

**Análisis y simulación del régimen permanente y de los transitorios
hidráulicos del sistema de bombeo de agua para el abastecimiento de un
yacimiento hidrocarburífero**



PARENTI, Gastón

PROYECTO INTEGRADOR PROFESIONAL

Presentado a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del
Comahue como requisito para la obtención del grado de
INGENIERO MECÁNICO

Neuquén - Argentina

AÑO 2026

**Análisis y simulación del régimen permanente y de los transitorios
hidráulicos del sistema de bombeo de agua para el abastecimiento de un
yacimiento hidrocarburífero**

PARENTI, Gastón

Director: Mg. Ing. AUDISIO, Orlando Aníbal

Presentado a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del
Comahue como requisito para la obtención del grado de
INGENIERO MECÁNICO

Neuquén - Argentina

AÑO 2026

**Análisis y simulación del régimen permanente y de los transitorios
hidráulicos del sistema de bombeo de agua para el abastecimiento de un
yacimiento hidrocarburífero**

PARENTI, Gastón

Aprobado en fecha: DIA de MES de AÑO

Tribunal evaluador:

- Dr. Ing. PRADO, Ricardo A.
- Ing. MARCHEGANI, Ariel R.
- Ing. VALLE SOSA, Juan J.

AGRADECIMIENTOS

El presente proyecto concluye una etapa importante de mi vida, marcada por el logro de obtener el título de Ingeniero Mecánico. Este camino no hubiera sido posible sin el acompañamiento y el apoyo de muchas personas, a quienes deseo expresar mi más sincero agradecimiento.

A mi familia, especialmente a mi madre, a mi padre y a mi abuela, por estar siempre presentes, acompañarme incondicionalmente, brindarme su apoyo y desear siempre lo mejor para mí.

A mis amigos de toda la vida y a los nuevos que fui conociendo durante la carrera, por estar a mi lado en cada etapa, por su amistad y por ser uno de mis principales sostenes.

A mis profesores, quienes a lo largo de mi formación universitaria compartieron sus conocimientos y experiencia. En especial, agradezco a mi director del Proyecto Integrador Profesional, Orlando Audisio, por su guía, dedicación y acompañamiento durante el desarrollo de este trabajo final de carrera. Asimismo, agradezco a los miembros del jurado por su tiempo y compromiso.

Finalmente, agradezco a la universidad pública, gratuita y de calidad, y en particular a los docentes y no docentes que la conforman, quienes con su trabajo diario hacen posible una educación accesible y de excelencia.

Análisis y simulación del régimen permanente y de los transitorios hidráulicos del sistema de bombeo de agua para el abastecimiento de un yacimiento hidrocarburífero

Autor: PARENTI, Gastón

Director: Mg. Ing. AUDISIO, Orlando Anibal

Resumen

El presente proyecto busca analizar el comportamiento hidráulico de un sistema de bombeo de agua en régimen permanente y transitorio, poniendo especial énfasis en los efectos del golpe de ariete. El sistema estudiado está compuesto por una estación de bombeo que impulsa el caudal a través de un acueducto de acero de gran longitud y perfil topográfico variable, descargando a un sistema de almacenamiento a presión atmosférica. Mediante simulaciones numéricas realizadas con el software Allievi, se evalúan las presiones y velocidades máximas y mínimas generadas durante el escenario más desfavorable, correspondiente al paro repentino de las bombas. Con el objetivo de mitigar estos efectos, se analizan distintas alternativas de protección frente a transitorios hidráulicos, considerando su desempeño hidráulico, viabilidad técnica y aspectos económicos. A partir del análisis comparativo, se selecciona como solución final la combinación de un calderín ubicado a la salida de la estación de bombeo y dos ventosas instaladas en puntos estratégicos del acueducto, logrando una adecuación en las magnitudes máximas y mínimas de presiones y garantizando un funcionamiento seguro y confiable del sistema.

Palabras Claves

Golpe de ariete; Transitorios hidráulicos; Sistemas de bombeo; Calderines; Ventosas; Acueductos; Allievi.

Analysis and Simulation of Steady-State and Hydraulic Transients in a Water Pumping System for Supplying an Oil and Gas Field

Author: PARENTI, Gastón

Advisor: Mg. Ing. AUDISIO, Orlando Anibal

Summary

The present project aims to analyze the hydraulic behavior of a water pumping system under steady-state and transient conditions, with special emphasis on the effects of water hammer. The system under study consists of a pumping station that conveys flow through a long steel aqueduct with a variable topographic profile, discharging into an atmospheric storage system. Through numerical simulations performed using Allievi software, the maximum and minimum pressures and velocities generated during the most unfavorable scenario—corresponding to the sudden shutdown of the pumps—are evaluated. In order to mitigate these effects, different protection alternatives against hydraulic transients are analyzed, considering their hydraulic performance, technical feasibility, and economic aspects. Based on the comparative analysis, the final solution selected consists of the combination of a surge tank installed at the outlet of the pumping station and two air valves located at strategic points along the aqueduct, achieving adequate control of maximum and minimum pressure magnitudes and ensuring safe and reliable system operation.

Key Words

Water hammer; Hydraulic transients; Pumping systems; Air vessels; Air valves; Aqueducts; Allievi.

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN.....	16
2	OBJETIVOS.....	18
2.1	Objetivo General	18
2.2	Objetivos Específicos.....	18
3	MARCO TEÓRICO	19
3.1	Sistemas de bombeo.....	19
3.1.1	Cámara de captación	19
3.1.2	Estación de bombeo.....	19
3.1.3	Tuberías.....	21
3.1.4	Válvulas, accesorios y elementos complementarios.....	22
3.2	Ecuaciones Básicas	22
3.2.1	Ecuación de continuidad.....	22
3.2.2	Ecuación de la energía.....	23
3.2.3	Pérdidas de carga en tuberías	23
3.3	Curvas del sistema	25
3.4	Curvas de la bomba.....	27
3.4.1	Acoplamiento en paralelo.....	29
3.4.2	Acoplamiento en serie	30
3.5	Cavitación	31
3.6	Transitorios hidráulicos.....	34

3.6.1	Descripción del fenómeno	35
3.6.2	Software Allievi	38
3.6.3	Métodos de atenuación.....	41
4	DESARROLLO.....	47
4.1	Descripción del sistema	47
4.2	Análisis teórico	55
4.2.1	Curvas de las bombas	56
4.2.2	Curva del sistema	56
4.2.3	Punto de operación	58
4.2.4	Funcionamiento de las bombas de acuerdo a la Norma ANSI/HI 9.6.3.....	59
4.3	Análisis mediante software	62
4.3.1	Configuración del sistema	62
4.3.2	Resultados sin protección.....	65
4.4	Selección de protecciones ante efectos transitorios	72
4.4.1	Válvula Anticipadora de Onda (VAO).....	74
4.4.2	Válvulas de aire (ventosas).....	76
4.4.3	Calderín	79
4.4.4	Tanque unidireccional	82
4.4.5	Calderines y tanques unidireccionales.....	84
4.4.6	Calderines y ventosas	87
4.4.7	Configuraciones alternativas de calderines	89

4.5	Resultados finales	92
4.5.1	Selección de los dispositivos estándar.....	93
4.5.2	Solución final con dispositivos seleccionados.....	95
4.5.3	Comparación con el escenario sin protección	97
4.6	Costos y consideraciones	99
4.6.1	Consideraciones técnicas y constructivas.....	99
4.6.2	Estimación general de costos.....	100
5	CONCLUSIONES.....	104
6	REFERENCIAS	105
	ANEXO I: Planos del sistema de bombeo.....	107
	ANEXO II: Características de las bombas	111
	ANEXO III: Dimensionamiento VAO	112
	ANEXO IV: Calderín	113
	ANEXO V: Ventosa Bermad C70.....	115
	ANEXO VI: Dimensiones permitidas de cargas.....	118
	ANEXO VII: Presupuesto calderín	119

Índice de Figuras

Figura 3-1. Tipos de rodetes según la dirección del flujo (Paz Penín et al., 2019).	21
Figura 3-2. Coeficiente de pérdida K para distintos accesorios (White, 2004)	25
Figura 3-3. Construcción de curva del sistema (Karassik, 2000)	26
Figura 3-4. Ensayo elemental de una bomba centrífuga a n constante (Paz Penín et al., 2019).....	27
Figura 3-5. Curvas de una instalación al variar la apertura de la válvula de impulsión (Paz Penín et al., 2019).....	29
Figura 3-6. Acoplamiento en paralelo. Izq.: dos bombas iguales. Der: diferentes bombas (Paz Penín et al., 2019).....	30
Figura 3-7. Acoplamiento de bombas en serie (Paz Penín et al., 2019).	31
Figura 3-8. Diagrama termodinámico de fases (Paz Penín et al., 2019).....	32
Figura 3-9. Altura de aspiración de una bomba (Paz Penín et al., 2019).....	33
Figura 3-10. Secuencia de eventos en un ciclo después del cierre instantáneo de válvula (Sanks, 1998)	37
Figura 3-11. Flujograma de cálculo para el software Allievi.	39
Figura 3-12. Standpipe o tanque de oscilación abierto (Sanks, 1998).....	43
Figura 3-13. Tanque unidireccional (Sanks, 1998).....	44
Figura 3-14. Calderín vertical (CSA srl, 2026).	45
Figura 4-1. Vista en planta de la cámara de bombeo.....	48
Figura 4-2. Corte A-A cámara de bombeo	49
Figura 4-3. Traza del acueducto (obtenido de Google Earth).....	50
Figura 4-4. Perfil de elevación del acueducto (obtenido de Google Earth).....	51

Figura 4-5. Curvas de la bomba KSB WVR 125/10 (KSB, s.f).	53
Figura 4-6. Factores de caudal para selección de válvula de regulación (Bermad, s.f.).....	55
Figura 4-7. Curvas de las bombas funcionando en paralelo	56
Figura 4-8. Curva característica del sistema.....	58
Figura 4-9. Punto de funcionamiento del sistema de bombeo.....	58
Figura 4-10. Rangos admisibles y preferibles de operación.....	61
Figura 4-11. Esquema en Allievi del modelo desarrollado (captura de pantalla del software Allievi).	63
Figura 4-12. Datos básicos para depósitos (captura de pantalla del software Allievi).	63
Figura 4-13. Datos para la configuración de las tuberías (captura de pantalla del software Allievi). .	64
Figura 4-14. Datos de la estación de bombeo (captura de pantalla del software Allievi).	65
Figura 4-15. Datos de válvula de regulación de caudal (captura de pantalla del software Allievi). ...	65
Figura 4-16. Datos de la ley de altura (captura de pantalla del software Allievi).	65
Figura 4-17. Resultados del régimen permanente en tuberías (captura de pantalla del software Allievi).	66
Figura 4-18. Resultados del régimen permanente en bombas (captura de pantalla del software Allievi).	66
Figura 4-19. Resultados en régimen permanente (LAM), (captura de pantalla del software Allievi).	67
Figura 4-20. Variación de presión en régimen permanente (captura de pantalla del software Allievi).	68
Figura 4-21. Alturas máximas y mínimas en régimen transitorio (captura de pantalla del software Allievi).....	69

Figura 4-22. Presiones máximas y mínimas en régimen transitorio (captura de pantalla del software Allievi).....	69
Figura 4-23. Presión en función del tiempo N31, estación 0 m (captura de pantalla del software Allievi).....	72
Figura 4-24. Configuración VAO (captura de pantalla del software Allievi).	74
Figura 4-25. Maniobra de apertura y cierre de VAO (captura de pantalla del software Allievi).	74
Figura 4-26. Esquema de la instalación con VAO (captura de pantalla del software Allievi).	75
Figura 4-27. Presiones máximas y mínimas con VAO, Caso 1 (captura de pantalla del software Allievi).....	76
Figura 4-28. Curvas de expulsión y admisión de aire de ventosas (IRUA, s.f).....	77
Figura 4-29. Configuración de nuevo fichero de ventosas (captura de pantalla del software Allievi).	78
Figura 4-30. Altura piezométrica con 12 ventosas, Caso 2 (captura de pantalla del software Allievi).	78
Figura 4-31. Presiones máximas y mínimas con ventosas instaladas, Caso 2 (captura de pantalla del software Allievi).....	79
Figura 4-32. Esquema de la instalación con calderín, Caso 3 (captura de pantalla del software Allievi).	80
Figura 4-33. Características del calderín obtenidas por el asistente del software (captura de pantalla del software Allievi).	80
Figura 4-34. Presiones máximas y mínimas con calderín, Caso 3 (captura de pantalla del software Allievi).....	81
Figura 4-35. Comportamiento del sistema con tres calderines, Caso 3.b (captura de pantalla del software Allievi).	82
Figura 4-36. Dimensiones del tanque unidireccional (captura de pantalla del software Allievi).	83

Figura 4-37. Presiones máximas y mínimas durante el transitorio con tanque unidireccional, Caso 4 (captura de pantalla del software Allievi).....	83
Figura 4-38. Presiones máximas y mínimas con calderín y tanque unidireccional, Caso 5 (captura de pantalla del software Allievi).	85
Figura 4-39. Presiones máximas y mínimas con calderín y dos tanques unidireccionales, Caso 5.a (captura de pantalla del software Allievi).....	86
Figura 4-40. Presiones con calderín y dos tanques unidireccionales, Caso 5.b (captura de pantalla del software Allievi).....	87
Figura 4-41. Ubicación y tipo de ventosas, Caso 6 (captura de pantalla del software Allievi).	88
Figura 4-42. Resultados obtenidos con un calderín y dos ventosas, Caso 6 (captura de pantalla del software Allievi).....	89
Figura 4-43. Datos básicos del predimensionamiento de calderines para el Caso 7.a (captura de pantalla del software Allievi).	90
Figura 4-44. Datos básicos del predimensionamiento de calderines para el Caso 7.b (captura de pantalla del software Allievi).	90
Figura 4-45. Resultados de presión para Caso 7.a de un calderín ubicado en loma, estación 4300 m (captura de pantalla del software Allievi).....	90
Figura 4-46. Esquema del Caso 7.b, con calderines a la salida de cada bomba más dos ventosas en las estaciones 4300 y 6800 m (captura de pantalla del software Allievi).	91
Figura 4-47. Resultados obtenidos para calderines a la salida de cada bomba, Caso 7.b (captura de pantalla del software Allievi).	92
Figura 4-48. Dimensiones estándar de calderines (Mistral Ross, s.f.).....	94
Figura 4-49. Válvula de aire combinada Bermad C70 (Bermad, s.f.).	94
Figura 4-50. Ubicación de las ventosas Bermad C70 (captura de pantalla del software Allievi).	95
Figura 4-51. Altura generada para la solución final (captura de pantalla del software Allievi).....	96

Figura 4-52. Presiones generadas para la solución final (captura de pantalla del software Allievi). ..96	96
Figura 4-53. Presión en función del tiempo Nodo 18, estación 0 m (captura de pantalla del software Allievi).....97	97
Figura 4-54. Comparación de presiones máximas y mínimas con y sin protección.....98	98
Figura 4-55. Costos unitarios de válvulas de aire (Todo Válvulas, 2025).....102	102
Figura I. 1. Vista en planta - cámara de bombeo108	108
Figura I. 2. Vista lateral de la cámara de bombeo109	109
Figura I. 3. Dimensiones de la bomba KSB WVR 125/10110	110
Figura III. 1. Instalación típica de VAO (ARMAS, 2018).112	112
Figura IV. 1. Dimensiones de calderín (Mistral Ross, s.f.)113	113
Figura V. 1. Válvula de aire Bermad C70 (Bermad, s.f.)115	115
Figura V. 2. Alivio y admisión de aire (durante el llenado, drenaje y en condiciones de vacío)117	117
Figura V. 3. Expulsión de aire (durante el llenado).....117	117
Figura VI. 1. Vehículos de transporte de cargas que son de libre circulación en rutas nacionales. ..118	118
Figura VII. 1. Presupuesto de Calderín (Ibaiondo, 2026).....119	119
Figura VII. 2. Condiciones de entrega de calderín (Ibaiondo, 2026).120	120

Índice de Tablas

Tabla 1. Especificaciones de las bombas.....	51
Tabla 2. Especificaciones de los motores.....	52
Tabla 3. Comparación puntos de funcionamiento de la bomba.....	59
Tabla 4. Rango preferido de operación relacionada con la velocidad específica (ANSI/HI 9.6.3, 2017)	60
Tabla 5. Cálculo de velocidad específica nsq	61
Tabla 6. Comparación de puntos de operación del sistema.....	66
Tabla 7. Requisitos de tensión (API 5L, 2018)	70
Tabla 8. Factores de calidad básicos para juntas longitudinales soldadas en tuberías (ASME B31.3, 2022).....	71
Tabla 9. Valores de coeficientes γ para $t < D/6$ (ASME B31.3, 2022).....	71
Tabla 10. Estimación general de costos.....	103
Tabla II. 1. Características principales de la bomba KSB 125/10	111
Tabla III. 1. Dimensionamiento de VAO	112
Tabla IV. 1. Dimensiones estándar calderín (Mistral Ross, s.f.)	114

1 INTRODUCCIÓN

Vaca Muerta es una formación geológica, ubicada principalmente en el centro de la provincia de Neuquén, aunque también su extensión incluye partes de Mendoza, Río Negro y La Pampa, es reconocida por su gran potencial en reservas de hidrocarburos, especialmente petróleo y gas (shale oil y shale gas), obtenidos a partir de yacimientos no convencionales. La explotación de estos recursos ha impulsado la economía local y nacional, atrayendo inversiones y generando empleo.

Vaca Muerta es un tipo de formación muy poco porosa y casi impermeable, denominada comúnmente “shale” y es conocida como roca madre o generadora, ya que en ella se originaron los hidrocarburos luego de un extenso proceso geológico. Parte de esos hidrocarburos migró hacia formaciones más porosas y permeables, dando origen a los yacimientos convencionales, pero una fracción importante permaneció atrapada en la roca generadora (Núñez y Martínez, 2020).

Mientras que en los yacimientos convencionales la producción se centra en extraer el petróleo y gas acumulados en formaciones naturalmente permeables, la explotación no convencional, como la de Vaca Muerta, consiste en recuperar los hidrocarburos directamente desde la roca madre. Dado que estas rocas presentan una permeabilidad extremadamente baja, es necesario generar artificialmente vías de flujo que permitan el movimiento del hidrocarburo. Esto se logra mediante la técnica de fractura hidráulica (fracking), que consiste en la inyección a alta presión de un fluido compuesto principalmente por agua (95 %), arena (4,5 %) y una pequeña proporción de aditivos químicos (menos del 1 %). La mezcla se introduce en el pozo con el objetivo de producir microfisuras en la roca, las cuales se mantienen abierta con granos de arena permitir que el petróleo o gas fluyan hacia la superficie (Núñez y Martínez, 2020).

El agua, por lo tanto, cumple un rol fundamental en este proceso, no solo durante la fractura hidráulica sino también en la perforación (para refrigerar y limpiar el pozo), en el tratamiento y manejo del fluido de retorno (flowback), y en otros procesos auxiliares. Por eso, disponer de un suministro confiable, continuo y seguro de agua resulta esencial para garantizar la operatividad de los yacimientos no convencionales.

El acueducto involucrado en este estudio es de 9800 metros de longitud y conecta la toma desde el río Neuquén hasta una zona núcleo de Vaca Muerta; el mismo, es de gran importancia para garantizar el suministro de agua requerido para las operaciones del yacimiento. El sistema está conformado por seis bombas en paralelo, de las cuales operan cinco, mientras que una queda en reserva (stand-by). La confiabilidad y eficiencia de este sistema son fundamentales para mantener la continuidad de las

actividades. En este contexto, es muy importante entender y mitigar los riesgos asociados con transitorios que puedan comprometer la operatividad y la integridad estructural de esta infraestructura.

Los transitorios hidráulicos de gran magnitud, también conocidos como golpes de ariete, son fenómenos que ocurren cuando se produce un cambio brusco en el régimen de flujo del agua, ya sea por el cierre de una válvula, la parada o arranque de una bomba, entre otros factores. Estos eventos pueden generar sobrepresiones o depresiones que, de no ser adecuadamente controladas, pueden causar daños estructurales significativos en el sistema hidráulico (Parmakian, 1963).

El propósito de este proyecto es identificar y analizar la situación más desfavorable que puede experimentar el acueducto en términos de transitorios hidráulicos. Para ello, se empleará el software Allievi, desarrollado por el Instituto Tecnológico del Agua (ITA) de la Universidad Politécnica de Valencia (Allievi, 2018), el cual permite simular numéricamente los distintos transitorios que pueden impactar el acueducto. Estas simulaciones permitirán evaluar con precisión los efectos de dichos eventos, identificar puntos críticos y proponer medidas de prevención y mitigación efectivas. De esta manera, se busca garantizar la integridad y eficiencia operativa del acueducto, asegurando la continuidad y confiabilidad del suministro de agua en la región.

2 OBJETIVOS

A continuación, se indican los objetivos generales y específicos de este proyecto.

2.1 Objetivo General

Definir y analizar la situación más desfavorable de carácter transitorio y/o dinámico que puede tener el acueducto que nace en la margen izquierda del Río Neuquén y llega hasta una zona núcleo próxima al Yacimiento “Loma Campana” de Vaca Muerta, mediante la simulación numérica de los regímenes permanentes y transitorios utilizando conceptos teóricos básicos y software de aplicación con resolutores en CFD (Computational Fluid Dynamics).

2.2 Objetivos Específicos

- Revisar y verificar las instalaciones hidromecánicas existentes (bombas, tuberías, accesorios, comando, etc.).
- Simular y determinar parámetros operativos para todas las posibilidades de operación y maniobra que pueda brindar la instalación existente.
- Cálculos en régimen permanente y no permanente.
- Análisis y definición de la situación más desfavorable para el sistema.
- Definir y seleccionar protecciones para el sistema hidráulico.
- Análisis de resultados finales con el sistema y sus protecciones definidas.
- Considerar y evaluar aspectos de mejoras potenciales y consideraciones económicas.

3 MARCO TEÓRICO

3.1 Sistemas de bombeo

El objetivo de esta sección es describir los principales componentes que conforman un sistema de bombeo empleado en acueductos presurizados. Un acueducto es toda obra destinada al transporte de agua entre dos o más puntos. Estos pueden funcionar a presión (tuberías cerradas) o bien a superficie libre (canales o tuberías parcialmente llenas).

Para el presente proyecto se trabajará con acueductos a presión, por lo tanto, se describen los elementos típicos que componen a los mismos, los cuales permiten captar, impulsar y transportar el agua hacia el punto de destino. En términos generales, un sistema de bombeo típico está integrado por la cámara de captación, la estación de bombeo, sistema de tuberías y accesorios, válvulas y elementos de control, elementos de protección contra transitorios y depósito de descarga.

3.1.1 Cámara de captación

La cámara de captación es la estructura hidráulica que permite acumular agua proveniente de río, lago o canal, asegurando condiciones estables y adecuadas para la succión de las bombas. Su función principal es recibir el caudal de la fuente de agua y entregarlo a la estación de bombeo con un nivel suficiente para garantizar la inmersión adecuada de las bombas y evitar fenómenos como la entrada de aire. Esta captación está emplazada en la margen izquierda del río Neuquén y aproximadamente a 15 km de la localidad de Añelo.

3.1.2 Estación de bombeo

La estación de bombeo es uno de los componentes principales del sistema, responsable de entregar al fluido la energía necesaria para vencer la diferencia de cotas y compensar las pérdidas de energía que se generan a lo largo de la conducción, tanto por fricción como por accesorios.

- La estación de bombeo está conformada por un conjunto de equipos e instalaciones electromecánicas. Entre los componentes principales se encuentran:
- Bombas: son máquinas de fluido, que sirven para comunicar energía al fluido que la atraviesa, transformando energía mecánica en energía hidráulica.
- Motores: pueden ser eléctricos o de combustión, y deben estar dimensionados para suministrar la potencia requerida por la bomba.
- Instalaciones de alimentación eléctrica: se incluyen tableros, protecciones y sistemas de control.

- Instalaciones auxiliares: incluyen sistemas de comando, automatización, ventilación, seguridad y monitoreo.

Para garantizar un funcionamiento seguro y permitir el mantenimiento de los equipos, cada bomba suele estar equipada con válvulas seccionadoras (como válvulas de compuerta o mariposa), que permiten aislar el equipo sin necesidad de intervenir la conducción completa, y una válvula de retención instalada en la descarga inmediata de cada bomba, cuya función es impedir el retorno del fluido ante una detención del equipo y evitar el giro inverso del rotor.

Dentro de las estaciones de bombeo, las bombas empleadas pueden clasificarse, de manera general, en bombas de desplazamiento positivo y bombas rotodinámicas o turbobombas.

Las bombas de desplazamiento positivo funcionan atrapando una cantidad fija de fluido y desplazándolo mediante el movimiento de uno o más elementos mecánicos (variación de volumen), como émbolos o engranajes. Este tipo de bombas resulta adecuado para aplicaciones que requieren un caudal prácticamente constante y altas presiones. El intercambio de energía entre la bomba y el fluido se realiza en forma de energía de presión, producida por la variación de un volumen (Mataix, 1975).

Las bombas rotodinámicas o turbobombas están constituidas por un rodete que gira acoplado a un motor. En este caso, el intercambio de energía entre la máquina y el fluido se produce mediante la adición de energía cinética al fluido, que posteriormente se transforma en energía de presión a lo largo del sistema. Este tipo de bombas es especialmente adecuado para el manejo de grandes caudales y para situaciones en las que existe variabilidad en la demanda de presión (Mataix, 1975).

Las turbobombas pueden clasificarse según la dirección del flujo del fluido a través del rodete, distinguiéndose tres tipos principales, como se muestra en la Figura 3-1 (Paz Penín et al., 2019). En las bombas radiales, el fluido ingresa axialmente al rodete y es impulsado en dirección radial, siendo adecuadas para aplicaciones que requieren alturas de elevación relativamente altas con caudales moderados. Las bombas axiales, en cambio, conducen el fluido de forma prácticamente paralela al eje de rotación, lo que las hace apropiadas para grandes caudales y bajas alturas de bombeo. Entre ambos extremos se encuentran las bombas diagonales o mixtas, en las cuales el flujo presenta componentes tanto radiales como axiales, permitiendo cubrir rangos intermedios de caudal y altura (Paz Penín et al., 2019).

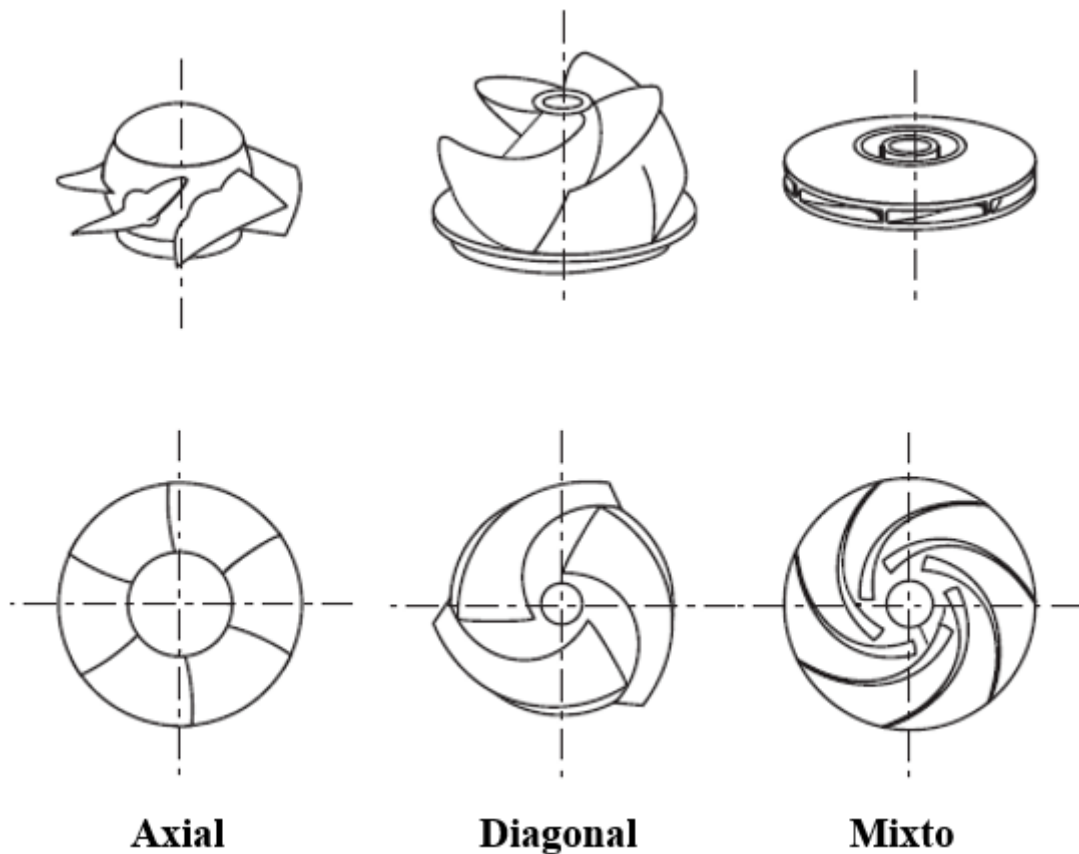


Figura 3-1. Tipos de rodetes según la dirección del flujo (Paz Penín et al., 2019).

3.1.3 Tuberías

Las tuberías también constituyen uno de los componentes principales de un sistema de bombeo, ya que son las encargadas de conducir el agua desde la estación de bombeo hasta el depósito de descarga, manteniendo las condiciones de presión y caudal requeridas. Su correcto dimensionamiento es fundamental para minimizar las pérdidas de carga y asegurar la integridad mecánica del acueducto.

Las tuberías pueden fabricarse de distintos materiales, cuya selección depende de factores como el diámetro requerido, la presión de operación, el tipo de fluido y las condiciones de servicio. En el caso del presente proyecto, el acueducto está construido en acero al carbono, material ampliamente utilizado en conducciones de gran diámetro y alta presión debido a su elevada resistencia mecánica y buena respuesta frente a sollicitaciones estructurales.

Las tuberías además incluyen una variedad de accesorios, como codos, tes, reducciones y otras uniones, que deben ser consideradas ya que introducen pérdidas de carga localizadas.

3.1.4 Válvulas, accesorios y elementos complementarios

Además de la cámara de captación, la estación de bombeo y sistema de tuberías, un acueducto a presión posee una serie de válvulas, accesorios y dispositivos complementarios que permiten su operación segura y eficiente. Estos elementos cumplen función de aislamiento, control, maniobra protección y mantenimiento del sistema.

Entre los componentes más habituales se encuentran:

- Válvulas de aislamiento o seccionadoras, utilizadas para habilitar o interrumpir el flujo en diferentes tramos del acueducto.
- Válvulas de retención (unidireccional), que impiden el flujo inverso y protegen los equipos de bombeo.
- Válvulas de control, como reguladoras de presión y caudal, que permiten ajustar el funcionamiento hidráulico del sistema.
- Accesorios, tales como codos, tes, reducciones, entre otros.
- Elementos de protección contra transitorios, como ventosas, calderines, válvulas anticipadoras de onda, cuya función es mitigar o reducir los efectos de los golpes de ariete y otros fenómenos transitorios.

3.2 Ecuaciones Básicas

Las ecuaciones de continuidad y de energía, junto con el concepto de pérdidas de carga, son fundamentales para el estudio del flujo de fluidos en tuberías.

3.2.1 Ecuación de continuidad

La ecuación de continuidad se basa en el principio de conservación de la masa. En el caso de tuberías, es común asumir un flujo estacionario y una velocidad uniforme en la sección transversal (Marigorta, 1994). La ecuación de continuidad entre dos secciones de un conducto resulta:

$$\rho_1 A_1 v_1 = \rho_2 A_2 v_2 \quad (3-1)$$

donde,

- A es la sección transversal de la tubería,
- v es la velocidad media del fluido en la sección transversal,
- ρ es la densidad del fluido.

3.2.2 Ecuación de la energía

La ecuación de la energía permite analizar el comportamiento del flujo de un fluido en distintos puntos del sistema considerando la conservación y transformación de distintas energías. Permite entender cómo se distribuye la energía del sistema hidráulico.

Partiendo de la ecuación de la energía en su forma desarrollada y considerando régimen permanente, flujo unidimensional, fluido incompresible y viscoso se obtiene la ecuación de la energía en su forma simplificada:

$$\frac{p_1}{\gamma_1} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 + H_b - h_f = \frac{p_2}{\gamma_2} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 \quad (3-2)$$

donde,

- $\frac{p}{\gamma}$ es la energía de presión, expresada en términos de altura, en donde p es la presión en la sección y γ es el peso específico del líquido,
- $\frac{v^2}{2g}$ es la energía cinética expresada en términos de altura,
- z es la energía de posición, expresada en términos de altura, con respecto a un plano de referencia,
- H_b es la energía entregada por la bomba, expresada en términos de altura,
- h_f son las pérdidas de carga totales entre las secciones 1 y 2, expresada en términos de altura.

3.2.3 Pérdidas de carga en tuberías

Cuando un fluido es conducido a través de una tubería, parte de su energía se disipa debido a los efectos viscosos y a la interacción del flujo con las paredes del conducto y con los elementos presentes en la instalación. Estas pérdidas, conocidas como pérdidas de carga, representan energía que debe ser compensada por las bombas u otros dispositivos para asegurar el transporte de caudal requerido.

Las pérdidas de carga se dividen pérdidas por fricción (o distribuidas) y pérdidas localizadas. Las primeras son aquellas que se generan a lo largo de la tubería debido al rozamiento del fluido con las paredes internas. Su magnitud se calcula generalmente con la fórmula de Darcy-Weisbach

$$h_f = f \frac{L v^2}{d 2g} \quad (3-3)$$

donde,

- f , factor de fricción,
- L , longitud de la tubería,
- d , diámetro de la tubería,
- v , velocidad media del fluido.

El coeficiente adimensional f se denomina coeficiente de fricción de Darcy, y depende del número de Reynolds Re , ec. (3-4), y de la rugosidad relativa ε/d , donde ε representa la altura de rugosidad de la pared (White, 2004). El mismo se puede obtener mediante el diagrama de Moody (1944), o con la ecuación de Haaland (1983), ec. (3-5),

$$Re = \frac{\rho v d}{\mu} \quad (3-4)$$

$$\frac{1}{f^{1/2}} = -1,8 \log \left[\frac{6,9}{Re} + \left(\frac{\varepsilon/d}{3,7} \right)^{1,11} \right] \quad (3-5)$$

donde ρ es la densidad del fluido, v la velocidad media, d el diámetro interno de la tubería y μ la viscosidad (White, 2004).

Por otro lado, las pérdidas localizadas son aquellas asociadas a accesorios, uniones, válvulas, codos, reducciones y otros elementos que alteran la dirección o velocidad del fluido. Estas pérdidas se expresan mediante la relación

$$h_m = K \frac{v^2}{2g} \quad (3-6)$$

donde K es un coeficiente característico del accesorio con valores tabulados en bibliografías, como se observa en la Figura 3-2 (White, 2004).

	Diámetro nominal, in									
	Roscado					Acoplado				
	$\frac{1}{2}$	1	2	4	1	2	4	8	20	
Válvulas (abiertas):										
Globo	14	8,2	6,9	5,7	13	8,5	6,0	5,8	5,5	
Compuerta	0,30	0,24	0,16	0,11	0,80	0,35	0,16	0,07	0,03	
De retención	5,1	2,9	2,1	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	
De ángulo	9,0	4,7	2,0	1,0	4,5	2,4	2,0	2,0	2,0	
Codos:										
45° normal	0,39	0,32	0,30	0,29						
45° suave					0,21	0,20	0,19	0,16	0,14	
90° normal	2,0	1,5	0,95	0,64	0,50	0,39	0,30	0,26	0,21	
90° suave	1,0	0,72	0,41	0,23	0,40	0,30	0,19	0,15	0,10	
180° normal	2,0	1,5	0,95	0,64	0,41	0,35	0,30	0,25	0,20	
180° suave					0,40	0,30	0,21	0,15	0,10	
«Tes»:										
Flujo directo	0,90	0,90	0,90	0,90	0,24	0,19	0,14	0,10	0,07	
Flujo lateral	2,4	1,8	1,4	1,1	1,0	0,80	0,64	0,58	0,41	

Figura 3-2. Coeficiente de pérdida K para distintos accesorios (White, 2004)

Por lo tanto, las pérdidas de carga totales resultan de la suma de las pérdidas por fricción y las pérdidas localizadas,

$$h_{tot} = h_f + \sum h_m \quad (3-7)$$

La estimación adecuada de estas pérdidas es fundamental para determinar la altura manométrica requerida y verificar que las bombas seleccionadas operen dentro de sus condiciones previstas.

3.3 Curvas del sistema

La expresión analítica que define la altura manométrica requerida por una instalación hidráulica se escribe como:

$$H_{sist} = \Delta z + \frac{\Delta p}{\gamma} + \frac{\Delta v^2}{2g} + h_{tot} \quad (3-8)$$

Los dos primeros términos son independientes del caudal y su suma define el valor de la altura manométrica a caudal nulo, denominado altura piezométrica. Los otros dos términos son función del caudal. En la mayoría de los casos la variación de la energía cinética suele despreciarse debido a su poca magnitud.

La representación gráfica de la ecuación anterior se la conoce como curva de la instalación. Los términos que no dependen del caudal se denominan cargas fijas, mientras que aquellos que varían con el caudal reciben el nombre de carga variable.

De acuerdo con Mataix (1975), la construcción de la curva del sistema se realiza como sigue:

1. Definir el sistema de bombeo y su longitud
2. Calcular la carga fija, correspondiente al cambio de energía entre el inicio y el final debido a diferencias de elevación y presión.
3. Calcular la carga variable para distintos caudales, considerando las pérdidas por fricción en la tubería y las pérdidas localizadas en válvulas y accesorios.

El resultado es una curva creciente, cuya pendiente está asociada al aumento de las pérdidas de carga con el caudal. A modo de ejemplo, en la Figura 3-3, obtenida de (Karassik, 2000), se muestra una curva típica del sistema, donde en el eje de ordenadas se representa la altura manométrica, mientras que en el eje de abscisas se indica el caudal.

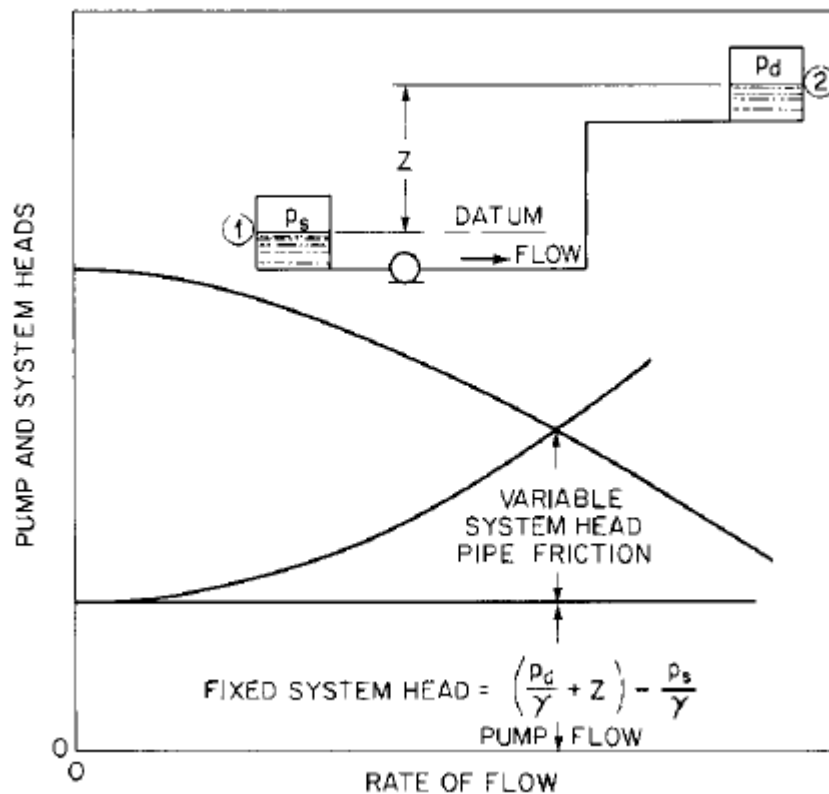


Figura 3-3. Construcción de curva del sistema (Karassik, 2000)

3.4 Curvas de la bomba

Las bombas centrífugas se caracterizan por un conjunto de curvas que describen su comportamiento hidráulico para diferentes condiciones de operación. Estas curvas son proporcionadas por el fabricante y permiten analizar la relación entre el caudal entregado, la altura generada, la potencia requerida y el rendimiento. Su utilización es fundamental tanto para la correcta selección de una bomba como para verificar que un equipo instalado opere dentro de su rango óptimo, y para evaluar la interacción con la curva del sistema.

La altura de una bomba centrífuga depende fundamentalmente del caudal que circula por ella, lo que quiere decir que va a estar definida por su acoplamiento con el sistema (Marigorta, 1994).

El fabricante de las bombas proporciona la curva de funcionamiento real en base a ensayos experimentales. En el ensayo elemental de una bomba, la velocidad de giro n permanece constante, para un tipo y tamaño determinado. Esto permite tratar las magnitudes dependientes (H, P_a, η), correspondientes a la altura manométrica, la potencia absorbida y el rendimiento de la bomba, respectivamente, como función del caudal (Mataix, 1975). En la Figura 3-4, obtenida de (Paz Penín et al., 2019), se ilustran las curvas obtenidas de un ensayo elemental para una bomba tipo.

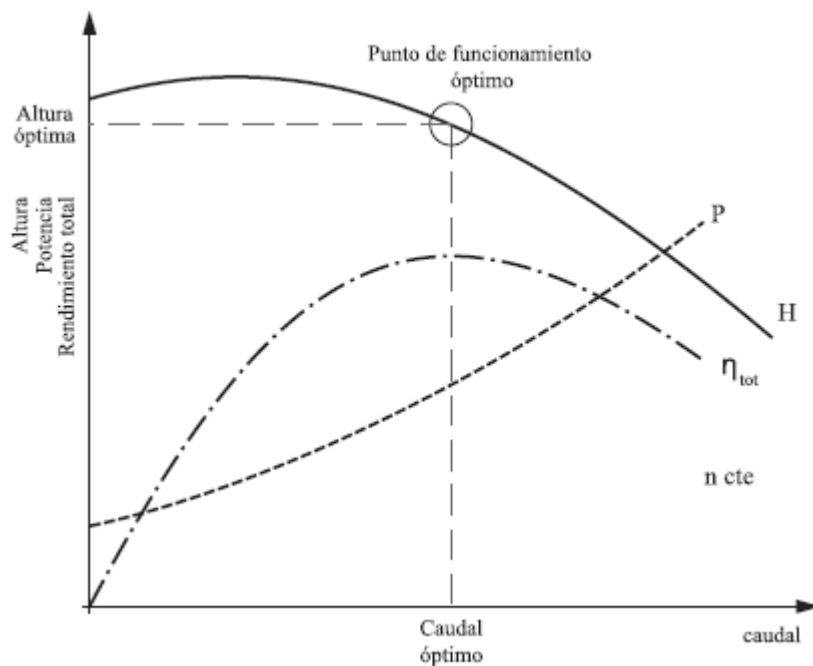


Figura 3-4. Ensayo elemental de una bomba centrífuga a n constante (Paz Penín et al., 2019).

La curva de potencia ($P_a - Q$) muestra la variación de la potencia absorbida por la bomba en función del caudal. En bombas centrífugas, la potencia suele aumentar con el caudal. Conocer esta relación es esencial para verificar que el motor instalado es capaz de suministrar la potencia necesaria en el rango de operación previsto.

La curva de rendimiento ($\eta - Q$) indica la eficiencia hidráulica de la bomba en función del caudal y presenta un valor máximo conocido como rendimiento óptimo. La posición del punto de funcionamiento con respecto al punto óptimo representa un criterio clave para evaluar si la bomba instalada opera dentro de su rango óptimo o si se encuentra en condiciones que podrían comprometer su funcionamiento y su vida útil.

El punto de funcionamiento de una bomba se define como la intersección entre su curva característica y la curva del sistema. En dicho punto, la altura que la bomba es capaz de generar coincide con la altura requerida por la instalación para transportar el caudal correspondiente. Dentro de esta relación, se denomina punto de funcionamiento óptimo o punto de diseño aquel en el cual la bomba alcanza su máxima eficiencia, η_{max} , asociado a los valores nominales de caudal y altura Q_N y H_N , respectivamente (Paz Penín et al., 2019).

En la práctica, los requerimientos de presión y caudal de un sistema pueden variar durante la operación, lo que hace necesario modificar el punto de funcionamiento. Dado que dicho punto depende exclusivamente de la intersección entre la curva de la bomba y la curva de la instalación, cualquier cambio en estas curvas provoca un cambio en el punto de operación.

Una de las formas de actuar sobre la curva característica de la bomba es variar la velocidad de giro del rodete. Este método permite desplazar el punto de funcionamiento a lo largo de la curva de la instalación, sin modificar dicha curva. La regulación mediante la velocidad variable presenta la ventaja de reducir significativamente los costos de operación, ya que la potencia consumida se ajusta a la mínima requerida. Sin embargo, la implementación inicial suele requerir una mayor inversión debido al uso de variador de frecuencia u otros dispositivos de control (Paz Penín et al., 2019).

Otra alternativa consiste en modificar la curva de la instalación mediante el estrangulamiento de una válvula ubicada en la impulsión, manteniendo constante la velocidad de rotación. Este procedimiento es sencillo, de bajo costo y fácil implementación, aunque presenta como desventaja una reducción en el rendimiento global, dado que introduce pérdidas adicionales en la instalación (Paz Penín et al., 2019).

En la Figura 3-5, obtenida de (Paz Penín et al., 2019), se muestran las curvas de la instalación correspondientes a diferentes aperturas de la válvula de impulsión, mostrando como varía el punto de funcionamiento de la bomba en función del grado de estrangulamiento.

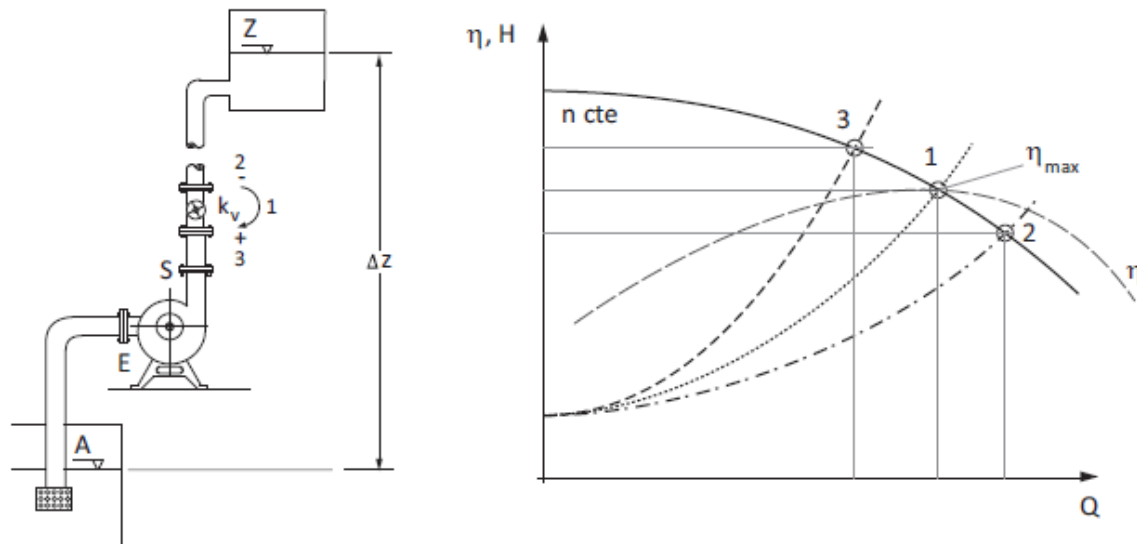


Figura 3-5. Curvas de una instalación al variar la apertura de la válvula de impulsión (Paz Penín et al., 2019).

Para determinadas operaciones es inviable el uso de una única bomba, ya que el rango de caudales y/o energía necesaria puede variar mucho. Con lo que, si se dimensiona la instalación para una única bomba, ésta debería poder alcanzar tanto los máximos como los mínimos fijados, con lo que la regulación se haría con rendimientos muy bajos, además de que, si algo fallase, no se podría restituir el caudal hasta reparar o cambiar la bomba.

Para resolver estos inconvenientes, es común recurrir al acoplamiento de varias bombas, lo que permite ampliar el rango operativo del sistema y asegurar la continuidad del servicio. Las bombas pueden conectarse en paralelo, cuando se desea aumentar el caudal total entregado, o en serie, cuando es necesario incrementar la altura manométrica disponible (Paz Penín et al., 2019).

3.4.1 Acoplamiento en paralelo

Cuando dos o más bombas se conectan en paralelo, todas ellas trabajan a la misma altura de bombeo, mientras que el caudal total del sistema es la suma de los caudales aportados por cada bomba.

Si las bombas que operan en paralelo son idénticas, sus curvas características coinciden y, por lo tanto, el caudal aportado por cada una es el mismo en el punto de funcionamiento. Para obtener la curva característica del conjunto, basta con duplicar (o multiplicar por el número de bombas) el caudal en la abscisa para cada valor de altura constante. De este modo se construye la curva equivalente del grupo de bombeo.

En cambio, cuando las bombas que se acoplan en paralelo son diferentes, cada una posee su propia curva característica. En ese caso, la curva resultante del conjunto se obtiene sumando los caudales individuales correspondientes a una misma altura. Esto permite determinar el comportamiento combinado del sistema para cualquier condición operativa.

En la Figura 3-6, obtenida de (Paz Penín et al., 2019), se presentan ejemplos de curvas características correspondientes a acoplamientos en paralelo, tanto para bombas idénticas como para bombas con curvas distintas.

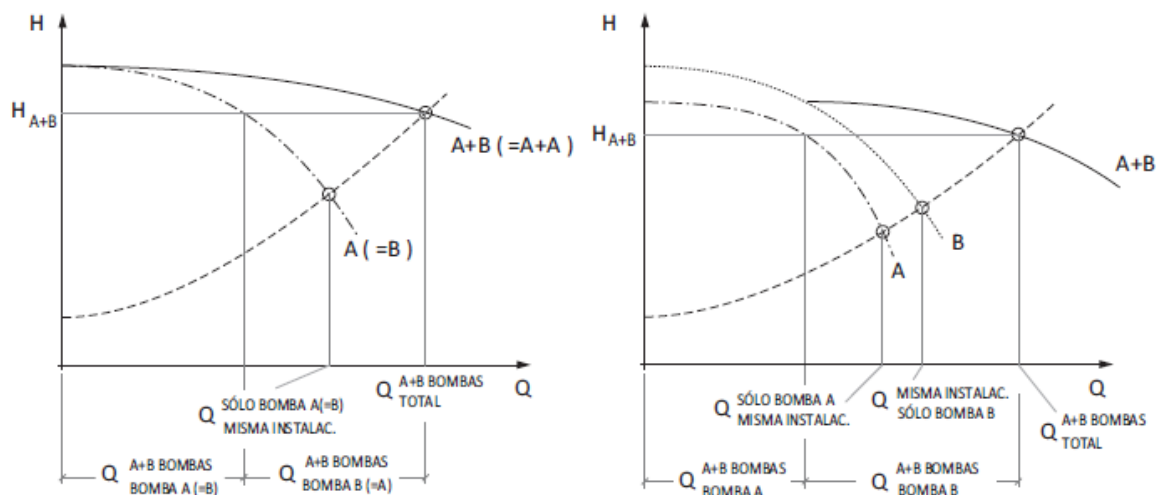


Figura 3-6. Acoplamiento en paralelo. Izq.: dos bombas iguales. Der: diferentes bombas (Paz Penín et al., 2019).

3.4.2 Acoplamiento en serie

En un acoplamiento de bombas en serie, el caudal que circula a través de cada bomba es el mismo, ya que el fluido atraviesa una bomba tras otra. En este tipo de configuración, la altura total generada por el conjunto es la suma de las alturas que aporta cada bomba para ese mismo caudal.

Cuando las bombas conectadas en serie son idénticas, la curva característica equivalente se obtiene sumando verticalmente las alturas correspondientes a la misma abscisa de caudal. Si las bombas son distintas, la curva resultante también se determina sumando las alturas individuales que cada bomba es capaz de entregar para cada valor de caudal, obteniendo así el comportamiento combinado del conjunto.

En la Figura 3-7 se presenta un ejemplo de acoplamiento de dos bombas diferentes en serie, mostrando como se construye la curva característica total a partir de las curvas individuales.

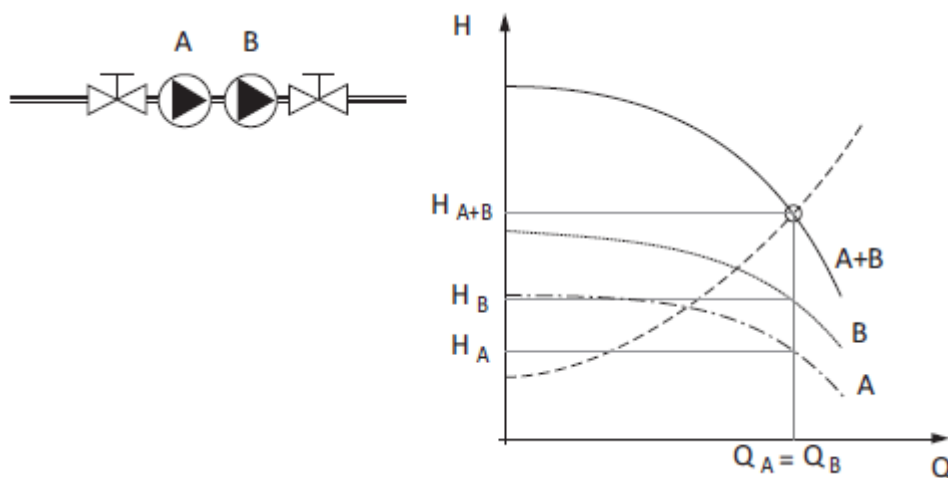


Figura 3-7. Acoplamiento de bombas en serie (Paz Penín et al., 2019).

3.5 Cavitación

La cavitación es un fenómeno de gran relevancia en el funcionamiento de las máquinas hidráulicas, ya que puede afectar seriamente su desempeño y vida útil. Consiste en la formación de pequeñas cavidades o burbujas de vapor en el interior del líquido, generalmente en las proximidades de las superficies sólidas que lo limitan. Estas burbujas se originan cuando, en algún punto del flujo, la presión local desciende hasta igualar la presión de vapor del líquido, momento en el cual éste se vaporiza. La presión de saturación del vapor depende de la temperatura y aumenta a medida que ésta se incrementa.

Si se analiza este proceso en un diagrama termodinámico Presión – Temperatura, véase Figura 3-8 extraída de (Paz Penín et al., 2019), se pueden identificar los tres estados de la materia, sólido, líquido y gas. Respecto al cambio de fase de líquido a gas, puede realizarse por dos vías diferentes:

- Aumentando la temperatura del fluido a presión constante (ebullición), desplazándose hacia la derecha en el diagrama.
- Disminuyendo la presión a temperatura constante (cavitación), desplazándose hacia abajo en el diagrama.

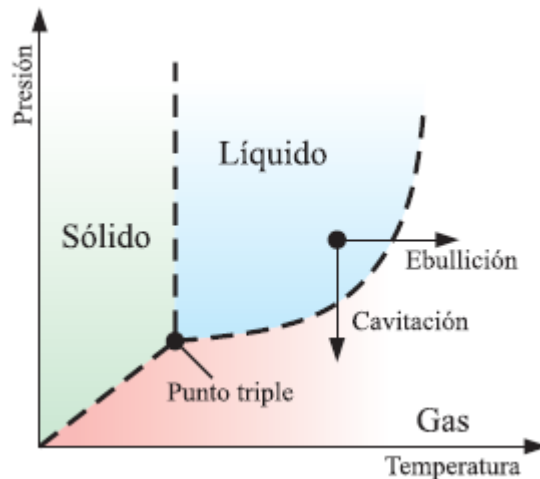


Figura 3-8. Diagrama termodinámico de fases (Paz Penín et al., 2019).

Una vez formadas, las cavidades de vapor son arrastradas hacia zonas de mayor presión, donde se condensan rápidamente. Este colapso provoca microimplosiones que generan sobrepresiones locales muy elevadas. Como consecuencia, pueden aparecer vibraciones, ruidos característicos, daños erosivos en las superficies (pitting) y deterioro progresivo de los componentes internos de la máquina. Por estas razones, la cavitación debe evitarse o mantenerse bajo control.

En general, la cavitación afecta de manera adversa a cualquier turbomáquina: disminuye la potencia útil en turbinas, incrementa la potencia requerida en bombas, genera vibraciones, puede causar desalineación de ejes y reduce tanto el rendimiento como la vida útil del equipo. En las bombas centrífugas, la presión mínima suele presentarse en la zona de entrada del rodete, particularmente cerca de la proa de los álabes, donde el fluido aún no ha recibido energía del impulsor y es más susceptible a vaporizarse.

Para prevenir la cavitación es necesario garantizar que la presión a la entrada de la bomba se mantenga por encima de la presión de vapor. Este criterio se expresa mediante el NPSH (Net Positive Suction Head). El fabricante proporciona la curva de NPSH requerido ($NPSH_r$), que indica el valor mínimo necesario para evitar la cavitación a diferentes caudales. Por su parte, el NPSH disponible ($NPSH_d$) es una característica propia de la instalación.

La condición para operar sin cavitación se expresa como

$$NPSH_d > NPSH_r \quad (3-9)$$

Tomando como referencia la Figura 3-9 (Paz Penín et al., 2019), el $NPSH_d$ se calcula mediante

$$NPSH_d = \frac{p_A}{\gamma} - \frac{p_s}{\gamma} - H_S - h_{fA-E} \quad (3-10)$$

donde,

- p_s es la presión de saturación del vapor,
- H_S es la altura geométrica de aspiración,
- h_{fA-E} representa las pérdidas de carga en la línea de aspiración.

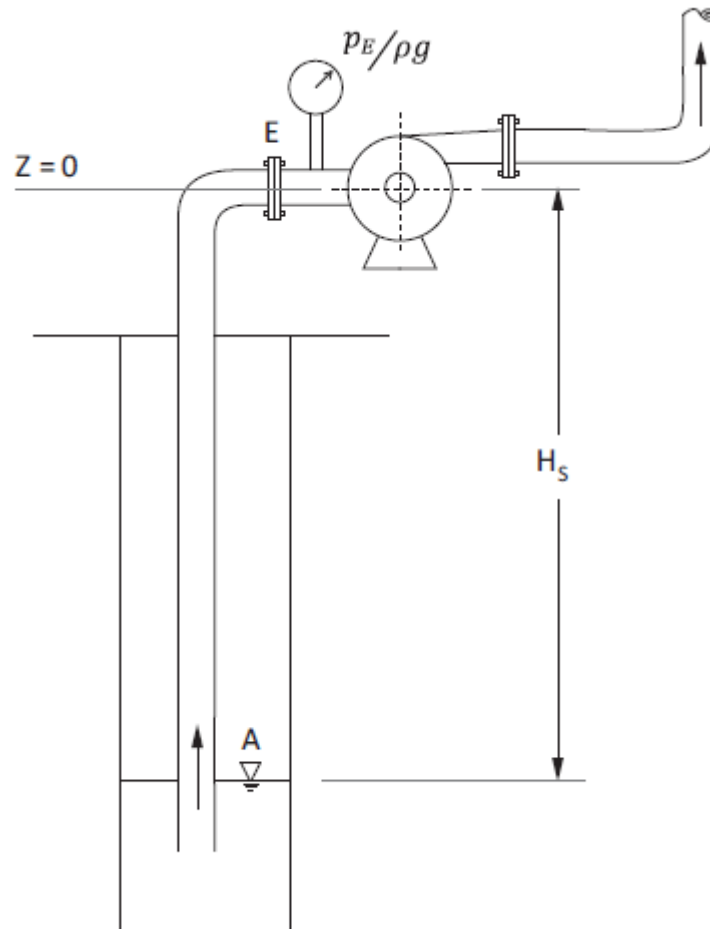


Figura 3-9. Altura de aspiración de una bomba (Paz Penín et al., 2019).

En resumen, el valor de $NPSH_d$ depende de la altura geométrica de aspiración, de la pérdida de carga en la aspiración y de la presión en el depósito de aspiración. Su verificación es esencial para asegurar el funcionamiento confiable de la bomba y evitar efectos perjudiciales de la cavitación.

3.6 Transitorios hidráulicos

El golpe de ariete es un fenómeno transitorio que se produce en los sistemas de conducción de fluidos cuando se generan variaciones bruscas de la velocidad del flujo, como consecuencia de maniobras rápidas de válvulas, arranques o paradas de bombas, o fallas imprevistas en la operación del sistema. Estas variaciones provocan cambios repentinos de presión que se propagan a lo largo de la tubería en forma de ondas, pudiendo alcanzar valores significativamente superiores o inferiores a los correspondientes al régimen permanente (Conagua, 2007).

Las sobrepresiones y depresiones asociadas al golpe de ariete pueden generar consecuencias graves en las instalaciones hidráulicas, tales como roturas de tuberías, fallas en accesorios, desprendimiento de revestimientos, daños en bombas y válvulas, así como vibraciones y ruidos que afectan la integridad estructural del sistema. Las depresiones pueden incluso generar cavitación, agravando aún más el problema (Sanks, 1998).

La identificación y el cálculo de presiones y velocidades resultantes de los transitorios hidráulicos permiten aplicar de manera eficaz distintas estrategias de control. Entre ellas se encuentran la selección adecuada de tuberías y accesorios capaces de soportar las presiones máximas y mínimas previstas, la correcta selección y ubicación de dispositivos de protección y control destinados a mitigar los efectos adversos de los transitorios, y la definición de procedimientos apropiados de arranque, operación y parada del sistema, que reduzcan la severidad de las variaciones hidráulicas.

Cualquier cambio repentino en las condiciones del flujo que se origina en un punto de una tubería a presión se propaga por la tubería con una velocidad que depende de la elasticidad del fluido y de la pared de la tubería. Esta velocidad se la denomina como celeridad o velocidad de propagación de la onda, y se calcula,

$$a = \sqrt{\frac{\frac{g}{\gamma}}{\frac{1}{K_{liq}} + \frac{D c_1}{E_{mat} e}}} \quad (3-11)$$

donde,

- a , velocidad de propagación de la onda,
- γ , peso específico del agua,
- g , aceleración de la gravedad,
- K_{liq} , módulo volumétrico del líquido,
- E_{mat} , módulo de elasticidad del material de la tubería,
- D , diámetro interno de la tubería,
- e , espesor de la tubería.
- c_1 , coeficiente de empotramiento de la tubería.

3.6.1 Descripción del fenómeno

Cuando una conducción opera en régimen permanente y se produce el cierre instantáneo de una válvula ubicada en uno de sus extremos, se genera el golpe de ariete, que está asociado a la propagación de ondas de presión a lo largo de la tubería.

En el instante de cierre, la velocidad del fluido en la sección de la válvula se reduce prácticamente a cero. Como el fluido es compresible y la tubería deformable, esta detención súbita del movimiento no ocurre de forma simultánea en toda la conducción, sino que da origen a una onda de presión que se propaga aguas arriba con una velocidad aproximadamente igual a la celeridad de la onda, a (Parmakian, 1963).

El fenómeno de golpe de ariete asociado al cierre rápido de una válvula puede describirse según lo expuesto por R. Sanks (1998).

Cuando una válvula en una tubería se cierra rápidamente, la presión aguas arriba de la válvula aumenta, y la onda de presión incrementada se propaga aguas arriba con la velocidad de onda, a . Esta onda (denominada sobrepresión o upsurge) reduce la velocidad de flujo. Aguas debajo de la válvula, la presión se reduce y la onda de presión disminuida se propaga aguas abajo, también con la velocidad de onda a . Este pulso (denominado depresión o downsurge) reduce la velocidad de flujo

Los eventos que siguen a un cierre instantáneo de una válvula ubicada a una distancia L aguas abajo de una bomba se describen en la Figura 3-10 (Sanks, 1998). Se desprecia la fricción y la altura piezométrica se denomina como H mientras que la altura generada por la onda de presión se denomina h . La velocidad del fluido en condiciones de régimen permanente es V_0 .

La secuencia de eventos entre la válvula y el reservorio ocurre en un ciclo de cuatro fases. La duración de cada fase es el tiempo que tarda la onda en viajar entre la válvula y el reservorio, es decir L/a .

- **$0 < t < L/a$:** en $t = 0$, el fluido inmediatamente aguas arriba de la válvula se comprime y se detiene. Una parte de la tubería (BC) se expande y se estira, como se muestra en la Figura 3-10 a. Este proceso se repite cada incremento sucesivo de fluido a medida que la onda de presión se propaga aguas arriba. El fluido aguas arriba del frente de onda continúa fluyendo hacia la válvula hasta que es detenido por el frente de la onda en avance. Cuando la onda de presión alcanza el reservorio en $t = L/a$, el fluido (ahora en reposo dentro de la tubería) se encuentra bajo una carga total $H + h$, es decir, una carga h mayor que la carga estática del reservorio.
- **$L/a < t < 2L/a$:** La diferencia de presión entre el reservorio y la tubería, en $t = L/a$, provoca que el fluido fluya desde la tubería al reservorio para compensar esta diferencia, a con una velocidad $-V_0$. La presión a lo largo del tramo AB se reduce al nivel original del régimen permanente, H , y una onda negativa que restablece la presión normal se propaga de regreso hacia la válvula, como se muestra en la Figura 3-10 b. En $t = 2L/a$, la presión es normal (H) a lo largo de toda la tubería, pero la velocidad es negativa en todo el sistema, es decir, el agua fluye alejándose de la válvula.
- **$2L/a < t < 3L/a$:** en $t = 2L/a$, no hay fluido disponible para mantener el flujo aguas arriba en la válvula, y la altura de presión normal H se reduce en una cantidad h para detener el fluido en la sección BC, Figura 3-10 c. Esta onda de presión reducida se propaga hacia el reservorio, todo el fluido se detiene, y la presión reducida permite que el fluido se expanda y que las paredes de la tubería se contraigan. En $t = 3L/a$, la presión reducida $H - h$ existe a lo largo de toda la tubería, la velocidad es cero en todo el sistema, y la carga de presión estática en la tubería es menor que la del reservorio.
- **$3L/a < t < 4L/a$:** en $t = 3L/a$, la diferencia de carga de presión existente entre el reservorio y la tubería, provoca que el agua fluya desde el reservorio hacia la tubería, aguas abajo, con una velocidad $+V_0$. Una onda de presión de al nivel de la carga estática original se propaga aguas abajo hacia la válvula, pero en la sección BC la presión continúa reducida en $H - h$, Figura 3-10 d. En $t = 4L/a$, la presión en toda la tubería es normal, igual a H , y la velocidad es la misma que la original, $+V_0$, existente antes del cierre de la válvula. Sin embargo, cuando la velocidad V_0 alcanza la válvula, el ciclo de cuatro fases se repite y continúa repitiéndose periódicamente cada intervalo de tiempo $4L/a$.

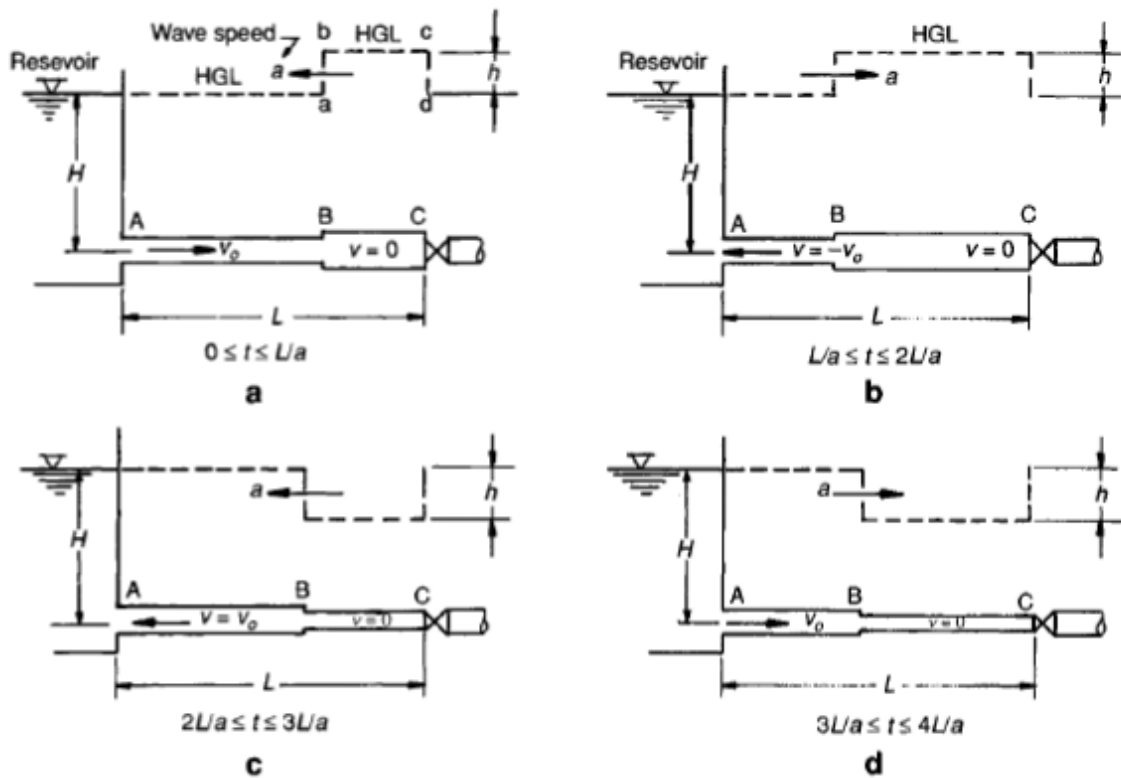


Figura 3-10. Secuencia de eventos en un ciclo después del cierre instantáneo de válvula (Sanks, 1998)

Los conceptos principales derivados de los eventos que siguen a un cierre instantáneo de una válvula indican que el tiempo L/a constituye un parámetro fundamental en el estudio del golpe de ariete, ya que representa el intervalo necesario para que la onda de presión se propague entre la válvula y el reservorio. Asimismo, el tiempo $2L/a$ resulta crítico y es el tiempo que tarda una onda en ir y volver.

Cuando una válvula se cierra en un tiempo menor que $2L/a$, es decir $t_{CV} \leq 2L/a$, el cierre se considera rápido y la sobrepresión máxima generada es independiente del tiempo de cierre y coincide con la correspondiente a un cierre instantáneo; en cambio, si el cierre se realiza en un tiempo mayor, $t_{CV} > 2L/a$, se considera cierre lento y la magnitud de la sobrepresión máxima disminuye progresivamente con, evidenciando la importancia de los tiempos de maniobra en el control de los transitorios hidráulicos.

Para cierres lentos, la sobrepresión puede estimarse mediante la fórmula de Michaud, que considera el tiempo de cierre de la válvula, t_{CV} (Sanks, 1998):

$$\Delta H = \frac{2L}{g t_{CV}} \Delta v \quad (3-12)$$

Para cierres rápidos (o brusco), la sobrepresión puede estimarse mediante la fórmula de Allievi (Sanks, 1998),

$$\Delta H = \frac{a}{g} \Delta v \quad (3-13)$$

3.6.2 Software Allievi

El desarrollo de la presente sección se basa en el manual del software Allievi (Manual Allievi, 2015), del cual se ha tomado y adaptado la información aquí presentada.

El programa Allievi es un paquete informático cuyo objetivo principal es simular y analizar los efectos de los transitorios hidráulicos en sistemas de conducción de fluidos a presión. Dada la magnitud de los efectos perjudiciales que pueden generarse durante el desarrollo de un transitorio hidráulico, resulta indispensable evaluar el comportamiento dinámico del sistema frente a distintas maniobras operativas.

Ante estos fenómenos, las soluciones posibles consisten, por un lado, en dotar a la instalación de una resistencia mecánica suficiente para soportar las oscilaciones de presión, y por otro, en incorporar dispositivos de protección que permitan disminuir la amplitud de dichas oscilaciones y mantenerlas dentro de límites admisibles. Para adoptar cualquiera de estas estrategias es necesario contar con una herramienta de cálculo que permita simular el transitorio hidráulico y proporcionar, entre otros resultados, la evolución temporal de las presiones generadas como consecuencia de una maniobra determinada. Este constituye, precisamente, el objetivo fundamental del programa Allievi.

En virtud de lo expuesto, Allievi es una herramienta que puede emplearse tanto en la fase de diseño como en la fase de verificación del funcionamiento de un sistema hidráulico. Durante la etapa de diseño, el programa permite incorporar y evaluar distintos dispositivos de protección, tales como calderines, chimeneas de equilibrio y válvulas de alivio, con el fin de asegurar que las oscilaciones de presión producidas por diferentes maniobras se mantengan dentro de los límites previamente establecidos. Por otra parte, en la fase de verificación, Allievi posibilita analizar y visualizar los efectos transitorios asociados a maniobras realizadas en una instalación ya diseñada o existente, permitiendo comprobar su comportamiento frente a condiciones operativas reales (Manual Allievi, 2015).

En la Figura 3-11 se observa el diagrama de flujo general de cálculo empleado por el software Allievi. En él se esquematiza la secuencia lógica de definición de parámetros físicos y geométricos del sistema, la configuración de elementos hidráulicos y las condiciones de operación.

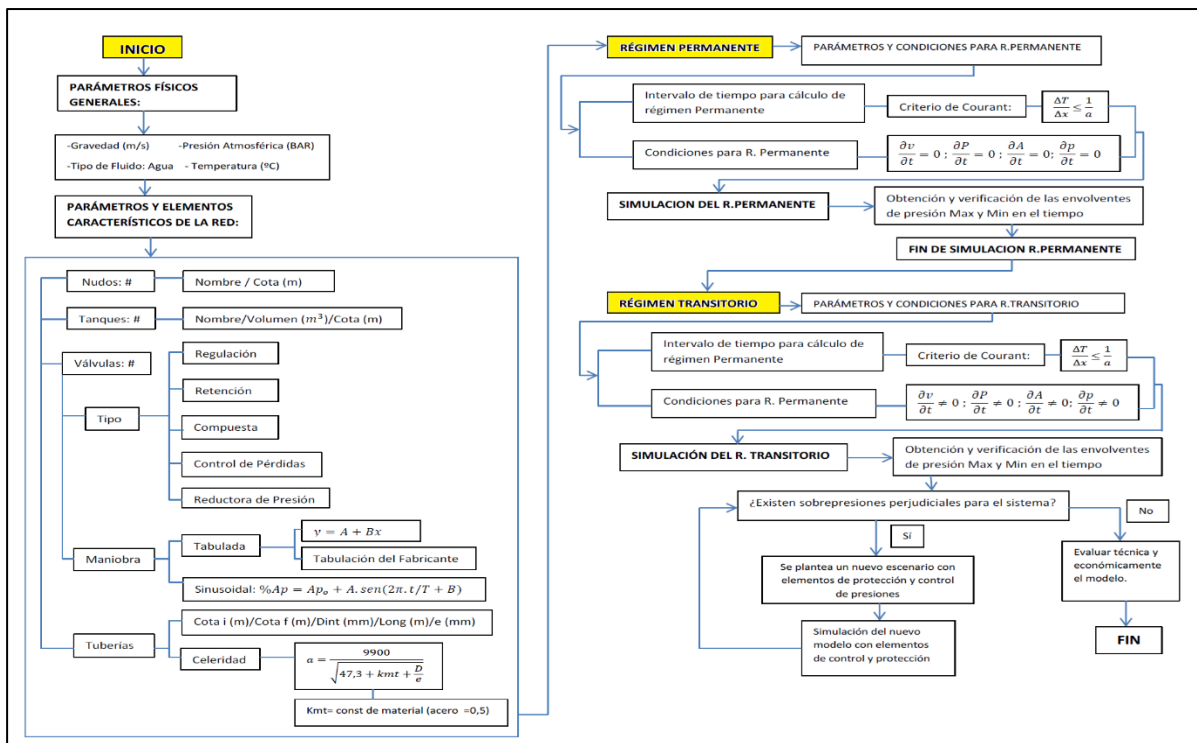


Figura 3-11. Flujo de cálculo para el software Allievi.

A continuación, se presentan los fundamentos de cálculo empleados por el software Allievi para el análisis de transitorios hidráulicos en conductos a presión. En este tipo de conducciones, el fenómeno transitorio se modela a partir de la aplicación de las ecuaciones de conservación de la masa y de la cantidad de movimiento a un volumen de control que incluye la onda de presión que se propaga a lo largo de la tubería.

De este planteo se obtiene un sistema de dos ecuaciones diferenciales no lineales con dos incógnitas, correspondientes a la altura piezométrica $H = H(x, t)$ y a la velocidad del fluido $V = V(x, t)$, ambas funciones del espacio y del tiempo. La forma general de este sistema de ecuaciones es la siguiente (Manual Allievi, 2015):

$$\frac{\partial H}{\partial t} + V \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{a^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \tag{3-14}$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + g \frac{\partial H}{\partial x} + f \frac{V|V|}{2D} = 0 \tag{3-15}$$

Dado que este sistema de ecuaciones no admite una solución analítica, su integración se realiza mediante un procedimiento numérico. Habitualmente se asume que la solución se obtiene en instantes

discretos de tiempo, separados entre sí un intervalo Δt , y en puntos discretos a lo largo de la conducción, separados una distancia Δx .

En el marco del método de las características, la discretización espacial y temporal se elige de manera que los incrementos Δx y Δt satisfagan la relación:

$$\frac{\Delta x}{\Delta t} = a \quad (3-16)$$

siendo “ a ” la celeridad de la onda de presión en la tubería. Esta condición asegura que la discretización siga las líneas características del problema, a los largos de las cuales se propagan las perturbaciones en el sistema, permitiendo transformar las ecuaciones diferenciales parciales en ecuaciones diferenciales ordinarias resolubles numéricamente.

Esta celeridad, para el caso del agua, se calcula por medio de la expresión:

$$a = \frac{9900}{\sqrt{47,6 + C \frac{D}{e}}} \quad (3-17)$$

donde C es un coeficiente que depende del material de la tubería.

Bajo esta hipótesis de discretización espacial y temporal, las ecuaciones diferenciales planteadas anteriormente se transforman en un sistema de dos ecuaciones algebraicas lineales con dos incógnitas, cuya forma general se presenta a continuación (Manual Allievi, 2015):

$$H_i^{n+1} - H_{i-1}^n + \frac{a}{g} (V_i^{n+1} - V_{i-1}^n) + \frac{f_{i-1}^n \Delta x}{D} V_{i-1}^n |V_{i-1}^n| = 0 \quad (3-18)$$

$$H_i^{n+1} - H_{i+1}^n - \frac{a}{g} (V_i^{n+1} - V_{i+1}^n) - \frac{f_{i+1}^n \Delta x}{D} V_{i+1}^n |V_{i+1}^n| = 0 \quad (3-19)$$

Con estas expresiones es posible calcular la altura piezométrica H y la velocidad V en el punto i de la tubería y en el instante de cálculo $n + 1$, a partir de los valores conocidos de H y V en los puntos $i - 1$ e $i + 1$ correspondientes al instante n . La aplicación de este conjunto de ecuaciones constituye el denominado método de las características, el cual es el fundamento del procedimiento de cálculo empleado por el programa Allievi para la simulación de transitorios hidráulicos en conductos a presión.

El sistema de ecuaciones (3-18) y (3-4) puede resolverse para todos los puntos de cálculo de un conducto, excepto en sus extremos, donde no se dispone de una de las dos ecuaciones necesarias. En dichos extremos se supone que la tubería se conecta con algún elemento del sistema hidráulico, por lo que la ecuación faltante se reemplaza por la ecuación, o conjunto de ecuaciones, que describen el comportamiento de dicho elemento. Estas relaciones se denominan condiciones de contorno.

De este modo, el programa Allievi permite simular el funcionamiento en régimen transitorio de un sistema hidráulico a presión, incorporando distintos tipos de elementos conectados entre sí a través del correspondiente sistema de tuberías, entre los cuales se incluyen:

- Depósitos, con o sin vertederos o aliviaderos.
- Estaciones de bombeo.
- Estructuras de control de caudal, constituidas por válvulas o pérdidas de carga localizadas.
- Estructuras de protección, tales como chimeneas de equilibrio, tanques unidireccionales o calderines.
- Ventosas, que pueden distribuirse a lo largo de las conducciones.
- Imposición de leyes de caudal o de altura piezométrica en los puntos extremos de las tuberías.
- Turbinas Francis.

3.6.3 Métodos de atenuación

Esta sección se basa en el desarrollo expuesto por R. Sanks (1998) , en el cual se describen de manera general los principales métodos de atenuación de los transitorios hidráulicos, que pueden ser dispositivos de protección (calderines, ventosas, entre otros) como también estrategias operativas, entre las que se destacan la regulación de los tiempos de maniobra de las válvulas. El objetivo de estos métodos es limitar las sobrepresiones y depresiones generadas durante los transitorios, reduciendo los riesgos para la integridad y funcionamiento del sistema.

En términos generales, el enfoque de diseño consiste en modelar el sistema hidráulico mediante herramientas de simulación para evaluar las presiones máximas y mínimas generadas bajo condiciones críticas de operación. Cuando los valores obtenidos resultan inaceptables, se seleccionan y analizan distintas alternativas de control, repitiendo el proceso de simulación hasta alcanzar un nivel adecuado de seguridad y confiabilidad con un costo mínimo. Este procedimiento requiere, en la mayoría de los casos, un análisis iterativo y un adecuado criterio ingenieril para la selección de la solución más conveniente.

Ante fallas de energía eléctrica, que pueden presentarse reiteradamente a lo largo de la vida útil de un sistema de bombeo, resulta fundamental una adecuada planificación de los dispositivos de protección. La pérdida de energía en una estación de bombeo genera inicialmente una rápida depresión (downsurge) en el colector de impulsión y en las tuberías próximas a la estación, lo que puede dar lugar a fenómenos severos como la separación de columna, que debe evitarse en todos los casos.

Existen diversos métodos para reducir la magnitud de estas depresiones. Uno de ellos consiste en incrementar la inercia del conjunto bomba–motor mediante la incorporación de volantes de inercia, los cuales permiten prolongar el tiempo de desaceleración del sistema tras una falla eléctrica. Este tipo de solución actúa principalmente sobre el downsurge, a diferencia de las válvulas de control, que resultan más efectivas frente a sobrepresiones (upsurge).

Otra alternativa ampliamente utilizada es la instalación de cámaras de aire próximas a la estación de bombeo y, eventualmente, en otros puntos del sistema. En conducciones de agua potable, también pueden emplearse tanques abiertos de sobrepresión, conocidos como chimeneas de equilibrio, especialmente en quiebres de pendiente o puntos altos, siempre que la altura requerida no resulte excesiva. El volumen de agua almacenado en estos dispositivos permite amortiguar tanto sobrepresiones como depresiones. Asimismo, la instalación de válvulas de aire o ventosas contribuye a evitar la formación de vacío mediante la admisión controlada de aire; durante el upsurge posterior, este aire debe evacuarse de manera gradual para evitar sobrepresiones asociadas al reencuentro de columnas líquidas. En sistemas extensos puede ser necesario combinar varios de estos dispositivos para lograr un control adecuado de los transitorios.

El arranque y la parada de bombas también constituyen situaciones críticas desde el punto de vista de los transitorios hidráulicos. Durante el arranque, el rápido incremento de la velocidad del fluido puede generar sobrepresiones indeseables, las cuales pueden mitigarse mediante el arranque secuencial de bombas, la apertura lenta de válvulas de impulsión, el uso de variadores de velocidad o, en casos más exigentes, la incorporación de cámaras de aire. De manera análoga, durante la parada normal de las bombas, los transitorios pueden mantenerse dentro de límites aceptables mediante la detención secuencial de los equipos, el cierre controlado de válvulas, la desaceleración progresiva del motor o el aumento de la inercia del conjunto bomba–motor.

Tanques de control

Los tanques de control constituyen uno de los métodos más eficaces y confiables para la atenuación de transitorios hidráulicos, abarcando desde soluciones simples, como los tanques abiertos verticales

(standpipes), hasta dispositivos más complejos como los tanques hidroneumáticos o calderines. Estos sistemas resultan especialmente adecuados cuando otras alternativas de control no logran limitar adecuadamente las variaciones de presión.

Los standpipes o tanques de oscilación abiertos, Figura 3-12 (Sanks, 1998), actúan como pequeños reservorios con superficie libre a presión atmosférica, permitiendo almacenar o suministrar temporalmente agua para amortiguar variaciones de presión. Son particularmente útiles en puntos altos del sistema donde la línea de altura manométrica se encuentra próxima al terreno. Presentan una construcción sencilla, funcionamiento automático y bajo requerimiento de mantenimiento, aunque su aplicación puede verse limitada por la altura necesaria y la disposición del agua de rebalse.

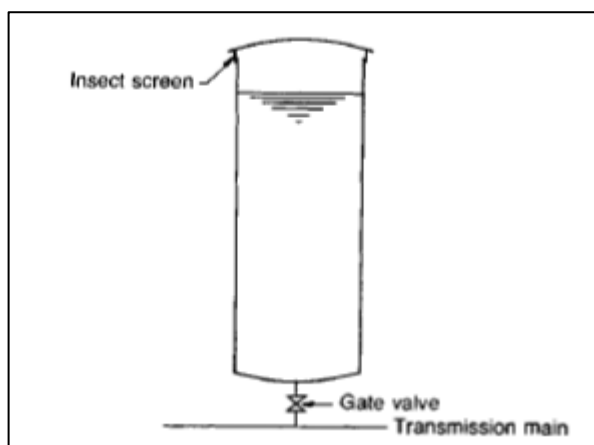


Figura 3-12. Standpipe o tanque de oscilación abierto (Sanks, 1998).

Los tanques de oscilación unidireccionales, Figura 3-13 (Sanks, 1998), constituyen una variante de los standpipes, permitiendo el flujo únicamente desde el tanque hacia la tubería. Esta característica los hace adecuados cuando la altura piezométrica del sistema impide el uso de tanques abiertos convencionales. Su diseño es más simple que el de los tanques hidroneumáticos, aunque algo más complejo que el de los standpipes.

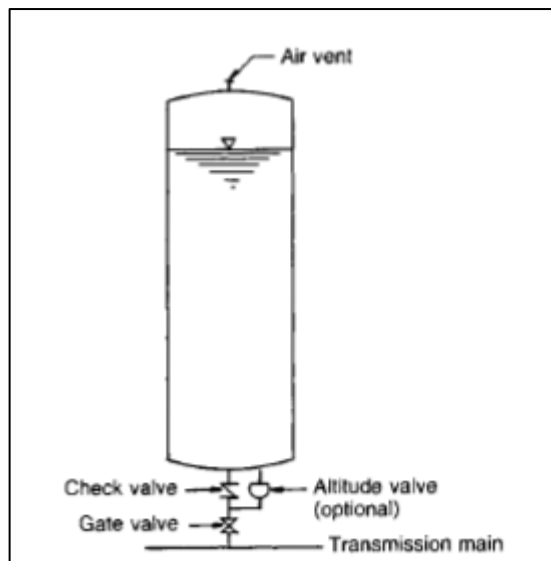


Figura 3-13. Tanque unidireccional (Sanks, 1998).

Por su parte, los calderines o tanques hidroneumáticos, Figura 3-14 (CSA srl, 2026), son recipientes presurizados parcialmente llenos de agua y aire, conectados generalmente al colector de descarga de las bombas. El aire contenido en el tanque se comprime, almacenando energía que queda disponible para sostener el caudal luego de una falla de energía. Las conexiones de entrada de las tuberías a estos tanques suelen estar equipadas con orificios diferenciales, que permiten la salida del agua del tanque con bajas pérdidas de carga, pero provocan una elevada disipación de energía cuando el flujo ingresa al tanque.

El funcionamiento durante una secuencia de depresión–sobrepresión (downsurge–upsurge) es el siguiente:

- Tras la detención de la bomba por una falla de energía, la presión del aire fuerza la salida de agua desde el tanque hacia la tubería. A medida que el agua abandona el tanque, el volumen de aire aumenta y su presión disminuye.
- La disminución de la presión provoca que el caudal hacia la tubería se reduzca gradualmente. Finalmente, el flujo en la tubería se detiene y luego se invierte, y la depresión da lugar a una sobrepresión.
- Cuando el agua comienza a ingresar nuevamente al tanque, el volumen de aire disminuye y la presión aumenta.
- El incremento de presión hace que el caudal disminuya progresivamente. Con el tiempo, el flujo en la tubería vuelve a detenerse y luego se invierte. El ciclo se repite hasta que la fricción del sistema lo amortigua gradualmente.

Las cámaras de aire resultan altamente eficaces y versátiles para el control tanto de sobrepresiones como de depresiones, por lo que se emplean con frecuencia en estaciones de bombeo y en puntos estratégicos de las conducciones, especialmente en sistemas de gran extensión.



Figura 3-14. Calderín vertical (CSA srl, 2026).

Válvulas para el control de transitorios

Las válvulas pueden emplearse eficazmente como elementos de control de los transitorios hidráulicos asociados al arranque y la detención de bombas, actuando principalmente sobre las sobrepresiones (upsurge) y, en menor medida, sobre las depresiones (downsurge). Sin embargo, por sí solas no resultan capaces de evitar la separación de columna aguas abajo ni de prevenir las depresiones severas originadas por una falla de energía eléctrica, por lo que suelen utilizarse como complemento de otros dispositivos de protección (Sanks, 1998).

Entre las más utilizadas se encuentran las válvulas de liberación de aire (**Air Release Valves**), las cuales permiten evacuar de manera continua pequeñas cantidades de aire acumulado en la tubería durante su funcionamiento normal. Estas válvulas cuentan con un orificio de pequeño diámetro, lo que limita su capacidad para admitir o expulsar grandes volúmenes de aire. Por esta razón, en la mayoría de las instalaciones se emplean en conjunto con válvulas de aire/vacío (**Air/Vacuum Valves**), que se instalan habitualmente aguas abajo de las estaciones de bombeo y en los puntos altos de la conducción. Estas últimas permiten la expulsión de grandes volúmenes de aire durante el llenado de la tubería y el arranque de las bombas, así como la admisión de aire ante la aparición de depresiones importantes, evitando la formación de vacío y facilitando el vaciado del sistema.

Una solución que combina ambas funciones es la válvula de aire combinada (**Combination Air Valves**), que integra en un mismo dispositivo un pequeño orificio para la liberación continua de aire y un puerto de gran sección para la admisión y expulsión rápida de volúmenes importantes. Debido a su versatilidad, este tipo de válvula constituye una alternativa adecuada para su instalación en los puntos altos de la conducción, e incluso puede utilizarse de manera exclusiva a lo largo de toda la tubería.

Las válvulas de retención (**Check Valves**), por su parte, no constituyen en sí mismas un medio específico de atenuación del golpe de ariete. No obstante, su análisis resulta fundamental, ya que su cierre puede generar sobrepresiones significativas durante los transitorios. En determinadas configuraciones topográficas, estas válvulas pueden ubicarse en puntos intermedios de la conducción para impedir el flujo inverso que se produce tras la detención de las bombas, contribuyendo así a limitar las sobrepresiones en el inicio del sistema.

Finalmente, las válvulas de anticipación de sobrepresión (**Surge Anticipation Valves**) permiten superar una de las principales limitaciones de las válvulas de alivio convencionales, ya que comienzan a abrirse antes de que la onda de sobrepresión alcance su valor máximo. Ante una falla de energía, la disminución inicial de presión es detectada y activa el mecanismo de apertura, permitiendo la descarga de agua antes de que se produzca el incremento de presión asociado al cierre de la válvula de retención. Posteriormente, la válvula cierra de manera controlada. Este tipo de dispositivos resulta eficaz para reducir sobrepresiones transitorias elevadas, aunque no permite controlar las presiones negativas iniciales que se generan en la tubería de impulsión tras la detención de la bomba o una interrupción del suministro eléctrico.

4 DESARROLLO

En esta sección se lleva a cabo el desarrollo del proyecto, abordando las etapas necesarias para alcanzar el objetivo principal, analizar y mitigar los efectos del golpe de ariete en el sistema de impulsión.

Para ello, se realiza inicialmente una descripción general del sistema, seguida de un análisis teórico y un análisis mediante uso del software Allievi y la evaluación de distintas alternativas de protección. Finalmente, se presentan los resultados obtenidos, junto con las consideraciones técnicas, constructivas y económicas asociadas a la solución elegida.

4.1 Descripción del sistema

El proyecto consiste en un sistema de bombeo de agua dulce desde el Río Neuquén hacia una zona núcleo de Vaca Muerta, en la cual se encuentran piletas de almacenamiento, para su posterior utilización en yacimientos no convencionales para la extracción de shale oil y shale gas.

El sistema bajo estudio está compuesto principalmente por la zona de captación de agua del río, cámara de bombeo y acueducto principal de impulsión hacia las piletas de almacenamiento. El sistema se inicia en una toma de agua del Río Neuquén, desde donde se transporta la misma hacia la cámara de bombeo por efecto de vasos comunicantes. Allí se encuentran las seis bombas centrífugas verticales sumergidas, de las cuales cinco operan mientras la otra se encuentra en condición de reserva.

En la Figura 4-1 se observa la vista en planta de la cámara de bombeo con la ubicación de las seis bombas y la disposición de las cañerías de descarga, y en la Figura 4-2 se puede ver el corte longitudinal A-A en la cual se identifican la profundidad de la cámara, los niveles mínimos y máximos de operación del agua, así como también el nivel medio de la cañería de impulsión a la salida de las bombas.

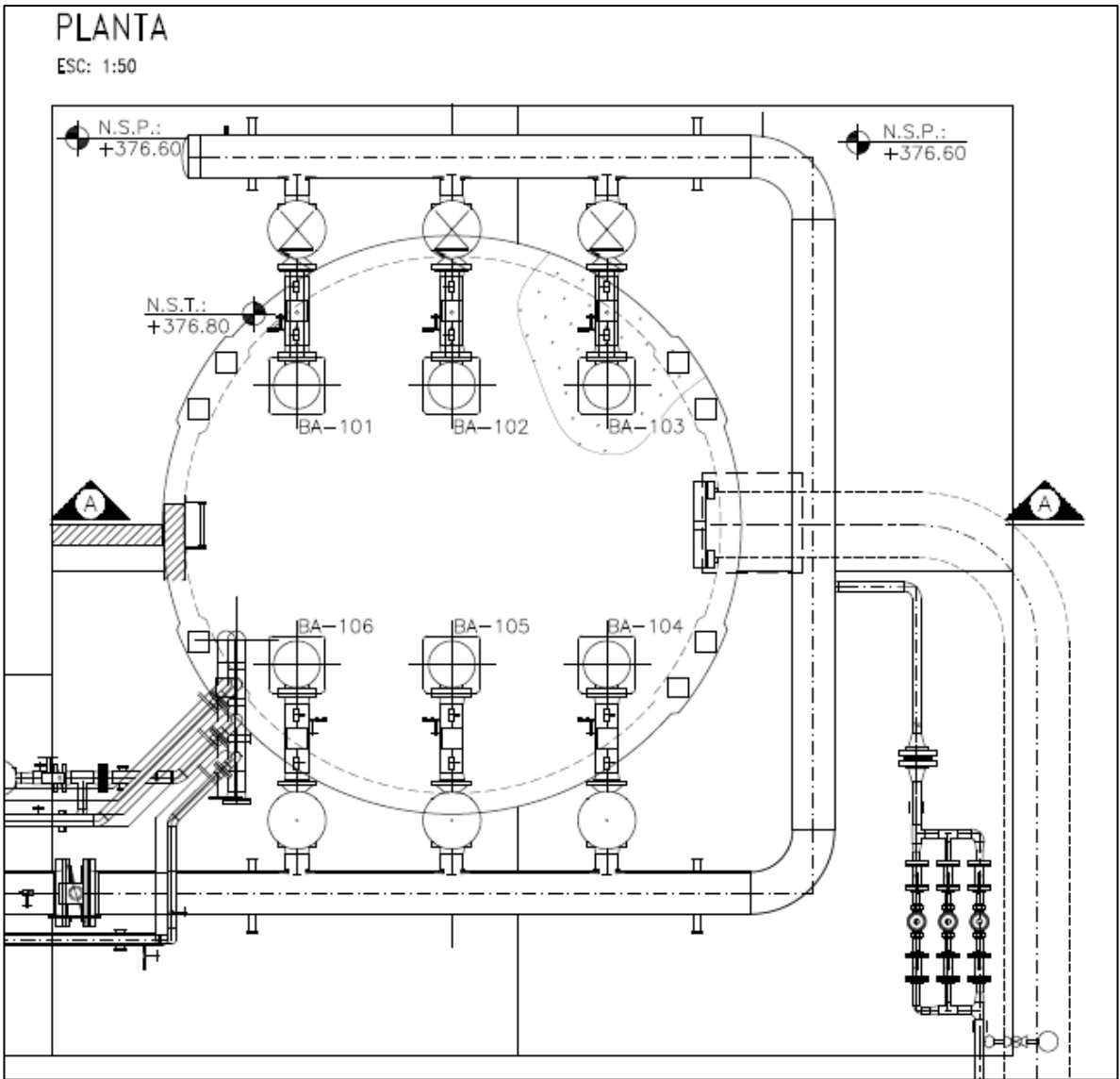


Figura 4-1. Vista en planta de la cámara de bombeo.

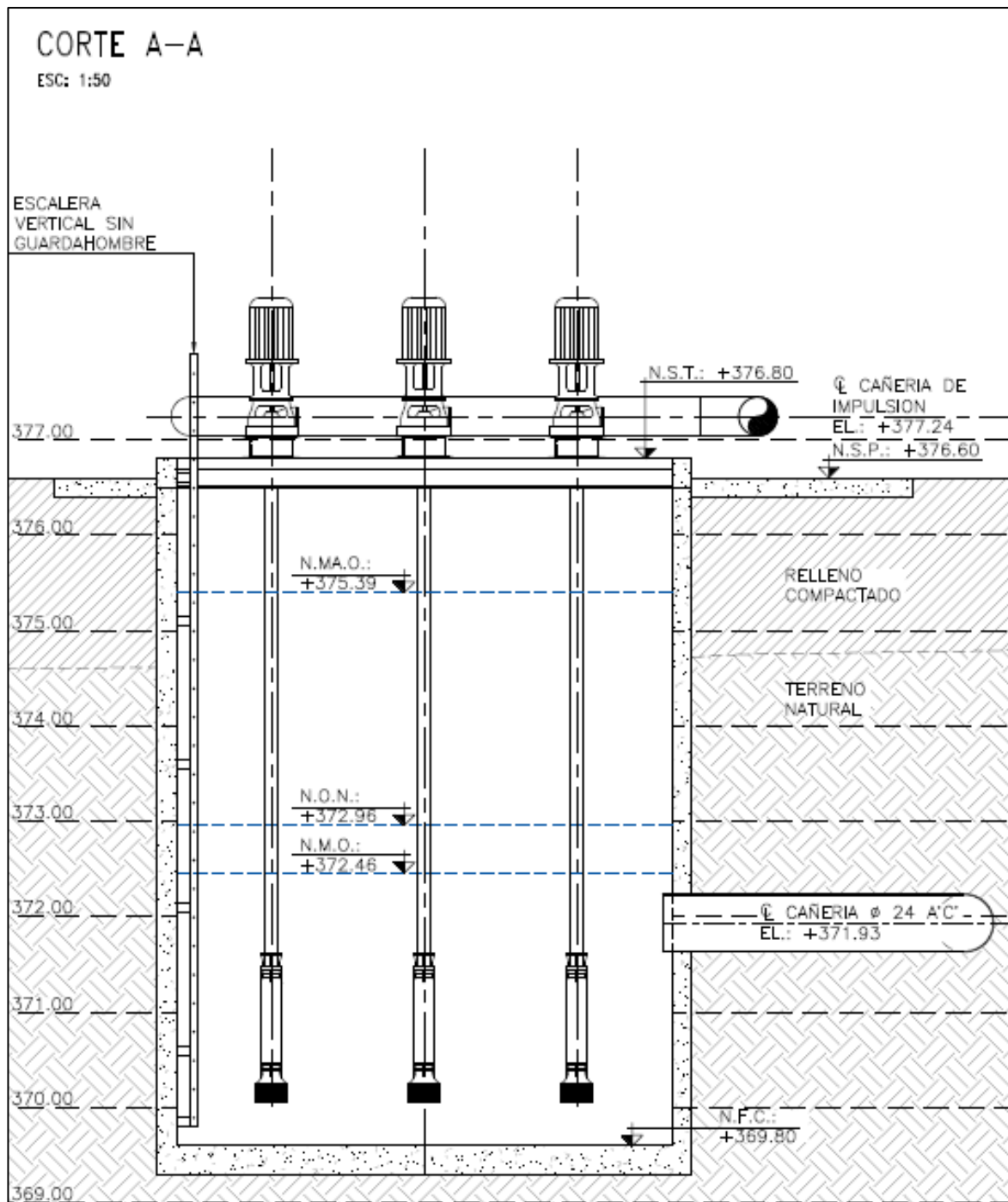


Figura 4-2. Corte A-A cámara de bombeo

donde,

- N.O.N: indica nivel de operación normal,
- N.M.O: indica nivel mínimo de operación,
- N.M.A.O: indica nivel máximo de operación,

- N.F.C: indica nivel de fondo de cámara,
- N.S.P: indica nivel superior de pavimento,
- N.S.T: indica nivel superior de tapa,
- EL: indica elevación de CL (centro de línea) de cañería.

Luego de las bombas, el agua es conducida por un acueducto principal construido de acero al carbono API 5L grado x56, Schedule 20, de 16 pulgadas de diámetro nominal y una longitud aproximada de 10 kilómetros, hasta llegar a las piletas de almacenamiento al final del sistema. La traza del acueducto, Figura 4-3, atraviesa un perfil topográfico variable, obtenido por medio de Google Earth, tal como se observa en la Figura 4-4.



Figura 4-3. Traza del acueducto (obtenido de Google Earth)

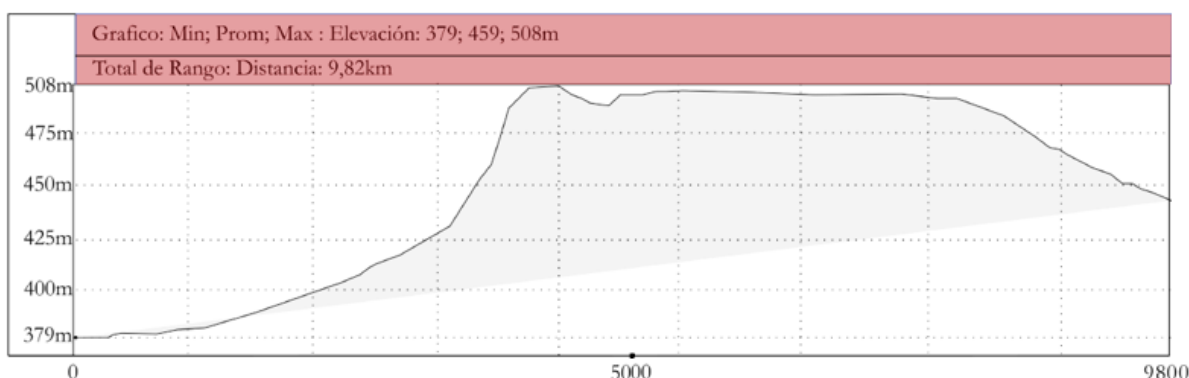


Figura 4-4. Perfil de elevación del acueducto (obtenido de Google Earth)

El sistema de bombeo cuenta con seis bombas centrífugas verticales multietapa modelo WVR 125/10, fabricadas por KSB, las cuales están montadas en paralelo como se observa en los planos anteriores. Este modelo cumple con los requisitos de la norma (API 610, 2021), que establece las especificaciones para bombas destinadas a servicios en la industria del petróleo y gas. Cada bomba tiene una velocidad de giro de 1450 rpm y cuenta con 10 etapas, permitiendo alcanzar una altura manométrica de 240 mca a un caudal nominal de $125 \text{ m}^3/\text{h}$, con un rendimiento del 75%, como se observa en la Figura 4-5. Las bombas están dispuestas en paralelo dentro de la cámara, operando sumergidas y con succión directa desde el nivel de agua del río.

En la Tabla 1 se detallan las especificaciones de las bombas y en la Tabla 2 las especificaciones de los motores acoplados.

Tabla 1. Especificaciones de las bombas.

Especificación	Valor
Tipo de bomba	Centrífuga vertical multietapa
Modelo	KSB WVR 125/10
Número de etapas	10 etapas
Velocidad de giro	1450 rpm
Caudal nominal	$125 \text{ m}^3/\text{hs}$
Altura manométrica nominal	240 m
Potencia absorbida	110 kW
Rendimiento nominal	~ 75 %
Rango operativo $Q_{min} - Q_{max}$	$40 \text{ m}^3/\text{hs} - 180 \text{ m}^3/\text{hs}$
DN aspiración / DN descarga	175 mm – 150 mm

Tabla 2. Especificaciones de los motores.

Especificación	Descripción
Fabricante	WEG
Motor tipo	315S/M
Potencia motor	160 kW
Posición	Vertical
Frecuencia	50 Hz

En la Figura 4-5 (KSB, s.f) se presentan las curvas características de la bomba, donde se muestran la altura manométrica, el NPSH requerido, la potencia absorbida y el rendimiento, todas ellas en función del caudal.

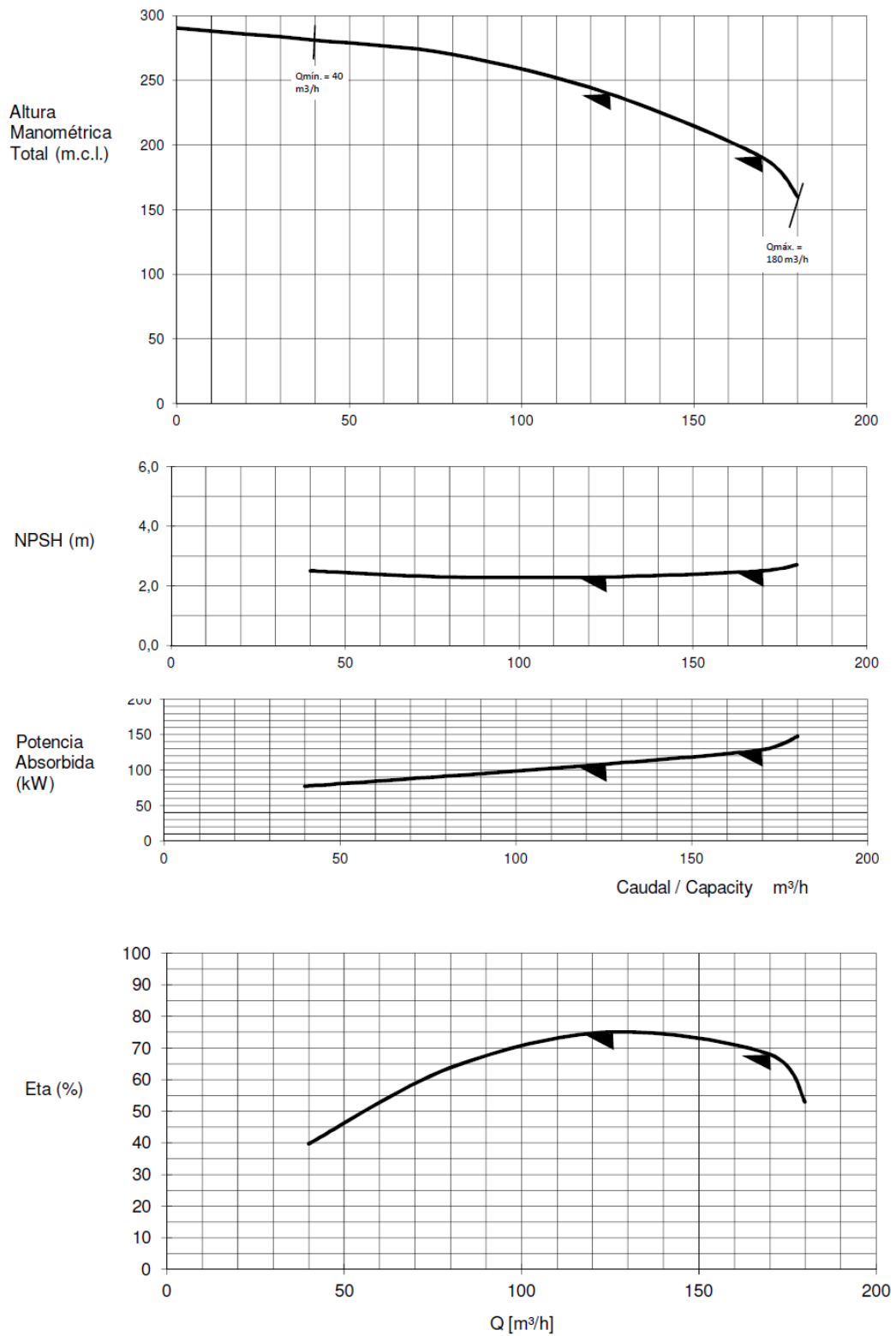


Figura 4-5. Curvas de la bomba KSB WVR 125/10 (KSB, s.f).

Según la información disponible, en el extremo final del acueducto existe instalada una válvula de regulación de caudal. Sin embargo, no se cuenta con datos precisos del modelo ni tamaño. Dado que este elemento forma parte del sistema y afecta directamente su comportamiento, resulta necesario incorporarla en la modelación realizada con el software.

Ante la falta de datos, se procede a dimensionar una válvula equivalente y luego se selecciona un modelo comercial para representar las condiciones de operación del sistema.

Para modelar adecuadamente la válvula de regulación existente al final del acueducto, se realiza el dimensionamiento de una válvula equivalente siguiendo criterios hidráulicos ampliamente utilizados en la industria.

De acuerdo con los datos brindados, se establece como condición de operación una altura de impulsión aproximada de 190 m, correspondiente al punto esperado de funcionamiento de las bombas. A partir de sus curvas características se observa que, para dicha altura, el sistema entregaría un caudal cercano a 840 m³/h.

Sin embargo, al analizar la curva del sistema sin considerar la válvula de regulación, se observa que para ese mismo caudal la altura requerida es de aproximadamente 160 m, por lo que el punto de intersección entre ambas curvas se ubicaría en una condición de mayor caudal y menor altura que la deseada. Por este motivo, la válvula de regulación debe generar una pérdida de carga adicional del orden de 30 m, permitiendo modificar la curva del sistema y desplazar el punto de operación hasta aproximadamente 190 m de altura y 840 m³/h de caudal.

Luego, siguiendo los lineamientos de Creus Solé (2010), se procede a calcular el coeficiente de caudal K_v , que es un parámetro que relaciona el caudal Q que atraviesa la válvula con la pérdida de carga ΔP_v que esta produce. El coeficiente K_v se define como:

$$K_v = \frac{Q}{\sqrt{\Delta P_v}} \quad (4-1)$$

Siguiendo criterios hidráulicos, se recomienda que la válvula opere en torno al 85% de apertura, lo cual permite contar con un margen de regulación.

Aplicando la fórmula (4-1), se obtiene un valor de coeficiente de caudal, $K_v = 490$. Con este valor se recurre al catálogo del fabricante (Bermad, s.f.), y se selecciona una válvula de control de caudal

modelo WW-700 DN 150, la cual presenta un coeficiente de pérdida $K = 2,7$, como se observa en la Figura 4-6.

Tamaño	pulg.	1.5"	2"	2.5"	3"	4"	6"	8"	10"	12"	16"
	mm	40	50	65	80	100	150	200	250	300	400
Disco plano	Cv	66	72	113	150	231	624	1045	1709	2472	3812
	Kv	57	62	98	130	200	540	905	1480	2140	3300
	K	1.2	2.6	2.9	3.8	3.9	2.7	3.1	2.8	2.8	3.7
V-Port	Cv	53	55	84	118	162	523	886	1513	2241	3430
	Kv	46	48	73	102	140	453	767	1310	1940	2970
	K	1.9	4.3	5.3	6.2	8.0	3.9	4.3	3.6	3.4	4.6

Figura 4-6. Factores de caudal para selección de válvula de regulación (Bermad, s.f.).

Finalmente, el agua impulsada a lo largo del acueducto es descargada libre a la atmósfera sobre las piletas de almacenamiento, ubicadas en destino.

Todo lo mencionado previamente es esencial para poder llevar a cabo el análisis del sistema de bombeo y así poder evaluar el funcionamiento del mismo, tanto en régimen permanente como los transitorios hidráulicos.

4.2 Análisis teórico

Si bien el sistema ya se encuentra construido y equipado con seis bombas instaladas, se considera oportuno realizar una verificación hidráulica mediante el análisis gráfico de las curvas de las bombas y la curva del sistema, como herramienta complementaria.

El objetivo de este análisis es evaluar si las bombas seleccionadas trabajarán en un punto de operación adecuado, dentro del rango hidráulico óptimo, y si la decisión de operar con 5 bombas en paralelo (dejando una sexta en reserva) resulta coherente con las condiciones hidráulicas del sistema.

El método consiste en graficar la curva de altura manométrica del sistema en función del caudal, $H = H(Q)$, obtenida a partir de la diferencia de cotas entre el nivel del agua en la succión y el nivel de descarga a las piletas, junto con las pérdidas de carga distribuidas y localizadas. Luego se representan las curvas para diferentes configuraciones de bombas operando en paralelo (de 1 a 6 bombas), sumando los caudales individuales para una misma altura. La intersección entre ambas curvas define el punto de operación: el caudal total y la altura manométrica que entrega el conjunto de bombas en esas condiciones.

Este análisis permite obtener una primera verificación hidráulica del dimensionamiento del sistema, evaluando si el caudal entregado por las bombas alcanza al requerido, si las bombas trabajan cerca de su punto de máxima eficiencia y si es adecuado operar con cinco bombas.

4.2.1 Curvas de las bombas

A partir de la curva de la bomba KSB WVR 125/10, Figura 4-5, se generan de manera gráfica, las curvas para diferentes configuraciones de bombas operando en paralelo, hasta 6 unidades, como se observa en la Figura 4-7. Dos o más bombas están en paralelo, cuando descargan hacia un mismo colector y aspiran desde una misma línea de succión, verificándose que:

$$H_B = H_{B1} = H_{B2} = H_{B3} = \dots = H_{Bn} \quad (4-2)$$

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + \dots + Q_n \quad (4-3)$$

Se toman distintos valores de altura y se suman los caudales correspondientes de cada bomba, ya que en una disposición en paralelo la altura H se mantiene constante entre todas las bombas y el caudal total es la suma de los caudales individuales a esa altura.

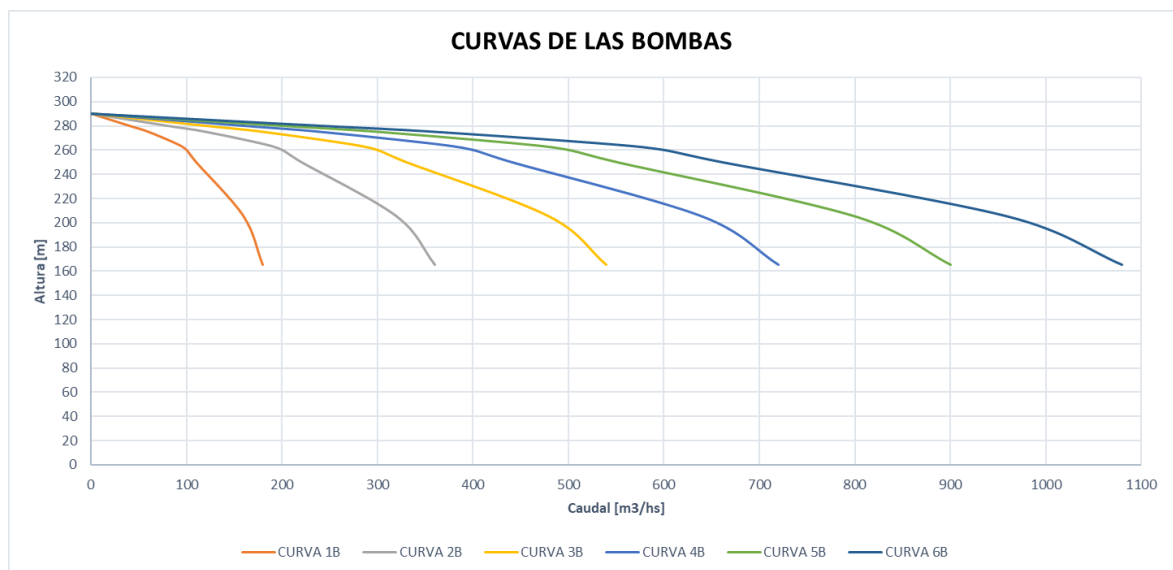


Figura 4-7. Curvas de las bombas funcionando en paralelo

4.2.2 Curva del sistema

La curva del sistema relaciona la altura manométrica total requerida por el sistema con el caudal total, y se expresa como,

$$H_{sist} = H_{estática} + h_{tot}(Q) \quad (4-4)$$

donde,

- $H_{estática}$ es la diferencia de cotas entre el nivel del río y el nivel de descarga atmosférica en las piletas.
- $h_{tot}(Q)$ son las pérdidas de carga, tanto distribuidas (h_f) como localizadas (h_m).

Las pérdidas de carga distribuidas se calculan haciendo uso de la expresión de Darcy-Weisbach, como se explicó en la sección 3.3,

$$h_f = f \frac{L v^2}{d 2g} \quad (4-5)$$

donde f , factor de fricción (adimensional), L la longitud del tubo en m, D el diámetro del tubo en m, v la velocidad media en m/s, y g la constante gravitacional.

Las pérdidas de carga localizadas, debida a codos, accesorios, etc., se calculan como

$$h_m = \sum K \frac{v^2}{2g} \quad (4-6)$$

Por lo tanto, la curva del sistema adopta una forma parabólica, cuyo origen es la diferencia de cotas entre los niveles de succión y descarga. A partir de ahí, a medida que el caudal aumenta, se suman las pérdidas de carga que aumentan con el cuadrado del mismo, lo que determina la pendiente ascendente de la curva.

Una vez realizados los cálculos correspondientes para los distintos valores de caudal, se procede a graficar la curva característica del sistema como se observa en la Figura 4-8.

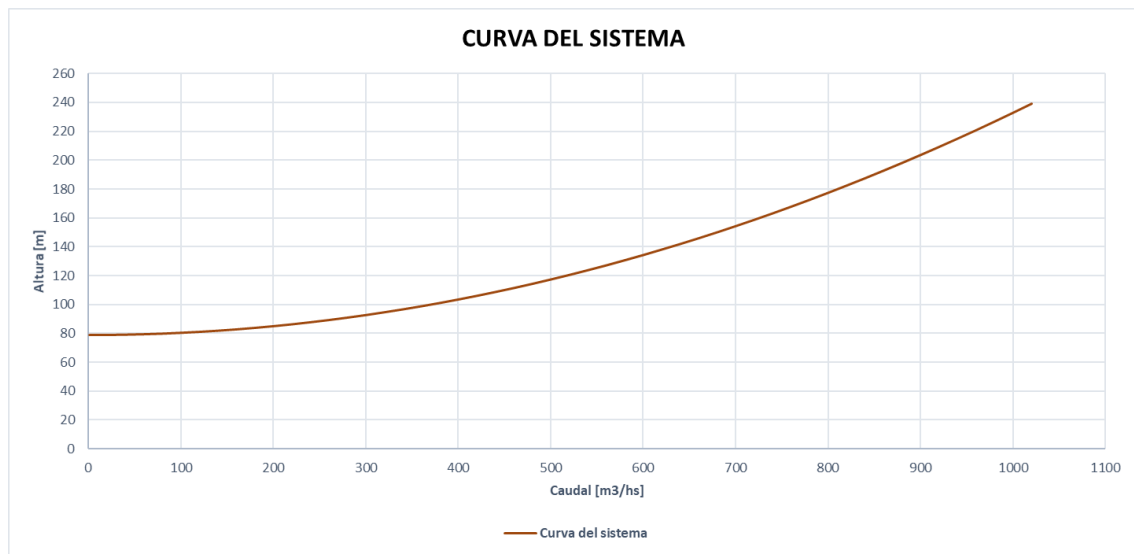


Figura 4-8. Curva característica del sistema

4.2.3 Punto de operación

Ahora se representa gráficamente la superposición de la curva del sistema con las curvas de las bombas, con el fin de determinar el punto de funcionamiento del sistema de bombeo. Este punto, que surge de la intersección de entre ambas curvas como se observa en la Figura 4-9, define las condiciones reales de funcionamiento del sistema en régimen permanente, es decir, el caudal entregado por las bombas y la altura manométrica que deben vencer.

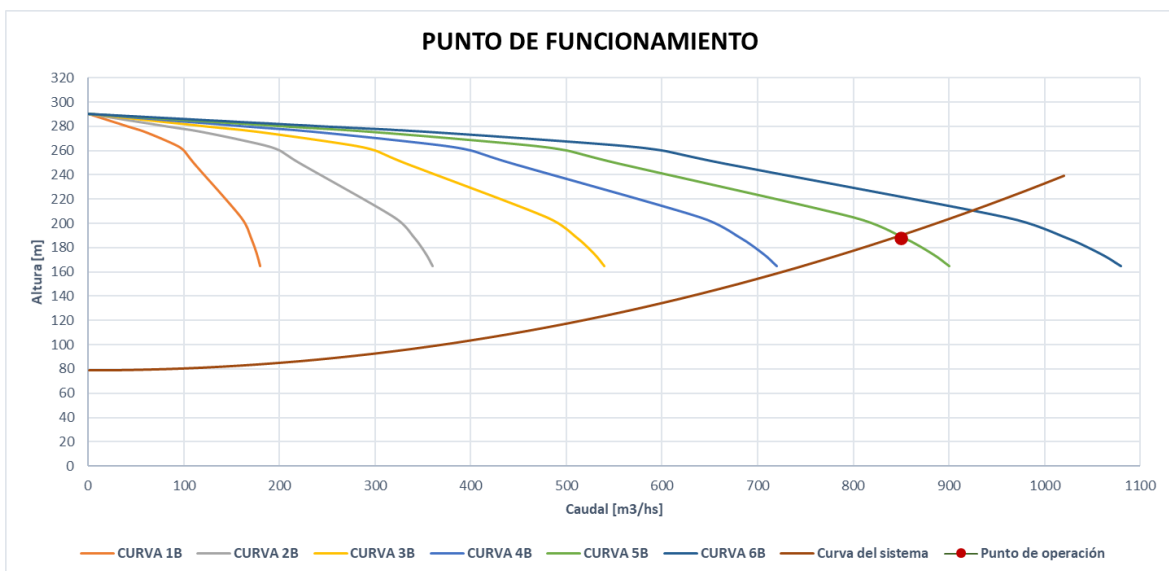


Figura 4-9. Punto de funcionamiento del sistema de bombeo.

Una vez superpuestas las curvas, se determina el punto de funcionamiento del sistema. Para la configuración de cinco unidades de bombeo operando en paralelo, dicho punto se ubica en un caudal total aproximado de $Q_{tot} = 850 \frac{m^3}{h}$ y una altura de $H = 187,76 m$. Dado que las cinco bombas son idénticas, se asume que el caudal se distribuye por igual en todas ellas, resultando en un caudal individual de $Q = 170 m^3/h$.

A partir de las curvas características de la bomba proporcionada por el fabricante KSB, Figura 4-5, se identifica que, a ese caudal, cada bomba opera con un rendimiento aproximadamente del 68% y absorbe una potencia de $P = 130 kW$.

En la Tabla 3 se muestra la comparación de los valores de los puntos de funcionamiento óptimo y real de las bombas.

Tabla 3. Comparación puntos de funcionamiento de la bomba

Punto de funcionamiento óptimo		Punto de operación real	
Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
Q	$125 m^3/hs$	Q	$170 m^3/hs$
H	$240 m$	H	$187,76 m$
η	75%	η	65%
$P_{absorbida}$	$110 kW$	$P_{absorbida}$	$130 kW$

El punto de operación se encuentra dentro del rango permitido por el fabricante, aunque próximo al límite superior ($180 m^3/h$), por lo que hay que tener atención a ese detalle.

Como las bombas trabajan a un caudal superior al de máxima eficiencia, implica una pérdida de rendimiento del 7 % aproximadamente y un aumento en la potencia absorbida.

Si bien el sistema de bombeo cumple con los requerimientos de caudal y altura de la instalación, este alejamiento del punto de máxima eficiencia puede traducirse en un aumento de los costos operativos, mayor desgaste y disminución de la vida útil de las bombas.

4.2.4 Funcionamiento de las bombas de acuerdo a la Norma ANSI/HI 9.6.3

La Norma ANSI/HI 9.6.3 analiza los efectos de operar una bomba rotodinámica de forma continua a caudales mayores o menores que el correspondiente al punto de mejor eficiencia (BEP, Best Efficiency Point) de la bomba.

La Norma define una región de funcionamiento permitida o admisible (AOR, Allowable Operating Region) para el rango de caudales de una bomba centrífuga, con una región de funcionamiento preferible (POR, Preferred Operating Region). Esta región está definida en función del BEP, como se observa en la Tabla 4.

Tabla 4. Rango preferido de operación relacionada con la velocidad específica (ANSI/HI 9.6.3, 2017)

Velocidad específica n_{sq}		Región de operación preferida (POR)
Sistema Métrico	Sistema Inglés	
≤ 90	≤ 4500	Entre 70% y 120% del BEP
> 90	> 4500	Entre 80% y 120% del BEP
≤ 140	≤ 7000	Entre 80% y 120% del BEP
> 140	> 7000	Entre 85% y 115% del BEP
≤ 200	≤ 10000	Entre 85% y 115% del BEP
> 200	> 10000	Entre 90% y 110% del BEP

La región de funcionamiento admisible (AOR) es una gama más amplia de caudales, fuera del POR, en la que la vida de servicio de una bomba es aceptable. Los límites de la AOR vienen determinados por requisitos distintos del consumo de energía y deben definirse con la ayuda del fabricante de la bomba. El funcionamiento en zonas que no estén totalmente definidas por la curva de la bomba (altura, rendimiento y NPSH) no debe realizarse sin consultar con el fabricante.

La vida de los cojinetes se reducirá y el ruido, las vibraciones y las tensiones de los componentes aumentarán cuando una bomba funcione fuera de su AOR. Como resultado, la vida útil de una bomba que funcione dentro de la AOR puede ser menor que dentro de la POR.

La velocidad específica de una bomba centrífuga se define como aquella velocidad en revoluciones por minuto a la cual un impulsor desarrollaría una altura unitaria con un caudal unitario (en el punto de máximo rendimiento, BEP).

$$n_{sq} = \frac{n\sqrt{Q}}{(H)^{3/4}} \quad (4-7)$$

- $n = rpm$
- $Q = m^3/s$
- $H = m$

De acuerdo a la expresión (4-7), las bombas instaladas tienen una velocidad específica de $n_{sq} = 4,43$, como se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5. Cálculo de velocidad específica n_{sq}

n [rpm]	Q [m^3/h]	Q [m^3/s]	H [m]	n_{sq}
1450	125	0,0347	240	4,43

De acuerdo a esto la bomba instalada tendrá un rango de operación POR entre el 70% y 120% del BEP, lo que representa caudales de 87,5 y 120 m^3/h , respectivamente, como se muestra en Figura 4-10.

El punto de funcionamiento del sistema se determinó en aproximadamente 170 m^3/h , valor que se encuentra dentro del AOR, aunque ligeramente por fuera del POR. Esto indica que la bomba puede operar de manera segura en las condiciones analizadas, aunque no lo hace en su zona de máxima eficiencia. La operación en esta región puede implicar una ligera reducción de eficiencia y un aumento de solicitaciones hidráulicas y mecánicas respecto del funcionamiento cercano al BEP.

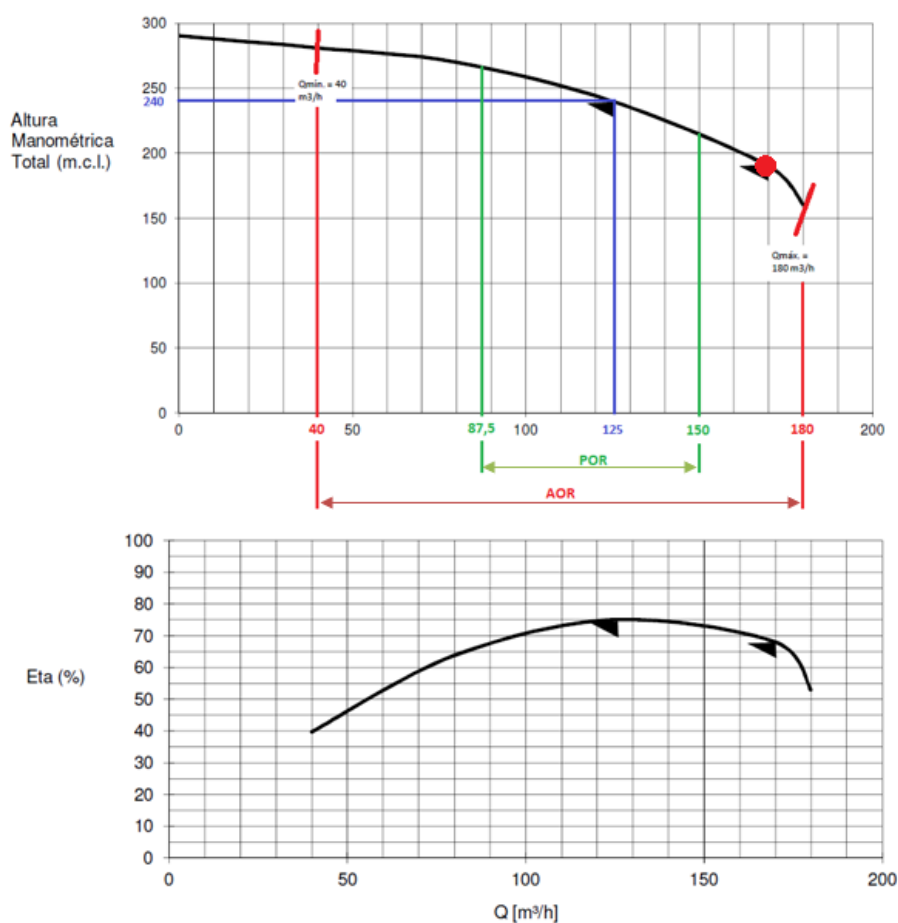


Figura 4-10. Rangos admisibles y preferibles de operación.

4.3 Análisis mediante software

A partir de la documentación recopilada, se procede a modelar el sistema de bombeo utilizando el Software Allievi, orientado a la simulación de transitorios hidráulicos (Allievi, 2018). El objetivo de esta sección es configurar el modelo representativo del sistema en estudio, a fin de evaluar su comportamiento ante distintas condiciones de operación, tanto en régimen permanente como frente a transitorios, y obtener resultados que permitan validar su diseño, seleccionar dispositivos de protección para atenuar los efectos del golpe de ariete y prever situaciones críticas. Este análisis es fundamental para garantizar que el sistema opere dentro de un rango seguro y efectivo.

4.3.1 Configuración del sistema

Para la simulación del sistema de bombeo, se construye un modelo que representa las condiciones reales del sistema, que abarca desde la cámara de bombeo hasta las piletas de almacenamiento.

En el ANEXO I: Planos del sistema de bombeo, se incluyen los planos utilizados para la configuración del modelo en el software Allievi, a partir de los cuales se obtuvieron las cotas, longitudes de los tramos, diámetros nominales y disposición general de los componentes.

En la Figura 4-11 se muestra el esquema del modelo desarrollado en Allievi. Se adoptaron ciertas simplificaciones para reducir la complejidad geométrica, como por ejemplo el colector de descarga de las seis bombas, que en la instalación real tiene una disposición tipo “C”, mientras que en el modelo fue representado por un tramo recto con las bombas alineadas en forma consecutiva. Se considera válido ya que las pérdidas localizadas asociadas a los codos fueron contempladas en la configuración del modelo.

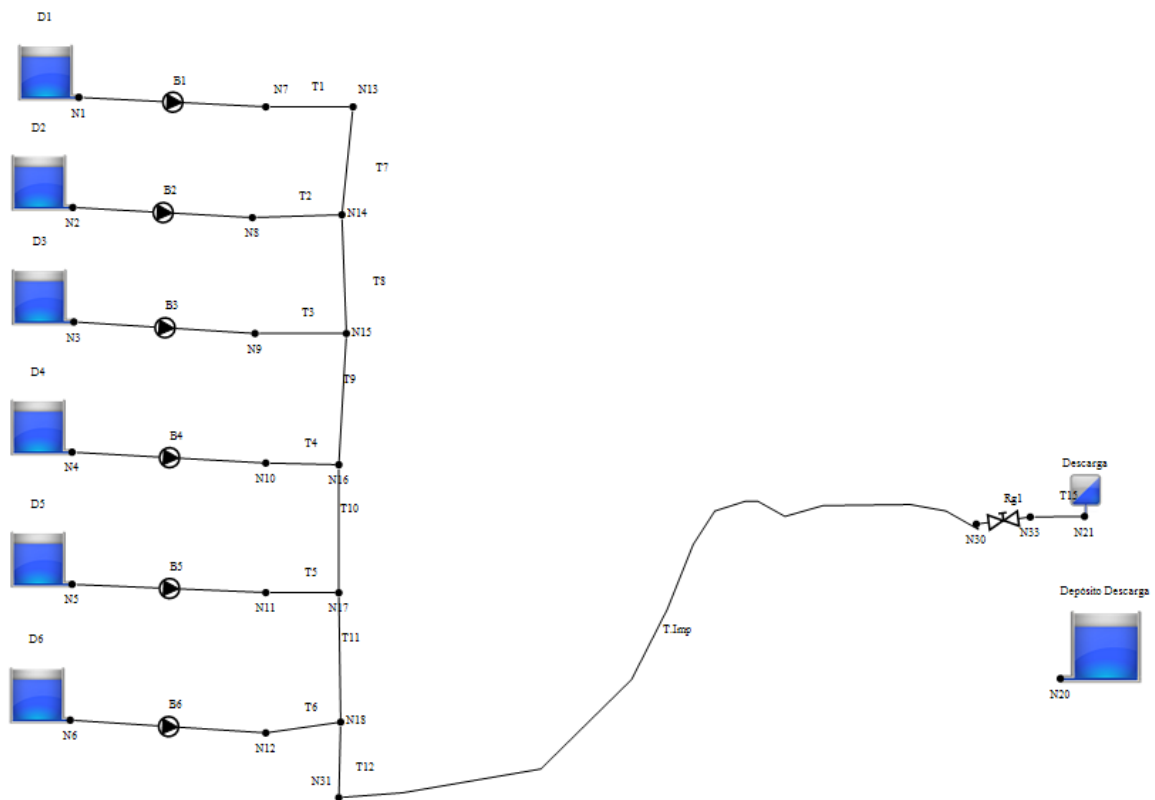


Figura 4-11. Esquema en Allievi del modelo desarrollado (captura de pantalla del software Allievi).

A continuación, se detallan los parámetros y consideraciones adoptados para la configuración de cada elemento que componen el modelo desarrollado.

Los depósitos son elementos del sistema donde se almacena agua a presión atmosférica. Tanto los depósitos de succión, que modelan la cámara de bombeo, como el depósito de descarga, que representa las piletas de almacenamiento, se consideran de grandes dimensiones. En la Figura 4-12 se presentan los datos correspondientes ingresados en el software.

Depósitos - Datos básicos							
Nombre ▲	Ni	Nf	Zs (m)	Tipo	S (m ²)	Z0 (m)	Zvar
D1	---	N1	369,95	GD ▼		372,46	▼
D2	---	N2	369,95	GD ▼		372,46	▼
D3	---	N3	369,95	GD ▼		372,46	▼
D4	---	N4	369,95	GD ▼		372,46	▼
D5	---	N5	369,95	GD ▼		372,46	▼
D6	---	N6	369,95	GD ▼		372,46	▼
D Descarga	N20	---	448,9	GD ▼		451	▼

Figura 4-12. Datos básicos para depósitos (captura de pantalla del software Allievi).

Las tuberías, como se describió previamente, están construidas de acero al carbono API 5L grado x56, SCH 20. Las conexiones entre la salida de cada bomba y el colector poseen un diámetro de 8”, mientras que el colector y el acueducto principal poseen un diámetro de 16”.

Para la configuración del acueducto, de aproximadamente 10 km de longitud, se cargó el perfil de elevación del terreno, el cual fue obtenido por medio de Google Earth, a fin de representar de forma adecuada las condiciones geométricas reales del sistema.

En la Figura 4-13 se presentan los datos ingresados en el software para representar las características de las tuberías del sistema.

Tuberías - Datos básicos											Pérdidas	
Nombre	Ni	Zi (m)	Nf	Zf (m)	Dint (mm)	L (m)	e (mm)	a (m/s)		Perfil	Rug (mm)	k
T1	N7	369,95	N13	377,24	206,38	9,5	7,11	1434,9333	Calc.	----	0,046	0,8
T2	N8	369,95	N14	377,24	206,38	9,5	7,11	1434,9333	Calc.	----	0,046	0,8
T3	N9	369,95	N15	377,24	206,38	9,5	7,11	1434,9333	Calc.	----	0,046	0,8
T4	N10	369,95	N16	377,24	206,38	9,5	7,11	1434,9333	Calc.	----	0,046	0,8
T5	N11	369,95	N17	377,24	206,38	9,5	7,11	1434,9333	Calc.	----	0,046	0,8
T6	N12	369,95	N18	377,24	206,38	9,5	7,11	1434,9333	Calc.	----	0,046	0,8
T8	N14	377,24	N15	377,24	390,56	1,5	7,92	1434,9333	Calc.	----	0,046	0
T11	N17	377,24	N18	377,24	390,56	1,5	7,92	1434,9333	Calc.	----	0,046	0
T12	N18	377,24	N31	379	390,56	1,8	7,92	1434,9333	Calc.	----	0,046	0
T7	N13	377,24	N14	377,24	390,56	1,5	7,92	1434,9333	Calc.	----	0,046	0
T.Imp	N31	379	N21	451,5	390,56	9820	7,92	1316,1727	Calc.	-^Λ-/	0,046	0
T9	N15	377,24	N16	377,24	390,56	9,4	7,92	1434,9333	Calc.	----	0,046	1,5
T10	N16	377,24	N17	377,24	390,56	1,5	7,92	1434,9333	Calc.	----	0,046	0

Figura 4-13. Datos para la configuración de las tuberías (captura de pantalla del software Allievi).

Luego se procede a la configuración de las bombas. Para el modelado de la estación de bombeo se optó por representar las seis bombas de manera de individual, cada una con su respectiva línea de impulsión hacia el colector. Esto logra una representación más precisa del comportamiento del sistema, tanto en régimen permanente como durante transitorios.

El modelado individual de las bombas permite simular distintas condiciones de operación, tales como la puesta en marcha o detención de una o varias bombas en diferentes momentos, lo que permite evaluar la respuesta del sistema ante distintos escenarios y obtener un análisis más completo.

Además, esta configuración permite cargar bombas con características distintas si fuera necesario, por ejemplo, en el caso de que alguna deba ser reemplazada y tenga una curva característica diferente. Esto no sería posible en una configuración simplificada, donde se asume que las seis bombas son idénticas.

Se consideran curvas características universales, las cuales permiten caracterizar el comportamiento de las bombas en cualesquiera condiciones de funcionamiento, esto es, para valores positivos, negativos o nulos de caudal, altura y velocidad de rotación (Manual Allievi, 2015). En la Figura 4-14 se presentan los datos de la estación de bombeo.

Estación de bombeo - Datos básicos					Instalación			Rotación				Parada/Arranque																																																																																																																											
Nombr	Ni	Nf	Z (m)	Num	Curva	V Ret	By-Pass	Nreg	Nnom	I	Calcul	Inicial	Paran	Inst. par.	Nuevo arr	Arrancan																																																																																																																							
B1	N1	N7	369,95	1	Universale	Si	No	1450	1450	3,765	Calcul	En marcha	Si	10	No																																																																																																																								
Rendimiento óptimo					V Regulación																																																																																																																																		
				Q (l/s)	H (m)	P (Kw)	Rend(%)	DN (mm)	Tipo	Modelo	Maniobra	V Retención		By-Pass																																																																																																																									
				34,5	240	110,004	73,84	200	Comercial	Paso Anular CADN		K		K																																																																																																																									
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="17">Estación de bombeo - Datos básicos</th> </tr> <tr> <th>Nombr</th> <th>Ni</th> <th>Nf</th> <th>Z (m)</th> <th>Num</th> <th>Curva</th> <th>V Ret</th> <th>By-Pass</th> <th>Nreg</th> <th>Nnom</th> <th>I</th> <th>Calcul</th> <th>Inicial</th> <th>Paran</th> <th>Inst. par.</th> <th>Nuevo arr</th> <th>Arrancan</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>B2</td> <td>N2</td> <td>N8</td> <td>369,95</td> <td>1</td> <td>Universale</td> <td>Si</td> <td>No</td> <td>1450</td> <td>1450</td> <td>3,765</td> <td>Calcul</td> <td>En marcha</td> <td>Si</td> <td>10</td> <td>No</td> <td></td> </tr> <tr> <td>B3</td> <td>N3</td> <td>N9</td> <td>369,95</td> <td>1</td> <td>Universale</td> <td>Si</td> <td>No</td> <td>1450</td> <td>1450</td> <td>3,765</td> <td>Calcul</td> <td>En marcha</td> <td>Si</td> <td>10</td> <td>No</td> <td></td> </tr> <tr> <td>B4</td> <td>N4</td> <td>N10</td> <td>369,95</td> <td>1</td> <td>Universale</td> <td>Si</td> <td>No</td> <td>1450</td> <td>1450</td> <td>3,765</td> <td>Calcul</td> <td>En marcha</td> <td>Si</td> <td>10</td> <td>No</td> <td></td> </tr> <tr> <td>B5</td> <td>N5</td> <td>N11</td> <td>369,95</td> <td>1</td> <td>Universale</td> <td>Si</td> <td>No</td> <td>1450</td> <td>1450</td> <td>3,765</td> <td>Calcul</td> <td>En marcha</td> <td>Si</td> <td>10</td> <td>No</td> <td></td> </tr> <tr> <td>B6</td> <td>N6</td> <td>N12</td> <td>369,95</td> <td>1</td> <td>Universale</td> <td>Si</td> <td>No</td> <td>1450</td> <td>1450</td> <td>3,765</td> <td>Calcul</td> <td>Paradas</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>No</td> </tr> </tbody> </table>																	Estación de bombeo - Datos básicos																	Nombr	Ni	Nf	Z (m)	Num	Curva	V Ret	By-Pass	Nreg	Nnom	I	Calcul	Inicial	Paran	Inst. par.	Nuevo arr	Arrancan	B2	N2	N8	369,95	1	Universale	Si	No	1450	1450	3,765	Calcul	En marcha	Si	10	No		B3	N3	N9	369,95	1	Universale	Si	No	1450	1450	3,765	Calcul	En marcha	Si	10	No		B4	N4	N10	369,95	1	Universale	Si	No	1450	1450	3,765	Calcul	En marcha	Si	10	No		B5	N5	N11	369,95	1	Universale	Si	No	1450	1450	3,765	Calcul	En marcha	Si	10	No		B6	N6	N12	369,95	1	Universale	Si	No	1450	1450	3,765	Calcul	Paradas				No
Estación de bombeo - Datos básicos																																																																																																																																							
Nombr	Ni	Nf	Z (m)	Num	Curva	V Ret	By-Pass	Nreg	Nnom	I	Calcul	Inicial	Paran	Inst. par.	Nuevo arr	Arrancan																																																																																																																							
B2	N2	N8	369,95	1	Universale	Si	No	1450	1450	3,765	Calcul	En marcha	Si	10	No																																																																																																																								
B3	N3	N9	369,95	1	Universale	Si	No	1450	1450	3,765	Calcul	En marcha	Si	10	No																																																																																																																								
B4	N4	N10	369,95	1	Universale	Si	No	1450	1450	3,765	Calcul	En marcha	Si	10	No																																																																																																																								
B5	N5	N11	369,95	1	Universale	Si	No	1450	1450	3,765	Calcul	En marcha	Si	10	No																																																																																																																								
B6	N6	N12	369,95	1	Universale	Si	No	1450	1450	3,765	Calcul	Paradas				No																																																																																																																							

Figura 4-14. Datos de la estación de bombeo (captura de pantalla del software Allievi).

Luego, se incorporó en el modelo una válvula reguladora de caudal, tipo globo, ubicada en el extremo final del acueducto. Los valores adoptados para dicha configuración se observan en la Figura 4-15.

Válvula Regulación - Datos básicos								Maniobra	Tabulada
Nombre	Ni	Nf	Z (m)	DN (mm)	k Ramal	Tipo	Modelo	Tipo	Tabla
Rg1	N30	N33	451,53	150	2,7	De globo		Tabulada	

Figura 4-15. Datos de válvula de regulación de caudal (captura de pantalla del software Allievi).

Para finalizar con la configuración del modelo, se define una ley de altura en el nudo de salida del acueducto, Figura 4-16, con el objetivo de simular adecuadamente la descarga a la atmósfera, por encima del nivel del agua en las piletas de almacenamiento. Con esta ley se impone una altura piezométrica determinada en un nudo, y el programa calcula el caudal de salida manteniendo la altura piezométrica del nudo igual a su cota (Manual Allievi, 2015).

Ley - Datos básicos							Vertido		
Nombre	Nudo	Z (m)	Tipo	Imp Q	Q imp (l/s)	Factor	Depósito	Zv (m)	Zona
Descarga	N21	451,5	H				Depósito Descarga	451,5	

Figura 4-16. Datos de la ley de altura (captura de pantalla del software Allievi).

4.3.2 Resultados sin protección

Una vez configurado el modelo del sistema de bombeo, se procede a ejecutar las simulaciones en régimen permanente y transitorio. En primer lugar, se realiza la simulación en régimen permanente para verificar el funcionamiento estacionario del sistema.

A continuación, se muestran los resultados del régimen permanente obtenidos mediante Allievi, Figura 4-17 y Figura 4-18, y luego se contrasta con los resultados obtenidos manualmente por medio de la intersección de las curvas de las bombas y la instalación.

	Nombre	Q(l/s)	V(m/s)	F. Fric.	Per. Fric. (m)	Pérd.men. (m)
1	T1	45.48	1.36	0.01679	0.07	0.08
2	T2	45.48	1.36	0.01679	0.07	0.08
3	T3	45.48	1.36	0.01679	0.07	0.08
4	T4	45.50	1.36	0.01679	0.07	0.08
5	T5	45.50	1.36	0.01679	0.07	0.08
6	T6	0.00	0.00	0.00000	-0.00	0.00
7	T8	90.95	0.76	0.01583	0.00	0.00
8	T11	227.42	1.90	0.01423	0.01	0.00
9	T12	227.42	1.90	0.01423	0.01	0.00
10	T7	45.48	0.38	0.01761	0.00	0.00
11	T9	136.43	1.14	0.01503	0.02	0.10
12	T10	181.93	1.52	0.01455	0.01	0.00
13	T.Imp	227.42	1.90	0.01423	65.72	0.00
14	T15	227.42	1.90	0.01423	0.01	0.00

Figura 4-17. Resultados del régimen permanente en tuberías (captura de pantalla del software Allievi).

	Nombre	bombas	Qb(l/s)	Hb(m)	Pot(Kw)	Rend(%)
1	B2	1	45.48	188.55	112.64	74.68
2	B3	1	45.48	188.54	112.64	74.68
3	B4	1	45.50	188.42	112.64	74.66
4	B5	1	45.50	188.41	112.64	74.66
5	B6	1	0.00	0.00	0.00	
6	B1	1	45.48	188.55	112.64	74.68

Figura 4-18. Resultados del régimen permanente en bombas (captura de pantalla del software Allievi).

El punto de operación obtenido mediante el método teórico de intersección de curvas y la simulación numérica mediante el software Allievi se muestra en la Tabla 6. Como se puede observar, los resultados obtenidos a partir de la simulación son coherentes con los obtenidos por el método teórico de intersección de curvas, mostrando muy poca diferencia en altura manométrica y caudales.

Tabla 6. Comparación de puntos de operación del sistema.

	H[m]	Q _{TOT} [m ³ /h]	Q _{TOT} [l/s]	Q _{bomba} [m ³ /h]
Intersección de curvas	187,76	850	236	170
Software Allievi	188,55	818,7	227	163,8

En la Figura 4-19 se observa la evolución de la altura piezométrica en régimen permanente (línea azul) la cual contempla tanto la altura geométrica como la de presión a lo largo de toda la conducción. Puede observarse como la energía se va disipando debido las pérdidas de carga. También se incluye la línea de cavitación (línea gris punteada), lo que permite verificar que las presiones a lo largo de todo el trayecto se mantienen en valores seguros, confirmando el correcto funcionamiento en régimen permanente.

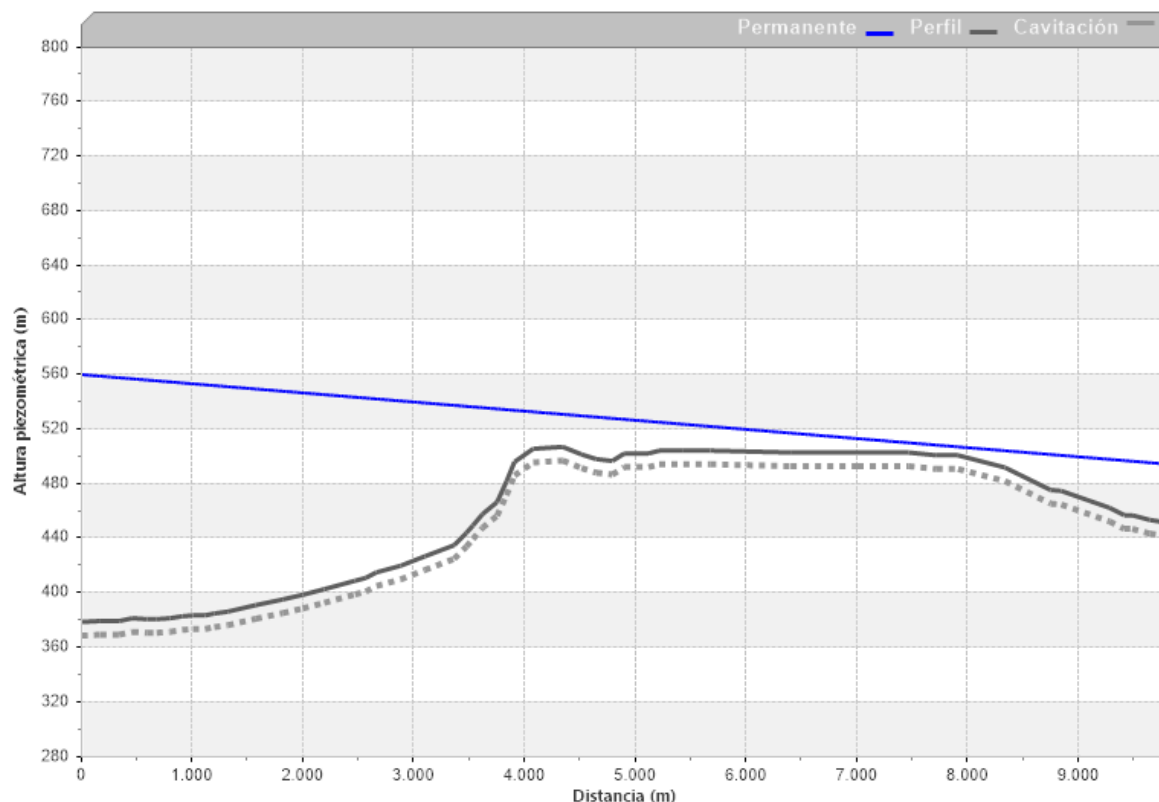


Figura 4-19. Resultados en régimen permanente (LAM), (captura de pantalla del software Allievi).

En la Figura 4-20 se muestra la variación de presión a lo largo del acueducto en régimen permanente, donde se observa que los valores se mantienen por encima de la zona de cavitación, garantizando un funcionamiento seguro como se mencionó previamente.

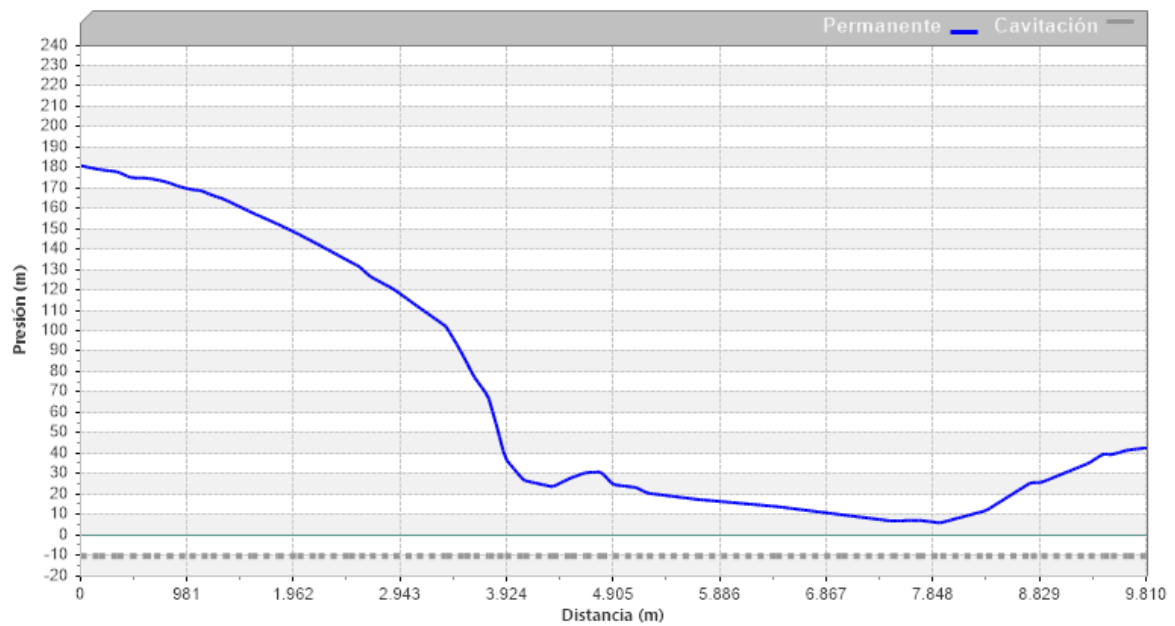


Figura 4-20. Variación de presión en régimen permanente (captura de pantalla del software Allievi).

A continuación, se realizan las simulaciones correspondientes al régimen transitorio utilizando el software Allievi, considerando el paro repentino de las cinco bombas en operación, que representa el caso más crítico del sistema. En la Figura 4-21 se presentan las curvas de alturas manométricas máximas y mínimas obtenidas a lo largo de la conducción, mientras que en la Figura 4-22 se muestran las presiones máximas y mínimas registradas.

Las curvas rojas representan los valores máximos mientras que las curvas verdes representan los valores mínimos obtenidos.

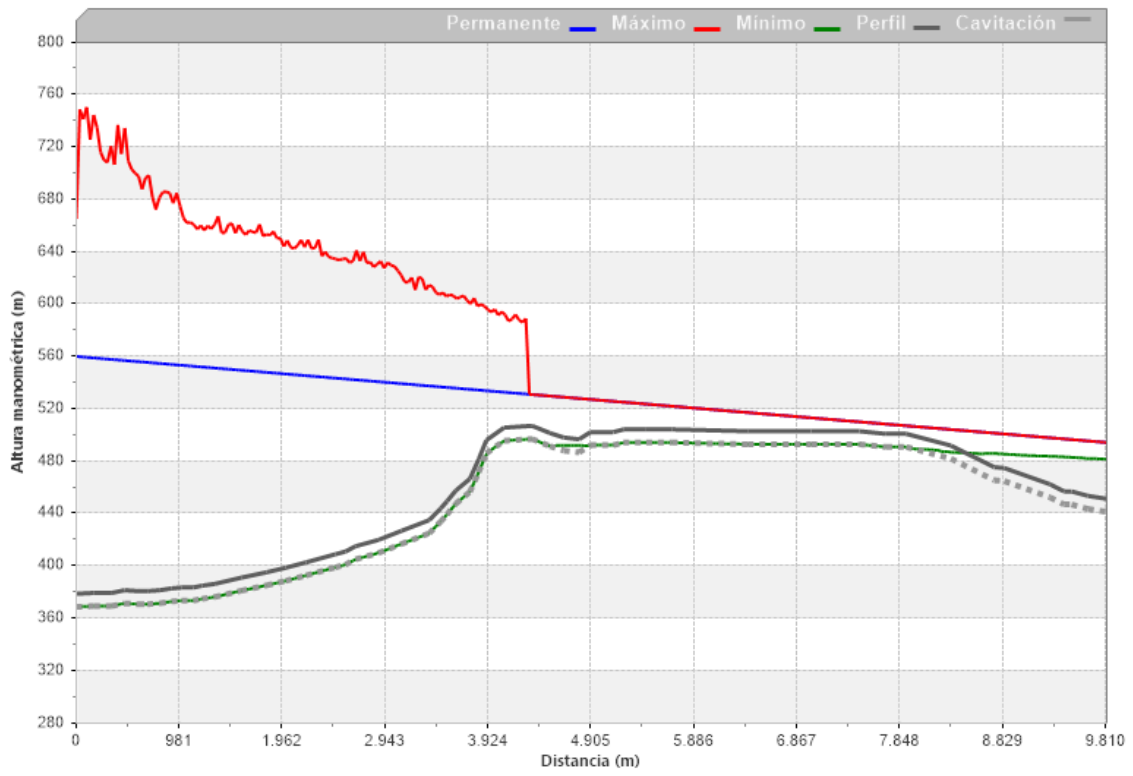


Figura 4-21. Alturas máximas y mínimas en régimen transitorio (captura de pantalla del software Allievi).

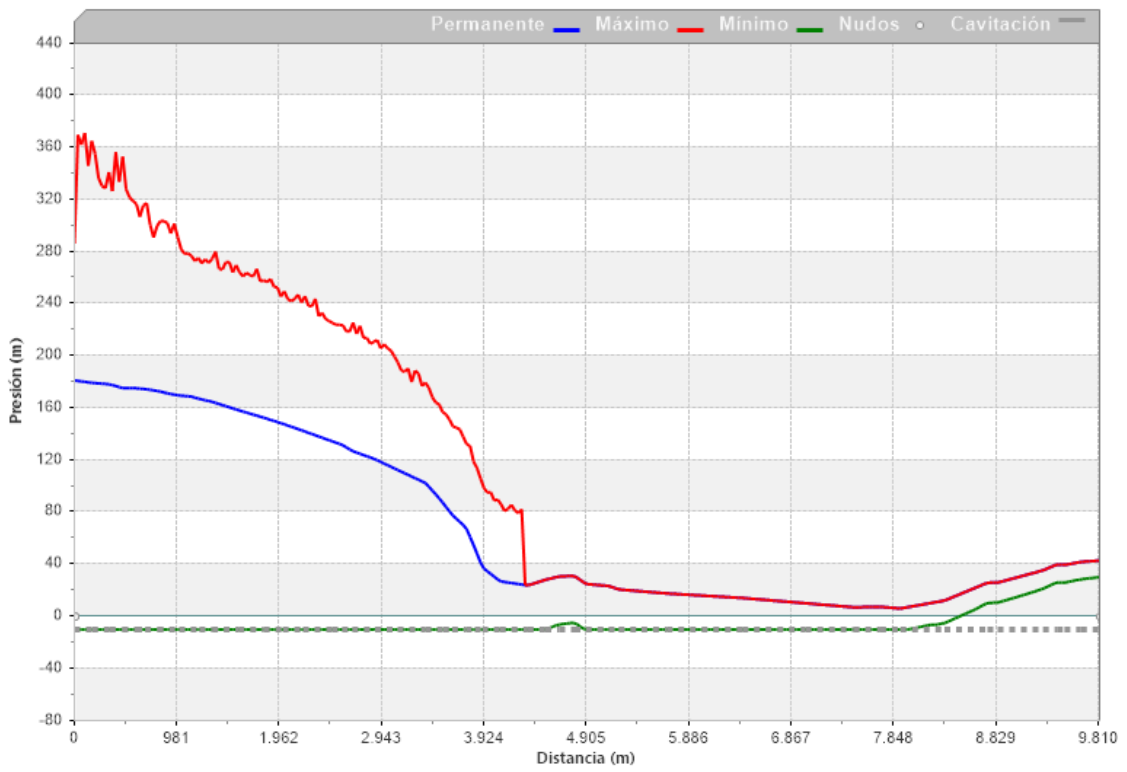


Figura 4-22. Presiones máximas y mínimas en régimen transitorio (captura de pantalla del software Allievi).

Como se observa en la Figura 4-22, la presión máxima alcanzada en la tubería de impulsión durante el régimen transitorio es del orden de 370 mca (aproximadamente 37 bar). Por otro lado, la curva de presiones mínimas indica que, en gran parte de la conducción, los valores descienden hasta la presión de vapor, lo que evidencia condiciones de cavitación a lo largo del sistema.

A continuación, se calculan las presiones máximas que soporta la tubería de acero al carbono API 5L grado x56, Schedule 20, de 16 pulgadas de diámetro nominal. Para esto se siguen los lineamientos del código (ASME B31.3, 2022).

Se parte de la fórmula que brinda el código para el cálculo del espesor mínimo de diseño. Como en este caso se dispone del espesor, se despeja la presión máxima que puede soportar la tubería. La ecuación en cuestión es:

$$t = \frac{P D}{2(S E W + P \gamma)} \quad (4-8)$$

donde,

- P = presión interna manométrica.
- D = diámetro externo del tubo.
- S = valor de esfuerzo del material obtenido de la Tabla 7.
- E = 1, factor de calidad de junta obtenido de la Tabla 8.
- W = factor de reducción de la resistencia de la junta de soldadura.
- γ = coeficiente obtenido de la Tabla 9 válida para valores de $t < D/6$.

Tabla 7. Requisitos de tensión (API 5L, 2018)

Grade	Yield Strength, Minimum		Ultimate Tensile Strength, Minimum		Elongation in 2 in. (50.8 mm), Minimum, Percent
	psi	MPa	psi	MPa	
A25	25,000	(172)	45,000	(310)	a
A	30,000	(207)	48,000	(331)	a
B	35,000	(241)	60,000	(414)	a
X42	42,000	(290)	60,000	(414)	a
X46	46,000	(317)	63,000	(434)	a
X52	52,000	(359)	66,000	(455)	a
X56	56,000	(386)	71,000	(490)	a
X60	60,000	(414)	75,000	(517)	a
X65	65,000	(448)	77,000	(531)	a
X70	70,000	(483)	82,000	(565)	a

Tabla 8. Factores de calidad básicos para juntas longitudinales soldadas en tuberías (ASME B31.3, 2022)

Estos factores de calidad son determinados de acuerdo con el párrafo 302.3.4(a). vea también párrafo 302.3.4(b) y Tabla 302.3.4 para factores de calidad incrementados aplicables a casos especiales. Las especificaciones, excepto API, son ASTM.

No. espec.	Clase (o tipo)	Descripción	$E_j(2)$	Notas. Apéndice A
Acero carbono				
API 5L	...	Tubería sin costura	1.00	...
		Tubería soldada por resistencia eléctrica	0.85	...
		Tubería soldada por fusión eléctrica, doble tope, cordón recto o en espiral	0.95	...
		Soldada a tope en horno	0.60	...

Tabla 9. Valores de coeficientes γ para $t < D/6$ (ASME B31.3, 2022)

Materiales	Temperatura, °C (°F)					≤ 621 (1.150 y mayores)
	≤ 482 (900 y menores)	510 (950)	538 (1.000)	566 (1.050)	593 (1.100)	
Aceros Ferríticos	0,4	0,5	0,7	0,7	0,7	0,7
Aceros Austeníticos	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5	0,7
Otros metales dúctiles	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Hierro Fundido	0,0

Realizando los cálculos correspondientes, se obtiene una presión admisible $P_{adm} = 147 \text{ bar}$. Por lo tanto, la presión máxima registrada en el transitorio (37 bar) se encuentra muy por debajo de este valor, lo que evidencia que no existen inconvenientes en relación con las sobrepresiones, por lo tanto, para este proyecto, el enfoque de la protección está en mitigar la presión negativa.

A continuación, en la Figura 4-23 se muestra la variación de presión en función del tiempo para el nodo 31, ubicado al inicio de la tubería de impulsión, estación 0 m. Se observa que las sobrepresiones generadas son inferiores a las admisibles, por lo que no representan un inconveniente. Sin embargo, en cuanto a las depresiones, los valores alcanzan la presión de vapor, indicando riesgo de cavitación. Cabe destacar además que, la presión tiende a estabilizarse en un valor aproximado a 120 mca, lo cual resulta coherente, ya que corresponde a la presión estática generada por la columna de agua entre la cota al comienzo del acueducto y el punto de máxima elevación.

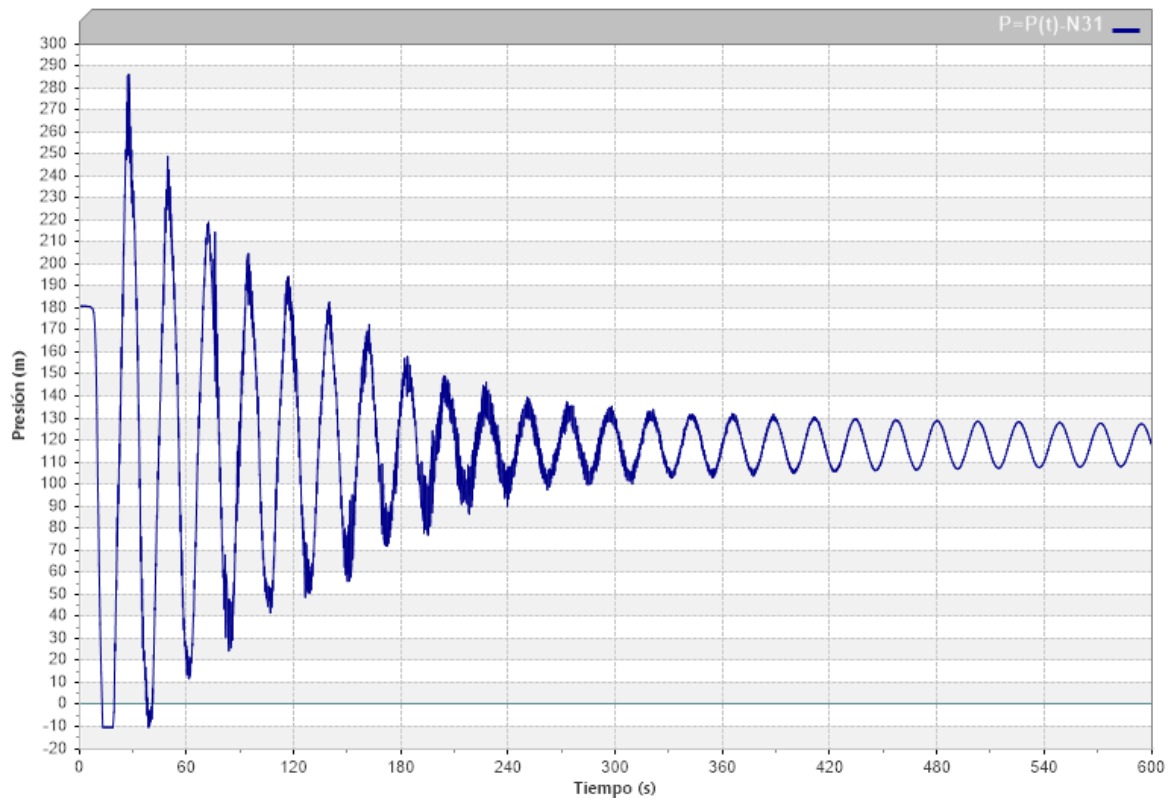


Figura 4-23. Presión en función del tiempo N31, estación 0 m (captura de pantalla del software Allievi).

En resumen, el análisis de los resultados obtenidos mediante el software Allievi permite comprender el comportamiento hidráulico del sistema tanto en régimen permanente como en régimen transitorio. Se comprobó que, si bien las sobrepresiones se mantienen dentro de valores admisibles, las depresiones alcanzan la presión de vapor en gran parte de la conducción, lo que evidencia la necesidad de incorporar medidas para mitigar o atenuar los efectos del golpe de ariete. En la siguiente sección se presentan distintas alternativas de protección, con el fin de garantizar un funcionamiento seguro y confiable del sistema.

4.4 Selección de protecciones ante efectos transitorios

A partir de lo analizado, se procede a evaluar distintas alternativas para la protección contra el golpe de ariete. El objetivo es identificar alternativas viables que permitan atenuar las sobrepresiones, pero principalmente evitar las depresiones generadas por el paro repentino de las bombas.

Existen diferentes dispositivos que permiten atenuar los efectos del golpe de ariete, cada uno con ventajas, desventajas y distintos grados de viabilidad. Para evaluar su comportamiento en el sistema, se utiliza el software Allievi, analizando cómo incide la incorporación de cada dispositivo en los resultados de presiones máximas y mínimas generadas.

En términos generales, durante los períodos de depresión se suministran caudales adicionales desde el exterior para reducir las bajas presiones, mientras que en los períodos de sobrepresión parte del caudal es expulsado hacia el exterior o hacia algún recipiente. La mayoría de los dispositivos antiarriete conocidos, y que serán analizados a continuación, cumplen con estas funciones. Generalmente la protección contra los transitorios puede lograrse de diversas formas y con diferentes medios. La tarea es seleccionar la variante más conveniente. El criterio determinante más frecuentemente es el económico, es decir, se busca la variante con un mínimo de costos para la protección, mantenimiento, etc., manteniendo el golpe de ariete dentro de los límites permisibles (Conagua, 2007).

Con el fin de seleccionar la alternativa de protección más adecuada para el sistema, se analizan distintos dispositivos, considerando tanto su comportamiento hidráulico como su viabilidad. El enfoque adoptado consiste en comenzar por las opciones más simples y económicas, que pueden representar soluciones al problema, aunque con limitada efectividad, y luego avanzar hacia los dispositivos más complejos y de mayor costo, pero capaces de dar una respuesta más eficiente al golpe de ariete. De esta manera se comparan las distintas alternativas para luego justificar la selección final en función de los resultados obtenidos.

Como criterio de evaluación de las alternativas de protección, se establece un límite inferior admisible de presión durante los transitorios. Si bien el límite teórico está dado por la presión de vapor del agua, -10 mca manométricos, en la práctica del diseño hidráulico se adoptan valores conservadores con el fin de garantizar un margen de seguridad adecuado.

En particular, en conducciones de materiales sintéticos (PVC, PEAD u otros) los fabricantes recomiendan limitar la presión mínima admisible a valores del orden de -5 mca. En el presente trabajo, y aunque la conducción analizada es de acero, se adopta dicho valor como criterio de referencia, dado que los fenómenos asociados a presiones negativas elevadas, como la separación de columna y la cavitación, son de naturaleza hidráulica y no dependen exclusivamente del material de la tubería. De este modo, se considera aceptable aquellas configuraciones de protección que permitan mantener las presiones mínimas por encima de -5 mca en toda la conducción, asegurando un funcionamiento seguro y confiable del sistema.

4.4.1 Válvula Anticipadora de Onda (VAO)

En este primer caso se analiza la incorporación de una válvula anticipadora de onda. La misma es un dispositivo hidráulico automático que se instala en derivación de la línea principal y cuya función es proteger la conducción frente a los efectos del golpe de ariete generado por el paro repentino de las bombas. La válvula se abre instantáneamente con la parada de la bomba, para disipar la onda de alta presión de retorno. La válvula se cierra lentamente una vez que la presión ha vuelto a su nivel estático. También funciona como válvula de alivio de presión (Aquestia, s.f).

El software Allievi no cuenta con un modelo específico de válvula anticipadora de onda. Por este motivo, se representa su funcionamiento mediante una válvula de regulación tipo globo configurada para reproducir las características principales de la VAO: apertura rápida ante la depresión inicial, evacuación un caudal suficiente y cierre lento y controlado. En la Figura 4-24 se muestra la configuración adoptada, la cual fue dimensionada siguiendo las recomendaciones de (ARMAS, 2018), detalladas en el ANEXO II: Características de las bombas. En la Figura 4-25 se observa la maniobra de apertura y cierre de la válvula, mientras que en la Figura 4-26 se presenta el esquema del sistema con la válvula instalada en derivación de la línea principal.

Válvula Regulación - Datos básicos								Maniobra	Tabulada
Nombre	Ni	Nf	Z (m)	DN (mm)	k Ramal	Tipo	Modelo	Tipo	Tabla
Rg1	N30	N33	451,53	150	1,1	De globo		Tabulada	
VAO	N34	N35	378,12	150	5,6	De diafragma		Tabulada	

Figura 4-24. Configuración VAO (captura de pantalla del software Allievi).

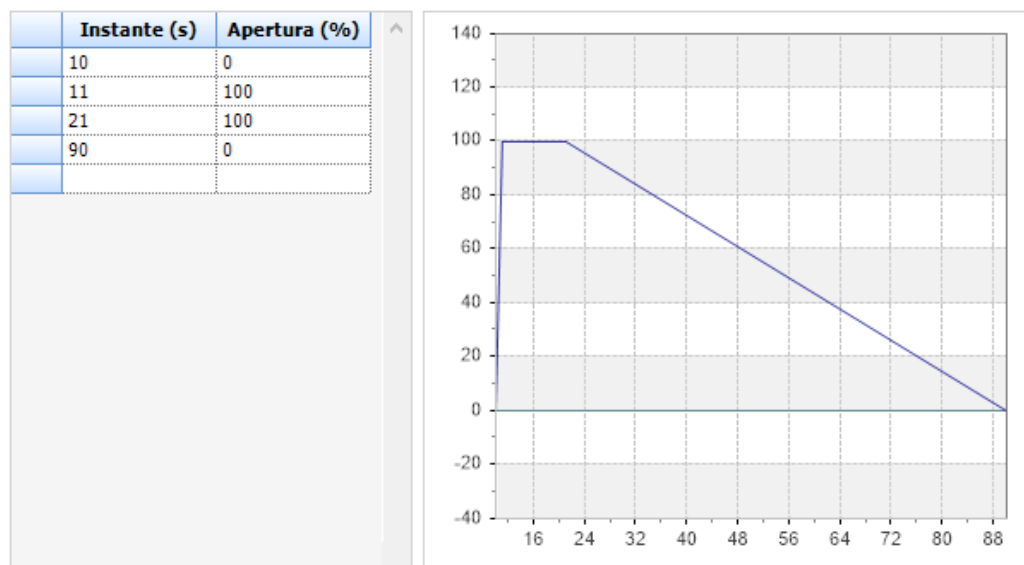


Figura 4-25. Maniobra de apertura y cierre de VAO (captura de pantalla del software Allievi).

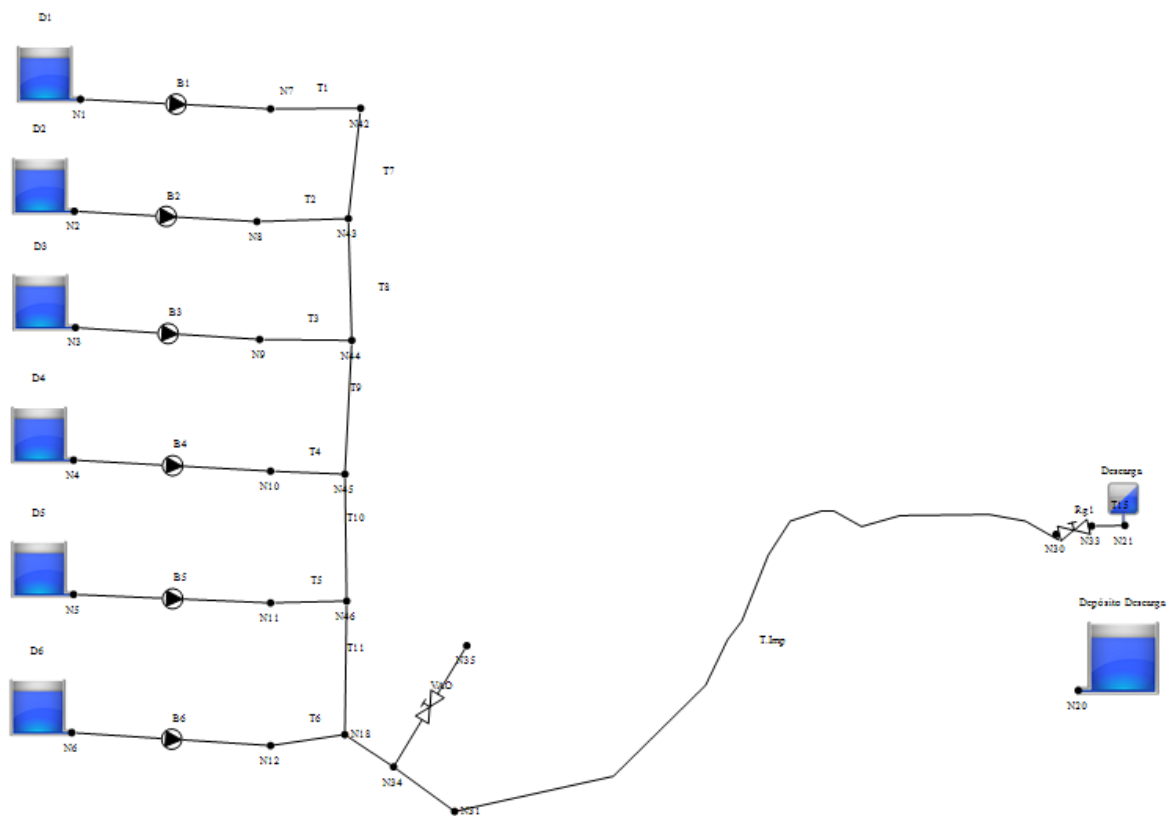


Figura 4-26. Esquema de la instalación con VAO (captura de pantalla del software Allievi).

Luego, se procede a realizar la simulación del transitorio, cuyos resultados se muestran en la Figura 4-27. Tal como era de esperarse, la válvula anticipadora de onda atenúa un poco las sobrepresiones, que de por sí no representaban un inconveniente significativo, pero no tiene efecto sobre las depresiones generadas durante el transitorio. En consecuencia, se concluye que esta alternativa no representa una solución viable al problema de las bajas presiones generadas en el sistema.

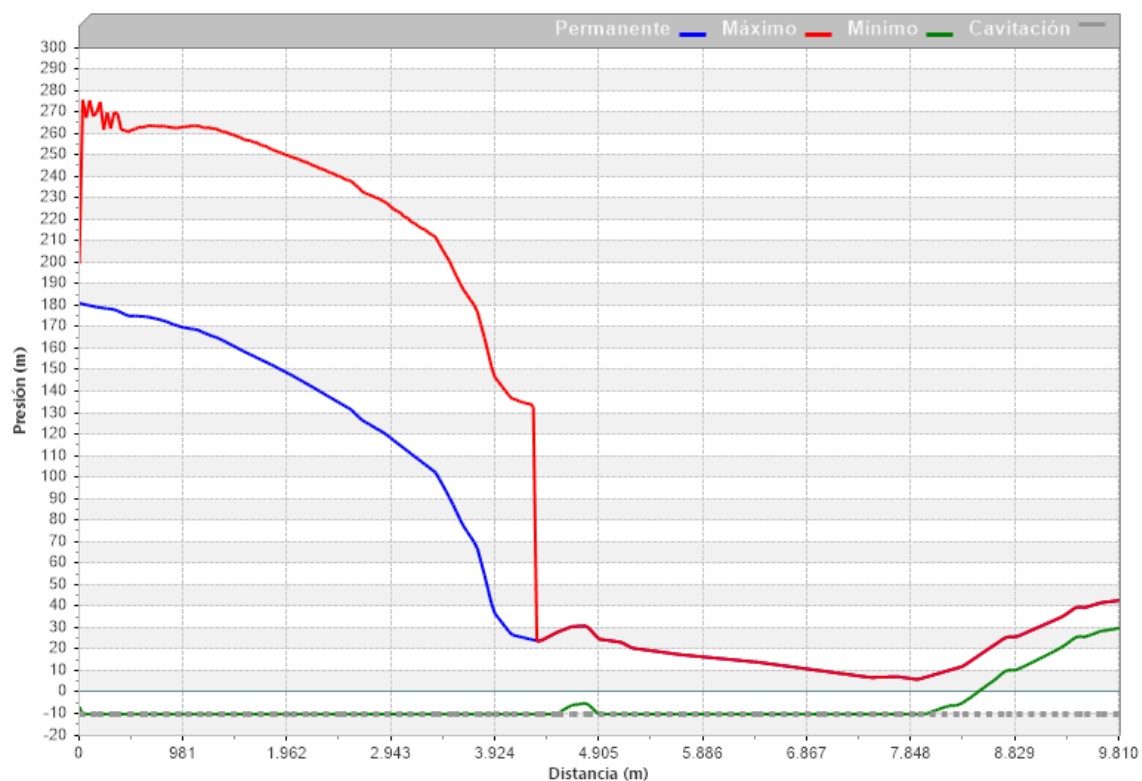


Figura 4-27. Presiones máximas y mínimas con VAO, Caso 1 (captura de pantalla del software Allievi).

4.4.2 Válvulas de aire (ventosas)

Para el segundo caso se considera la incorporación de válvulas de aire. Las ventosas permiten la entrada de aire atmosférico a la conducción en el punto en que se encuentran instaladas cuando la presión tiende a situarse por debajo de la presión atmosférica. Posteriormente, si la presión aumenta hasta superar la presión exterior, el aire es expulsado (Conagua, 2007).

Su función principal es evitar la formación de bolsas de aire durante el llenado, facilitar la evacuación de aire acumulado en puntos altos de la conducción y permitir la entrada de aire en situaciones de depresión, reduciendo así el riesgo de cavitación y colapso de la tubería.

Siguiendo las recomendaciones de la norma (AWWA M51, 2016), que se detallan a continuación, se disponen un total de 12 ventosas a lo largo de la conducción:

- Puntos altos: para permitir la ventilación durante el llenado, durante la operación normal y para la entrada de aire que proporcione protección contra vacío.
- Tramos horizontales largos: se deben considerar ventosas cada 400 a 800 metros.
- Descensos largos: se deben considerar ventosas cada 400 a 800 metros.

- Ascensos largos: se deben considerar ventosas cada 400 a 800 metros.
- Disminución en una pendiente ascendente.

Para el dimensionamiento de las válvulas se utilizan los diagramas provistos por los fabricantes, en los cuales se ingresa con el caudal de aire y con la presión diferencial, que para fines de diseño se adopta un valor entre 0,3 y 0,4 bar. El caudal de aire se estima aplicando la fórmula de Hazen-Williams (AWWA M11, 2017):

$$Q = 0,278 C D^{2,73} J^{0,54} \quad (4-9)$$

Siendo:

- Q = caudal [m^3/s]
- $C = 145$, coeficiente de Hazen-Williams [adimensional]
- D = diámetro interior de la tubería [m]
- J = pendiente de la tubería [m/m]

De este modo se obtiene un caudal de $Q = 45m^3/min$. Ingresando a las curvas de la Figura 4-28, proporcionadas por el fabricante (IRUA, s.f), se determina que el diámetro nominal requerido es DN100.

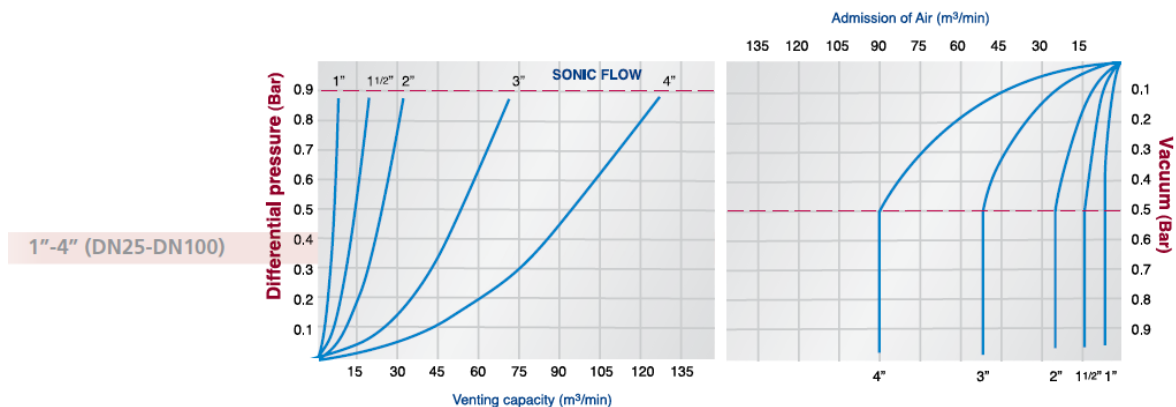


Figura 4-28. Curvas de expulsión y admisión de aire de ventosas (IRUA, s.f)

Dado que el software no cuenta de un modelo para ventosas de ese tamaño, se genera un nuevo fichero incorporando las curvas de admisión y expulsión de aire correspondientes al modelo DN100 dadas por el fabricante, como se observa en la Figura 4-29.

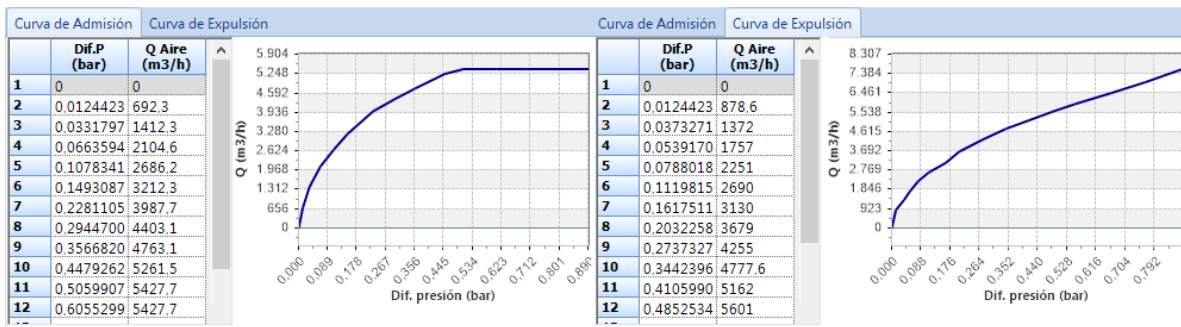


Figura 4-29. Configuración de nuevo fichero de ventosas (captura de pantalla del software Allievi).

A continuación, se realiza la simulación del transitorio en el sistema, y se obtienen las curvas de altura piezométrica, Figura 4-30, y de presiones máximas y mínimas, Figura 4-31.

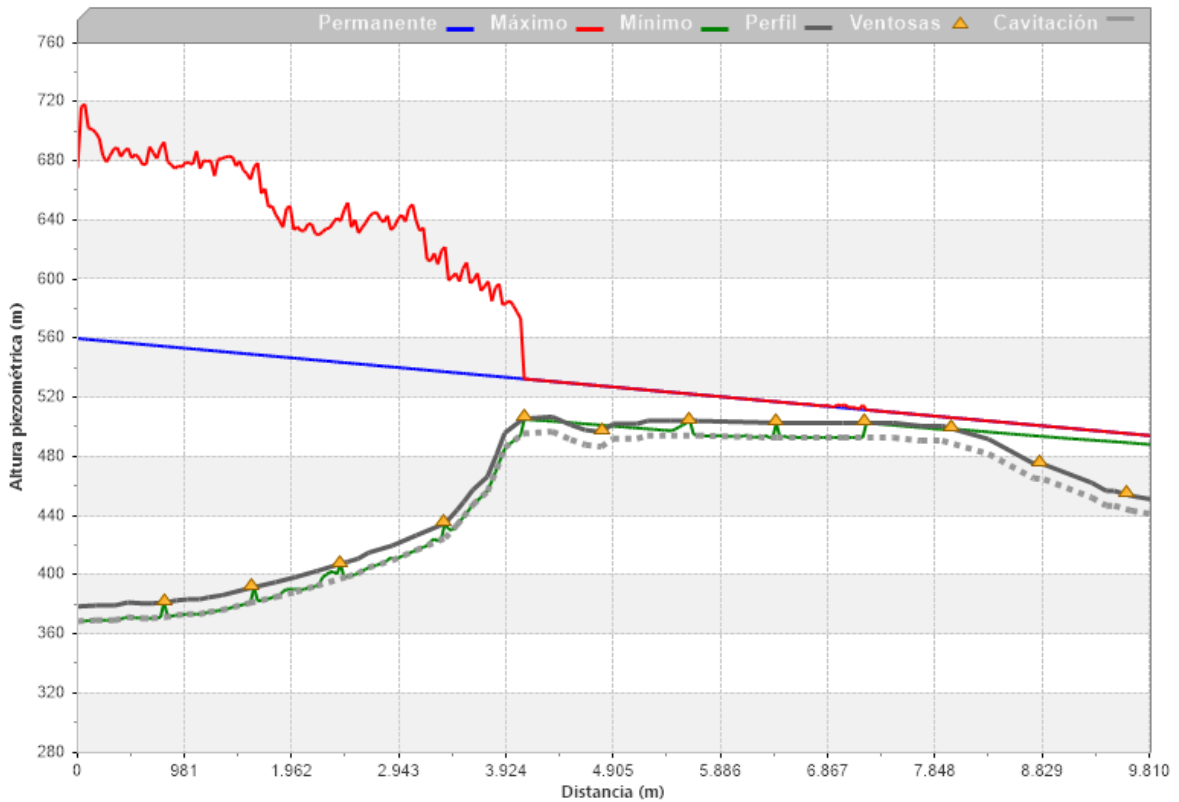


Figura 4-30. Altura piezométrica con 12 ventosas, Caso 2 (captura de pantalla del software Allievi).

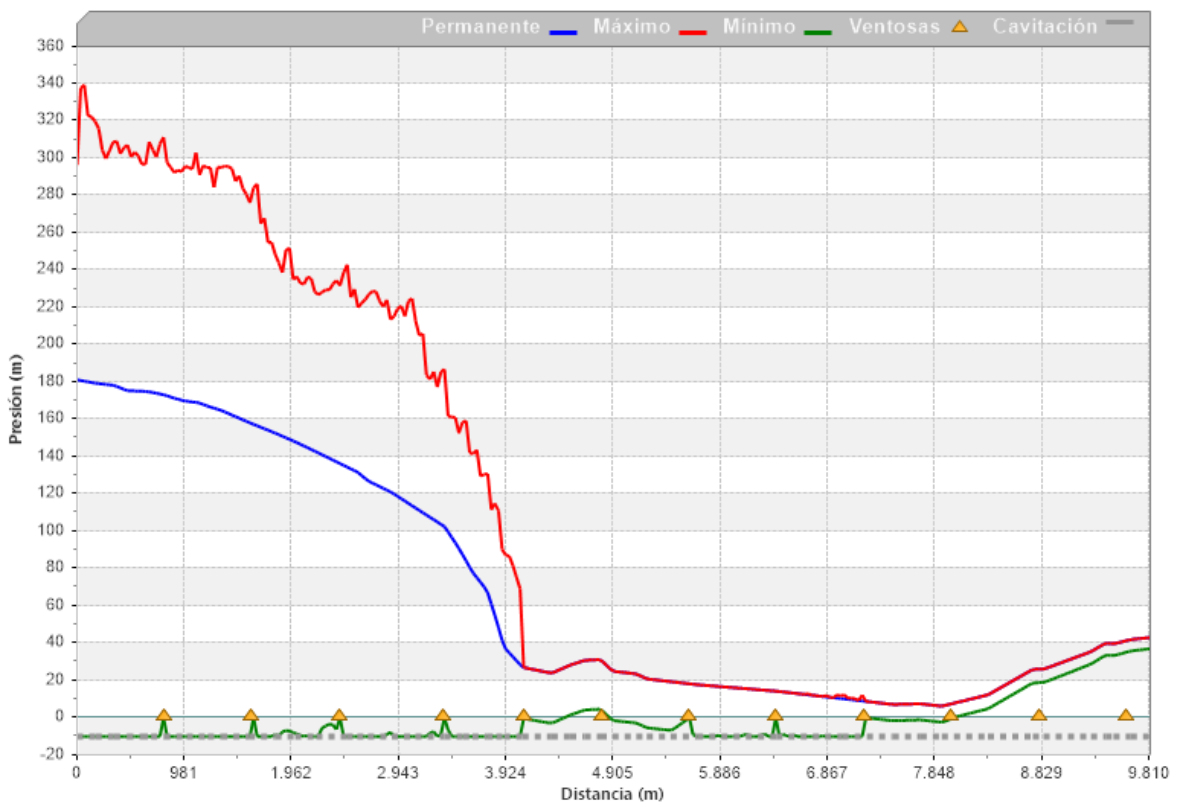


Figura 4-31. Presiones máximas y mínimas con ventosas instaladas, Caso 2 (captura de pantalla del software Allievi).

Los resultados muestran que el problema de bajas presiones a lo largo de la conducción no se resuelve, aunque se observa una mejora localizada en los puntos de instalación de las ventosas. En consecuencia, las ventosas no resultan una alternativa viable por sí solas, aunque podrían considerarse en combinación con otros.

4.4.3 Calderín

El calderín (tanque de aire comprimido) es uno de los dispositivos más utilizados para el control de transitorios, particularmente para la protección de instalaciones de bombeo frente al fallo de suministro eléctrico. Consiste en un tanque cerrado, unido a la tubería, que contiene aire comprimido en su interior. Su principio de funcionamiento se basa en la compresibilidad de ese aire: durante una sobrepresión, el tanque absorbe parte del exceso de energía comprimiendo el aire, mientras que durante depresiones libera agua, compensando la caída de presión en la conducción (Conagua, 2007).

De esta manera, el calderín actúa como un elemento de almacenamiento de energía, amortiguando tanto las sobrepresiones como las depresiones. Su eficacia depende principalmente del volumen de aire en el tanque, de la presión de precarga y de la ubicación dentro del sistema.

Como tercer caso se propone la instalación de un calderín al comienzo de la tubería de impulsión, tal como se observa en la Figura 4-32.

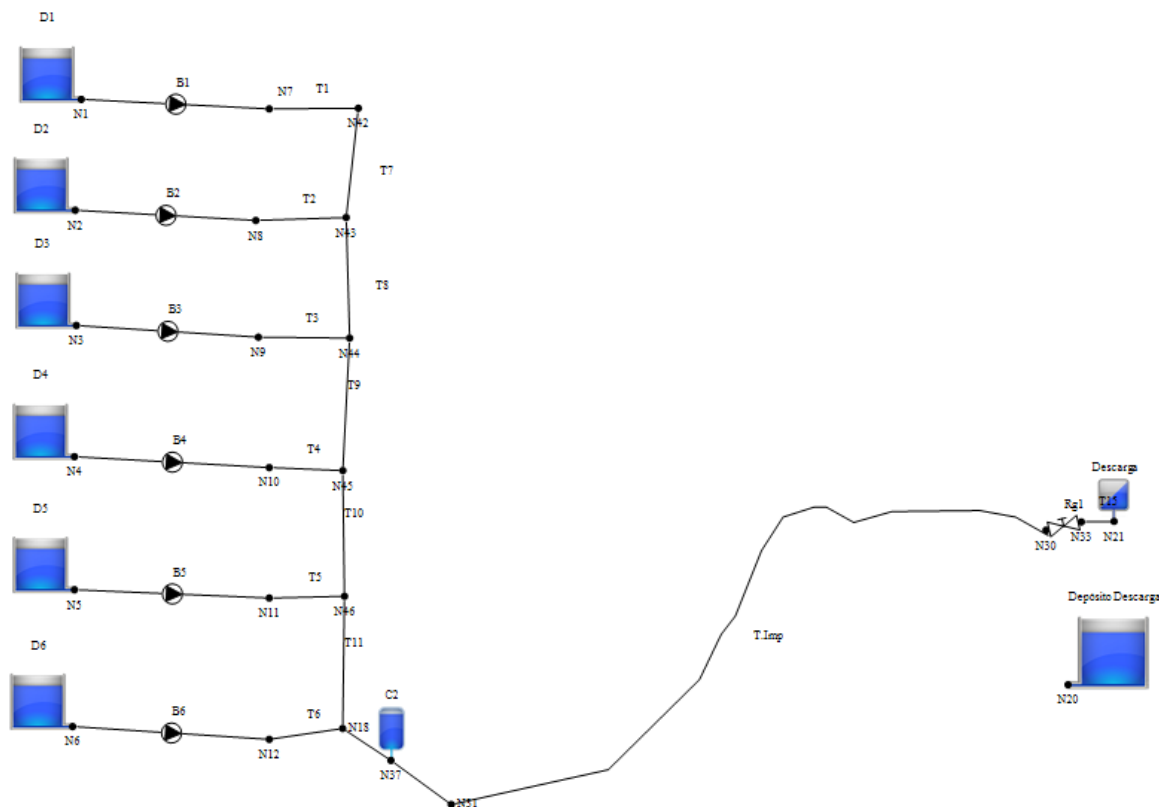


Figura 4-32. Esquema de la instalación con calderín, Caso 3 (captura de pantalla del software Allievi).

Para el cálculo de las dimensiones del calderín y de la presión de hinchado, así como también el coeficiente de pérdidas de entrada y salida del tanque, se utiliza el asistente del software, obteniéndose los valores de la Figura 4-33.

Características físicas del calderín										Ramal de unión			Pérdidas		
D (m)	L (m)	V (m ³)	Pred	Rug (mm)	Zb (m)	Posición	Vejiga	P (bar)	EP	D (mm)	L (m)	KUG (mm)	K sal	K ent	
1,8	3,41	8,68	...	0,046	378,12	Vertical	Si	5,45	Calc.	1,2	200	1	0,046	206,47	311,75

Figura 4-33. Características del calderín obtenidas por el asistente del software (captura de pantalla del software Allievi).

Se procede a realizar la simulación del transitorio para evaluar las presiones máximas y mínimas obtenidas, dando como resultado las curvas de la Figura 4-34. Como puede observarse, las presiones máximas disminuyen con respecto a la instalación sin protecciones, mientras que el problema de depresiones se atenúa únicamente en el primer tramo de la conducción, hasta aproximadamente los 1800 metros. A partir de esa distancia, continúa el problema de presiones por debajo de la presión de vapor, lo que resulta que el calderín no resulta suficiente por sí solo para proteger todo el acueducto.

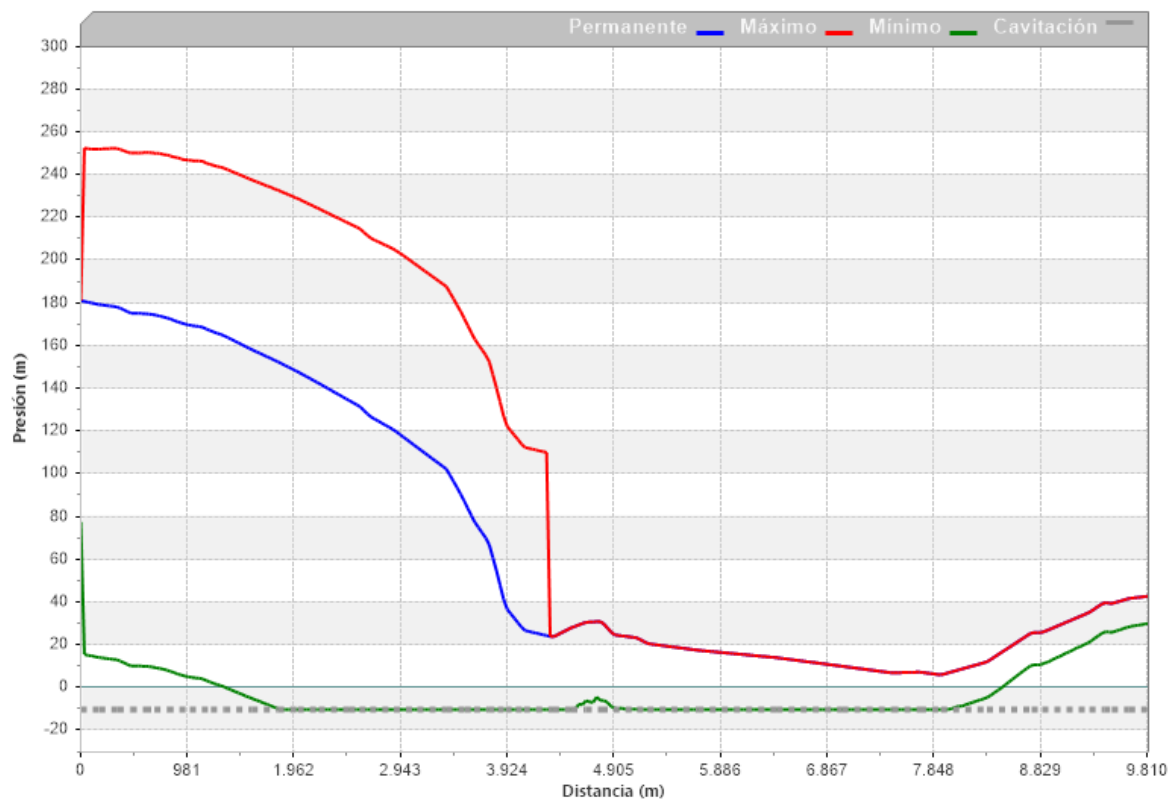


Figura 4-34. Presiones máximas y mínimas con calderín, Caso 3 (captura de pantalla del software Allievi).

Con el fin de evaluar la influencia del número y las dimensiones de los calderines en la respuesta del sistema al transitorio, se realizan distintas simulaciones incrementando progresivamente la cantidad de dispositivos y variando sus volúmenes.

En el Caso 3.a, correspondiente a la instalación de dos calderines, se observa una mejora en el tramo inicial del acueducto, reduciéndose las depresiones respecto al caso de un solo calderín. Al incorporar un tercer calderín, Caso 3.b, se obtiene una mejora más significativa, las depresiones se eliminan hasta la zona de la loma, correspondiente al punto de máxima elevación del perfil, estación 4000 m. Sin embargo, a partir de dicha zona las presiones mínimas continúan por debajo de los límites admisibles. En la Figura 4-35 se observa el comportamiento del sistema con tres calderines.

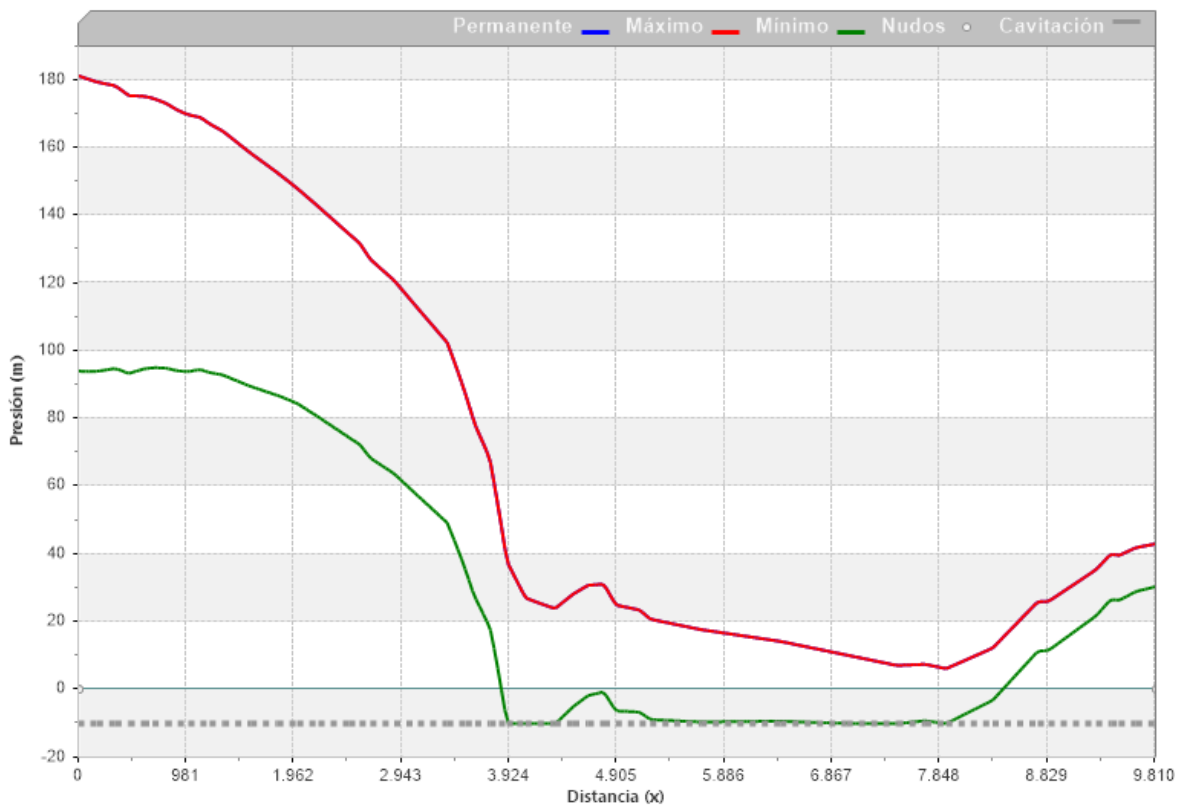


Figura 4-35. Comportamiento del sistema con tres calderines, Caso 3.b (captura de pantalla del software Allievi).

De manera complementaria, en el Caso 3.c se analiza el comportamiento del sistema con un solo calderín, variando sus dimensiones. Los resultados muestran la misma tendencia observada al aumentar el número de calderines, ya que las mejoras se limitan al tramo inicial hasta la loma (estación 4000 m) y no logran resolver las depresiones en el resto de la conducción.

Finalmente, se realizan nuevas simulaciones incrementando la cantidad de calderines (cuatro, cinco, etc.) observándose que, a partir de tres dispositivos, el comportamiento del sistema no presenta mejoras significativas, dado que se observan las mismas curvas de presiones en los distintos casos.

Este análisis permite concluir que el incremento en el número o en el tamaño de calderines no representa una solución suficiente por sí sola para eliminar las depresiones a lo largo de toda la conducción, aunque sí ayuda a mejorar el comportamiento en el tramo inicial.

4.4.4 Tanque unidireccional

El tanque unidireccional es un dispositivo que aporta agua a la tubería en los periodos de depresión del transitorio en puntos altos la tubería, con el objetivo de evitar los vacíos y las separaciones de columna de líquido. Lleva una válvula de no retorno instalada en el tubo de conexión con la tubería,

que impide el flujo desde la tubería hacia el tanque. Su función es permitir la entrada de agua hacia la tubería, compensando la caída de presión.

En el Caso 4 se propone la instalación de un tanque unidireccional ubicado a una distancia de 4000 metros desde el inicio del acueducto. Se realizan distintas simulaciones variando su posición a lo largo de la conducción y analizando los resultados obtenidos, determinándose que dicha ubicación resulta la alternativa más adecuada para su funcionamiento.

Las dimensiones del tanque y del ramal de unión se presentan en la Figura 4-36. A continuación, se realiza la simulación del régimen transitorio, obteniéndose las curvas de presión mostradas en la Figura 4-37.

Tanque Unidireccional - Datos básicos								Ramal de unión				
Nombre	Nudo	Zu (m)	Act	D (m)	Rug (mm)	Zb (m)	Niv.max (m)	D (mm)	L (m)	Rug (mm)	K sal	Calc K
Tn3	N48	501,66	<input checked="" type="checkbox"/>	3	0,046	501,66	3	200	2	0,046	218	...

Figura 4-36. Dimensiones del tanque unidireccional (captura de pantalla del software Allievi).

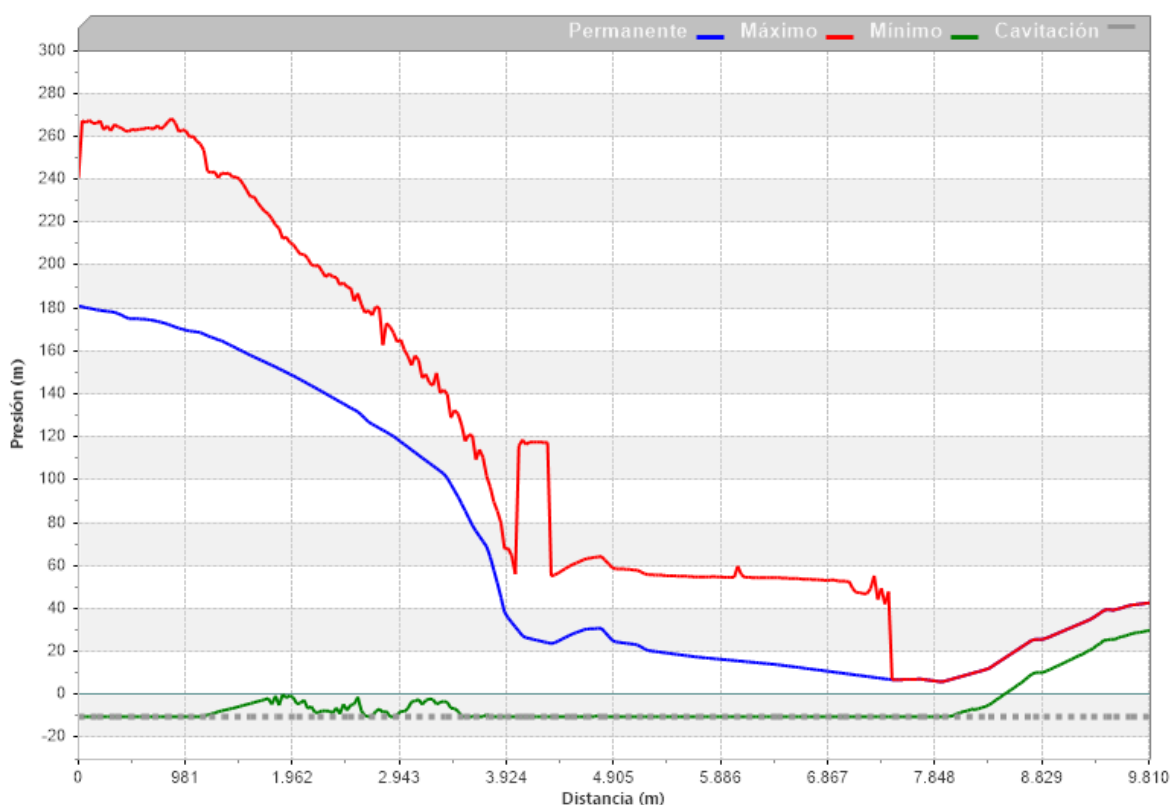


Figura 4-37. Presiones máximas y mínimas durante el transitorio con tanque unidireccional, Caso 4 (captura de pantalla del software Allievi).

Como se observa en los resultados, la incorporación del tanque unidireccional no logra resolver el problema de las depresiones generadas durante el transitorio. Por lo tanto, se descarta su utilización como único medio de control para mitigar los efectos del golpe de ariete.

4.4.5 Calderines y tanques unidireccionales

Como se determinó en los resultados y análisis previos, los dispositivos evaluados en forma individual no logran resolver completamente el problema de las depresiones generadas durante el régimen transitorio. Por lo tanto, se procede a combinar los distintos elementos de protección con el objetivo de atenuar más eficazmente las variaciones de presión y, luego, determinar la alternativa más viable.

En el Caso 5 se propone la combinación de un calderín y un tanque unidireccional. Dado que el calderín demostró ser eficaz en el tramo inicial de la conducción, se propone su instalación allí, complementando con un tanque unidireccional ubicado en las proximidades a la loma, en la estación 4200 m.

En la Figura 4-38 se presentan las curvas de presión obtenidas para esta configuración. Como se observa, la combinación de ambos dispositivos mejora notablemente el comportamiento del sistema en el tramo inicial, donde las presiones se mantienen en valores seguros. Sin embargo, a partir de la loma en adelante, continúa el problema de las depresiones, lo que indica que esta combinación no representa una solución completamente efectiva para toda la conducción.

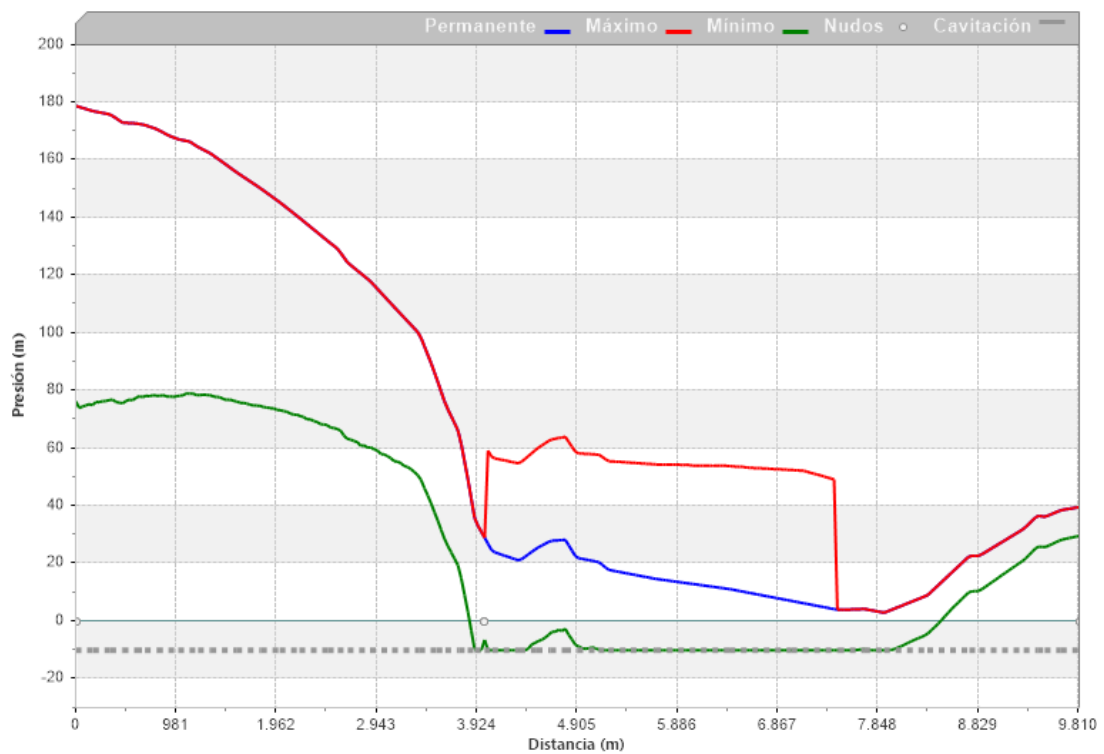


Figura 4-38. Presiones máximas y mínimas con calderín y tanque unidireccional, Caso 5 (captura de pantalla del software Allievi).

A continuación, se proponen variantes al Caso 5 con el objetivo de mejorar el comportamiento del sistema frente a las depresiones.

En el Caso 5.a se propone la incorporación de un segundo tanque unidireccional, manteniendo el primero ubicado en la loma, a una distancia aproximada de 4200 metros desde el inicio de la conducción, y el segundo ubicado a los 7000 metros. Ambos tanques se dimensionan con las mismas características constructivas que en el caso anterior.

En la Figura 4-39 se presentan las curvas obtenidas para esta configuración. Se observa una mejora significativa en las presiones mínimas a lo largo del acueducto. El punto más crítico se localiza en la zona de máxima elevación, donde se alcanza una presión mínima de -6,53 mca. Sin embargo, en la mayor parte de la conducción las presiones mínimas se mantienen por encima de -5 mca.

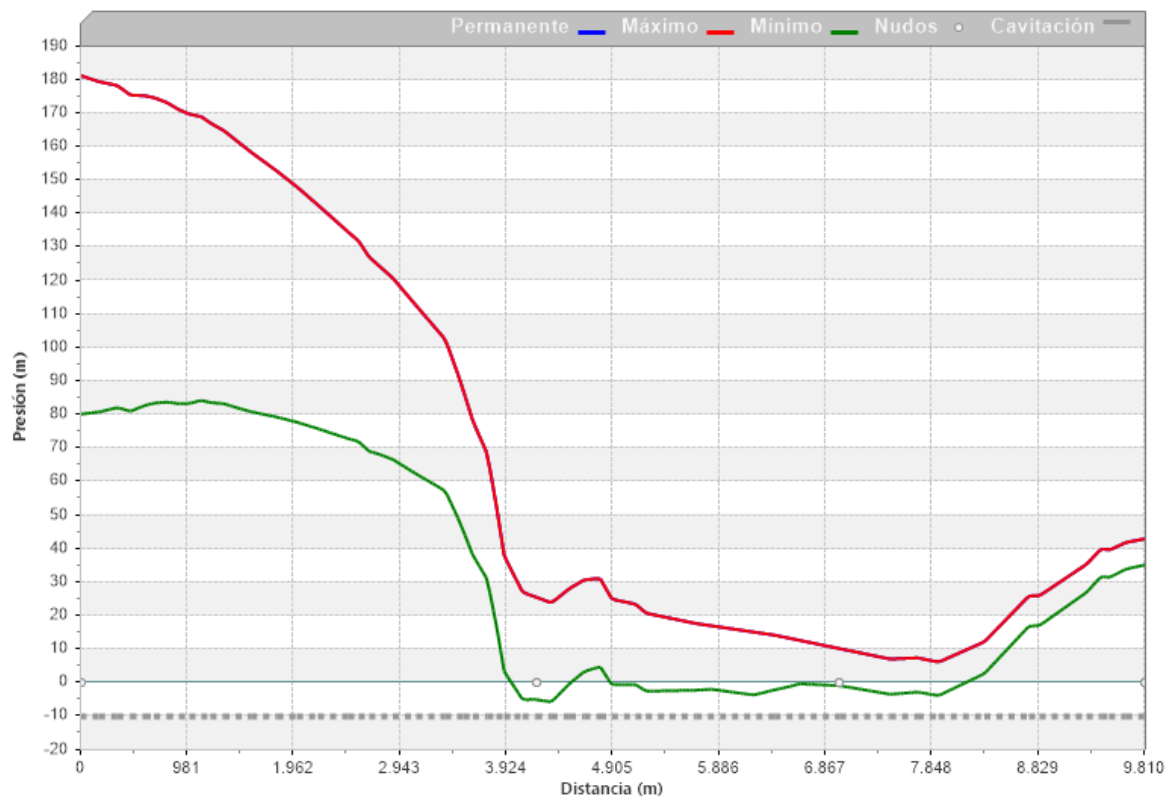


Figura 4-39. Presiones máximas y mínimas con calderín y dos tanques unidireccionales, Caso 5.a (captura de pantalla del software Allievi).

En el Caso 5.b se propone modificar las dimensiones de los tanques y analizar los nuevos resultados obtenidos. Se mantiene el diámetro de 3 metros, pero se modifica el nivel máximo del tanque a 8 metros.

Las curvas obtenidas para esta configuración se muestran en la Figura 4-40, donde puede observarse que el aumento las dimensiones de los tanques produce una mejora en las presiones mínimas, alcanzándose un valor mínimo de -3,8 mca.

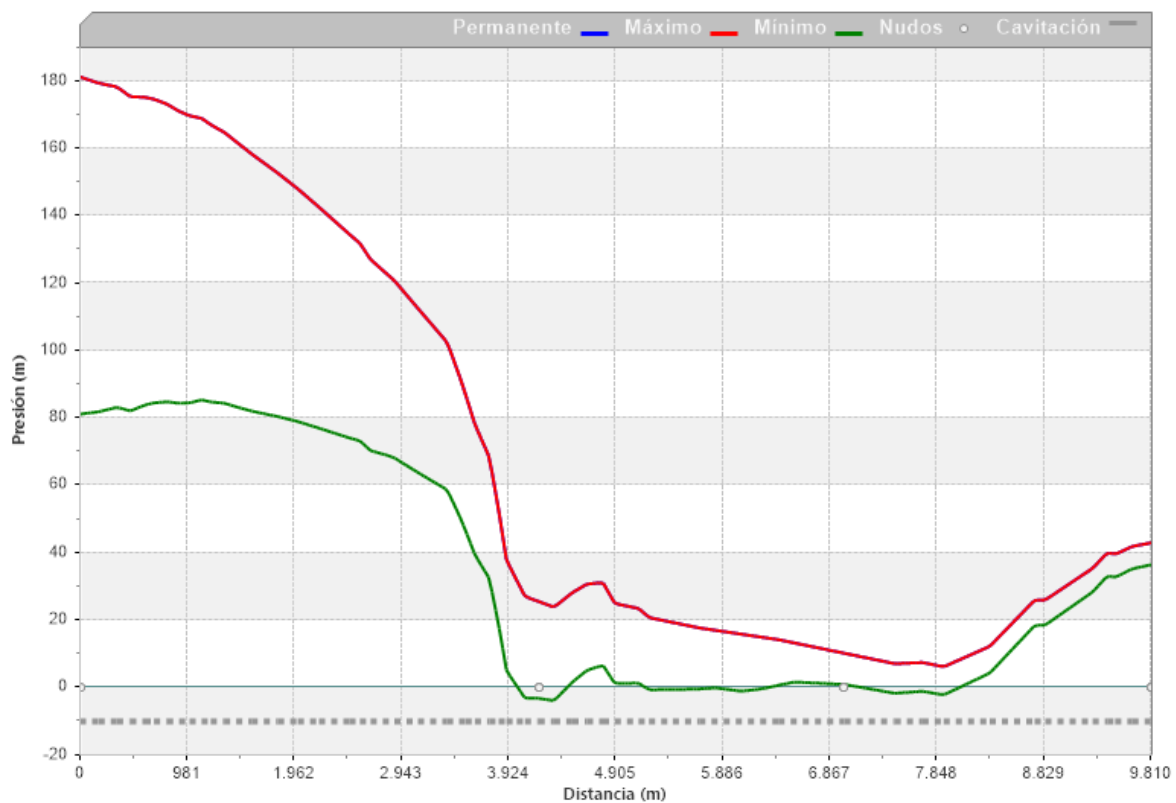


Figura 4-40. Presiones con calderín y dos tanques unidireccionales, Caso 5.b (captura de pantalla del software Allievi).

En base a estos resultados, la combinación de un calderín instalado a la salida de la estación de bombeo y dos tanques unidireccionales ubicados en los puntos altos del acueducto se considera una alternativa eficaz para mitigar las depresiones originadas durante el régimen transitorio.

Sin embargo, esta alternativa presenta limitaciones en cuanto a su viabilidad constructiva y económica. La instalación de los tanques requiere de obras civiles, como la construcción de estructuras de soporte, además de necesitar un mantenimiento más complejo. También, los costos asociados son elevados, tanto por la fabricación como por el transporte hacia la zona propuesta.

Por estos motivos, si bien la solución es efectiva desde el punto de vista hidráulico, no se considera la opción más conveniente en términos prácticos y económicos.

4.4.6 Calderines y ventosas

Considerando los análisis previos, se propone como sexto caso evaluar la combinación de un calderín con ventosas como una alternativa para mitigar los efectos del golpe de ariete. La utilización conjunta de estos dispositivos permite aprovechar la acción complementaria de cada uno: mientras que el calderín aporta volumen de agua para amortiguar las depresiones generadas por el paro repentino de

las bombas, las ventosas facilitan la admisión y expulsión de aire, reduciendo la formación de presiones negativas y atenuando las oscilaciones de presión a lo largo de la conducción.

En este tipo de configuraciones, la presencia de ventosas permite reducir las dimensiones requeridas del calderín, ya que parte del control de las depresiones se logra mediante la admisión de aire en los puntos críticos del perfil. De este modo, se obtiene una solución más eficiente desde el punto de vista hidráulico y, a su vez, se disminuyen los costos asociados a la instalación de dispositivos de gran volumen.

Para determinar la ubicación más eficiente, se realizaron distintas simulaciones variando sus posiciones a lo largo de la conducción, hasta encontrar la disposición que brinde la mejor respuesta frente a las depresiones. Como resultado, se determinaron las ubicaciones óptimas de 4300 y 6800 metros desde el inicio del acueducto. Las ventosas seleccionadas son las mismas analizadas previamente, de diámetro nominal DN 100, cuyas curvas características fueron incorporadas al software Allievi. En la Figura 4-41, se muestra la ubicación óptima y el tipo de ventosas seleccionadas.

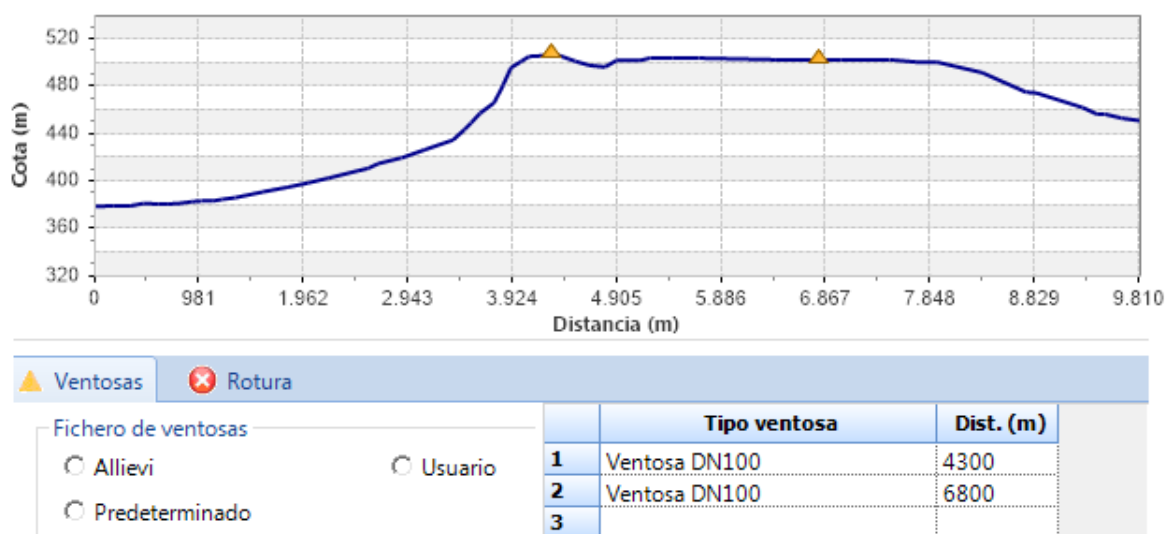


Figura 4-41. Ubicación y tipo de ventosas, Caso 6 (captura de pantalla del software Allievi).

Luego de la simulación del transitorio, en la Figura 4-42 se presentan las curvas de presiones máximas y mínimas obtenidas con la configuración propuesta. Como se observa, la incorporación de ambos dispositivos mejora de forma significativa la respuesta del sistema frente al régimen transitorio. El calderín contribuye a amortiguar las variaciones de presión en el tramo inicial, mientras que las ventosas reduciendo las depresiones en la zona media y final del acueducto.

Del análisis de los resultados, se determina que en aproximadamente 900 metros de la conducción (5600 m hasta 6500 m) las presiones mínimas descienden por debajo de -5 mca, mientras que en el resto del trayecto se encuentran por encima de dicho valor. Esto representa una mejora notable respecto a los escenarios anteriores, donde las depresiones se extendían a lo largo de mayor parte de la conducción.

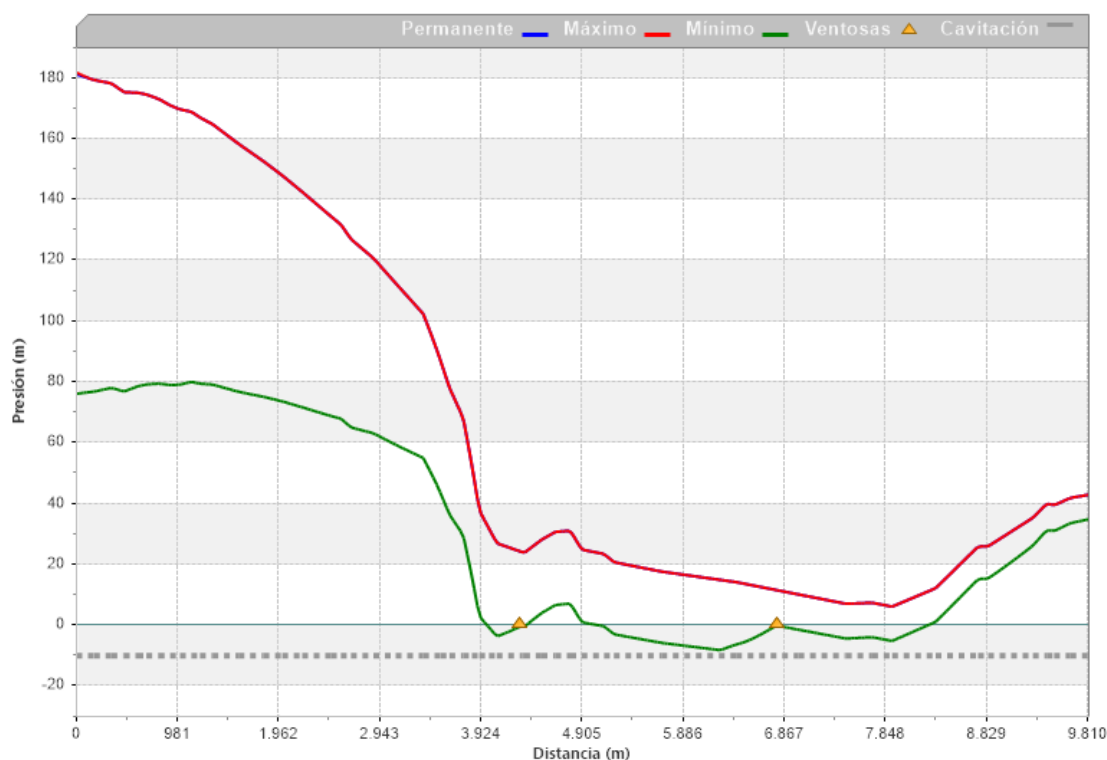


Figura 4-42. Resultados obtenidos con un calderín y dos ventosas, Caso 6 (captura de pantalla del software Allievi).

4.4.7 Configuraciones alternativas de calderines

Con el objetivo de continuar analizando el comportamiento del sistema ante distintas configuraciones de protección, se evalúan nuevas alternativas, en este caso variando la ubicación y cantidad de calderines.

En primer lugar, se plantea el Caso 7.a, en el cual se dispone un calderín a la salida de la estación de bombeo, como se analizó en los casos anteriores, y un segundo calderín ubicado en la estación 4300 m del acueducto (zona de la loma), correspondiente al punto de máxima elevación del acueducto.

En segundo lugar, en el Caso 7.b se considera la instalación de un calderín en la salida de cada una de las bombas de la estación.

Con el asistente de Allievi, se realiza el predimensionamiento del volumen de los calderines y la presión de hinchado inicial para ambos escenarios. En la Figura 4-43 y en la Figura 4-44 se muestran los datos básicos para los dos casos.

Calderines - Datos básicos							Características físicas del calderín							
Nombre	Nudo	Zu (m)	Num	Calc K	Act	D (m)	L (m)	V (m ³)	Pred	Rug (mm)	Zb (m)	Posición	Vejiga	P (bar)
C2	N37	378,12	1	...	<input checked="" type="checkbox"/>	1,04	2,59	2,19	...	0,046	378,12	Vertical	Si	4,35
C3	N36	501,66	1	...	<input checked="" type="checkbox"/>	1,16	2,91	3,1	...	0,046	501,66	Vertical	Si	6,42

Figura 4-43. Datos básicos del predimensionamiento de calderines para el Caso 7.a (captura de pantalla del software Allievi).

Calderines - Datos básicos							Características físicas del calderín							
Nombre	Nudo	Zu (m)	Num	Calc K	Act	D (m)	L (m)	V (m ³)	Pred	Rug (mm)	Zb (m)	Posición	Vejiga	P (bar)
C3	N48	373,6	1	...	<input checked="" type="checkbox"/>	0,71	1,76	0,7	...	0,046	373,6	Vertical	Si	10,59
C4	N49	373,6	1	...	<input checked="" type="checkbox"/>	0,71	1,76	0,7	...	0,046	373,6	Vertical	Si	10,59
C6	N51	373,6	1	...	<input checked="" type="checkbox"/>	0,71	1,76	0,7	...	0,046	373,6	Vertical	Si	10,59
C7	N52	373,6	1	...	<input checked="" type="checkbox"/>	0,71	1,76	0,7	...	0,046	373,6	Vertical	Si	10,59
C8	N53	373,6	1	...	<input checked="" type="checkbox"/>	0,71	1,76	0,7	...	0,046	373,6	Vertical	Si	10,59
C9	N54	373,6	1	...	<input checked="" type="checkbox"/>	0,71	1,76	0,7	...	0,046	373,6	Vertical	Si	10,59

Figura 4-44. Datos básicos del predimensionamiento de calderines para el Caso 7.b (captura de pantalla del software Allievi).

En la Figura 4-45 se presentan las curvas obtenidas para el primer escenario. Como puede observarse, esta configuración produce una leve mejora en el tramo inicial de la conducción, donde se reducen parcialmente las depresiones. Sin embargo, en la mayor parte del acueducto persisten presiones negativas, lo que indica que la medida no resulta suficiente para controlar el transitorio de manera efectiva.

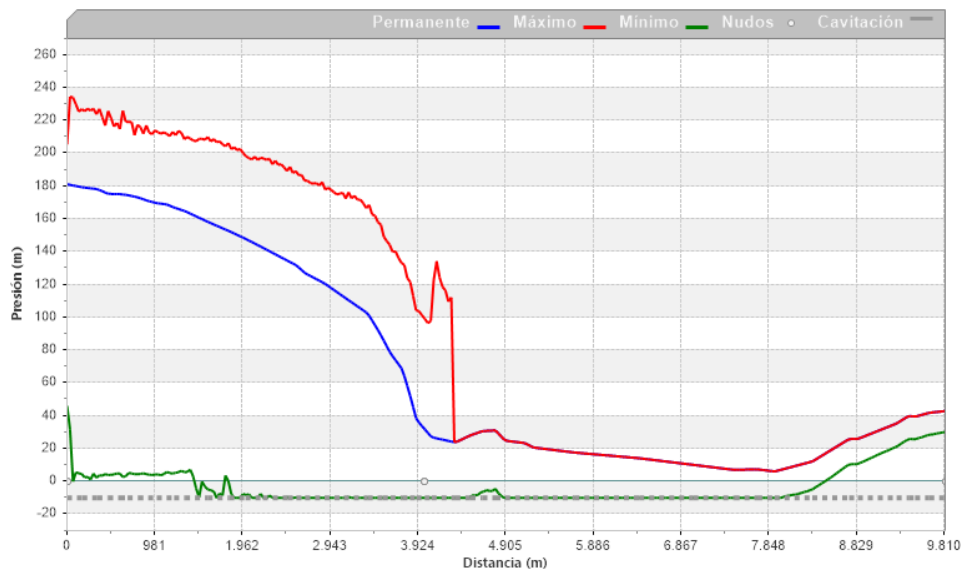


Figura 4-45. Resultados de presión para Caso 7.a de un calderín ubicado en loma, estación 4300 m (captura de pantalla del software Allievi).

En la Figura 4-46 se muestra el esquema del segundo escenario, correspondiente a la instalación de un calderín a la salida de cada bomba y la incorporación de dos ventosas ubicadas en los puntos altos del sistema, correspondientes a las estaciones 4300 y 6800 m. Los resultados se muestran en la Figura 4-47, donde se observa que, si bien la configuración mejora la respuesta del sistema, aún se registran tramos con presiones inferiores a -5 mca, lo que evidencia que el problema de las depresiones no se elimina completamente.

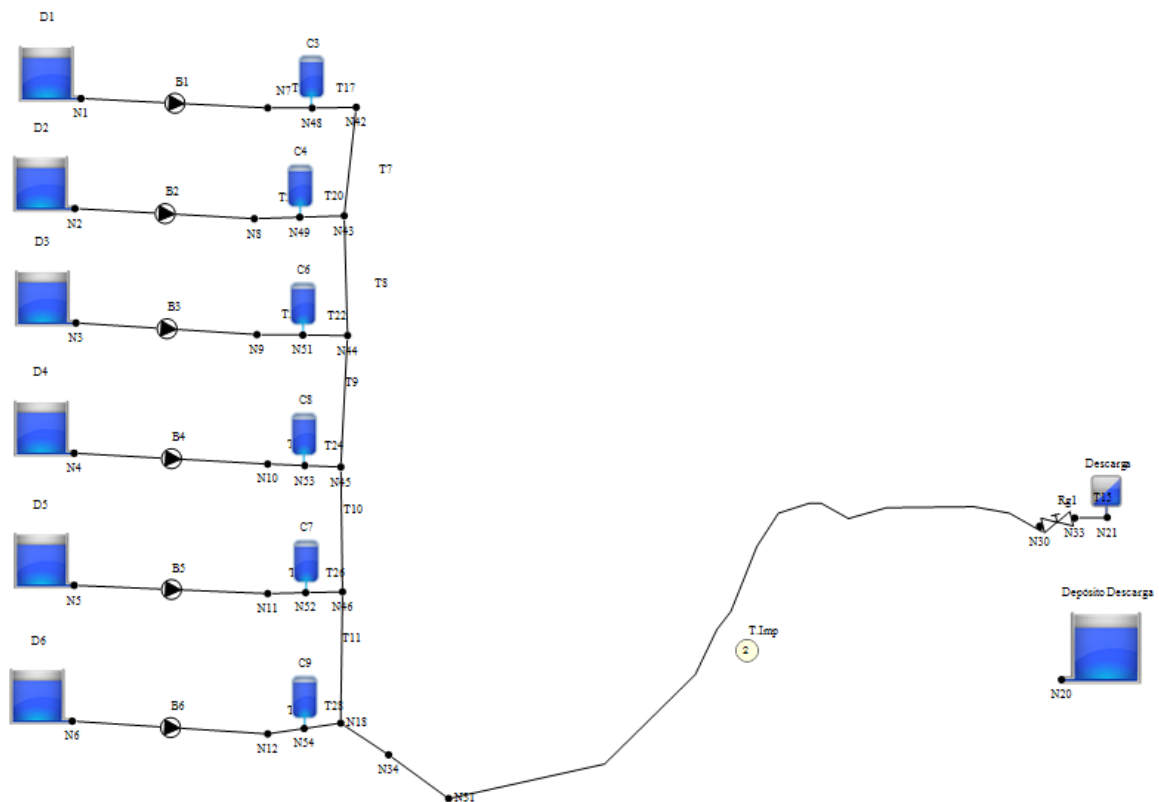


Figura 4-46. Esquema del Caso 7.b, con calderines a la salida de cada bomba más dos ventosas en las estaciones 4300 y 6800 m (captura de pantalla del software Allievi).

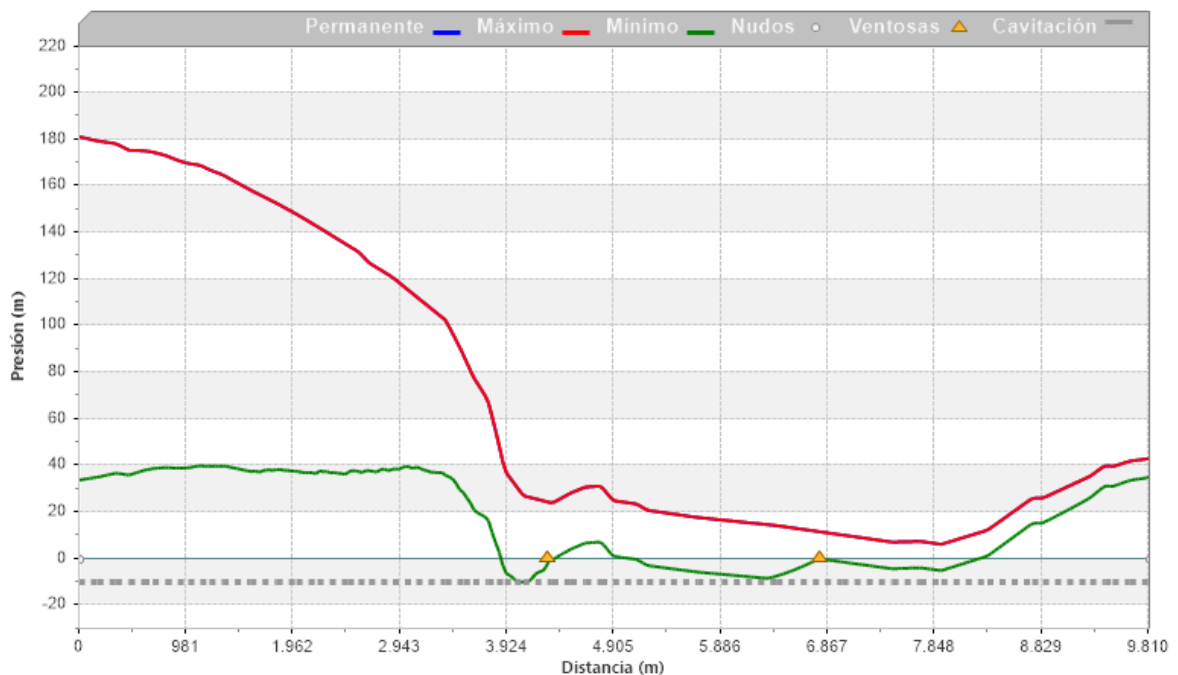


Figura 4-47. Resultados obtenidos para calderines a la salida de cada bomba, Caso 7.b (captura de pantalla del software Allievi).

En base a los resultados obtenidos, ninguna de estas configuraciones se considera una solución adecuada.

4.5 Resultados finales

De acuerdo con el análisis realizado en la sección anterior, en la cual se evaluaron distintas alternativas de protección frente a los efectos del golpe de ariete, se definieron siete casos y sus respectivas variantes, las cuales se detallan a continuación:

- Caso 1: incorporación de una válvula anticipadora de onda,
- Caso 2: incorporación de ventosas,
- Caso 3: incorporación de un calderín,
 - Caso 3.a: incorporación de dos calderines en estación 0 m,
 - Caso 3.b: incorporación de tres calderines en estación 0 m,
 - Caso 3.c: variación de dimensiones de un calderín en estación 0m,
- Caso 4: incorporación de un tanque unidireccional en estación 4000 m,
- Caso 5: combinación de un calderín con un tanque unidireccional (estación 4200 m),
 - Caso 5.a: incorporación de un segundo tanque (estación 7000 m),
 - Caso 5.b: variación de las dimensiones de los tanques,

- Caso 6: combinación de un calderín con dos ventosas (estación 4300 m y 6800 m),
- Caso 7: configuraciones alternativas de calderines:
 - Caso 7.a: dos calderines ubicados en estación 0 m y estación 4300 m,
 - Caso 7.b: un calderín a la salida de cada bomba.

A partir de los casos analizados, se selecciona como solución final el Caso 6, el cual corresponde a la combinación de un calderín a la salida de la estación de bombeo y dos ventosas instaladas en los puntos altos del acueducto, ubicadas en las estaciones 4300 m y 6800 m.

Esta configuración representa la alternativa más adecuada, ya que logra una reducción significativa de las depresiones generadas durante el régimen transitorio. Además, combina un buen rendimiento hidráulico con una operación simple y viabilidad económica, garantizando un funcionamiento seguro del sistema ante el paro repentino de las bombas.

Cabe destacar que tanto los calderines como las ventosas son elementos ampliamente utilizados en sistemas de bombeo, siendo dispositivos comunes en la industria para la protección frente a transitorios hidráulicos. Esto hace que sean accesibles en el mercado y que su implementación no requiera soluciones especiales ni equipamiento fuera de lo habitual.

4.5.1 Selección de los dispositivos estándar

De acuerdo con el catálogo de calderines de la empresa Mistral Ross (s.f.), se selecciona un modelo de dimensiones estándar, con un volumen ligeramente superior al calculado por el asistente del software Allievi. Si bien el fabricante ofrece la posibilidad de construir calderines a medida según las especificaciones del cliente, resulta más conveniente optar por equipos comerciales estándar debido a su disponibilidad, menor costo y plazos de entrega más cortos.

Los calderines están fabricados en acero al carbono, lo que les confiere una gran robustez mecánica y resistencia a variaciones de presión. En su interior cuentan con una vejiga de poliuretano y una malla antirretorno, que protege la vejiga frente a las depresiones y evita la entrada de partículas sólidas de gran tamaño que podrían dañarla.

En la Figura 4-48 se muestran las dimensiones estándar. El calderín seleccionado es corresponde a una capacidad de 6000 litros ($6 m^3$), con un diámetro exterior de 1,6 m, una altura de 3850 mm y una presión de precarga de 10 bar (ver ANEXO IV: Calderín).

Capacidad (litros)	Presión (bar)	Ø Ext. (mm)	Altura (mm)	h1 (mm)	Apoyo (uds.)	Boca de hombre (DN 500)
2.000	10/16/25/40	1.100	3.000	350	4	Si
3.000	10/16/25/40	1.100	4.050	350	4	Si
4.000	10/16/25/40	1.273	4.560	350	4	Si
5.000	10/16/25/40	1.600	3.350	350	4	Si
6.000	10/16/25/40	1.600	3.850	350	4	Si
7.000	10/16/25/40	1.800	4.450	350	4	Si
8.000	10/16/25/40	2.069	4.300	350	4	Si
10.000	10/16/25/40	2.069	4.000	350	4	Si
12.000	10/16/25/40	2.150	4.550	350	4	Si
15.000	10/16/25/40	2.150	5.130	350	4	Si
18.000	10/16/25/40	2.150	5.950	350	4	Si
20.000	10/16/25/40	2.545	5.080	350	4	Si
25.000	10/16/25/40	2.545	6.060	350	4	Si

Figura 4-48. Dimensiones estándar de calderines (Mistral Ross, s.f.)

Las ventosas seleccionadas, como se mencionó en la sección 4.4.2, son de diámetro nominal DN100. A partir del catálogo del fabricante (Bermad, s.f.) se elige la válvula de aire combinada modelo C70, Figura 4-49. Esta es una válvula de alta calidad, destinada a diversos sistemas de conducción de agua y condiciones de funcionamiento. Esta válvula permite purgar rápidamente el aire durante el llenado de la tubería, descargar eficientemente las bolsas de aire acumuladas durante el régimen presurizado y admitir grandes volúmenes de aire durante el vaciado, evitando así la formación de depresiones y sobrepresiones indeseadas (ver ANEXO V: Ventosa Bermad C70).



Figura 4-49. Válvula de aire combinada Bermad C70 (Bermad, s.f.).

Tal como se determinó en los análisis realizados, se instalarán dos válvulas en los puntos altos del sistema. La ubicación óptima de las mismas se obtuvo mediante distintas simulaciones, definiéndose las posiciones en las distancias óptimas de 4300 m y 6800 m desde el inicio de la conducción, Figura 4-50.

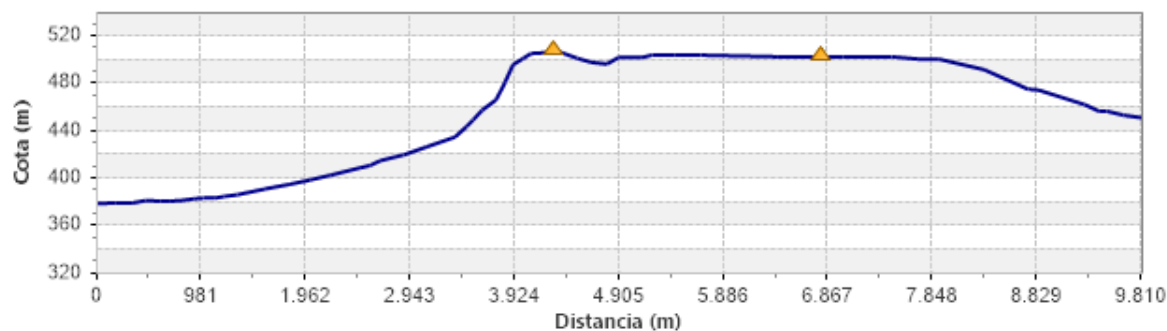


Figura 4-50. Ubicación de las ventosas Bermad C70 (captura de pantalla del software Allievi).

4.5.2 Solución final con dispositivos seleccionados

A continuación, se realizan las simulaciones con el software Allievi correspondientes a los dispositivos estándar seleccionados, obteniéndose los resultados finales del análisis. En la Figura 4-51 se muestran las curvas de altura manométrica generadas durante el régimen transitorio, mientras que en la Figura 4-52 representan los resultados en términos de altura de presión (mca).

Como se observa, en ningún punto de la conducción se alcanzan presiones de cavitación, siendo la presión mínima registrada de -6,51 mca en el tramo correspondiente a los 5800 metros desde el inicio del acueducto.

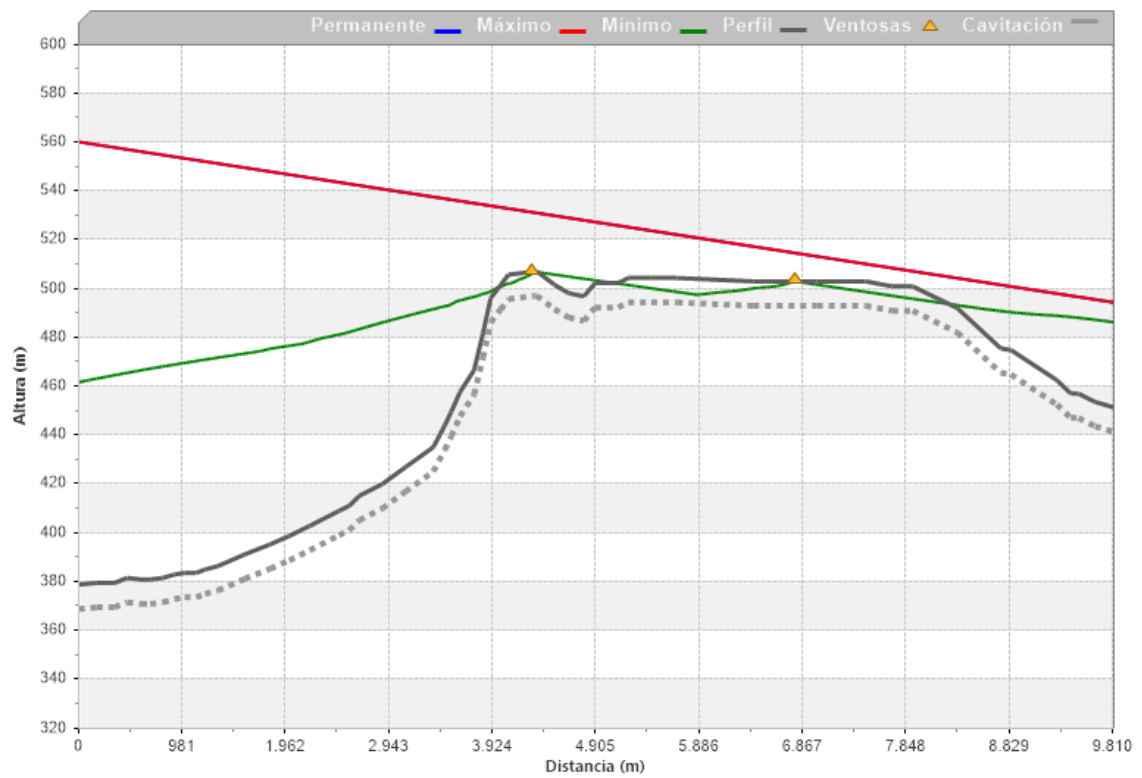


Figura 4-51. Altura generada para la solución final (captura de pantalla del software Allievi).

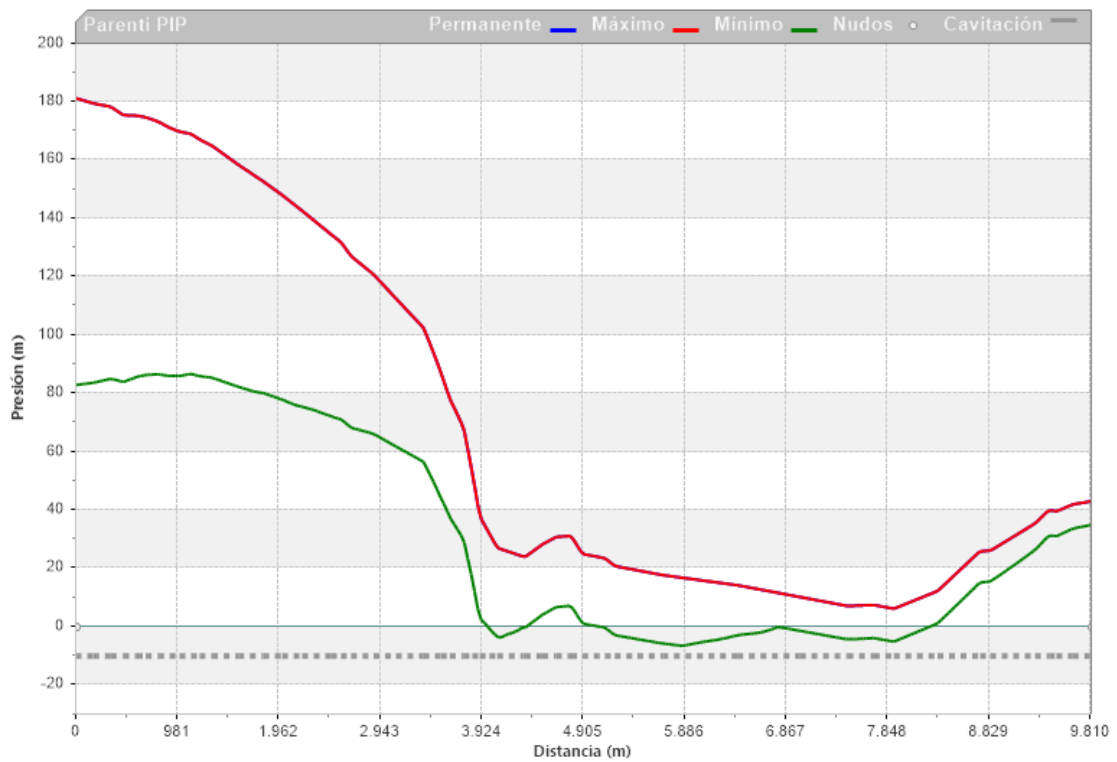


Figura 4-52. Presiones generadas para la solución final (captura de pantalla del software Allievi).

En la Figura 4-53 se presenta la variación de presión en función del tiempo para el Nodo 18, correspondiente al inicio de la conducción, en la estación 0 m del acueducto. Puede observarse que ya no se registran depresiones significativas, a diferencia de lo observado en el escenario sin protecciones (Figura 4-23), lo que demuestra la eficacia del sistema combinado de calderín y ventosas en la mitigación de los efectos del golpe de ariete.

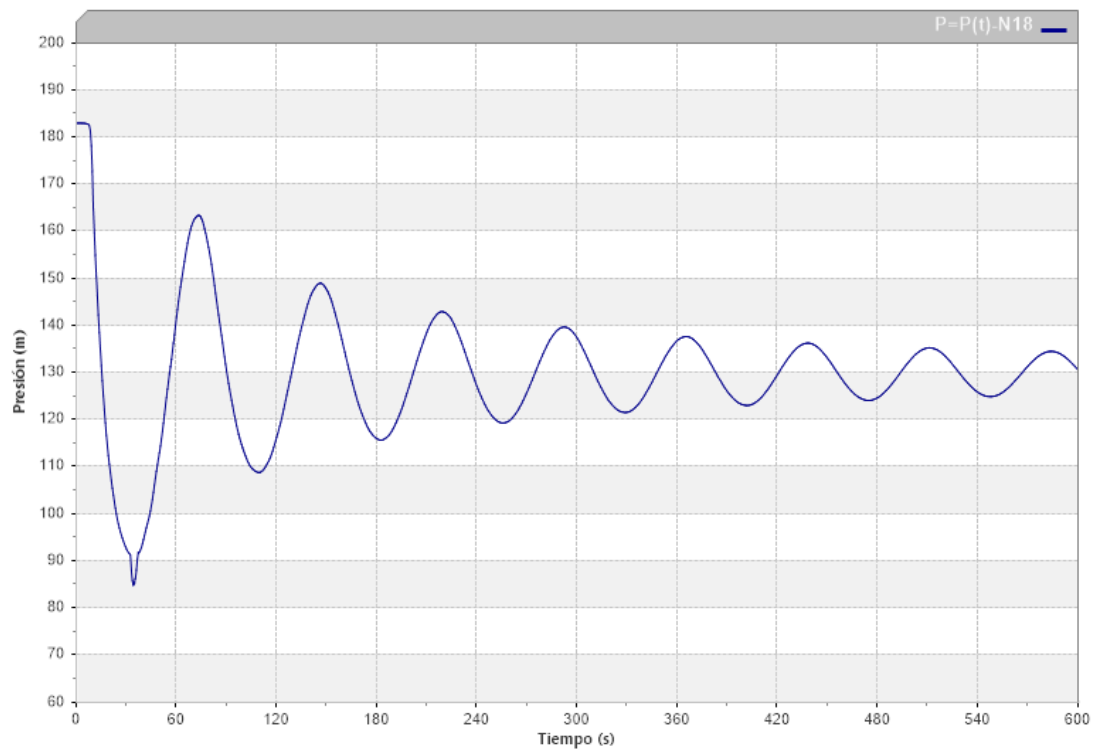


Figura 4-53. Presión en función del tiempo Nodo 18, estación 0 m (captura de pantalla del software Allievi).

4.5.3 Comparación con el escenario sin protección

Con el fin de evaluar la eficacia de la solución adoptada, se comparan los resultados obtenidos en el escenario sin protecciones con los del sistema final, compuesto por el calderín y las dos ventosas.

En la Figura 4-54 se presenta una superposición de los resultados obtenidos para el sistema sin protección y el sistema con protección, con el objetivo de contrastar gráficamente las curvas de presión y analizar de forma comparativa el comportamiento hidráulico en ambos escenarios. Esta representación permite observar con claridad la influencia de los dispositivos incorporados sobre las presiones máximas y mínimas resultantes a lo largo de la conducción.

Para el escenario sin protecciones, la presión máxima alcanzada en la tubería de impulsión durante el régimen transitorio es del orden de 370 mca, valor que, como se mencionó previamente, no representa un problema por sobrepresión, ya que se encuentra muy por debajo de la presión admisible del sistema, la cual resultó de 147 bar. En cambio, el problema principal se presenta en las presiones mínimas, ya que la curva correspondiente muestra que, en gran parte de la conducción, los valores descienden hasta la presión de vapor, lo que evidencia posibilidad de cavitación a lo largo del sistema.

Por el contrario, con la incorporación de los dispositivos de protección de seleccionados, se observa una reducción significativa de las depresiones. Como se observa en la Figura 4-54, las presiones se mantienen dentro de valores admisibles, alcanzando un mínimo de presión de -6,5 mca en un tramo reducido de la tubería. Sin embargo, en ningún punto se llega a la presión de vapor, aproximadamente -10 mca, por lo que no se producen condiciones de cavitación.

Este resultado demuestra que la solución propuesta disminuye notablemente la magnitud y extensión de las zonas sometidas a depresión, garantizando un comportamiento más estable del sistema frente al golpe de ariete y reduciendo el riesgo de cavitación.

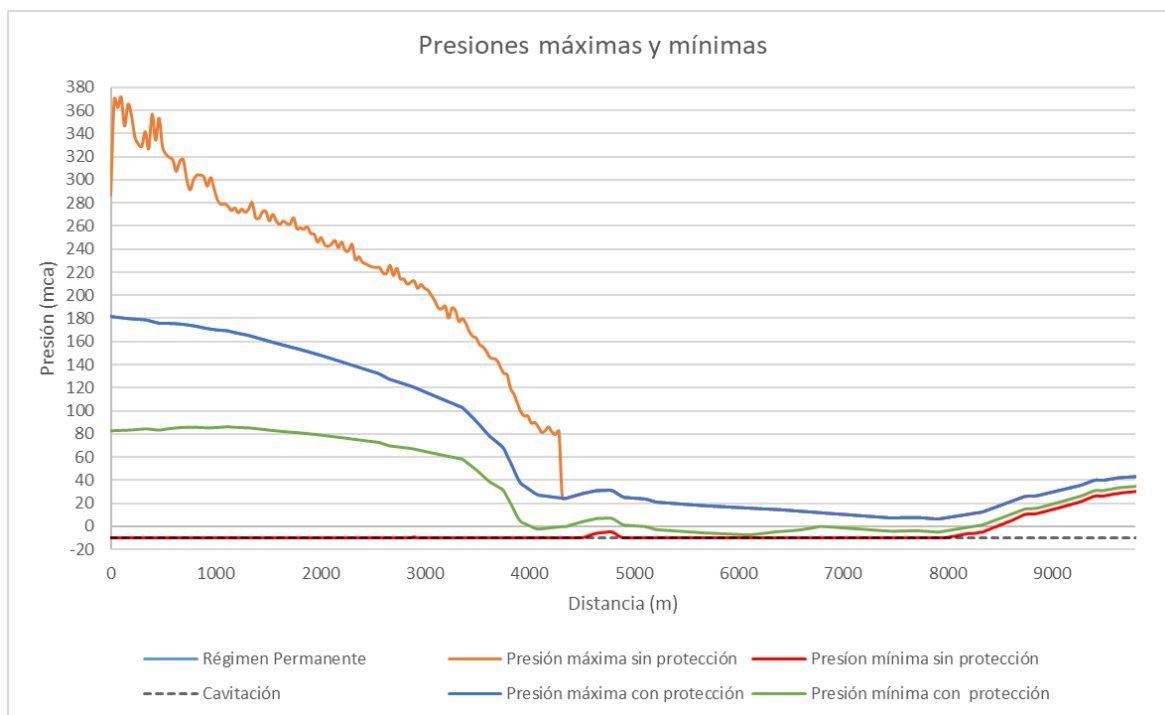


Figura 4-54. Comparación de presiones máximas y mínimas con y sin protección.

4.6 Costos y consideraciones

4.6.1 Consideraciones técnicas y constructivas

Una vez definida la configuración final del sistema de protección frente al golpe de ariete, se realiza una evaluación de los costos asociados y de las consideraciones técnicas y operativas necesarias para su implementación.

El objetivo de esta sección es analizar la viabilidad económica y las consideraciones constructivas y logísticas de los dispositivos seleccionados. Se contemplan aspectos como la disponibilidad comercial de los equipos, costos de adquisición, transporte e instalación, mantenimiento, entre otros.

La instalación del calderín se efectuará mediante una derivación tipo “T” bridada sobre la línea de impulsión, ubicada en las proximidades a la estación de bombeo. Para ello es necesario interrumpir la conducción y realizar el corte de la cañería de acero, incorporando posteriormente la T, del mismo material y espesor (acero al carbono SCH 20). Esta derivación permitirá la conexión directa del calderín al sistema.

El calderín se montará sobre una plataforma de hormigón armado, diseñada para soportar el peso total del equipo en condiciones de operación, incluyendo el volumen del agua contenida. La plataforma deberá contar con anclajes que aseguren la estabilidad del calderín ante las solicitaciones de presión y vibraciones.

Dado que el calderín seleccionado posee vejiga interna, el gas de precarga se mantiene separado del agua, por lo que no es necesario un compresor auxiliar para su funcionamiento.

En cuanto al transporte del equipo, de acuerdo con la información oficial publicada por la página oficial argentina.gob.ar (Vehículos de transporte de cargas que son de libre circulación en rutas nacionales – Artículo N.º 27, Apartado 2.3.1), el calderín puede circular sin permiso especial, dado que sus dimensiones se encuentran dentro de los límites establecidos para camiones de transporte estándar, los cuales son de 2,6 metros de ancho (ver ANEXO VI: Dimensiones permitidas de cargas). Además, el sitio previsto para su instalación presenta accesibilidad adecuada para el ingreso del vehículo de transporte.

Las ventosas se instalarán en los puntos altos del acueducto, ubicados en los kilómetros 4300 y 6800, seleccionados a partir del perfil topográfico del sistema y de los análisis previos, donde pueden acumularse bolsas de aire o generarse depresiones durante los regímenes transitorios.

Al igual que en el caso del calderín, dado que el acueducto se encuentra ya construido, será necesario realizar intervenciones puntuales en la tubería para incorporar las ventosas. En cada ubicación se procederá a exponer la tubería y cortar un tramo del conducto, sobre el cual se colocará la derivación tipo “T” que permita la conexión de las válvulas de aire, quedando así integradas a la conducción, cumpliendo con su función de admisión y expulsión de aire, garantizando una función segura del sistema.

4.6.2 Estimación general de costos

Se realiza un análisis general de los costos asociados a la implementación del sistema de protección frente al golpe de ariete, considerando principalmente los costos de adquisición de los dispositivos seleccionados (calderín y dos ventosas) y su transporte hasta el lugar de instalación.

Cabe destacar que este análisis tiene carácter estimativo y orientativo, ya que para los costos finales deben contemplarse otros costos adicionales que pueden tener una incidencia significativa en el monto total. Entre ellos se incluyen los costos de mano de obra especializada para el corte y conexión de los dispositivos, y posteriores pruebas hidráulicas, fabricación de la plataforma de hormigón para el soporte del calderín, uso de equipos de izaje y grúas para el montaje de los elementos, así como también los costos indirectos relacionados con supervisión, interrupción del servicio durante la instalación, entre otros.

Por lo tanto, los valores presentados a continuación buscan ofrecer una referencia de los costos generales para tener una estimación de la inversión para la incorporación de los dispositivos de protección.

Para la estimación económica del calderín de 6000 L se adoptó un criterio de cálculo basado en costos de fabricación local.

En primer lugar, se determinó el peso aproximado del recipiente a partir de sus dimensiones geométricas (diámetro 1600 mm, espesor de 6,35 mm y longitud correspondiente al volumen requerido), obteniéndose un peso del orden de 1000 kg.

El costo directo de fabricación se estimó como la suma de:

- Costo de mano de obra, considerando un valor de referencia de 5 USD/kg para tareas de corte, rolado y soldadura.

- Costo de materiales, calculado a partir del precio comercial de láminas de acero al carbono de $\frac{1}{4}$ ".

De esta manera, el costo directo total resultó del orden de 8000 U\$D.

Luego, se incorporó un margen de rentabilidad industrial del 25-30 %, valor representativo de equipos especiales bajo pedido, obteniéndose un precio estimado del orden de 10000 U\$D (sin IVA).

Finalmente, a efectos de estimación de mercado, se consideró la aplicación del IVA (21%), alcanzándose un valor final aproximado de 12000 U\$D.

A efectos de contrastar la estimación obtenida mediante el cálculo, se realizó una consulta a la empresa Industrias Ibaiondo S.A., fabricante europeo de recipientes a presión y calderines hidroneumáticos.

El equipo solicitado se encuentra dentro de la línea estándar del fabricante, y se obtuvo una cotización de referencia por 17327 EUR (ver ANEXO VII: Presupuesto calderín), bajo condición Incoterm EXW, es decir, con retiro en planta del fabricante y sin incluir transporte ni gastos asociados a exportación o importación.

Se destaca que el precio obtenido constituye un valor de referencia con fines comparativos dentro del presente análisis económico.

La diferencia respecto de la estimación obtenida puede explicarse por las certificaciones y estándares del fabricante, así como por la inclusión de componentes adicionales, como la vejiga interna y el ramal de unión, que no fueron contemplados en el cálculo simplificado desarrollado en este trabajo.

Los costos correspondientes a las válvulas de aire Bermad modelo C70-C DN 100 se obtienen del proveedor (Todo Válvulas, 2025).

El valor unitario de las ventosas se presenta en la Figura 4-55, siendo de U\$D 1635,10 (sin IVA). Cabe aclarar que el envío corre por cuenta del comprador.

CÓDIGO	DN	DESCRIPCIÓN	U\$S
BERC702BSP	2"	Roscada	787,68
BERC702"	2"	Bridada	849,20
BERC703"	3"	Bridada	1.200,20
BERC704"	4"	Bridada	1.635,10
BERC706"	6"	Bridada	2.917,44
BERC708"	8"	Bridada	5.156,80

C70-C

VÁLVULAS DE AIRE TRIPLE FUNCIÓN
Cuerpo Metálico. PN 16
Para Agua Potable, NOMINAL
APROBADA AYSA



Figura 4-55. Costos unitarios de válvulas de aire (Todo Válvulas, 2025).

Para la estimación del costo de transporte se realiza considerando la siguiente fórmula que es muy utilizada para estos cálculos, donde el costo depende del volumen del embalaje y de la distancia recorrida.

$$\text{Costo (U\$D)} = 0,25 \frac{\text{U\$D}}{\text{m}^3 \text{ km}} \times \text{Volumen (m}^3\text{)} \times \text{Distancia (km)} \quad (4-10)$$

En este caso, se considera un recorrido desde la ciudad de Buenos Aires hasta Neuquén, con un trayecto ida y vuelta, lo que representa aproximadamente una distancia de 2400 km.

Bajo este criterio, se evaluaron los costos de transporte de los principales componentes del sistema, el calderín y las ventosas Bermad C70 DN100.

El calderín considerado posee un diámetro de 1600mm y una altura de 3850 mm considerando los apoyos. Para su transporte, se prevé un embalaje de 100 mm en todo el contorno de la caja. Por lo tanto, el volumen resultante aproximado es de 13 m³. Resultando en un costo de transporte de 7860 U\$D.

Las válvulas de aire Bermad C70 DN100 poseen dimensiones de 371 mm × 410 mm × 270 mm. Cada válvula se embala individualmente con 100 mm de acolchado, resultando un volumen de aproximadamente 0,19 m³ por unidad. Dado que son dos ventosas, el volumen total equivale a 0,38 m³. Con la misma fórmula, se obtiene un costo de transporte de las ventosas de 228 U\$D.

En la Tabla 10 se presenta a modo de resumen los costos unitarios de los elementos y también los costos relacionados al transporte de los mismos, considerando valores de referencia correspondientes a febrero de 2026.

Tabla 10. Estimación general de costos

Costos	Valor
Costo unitario de calderín	12000 USD
Costo unitario de válvulas	1635,10 USD (sin IVA)
Costo transporte calderín	7860 USD
Costo transporte válvulas	228 USD

5 CONCLUSIONES

En el presente Proyecto Integrador Profesional se analizó el comportamiento hidráulico de un sistema de bombeo de agua en régimen permanente y transitorio, poniendo especial énfasis en los fenómenos asociados al golpe de ariete, principalmente en la generación de depresiones y el riesgo de cavitación, dando cumplimiento a los objetivos planteados inicialmente.

En primer lugar, se realizó un análisis teórico mediante la intersección de las curvas características de las bombas con la curva del sistema, cuyos resultados fueron posteriormente contrastados con las simulaciones numéricas realizadas con el software Allievi. La comparación evidenció una muy baja diferencia entre ambos métodos en términos de caudal y altura manométrica, mostrando concordancia entre el análisis teórico y la simulación numérica.

A partir de la simulación del escenario más desfavorable, correspondiente al paro repentino de las cinco bombas en operación, se observó que, ante la ausencia de dispositivos de protección, el sistema alcanza valores de presión mínima suficientemente bajos como para generar cavitación o separación de columna. En contraste, las sobrepresiones máximas obtenidas no superan la presión admisible de la conducción, que le otorgan un margen de seguridad adecuado frente a los incrementos de presión.

Estos resultados evidenciaron la necesidad de incorporar dispositivos de protección orientados a mitigar las depresiones generadas durante el transitorio. Se evaluaron distintas alternativas considerando su comportamiento hidráulico, viabilidad técnica y económica. Del análisis comparativo se concluye que la combinación de un calderín instalado a la salida de la estación de bombeo junto con dos ventosas ubicadas en puntos altos estratégicos del acueducto (estación 4300 m y 6800 m) constituye la solución más adecuada para el sistema en estudio. Con esta configuración se logra una reducción significativa de las presiones mínimas, manteniendo el sistema dentro de los rangos admisibles y garantizando un funcionamiento seguro.

Finalmente, el trabajo demuestra la importancia del análisis de los transitorios hidráulicos en sistemas de bombeo de gran extensión, así como la utilización de herramientas de simulación numérica como apoyo fundamental en el diseño, verificación y la toma de decisiones en este tipo de proyectos.

6 REFERENCIAS

- Allievi. (2018). *Instituto Tecnológico del Agua - Universitat Politècnica de València - España; software Allievi*, [3.0.1]. Obtenido de <https://www.allievi.net/allievi-es.php>
- ANSI/HI 9.6.3. (2017). *Rotodynamic Pumps - Guideline for Operating Regions*. American National Standards Institute, Inc. - Hydraulic Institute.
- API 5L. (2018). *Specification for Line Pipe*. American Petroleum Institute.
- API 610. (2021). *Centrifugal Pumps for Petroleum, Petrochemical, and Natural Gas Industries*. American Petroleum Institute.
- Aquestia. (s.f). *Surge protection and transient analysis solutions*. Obtenido de <https://www.aquestia.com/>
- ARMAS. (2018). *Armaş Su Armatürleri San. ve Tic. A.Ş.* Obtenido de <https://armas.com.tr/es-ES>
- ASME B31.3. (2022). *Process Piping*. The American Society of Mechanical Engineers.
- AWWA M11. (2017). *Steel Pipe - A guide for Design and Installation*. American Water Works Association.
- AWWA M51. (2016). *Air-Release, Air/Vacuum, and Combination Air Valves: M51*. American Water Works Association.
- Bermad. (s.f.). *Productos y soluciones hidráulicas*. Obtenido de <https://www.bermad.com/>
- Conagua. (2007). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento, Fenómenos Transitorios en Líneas de Conducción*. México, D.F.: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Creus Solé, A. (2010). *Instrumentación industrial* (8 ed.). Marcombo.
- CSA srl. (2026). *Catalogo serbatoio anti-colpo d'ariete*. Obtenido de <https://csasrl.it/>
- Haaland, S. E. (1983). Simple and Explicit Formulas for the Friction Factor in Turbulent Pipe Flow. *Journal of Fluids Engineering*, 105(1), 89-90.
- Ibaiondo. (2026). *Industrias Ibaiondo - Vasos de expansión*. Obtenido de <https://www.ibaiondo.com/>

IRUA. (s.f). *Air Valves - General Catalogue*. IRUA Tech Industries.

Karassik, I. J. (2000). *Pump Handbook* (Tercera ed.). McGRAW-HILL.

KSB. (s.f). *Bombas, Válvulas y servicios*. Obtenido de <https://www.ksb.com/es-ar>

Manual Allievi. (2015). *Manual Técnico de Allievi*. Valencia: ITA | Universidad Politécnica de Valencia.

Marigorta, E. B. (1994). *Sistemas de bombeo*.

Mataix, C. (1975). *Turbomáquinas Hidráulicas*. Madrid: ICAI.

Mistral Ross. (s.f.). *Catálogo de calderines Mistral Ross*. Obtenido de <https://www.mistralross.com.ar/>

Moody, L. F. (1944). Friction Factors for Pipe Flow. *Transactions of the ASME*, 66, 671--684.

Núñez , J., y Martínez, D. (2020). Vaca Muerta y minería. Agua potable y saneamiento. *Cámara Argentina de la Construcción*.

Parmakian, J. (1963). *Waterhammer Analysis*. Dover Publications, INC.

Paz Penín, C., Suárez Porto, E., Concheiro Castiñeira, M., y Conde Fontela , M. (2019). *Turbomáquinas Hidráulicas*. Servizo de Publicacións da Universidade de Vigo.

Sanks, R. L. (1998). *Pumping Station Design*.

Todo Válvulas. (2025). *Listado de precios. Catálogo de Válvulas*. Obtenido de <http://www.todovalvulas.com.ar/>

White, F. M. (2004). *Mecánica de Fluidos* (Quinta ed.). Mc Graw Hill.

ANEXO I: PLANOS DEL SISTEMA DE BOMBEO

En este Anexo se incluyen los planos que fueron de utilidad para la configuración del modelo hidráulico desarrollado en Allievi. Los mismos contienen información importante como cotas, longitudes de tramos, diámetros nominales y disposición de las bombas, que permitieron construir un modelo equivalente del sistema real.

La Figura I. 1 corresponde a la vista en planta de la zona de captación, donde se observa la disposición de las bombas, el colector y las distancias entre componentes, como así también las longitudes y diámetros de los distintos tramos del colector que conecta las bombas con la tubería principal.

La Figura I. 2 muestra la vista lateral de la cámara de bombeo, donde se identifica la cota de salida de la bomba como así también los niveles de operación del agua, fundamentales para definir las cotas de los depósitos de succión en el Software.

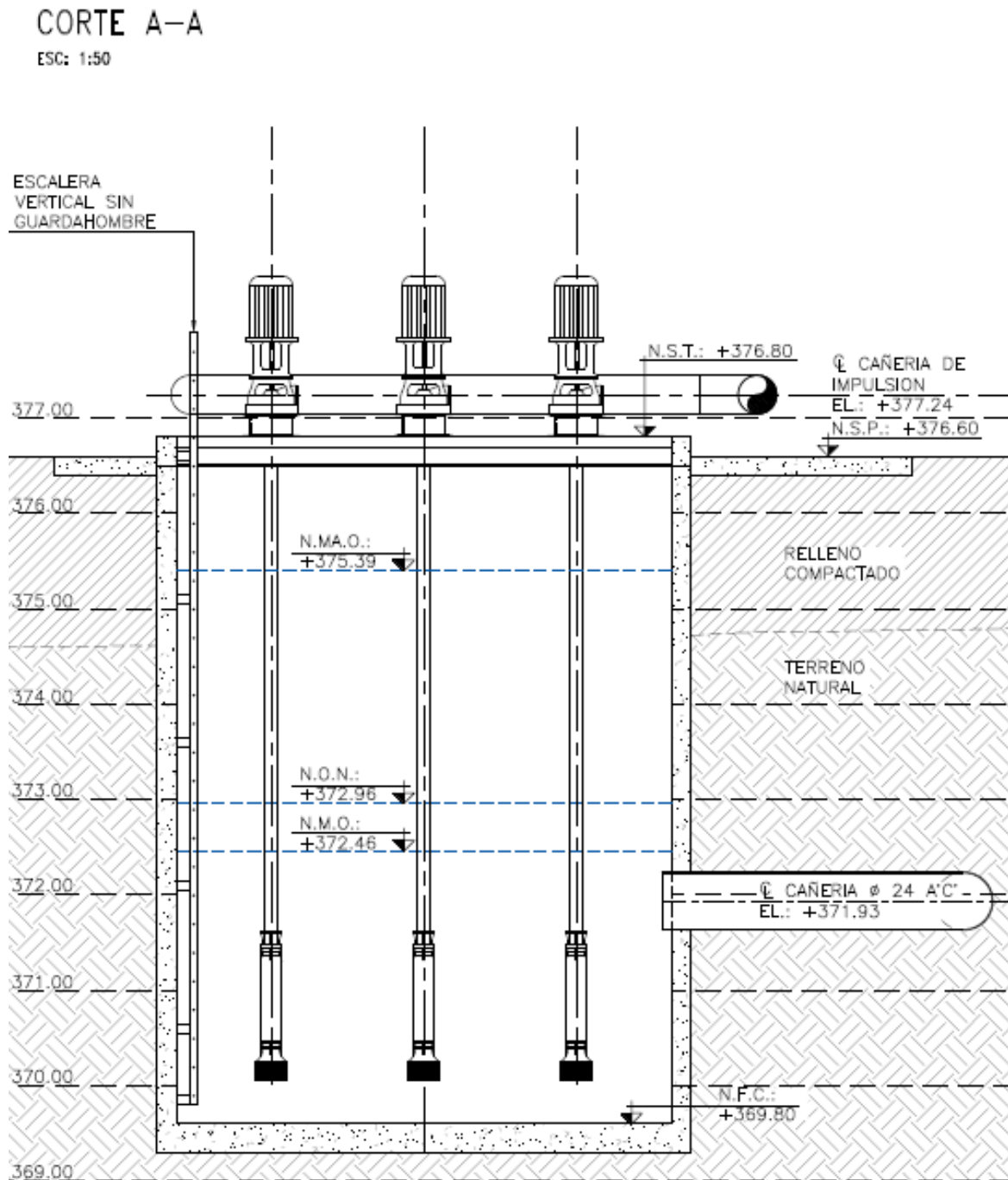


Figura I. 2. Vista lateral de la cámara de bombeo

En la Figura I. 3 se observan las dimensiones de la bomba vertical KSB WVR 125/10, las cuales son importantes para definir las cotas de los depósitos de succión.

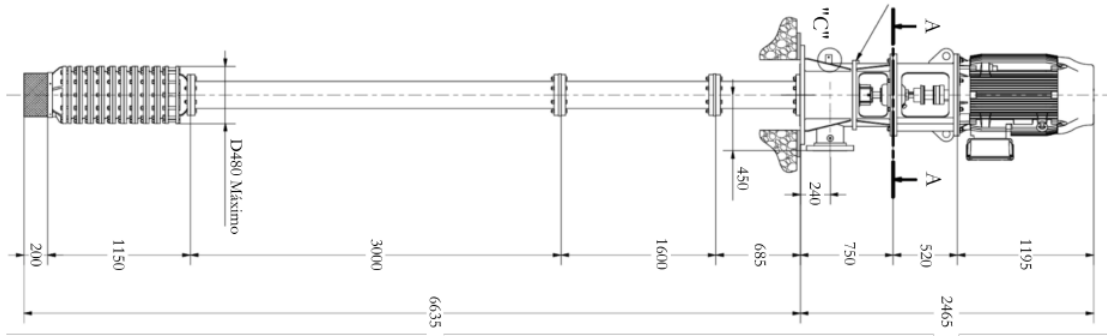


Figura I. 3. Dimensiones de la bomba KSB WVR 125/10

ANEXO II: CARACTERÍSTICAS DE LAS BOMBAS

A continuación, en la Tabla II. 1, se detallan las principales características de las bombas utilizadas en el proyecto.

Tabla II. 1. Características principales de la bomba KSB 125/10

Parámetro	Valor
Caudal nominal	125 m ³ /h
Altura manométrica total	240 mca
Eficiencia en cuerpo de bomba	75 %
Velocidad de rotación	1450
NPSH requerido	4,5 mca
Tipo de instalación	Vertical
Tipo de bomba	Centrífuga vertical
DN aspiración	7" (175 mm)
DN descarga	6" (150 mm)
Norma de brida de descarga	ANSI B16.5

ANEXO III: DIMENSIONAMIENTO VAO

La válvula anticipadora de onda se instala en derivación a la tubería principal, como se observa en la Figura III. 1. Para el dimensionamiento de la misma, se siguen las recomendaciones del fabricante (ARMAS, 2018), donde se calcula el diámetro de la válvula mediante la siguiente la fórmula empírica:

$$D_v = \sqrt{\frac{250 Q}{\sqrt{H_m}}} \quad (\text{AII-1})$$

Siendo,

- D_v : diámetro de la válvula [mm]
- Q : caudal en el sistema [m^3/h]
- H_m : altura manométrica [m]

Tabla III. 1. Dimensionamiento de VAO

Q [m^3/hs]	H_m [m]	D_v [mm]
820	190	121

Por lo tanto, se toma el diámetro nominal comercial superior, DN=150 mm.

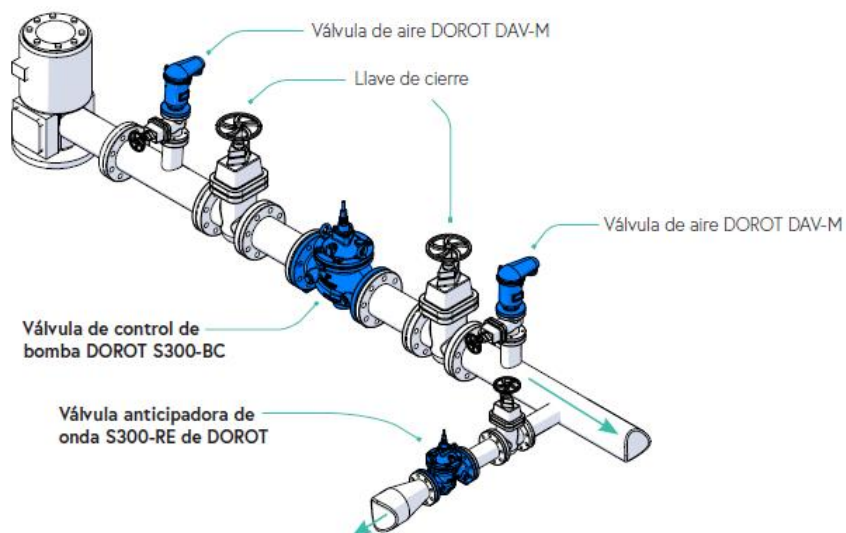


Figura III. 1. Instalación típica de VAO (ARMAS, 2018).

ANEXO IV: CALDERÍN

En la Figura IV. 1 se puede observar el plano con las dimensiones de los calderines, y en la Tabla IV. 1 se muestran los valores estándar de las medidas.

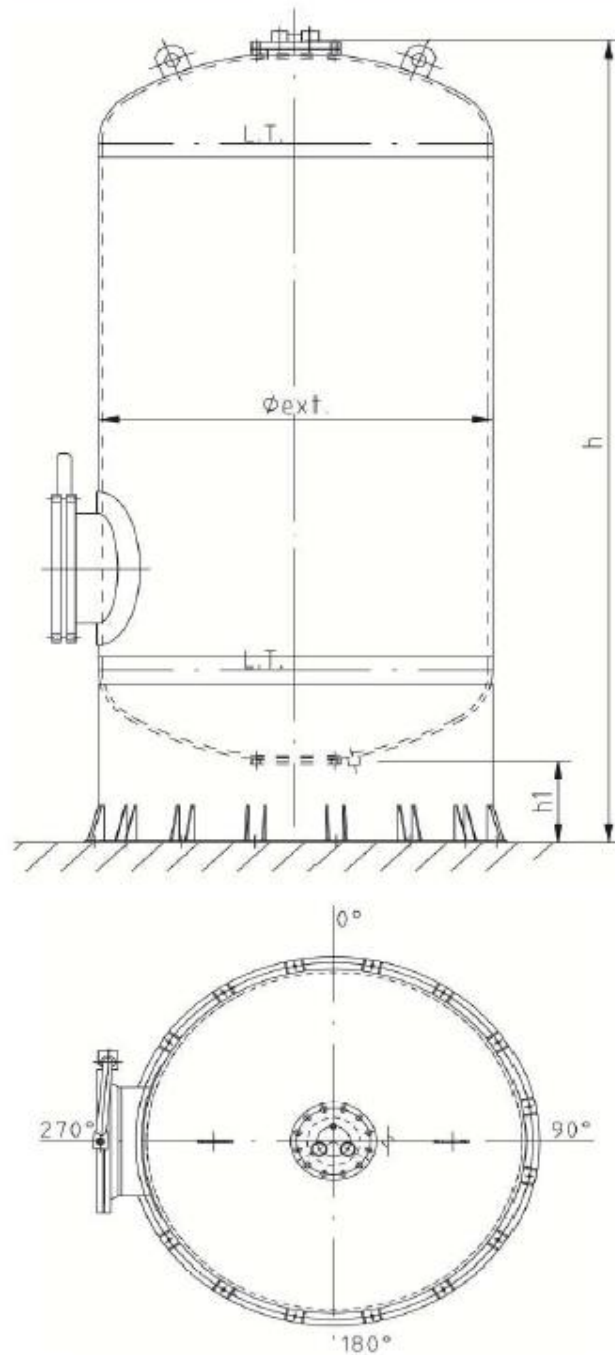


Figura IV. 1. Dimensiones de calderín (Mistral Ross, s.f.)

Tabla IV. 1. Dimensiones estándar calderín (Mistral Ross, s.f.)

Capacidad (litros)	Presión (bar)	Ø Ext. (mm)	Altura (mm)	h1 (mm)	Apoyo (uds.)	Boca de hombre (DN 500)
2000	10/16/25/40	1100	3000	350	4	Sí
3000	10/16/25/40	1100	4050	350	4	Sí
4000	10/16/25/40	1273	4560	350	4	Sí
5000	10/16/25/40	1600	3350	350	4	Sí
6000	10/16/25/40	1600	3850	350	4	Sí
7000	10/16/25/40	1800	4450	350	4	Sí
8000	10/16/25/40	2069	4300	350	4	Sí
9000	10/16/25/40	2069	4400	350	4	Sí
10000	10/16/25/40	2150	4550	350	4	Sí
12000	10/16/25/40	2150	5130	350	4	Sí
15000	10/16/25/40	2150	5950	350	4	Sí
18000	10/16/25/40	2150	5950	350	4	Sí
20000	10/16/25/40	2545	5080	350	4	Sí
25000	10/16/25/40	2545	6060	350	4	Sí

A continuación, se detallan las características del calderín brindadas por (Mistral Ross, s.f.):

- Presión: servicio/proyecto = 10, 16, 25, 40, 64 bar.
- Temperatura: servicio/proyecto = 20 °C / 50 °C
- Materiales: S275JR/EN10025-2 (cuerpo + fondos abombados)
- Puerta para inspección DN200 (fondo abombado superior)
- Boca de hombre DN500 (cuerpo)
- Entrada/Salida de agua en fondo abombado inferior (DN varía en función de la capacidad del calderín)
- Purga Ø 1" (fondo abombado inferior)
- Tomas (2) para conexión a nivel
- Orejas de izaje (2)
- Tomas para las conexiones de la válvula de seguridad, manómetro y entrada de aire.
- Acabado interior: granallado hasta grado SA2,5 (ISO 8501-1)
- Recubrimiento interior epoxi – 250 micras
- Acabado exterior: granallado hasta grado SA2,5 (ISO 8501-1)
- Recubrimiento exterior epoxi/poliuretano – 120 micras
- Equipamiento: válvula de seguridad / manómetro
- Vejiga interior de poliuretano.
- Opcional: válvula de regulación de aire automática / válvula de retención perforada / codo 90°

ANEXO V: VENTOSA BERMAD C70

BERMAD C70 es una válvula de aire combinada de alta calidad, destinada a diversos sistemas de conducción de agua y condiciones de funcionamiento. Esta válvula purga rápidamente el aire durante el llenado de la tubería, permite la descarga eficiente de bolsas de aire de las tuberías presurizadas, y admite grandes volúmenes de aire en caso de vaciado de la tubería.

Posee un diseño aerodinámico de avanzada, doble orificio y dispositivo de protección contra el golpe de ariete (anti-slam/cierre lento). Esta válvula proporciona una excelente protección contra la acumulación de aire, la formación de vacío y los golpes de ariete, con cierre hermético mejorado en condiciones de baja presión. La válvula minimiza las salpicaduras durante la purga de aire.



Figura V. 1. Válvula de aire Bermad C70 (Bermad, s.f.)

Características y ventajas

- Cuerpo de flujo recto con orificio automático de gran diámetro: caudales mayores que los habituales.
- Cuerpo de diseño totalmente aerodinámico: evita el cierre prematuro sin perturbar la admisión o la descarga de aire.
- Estructura compacta, sencilla y confiable con piezas resistentes a la corrosión; menos mantenimiento y prolongada vida útil.
- Diseño en cumplimiento de las normativas de funcionamiento y de servicio de agua.

- Aprobación y control de calidad en fábrica: pruebas de funcionamiento y especificaciones en un banco de pruebas especializado, inclusive en condiciones de depresión (vacío).

Conexiones de entrada y salida

- Entradas: rosca hembra 2"; DN50, brida 2-8"; DN50-200.
- Salidas:
 - Hacia abajo, compatible con la característica adicional de SP.
 - Lateral, rosca hembra 2-3"; DN50-80, ranura (Victaulic) 4-8"; DN100-200. Compatible con las características adicionales de SP, AS, AC y IP.
 - Hongo (circular periférica), compatible con la característica adicional de SP.

Materiales

- Cuerpo y tapa:
 - Hierro fundido dúctil (C70-C)
 - Acero inoxidable (C70-N)
 - Acero fundido / WCB (C70-S)
- Revestimiento: Epoxi adherido por fusión (FBE), Azul
- Placa superior: Acero inoxidable, Hierro dúctil
- Conjunto del flotador: Polipropileno, nylon reforzado con fibra de vidrio
- Orificio automático: Acero inoxidable
- Elastómeros: EPDM

Datos de funcionamiento

- Presión nominal: 230 psi; ISO PN16, 360 psi; ISO PN25, 580 psi; ISO PN40
- Presión mínima de trabajo: 1.5 psi; 0.1 bar
- Máxima presión de trabajo: 230 psi; 16 bar, 360 psi; 25 bar, 580 psi; 40 bar
- Temperatura ambiente y de trabajo: Agua, 33-140°F; 1-60°C.

Gráficos del flujo de aire

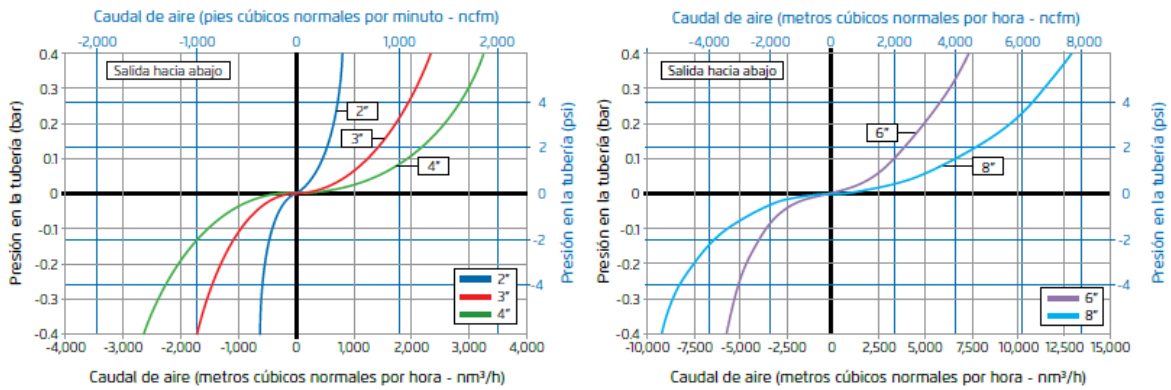


Figura V. 2. Alivio y admisión de aire (durante el llenado, drenaje y en condiciones de vacío)

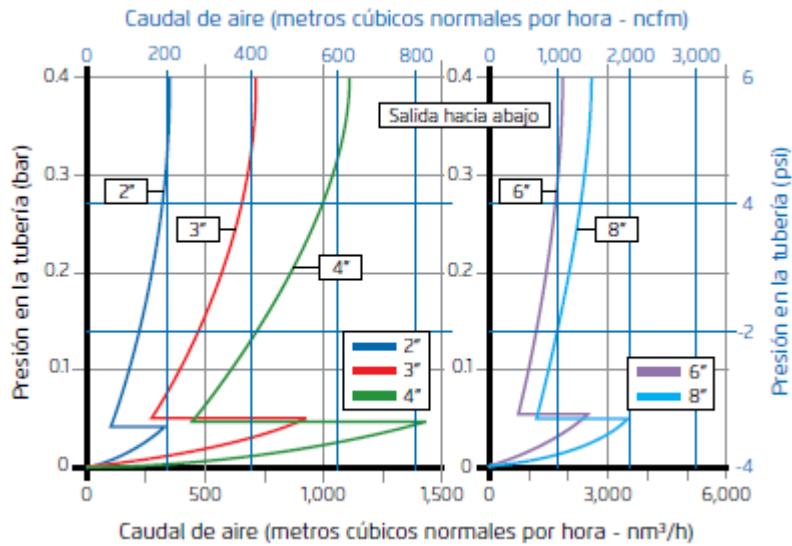


Figura V. 3. Expulsión de aire (durante el llenado)

ANEXO VI: DIMENSIONES PERMITIDAS DE CARGAS

En la Figura VI. 1 se pueden observar las configuraciones autorizadas para el transporte automotor de cargas, ART. N° 27 – Apartado 2.3.1, obtenido del portal oficial argentina.gov.ar¹














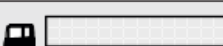
N°	TIPO DE VEHÍCULO	CONFIGURACIÓN N° DE EJES				PESO MÁXIMO (t)	Relación POT/PESO (CV/t) mín.
			LARGO (m)	ANCHO (m)	ALTO (m)		
1		S1 - D1	13,20	2,60	4,30	16,50	4,25
2		S1 - D2	13,20	2,60	4,30	24,00	4,25
3		S1 - D3	13,20	2,60	4,30	31,50	4,25
4		S2 - D2	13,20	2,60	4,30	28,00	4,25
5		S2 - D3	13,20	2,60	4,30	35,50	4,25
6		S1 - S1 - D2	13,20	2,60	4,30	30,00	4,25
7		S1 - S1 - D3	13,20	2,60	4,30	37,50	4,25
8		S1 - D1 - D1	18,60	2,60	4,30	27,00	4,25
9		S1 - D1 - D2	18,60	2,60	4,30	34,50	4,25
10		S1 - D1 - D3	18,60	2,60	4,30	42,00	4,25
11		S1 - D2 - D2	18,60	2,60	4,30	42,00	4,25
12		S1 - D2 - D1 - D1	18,60	2,60	4,30	45,00	4,25
13		S1 - D2 - D3	18,60	2,60	4,30	49,50	6,00
14		S1 - D1 - D1 - D2	18,60	2,60	4,30	45,00	4,25

Figura VI. 1. Vehículos de transporte de cargas que son de libre circulación en rutas nacionales.

¹ <https://www.argentina.gov.ar/transporte/vialidad-nacional/transporte-de-cargas/informacion-util>

2.1. Plazo de entrega

Los equipos contemplados en esta oferta se suministrarán en el plazo de 4-5 SEMANAS (agosto excluido), cuyo cómputo se iniciará en la fecha de confirmación del pedido

2.2. Embalaje

Los equipos se expiden en el embalaje estándar de Industrias Ibaiondo S.A. según modelo. Cualquier embalaje adicional deberá ser objeto de contratación especial.

2.3. Transporte

El suministro se realizará bajo el Incoterm 2020: EXW

En caso de que el cliente decida hacer el acuerdo comercial bajo el Incoterm 2020 ExWorks, estará obligado de enviar a Industrias Ibaiondo S.A. la documentación que justifique la salida de la mercancía del territorio español (DUA, EUR1, BL y/o CMR).

Si se requiere una inspección previa al embarque, el comprador deberá especificarlo en la factura proforma y en la orden de compra que se cotice. En caso contrario, Industrias Ibaiondo S.A. no estará obligada a asumir los costes de la misma.

2.4. Instalación y puesta en marcha

Los gastos de instalación y puesta en marcha de los equipos son por cuenta del comprador. La contratación de este servicio o cualquier otra intervención de nuestro personal técnico deberá ser solicitada por el cliente previa aceptación del presupuesto específico

2.5. Garantías

Industrias IBAIONDO, S.A. garantiza los equipos ofertados por un periodo de 24 meses a partir de su suministro.

Será por cuenta de Industrias IBAIONDO, S.A. la subsanación de los defectos solo si se demostrase que ha sido el responsable de los mismos.

Se excluye la garantía en caso de que se compruebe que los defectos hayan sido causados por una incorrecta manipulación u operación por parte de personal ajeno a Industrias IBAIONDO, S.A., si los valores máximos o mínimos de presión y/o temperatura han sido excedidos o, en general, si no se han seguido cualquiera de las instrucciones de puesta en marcha, utilización o mantenimiento incorporadas en la documentación facilitada.

En ningún caso Industrias IBAIONDO, S.A. responderá por daños directos o indirectos causados por averías o defectos de sus productos, lucro cesante o cualquier otra reclamación que pudiera formularse, a menos que la ley lo disponga con carácter obligatorio.

2.6. Forma de pago

Industrias IBAIONDO, S.A. propone la facturación de los equipos ofertados en el presente presupuesto de acuerdo con los siguientes hitos:

PAGO POR ADELANTADO

La empresa abonará las facturas a Industrias IBAIONDO, S.A. de la siguiente forma:

PAGO POR ADELANTADO

Industrias Ibaiondo S.A. se aferra a la cláusula ROT.

2.7. Avaluos y gastos financieros

En esta oferta no están incluidos los gastos derivados de la contratación de avaluos o el aplazamiento en el pago total o parcial de la operación por encima de los plazos máximos marcados por la legislación vigente. Cualquiera de estos servicios deberá ser objeto de contratación específica, previa aceptación de las condiciones económicas convenidas

2.8. Validez de la oferta

La presente oferta tiene una validez de 90 días a partir de la fecha de emisión de la misma.

2.9. Documentación

Industrias Ibaiondo S.A. facilitará siempre la factura comercial, la lista de empaquetado y los documentos de transporte en su caso. Si se requieren otros documentos, deben solicitarse y especificarse en la factura proforma y en la orden de compra. Si no se especifica, Industrias Ibaiondo S.A. no estará obligada a proporcionarlos.

Figura VII. 2. Condiciones de entrega de calderín (Ibaiondo, 2026).