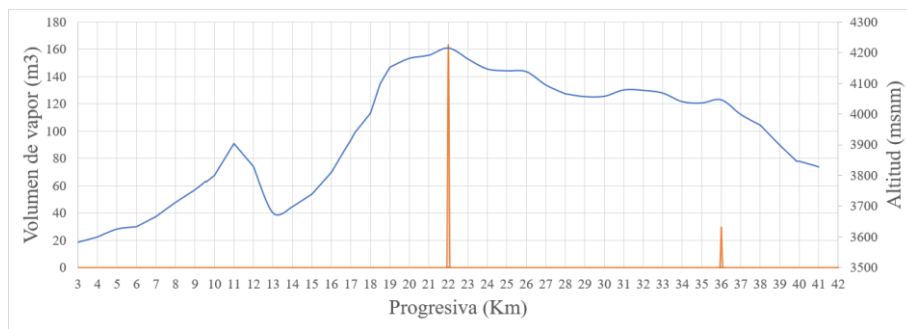


Figura 37. Volumen de vapor generado en estado transitorio Caso 1 – Escenario A.

Los resultados muestran que las sobrepresiones máximas registradas durante el transitorio no superan la PTMO para las clases de tubería instaladas, por lo que no se compromete la integridad estructural por sobrepresión.

Sin embargo, se observa una disminución significativa de la presión en las progresivas aproximadas 22 km y 36 km, alcanzando valores inferiores a la presión de vapor del agua. Estas ubicaciones corresponden a puntos altos de la traza (Figura 13), donde el gradiente piezométrico resulta más desfavorable durante la desaceleración del flujo.

En la progresiva 22 km se identifica una discontinuidad en la velocidad (Gif 1), indicativa de formación de cavidad. Este comportamiento se encuentra respaldado por la aparición de volumen de vapor en dicha ubicación, lo que evidencia la ocurrencia de separación de columna.

Cabe señalar que el modelo numérico presenta limitaciones para representar con total fidelidad la evolución posterior a la separación de columna. En presencia de volumen de vapor con drenaje sostenido, el comportamiento hidráulico real puede diferir de la predicción idealizada, dado que se pierde la continuidad hidráulica en la conducción.

En consecuencia, bajo condición de válvulas de retención operativas, el sistema no presenta sobrepresiones estructuralmente críticas; sin embargo, se verifican presiones subatmosféricas con formación de cavidades en puntos altos de la traza, configurando una condición hidráulicamente desfavorable ante eventos de parada simultánea.

6.1.1.2 Caso 1 - Escenario B

En el Escenario B se analiza la parada simultánea de las cuatro bombas ante falla de suministro eléctrico, considerando la no operatividad de las válvulas de retención. En esta condición, las bombas pueden experimentar rotación inversa y operar transitoriamente fuera del primer cuadrante, según el modelo implementado mediante el método de Suter.

Se evaluaron los perfiles de presión máxima y mínima a lo largo de la traza, la evolución temporal de la velocidad en puntos representativos y la generación de volumen de vapor.

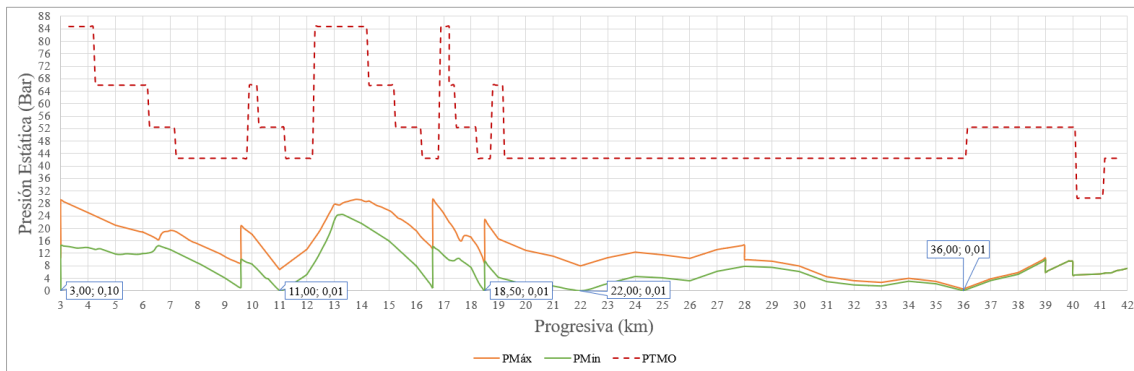
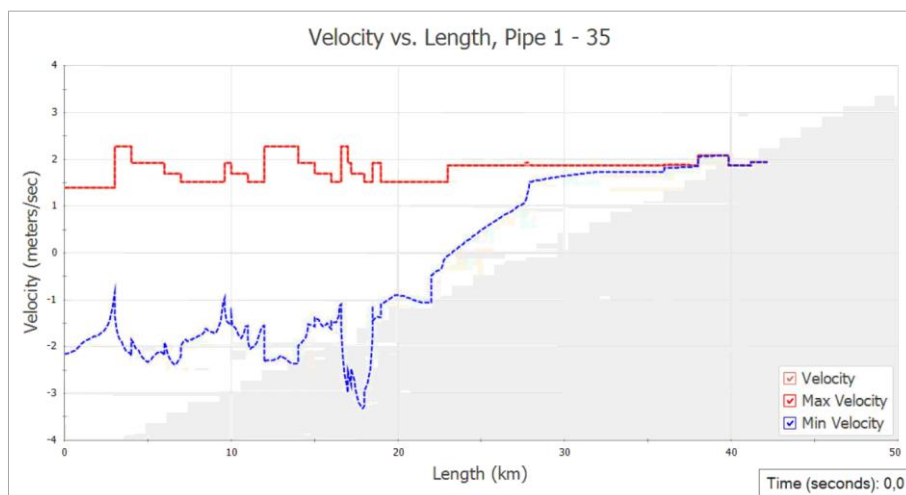


Figura 38. Perfil de presiones máximas y mínimas obtenidas en el transitorio Caso 1 – Escenario B.



Gif 2. Velocidad vs longitud (según el tiempo).



Figura 39. Volumen de vapor generado en estado transitorio Caso 1 – Escenario B.

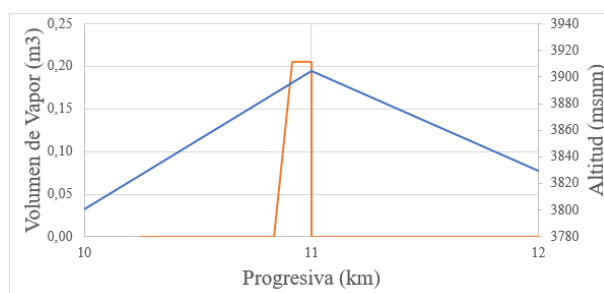


Figura 40. Volumen de vapor formado en la progresiva 11 km.

Los resultados indican que la ausencia de válvula check incrementa la severidad del transitorio debido a la inversión momentánea del flujo y a la interacción dinámica entre la inercia del sistema y la desaceleración de las bombas.

Se observa:

- Mayores oscilaciones de presión respecto al Escenario A.
- Incremento en la magnitud de las presiones negativas en puntos altos de la traza.
- Mayor volumen de vapor generado.

En determinados sectores, las presiones mínimas descienden significativamente por debajo de la presión de vapor, favoreciendo la separación de columna. Este comportamiento se manifiesta principalmente en las progresivas 11 km, 18,5 km, 22 km y 36 km.

Las progresivas 11 km, 22 km y 36 km coinciden con puntos altos de la traza, donde el gradiente piezométrico resulta más desfavorable durante la desaceleración del flujo.

En cambio, la condición observada en 18,5 km, correspondiente a la estación de la cuarta bomba, se asocia a la dinámica propia de la desaceleración e inversión momentánea del conjunto bomba-motor ante la falla de la válvula check, generando un descenso abrupto de presión en la succión.

En dichas ubicaciones se observa un incremento del volumen de vapor generado y discontinuidades en la velocidad, indicativas de separación de columna.

Si bien las sobrepresiones máximas no superan la PTMO de las tuberías, la respuesta hidráulica resulta significativamente más exigente que en el Escenario A, evidenciando una mayor vulnerabilidad del sistema ante la pérdida de la función antirretorno.

Desde el punto de vista operativo, la rotación inversa introduce esfuerzos adicionales sobre el conjunto bomba-motor y amplifica los efectos dinámicos en la conducción.

6.1.1.3 Síntesis comparativa - parada simultánea

El análisis de los eventos de parada permitió identificar diferencias significativas entre el comportamiento del sistema con válvulas de retención operativas (Escenario A) y ante su falla (Escenario B).

En ambos escenarios:

- No se registraron sobrepresiones que superen la PTMO para las clases de tubería instaladas.

Sin embargo, desde el punto de vista hidráulico, las diferencias son relevantes:

Escenario A – Con válvula check operativa

- Se generan presiones subatmosféricas en puntos altos de la traza.
- Se produce formación localizada de vapor y separación de columna.
- El fenómeno se concentra en sectores topográficamente desfavorables.
- No se observan efectos asociados a inversión de flujo en estaciones de bombeo.

Escenario B – Falla de válvula check

- Se incrementa la severidad del transitorio.
- Se registran mayores oscilaciones de presión.
- Se amplifica la magnitud y extensión de las presiones negativas.
- Aparece inversión momentánea del flujo en estaciones de bombeo.
- Formación de vapor en múltiples progresivas (\approx 11 km, 18,5 km, 22 km y 36 km).
- Se introducen solicitaciones dinámicas adicionales sobre el conjunto bomba-motor.

Si bien desde el punto de vista estructural las tuberías no presentan riesgo por sobrepresión, la presencia de vapor y separación de columna en ambos escenarios —y su intensificación ante la falla de válvula check— evidencian que la condición crítica del sistema no está asociada a picos positivos, sino a presiones negativas y pérdida de continuidad hidráulica en puntos altos y estaciones de bombeo.

En consecuencia, la confiabilidad de las válvulas de retención resulta un elemento determinante para limitar la severidad del transitorio y reducir la vulnerabilidad del sistema frente a eventos de parada simultánea.

6.1.2 Paradas individuales de bombas

6.1.2.1 Caso 2 - Escenario A

La detención súbita de la bomba P-1 con la válvula de retención operativa genera una reducción inmediata del aporte energético en el tramo inicial del sistema. Como consecuencia, se produce una caída del gradiente piezométrico aguas abajo, afectando directamente las condiciones de succión de las estaciones posteriores.

Se observa:

- Descenso de presión en el tramo comprendido entre la estación P-1 y la estación P-2.
- Depresión en las progresivas 3 km, 9,59 km, 16,6 km y 18,5 km (succiones de bombas), así como en 36 km (punto topográfico más alto).
- Formación de vapor en 9,59 km, 16,6 km y 18,5 km, indicativa de cavitación en la succión de P-2, P-3 y P-4.

La aparición de volumen de vapor en estas ubicaciones (Figura 41) confirma que la presión local desciende por debajo de la presión de vapor del fluido.

A partir de este instante deja de ser válida la hipótesis de conducción completamente llena. En consecuencia:

- Se pierde la continuidad hidráulica de la columna líquida en los tramos afectados.
- Pueden observarse caudales distintos entre estaciones e incluso valores cercanos a cero.

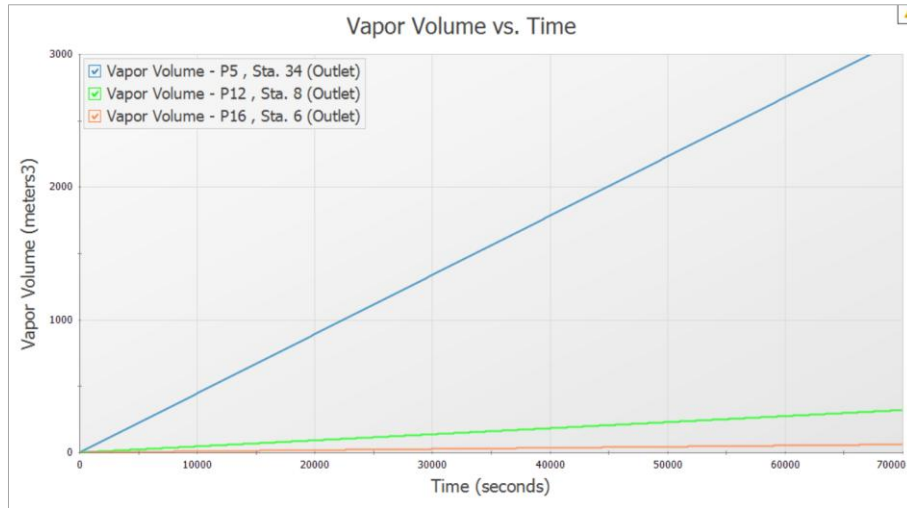


Figura 41. Evolución del volumen de vapor en las succiones de P-2, P-3 y P-4 durante el transitorio 2A, lo que evidencia cavitación en la succión.

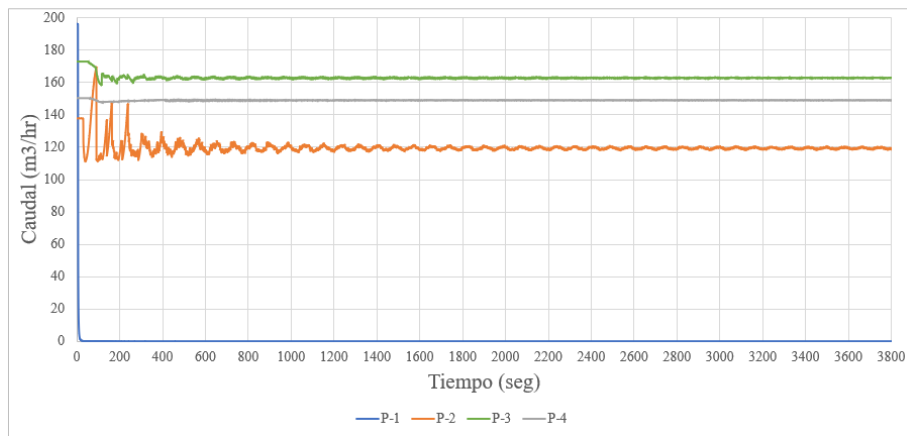


Figura 42. Variación del caudal en la succión de la bomba en el transitorio Caso 2 – Escenario A.

Los resultados posteriores al inicio de la cavitación deben interpretarse con cautela, ya que el modelo no reproduce con total fidelidad el comportamiento físico asociado a una separación de columna sostenida. Esta limitación se evidencia en la aparición de caudales distintos en cada bomba durante el transitorio, situación que desde el punto de vista físico resulta poco consistente dentro de un sistema hidráulicamente acoplado.

En síntesis, aunque no se registran sobrepresiones estructuralmente críticas, la falla de P-1 induce una condición hidráulicamente desfavorable caracterizada por cavitación en succión y pérdida de continuidad de la columna líquida.

6.1.2.2 Caso 2 - Escenario B

En ausencia de válvula de retención, la detención de P-1 produce una respuesta hidráulica más severa que en el Caso 2A. La inversión momentánea del flujo en la

descarga de la bomba modifica el campo de presiones y amplifica las depresiones aguas abajo.

Se observa:

- Mayor amplitud de presiones negativas en 9,59 km, 16,6 km y 18,5 km.
- Incremento del volumen de vapor generado en las succiones de P-2, P-3 y P-4.
- Inversión de caudal en la bomba P-1.

En comparación con el Escenario A, la ausencia de válvula de retención incrementa la severidad del evento, amplificando las depresiones y extendiendo espacialmente la cavitación en succión, además de introducir inversión transitoria de flujo.

Desde el punto de vista operativo, la ausencia de check no sólo agrava las depresiones, sino que introduce solicitaciones adicionales sobre el conjunto bomba-motor por posible rotación inversa.

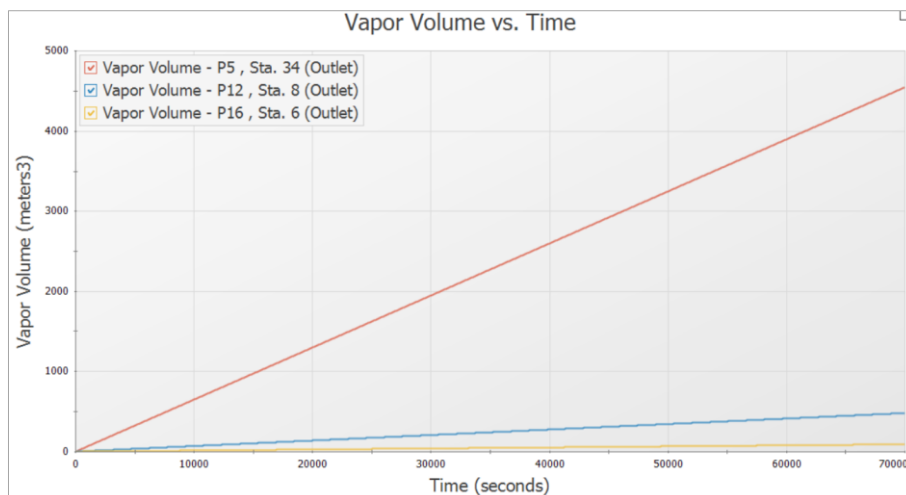


Figura 43. Evolución del volumen de vapor en las succiones de P-2, P-3 y P-4 durante el transitorio 2B, lo que evidencia separación de columna.

6.1.2.3 Caso 3 - Escenarios A/B

Se analizó la detención individual de la bomba P-2 considerando dos condiciones: Escenario A, con válvula check operativa, y Escenario B, con falla de válvula check.

La interrupción del aporte energético en la estación P-2 altera el gradiente piezométrico en el tramo intermedio del sistema, generando perturbaciones que se propagan aguas arriba y aguas abajo.

Análisis de comportamiento hidráulico

En ambos escenarios se identifican descensos de presión en:

- 11 km (punto alto de la traza).
- 16,6 km (succión de P-3).
- 18,5 km (succión de P-4).

En estas ubicaciones se registra formación de volumen de vapor, indicativa de cavitación localizada y separación de columna en el punto alto de la traza (Figura 44).

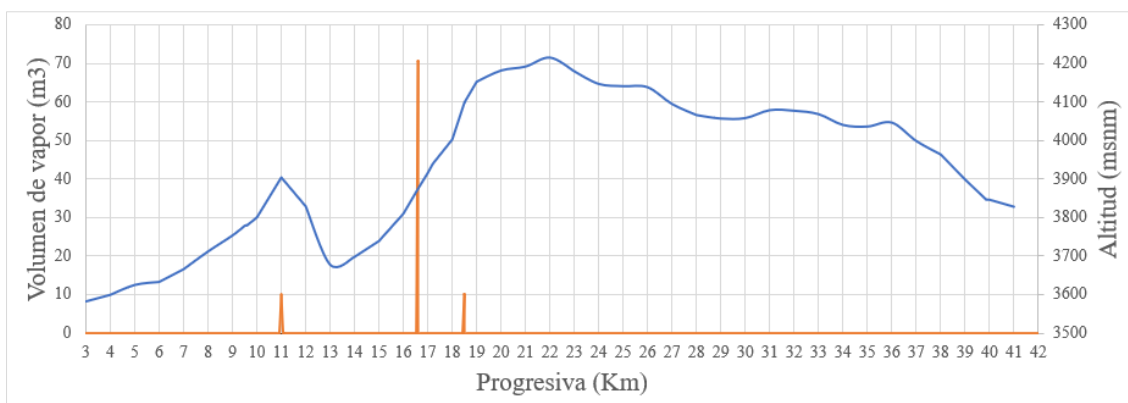


Figura 44. Volumen de vapor generado en estado transitorio Caso 3 – Escenario B.

La severidad difiere entre escenarios:

Escenario A (con check):

- Oscilaciones de presión moderadas.
- Cavitación localizada de menor magnitud.
- No se observa inversión sostenida de flujo.

Escenario B (sin check):

- Mayor amplitud de oscilaciones de presión.
- Retroceso de flujo en la estación afectada.
- Incremento del volumen de vapor generado.

Análisis estructural

En ninguno de los dos escenarios las sobrepresiones máximas superan la PTMO para las clases de tubería instaladas. Por lo tanto, no se compromete la integridad mecánica por sobrepresión.

Análisis de implicancias hidráulicas

La formación de vapor en succión implica pérdida local de la condición de conducción completamente llena, lo que puede generar:

- Desacople hidráulico entre tramos.
- Caudales no uniformes al restablecerse el régimen.
- Condición transitoria de NPSH disponible insuficiente.

En términos comparativos, el Escenario B resulta hidráulicamente más severo debido a la combinación de mayores depresiones, posible rotación inversa y cavitación más extendida.

6.1.2.4 Caso 4 - Escenarios A/B

Se analizó la detención individual de la bomba P-3 considerando dos condiciones: Escenario A, con válvula check operativa, y Escenario B, con falla de válvula check.

Escenario A – (Con check)

- Descenso de presión en la succión de P-4.
- Formación de vapor únicamente en la progresiva correspondiente a la succión de P-4.
- La cavitación se mantiene localizada y de baja extensión espacial.
- No se registra inversión de flujo en la bomba detenida.

Escenario B – (Sin check)

En ausencia de válvula de retención, el perfil global de presiones máximas y mínimas resulta similar al del Escenario A. Sin embargo, se observa una diferencia dinámica relevante:

- Se observa inversión transitoria de flujo en P-3 y un reflujo breve en P-4, asociado a la propagación de la perturbación y a la dinámica inercial del sistema.
- El caudal presenta valores negativos durante el evento.
- Se mantiene la formación de vapor en la succión de P-4.

Si bien el perfil global de presiones no difiere sustancialmente del Escenario A, la presencia de reflujo introduce solicitaciones adicionales sobre los conjuntos rotativos, particularmente en la bomba detenida.

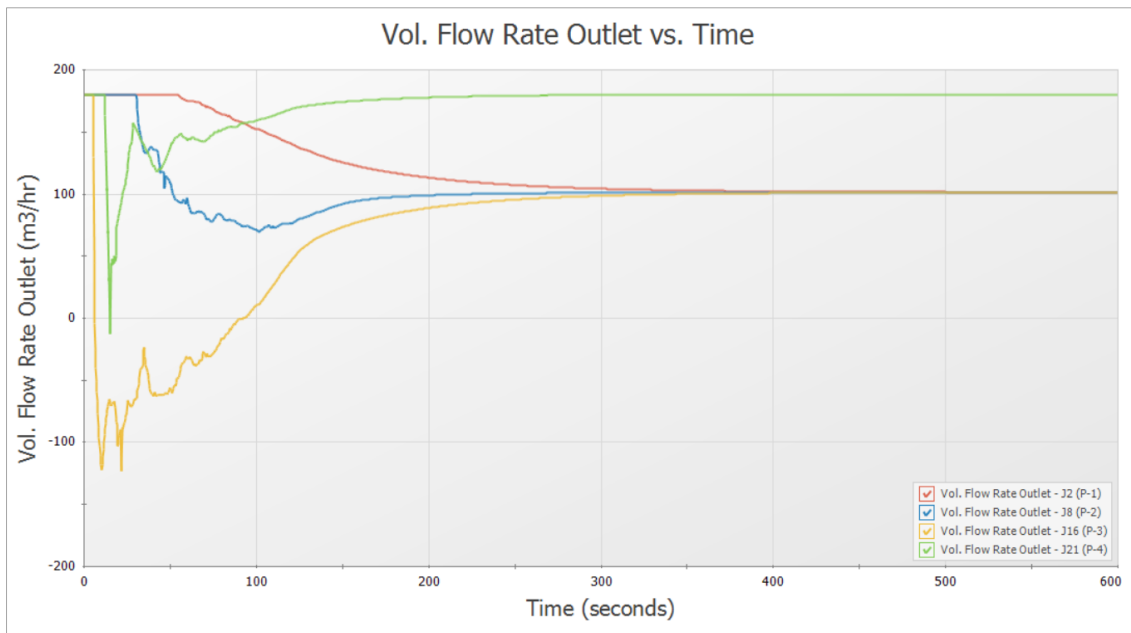


Figura 45. Caudal en la descarga de las bombas para el escenario en el cual las check valve fallan.

Las sobrepresiones máximas no superan la PTMO en ambos escenarios, por lo que no se compromete la integridad estructural de la conducción.

6.1.2.5 Caso 5 - Escenarios A/B

La detención de P-4 provoca una caída abrupta del caudal en su descarga, alcanzando valores cercanos a cero en los primeros instantes del transitorio. Simultáneamente, las estaciones aguas arriba experimentan una reducción transitoria de caudal debido a la desaceleración del flujo y a la propagación de la onda de presión asociada al evento (Figura 46).

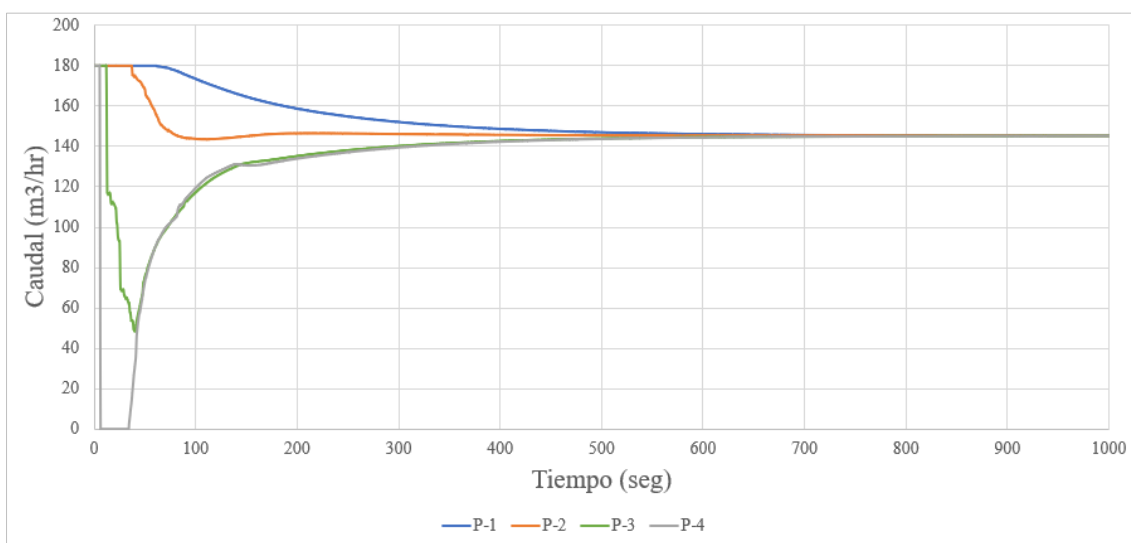


Figura 46. Variación del caudal en la descarga de la bomba en el transitorio Caso 5 – Escenario A (similar a Escenario B).

Posteriormente, el sistema evoluciona hacia un nuevo régimen estacionario en el cual el caudal se estabiliza en aproximadamente 150 m³/h en todas las estaciones operativas. Esta convergencia responde a la condición de continuidad hidráulica de la conducción principal y al nuevo balance energético del sistema tras la salida de servicio de P-4.

Si bien el régimen final resulta hidráulicamente estable en términos de caudal, durante el transitorio se registran presiones mínimas por debajo de la presión de vapor en las progresivas ~22 km y ~36 km, coincidentes con puntos altos de la traza, evidenciando formación de vapor localizada gobernada principalmente por la topografía (Figura 47).

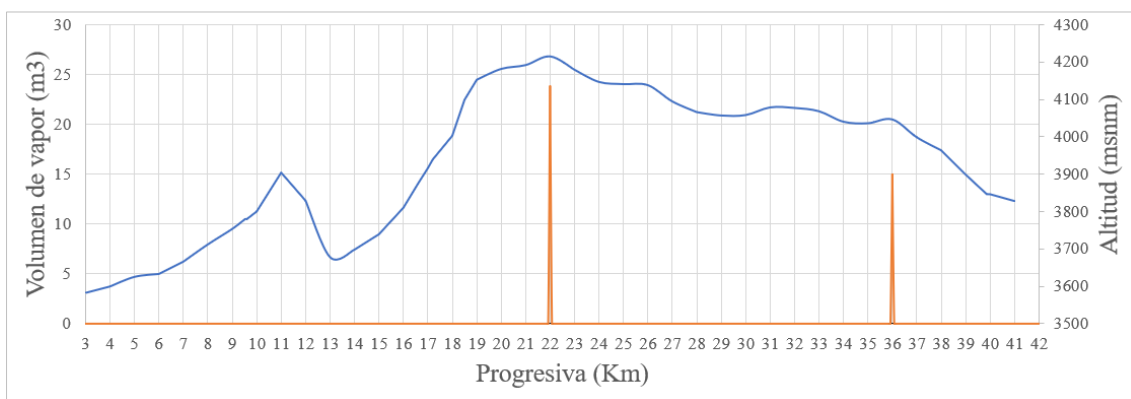


Figura 47. Volumen de vapor generado en estado transitorio Caso 5 – Escenario A (Similar a Escenario B).

6.1.2.6 Síntesis comparativa - Paradas individuales

En la Tabla 23 se presenta una síntesis comparativa de los resultados obtenidos para los distintos escenarios de parada individual de bombas, incluyendo la ocurrencia de sobrepresiones, cavitación, inversión de flujo y la severidad del transitorio.

Tabla 23. Comparación de resultados hidráulicos para escenarios de parada individual de bombas.

Bomba	Escenario	Pmax vs admisible	Pmin vs P _{vap}	Ubicación cavitación	Inversión de flujo	Severidad
P-1	A	No supera	Sí	Succión P-2, P-3, P-4	No	Alta
P-1	B	No supera	Sí (mayor magnitud)	Succión P-2, P-3, P-4	Sí (P-1)	Muy alta
P-2	A	No supera	Sí	11 km, succión P-3 y P-4	No	Media
P-2	B	No supera	Sí (mayor extensión)	11 km, succión P-3 y P-4	Sí	Alta
P-3	A	No supera	Sí (localizada)	Succión P-4	No	Baja

Bomba	Escenario	Pmax vs admisible	Pmin vs Pvp	Ubicación cavitación	Inversión de flujo	Severidad
P-3	B	No supera	Sí (similar a A)	Succión P-4	Sí (P-3 y breve en P-4)	Media
P-4	A	No supera	Sí	22 km y 36 km (puntos altos)	No	Media
P-4	B	No supera	Sí	22 km y 36 km	No significativa	Media

De la comparación precedente se observa que las paradas individuales no generan condiciones estructuralmente críticas por sobrepresión; sin embargo, la severidad hidráulica varía significativamente según la ubicación de la estación afectada. Las fallas en P-1 y P-2 resultan más exigentes desde el punto de vista de formación de vapor, mientras que la detención de P-4 se encuentra gobernada principalmente por efectos topográficos en puntos altos de la traza.

6.1.3 Cierre de válvulas

6.1.3.1 Caso 6 – Escenarios A/B

El análisis comparativo de los Escenarios A y B evidencia un comportamiento hidráulico esencialmente equivalente frente al cierre transitorio de PR1, por lo que los resultados se presentan de manera conjunta.

Sobrepresión aguas arriba de PR1

En ambos escenarios se observa un incremento significativo de presión aguas arriba de la válvula PR1, alcanzando valores superiores a la presión máxima admisible del material (PTMO). Este aumento responde al mecanismo clásico del golpe de ariete, donde la detención brusca del flujo transforma energía cinética en energía de presión.

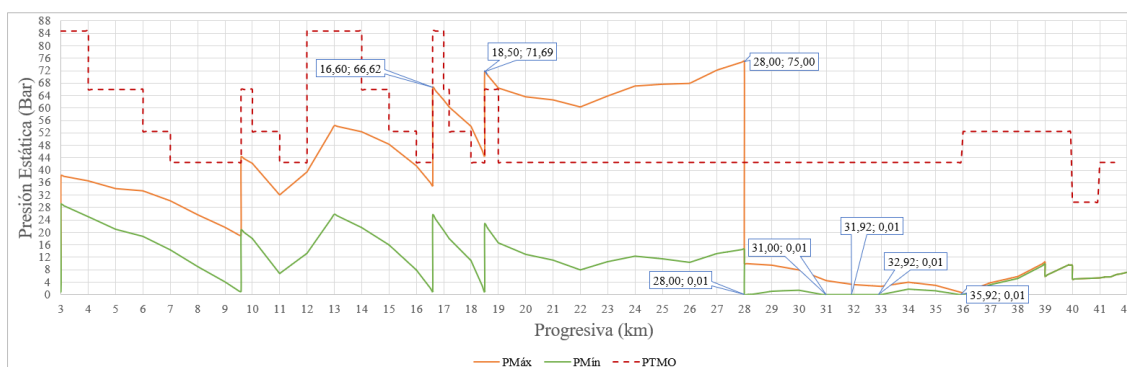


Figura 48. Perfil de presiones máximas y mínimas obtenidas en el transitorio Caso 6 – Escenario B.

La superación del límite estructural confirma que el cierre de PR1 constituye un evento crítico desde el punto de vista mecánico para la conducción.

Formación de vapor aguas abajo

Aguas abajo de PR1 se registra una caída abrupta de presión, alcanzando valores próximos a cero bar en torno a la progresiva ~28 km. Por otro lado, se observa formación de vapor en las progresivas 31 km a 33 km y 36 km (Figura 49). Estas zonas coinciden con sectores topográficamente elevados del trazado, donde la presión disponible es menor y el sistema resulta más susceptible a formación de vapor.

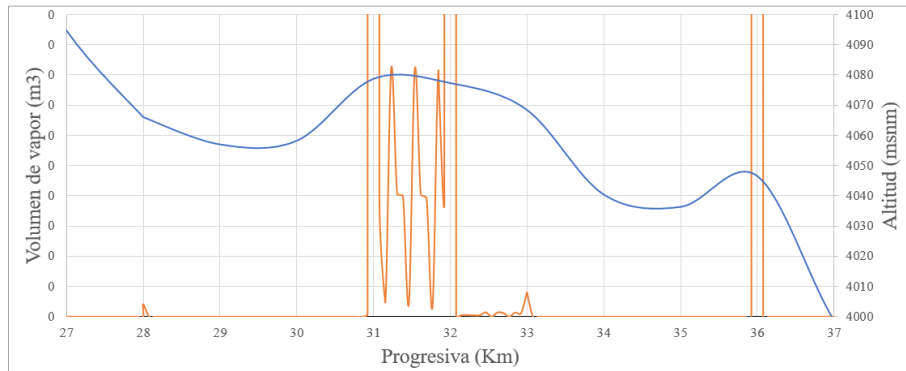


Figura 49. Volumen de vapor generado en estado transitorio Caso 6 – Escenario B.

Incoherencia operativa en PR2 y PR3 durante separación de columna

En la Figura 50 se observa un comportamiento no convencional en las válvulas PR2 y PR3 durante el transitorio. Desde el punto de vista teórico, ante el cierre de PR1 y la consecuente caída de presión aguas abajo, dichas válvulas deberían abrirse inicialmente con el objetivo de sostener el setpoint de presión en el tramo correspondiente. Posteriormente, al disminuir la presión disponible aguas arriba, su capacidad de regulación se vería limitada, tendiendo nuevamente al cierre.

Sin embargo, la interrupción del aporte de caudal generada por el cierre de PR1 provoca que la columna de agua situada aguas abajo continúe su movimiento por inercia. Esta condición induce una caída adicional de presión que puede descender por debajo de la presión de vapor, dando lugar a la formación de separación de columna.

Una vez iniciada la formación de separación de columna, el modelo numérico presenta limitaciones en la representación física del sistema, ya que la continuidad hidráulica se ve transitoriamente interrumpida. En consecuencia, el comportamiento posterior de las válvulas y las variables hidráulicas asociadas debe interpretarse con cautela, dado que responde a las simplificaciones propias del modelo empleado y puede no reflejar con total fidelidad el comportamiento físico real del sistema.

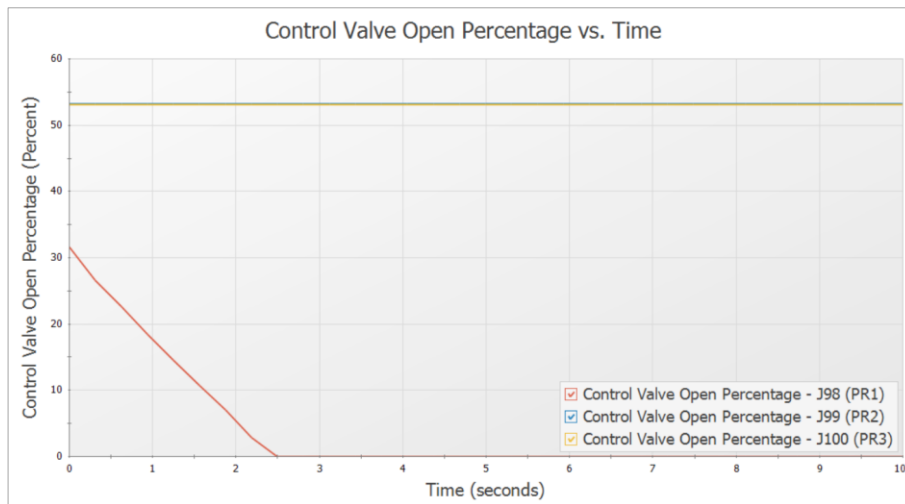


Figura 50. Porcentaje de apertura de las válvulas durante el transitorio.

Conclusión

Tanto el Escenario A como el Escenario B demuestran que el cierre de PR1 genera simultáneamente:

- sobrepresiones aguas arriba que exceden el límite estructural del material,
- cavitación localizada aguas abajo en progresivas específicas del trazado,
- y un régimen transitorio donde la operación de válvulas PR2 y PR3 se ven afectada por la presencia de separación de columna.

En consecuencia, el evento analizado representa una condición hidráulica y estructuralmente crítica para el sistema. Este resultado evidencia que el cierre rápido de PR1 no constituye una maniobra admisible bajo las condiciones actuales de diseño.

6.1.3.2 Caso 7 – Escenarios A/B

En el análisis del cierre de PR2 se observa que, al producirse su cierre, se genera un incremento de presión aguas arriba de la misma. Este aumento de presión se transmite hacia el tramo precedente, elevando la presión aguas abajo de PR1. Como consecuencia, PR1 reduce su apertura hasta cerrarse, generando un transitorio hidráulico de magnitud comparable al generado por el cierre directo de PR1 (Caso 6).

Simultáneamente, la válvula PR3 detecta una disminución de presión aguas arriba producto de la redistribución dinámica de la onda generada por el cierre de PR2. Ante esta condición, PR3 también tiende a cerrarse, ya que pierde la presión necesaria para mantener su regulación.

El análisis del volumen de vapor indica que la cavitación se produce aguas abajo de PR2, donde la caída transitoria de presión alcanza valores cercanos a la presión de

vapor del fluido. Esto confirma que el fenómeno dominante continúa siendo la propagación de ondas de presión asociadas al cierre brusco de la válvula, generando sobrepresiones aguas arriba y separación de columna líquida aguas abajo (Figura 51 y Figura 52).

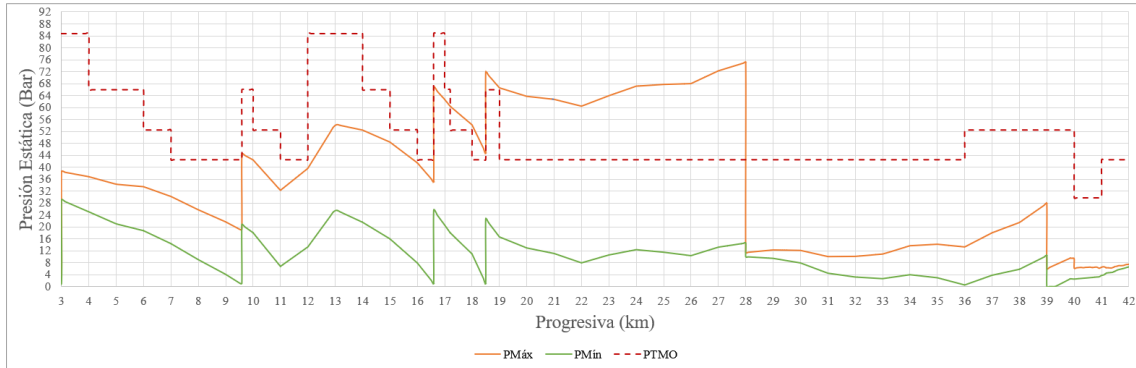


Figura 51. Perfil de presiones máximas y mínimas obtenidas en el transitorio Caso 7 – Escenario A (Similar a B).

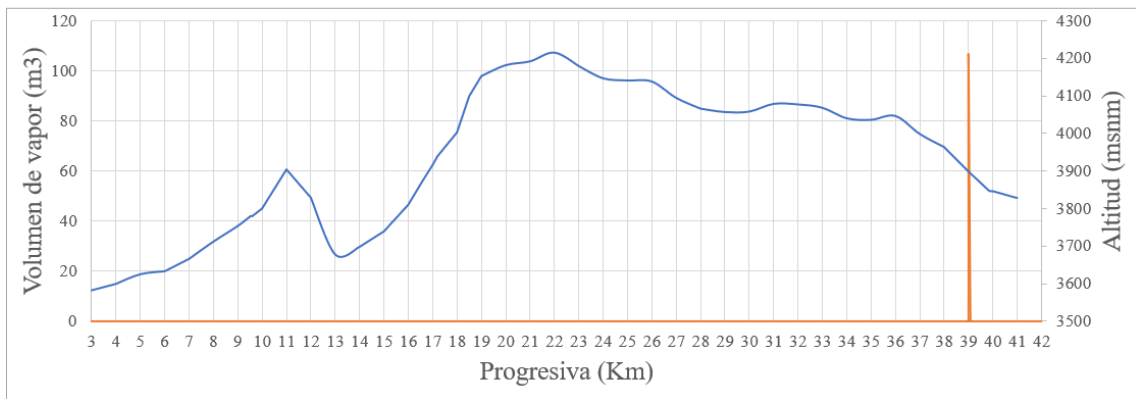


Figura 52. Volumen de vapor generado en estado transitorio Caso 7 – Escenario A (Similar a B).

En términos comparativos, para ambos escenarios analizados el comportamiento hidráulico global resulta similar en cuanto a sobrepresiones y formación de cavitación. No obstante, la diferencia principal estriba en el impacto potencial sobre la bomba: en el escenario donde se produce inversión transitoria del flujo, existe riesgo de rotación inversa del equipo.

6.1.3.3 Caso 8 – Escenarios A/B

En el caso correspondiente al cierre de la válvula PR3, se observa que su cierre provoca una rápida disminución de presión aguas abajo, generándose condiciones de depresión que inducen la formación de vapor en el tramo inmediatamente posterior a la válvula.

Simultáneamente, el cierre de PR3 produce un incremento significativo de presión aguas arriba debido a la reflexión de la onda compresiva. Este aumento de presión se

transmite hacia los tramos precedentes, provocando el cierre sucesivo de las válvulas PR2 y PR1, al detectarse un aumento transitorio de presión aguas abajo respecto a sus valores de consigna (setpoint). Como consecuencia, el sistema experimenta golpes de ariete secuenciales asociados al cierre escalonado de las válvulas, intensificando el régimen transitorio y las sobrepresiones en los sectores aguas arriba. El evento más severo se produce durante el cierre de PR1, donde la presión alcanza valores superiores a la presión máxima admisible del material de la conducción.

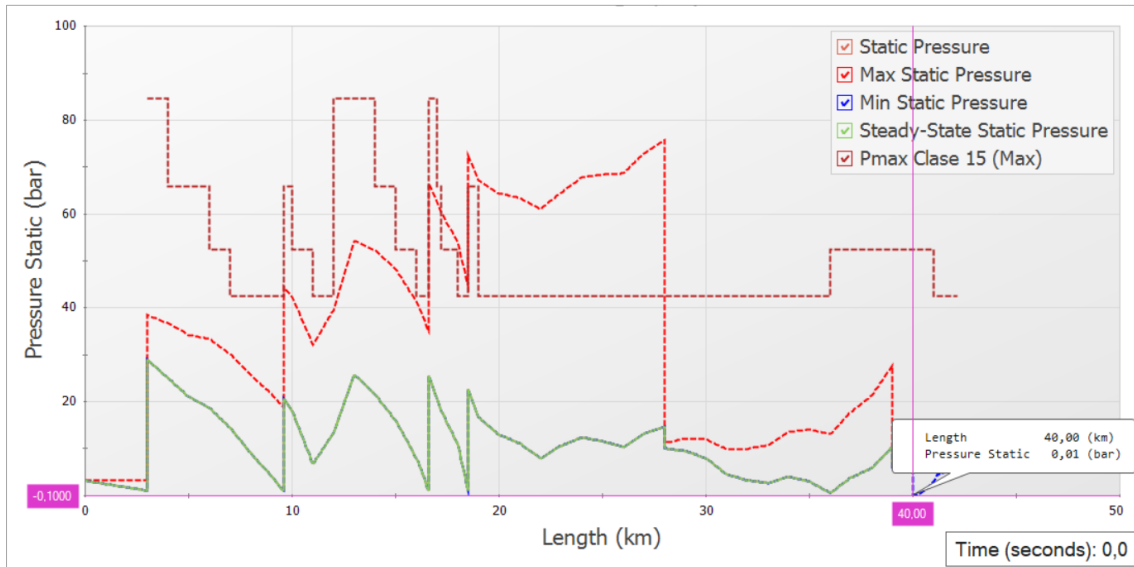


Figura 53. Perfil de presiones máximas y mínimas obtenidas en el transitorio Caso 8 – Escenario B.

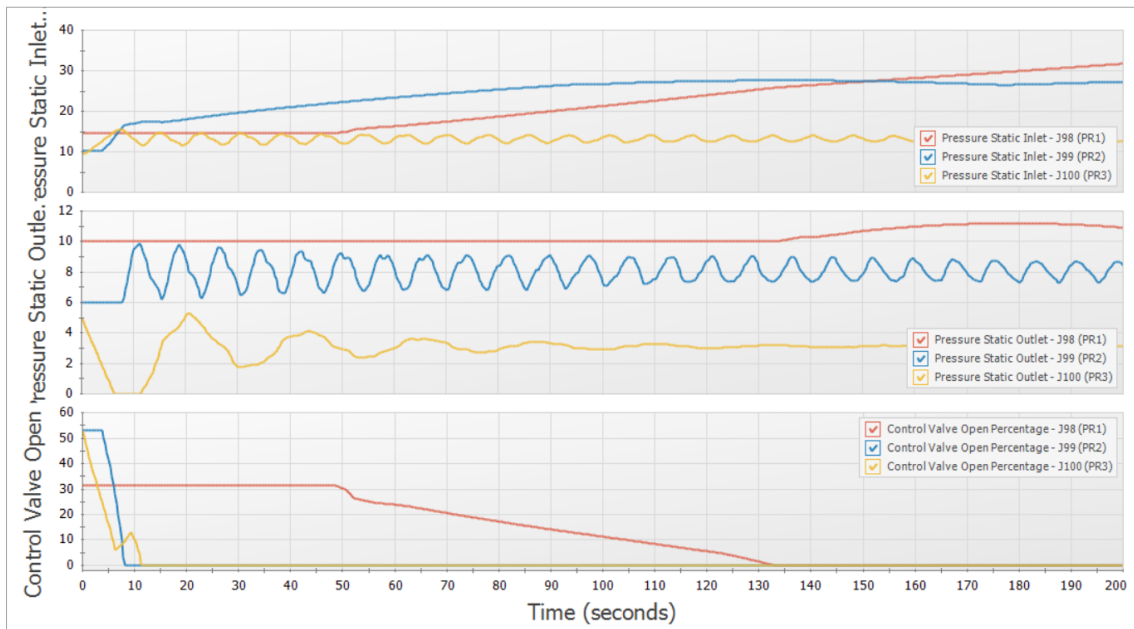


Figura 54. Respuesta transitoria de presiones estáticas y posición de válvulas de control ante el cierre de PR3.

6.1.3.4 Síntesis comparativa – Cierre de válvulas

Del análisis conjunto de los Casos 6, 7 y 8 se concluye que el cierre brusco de cualquiera de las válvulas de regulación induce un régimen transitorio severo. Este comportamiento se caracteriza por la propagación de ondas de presión, formación de vapor y acoplamiento dinámico entre válvulas.

En todos los casos y escenarios se generan sobrepresiones aguas arriba de la válvula que se cierra, superándose la presión máxima admisible del material (PTMO) en la progresiva 28 km, ubicada aguas arriba de PR1. Esta condición configura un escenario estructuralmente crítico para la conducción.

Asimismo, se verifica la formación de vapor aguas abajo de las válvulas sometidas a cierre, evidenciando separación de columna en los tramos más desfavorables desde el punto de vista topográfico.

En particular, el cierre de PR3 (Caso 8) desencadena un efecto en cascada, provocando el cierre sucesivo de PR2 y PR1 y generando golpes de ariete escalonados. La máxima sobrepresión del sistema vuelve a concentrarse en el tramo asociado a PR1, donde se alcanzan los valores más elevados del transitorio.

En conjunto, los resultados evidencian una alta sensibilidad del sistema frente a maniobras rápidas de cierre de válvulas, siendo el control del tiempo de cierre un parámetro determinante para mitigar la severidad del fenómeno.

6.1.4 Arranque de bombas

El arranque de bombas no fue modelado explícitamente en el presente estudio. El análisis se concentró en los eventos que resultaron gobernantes en términos de severidad hidráulica, particularmente aquellos asociados a depresiones críticas y separación de columna, como paradas intempestivas y cierres operativos. En sistemas de bombeo reales, el arranque constituye un evento controlado mediante rampas de velocidad y secuenciación de equipos, lo cual reduce su potencial severidad respecto de una parada abrupta. Asimismo, la modelación detallada del arranque requiere información específica sobre perfiles temporales de aceleración no disponible en esta etapa. Se recomienda su evaluación en trabajos futuros para completar el análisis integral del sistema.

6.2 Comparación global de todos los eventos transitorios

La Tabla 24 sintetiza la comparación global de los eventos transitorios analizados —parada simultánea, paradas individuales y cierre de válvulas de regulación— permitiendo distinguir diferencias claras desde el punto de vista estructural e hidráulico.

Tabla 24. Síntesis comparativa de los eventos transitorios.

Evento	Escenario más crítico	Supera PTMO	$P_{min} < P_{vap}$
Parada simultánea	B	No	Sí (22 y 36 km)
Falla P-1	B	No	Sí (9,59 y 18,5 km)
Falla P-2	B	No	Sí (11 y 18,5 km)
Falla P-3	B	No	Sí (16,6 km)
Falla P-4	A/B similar	No	Sí (22 y 36 km)
Cierre de la PR1	A/B similar	Sí (28 km)	Sí (28, 31-33 y 36 km)
Cierre de la PR2	A/B similar	Sí (indirecta)	Sí (39,86 km)
Cierre de la PR3	A/B similar	Sí (secuencial)	Sí (41 km)

En los escenarios de parada de bombas no se registraron sobrepresiones que superen la PTMO, por lo que el riesgo estructural por picos positivos resulta bajo. Sin embargo, la severidad hidráulica está gobernada por la aparición de depresiones inferiores a la presión de vapor, con formación de cavitación y separación de columna.

Por el contrario, los cierres bruscos de válvulas de regulación constituyen los eventos estructuralmente más críticos, ya que en todos los casos se superó la PTMO en la progresiva 28 km, aguas arriba de PR1, combinándose sobrepresiones inadmisibles y formación de vapor aguas abajo.

En conjunto, los resultados evidencian que la vulnerabilidad del sistema está asociada tanto a sobrepresiones estructurales como a depresiones críticas y pérdida de continuidad hidráulica, siendo determinante la confiabilidad de las válvulas de retención y el control del tiempo de cierre.

7 Conclusiones

7.1 Evaluación estructural frente a sobrepresiones

Las paradas de bombas, tanto individuales como simultáneas, no generan sobrepresiones superiores a la PTMO bajo las hipótesis modeladas, por lo que no constituyen el escenario crítico desde el punto de vista estructural.

En contraste, los cierres rápidos de válvulas reductoras (PR1, PR2 y PR3) con tiempos inferiores al tiempo crítico $2L/a$ producen picos de presión localizados que superan la PTMO, constituyendo la condición de mayor exigencia estructural del sistema.

La criticidad estructural se encuentra, por lo tanto, asociada a maniobras de cierre rápido y no a eventos de paradas de bombas.

7.2 Evaluación hidráulica

La severidad del sistema se encuentra gobernada por depresiones que alcanzan valores inferiores a la presión de vapor, generando cavitación y separación de columna. Estas condiciones se localizan principalmente en:

- Succiones de bombas (Progresivas 3 km, 9.59 km, 16.6 km y 18.5 km).
- Aguas abajo de las PR (Progresivas 28 km, 39,86 km y 41 km).
- Puntos altos de la traza (Progresivas 11 km, 22 km y 36 km).

La magnitud y extensión del fenómeno dependen del evento transitorio analizado.

7.3 Impacto operativo

La falla de válvulas check incrementa la severidad de los transitorios, favoreciendo inversión de flujo y ampliando las depresiones registradas.

Los cierres rápidos de válvulas generan sobrepresiones localizadas aguas arriba del punto de cierre, pudiendo desencadenar eventos estructuralmente críticos.

7.4 Limitaciones del modelo

En condiciones de separación de columna sostenida, el modelo numérico no reproduce con total fidelidad el comportamiento bifásico del sistema. Por lo que los resultados posteriores al inicio de la cavitación deben interpretarse con criterio ingenieril.

8 Recomendaciones

En función de los resultados obtenidos en el análisis transitorio, se proponen las siguientes acciones orientadas a mitigar la severidad hidráulica del sistema y mejorar su desempeño operativo:

1. **Incorporación de dispositivos antiariete en progresivas críticas**, especialmente en puntos altos y en proximidad a estaciones de bombeo y válvulas reductoras de presión, priorizando válvulas trifuncionales (air/vacuum) y válvulas de alivio según corresponda.
2. **Instalación de válvulas check amortiguadas (anti-slam)** en cada estación de bombeo, a fin de reducir la magnitud del flujo inverso y minimizar la rotación inversa ante fallas o paradas súbitas.
3. **Optimización de los tiempos de cierre de válvulas**, procurando maniobras superiores al tiempo crítico $2L/a$. Para una longitud aproximada de 42 km y una velocidad de onda máxima de 349 m/s, el tiempo crítico estimado es de 241 s (\approx 4 min). En consecuencia, tiempos de cierre superiores a dicho valor reducen significativamente la amplitud del transitorio.
4. **Implementación de rampas controladas de arranque y parada mediante variadores de frecuencia (VFD)**, favoreciendo transiciones hidráulicas más graduales y reduciendo los gradientes de velocidad.
5. **El aumento del momento de inercia del conjunto motor–bomba**, puede mitigar la severidad del golpe de ariete ante detenciones súbitas, al desacelerar la variación de velocidad del fluido y reducir la sobrepresión generada. Esta alternativa podría evaluarse mediante la incorporación de volantes de inercia o la selección de equipos con mayor inercia mecánica.
6. **Desarrollo de estudios complementarios** para el dimensionamiento detallado de los dispositivos de protección propuestos.

8.1 Propuesta de ubicación y tipo de dispositivos anti ariete

Sobre el perfil longitudinal del sistema se indican las progresivas críticas identificadas durante el análisis transitorio y la ubicación propuesta de los dispositivos de protección antiariete. La disposición responde tanto a los resultados de simulación dinámica como a los lineamientos del AWWA Air Valve Manual.

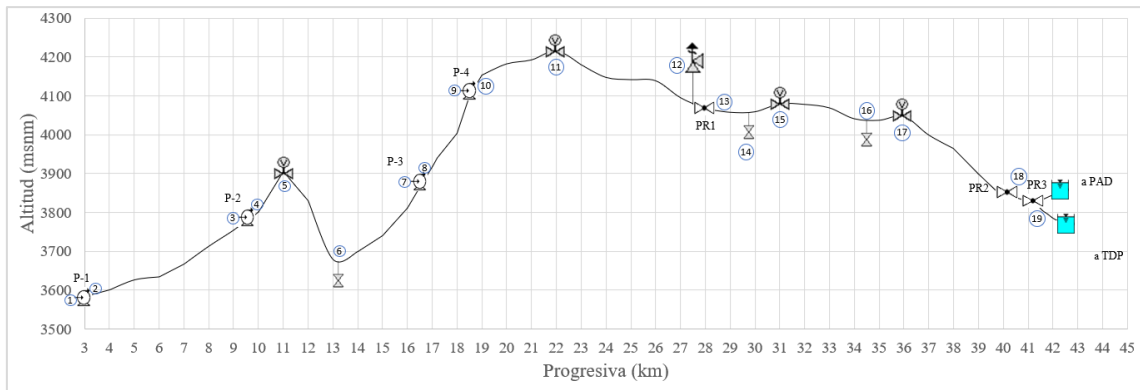


Figura 55. Perfil longitudinal del acueducto con propuesta de ubicación de dispositivos antiariete.

Tabla 25. Propuesta de ubicación y tipo de dispositivos de protección antiariete.

Nº	Km aprox	Ubicación	Condición / problema	Dispositivo recomendado	Objetivo
1	3	Estación P-1 (succión)	Depresión en transitorios / riesgo de vacío	Trifuncional	Admitir aire y evitar vacío/separación de columna local
2	3	Descarga P-1	Sobrepresión por transitorios	Anticipadoras de onda	Limitar sobrepresión / golpe de ariete
3	9,59	Estación P-2 (succión)	Depresión en transitorios	Trifuncional	Admitir aire y evitar vacío/separación de columna
4	9,59	Descarga P-2	Sobrepresión por transitorios	Anticipadoras de onda	Limitar sobrepresión
5	11	Punto alto	Separación de columna / P _{vap}	Trifuncional	Evitar vacío y amortiguar recomposición de columna
6	6	Punto bajo	Acumulación de agua (mantenimiento)	Drenaje	Drenaje y mantenimiento
7	16,6	Estación P-3 (succión)	Depresión en transitorios	Trifuncional	Evitar vacío/separación de columna
8	16,6	Descarga P-3	Sobrepresión por transitorios	Anticipadoras de onda	Limitar sobrepresión
9	18,5	Estación P-4 (succión)	Depresión/inversión dinámica (sin check)	Trifuncional	Evitar vacío y reducir severidad
10	18,5	Descarga P-4	Sobrepresión por transitorios	Anticipadoras de onda	Limitar sobrepresión
11	22	Punto alto	Separación de columna (crítico)	Trifuncional	Evitar vacío / colapso por presión externa y controlar recomposición
12	28	Aguas arriba PR1	P _{max} > PTMO (evento crítico)	Válvula de alivio	Proteger estructura ante sobrepresión
13	28	Aguas abajo PR1	Vacío por cierre / desacople	Trifuncional	Admitir aire y evitar vacío/separación
14	29,7	Punto bajo	Acumulación de agua	Drenaje	Drenaje/mantenimiento
15	31	Punto alto	Separación de columna	Trifuncional	Evitar vacío y recomposición severa
16	34,4	Punto bajo	Acumulación de agua	Drenaje	Drenaje/mantenimiento

N°	Km aprox	Ubicación	Condición / problema	Dispositivo recomendado	Objetivo
17	36	Punto alto	Separación de columna (recurrente)	Trifuncional	Evitar vacío / mitigar recomposición
18	39,86	Aguas abajo PR2	Vacío por cierre	Trifuncional	Admitir aire y evitar vacío
19	41	Aguas abajo PR3	Vacío por cierre	Trifuncional	Admitir aire y evitar vacío

La disposición propuesta de válvulas trifuncionales en puntos altos, válvulas de alivio en proximidad a las PR y válvulas anticipadoras y check amortiguadas en estaciones de bombeo responde tanto a los lineamientos del AWWA Air Valve Manual como a los resultados obtenidos mediante simulación dinámica en AFT Impulse. Esta configuración preliminar constituye una base técnica consistente para el dimensionamiento definitivo del sistema de protección antiarriete del acueducto, el cual deberá ser desarrollado en una etapa de ingeniería de detalle.

9 Bibliografía

- [1] J. Parmakian, Waterhammer Analysis, 1st ed., Prentice-Hall, Inc., New York, 1955.

- [2] M. H. Chaudhry, Applied Hydraulic Transients, 3rd ed., Springer, New York, 2014.

- [3] American Water Works Association (AWWA), Manual of Water Supply Practices M51 – Air-Release, Air/Vacuum, and Combination Air Valves, Denver, CO, USA.

- [4] I. J. Karassik, J. P. Messina, P. Cooper y C. C. Heald, Pump Handbook, 3rd ed., McGraw-Hill, New York, 2001.

- [5] Crane Co., Flow of Fluids Through Valves, Fittings, and Pipe (Technical Paper No. 410), Crane Co., USA, 2010.

- [6] AFT (Applied Flow Technology), AFT Impulse User's Guide, Applied Flow Technology, Colorado, USA.

- [7] Aspen Technology, Aspen HYSYS User Guide, Aspen Technology Inc., USA.

- [8] Golan Plastic Products, PEXGOL Cross-Linked Polyethylene (PE-Xa) Pipes–Technical Data Catalogue, Golan Plastic Products Ltd.

- [9] Emerson Electric Co. Control Valve Handbook, 4th ed. Fisher Controls International LLC, Marshalltown, Iowa, 2005.

10 Anexos

10.1 Anexo 1 - Memoria de Cálculo

10.2 Anexo 2 - Altimetría y clase de las cañerías

Tabla 26. Detalle de la Altimetría y de la clase de las cañerías.

Tramo	Clase	OD [mm]	ID [mm]	Longitud [m]	Progresiva, origen [Km]	Progresiva, destino [Km]	Elevación, origen [msnm]	Elevación, destino [msnm]
PRIMERA ESTACIÓN DE BOMBEO								
1	30	250	167	1000	3	4	3582,5	3599,6
2	24	250	181,6	1000	4	5	3599,6	3625,3
3	24	250	181,6	1000	5	6	3625,3	3633,1
4	19	250	194,2	1000	6	7	3633,1	3666,1
5	15	250	204,6	1000	7	8	3666,1	3712,1
6	15	250	204,6	1000	8	9	3712,1	3753,6
7	15	250	204,6	530	9	9,53	3753,6	3780
8	15	250	204,6	60	9,53	9,59	3780	3779,5
SEGUNDA ESTACIÓN DE BOMBEO								
9	24	250	181,6	410	9,59	10	3779,5	3800,3
10	19	250	194,2	1000	10	11	3800,3	3904,2
11	15	250	204,6	1000	11	12	3904,2	3829,1
12	30	250	167	1000	12	13	3829,1	3677,9
13	30	250	167	1000	13	14	3677,9	3698,1
14	24	250	181,6	1000	14	15	3698,1	3739,3
15	19	250	194,2	1000	15	16	3739,3	3810,3
16	15	250	204,6	600	16	16,6	3810,3	3875
TERCERA ESTACIÓN DE BOMBEO								
17	30	250	167	400	16,6	17	3875	3916,1
18	24	250	181,6	200	17	17,2	3916,1	3939,3
19	19	250	194,2	800	17,2	18	3939,3	4002,8
20	15	250	204,6	500	18	18,5	4002,8	4098,9
CUARTA ESTACIÓN DE BOMBEO								
21	24	250	181,6	500	18,5	19	4098,9	4152,7
22	15	250	204,6	1000	19	20	4152,7	4181,7
23	15	250	204,6	1000	20	21	4181,7	4191,9
24	15	250	204,6	1000	21	22	4191,9	4215,2
25	15	250	204,6	1000	22	23	4215,2	4179,4
26	15	225	184,2	1000	23	24	4179,4	4146,8

Tramo	Clase	OD [mm]	ID [mm]	Longitud [m]	Progresiva, origen [Km]	Progresiva, destino [Km]	Elevación, origen [msnm]	Elevación, destino [msnm]
27	15	225	184,2	1000	24	25	4146,8	4141
28	15	225	184,2	1000	25	26	4141	4138,2
29	15	225	184,2	1000	26	27	4138,2	4094,7
30	15	225	184,2	1000	27	28	4094,7	4066
31	15	225	184,2	1000	28	29	4066	4057
32	15	225	184,2	1000	29	30	4057	4058,2
33	15	225	184,2	1000	30	31	4058,2	4078,7
34	15	225	184,2	1000	31	32	4078,7	4077,3
35	15	225	184,2	1000	32	33	4077,3	4068,4
36	15	225	184,2	1000	33	34	4068,4	4040,4
37	15	225	184,2	1000	34	35	4040,4	4036,3
38	15	225	184,2	1000	35	36	4036,3	4046,5
39	15	225	184,2	1000	36	37	4046,5	3998,7
40	15	225	184,2	1000	37	38	3998,7	3963,8
41	19	225	175	1000	38	39	3963,8	3898,8
42	19	225	175	860	39	39,86	3898,8	3846,6
43	15	225	184,2	140	39,86	40	3846,6	3846,4
44	15	225	184,2	1000	40	41	3846,4	3828,5
45	15	225	184,2	170	41	41,17	3828,5	3823,1
TRAMO A TDP								
46	15	140	114	30	41,17	41,2	3823,1	3821,8
47	15	140	114	200	41,2	41,4	3821,8	3816,1
48	15	140	114	200	41,4	41,6	3816,1	3803,3
49	15	140	114	200	41,6	41,8	3803,3	3794,7
50	15	140	114	200	41,8	42	3794,7	3784,7
51	15	140	114	168	42	42,168	3784,7	3778,7
TRAMO A PAD								
45A	15	200	163	80	41,17	41,25	3823,1	3827,1
45B	15	200	163	80	41,25	41,33	3827,1	3830,1

10.3 Anexo 3 - Datos de las bombas.

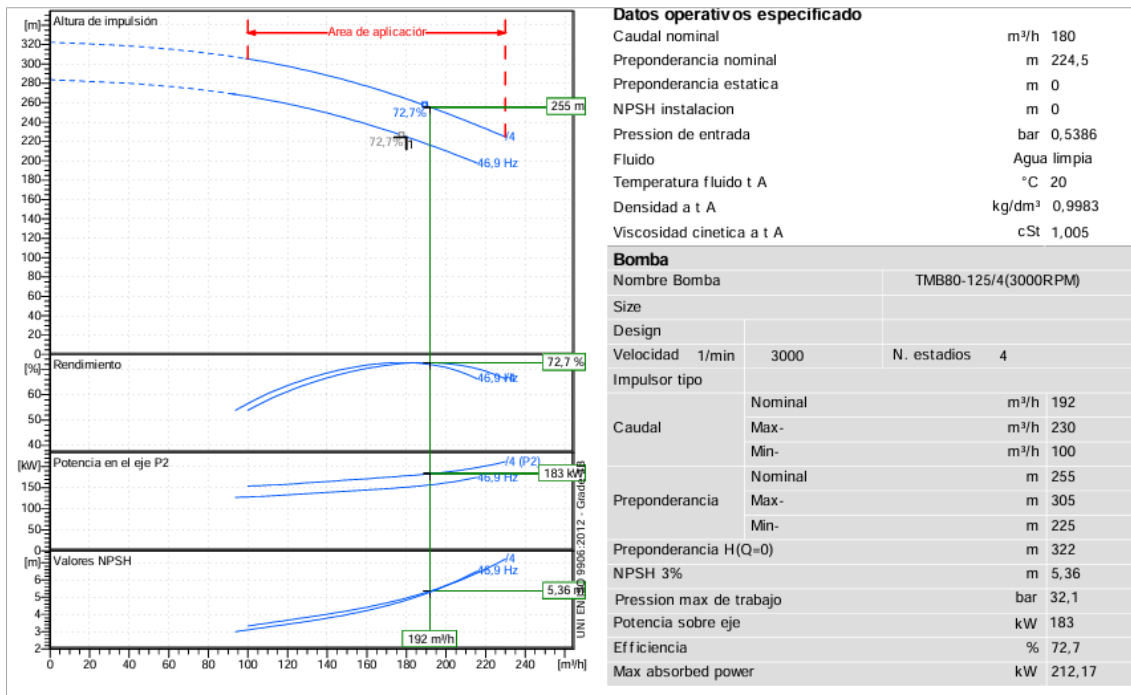


Figura 56. Datos técnicos de la bomba modelo TMB80-125/4, operando a 3000 RPM.

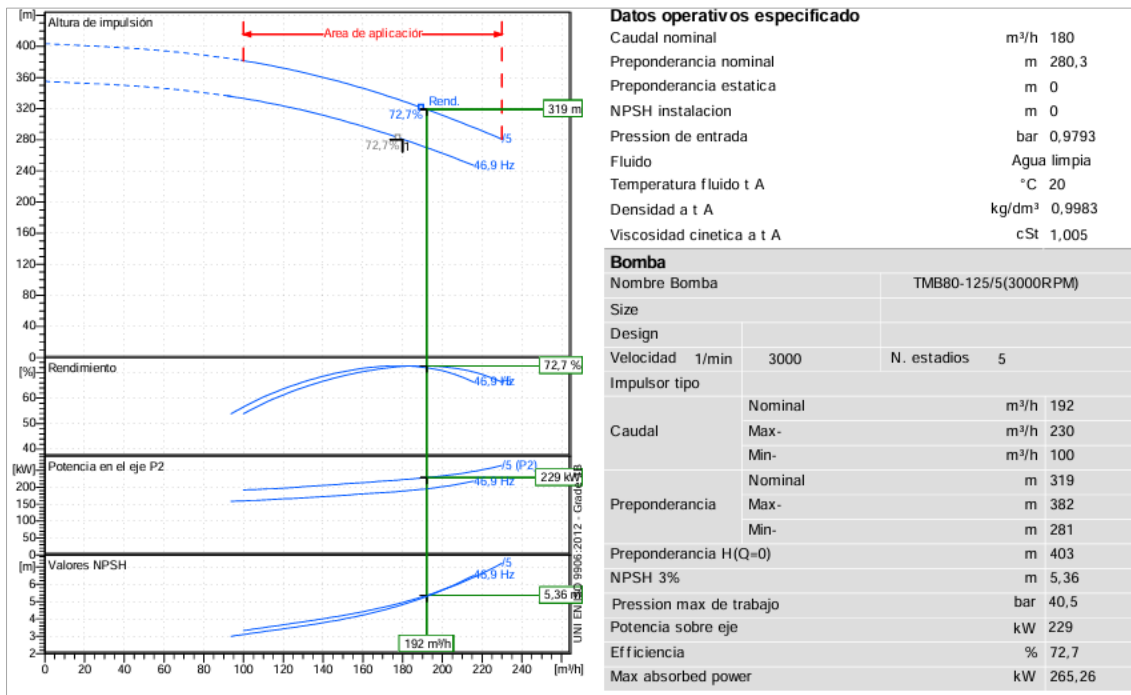


Figura 57. Datos técnicos de la bomba modelo TMB80-125/5, operando a 3000 RPM.

10.4 Anexo 4 - Hojas de datos válvulas reductoras

Tabla 27. Hoja técnica de la válvula reductora de presión (PR1) Dorot modelo 30-6-ISO PN16.


		Customer: Pexgol Israel		Pressure Rating: PN16		
Date: 7.5, 2023		Pressure Reducing valve, 2W control			Project name:	
CONTROL VALVE	Main valve Model	30	30 -6-ISO PN16 -PR Standard		H0223IL1 PR1 v2	
	Main valve Type	Globe, straight flow, diaphragm- actuated, Resilient disc seal, Flange connections				
	Control function:	The valve reduces upstream pressure to a steady, predetermined downstream pressure, regardless to upstream pressure or flow rate fluctuations and closes drip tight if the downstream pressure exceed the required set point.				
	PR					
	Size: Inch / mm	6	150			
	Kv ; Cv	407m3/h @ 1bar 475Gpm @ 1psi				
Length	480mm 18.9Inch					
Weight	157kg 346Lbs.					
SERVICE CONDITIONS	Pressures	Min.: mwc psi 7 10		Max.: PN16		
	Flow Rate	Continuous:		Max. momentary:		
		[cu.m/h]	350		953	
		[gpm]	1542		4198	
	Temp.	1 – 80 C \ 33 - 176 F				
Fluid type	Water					

Tabla 28. Hoja técnica de la válvula reductora de presión (PR2) Dorot modelo 32-6-ISO PN16.



		Customer: Pexgol Israel		Pressure Rating: PN25		
Date: 7.5, 2023		Pressure Reducing valve, 2W control			Project name:	
CONTROL VALVE	Main valve Model	32	32 -6-ISO PN16 -PR Standard		H0223IL1 PR2 v2	
	Main valve Type	Globe, straight flow, diaphragm- actuated, Resilient disc seal, Flange connections				
	Control function:	The valve reduces upstream pressure to a steady, predetermined downstream pressure, regardless to upstream pressure or flow rate fluctuations and closes drip tight if the downstream pressure exceed the required set point.				
	PR					
	Size: Inch / mm	6	150			
	Kv ; Cv	165m3/h @ 1bar 193Gpm @ 1psi				
Length	480mm 18.9Inch					
Weight	51kg 112Lbs.					
SERVICE CONDITIONS	Pressures	Min.: mwc psi 7 10		Max.: PN25		
	Flow Rate	Continuous:		Max. momentary:		
		[cu.m/h]	350		953	
		[gpm]	1542		4198	
	Temp.	1 – 80 C \ 33 - 176 F				
Fluid type	Water					

Tabla 29. Hoja técnica de la válvula reductora de presión (PR3) Dorot modelo 32-6-ISO PN16.

		Customer: Pexgol Israel		Pressure Rating: PN16	
Date: 7.5, 2023		Pressure Reducing valve, 2W control			Project name:
CONTROL VALVE	Main valve Model	32	32 -6-ISO PN16 -PR Standard		H0223IL1 PR3 v2
	Main valve Type	Globe, straight flow, diaphragm- actuated, Resilient disc seal, Flange connections			
	Control function:	The valve reduces upstream pressure to a steady, predetermined downstream pressure, regardless to upstream pressure or flow rate fluctuations and closes drip tight if the downstream pressure exceed the required set point.			
	PR				
	Size: Inch / mm	6	150		
	Kv ; Cv	165m ³ /h @ 1bar 193Gpm @ 1psi			
Length	480mm 18.9Inch				
Weight	51kg 112Lbs.				
SERVICE CONDITIONS	Pressures	Min.: mwc psi	7	10	Max.: PN16
	Flow Rate		Continuous:		Max. momentary:
		[cu.m/h]	350		953
		[gpm]	1542		4198
	Temp.	1 – 80 C \ 33 - 176 F			
Fluid type	Water				

10.5 Anexo 5 – Cálculo de verificación de válvulas

Para la selección de válvulas para líquidos, se sigue el siguiente procedimiento:

1. Especificar las variables necesarias para seleccionar el tamaño de la válvula: diseño, Q o dm/dt, P1, P2 o ΔP, S, Pv, Pc, v.

La ecuación para cuando la válvula maneja un líquido es:

$$C_v = \frac{Q}{N_1 F_P} \sqrt{\frac{S}{\Delta P}}$$

2. En la Tabla A1, determinar N1 si se conoce Q, de acuerdo con el sistema de unidades utilizado.

Se hace un cálculo preliminar de Cv suponiendo un valor razonable de Fp (por ejemplo 0,9).

3. Calcular el factor geométrico de la tubería, FP, que tiene en cuenta los accesorios que conectan la válvula a la tubería.

$$F_P = \left[1 + \frac{\Sigma K}{N_2} \left(\frac{C_{v,m\acute{a}x}}{d^2} \right)^2 \right]^{-1/2}$$

En la Tabla A1 se determina N2 según el sistema de unidades utilizado; d es el diámetro nominal de la válvula; ΣK es la suma de los coeficientes de pérdidas de los

accesorios que conectan la válvula a la tubería, incluyendo la altura dinámica a la entrada y a la salida, con sus signos:

$$\Sigma K = 0,5 \left[1 - \frac{d^2}{D_1^2} \right]^2 + \left[1 - \frac{d^2}{D_2^2} \right]^2 + \left[1 - \left(\frac{d}{D_1} \right)^4 \right] - \left[1 - \left(\frac{d}{D_2} \right)^4 \right]$$

D_1 es el diámetro interior de la tubería antes de la válvula; D_2 es el diámetro interior de la tubería después de la válvula. Si la válvula se conecta a la tubería sin accesorios, $F_P=1$.

4. Determinar los valores límite del caudal y de la caída de presión en la válvula.
 - a. El caudal máximo que puede manejar la válvula sin tener flujo estrangulado es:

$$Q_{\text{máx}} = N_1 \frac{F_{LP}}{F_P} C_v \sqrt{\frac{P_1 - F_F P_V}{S}}$$

Calcular el factor de relación de la presión del líquido con la presión crítica:

$$F_F = 0,96 - 0,28 \sqrt{\frac{P_V}{P_C}}$$

De acuerdo con el tipo de válvula por utilizar, determinar el coeficiente de recuperación de la presión en la válvula F_L , en la Tabla A2, A3 o A4.³

Calcular el factor combinado de recuperación de la presión en la válvula y en las conexiones:

$$F_{LP} = \left[\frac{K_i}{N_2} \left(\frac{C_v}{d^2} \right)^2 + \frac{1}{F_L^2} \right]^{-1/2}$$

$$K_i = 0,5 \left[1 - \frac{d^2}{D_1^2} \right]^2 + \left[1 - \left(\frac{d}{D_1} \right)^4 \right]$$

Si la válvula se conecta a la tubería sin accesorios, $K_i=0$, $F_P=1$, por lo tanto:

$$\frac{F_{LP}}{F_P} = F_L$$

El caudal de la válvula no puede ser mayor que el caudal máximo. De ser así, se debe optar por otra válvula con mayor C_v .

- b. Caída de presión máxima en la válvula, $\Delta P_{\text{máx}}$.

$$\Delta P_{\text{máx}} = \left(\frac{F_{LP}}{F_P} \right)^2 (P_1 - F_F P_V)$$

³ $F_L=0,85$, valor típico para válvula globo de flujo recto según IEC 60534-2-1.

Si la válvula se conecta a la tubería sin accesorios:

$$\left(\frac{F_{LP}}{F_P}\right)^2 = F_L^2$$

Se presenta flujo estrangulado si $\Delta P_{m\acute{a}x} < (P_1 - P_2)$. En tal caso, el caudal máximo se obtiene reemplazando ΔP por $\Delta P_{m\acute{a}x}$; si la válvula no es apropiada, se repite el procedimiento llevado hasta aquí con una válvula de mayor capacidad, es decir, mayor C_v .

5. Calcular el coeficiente de la válvula para líquidos:

$$C_v = \frac{Q}{N_1 F_P} \sqrt{\frac{S}{\Delta P}}$$

Recalcular los valores de F_P , F_{LP} y C_v .

6. Seleccionar la válvula a partir del C_v calculado.

Las constantes utilizadas se obtienen de la Tabla A1, el resto de variables se obtendrán de las tablas de datos de los fabricantes de válvulas.

Tabla A1. Constantes de las ecuaciones (adaptada de Emerson)

	N		Q	P, abs	ρ	T	d,D
N1	0,0865 0,865 1,00		Nm ³ /h Nm ³ /h GPM	kPa bar psia			
N2	0,00214 890						mm pulgada