

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

**ESCUELA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN RECURSOS HÍDRICOS**



**“FENOMENOS TRANSITORIOS EN EL DISEÑO DE UNA
LÍNEA DE IMPULSIÓN – CASO MINERA LA ZANJA”**

Presentada por:

ALDO ERNESTO RAMÍREZ GONZÁLEZ

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE
MAGISTER SCIENTIAE EN RECURSOS HÍDRICOS**

Lima - Perú

2020

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

**ESCUELA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN RECURSOS HIDRÍCOS**

**“FENOMENOS TRANSITORIOS EN EL DISEÑO DE UNA
LÍNEA DE IMPULSIÓN – CASO MINERA LA ZANJA”**

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE
MAGISTER SCIENTIAE**

Presentada por:

ALDO ERNESTO RAMÍREZ GONZÁLEZ

Sustentada y aprobada ante el siguiente jurado:

Mg.Sc. Ricardo ~~Apaclla~~ Nalvarte
PRESIDENTE

Mg.Sc. Miguel Sánchez Delgado
PATROCINADOR

Dr. ~~Abel~~ Mejía Marcacuzco
MIEMBRO

Mg.Sc. Gonzalo Fano Miranda
MIEMBRO

DEDICATORIA

A mi familia, por ser el núcleo de mi formación personal y profesional, en cada caída sufrida siempre encontré en ellos una razón para levantarme y simplemente mejorar.

A mi esposa Ruby Ramos, debo sinceramente confesar que ninguno de mis logros académicos hubiese podido completarse sin su ayuda, ha sabido fortalecerme en esta lucha incesante que es la vida, le ha puesto luz y alegría.

A mis hijas, por hacerme parte de su crecimiento, estos años han sido un aprender constante y una explosión de emociones continuas, me enseñaron que el único día importante es el hoy, gracias Fabianna y Fiorella.

AGRADECIMIENTOS

Mi mayor agradecimiento a cada persona que dedicó tiempo y esfuerzo buscando que esta tesis se concluya, resalto el apoyo del Msc. Ing. Miguel Sánchez, patrocinador del estudio.

A mi familia nuclear, por cada pedazo de tiempo hecho recuerdo, por una infancia de exploración y alegría irrestricta, de miedos aflorantes y en cierto modo envueltos de incertidumbre que solo el tiempo pudo mostrar con certeza. Hoy me queda claro que la familia nuclear es la que forma tu estructura, inspira tu esencia y acumula tu fuerza.

A mi familia medular, por formar parte de mí entorno racional y emocional, por compartir el sudor de la lucha diaria, la alegría de cada instante juntos, esta familia que formamos es en definitiva la que nos acompaña hasta el final.

A la patria, por ser razón de vida y muerte, por acoger en sus tierras la sangre de sus valerosos soldados, peruanos que defendieron sus fronteras con mas que armas y demostraron el valor de su raza, Olaya, Quiñonez, Cáceres, Ugarte, Bolognesi, Moore, Grau, entre otros símbolos de coraje y amor a su patria.

A los personajes ilustres, por impregnar su nombre en la historia del Perú y compartirnos su visión de la vida, Mariano Melgar, Ciro Alegría, José María Arguedas, José Carlos Mariátegui, Clorinda Matto de Turner, Jorge Basadre, Federico Villarreal y César Vallejo, vienen a mi mente hoy.

A cada creador de nueva bibliografía, autores de libros y artículos que comparten en silencio cada página de ilusión, experiencia y sabiduría.

A los ríos, por ser inspiración continua de energía abrazadora, irresoluta en movimiento, pero capaz de atravesar obstáculos insondables y distantes, estos cursos de agua nunca retroceden y marcan su propio rumbo, los terrenos a su paso son modificados por la constancia de su movimiento hacia el mar.

A Dios, a Irene y a Hugo, eterno agradecimiento por darme la vida y estar hoy más presentes que nunca, reconozco en ellos su incansable amor por sus hijos.

ÍNDICE GENERAL

I.	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Objetivos de la Investigación	1
II.	REVISIÓN DE LITERATURA	3
2.1	Definición de transitorios	3
2.2	Clasificación de los transitorios hidráulicos	3
2.3	Causas de los transitorios en conductos cerrados	4
2.4	Tipos de transitorios en conductos cerrados	5
2.5	Separación de la columna líquida	6
2.6	Análisis de venteo	7
2.6.1	El principio de funcionamiento de la válvula de aire.	10
2.6.2	La válvula de aire combinada.	10
2.7	Modelos de análisis de transitorios hidráulicos	11
2.7.1	Modelos no inerciales.	12
2.7.2	Modelos inerciales.	12
2.7.2.1	Modelo inercial elástico.	12
2.7.2.2	Modelo inercial rígido.	15
2.7.2.3	Frontera entre los modelos elástico y rígido en tuberías de impulsión.	16
2.8	Análisis de transitorios en tuberías de impulsión	16
2.8.1	Inercia de la bomba.	18
2.8.2	Características completas de la bomba y los efectos de velocidades específicas en transitorios hidráulicos.	18
2.8.3	El fenómeno de golpe de ariete en la línea de descarga.	20
2.9	Método de solución de las características	20
2.9.1	Condiciones de contorno en una estación de bombeo.	25
2.10	Programas para el modelamiento	27
2.10.1	Programa KYPipe.	27
2.10.2	Programa ARIavCAD.	29
III.	MATERIALES Y METODOS	31
3.1	Área de Aplicación	31
3.1.1	Ubicación de la zona de estudio.	31
3.1.1.1	Vías de acceso.	31
3.1.2	Clima y meteorología.	32
3.1.2.1	Temperatura del aire.	32
3.1.2.2	Precipitación.	33

3.1.2.3	Humedad relativa.	33
3.1.3	Geología.	34
3.1.3.1	Geomorfología.	34
3.1.3.2	Geología local.	34
3.1.4	Hidrología.	35
3.1.4.1	Oferta de agua.	36
3.1.4.2	Hidrogeología.	36
3.2	Metodología	42
3.2.1	Procedimiento de trabajo.	42
3.2.2	Recopilación y generación de datos.	43
3.2.3	Modelamiento hidráulico.	43
3.2.4	Verificación del modelo hidráulico.	43
3.3	Materiales	43
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	45
4.1	Incidencia del flujo transitorio en la línea de impulsión	45
4.1.1	Descripción de la línea de impulsión.	45
4.2	Modelamiento hidráulico en la línea de impulsión	45
4.2.1	Datos de ingreso para el análisis hidráulico.	45
4.2.2	Modelamiento hidráulico de la línea de impulsión en régimen permanente.	47
4.2.3	Modelamiento hidráulico de la línea de impulsión en régimen transitorio.	49
4.2.3.1	Modelamiento hidráulico en régimen transitorio sin considerar elementos de protección.	49
4.2.3.2	Modelamiento hidráulico en régimen transitorio considerando elementos de protección.	49
4.3	Diseño del sistema de protección	54
4.3.1	Control de arranque y parada de bomba.	54
4.3.2	Control del fenómeno de golpe de ariete.	60
4.3.3	Control de aire en la tubería.	61
4.3.3.1	Información requerida para el análisis ARIavCad.	61
V.	CONCLUSIONES	63
VI.	RECOMENDACIONES	64
VII.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	65
VIII.	ANEXOS	69

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Separación de columna líquida generadas por condiciones de vacío.	6
Figura 2. Ubicación de las válvulas de aire según la norma AWWA M51, distancia entre válvulas ventosas de acuerdo con la geometría del terreno.	13
Figura 3. Cuando usar la teoría elástica frente a la rígida para un cierre de válvula.	17
Figura 4. Impulsión típica con válvula de retención instalada a la salida del equipo.	17
Figura 5. Operación de zonas en sistema polar combinado.	20
Figura 6. Diagrama $x-t$ de las características.	23
Figura 7. Red rectangular para la solución de las ecuaciones características.	24
Figura 8. Notación de diferencias finitas.	24
Figura 9. Curva característica completa de las bombas.	26
Figura 10. Líneas características de una bomba.	27
Figura 11. Perfil de la tubería y gradiente hidráulico en régimen permanente.	48
Figura 12. Cargas modeladas en régimen transitorio sin considerar dispositivos de protección.	52
Figura 13. Presiones modeladas en régimen transitorio sin considerar dispositivos de protección.	53
Figura 14. Ubicación de las válvulas ventosas en el perfil de la línea en régimen permanente, usando el software ARIavCAD.	55
Figura 15. Cargas modeladas en régimen transitorio considerando dispositivos de protección.	58
Figura 16. Presiones modeladas en régimen transitorio considerando dispositivos de protección.	59

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Rutas de acceso.	31
Tabla 2. Promedios mensuales de temperatura media, máxima y mínima y sensación térmica.	32
Tabla 3. Estaciones pluviométricas seleccionadas.	33
Tabla 4. Parámetros geomorfológicos de la subcuenca de la quebrada El Cedro.	35
Tabla 5. Parámetros geomorfológicos de la subcuenca del río Pisit.	36
Tabla 6. Resultados de caudales medios anuales (l/s) en la quebrada Bramadero según el modelo Hidrológico.	37
Tabla 7. Estaciones de monitoreo, línea base de aguas superficiales.	39
Tabla 8. Datos del perfil de la línea de impulsión.	46
Tabla 9. Resultados de la simulación en régimen permanente.	47
Tabla 10. Resultados de la simulación en régimen transitorio sin dispositivos de protección.	50
Tabla 11. Resumen de máximas y mínimas presiones alcanzadas en régimen transitorio sin dispositivos de protección.	50
Tabla 12. Selección y ubicación de válvulas ventosas.	51
Tabla 13. Resultados de la simulación en régimen transitorio con dispositivos de protección.	56
Tabla 14. Resumen de máximas y mínimas presiones alcanzadas en régimen transitorio con dispositivos de protección.	57
Tabla 15. Válvula control de bomba.	60
Tabla 16. Válvula de control anticipadora de onda.	60
Tabla 17. Válvula control de aire.	62

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1 :Válvulas de control hidráulico.	69
ANEXO 2: Reporte de ARIavCAD.	72
ANEXO 3: Válvulas control de aire.	74
ANEXO 4: Resultados de Kypipe.	77
ANEXO 5: Especificaciones de la bomba.	85

RESUMEN

El transporte de agua desde sus fuentes hacia la zona requerida puede realizarse por gravedad o por bombeo, en ambos casos se busca cubrir la demanda de agua en proyectos de irrigación, consumo humano e industrial. Minera La Zanja cuenta con dos yacimientos de extracción, Pampa Verde y San Pedro Sur, con un total de 17 414 000 toneladas de mineral, con una ley promedio de oro y plata de 0.88 y 6.60 g/TM respectivamente y un total de onzas de oro producidas de 325 174. El mineral será lixiviado y procesado en una Planta de adsorción, desorción y regeneración de carbón, obteniendo como producto final anual de 100 000 onzas de oro y 200 000 de plata, la inversión se ha estimado en US \$ 50 millones. Para conseguir los beneficios planteados los procesos mineros necesitan un caudal total máximo de 48.9 l/s de los cuales 20 l/s lo recibe del reservorio Bramadero y los restantes 28.9 l/s serán abastecidos por la línea de impulsión Pisit – Bramadero, en este contexto el sistema de bombeo debe garantizar el suministro del caudal déficit. El propósito de la presente tesis es resaltar la incidencia del flujo transitorio en el diseño de la línea de impulsión que extrae agua del río Pisit y la transporta al reservorio Bramadero, con la finalidad de cubrir el déficit histórico de minera La Zanja. Se aplica un análisis hidráulico basado en modelos inerciales para evaluar los transitorios en conductos cerrados, empleando datos del perfil de la línea de impulsión y del conjunto motor bomba. El software KYPipe se emplea en el modelamiento hidráulico, el procedimiento considera un análisis del sistema en flujo permanente para obtener las presiones de operación y otro en flujo transitorio como consecuencia del corte de suministro eléctrico y parada abrupta de la electrobomba, este flujo en régimen transitorio es evaluado considerando dos escenarios, sin y con elementos de protección. También se presenta el estudio de venteo que evita las acumulaciones de aire en la línea y la separación de columna de agua, el software ARIavCAD se emplea para ubicar y dimensionar las válvulas ventosas dentro de la tubería de impulsión. Los resultados de presiones extremas máximas y mínimas obtenidas del análisis transitorio sin considerar elementos de protección fueron muy superiores a la presión de operación siendo necesario sobredimensionar la resistencia del material de la tubería aumentando en exceso los espesores de este. Considerando los elementos de protección como la válvula anticipadora de onda, la válvula control de bomba y las ventosas, se logra reducir las presiones máximas y controlar las depresiones hasta límites que garanticen una operación segura y un sistema eficiente.

Palabras Clave: Transitorio hidráulico, golpe de ariete, tubería, método de las características.

ABSTRACT

The transport of water from its sources to the required area can be done by gravity or by pumping, in both cases it is sought to cover the demand for water in irrigation, human and industrial consumption projects. Minera La Zanja has two extraction sites, Pampa Verde and San Pedro Sur, with a total of 17,414,000 tons of ore, with an average gold and silver grade of 0.88 and 6.60 g/MT respectively and a total of ounces of Gold produced from 325 174. The ore will be leached and processed in a coal adsorption, desorption and regeneration plant, obtaining as annual final product of 100,000 ounces of gold and 200,000 of silver, the investment has been estimated at US \$ 50 millions. To achieve the benefits raised, the mining processes need a maximum total flow of 48.9 l/s of which 20 l/s receives it from the Bramadero reservoir and the remaining 28.9 l/s will be supplied by the Pisit - Bramadero drive line, in this context the pumping system must guarantee the supply of the deficit flow. The purpose of this thesis is to highlight the incidence of transient flow in the design of the impulse line that extracts water from the Pisit River and transports it to the Bramadero reservoir, in order to cover the historical deficit of the La Zanja mining company. A hydraulic analysis based on inertial models is applied to evaluate the transients in closed ducts, using data from the profile of the drive line and the pump motor assembly. The KYPipe software is used in hydraulic modeling, the procedure considers an analysis of the system in permanent flow to obtain the operating pressures and another in transient flow as a result of the power supply cut and abrupt stop of the electric pump, for this flow in regime Transitory are evaluated in two scenarios, without and with protection elements. The venting study that avoids the accumulation of air in the line and the separation of the water column is also presented, the ARIavCAD software is used to locate and size the suction valves inside the supply pipe. The results of maximum and minimum extreme pressures obtained from the transitory analysis without considering protection elements, were much higher than the operating pressure, being necessary to oversize the resistance of the pipe material by excessively increasing its thicknesses. Considering the protection elements such as the wave anticipating valve, the pump control valve and the suction cups, it is possible to reduce the maximum pressures and control the depressions to limits that guarantee a safe operation and an efficient system.

Keywords: Hydraulic transient, water hammer, pipe, characteristics method.

I. INTRODUCCIÓN

El análisis del transitorio hidráulico juega un papel importante en el diseño de sistemas de tuberías presurizadas. También es igualmente importante en la etapa de operación de un sistema existente para el diagnóstico de problemas de mal funcionamiento o causas de rupturas de tuberías (Soares y Covas citado por Nerella y Rathnam, 2015). Debido a ello la importancia de considerar la protección hidráulica de una línea de impulsión al momento de diseñar un sistema de bombeo. Generalmente se suele sobredimensionar los espesores, la resistencia de los materiales, instrumentos y equipos del sistema de bombeo que permita soportar las presiones extremas generadas por el fenómeno de golpe de ariete. Otra manera de minimizar los efectos adversos generados por el transiente hidráulico se consigue modelando las presiones que soportará la línea y proponiendo equipos de control que aseguren presiones en sus rangos mínimos.

El caso en estudio corresponde a la línea N°7 de Minera La Zanja, este sistema extrae agua del río Pisít y lo transporta al reservorio Bramadero, con la finalidad de sumar un caudal al obtenido por el vaso de recepción del reservorio. La operación del proceso minero se sustenta en el afianzamiento del recurso hídrico de las fuentes citadas.

Finalmente se propondrán los equipos de protección y su ubicación en la línea de impulsión, basado en un modelamiento de transitorios hidráulicos mediante el software KYPipe y teniendo en cuenta el estudio de venteo realizado con el software ARIavCAD.

1.1 Objetivos de la Investigación

Objetivo general:

- Evaluar la incidencia del flujo transitorio en el diseño de una línea de impulsión.

Objetivos específicos:

- Aplicar un modelo matemático para la determinación del flujo transitorio y los valores de presión máximos y mínimos alcanzados en la línea N°7- Minera La Zanja
- Realizar el modelamiento de la línea de impulsión considerando elementos de protección como válvulas de control, anticipadoras de onda, ventosas, entre otros.
- Proponer un sistema automatizado para el control de los efectos adversos generados por los transitorios hidráulicos.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Definición de transitorios

Diseñar una tubería para operar en condiciones de estado estable implica la aplicación de principios bien establecidos y bastante fáciles de entender. Si los supuestos como la fricción de la tubería, las pérdidas menores o los factores de envejecimiento no son exactos, generalmente la consecuencia es que el flujo real es ligeramente diferente del flujo calculado. Los graves problemas de ingeniería con las tuberías se asocian generalmente con la cavitación o las condiciones de flujo inestable, ya sea durante el llenado de la línea, mientras se realizan cambios en la operación, fallas por corte de suministro eléctrico en las electrobombas, apertura o cierre accidental de una válvula, etc. Para algunas tuberías, especialmente en líneas largas sobre terreno montañoso, el momento más crítico en la vida útil de la tubería puede ser el llenado inicial, la presurización y el lavado del aire. Si no se proporcionan disposiciones de diseño y procedimientos operativos adecuados, puede que no sea posible poner la línea en servicio de manera segura. La presión transitoria generada durante el llenado puede exceder fácilmente el rango de operación segura de la tubería (Tullis, 1989). En el flujo constante no hay cambios en las condiciones del flujo en el tiempo, en condiciones de flujo inestable las condiciones pueden cambiar con el tiempo. En flujo uniforme la velocidad promedio en cualquier sección transversal es la misma en el tiempo, en un flujo no uniforme la velocidad varía a lo largo del conducto en cualquier momento dado. Los términos golpe de ariete y flujo transitorio se usan de manera sinónima para describir el flujo inestable de fluidos en tuberías, aunque el uso de los primeros se restringe habitualmente al agua (Wylie y Streeter, 1978).

2.2 Clasificación de los transitorios hidráulicos

Dependiendo del conducto en el que se producen las condiciones transitorias, se pueden clasificar en tres categorías:

- Transitorios en conductos cerrados.
- Transitorios en canales abiertos

- Flujo transitorio combinado presurizado en superficie libre.

El análisis de transitorios en conductos cerrados se puede subdividir en dos tipos: sistemas distribuidos y sistemas agrupados. En el primer caso, el fluido se considera compresible y el fenómeno transitorio se produce en forma de ondas viajeras. Los ejemplos en los que ocurren tales transitorios son las tuberías de suministro de agua, los conductos de las centrales eléctricas y las líneas de transmisión de gas. En el análisis de los sistemas agrupados, se supone que cualquier cambio en las condiciones de flujo tiene lugar instantáneamente en todo el fluido, es decir, el fluido se considera como un cuerpo sólido (masa rígida). Ejemplo de un sistema de este tipo son las lentas oscilaciones del nivel de agua en un tanque de compensación tras un cambio de carga en la turbina (Chaudhry, 1979).

Chaudhry (1979) señala que matemáticamente, los transitorios en los sistemas distribuidos se representan mediante ecuaciones diferenciales parciales, mientras que los transitorios en los sistemas agrupados se describen mediante ecuaciones diferenciales ordinarias. Si $\omega L / a$ es mucho menor que 1, entonces el sistema puede analizarse como un sistema agrupado, de lo contrario, el sistema debe ser analizado como un sistema distribuido. En la expresión precedente, " ω " frecuencia, "L" longitud de la tubería y "a" velocidad de onda.

A veces, un flujo libre se presuriza debido al cebado de los conductos durante las condiciones de estado transitorio. Tales flujos se llaman flujos presurizados de superficie libre combinados. Ejemplos de tales flujos se dan en una tormenta pluvial sobre alcantarillas o el flujo en el túnel de la carrera de una central hidroeléctrica luego de una rápida aceptación de la carga en las turbinas (Chaudhry, 1979).

2.3 Causas de los transitorios en conductos cerrados

Muchos pueden ser los eventos que pueden generar un transitorio. Líneas abajo algunos de ellos:

- Cambio de apertura de la válvula.
- Arranque o parada de bombas.
- Funcionamiento de válvulas de retención, válvulas de liberación de aire, válvulas reductoras de presión y válvulas de alivio de presión.
- Rotura de la tubería.
- Llenado, lavado o eliminación de aire en tuberías.

- Aire atrapado en tuberías.
- Cambio en la demanda de potencia de las turbinas hidráulicas.

Todas las tuberías experimentan transitorios, si este crea problemas operacionales o falla de la tubería depende de la magnitud y capacidad de las tuberías para tolerar altas presiones sin daños. Por ejemplo, una tubería de concreto no reforzado puede tener un margen de presión transitoria de solo unos pocos pies por encima de su presión de operación antes de que pueda ocurrir el daño. Para tales situaciones, incluso en el cierre lento de las válvulas de control o interrupciones menores de flujo debidas a cualquier causa, pueden crear suficientes presiones transitorias para romper la tubería. En contraste, las tuberías de acero generalmente pueden tomar presiones transitorias relativamente altas sin fallas (Tullis, 1989).

2.4 Tipos de transitorios en conductos cerrados

Según Stephenson (1984) los transitorios generados en conductos cerrados se clasifican normalmente en dos categorías: una oscilación en masa a cámara *lenta* del fluido que se denomina oleada y un cambio rápido en el flujo acompañado por una tensión elástica del fluido denominado golpe de ariete. Para cambios lentos o pequeños en el flujo o la presión, las dos teorías producen resultados similares.

Normalmente es más fácil analizar un sistema mediante la teoría de columna rígida que mediante la teoría elástica. Por otro lado, hay muchas situaciones en las que es inexacto o incluso peligroso aplicar esta teoría simplificada, y debe aplicarse la teoría del golpe de ariete. Con la teoría de la columna rígida, el agua en el conducto se trata como una masa incompresible, aunque la columna de agua puede moverse libremente en las curvas y en las expansiones, etc. Una diferencia de presión aplicada en los extremos de la columna produce una aceleración instantánea en toda su longitud. La ecuación básica que relaciona la diferencia de la carga entre los extremos de la columna de agua en un conducto de perforación uniforme con la tasa de cambio en la velocidad se deriva de la ley básica del movimiento de Newton, y es:

$$h = -\frac{L}{g} \frac{dv}{dt} \quad (1)$$

Donde "h" es la diferencia de carga entre los dos extremos, "L" es la longitud del conducto, "v" la velocidad del flujo, "g" la aceleración gravitacional y "t" es el tiempo.

La ecuación es útil para calcular el aumento de altura asociado con la desaceleración lenta de una columna de agua. Se puede usar para calcular las variaciones de nivel de agua en unos picos de tensión después de un disparo de potencia o puesta en marcha en una línea de bombeo, o cambios de carga de potencia en una instalación hidroeléctrica alimentada por una tubería de presión. La ecuación se puede resolver en pasos de Δt con ayuda de un computador, en forma tabular o gráficamente (Stephenson, 1984).

2.5 Separación de la columna líquida

La separación de columna líquida se refiere a la ruptura de la columna en tuberías completamente llenas. Esto puede ocurrir en un evento de golpe de ariete cuando la presión en una tubería cae a la presión de vapor en lugares específicos como extremos cerrados, puntos altos o cambios en la pendiente de la tubería.

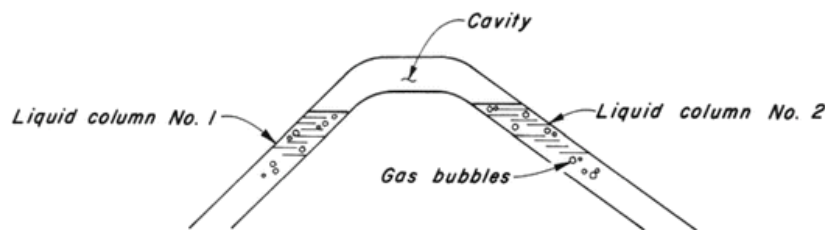


Figura 1. Separación de columna líquida generadas por condiciones de vacío.
FUENTE: Chaudhry (2014).

Bergant y Simpson (1999) refieren que pueden suceder dos tipos diferentes de separación de columnas. El primer tipo es una cavidad de vapor localizada con una gran fracción de vacío puede formarse en un punto alto a lo largo de la tubería, además, se puede formar una cavidad intermedia como resultado de la interacción de dos ondas de baja presión a lo largo de la tubería. El segundo tipo de separación de columna es la cavitación vaporosa distribuida que puede extenderse sobre secciones largas de la tubería, la fracción vacía para la mezcla de líquido y burbujas de vapor líquido en cavitación vaporosa distribuida es pequeña (cerca de cero). Este tipo de cavitación ocurre cuando una onda de rarefacción disminuye progresivamente la presión en una región extendida de la tubería hasta la presión de vapor líquido. Tanto el colapso de una cavidad de vapor discreta como el movimiento del frente de onda de choque en una región de cavitación vaporosa distribuida condensan la fase de

vapor de nuevo a la fase líquida. Por lo tanto, los sistemas de tuberías pueden experimentar efectos combinados entre golpe de ariete y separación de columna de agua durante eventos transitorios ([Cita Streeter, 1983](#); [Bergant y Simpson 1992](#); [Wylie y Streeter, 1978](#))

2.6 Análisis de venteo

La presencia de bolsas de aire atrapadas en conductos a presión puede reducir de forma importante el transporte de agua en este tipo de sistemas. En líneas de impulsión por bombeo, la presencia de aire se puede reflejar en un incremento en el consumo de energía eléctrica y la reducción del caudal. Estos problemas siguen ocurriendo hoy en día, incluso en acueductos construidos recientemente, debido a la falta de criterios de diseño que logren un funcionamiento eficiente ([Pozos et al., 2017](#)).

Es por ello la importancia de la colocación de dispositivos que controlen la entrada y salida de aire en la línea ya sea por las bolsas de aire atrapado o para romper el vacío generado por la separación de columna de agua. Dichos dispositivos son las válvulas ventosas, que serán ubicadas en la línea con ayuda al programa ARIavCAD.

Las ventosas (válvulas automáticas, cinética, combinada o de romper vacío) son una de las diversas herramientas disponibles para el control de transitorios hidráulicos. Una correcta especificación de la válvula, un dimensionamiento eficiente y su ubicación dentro de la instalación empleando un modelo computacional adecuado, son de vital importancia para la eficacia de la protección.

En la actualidad existen poderosas herramientas informáticas capaces de modelar con alto grado de exactitud el comportamiento de las ventosas en estas situaciones, esto nos permite combinarlas con otras tecnologías para poder realizar recomendaciones técnicas 100% fiables y con costos de implantación menores ([Gandarillas, s.f.](#)).

Se prestará especial atención a la ventosa de efecto dinámico desarrollada por [ARI Flow Control Accesories Ltd \(s.f.\)](#). En los sistemas de conducción de agua se encuentran volúmenes de aire disuelto y libre, debido a una o varias de las siguientes causas:

- La línea no se ha llenado completamente, dejando bolsas de aire en los puntos altos y en accesorios.
- El aire que estaba disuelto en el líquido se libera porque baja la presión o sube la temperatura.
- Torbellinos del líquido en el punto de bombeo introducen aire en el sistema.
- Succión de aire a través de orificios y accesorios.

Si el aire que está en el sistema no se controla, pueden producirse diversos fenómenos, tales como:

- Generación de vacío con efectos muy negativos.
- Disminución de la eficiencia del drenaje.
- Ondas de sobrepresión.
- Bolsas de aire, capaces de provocar la reducción de la sección transversal del flujo, con aumento en las pérdidas de energía, sacudones en el sistema y en casos extremos, la interrupción total del flujo.
- Incremento de la corrosión en las piezas y accesorios de metal.
- Reducción de la eficiencia de la bomba.
- Distorsiones en la medición del flujo.
- Mayor desgaste en las piezas móviles y en los medidores de flujo.
- Riesgo de cavitación.

La finalidad de purgar grandes caudales de aire durante el llenado de la tubería e introducir grandes caudales de aire mientras el sistema se vacía, es de importancia crítica para tuberías susceptibles de colapso. El ingreso de aire en el sistema influye en la velocidad de salida del líquido, un factor importante cuando las tuberías de agua o de otros fluidos se drenan con fines de mantenimiento.

Este tipo de válvula funciona sólo cuando la tubería se encuentra en condición atmosférica, es decir cuando el sistema no está presurizado, cuando el agua fluye por el sistema presurizado esta válvula permanece cerrada, la presión del sistema sobre la abertura superior de la válvula genera una fuerza mayor que el peso del flotador, por consiguiente, cuando no hay presión en el sistema el flotador baja y el aire entra, la liberación de aire a grandes

velocidades no puede arrastrar el flotador causando el cierre prematuro de la válvula que se cierra herméticamente sólo con la llegada del líquido a la válvula. El caudal de aire que se requiere, así como el diámetro de la válvula, se determinan en función de la finalidad de instalación de la válvula, según se explica a continuación:

Si la finalidad de la válvula de aire es sólo limitar la velocidad de llenado, el caudal de salida del aire que se requiere es igual al caudal de llenado del sistema, que deriva de la velocidad deseada de llenado. Si la función de la válvula de aire es proteger al sistema en caso de rotura de un tubo en toda su sección transversal, con vaciado en flujo libre, suele determinarse el caudal de entrada del aire que se requiere efectuando un análisis basado en alguna de las fórmulas de cálculo de caudales, tales como la ecuación de Hazen-Williams.

$$Q_{burst} = \sqrt[1.852]{\frac{S \cdot D^{4.87} \cdot C^{1.852}}{10.69}} \quad (2)$$

Donde:

Q_{burst} = Capacidad requerida de introducción para la rotura (m^3/seg).

S = Pendiente hidráulica o pérdida de carga (m/m).

D = Diámetro (m).

C = Coeficiente de Hazen-Williams.

Si la válvula de aire se instala para proteger al sistema mientras se vacía a través de un determinado dispositivo de drenaje, se puede utilizar un análisis basado en la ecuación del orificio:

$$Q_{drainage} = C_d \sqrt{2g\Delta h} \pi \left(\frac{D}{2}\right)^2 \quad (3)$$

Donde:

$Q_{drainage}$ = Capacidad requerida de introducción para la rotura (m^3/s).

C_d = Coeficiente de descarga (0.6).

g = Gravedad ($9.81 m/seg^2$).

Δh = Diferencia de altura entre el punto más alto y el punto de drenaje (m).

D = Diámetro de la válvula de drenaje (m).

Si la válvula de aire está destinada a proteger al sistema en caso de rotura de un diámetro determinado, se puede utilizar el análisis mencionado, utilizando una válvula de drenaje virtual con un diámetro igual al de la rotura. Puesto que el cálculo del diámetro de las

válvulas de aire debe efectuarse en cada punto de aire del sistema por separado, se trata de una tarea laboriosa, para facilitarla, ARI ha desarrollado un software especializado denominado ARIavCAD, por intermedio del cual se determinan los diámetros y ubicaciones de las válvulas de aire y se seleccionan las válvulas más adecuadas a cada punto, de los varios modelos producidos por ARI ([ARI Flow Control Accesories Ltd, s.f.](#)).

2.6.1 El principio de funcionamiento de la válvula de aire. El efecto de la válvula de aire en las tuberías de agua de larga distancia se encuentra en las siguientes tres áreas: en primer lugar la etapa de llenado de agua de la tubería es realizada a cierta velocidad, la válvula de aire puede descargar el gas restante de la tubería, segundo lugar, en la etapa normal de trabajo la válvula de aire puede descargar la pequeña cantidad de gas recolectado en la tubería de manera oportuna, finalmente, durante las etapas de falla o mantenimiento de la bomba, la válvula de aire repondrá el gas en la tubería para romper el vacío. De acuerdo con el tamaño del orificio, el desplazamiento y la presión de trabajo, la válvula de aire se divide en una válvula de escape de alta presión, una válvula de descarga de aire de baja presión y una válvula de aire combinada. La válvula de escape de alta presión descarga principalmente la pequeña cantidad de gas recolectado en la parte superior de la tubería, el orificio es generalmente pequeño. La válvula de descarga de aire a baja presión es principalmente responsable de vaciar la tubería y controlar la alta velocidad en el tubo de escape durante las etapas de falla o mantenimiento de la bomba. La válvula de aire combinada es una combinación de la válvula de escape de alta presión y la válvula de liberación de aire de baja presión ([Li, Baggett y Rosario](#), citado por [Wu et al., 2015](#)).

2.6.2 La válvula de aire combinada. [Lee y Leow \(1999\)](#) señalan que la válvula de aire combinado funciona de la siguiente manera:

- En la tubería vacía la etapa inicial de llenado de agua, se debe descargar completamente la gran cantidad de gas recolectado en la tubería para garantizar una carga suave.
- El agua comienza a ingresar a las válvulas de admisión y escape en la presión baja, debido a los efectos de flotación la bola flotante se eleva para cerrar los puertos de admisión y escape, cuando en las tuberías durante la operación normal el aire disuelto en el agua se libera lentamente y se acumula dentro de las tuberías se mueve hacia la válvula de aire, reemplaza el agua en el cuerpo de la válvula.

- A medida que el aire continúa acumulándose, el nivel de líquido de la válvula de escape de alta presión baja, el flotador también comienza a caer, después de completar las emisiones de aire, el agua vuelve a ingresar a la válvula de escape de alta presión, el flotador sube por efecto de la flotabilidad y cierra la ventilación.
- Cuando se produce la presión negativa en la tubería, el flotador en la válvula de liberación de aire a baja presión aterriza inmediatamente, abre el puerto de admisión y de escape, eliminando la presión negativa para evitar la separación de columna de agua, de esta forma protege el sistema de tuberías.

Debido a la presión alta, la válvula de escape solo puede expulsar y el escape solo puede llevarse a cabo bajo alta presión, la válvula de liberación de aire a baja presión solo puede recibir o expulsar aire de masa a baja presión. Así que, en la ingeniería práctica, las dos válvulas de escape rara vez se utilizan. Basados en la combinación de la válvula de escape de alta presión y la válvula de liberación de aire de baja presión juntas, la válvula de aire combinada no solo puede descargar la salida de alta presión sino también la de alta velocidad a baja presión, para superar los inconvenientes la válvula de aire combinada ha sido ampliamente utilizada en ingeniería práctica (Lee y Leow, 1999).

En el Manual of water supply practice [AWWA MANUAL M51 \(2002\)](#) se detallan las consideraciones que se deben tener en cuenta en el análisis de venteo.

2.7 Modelos de análisis de transitorios hidráulicos

Una de las características fundamentales de los modelos de análisis de redes hidráulicas a presión es la presencia de la variable temporal. Así, el objetivo de un modelo no es únicamente obtener los valores de las variables significativas (como las presiones en nudos y caudales en las líneas) sino que se busca la obtención de la variación a lo largo del tiempo (Iglesias et al., 2003:).

Los modelos dinámicos, en los que interviene la variación a lo largo del tiempo tanto de los parámetros como de las variables, se pueden clasificar en:

- a. Modelos no inerciales.
- b. Modelos inerciales, que a su vez pueden clasificarse en modelos inerciales rígidos y modelos inerciales elásticos.

2.7.1 Modelos no inerciales. Los modelos no inerciales son un tipo particular de modelos dinámicos en los que se desprecia la inercia del fluido en el sistema, de forma que la característica dinámica le viene conferida por el hecho de disponer de una serie de condiciones de contorno lentamente variables con el tiempo. Este tipo de modelos son los que comúnmente se denominan modelos cuasi-estáticos y cuya implementación es lo que se llama simulación en periodo extendido.

2.7.2 Modelos inerciales. Los modelos inerciales presentan como característica principal el hecho de considerar la inercia del fluido en su movimiento, es decir, la energía puesta en juego en los cambios de velocidad, motivados por variaciones temporales de las condiciones de contorno.

2.7.2.1 Modelo inercial elástico. Se trata de un modelo empleado en caso de maniobras bruscas en el sistema, donde los fenómenos elásticos se ponen claramente de manifiesto (Iglesias et al., 2003).

Cuando los cambios en la velocidad, y en consecuencia la presión, ocurren rápidamente, tanto la compresibilidad del líquido como la elasticidad de la tubería deben incluirse en el análisis. Este procedimiento a menudo se denomina análisis "elástico" o "golpe de ariete" e implica ondas de presión acústica que viajan a través de la tubería y la solución de ecuaciones diferenciales parciales.

Aunque el término transitorio se refiere a todos los flujos inestables, generalmente se usa para identificar el caso "elástico" específicamente (Tullis, citado por Abuiziah et al., 2013). A partir de los balances de materia y cantidad de movimiento, pueden establecerse (Abreu et al., 1995c) las ecuaciones generales del modelo elástico:

Ubicación de las válvulas de aire en función de las líneas de fluidos

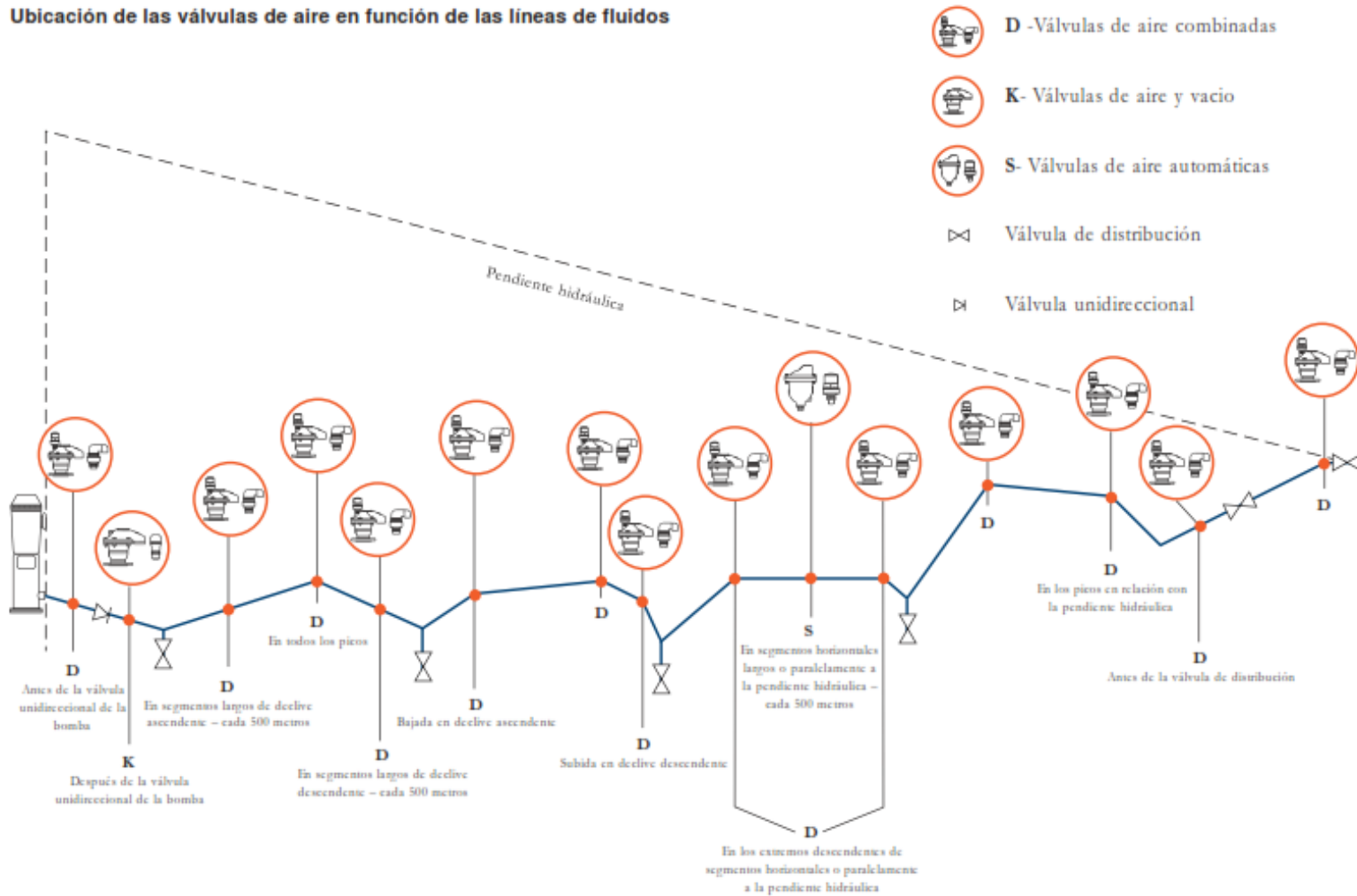


Figura 2. Ubicación de las válvulas de aire según la norma AWWA M51, distancia entre válvulas ventosas de acuerdo con la geometría del terreno.
 FUENTE: [ARI Flow Control Accesories Ltd. s.f.](#)

$$\frac{\partial H}{\partial x} + \frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{fV|V|}{2gD} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (5)$$

Aplicadas a un segmento δx de la tubería, y en donde las variables tienen la siguiente significación: V, velocidad; t, tiempo; x, variable espacial considerada; ρ , densidad del agua; H, altura piezométrica; g, aceleración de la gravedad; f, factor de fricción; D, diámetro de la tubería y “a” celeridad de propagación de una perturbación a lo largo de la tubería. Las ecuaciones (4) y (5) se escribe en términos del caudal Q y se reorganiza de la siguiente manera dando lugar a las ecuaciones del modelo elástico:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{f}{2DA} Q|Q| = 0 \quad (6)$$

$$\frac{a^2}{gA} \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial t} = 0 \quad (7)$$

La celeridad de la onda de presión:

$$a = \frac{\sqrt{\frac{K}{\rho}}}{\sqrt{1 + \frac{KD}{Ee}}} \quad (8)$$

[Chaudhry \(1979\)](#) indica que estas ecuaciones se pueden clasificar como elípticas, parabólicas o hiperbólicas de la siguiente manera:

Las ecuaciones (6) y (7) se pueden escribir en forma de matriz como:

$$\frac{\partial}{\partial t} \begin{Bmatrix} Q \\ H \end{Bmatrix} = [B(Q; H)] \frac{\partial}{\partial x} \begin{Bmatrix} Q \\ H \end{Bmatrix} - [G(Q, H)] \quad (9)$$

En la cual:

$$B = \begin{bmatrix} 0 & gA \\ \frac{a^2}{gA} & 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$G = \begin{bmatrix} fQ|Q| \\ \frac{2DA}{0} \end{bmatrix} \quad (11)$$

Los valores propios, λ de la matriz B determinan el tipo de conjunto de ecuaciones. La ecuación característica (Wylie, 1967) de la matriz B es:

$$\lambda^2 - a^2 = 0 \quad (12)$$

Por lo tanto:

$$\lambda = \pm a \quad (13)$$

Como “a” es real, ambos valores propios son reales distintos y por lo tanto las ecuaciones (6) y (12) forman un conjunto de ecuaciones diferenciales parciales hiperbólicas (Chaudhry, 1979).

Para resolver este conjunto de ecuaciones diferenciales no lineales en derivadas parciales de tipo hiperbólico se recurre, generalmente, al método de las características (MOC) (Abreu, Guarga, et al., 1995c), que proporciona una solución numérica de la función es $Q = Q(x, t)$ y $H = H(x, T)$ que describen el comportamiento del sistema, como respuesta a una determinada condición de contorno (p.e. cierre de una válvula, cambio brusco en el consumo en un nudo, etc.) consideradas asimismo en la resolución conjunta con las ecuaciones (6) y (7). (Abreu, 1995a). Como “a” es real, ambos valores propios son reales y distintos, (6) y (12) forman un conjunto de ecuaciones diferenciales parciales hiperbólicas (Chaudhry 1979).

2.7.2.2 Modelo inercial rígido. Para Iglesias et al. (2003) el modelo rígido, también denominado oscilación en masa o modelo de parámetros concentrados, a diferencia de los modelos elásticos no tiene en cuenta la elasticidad del fluido y de la conducción. El modelo rígido tiene como característica destacable la de ofrecer resultados suficientemente precisos cuando las variaciones de caudal y las maniobras en el sistema se realizan de manera suficientemente lenta.

Un modelo simplificado del modelo elástico se obtiene en el caso de suponer que las perturbaciones se transmiten de manera instantánea, al considerar el medio “rígido” (tanto

el fluido como las paredes de la conducción). Este modelo admite aún la variabilidad temporal de Q y H, pero sólo debido a la inercia de las masas fluidas, se conoce con el nombre de modelo rígido o de oscilación en masa. Haciendo tender a infinito la celeridad a en la ecuación (7) se llega a que $\partial Q/\partial x \rightarrow 0$, de modo que ahora Q solo evoluciona con el tiempo a lo largo de la conducción $Q = Q(t)$. Ello permite escribir la ecuación (6) (Bartolín et al., 2006).

$$\frac{dQ}{dt} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{f}{2DA} Q|Q| = 0 \quad (14)$$

2.7.2.3 Frontera entre los modelos elástico y rígido en tuberías de impulsión. Antes del uso generalizado de las computadoras, el tema de la teoría de la columna de agua rígida era muy popular, numerosos investigadores e ingenieros dedicaron un gran esfuerzo para mejorar su precisión y determinar el alcance de su aplicación. La figura 3 muestra cuándo usar la teoría de la columna elástica frente a la rígida para un cierre de válvula es un gráfico adimensional del tiempo de cierre de la válvula dividido por la mitad del tiempo característico, l/a . En comparación con la relación entre la carga inicial y la carga transitoria en una zona sin fricción (o muy baja fricción). Se muestra que diferentes investigadores, a partir de 1933, propusieron varios criterios para determinar cuándo es necesaria una solución elástica y cuándo una solución de columna rígida es lo suficientemente precisa (Bentley, s. f.).

2.8 Análisis de transitorios en tuberías de impulsión

Según Parmakian (1963) existen muchas condiciones de operación en grandes instalaciones de bombas centrífugas accionadas por motor que son capaces de producir cambios sustanciales de presión en la línea de descarga, una de las condiciones más importantes es la rápida desaceleración de los motores de la bomba debido a un corte de energía. Abreu et.al (1995d) consideró un análisis hidráulico y parte de la base de una impulsión típica, con una válvula de retención instalada a la descarga del equipo de bombeo y en la que no se produce la separación de la columna líquida por cavitación durante el transitorio.

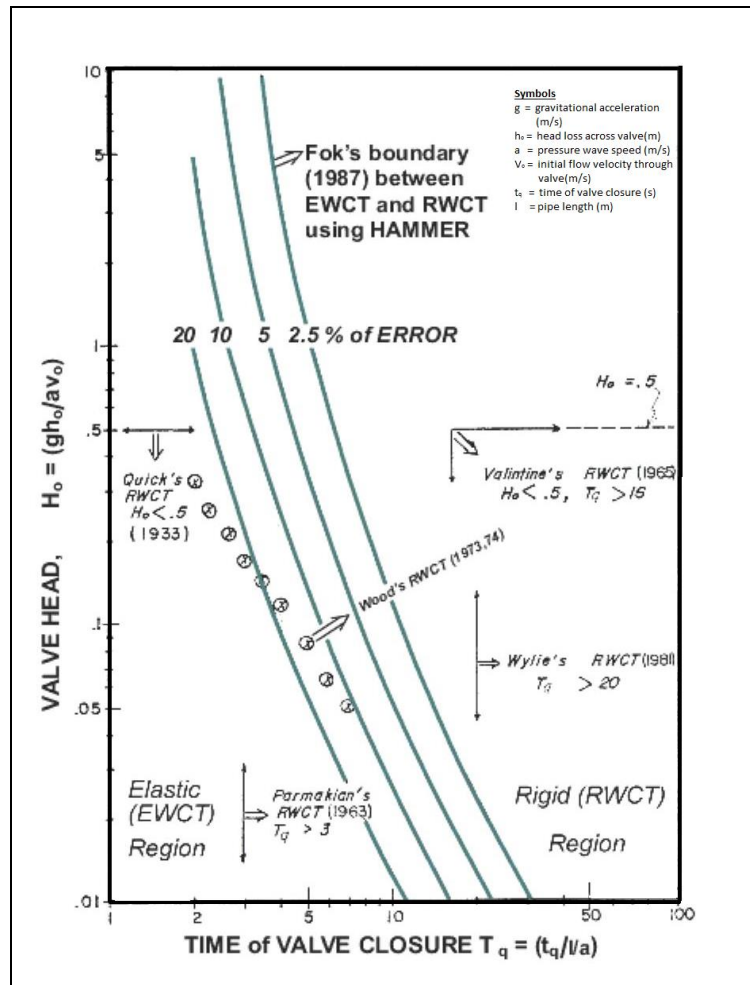


Figura 3. Cuando usar la teoría elástica frente a la rígida para un cierre de válvula. FUENTE: Bentley (s.f.).

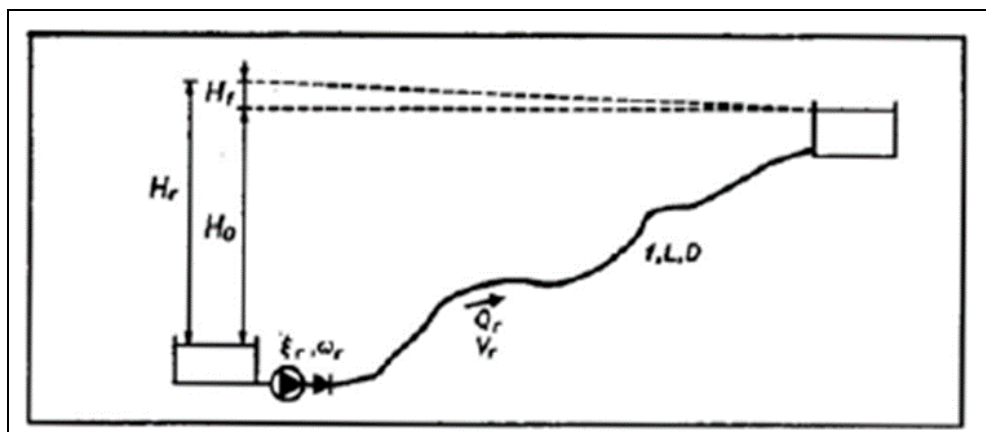


Figura 4. Impulsión típica con válvula de retención instalada a la salida del equipo. FUENTE: Abreu et al. (1995d).

Para determinar las condiciones hidráulicas transitorias en la bomba y en la línea de descarga posterior a un corte de energía eléctrica que detiene el motor de la bomba, se deben considerar tres efectos, *las características de la bomba, la inercia del conjunto motor bomba y el fenómeno de golpe de ariete en la línea de descarga* (Parmakian, 1963).

2.8.1 Inercia de la bomba.

La inercia de la bomba o el momento de inercia de una bomba es su resistencia a cambiar la velocidad angular cuando gira alrededor de su eje. El conocimiento del momento de inercia de una bomba, motor y componentes asociados se requiere típicamente para el análisis transitorio de un sistema de bombeo. La inercia de la bomba es constante para una combinación particular de bomba y motor. Cuanto mayor sea la inercia de una bomba más tiempo le tomará a la bomba dejar de girar después de su apagado y viceversa (Bentley, s.f.). La inercia de la bomba se puede aumentar mediante el uso de un volante, el alto valor de la inercia de la bomba puede controlar la gran sobretensión en la línea de tubería, pero los problemas mecánicos asociados con las bombas de alta inercia lo hacen poco práctico, la inercia total de la bomba incluye la inercia de la bomba y el motor. La inercia de la bomba se calcula como (Kumar y Ruchi, 2017):

$$I_{bomba} = 1.5 * 10^7 * \left(\frac{P}{N^3}\right)^{0.9556} \quad (15)$$

Donde:

I_{bomba} : Inercia de la bomba en Kg·m².

P: Potencia en kW.

N: Velocidad rotacional de la bomba en RPM.

La inercia del motor se calcula como:

$$I_{motor} = 118 * \left(\frac{P}{N}\right)^{1.48} \quad (16)$$

2.8.2 Características completas de la bomba y los efectos de velocidades específicas en transitorios hidráulicos. Donsky (1961) refiere que las características de funcionamiento completas de las bombas con varias velocidades específicas no están

fácilmente disponibles. En general, el fabricante de la bomba suministra la carga de presión, la potencia de frenado y la eficiencia representada en comparación con la descarga para la velocidad normal de operación de la bomba. Las características completas de una bomba se presentan en las zonas de operación de la bomba, operación de la turbina y disipación de energía. Estas zonas se pueden trazar como familias de curvas de relación de velocidad y curvas de relación de torque en un sistema de coordenadas de v - hp (relación de carga y flujo). En esta forma, es conveniente determinar los efectos transitorios de los golpes de ariete mediante procedimientos gráficos. Además, es posible determinar por inspección las condiciones de estado estable existente a diferentes cargas o velocidades en condiciones normales y anormales de operación.

Definimos las siguientes variables adimensionales:

$$v = \frac{Q}{Q_R} ; h = \frac{H}{H_R} ; \alpha = \frac{N}{N_R} ; \beta = \frac{T}{T_R} \quad (17)$$

Donde α es la velocidad adimensional; v tasa de flujo adimensional; h carga de bombeo adimensional; β tasa del torque adimensional; Q_R flujo nominal; N_R velocidad nominal; H_R carga nominal y T_R torque nominal. Dado α , v/α y h/α^2 representan la curva de la carga de la bomba, así como v/α and β/α^2 representan la curva de torque de la bomba.

De hecho, hay diferentes curvas para diferentes velocidades α . Las características completas de la bomba solo pueden expresarse mediante sistema de curvas. Es difícil aplicar directamente estas curvas a la simulación numérica transitoria, ya que estas relaciones consisten en muchas curvas. Para aplicar estas curvas a la simulación de transitorios hidráulicos, [Marchal et al. \(1965\)](#) utilizó solo dos curvas para representar las características completas de la bomba. El esquema de Suter puede ser escrito como ([Wan y Huang, 2011](#)):

$$\begin{cases} Wh(x) = \frac{h}{\alpha^2 + v^2} \\ Wb(x) = \frac{\beta}{\alpha^2 + v^2} \\ x = \pi + \arctan \frac{v}{\alpha} \end{cases} \quad (18)$$

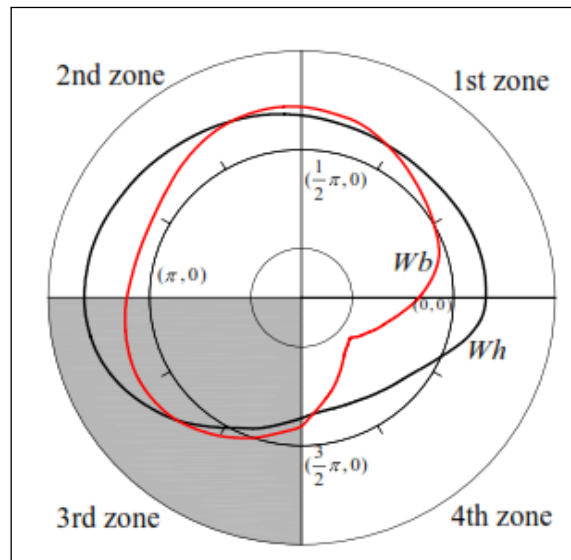


Figura 5. Operación de zonas en sistema polar combinado.
 FUENTE: [Wan y Huang \(2018\)](#).

2.8.3 El fenómeno de golpe de ariete en la línea de descarga. Finalmente, los efectos de golpe de ariete en la descarga se obtienen de la relación entre la carga y el flujo producto de las ecuaciones de continuidad y cantidad de movimiento durante el transitorio en la tubería. ([Parmakian, 1963](#)).

2.9 Método de solución de las características

Según mencionan [Rodríguez y Palladares \(2007\)](#) las ecuaciones diferenciales para calcular el golpe de ariete resultan de la aplicación de las dos ecuaciones básicas de la mecánica en un segmento corto de flujo: la segunda ley de Newton y la ecuación de continuidad. Las variables dependientes son, la altura de la línea piezométrica H por encima de un eje de referencia fijo y la velocidad media V en una sección transversal. Las variables independientes son, la distancia x a lo largo de la tubería medida desde el extremo aguas arriba y el tiempo t . Por tanto, $H = H(x, t)$ y $V = V(x, t)$. En la deducción de las ecuaciones del golpe de ariete no se tiene en cuenta el efecto de Poisson y se considera que el rozamiento es proporcional al cuadrado de la velocidad.

Del segundo principio de Newton del movimiento en la dirección axial de la tubería, resulta la ecuación diferencial parcial, L_2 :

$$L_2 = g \frac{\partial H}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial t} + f \frac{V|V|}{2D} = 0 \quad (19)$$

y de la ecuación de continuidad resulta la ecuación diferencial parcial L_1 :

$$L_1 = \frac{a^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial t} + V \operatorname{sen} \theta = 0 \quad (20)$$

En las ecuaciones (19) y (20), en donde:

D: es el diámetro de la tubería,

f: Coeficiente de fricción de la ecuación de Darcy - Weisbach para pérdidas en tuberías.

g: Aceleración de la gravedad y θ el ángulo del eje de la tubería medido respecto a la horizontal.

L_1 y L_2 son dos ecuaciones diferenciales parciales no lineales en V y H, en función de las variables independientes x y t . No se conoce solución general de estas ecuaciones, pero se pueden resolver por el método de las características para una solución adecuada en diferencias finitas a través del computador (Rodríguez y Palladares, 2007).

Las ecuaciones L_1 y L_2 se multiplican por un multiplicador desconocido y se combinan tal como $L = L_1 + \lambda L_2$. Un par de valores λ , reales y distintos, proporcionan un par de ecuaciones en V y H que contienen todo el significado físico de las ecuaciones originales L_1 y L_2 y que pueden sustituirlas para cualquier solución. Puede suceder que se encuentre una gran simplificación, si se determinan dos valores particulares de λ . L_1 y L_2 se sustituyen en la ecuación de L con cierto reagrupamiento.

$$L = \left[\frac{\partial H}{\partial x} (V + \lambda g) + \frac{\partial H}{\partial t} \right] + \lambda \left[\frac{\partial V}{\partial x} \left(V + \frac{a^2}{g\lambda} \right) + \frac{\partial V}{\partial t} \right] + V \operatorname{sen} \theta + \lambda f \frac{V|V|}{2D} = 0 \quad (21)$$

Dado que,

$$\frac{dH}{dt} = \frac{\partial H}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial H}{\partial t} \quad \text{y} \quad \frac{dV}{dt} = \frac{\partial V}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial V}{\partial t} \quad (22)$$

la ecuación (21) se ordena de modo que el primer término entre corchetes sea la derivada total dH/dt y el segundo término dV/dt . Para esto,

$$\frac{dx}{dt} = V + g\lambda \quad (23)$$

$$\frac{dx}{dt} = V + \frac{a^2}{g\lambda} \quad (24)$$

Las ecuaciones (23) y (24) deben ser equivalentes:

$$V + g\lambda = V + \frac{a^2}{g\lambda} \quad (25)$$

Despejando λ , se obtiene:

$$\lambda = \pm \frac{a}{g} \quad (26)$$

Por tanto, se han encontrado dos valores de λ reales y distintos que convierten las dos ecuaciones diferenciales en derivadas parciales en un par de ecuaciones diferenciales ordinarias limitadas por las ecuaciones (23) y (24).

Sustituyendo la expresión de λ , las ecuaciones (21) y (23) se convierten en:

$$\frac{dH}{dt} + \frac{a}{g} \frac{dV}{dt} + V \operatorname{sen}\theta + af \frac{V|V|}{2gD} = 0 \quad (27)$$

$$\frac{dx}{dt} = V + a \quad (28)$$

$$\frac{dH}{dt} - \frac{a}{g} \frac{dV}{dt} + V \operatorname{sen}\theta - af \frac{V|V|}{2gD} = 0 \quad (29)$$

$$\frac{dx}{dt} = V - a \quad (30)$$

Las ecuaciones (27) y (28) son válidas para la curva C^+ , y las ecuaciones (29) y (30) lo son para la curva C^- . Para entender el significado de estas últimas cuatro ecuaciones es conveniente considerar que la solución se obtiene en un diagrama x-t como se muestra en la Figura 6, suponiendo que se conocen V y H en los dos puntos conocidos R y S. La curva denominada C^+ es un diagrama de la ecuación (28) y la ecuación (27) sólo es válida a lo

largo de la característica de C^+ . La curva denominada C^- es un diagrama de la ecuación (30) y la ecuación (29) es válida a lo largo de la característica C^- .

En las ecuaciones (27) y (29) únicamente contienen dos incógnitas para un punto conocido sobre su característica, en la intersección P de C^+ y C^- , ambas ecuaciones se pueden resolver para encontrar V_P y H_P . Para este punto se tiene que las ecuaciones (28) y (30) también se pueden resolver para determinar x y t . Por tanto, se obtiene la solución a lo largo de las características, partiendo de condiciones conocidas y encontrando nuevas intersecciones, de manera que se hallen alturas y velocidades para tiempos posteriores.

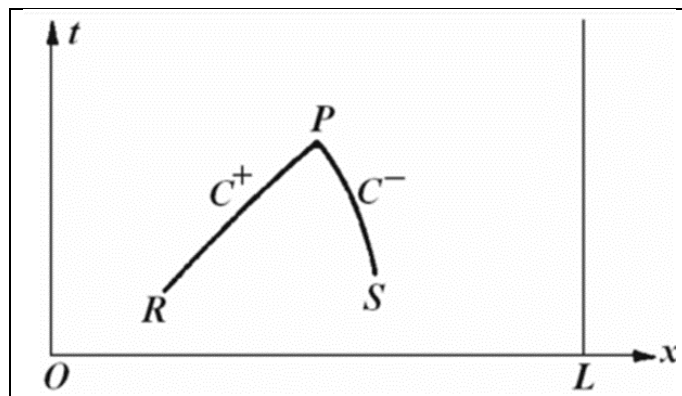


Figura 6. Diagrama $x-t$ de las características.
FUENTE: Rodríguez y Palladares (2007).

En los cálculos de golpe de ariete en tuberías metálicas, “ V ” es muy pequeña comparada con “ a ” y se puede eliminar de las ecuaciones (28) y (30). De esta manera, las líneas características son rectas de pendientes $\pm a$, donde “ a ” es la velocidad de la onda de presión a lo largo de la tubería. Se considera en la figura 7 que la tubería está construida con N tramos iguales, H y V se conocen inicialmente en cada una de las secciones en que se ha dividido la tubería. Entonces, se puede obtener la solución del problema de golpe de ariete en las intersecciones de las líneas características, como lo indican los puntos rellenos en la figura 7. Se debe de tener presente que la solución se obtiene sólo sobre una región limitada, a menos que se proporcione de alguna manera algún dato en $x = 0$ y $x = L$ como condición externa en función del tiempo. A esto, se le conoce como condiciones de contorno (Rodríguez y Palladares, 2007). En la malla el intervalo de tiempo de cálculo es $\Delta t = \frac{\Delta x}{a}$.

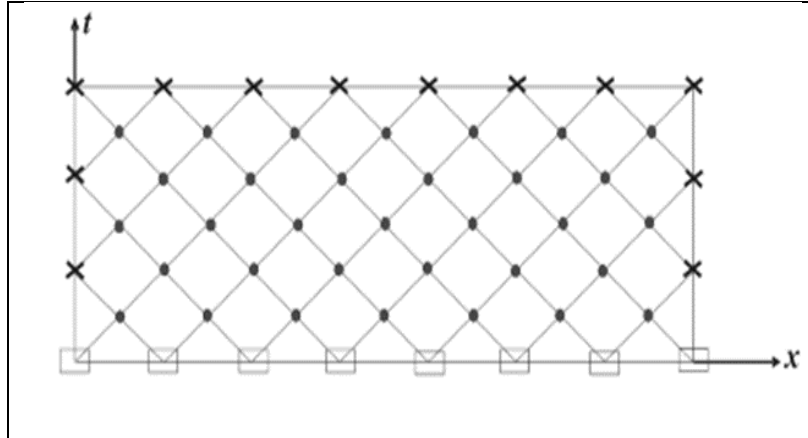


Figura 7. Red rectangular para la solución de las ecuaciones características.
FUENTE: Rodríguez y Palladares (2007).

En el reticulado, x y t se conocen en cada intersección y no hace falta considerar más las ecuaciones (28) y (30). Las ecuaciones (27) y (29) se escriben en notación de diferencias finitas de acuerdo con la figura 8.

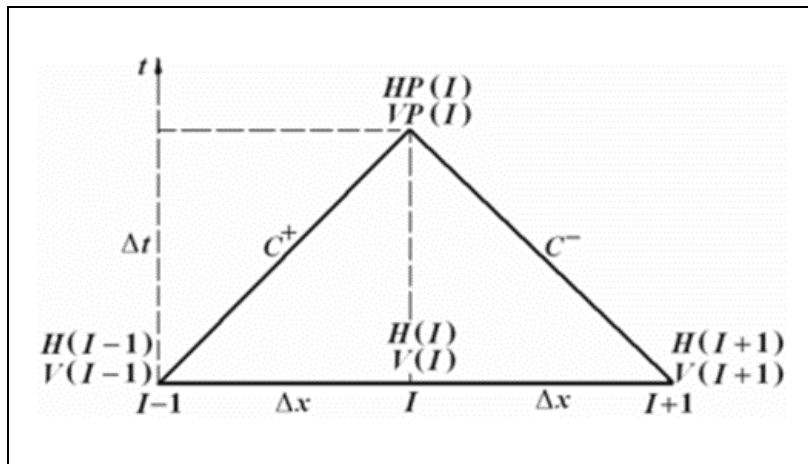


Figura 8. Notación de diferencias finitas.
FUENTE: Rodríguez y Palladares (2007).

Para la ecuación (27) se tiene que:

$$dH = HP(I) - H(I - 1) \ ; \ dV = VP(I) - V(I - 1) \ y \ dt = \Delta t$$

Entonces:

$$HP(I) - H(I - 1) + \frac{a}{g} (VP(I) - V(I - 1)) + V(I - 1) \text{sen}\theta \Delta t + \frac{af\Delta t}{2gD} V(I - 1) |V(I - 1)| = 0 \quad (31)$$

Y análogamente, para la ecuación (29):

$$HP(I) - H(I + 1) - \frac{a}{g} (VP(I) - V(I + 1)) + V(I + 1)sen\theta\Delta t - \quad (32)$$

$$\frac{af\Delta t}{2gD}V(I + 1)|V(I + 1)| = 0$$

Sumando las ecuaciones (31) y (32), se elimina VP (I) y se obtiene HP (I):

$$HP(I) = \frac{1}{2}H(I - 1) + \frac{1}{2}H(I + 1) + \quad (33)$$

$$\frac{a}{2g}(V(I - 1) - V(I + 1)) - sen\theta\Delta t(V(I - 1) + V(I + 1))$$

$$- \frac{a}{4gD}f\Delta t[V(I - 1)|V(I - 1)| - V(I + 1)|V(I + 1)|]$$

Análogamente, al restar las ecuaciones (31) y (32) se obtiene VP (I):

$$VP(I) = -\frac{1}{2}V(I - 1) + \frac{1}{2}V(I + 1) + \frac{g}{2a}(H(I - 1) - H(I + 1)) - \quad (34)$$

$$\frac{1}{2}sen\theta\Delta t(V(I - 1) - V(I + 1))$$

$$\frac{f}{4D}\Delta t[V(I - 1)|V(I - 1)| + V(I + 1)|V(I + 1)|]$$

Las ecuaciones (33) y (34) se emplean en un circuito continuo para despejar VP y HP desde $I = 1$ hasta $I = N-1$. Por otra parte, se utilizan las condiciones de contorno para despejar HP(0), VP(0) y HP(N), VP(N). Obtenidas estas, se pueden escribir los resultados, y después se sustituyen los valores de V(I) y H(I) por los valores de VP(I) y HP(I), incrementando el tiempo y repitiendo el proceso.

2.9.1 Condiciones de contorno en una estación de bombeo. [Wan y Zhang \(2018\)](#)

mencionan que, para simular un proceso transitorio de un sistema hidráulico con una estación de bombeo, las condiciones límite de las bombas deben resolverse correctamente.

Cuatro cantidades están involucradas en las características, la carga dinámica nominal H_R , la descarga de flujo nominal Q_R , el par nominal del eje T_R y la velocidad de rotación nominal N_R , las características completas se pueden expresar en la siguiente forma:

$$WH(x_P) = \frac{\frac{H}{H_R}}{\left(\frac{N}{N_R}\right)^2 + \left(\frac{Q}{Q_R}\right)^2} \quad (35)$$

$$WB(x_p) = \frac{\frac{T}{T_R}}{\left(\frac{N}{N_R}\right)^2 + \left(\frac{Q}{Q_R}\right)^2} \quad (36)$$

Donde $WH(x_p)$ y $WB(x_p)$ son dos cantidades sin dimensiones definidas que representan las características de las bombas, cuya curva consiste en las relaciones entre las cuatro variables dominantes mencionadas anteriormente. Una vez que se determinan dos de las variables, las otras pueden derivarse utilizando las curvas características representadas por $WH(x_p)$ y $WB(x_p)$. La figura 9 muestra la curva característica completa de la bomba utilizada en este modelo de simulación, una turbina imaginaria con los parámetros cambiados según el ejemplo descrito en la referencia (Stephenson, 2002).

$$x_p = \pi + \arctan\left(\frac{QN_R}{NQ_R}\right) \quad (37)$$

La abscisa x_p representa la posición instantánea de funcionamiento de la bomba, eso significa que solo dos cantidades entre ellos son independientes. Junto con la curva característica completa, una cierta condición operativa puede expresarse concretamente de forma numérica (Wan y Zhang, 2018).

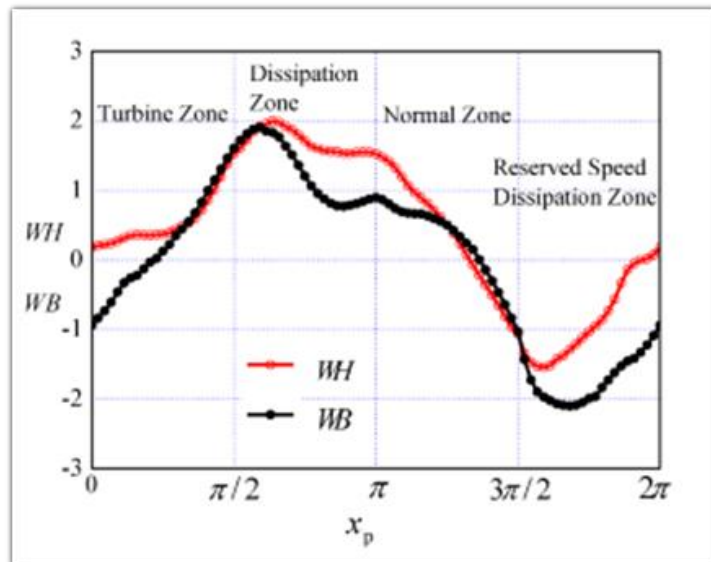


Figura 9. Curva característica completa de las bombas.
FUENTE: Wan y Zhang (2018).

Las líneas características de una bomba se muestran en la figura 10, una bomba en funcionamiento tanto en la succión y descarga de la bomba se pueden obtener sus condiciones de operación resolviendo el conjunto de ecuaciones (38) (Wan y Zhang, 2018), que combina la curva característica completa de la figura 10:

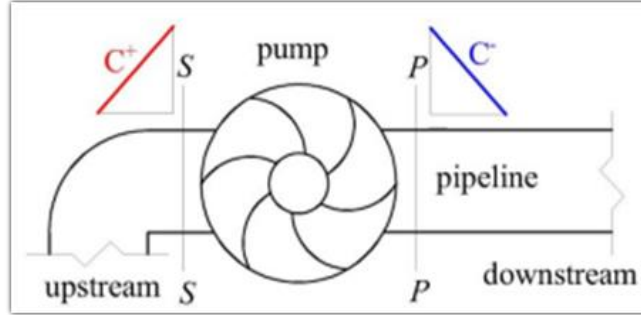


Figura 10. Líneas características de una bomba.
FUENTE: Wan y Zhang (2018).

$$\left\{ \begin{array}{l} h(i_{s-s}, t + \Delta t) + t dh = h(i_{p-p}, t + \Delta t) \\ \left(\frac{N^2}{N_R} + \frac{Q^2}{Q_R} \right) WB(x_P) + \frac{T_0}{T} - \frac{WR_g^2 N_R}{g T_R} \frac{\pi}{30 \Delta T} \frac{N_0 - N}{N_R} = 0 \\ q(i_{s-s}, t + \Delta t) = C_p - Bq(i_{s-s}, t + \Delta t) \\ h(i_{s-s}, t + \Delta t) = C_p - Bq(i_{s-s}, t + \Delta t) \\ h(i_{p-p}, t + \Delta t) = C_M + Bq(i_{p-p}, t + \Delta t) \\ t dh = H_R \left(\frac{N^2}{N_R} + \frac{Q^2}{Q_R} \right) WH(x_P) \end{array} \right. \quad (38)$$

Las soluciones se han descrito con detalle en las investigaciones de Wan y Li (2016).

2.10 Programas para el modelamiento

Dentro del estudio y análisis hidráulico se emplearon 2 programas que permitieron dimensionar y seleccionar las posiciones recomendadas para la instalación de los equipos pudiendo simular la operación, el KYPipe como programa de modelamiento de transitorios y el ARIavCAD para la ubicación y dimensionamiento de las ventosas.

2.10.1 Programa KYPipe. ha sido desarrollado para calcular los flujos de estado estacionario y las presiones para la distribución de sistemas de tuberías. El programa puede ser aplicado a cualquier líquido, está programado para adaptarse a cualquier configuración

de tuberías y diversos componentes hidráulicos tales como bombas, válvulas (incluyendo válvulas de retención y válvulas de regulación), cualquier componente o accesorio que produce pérdida de carga significativa (por ejemplo, codos, orificios, etc.), los cálculos se pueden llevar a cabo utilizando unidades inglesas ó SI (KYPipe, 2010).

KYPipe también es capaz de llevar a cabo una simulación de periodo largo (EPS) teniendo en cuenta los niveles del tanque de almacenamiento que varían a lo largo del período de simulación. Los tanques de almacenamiento pueden tener cualquier forma y niveles de superficie superior e inferior que definen la gama de funcionamiento de los tanques, las líneas que conducen a los tanques de almacenamiento se cerrarán si los niveles de la superficie de líquidos alcanzan estos límites. Como una característica de la simulación en período prolongado, el estado abierto-cerrado de tuberías designadas puede ser controlado por la línea piezométrica en un lugar, esta característica le permitirá, por ejemplo, llevar una bomba refuerzo en la línea si la presión en un lugar especificado cae por debajo de un valor establecido de conmutación, esta bomba funcionará hasta que la presión se incremente por encima de un segundo valor especificado.

El modelado de la red de tubería normal implica el cálculo del flujo en cada tubería y la presión en cada nodo para una condición de funcionamiento particular, además de llevar a cabo estos cálculos, KYPipe ha sido mejorado para permitir calcular directamente una variedad de diseños, el funcionamiento y los parámetros de calibración deben satisfacer los requisitos de presión establecidos. Esta poderosa capacidad técnica, en gran medida aumenta la utilidad de KYPipe como una herramienta de modelado de redes de tuberías mediante la eliminación de la prueba y error procedimiento que normalmente se asocian con este tipo de cálculos. KYPipe se basa en la resolución de todo el conjunto de ecuaciones de continuidad y de la energía que utilizan esquemas de linealización para manejar términos no lineales y una muy poderosa rutina de matrices desarrollados por Curtis y Reid (1972) de la División de Física Teórica, Grupo de Investigación UKAEA, Harwell, Inglaterra. Este enfoque acomoda elementos como líneas cerradas, las válvulas de retención y válvulas de regulación de una forma directa y muy eficiente, el enfoque también se encarga eficazmente de datos con valores de parámetros que varían ampliamente. Extensas pruebas de diversos algoritmos para el análisis de la red de tuberías llevaron a las conclusiones que el enfoque utilizado por

KYPipe es el más potente y tiene la mejor característica de convergencia de los métodos utilizados comúnmente (Wood, 1981).

2.10.2 Programa ARIavCAD. A.R.I. ha desarrollado un programa informático para ayudar a los ingenieros en la selección de los emplazamientos más importantes para las válvulas de aire en la tubería. Además, el software especifica los modelos y tamaños de las válvulas de A.R.I. más adecuadas para las diversas aplicaciones (ARI, s.f.).

El programa trabaja según la norma AWWA M51 lugares y tipos sugeridos, las válvulas de aire deben instalarse en las siguientes ubicaciones:

- ***Puntos altos.*** Las válvulas de aire combinadas deben instalarse en los puntos altos de la tubería para proporcionar ventilación mientras la tubería se está llenando, durante el funcionamiento normal de la tubería y para la entrada de aire y la protección del vacío mientras la tubería está drenando. Un punto alto se define por el gradiente hidráulico y es considerado el extremo superior de cualquier segmento de tubería que se inclina hasta el gradiente hidráulico o corre paralelo a él.
- ***Válvulas de línea principal.*** Las válvulas de vacío de aire o las válvulas de aire combinadas se pueden usar en el lado de drenaje de las válvulas de la línea principal para facilitar el drenaje de la tubería.
- ***Mayor pendiente descendente.*** Se debe considerar una válvula de aire combinada en los aumentos bruscos de la pendiente descendente.
- ***Disminución de la pendiente ascendente.*** Se debe considerar una válvula de vacío de aire o una válvula de aire combinada en disminuciones abruptas en la pendiente ascendente.
- ***Ascensiones largas.*** Se debe considerar una válvula de vacío de aire o una válvula de aire combinada a intervalos de 1/4 de milla (400 m) a 1/2 de milla (800 m) a lo largo de las secciones ascendentes de las tuberías.
- ***Descensos largos.*** Se debe considerar una válvula de liberación de aire o una válvula de aire combinada a intervalos de 1/4 mi (400 m) a 1/2 mi (800 m) a lo largo de las secciones descendentes de las tuberías.
- ***Carreras horizontales.*** Las válvulas de aire combinadas deben considerarse al principio y al final de las secciones horizontales largas, y las válvulas de liberación

de aire o las válvulas de aire combinadas deben considerarse a intervalos de 14 mi (400 m) a 1/2 mi (800 m) a lo largo de las secciones horizontales de tubería. Es difícil evacuar el aire de una larga tubería horizontal a bajas velocidades de flujo.

- **Medidores Venturi.** Las válvulas de liberación de aire deben instalarse aguas arriba de los medidores Venturi para eliminar las imprecisiones de medición causadas por el aire atrapado.
- **Pozos profundos y bombas de turbina verticales.** Las válvulas de vacío deben instalarse en el lado de descarga de los pozos profundos y las bombas de turbina verticales para eliminar el aire en la columna del pozo durante el arranque de la bomba y permitir que el aire vuelva a entrar en la línea después del apagado de la bomba. Las válvulas de aire montadas en este tipo de bombas pueden requerir una consideración especial en la selección debido a los cambios violentos en el caudal durante el ciclo de la bomba. Las válvulas de liberación de aire a menudo se usan con válvulas de retención activadas por potencia y con retardo de tiempo para liberar lentamente el aire en la columna de la bomba bajo la presión de la bomba.
- **Sifones.** para mantener un sifón en una sección de tubería que se extiende por encima del gradiente hidráulico y que funciona constantemente bajo presión negativa, instale una válvula de liberación de aire en el punto alto del sifón para ventilar el aire. Sin embargo, la válvula de liberación de aire debe estar equipada con un dispositivo de verificación de vacío en la salida para evitar la entrada de aire en la tubería. Para los sistemas que requieren una mayor capacidad de ventilación, se puede lograr un enfoque similar con una válvula de vacío auxiliar con dispositivo de verificación de vacío en la salida.
- **Cuando el flujo inverso no es deseable después de la parada de la bomba.** Se puede utilizar una válvula antisifón de vacío de aire especializado. Una válvula antisifón está diseñada para ventilar el aire durante el arranque, cerrar herméticamente durante las condiciones de flujo y abrirse para romper el sifón durante las condiciones de flujo inverso.

III. MATERIALES Y METODOS

3.1 Área de Aplicación

El estudio y la descripción del área de aplicación ha sido tomada en su totalidad del estudio de impacto ambiental de [Knight Piésold Consulting \(2009\)](#).

3.1.1 Ubicación de la zona de estudio. El Proyecto La Zanja, está ubicado en el caserío La Zanja distrito de Pulán, provincia de Santa Cruz de Suchabamba, departamento de Cajamarca. El área del proyecto comprende las zonas altas de este distrito, a una altitud que varía entre los 2 800 y 3 811 m.s.n.m y limita con los distritos de Catache de la misma provincia de Santa Cruz de Suchabamba y Tongod de la provincia de San Miguel de Pallaques.

3.1.1.1 Vías de acceso. Las rutas de acceso al área del proyecto se muestran en el Tabla 1.

Tabla 1. Rutas de acceso.

Ruta	Origen- Destino	Distancia (Km)	Estado de la carretera	Tiempo de viaje aproximado carretera	Total de distancia recorrida en carretera kilómetros
Ruta N°1	Lima- Pacasmayo- Dv. Cajamarca	741	Asfaltada		1023
	Dv. Cajamarca- Dv. Chilete- Cajamarca	180	Asfaltada	(Lima- Proyecto) 16 Horas	
	Cajamarca- El Empalme	70	afirmada		
	El Empalme - Proyecto	32	parcialmente afirmada		
Ruta N°2	Lima- Pacasmayo- Dv. Cajamarca	741	Asfaltada		920.5
	Dv. Cajamarca- Dv. Chilete	91	Asfaltada	(Lima- Proyecto) 15 Horas 30 minutos	
	Dv. Chilete- San Miguel	53.5	afirmada		
	San Miguel- Proyecto	35	Trocha carrozable		
Ruta N°3	Lima- Cajamarca	N.A (*)	N.A (*)	Vía aérea	102
	Cajamarca- El Empalme	70	afirmada	(Cajamarca- proyecto) 3 Horas	
	El Empalme - Proyecto	32	Afirmada 20% trocha 80%		

FUENTE: Estudio de impacto ambiental de [Knight Piésold Consulting \(2009\)](#).

3.1.2 Clima y meteorología. De acuerdo con la información obtenida del estudio de impacto ambiental realizado por la consultora Knight Piésold, los datos corresponden a 25 meses que cubren todo el año (estación seca y húmeda), ha sido posible construir un año tipo a partir de los datos disponibles los cuales permiten efectuar el análisis. No existe información representativa adicional debido a que la estación meteorológica más cercana del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) se encuentra en la ciudad de Cajamarca, distante más de 40 km del proyecto. Sin embargo, para fines de la línea base, los datos disponibles de la estación meteorológica La Zanja son adecuados. En el caso del análisis de precipitaciones, se cuenta con varias estaciones pluviométricas cercanas a la zona del proyecto las cuales han sido consideradas en el análisis.

3.1.2.1 Temperatura del aire. La temperatura promedio mensual del aire para la zona de evaluación fluctúa entre 7,0 - 8,2 °C, no se presentan variaciones significativas a lo largo del año (Tabla 2). La temperatura promedio para el período de registro es de 7,7 °C.

Tabla 2. Promedios mensuales de temperatura media, máxima y mínima y sensación térmica.

Mes	Media	Máxima	Temperatura Mínima (°C)	Sensación Térmica
Enero	8.1	11.4	5.7	4.7
Febrero	8.0	11.4	5.7	5.6
Marzo	7.7	11.1	5.6	5.1
Abril	7.9	11.2	5.5	4.7
Mayo	7.9	12.1	4.7	4.4
Junio	7.3	11.5	4.0	2.2
Julio	7.1	11.4	3.7	1.8
Agosto	7.3	12.1	3.6	-0.1
Setiembre	7.9	12.3	5.0	4.9
Octubre	7.5	11.4	5.0	4.6
Noviembre	7.8	11.3	5.4	5.0
Diciembre	7.8	11.2	5.5	5.2

FUENTE: Estudio de impacto ambiental de [Knight Piésold Consulting \(2009\)](#).

La temperatura mínima mensual promedio en la estación meteorológica La Zanja varía entre 3,6 - 5,7 °C (Tabla 2), con una temperatura promedio mínima para el período evaluado de 4,9 °C. La variación mensual de la temperatura mínima se presenta en el mes de agosto. La temperatura máxima mensual promedio alcanza valores entre 11,1 - 12,3 °C (Tabla 2), con una temperatura promedio máxima para el período evaluado de 11,6 °C.

Pese a no alcanzar temperaturas extremas, la sensación térmica es considerablemente más baja que las temperaturas mínimas en los meses de junio, julio y agosto, esto se debe a factores como humedad relativa y velocidad del viento. En el mes de agosto se observan las más bajas sensaciones térmicas debido a la mayor velocidad del viento.

3.1.2.2 Precipitación. La línea base considera datos de precipitación de estaciones pluviométricas cercanas al área del proyecto, los cuales fueron analizados y correlacionados estadísticamente para estimar la precipitación media anual para cualquier punto dentro del área del proyecto. Las estaciones meteorológicas de interés fueron seleccionadas considerando su cercanía al área del proyecto, altitud y período de registro. Del total de estaciones disponibles se seleccionaron 18 (10 en la vertiente del Pacífico y 8 en la del Atlántico), como se muestra en el Tabla 3.

3.1.2.3 Humedad relativa. La humedad relativa en el área fluctúa en promedio entre el 83 y 93%, con un promedio de 88%, sigue la tendencia de la serie anual de precipitación. La humedad relativa es la expresión porcentual de la cantidad de vapor de agua presente en la atmósfera a una temperatura determinada e indica su grado de saturación.

Tabla 3. Estaciones pluviométricas seleccionadas.

Vertiente	Estación	Periodo de registro (años)	N° Años registro
Pacífico	Chilete	64-82;85-02	37
	Magdalena	64-82;85-02	35
	Chota	71-76; 78-82; 95-01	18
	Contumazá	65-02	38
	Llapa	87-02	16
	Quilcate	66-69; 71-97; 99-02	35
	Granja Porcón	67-77; 80-81; 86-02	30
	Minas Sipán	78-00	22
	Hacienda Negritos	62-74	11
	Quebrada Honda	65-68;70-97	32
Atlántico	Cochobamba	65-82; 87-02	35
	Bambamarca	62-02	41
	Weberbauer	65-67; 79-94; 96-02	35
	La Llica	83-98	16
	San Juan de		
	Lacamaca	82-97	16
	Hualgayoc	62-82	21
	Maqui Maqui	95-96; 98-0	08
Carachugo	95-02	08	

FUENTE: Estudio de impacto ambiental de [Knight Piésold Consulting \(2009\)](#).

3.1.3 Geología. La información detallada líneas abajo ha sido tomada del estudio de impacto ambiental de [Knight Piésold Consulting \(2009\)](#).

3.1.3.1 Geomorfología. Geomorfológicamente el área del Proyecto La Zanja forma parte del contrafuerte occidental andino del norte del Perú, en el sistema de drenaje de aguas que vierten hacia el océano Pacífico. El área en estudio presenta una fisiografía compleja, conformada por numerosas quebradas cuyas laderas presentan gradientes pronunciadas y espacios relativamente planos ubicados en las zonas altas por encima de los 3 500 m de altitud que se conocen como Superficie Puna, tal es el caso de la pampa de Bramadero. Dentro de las quebradas principales figuran El Cedro, Pisit, Río Blanco, San Lorenzo así como las quebradas Puntillo y La Colpa.

En particular, la quebrada El Cedro ha desarrollado laderas muy empinadas con pendientes variables entre 50 a 80% en contraste con el cambio brusco de la pampa Del Bramadero que presenta pendientes variables entre 6 y 12%. Los principales cerros que se observan en los alrededores del área del proyecto son: Chinchimal (3 600 m), Alcaparrosa (3 600 m), Garay (3 800 m) y Culaque (3 800 m), con desniveles que varían entre 200 y 400 m, con respecto a las planicies.

En general, el Proyecto La Zanja desarrollará sus operaciones en la parte alta de esta formación fisiográfica, la cual se extiende entre los 3 000 y los 3 600 m, en dos áreas laterales superiores denominadas San Pedro Sur y Pampa Verde. En la parte alta, el relieve es poco accidentado y está rodeado por cerros en donde se presentan afloramientos rocosos de estribaciones medias, modeladas por varias etapas de erosión y la alteración hidrotermal en las rocas.

Las planicies o superficie Puna están dominadas por la presencia de bofedales poco profundos debido a la baja permeabilidad de las tobas volcánicas de grano medio a fino, cuya alteración hidrotermal y la consiguiente meteorización han producido suelos de matriz arcillosa que a su vez actúan como una barrera al agua, pudiendo encontrarse también suelos de naturaleza argílica.

3.1.3.2 Geología local. En el área del Proyecto La Zanja a nivel local, afloran principalmente rocas volcánicas piroclásticas y derrames de la Formación Llama y rocas

volcánicas de la Formación Porculla, las rocas de la Formación Huambo afloran al noroeste del área del proyecto fuera de los límites del desarrollo de las operaciones.

3.1.4 Hidrología. El sistema de drenaje superficial del área de estudio se puede subdividir en dos sistemas de subcuencas principales. Sin embargo, es necesario aclarar que las instalaciones industriales se ubican solamente en la subcuenca de la quebrada El Cedro. A continuación, se detallan las cuencas:

- La cuenca de la quebrada El Cedro drena hacia el norte e incluye las quebradas Bancuyoc, La Cuchilla, La Playa, La Mina, Bramadero, Cocán y El Hornamo.
- La cuenca del río Pisit que también drena hacia el norte e incluye las quebradas San Lorenzo, Del Panteón y Vizcachas.

La quebrada El Cedro recibe posteriormente el nombre de río Pulán, el cual se une con el río Pisit para constituir el río Cañad, tributario del río Chancay. El río Chancay aporta sus aguas al río Reque y éste vierte finalmente sus aguas en el océano Pacífico. En el área del proyecto los cursos de agua son permanentes pero sus caudales son mínimos si se comparan con los caudales obtenidos aguas abajo de Pulán y Pisit. Esto debido a la presencia de otros tributarios ubicados entre el área del proyecto y dichas localidades. La cuenca de la quebrada El Cedro tiene una extensión de 69,92 km², la pendiente promedio de la cuenca es de 39,8%. El factor de forma de la cuenca es de 0,21 y el coeficiente de compacidad es 1,41 y esto nos indica que la respuesta de la cuenca frente al escurrimiento es rápida. La tabla 4 muestra los principales parámetros geomorfológicos de la cuenca.

Tabla 4. Parámetros geomorfológicos de la subcuenca de la quebrada El Cedro.

Parámetro	Valor	Unidad
Área	69.92	Km ²
Perímetro	42.39	Km
Altitud máxima	3600	m.s.n.m.
Altitud mínima	1540	m.s.n.m.
Altitud media	2562.5	m.s.n.m.
Pendiente media	39.8	%
Longitud río	18175	m.
Pendiente del cauce principal	0.11	m/m
Coeficiente de compacidad	1.41	adimensional
Factor de forma	0.21	adimensional

FUENTE: Estudio de impacto ambiental de [Knight Piésold Consulting \(2009\)](#).

La cuenca de la quebrada Pisit tiene una extensión de 69,97 km², la pendiente promedio de la cuenca es de 30,2%. El factor de forma de la cuenca es de 0,10 y el coeficiente de compacidad es 1,77 y esto nos indica que la respuesta de la cuenca frente al escurrimiento también es rápida. En la tabla 5 muestra los principales parámetros geomorfológicos de la cuenca.

Tabla 5. Parámetros geomorfológicos de la subcuenca del río Pisit.

Parámetro	Valor	Unidad
Área	69.92	Km ²
Perímetro	53.1	Km
Altitud máxima	3600	m.s.n.m.
Altitud mínima	1640	m.s.n.m.
Altitud media	2612	m.s.n.m.
Pendiente media	30.2	%
Longitud río	26043	m.
Pendiente del cauce principal	0.08	m/m
Coeficiente de compacidad	1.77	adimensional
factor de forma	0.1	adimensional

FUENTE: Estudio de impacto ambiental de [Knight Piésold Consulting \(2009\)](#).

3.1.4.1 Oferta de agua. Dado que se requiere más información de aforos, se han estimado las ofertas de agua de la quebrada Bramadero en función de los datos diarios de precipitación. Para tal fin, Water Management Consultants ha empleado el modelo hidrológico de simulación continua Hydrological Model System (HMS), desarrollado y mantenido por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos. El modelo ha sido previamente calibrado con información de precipitaciones y caudales obtenida durante el periodo de febrero a junio de 2006. Con base en esta calibración, se obtuvieron caudales medios anuales para diferentes escenarios hidrológicos. Los resultados se muestran en el Tabla 6.

3.1.4.2 Hidrogeología. Las principales unidades con potencial hidrogeológico en el área yacen entre la zona meteorizada superior y las zonas fracturadas de las formaciones volcánicas subyacentes. La zona meteorizada superior representa una zona de interflujo intermedio o flujo de paso que puede ser de naturaleza efímera.

Tabla 6. Resultados de caudales medios anuales (l/s) en la quebrada Bramadero según el modelo Hidrológico.

Escenario	Caudal medio anual (l/s)
100 años secos	33
50 años secos	35
10 años secos	44
Promedio	65

FUENTE: Estudio de impacto ambiental de [Knight Piésold Consulting \(2009\)](#).

En general, la zona de lecho rocoso fresco subyacente es de menor permeabilidad y con menor presencia de agua subterránea, la circulación está limitada a las zonas de fractura tales como fallas y zonas de cizallamiento. La información colectada a partir del programa de perforaciones de investigación de campo sugiere que las fracturas al interior de la zona del lecho rocoso se encuentran típicamente rellenas con minerales como calcita. Cerca de la superficie, el material de relleno de las fracturas puede haber sido removido, dadas las condiciones geológicas del área.

Los aspectos vinculados a la alteración representan un aspecto importante a considerar para la comprensión de las condiciones hidrogeológicas locales. Dentro del área del depósito, las zonas de alteración silíceas tienden a exhibir una permeabilidad relativamente mayor que otras unidades debido a su naturaleza quebradiza y fracturada. En contraste, las zonas de alteración argílica tienden a exhibir una permeabilidad muy baja. Estas características son significativas al considerar problemas tales como las fuentes potenciales de agua subterránea y el drenaje de la mina.

Los depósitos de lava volcánica, tales como los que se encuentran bajo el yacimiento y el área circundante, exhiben una permeabilidad horizontal relativamente mayor que la permeabilidad vertical debido a la estratificación de estos depósitos volcánicos. En general, las unidades de tobas volcánicas tienen baja permeabilidad, aunque se puede presentar una permeabilidad vertical donde existen diaclasas de tipo columnar. El agua subterránea puede tender a formar zonas aisladas en la parte superior de las capas de tobas y descargar en afloramientos expuestos. Las unidades volcánicas piroclásticas generalmente exhiben una baja permeabilidad, excepto cuando el grado de cementación y compactación de la roca es pobre.

- ***Flujo de agua subterránea.***

Durante la estación lluviosa hay presencia de agua subterránea somera en el área de estudio, principalmente entre la capa de tierra orgánica y la interface de roca meteorizada. Durante este tiempo, una reducida proporción del agua contenida en esta zona se infiltra hacia zonas fracturadas más profundas a través de planos en fracturas discontinuas. El flujo de agua subterránea somera tiende a seguir la topografía general a lo largo de la capa de tierra orgánica y el lecho rocoso meteorizado. La profundidad de la capa de tierra orgánica tiende a un mayor espesor en las laderas de menor gradiente y a ser menos definida en las pendientes superiores y más abruptas. Varias de las zonas de manantial están asociadas con los cambios de pendiente y con los puntos en donde la capa de tierra orgánica y la zona meteorizada se interceptan en la superficie. Si bien los datos de niveles presentan una distribución limitada, las curvas piezométricas guardan relación con la topografía del área de estudio. El flujo de agua subterránea durante el período de mediciones (estación lluviosa) tiende a fluir en dirección NO en el área de la futura planta de lixiviación.

Se deduce la profundidad de la napa freática en diferentes áreas de la zona en la que se ubicará la infraestructura del proyecto. La profundidad esperada de los niveles de agua para el área de la pila de lixiviación varía aproximadamente entre de 6 y 20 m, pudiendo en algunos lugares estar cerca de la superficie. Así, en el área del depósito de desmonte de mina San Pedro Sur, la profundidad esperada está en un rango de 6 a 10 m. En el área del embalse, en la quebrada Bramadero, varía entre 8 y 15 m, mientras que en el área del tajo San Pedro Sur, el nivel se encuentra a profundidades entre 30 y 40 m. Las perforaciones hidrogeológicas en el sector del tajo Pampa Verde indican que la profundidad del nivel freático se encontraría a profundidades mayores a 145 m, más de 20 m por debajo del piso final del tajo.

- ***Calidad de agua superficial.***

El Proyecto La Zanja involucra las subcuencas de la quebrada El Cedro y del río Pisit. En la quebrada El Cedro, se ubicaron 10 estaciones de monitoreo y en el río Pisit se ubicaron 3 estaciones de monitoreo. Las estaciones de monitoreo, coordenadas de ubicación y referencia de la zona se resumen en tabla 7.

Tabla 7. Estaciones de monitoreo, línea base de aguas superficiales.

Nombre del sitio	Este	Norte	Altitud	Zona
Quebrada El Cedro				
MA-2	730705	9254825	2057	Quebrada El cedro, aguas abajo, antes de la confluencia con la quebrada, del Homamo.
MA-3	730316	9254825	2059	Quebrada del Homamo, aguas abajo.
MA-4	732587	9244255	3522	Nacientes, quebrada Bancuyoc.
MA-6	732465	9244068		Nacientes, quebrada Bancuyoc sector cerro Vizcacha.
MA-7	73017	9246146	3455	Quebrada Mina, sector pampa verde.
MA-10	731785	9245763	3100	Quebrada de la Playa, sector cerro Campana.
MA-11	732662	9246179	3233	Aguas abajo de la plataforma de lixiviación.
MA-12	733592	9246038	3536	Aguas abajo del sector campamento.
MA-14	731643	9245121	3228	Nacientes quebradas de la playa.
MA-15	731662	9245100	3223	Nacientes quebradas de la playa.
Rio Pisit				
MA-1	731732	9256386	1982	Rio Pisit, aguas abajo.
MA-5	736132	9247010	3250	Aguas abajo del centro poblado menor de Pisit.
MA-13	736094	9245160	3285	Aguas arriba del centro poblado menor de Pisit.

FUENTE: Estudio de impacto ambiental de [Knight Piésold Consulting \(2009\)](#).

Los parámetros monitoreados incluyen como parámetros fisicoquímicos de campo: pH, temperatura y conductividad eléctrica (CE). También sólidos totales en suspensión (STS), sólidos totales disueltos (STD), Na, Mg, potasio (K), Ca, Fe, manganeso (Mn), Al, cloruros, sulfatos, nitratos, fluoruros, Ni, Cu, Pb, Zn, As y Cd. Los procedimientos de control y aseguramiento de la calidad en el proceso de toma de muestras incluyeron la toma de un 10% de muestras duplicadas y la toma de muestras en blanco. Los análisis de laboratorio incluyeron procedimientos de control de calidad tales como los análisis duplicados, análisis de blancos y adiciones de estándares.

- **Cuenca del río Pisit.**

En la cuenca del río Pisit se monitorearon tres estaciones de calidad de aguas superficiales (Tabla 7). Las estaciones MA-1, MA-5 y MA-13 se ubican aguas abajo del área del proyecto. A continuación, se da una descripción de la hidroquímica de las aguas de la cuenca en cada punto de monitoreo.

MA-1: La estación MA-1 se muestreó en 5 ocasiones entre septiembre de 2000 y junio de 2004. El agua fue neutra (pH promedio de 7,3). La concentración promedio de STD correspondió a 50,0 mg/L. El agua es de tipo Na-Ca-HCO₃. Los valores altos en varios metales, particularmente Fe (valores de hasta 3,1 mg/L y un promedio de 1,8 mg/L), se estima que corresponden a errores analíticos.

MA-5: La estación MA-5 fue muestreada en 21 ocasiones entre agosto de 2001 y julio de 2006. El agua fue neutra, con un valor de pH promedio de 7,3. La concentración promedio de STD fue de 34,0 mg/L, disminuyendo de la estación seca a la estación lluviosa. El agua puede clasificarse como tipo Ca-SO₄ a ligeramente HCO₃, disminuyendo los valores de HCO₃ y SO₄ de la época seca a la lluviosa. Se destaca la ocurrencia de valores anómalos de Fe sobre 2,0 mg/L en 2001 y 2003, estos son valores anómalamente altos y que no se han repetido posteriormente. En los meses de octubre de 2005 y marzo de 2006, se presentaron extremos de Cu y Pb.

MA-13; La estación MA-13 fue muestreada en 20 ocasiones entre agosto de 2001 y julio de 2006. El agua fue casi neutra, con un valor de pH promedio de 7,1 destacando un valor mínimo de 4,9 en agosto de 2001 que es considerado como anómalo. La concentración promedio de STD correspondió a 38,0 mg/L. El agua es de tipo Ca-SO₄ y sólo ocasionalmente bicarbonatada, disminuyendo los valores de HCO₃ y SO₄ de la época seca a la lluviosa. Se destaca la ocurrencia de valores anómalos de Fe con valores sobre 2,0 mg/L, en 2001 y 2003. Evaluación de la calidad de aguas superficiales según la legislación peruana Para la descripción y evaluación de la calidad de las aguas se ha tomado en cuenta principalmente la Ley General de Aguas (D.L. N° 17752), incluyendo sus posteriores modificaciones.

La ley contiene un listado de 22 parámetros y sus estándares de calidad, los cuales se diferencian según el uso del recurso hídrico en los siguientes tipos:

- (I) Uso doméstico después de la simple desinfección.
- (II) Uso doméstico después de tratamiento equivalente a coagulación, sedimentación, filtración y/o cloración.
- (III) Agua para consumo animal o para regadío de vegetales.
- (IV) Agua presente en zonas de recreación con probabilidad de entrar en contacto humano directo.
- (V) Agua para producción de mariscos.
- (VI) Agua presente en áreas de preservación de la vida silvestre y pesca recreativa o comercial.

Se han escogido los estándares de la Clase III como primer criterio, ya que es el uso más importante de esta agua en la zona del proyecto. En forma referencial, se han incluido los de la Clase I. En ambas clases, el listado de estándares se refiere a concentraciones de parámetros totales.

Algunos casos especiales que deben resaltarse para el análisis de las normas y guías de calidad de aguas son:

Por no existir un estándar para el NO_3 en la Clase III de la Ley General de Aguas (LGA), se considera el de la Clase I, lo cual es 0,1 mg/L; sin embargo, este valor está muy por debajo de la Guía para Agua Potable de la Organización Mundial de Salud (OMS), que indica un valor de 50 mg/L, siendo 500 veces de magnitud mayor que el definido por la LGA peruana. Por ello, se estima que el límite para NO_3 se encuentra erróneamente transcrito en la norma peruana.

Otro caso particular son los fenoles, cuyo límite de detección es de 0,001 mg/L. Este valor coincide con el estándar de la LGA para la Clase III, mientras que el estándar para la Clase I de la LGA (0,0005 mg/L) está por debajo del límite de detección del método analítico. Por lo tanto, para el caso de fenoles sólo se ha utilizado como referente el estándar de la Clase III.

Asimismo, se puede manifestar que el estándar de Ni (total) en ambas Clases (I y III) es 35 veces más bajo que el valor guía de OMS para agua potable. Por lo tanto, el estándar para el Ni en la LGA también necesita revisión. El estándar del valor de Cu en las Clases I y III parecen estar confundidos, siendo el valor de las Clase III más bajo que el de la Clase I.

Se puede apreciar que los resultados de fenoles en las campañas de marzo de 2004 así como julio y agosto de 2005 sobrepasan muchas veces el estándar de la Clase III, mientras que los resultados de las campañas mensuales en 2006 se encuentran todos por debajo del estándar de esta clase. Como las excedencias ocurren puntualmente durante ciertas campañas mensuales, y no registran ningún valor por encima del estándar en otras campañas mensuales, se supone que las muestras fueron contaminadas por una fuente de error sistemática. Además, en las campañas de 2003 y 2004, algunos valores de nitratos excedieron el estándar de la Clase I de la LGA. Como en el caso de los fenoles, se supone que las muestras fueron contaminadas por un error sistemático, puesto que las excedencias se registran sólo puntualmente durante ciertas campañas.

Otras excedencias se observan con respecto a Cu y Ni. Estas excedencias se verifican en la estación MA-7 (inmediatamente aguas abajo del futuro tajo Pampa Verde) y en la estación MA-14 (adyacente al futuro tajo San Pedro Sur) y se restringen sólo a la campaña de monitoreo de octubre de 2003.

En el caso del Cu, se observa una leve excedencia (0,53 mg/L) en la estación MA-7 en comparación con el estándar de la Clase III (0,5 mg/L). En el caso de Ni, se tiene dos excedencias, una en la estación MA-7 y una en la estación MA-14, siendo en ambos casos 0,3 mg/L.

3.2 Metodología

3.2.1 Procedimiento de trabajo. El estudio se realizó en 3 etapas: la primera etapa abarcó la recopilación y generación de datos, la segunda cubrió el modelamiento hidráulico del sistema y el desarrollo de la propuesta de los equipos de protección. Finalmente se modeló el sistema considerando los equipos de protección propuestos, se validó el diseño.

3.2.2 Recopilación y generación de datos. En esta primera etapa se ubicó la zona de estudio, se revisó el balance hídrico de la zona con influencia sobre el proyecto, volúmenes de agua proyectados necesario para los procesos mineros, ubicación del punto de toma en el río Pisis, ubicación de la caseta de bombeo, revisión de las características hidráulicas y constructivas de las bombas y sus motores eléctricos, levantamiento topográfico del terreno y georreferenciación del trayecto de la línea de impulsión y el punto de vertimiento de agua en el reservorio Bramadero.

3.2.3 Modelamiento hidráulico. Con ayuda del software KYPipe se modeló el sistema hidráulico inicial con diferentes situaciones que se presentan en la operación de la línea de impulsión, el diseño consideró la situación más crítica, cuando existe un corte abrupto del suministro eléctrico deteniendo el motor de la electrobomba, el modelo cuantificó las zonas de mayor presión y depresión en la línea.

3.2.4 Verificación del modelo hidráulico. Como etapa final se realizó el modelamiento considerando la instalación de las válvulas anticipadora de onda y ventosas a lo largo de la línea, el modelamiento final arrojó los mejores rangos de presiones y depresiones posibles, estos valores servirán para verificar el diseño final de la línea de impulsión.

3.3 Materiales

a. Humanos.

- Profesionales de la empresa Bermad Peru S.A.C.
- Profesionales de minera La Zanja.
- Docentes de la Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Profesionales en Ingeniería Mecánica de Fluidos de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

b. Entidades.

- Bermad Perú S.A.C
- Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
- Universidad Nacional Agraria La Molina.

c. Materiales.

- Información cartográfica de la cuenca
- Software ARIavCAD, KYPipe, Water Hammer
- Computador con capacidad para trabajar con Sistema de Información Geográfica.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Incidencia del flujo transitorio en la línea de impulsión

La aparición de flujo transitorio dentro de la línea de impulsión ocurre después de un corte intempestivo del suministro eléctrico o interrupción del flujo por una mala operación. La falta de energía eléctrica hace que la electrobomba se detenga abruptamente ocasionando una caída de presión en la línea, seguido de un aumento de presión pico, estas presiones extremas deben ser soportadas por el sistema o deben ser reducidas a valores aceptables de un diseño eficiente.

4.1.1 Descripción de la línea de impulsión. La línea transporta $100 \text{ m}^3/\text{h}$ de agua del río Pisit al reservorio Bramadero a través de una tubería de 2760 m. de longitud, el material de la tubería corresponde a polietileno de alta densidad según código de tubería, A1-HDPE SDR5, A2- HDPE SDR9 y A3-HDPE SDR17, para los tramos y diámetros especificados en la Tabla 8.

El sistema de bombeo está compuesto por 2 electrobombas con caudal de $100 \text{ m}^3/\text{h}$ y una altura dinámica total de 383.8 m.c.a la potencia de motor es de 300kw. por equipo, su operación será alternada para cubrir cualquier eventualidad y mantenimiento preventivo (Anexo 5).

4.2 Modelamiento hidráulico en la línea de impulsión

Se realizó el modelamiento hidráulico para régimen permanente y transitorio, considerando datos del perfil de la línea y condiciones de operación de la bomba.

4.2.1 Datos de ingreso para el análisis hidráulico. Se debe considerar la revisión exhaustiva de los datos de ingreso para obtener resultados fiables de la simulación hidráulica.

a. Progresiva del perfil de la línea. Elevación, diámetro, material de la tubería, celeridad de la onda, coeficiente de Hazen- William, a considerar en el modelamiento.

Tabla 8. Datos del perfil de la línea de impulsión.

Nodos	Progresiva (m.)	Elevación (m.s.n.m.)	Diámetro Interno (mm.)	Cód. Tubería	Celeridad (m/s)	Coef. H-W
N01	0	3232.00	119.8	A1	1000	150
N02	200	3283.42	119.8	A1	1000	150
N03	280	3281.86	119.8	A1	1000	150
N04	320	3288.64	119.8	A1	1000	150
N05	420	3282.00	119.8	A1	1000	150
N06	480	3298.42	119.8	A1	1000	150
N07	520	3295.80	202.74	A1	1000	150
N08	660	3324.50	202.74	A1	1000	150
N09	680	3323.46	202.74	A1	1000	150
N10	840	3375.55	202.74	A1	1000	150
N11	860	3374.66	202.74	A1	1000	150
N12	940	3385.75	202.74	A1	1000	150
N13	960	3384.01	202.74	A1	1000	150
N14	1080	3420.19	155.20	A2	1000	150
N15	1300	3473.42	155.20	A2	1000	150
N16	1600	3531.24	176.20	A3	1000	150
N17	2020	3564.75	176.20	A3	1000	150
N18	2740	3516.00	176.20	A3	1000	150
N19	2760	3516.00	176.20	A3	1000	150

FUENTE: Datos obtenidos del modelamiento con software KYPipe.

A1: Tubería de HDPE SDR5, A2: Tubería de HDPE SDR9, A3: Tubería de HDPE SDR17

b. Condiciones de operación de las electrobombas. La curva del sistema queda definida por la altura estática y las pérdidas de carga, ADT (Altura Dinámica Total). La curva de la bomba la suministra el fabricante de la bomba y se detalla en el Anexo 5, la inercia de la bomba puede ser estimada conociendo las características físicas y de operación del conjunto rotativo. Se debe también tener presente la altura neta de succión positiva, tanto la que suministra el fabricante como la generada por el sistema, de tal forma que se garantice la ausencia de cavitación dentro de la bomba.

- Altura dinámica total [ADT (m.)] : 383.8
- Caudal de operación [Q (m³/h)] : 100
- Inercia de la bomba [I (Nm²)] : 11
- Velocidad nominal de motor (RPM) : 3565

4.2.2 Modelamiento hidráulico de la línea de impulsión en régimen permanente. Se realizó un análisis hidráulico en flujo permanente para obtener las condiciones de operación en funcionamiento normal, se modeló en el software KYPipe obteniendo niveles de energía en cada punto a lo largo de la tubería y las presiones en los nodos de la tubería mostrados en la tabla 9 y en la figura 11.

Tabla 9. Resultados de la simulación en régimen permanente.

Nombre nodo	Progresiva m.	Gradiente hidráulico m.s.n.m.	Elevación nodo m.s.n.m	Presión Manométrica m.	Presión Manométrica Kpa.
N0	0+000	3237.00	3235.00	2.00	19.61
I-N00	0+012	3236.52	3235.03	1.48	14.56
O-N00	0+012	3620.32	3235.03	385.28	3778.35
N000	0+017	3620.11	3236.00	384.11	3766.89
N01	0+022	3619.91	3237.62	382.30	3749.05
N02	0+200	3612.75	3283.42	329.33	3229.67
N03	0+280	3609.53	3281.86	327.67	3213.41
N04	0+320	3607.93	3288.64	319.29	3131.14
N05	0+420	3603.90	3282.00	321.90	3156.81
N06	0+480	3601.49	3298.42	303.07	2972.11
N07	0+520	3599.88	3295.80	304.08	2982.03
N08	0+660	3594.25	3324.50	269.75	2645.35
N09	0+680	3593.44	3323.46	269.98	2647.66
N10	0+840	3587.01	3375.55	211.46	2073.71
N11	0+860	3586.20	3374.66	211.54	2074.56
N12	0+940	3582.99	3385.75	197.24	1934.24
N13	0+960	3582.18	3384.01	198.17	1943.41
N14	1+080	3577.35	3420.19	157.17	1541.27
N15	1+300	3574.85	3473.42	101.43	994.66
N16	1+600	3573.00	3531.24	41.76	409.56
N17	2+020	3570.42	3564.75	5.67	55.62
N18	2+740	3566.00	3516.00	50.00	490.31
I-N19	2+755	3565.91	3516.00	49.91	489.41
O-N19	2+755	3515.93	3516.00	-0.07	-0.68
N20	2+760	3515.90	3510.00	5.90	57.86

FUENTE: Datos obtenidos del modelamiento con software KYPipe.

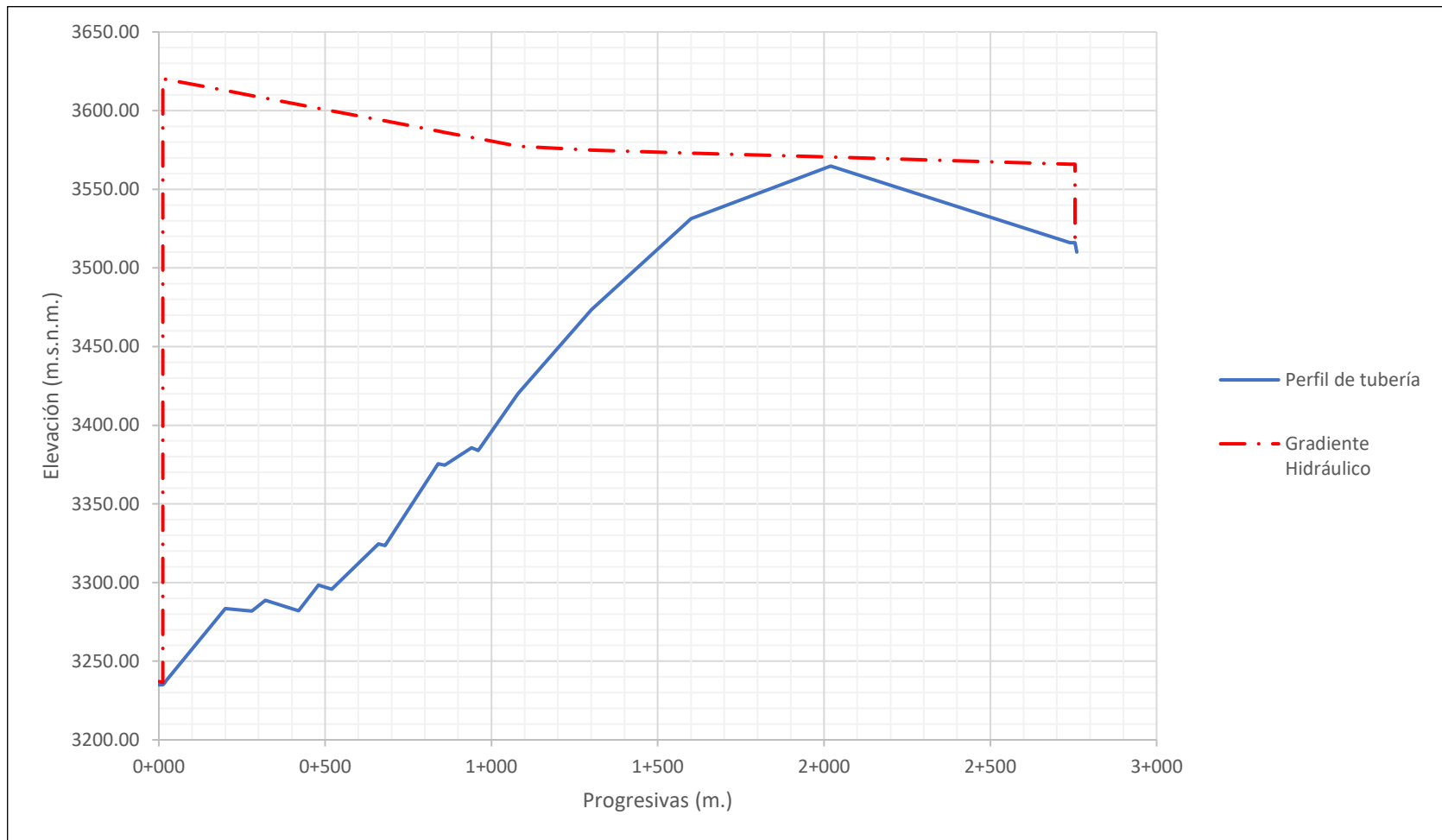


Figura 11. Perfil de la tubería y gradiente hidráulico en régimen permanente.
 FUENTE: Datos obtenidos del modelamiento con software KYPipe.

4.2.3 Modelamiento hidráulico de la línea de impulsión en régimen transitorio. Para realizar este modelamiento se consideraron dos escenarios, modelamiento hidráulico sin considerar elementos de protección y considerando elementos de protección.

4.2.3.1 Modelamiento hidráulico en régimen transitorio sin considerar elementos de protección. En este escenario el modelamiento se realizó analizando los transitorios generados en la línea luego de un corte abrupto del suministro eléctrico, para ello se considera únicamente los equipos de bombeo y la línea de impulsión sin protección alguna, con la ayuda del software KYPipe se obtuvieron los resultados de la tabla 10, que son los máximos y mínimos niveles energía obtenidos a lo largo de la tubería durante el transitorio hidráulico denominado envolvente de presiones.

Las figuras 12 y 13 se muestran las cargas y presiones modeladas en régimen transitorio sin considerar dispositivos de protección, se observan las máximas y mínimas presiones alcanzadas a lo largo de la tubería resultado de los valores hallados en la tabla 10, columna (3) y columna (4). En la tabla 11 se observa el estado del flujo en la línea, las presiones negativas debido al paro intempestivo de la electrobomba generan depresión en la descarga de la bomba producto de la inercia del fluido, acción que parcialmente puede ser reducida por una gran inercia del conjunto rotativo de la electrobomba y la carga de presión estática en la línea de impulsión.

4.2.3.2 Modelamiento hidráulico en régimen transitorio considerando elementos de protección. Para evitar sobrepresiones y depresiones extremas durante el evento transitorio se incluyó en el modelamiento una válvula control de bomba, una válvula anticipadora de onda conectadas en el manifold de descarga de los equipos de bombeo, así como ventosas seleccionadas, dimensionadas y posicionadas sobre la línea de impulsión con la ayuda del software ARIavCAD, tabla 12. El detalle de las válvulas en los anexos 1 y 3.

Los resultados del modelamiento se muestran en la tabla 13, observándose nuevas máximas y mínimas presiones durante el evento, figura 15.

Tabla 10. Resultados de la simulación en régimen transitorio sin dispositivos de protección.

Posición N°	Prog. m.	Máx. carga m.	Mín carga m.	Tiempo Reversa	Máx. Presión Kpa.	Mín. Presión Kpa.	Máx. Tiempo (seg.)	Mín. Tiempo (seg.)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
N0	0	2.00	2.00	0.00	19.62	19.62	0.01	0.01
I-N00	12	77.91	-9.50	67.46	764.26	-93.195	7.82	7.70
O-N00	12	614.22	90.52	67.46	6025.53	887.977	18.18	26.93
N000	17	610.04	99.10	0.00	5984.47	972.126	18.19	7.59
N01	22	609.97	98.09	0.00	5983.83	962.269	18.16	7.58
N02	200	483.64	65.85	0.00	4744.49	645.956	17.98	6.96
N03	280	484.33	66.23	0.00	4751.23	649.707	24.61	27.26
N04	320	488.13	21.50	0.00	4788.54	210.919	24.69	27.25
N05	420	459.63	88.03	0.00	4508.97	863.599	17.78	6.76
N06	480	447.93	78.72	0.00	4394.16	772.202	24.61	6.70
N07	520	504.46	71.11	0.00	4948.76	697.569	18.83	14.70
N08	660	471.95	35.06	0.00	4629.84	343.938	24.49	14.84
N09	680	457.58	33.57	0.00	4488.83	329.325	24.45	14.84
N10	840	430.79	-0.12	0.01	4226.08	-1.168	17.35	28.57
N11	860	423.31	-9.50	0.02	4152.64	-93.195	17.32	20.03
N12	940	380.48	1.37	0.00	3732.47	13.405	17.34	28.50
N13	960	364.02	0.32	0.00	3571.01	3.101	11.82	12.89
N14	1080	324.05	-9.50	0.58	3178.88	-93.195	11.69	14.11
N15	1300	259.60	-9.50	2.28	2546.70	-93.195	11.42	7.15
N16	1600	183.13	-9.50	23.98	1796.52	-93.195	11.17	6.88
N17	2020	5.67	-9.50	112.95	55.65	-93.195	2.04	7.10
N18	2740	50.00	34.93	0.00	490.49	342.619	2.78	7.82
I-N19	2755	49.91	35.48	0.00	489.58	348.016	2.78	9.34
O-N19	2755	0.47	-1.94	0.00	4.58	-19.078	7.86	7.80
N20	2760	5.90	5.90	0.00	57.88	57.878	0.01	0.01

FUENTE: Datos obtenidos del modelamiento con software KYPipe.

Tabla 11. Resumen de máximas y mínimas presiones alcanzadas en régimen transitorio sin dispositivos de protección.

Nodo Inicio	Nodo Final	Máxima carga Kpa.	Mínima carga Kpa.	Estado
N0	I-N00	764.26	-93.20	Cavitación
O-N00	N000	6025.52	887.98	No cavitación
N000	N01	5984.47	962.27	No cavitación
N01	N02	5983.82	645.96	No cavitación
N02	N03	4751.23	645.96	No cavitación
N03	N04	4788.54	210.92	No cavitación
N04	N05	4788.54	210.92	No cavitación
N05	N06	4508.97	772.20	No cavitación
N06	N07	4948.76	697.57	No cavitación
N07	N08	4948.76	343.94	No cavitación

N08	N09	4629.84	329.33	No cavitación
N09	N10	4488.83	-1.17	No cavitación
N10	N11	4226.08	-93.20	Cavitación
N11	N12	4152.64	-93.20	Cavitación
N12	N13	3732.47	3.10	No cavitación
N13	N14	3571.00	-93.20	Cavitación
N14	N15	3178.88	-93.20	Cavitación
N15	N16	2546.70	-93.20	Cavitación
N16	N17	1796.52	-93.20	Cavitación
N17	N18	490.49	-93.20	Cavitación
N18	I-N19	490.49	342.62	No cavitación
O-N19	N20	57.88	-19.08	No cavitación

FUENTE: Datos obtenidos del modelamiento con software KYPipe.

Tabla 12. Selección y ubicación de válvulas ventosas.

Progresiva	Modelo	Presión nominal
0+000	D014HF-2"	40 bar
0+320	D014HF-2	40 bar
0+660	D014HF-2	40 bar
0+840	D062	25 bar
1+300	D060	16 bar
1+600	D060	16 bar
2+020	D060	16 bar

FUENTE: Datos obtenidos del modelamiento con software ARIavCAD.

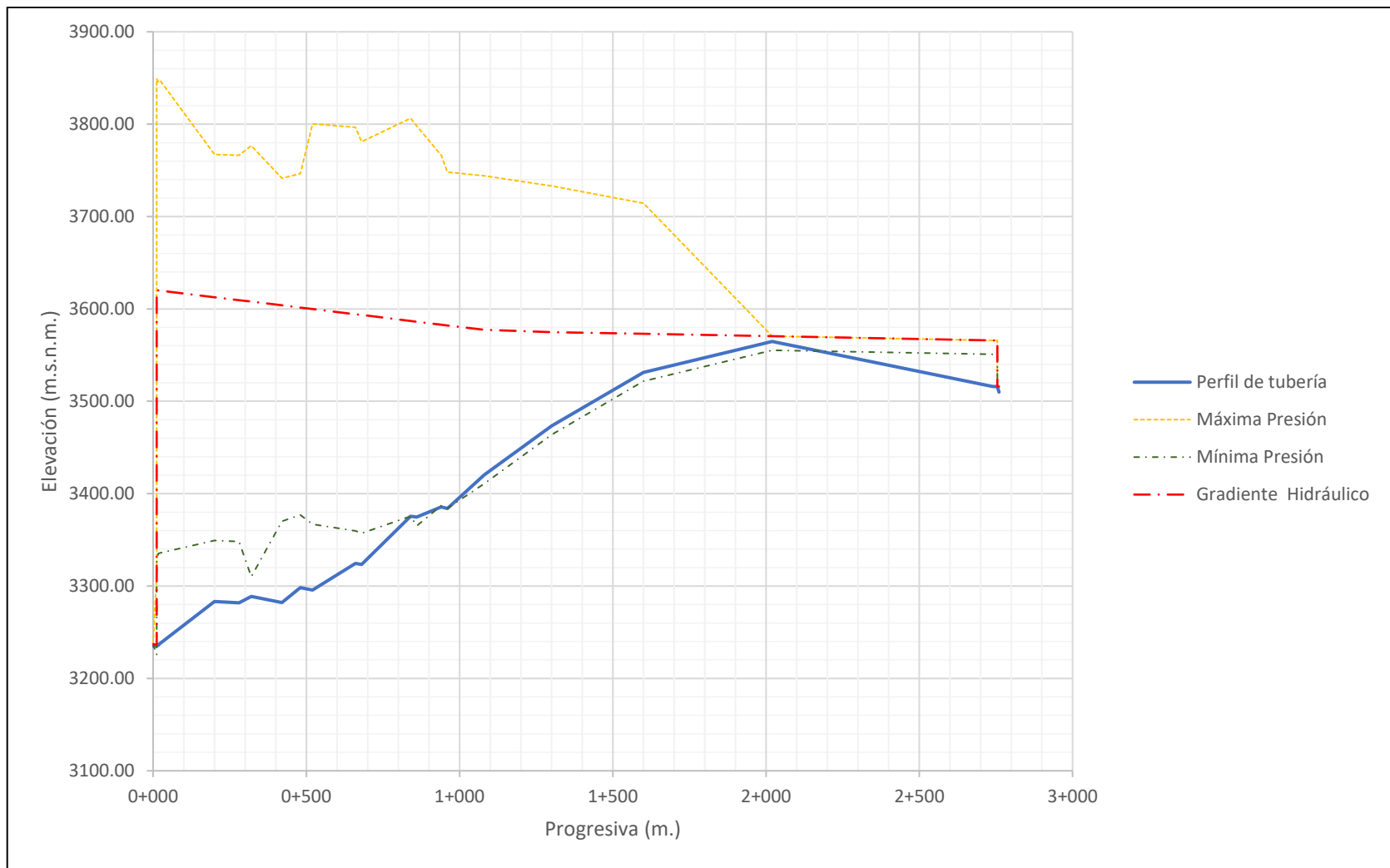


Figura 12. Cargas modeladas en régimen transitorio sin considerar dispositivos de protección.
 FUENTE: Datos obtenidos del modelamiento con software KYPipe.

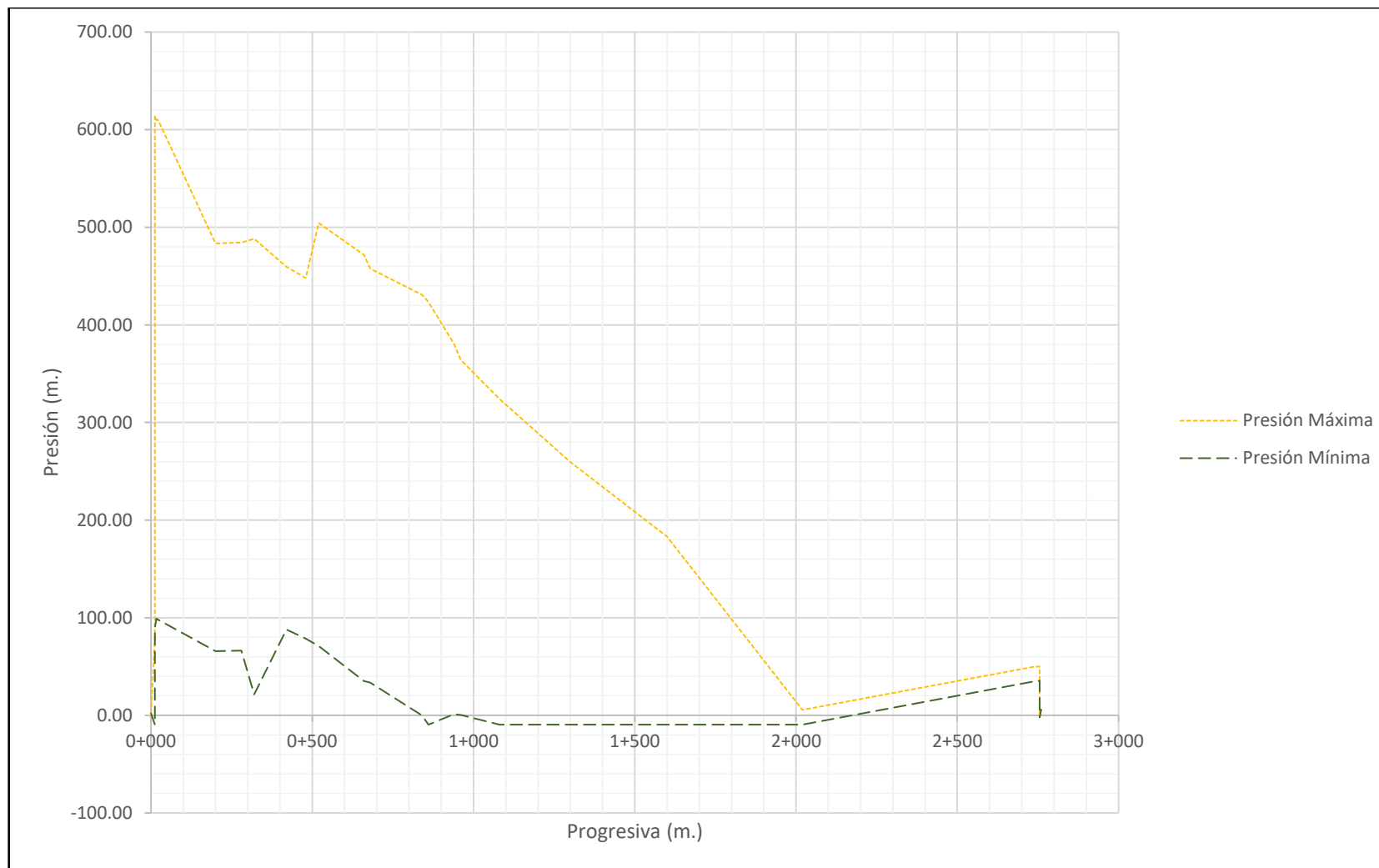


Figura 13. Presiones modeladas en régimen transitorio sin considerar dispositivos de protección.
 FUENTE: Datos obtenidos del modelamiento con software KYPipe.

4.3 Diseño del sistema de protección

El diseño del sistema de protección cuenta con un control de arranque y parada de bomba, control de fenómenos de golpes de ariete y control de presencia de aire en las tuberías.

4.3.1 Control de arranque y parada de bomba. El empleo de válvulas de retención convencionales ocasiona la presencia de fenómenos de golpes de ariete y transitorios en cada una de las operaciones de arranque y parada de la bomba, produciendo serios problemas en el sistema.

Por tal razón se consideró un sistema automatizado de arranque y parada suave de bombas, mediante el modelamiento se obtuvieron válvulas con rangos de caudales adecuados para controlar los efectos adversos. La válvula control de bomba tiene como función automatizar los arranques y paradas de las bombas a fin de evitar la presencia de golpes de ariete en cada una de estas operaciones, para esto debe tener la posibilidad de regular tanto la velocidad de apertura como cierre de la válvula. Para la automatización la válvula control de bomba cuenta en su circuito de control con una válvula de bola motorizada (actuada eléctricamente) y un interruptor de final de carrera que están interconectadas al tablero de control de la bomba.

Al darse la orden de arranque la válvula de bola motorizada del circuito de control se coloca en su posición de apertura dejando sin resistencia a la válvula control de bomba para su apertura, logrando el llenado progresivo y controlado de las tuberías. Al darse la orden de parada, la válvula de bola motorizada del circuito de control se coloca en su posición de cierre, produciendo el cierre gradual de la válvula control de bomba, al llegar está a su final de carrera el interruptor ordenará la parada de la bomba.

Ante un fallo de energía eléctrica, la válvula funcionará hidráulicamente como una válvula de retención convencional a fin de evitar flujo inverso hacia las bombas. Con el empleo de la válvula control de bomba se garantiza que no se producirán transitorios ni golpes de ariete en cada uno de los arranques y paradas de la bomba (Anexo 1).

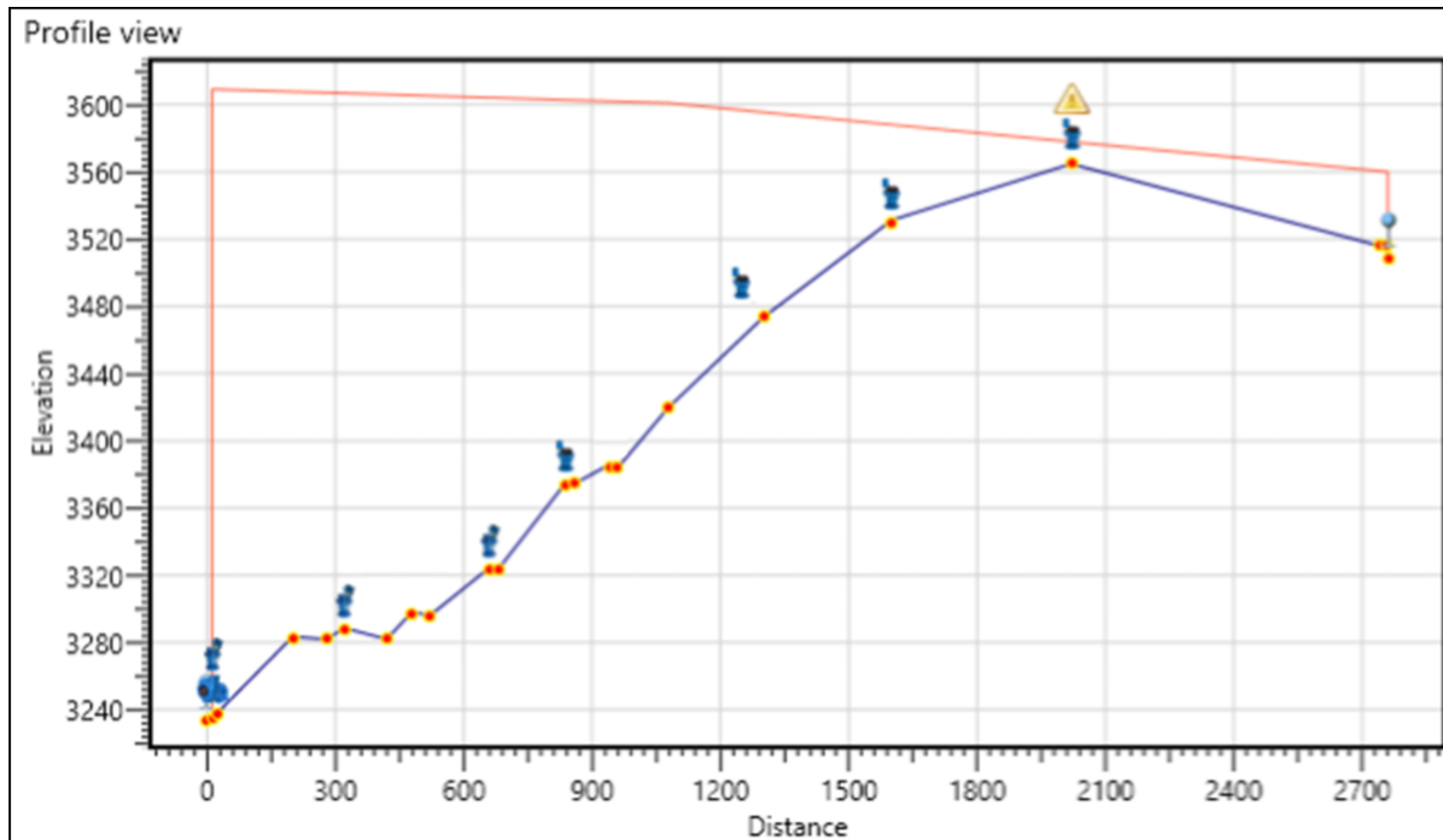


Figura 14. Ubicación de las válvulas ventosas en el perfil de la línea en régimen permanente, usando el software ARIavCAD.
FUENTE: Gráfica obtenida del ARIavCAD.

Tabla 13. Resultados de la simulación en régimen transitorio con dispositivos de protección.

Posición N°	Prog. m.	Máx. carga m.	Mín carga m.	Tiempo Reversa	Máx. Presión Kpa.	Mín. Presión Kpa.	Máx. Tiempo (seg.)	Mín. Tiempo (seg.)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
N0	0	2.00	2.00	0.00	19.62	19.62	0.01	0.01
I-N00	12	76.16	-9.50	74.22	747.13	-93.195	8.92	8.80
O-N00	12	385.28	34.38	74.22	3779.64	337.24	4.92	7.53
N000	17	384.12	33.79	0.00	3768.18	331.449	1.03	7.52
N01	22	382.30	32.55	0.00	3750.34	319.325	0.89	7.51
N02	200	329.34	-6.13	0.71	3230.79	-60.144	5.18	6.73
N03	280	327.68	-1.80	0.03	3214.52	-17.68	5.24	6.65
N04	320	319.29	-0.01	0.58	3132.22	-0.105	5.21	6.88
N05	420	321.91	4.72	0.00	3157.90	46.295	5.10	6.74
N06	480	303.07	-5.58	0.16	2973.14	-54.72	5.04	6.77
N07	520	304.08	2.42	0.00	2983.06	23.778	5.00	6.81
N08	660	278.16	-0.01	0.21	2728.80	-0.102	16.36	6.97
N09	680	281.48	2.93	0.00	2761.33	28.721	16.38	6.87
N10	840	253.50	-0.01	0.73	2486.82	-0.106	16.14	7.05
N11	860	258.75	2.80	0.00	2538.38	27.509	16.16	7.36
N12	940	258.74	2.34	0.00	2538.23	22.963	16.08	7.28
N13	960	263.44	7.29	0.00	2584.38	71.526	16.09	7.26
N14	1080	243.33	-8.61	0.35	2387.09	-84.442	15.93	7.14
N15	1300	190.24	-0.01	0.67	1866.21	-0.122	15.76	7.31
N16	1600	115.59	-0.14	4.19	1133.91	-1.339	15.48	8.34
N17	2020	5.67	-0.55	112.95	55.65	-5.37	3.51	15.07
N18	2740	50.00	43.93	0.00	490.49	430.995	2.78	7.80
I-N19	2755	49.91	44.05	0.00	489.58	432.179	2.78	15.33
O-N19	2755	0.36	-1.69	0.00	3.51	-16.585	9.31	7.79
N20	2760	5.90	5.90	0.00	57.88	57.878	0.01	0.01

FUENTE: Datos obtenidos del modelamiento con el software KYPipe.

Tabla 14. Resumen de máximas y mínimas presiones alcanzadas en régimen transitorio con dispositivos de protección.

Nodo Inicio	Nodo Final	Máxima carga Kpa.	Mínima carga Kpa.	Estado
O-N00	N000	3779.64	331.45	No cavita
N000_O	N01	3768.18	319.32	No cavita
N01_O	N02	3750.34	-60.14	No cavita
N02	N03	3230.79	-60.14	No cavita
N03	N04	3214.52	-17.68	No cavita
N04_O	N05	3157.9	-0.1	No cavita
N05	N06	3157.9	-54.72	No cavita
N06	N07	2983.06	-54.72	No cavita
N07	N08	2983.06	-0.1	No cavita
N08_O	N09	2761.33	-0.1	No cavita
N09	N10	2761.33	-0.11	No cavita
N10_O	N11	2538.38	-0.11	No cavita
N11	N12	2538.38	22.96	No cavita
N12	N13	2584.38	22.96	No cavita
N13	N14	2584.38	-84.44	No cavita
N14	N15	2387.09	-84.44	No cavita
N15_O	N16	1866.21	-1.34	No cavita
N16_O	N17	1133.91	-5.37	No cavita
N17_O	N18	490.49	-5.37	No cavita
N18	I-N19	490.49	431	No cavita
O-N19	N20	57.88	-16.59	No cavita

FUENTE: Datos obtenidos del modelamiento con software KYPipe.

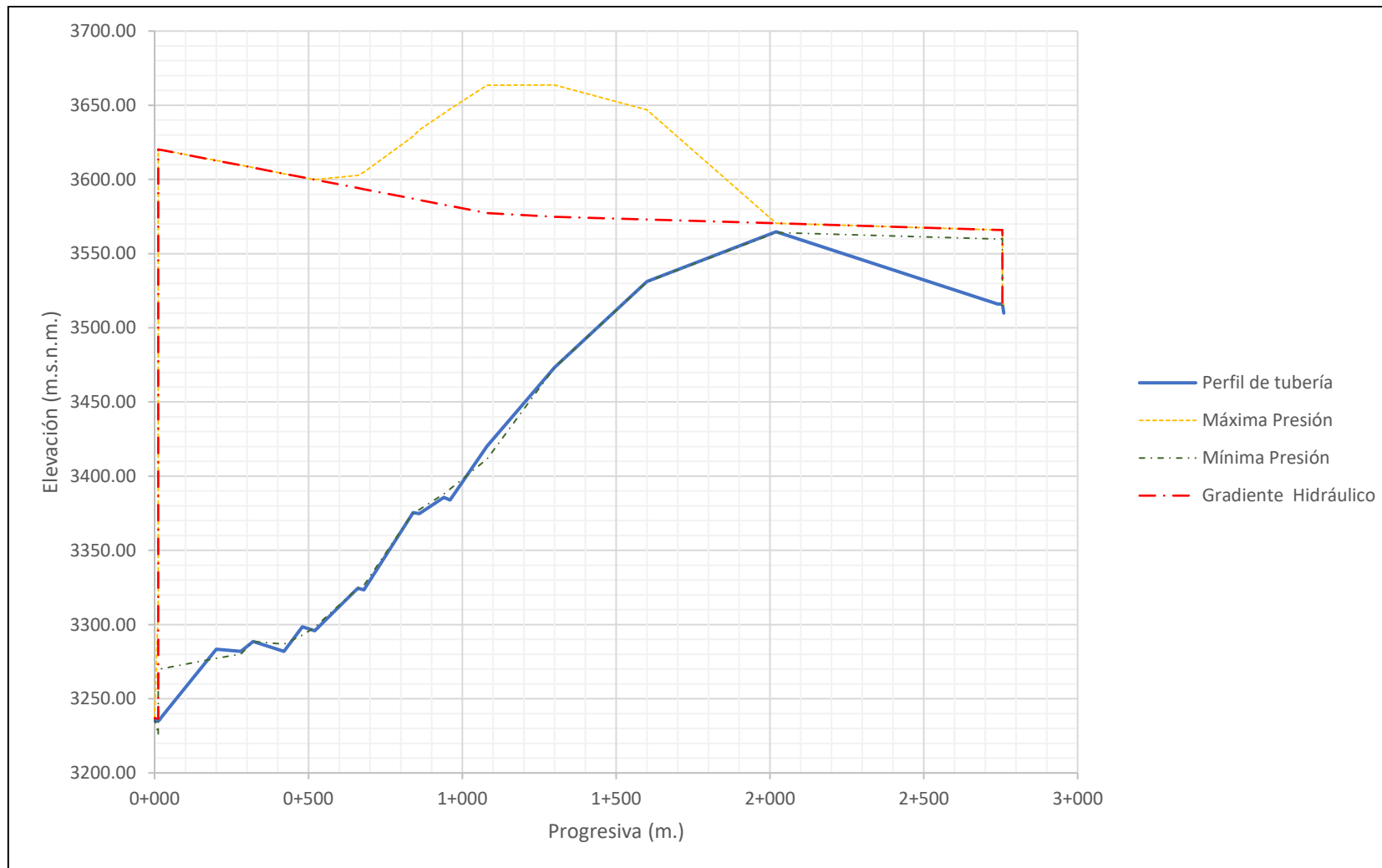


Figura 15. Cargas modeladas en régimen transitorio considerando dispositivos de protección.
 FUENTE: Datos obtenidos del modelamiento con el software KYPipe.

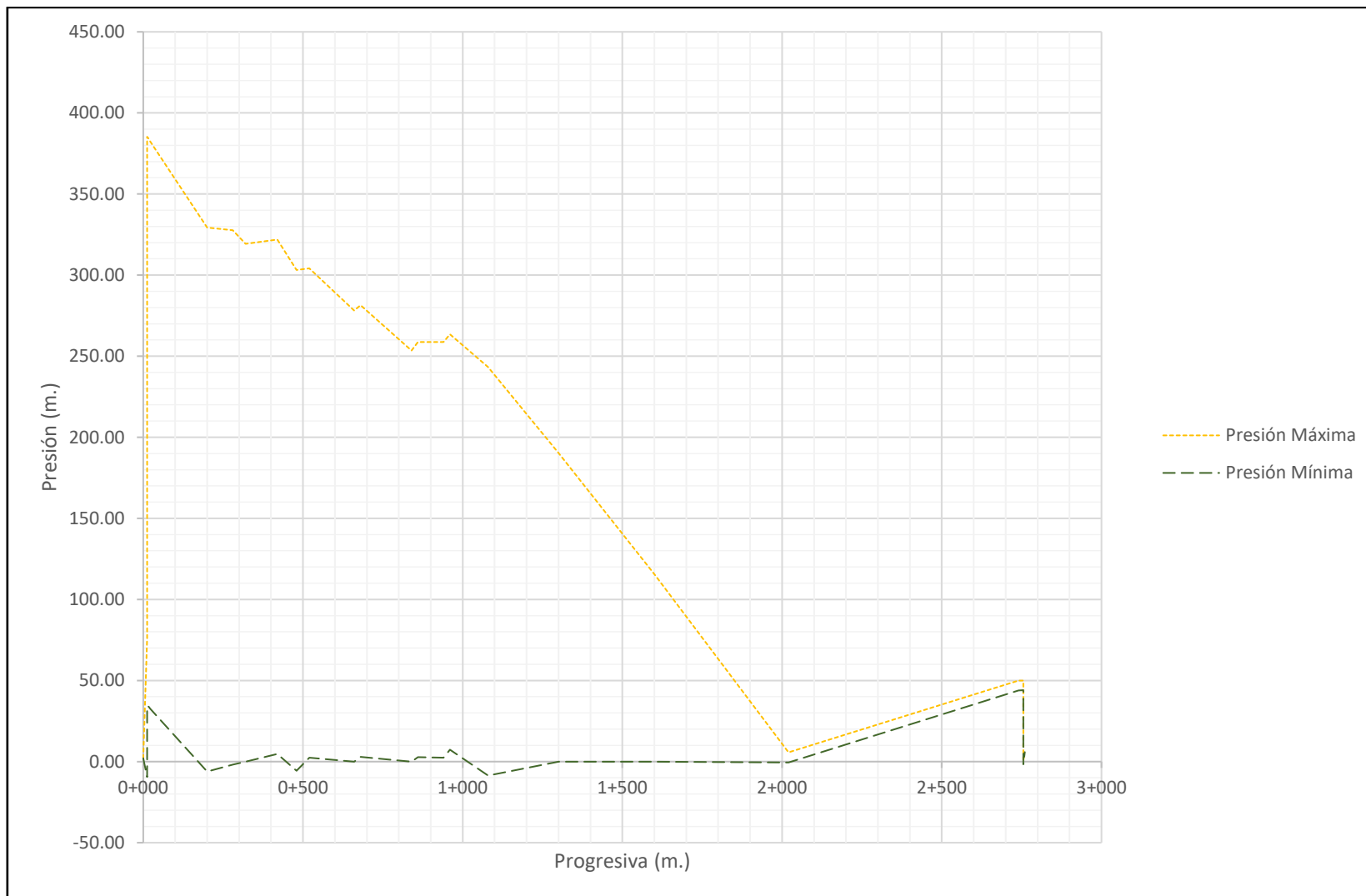


Figura 16. Presiones modeladas en régimen transitorio considerando dispositivos de protección.
 FUENTE: Datos obtenidos del modelamiento con el software KYPipe.

Tabla 15. Válvula control de bomba.

Características de válvula control de bomba	
Modelo	: 840
Cuerpo	: Acero al carbono ASTM A-216 WCB
Cantidad	: 1 und.
Diámetro	: 8 pulgadas
Bridas	: ANSI 300
Presión de trabajo	: PN40

FUENTE: Propia.

En el Anexo 1, se encuentran las especificaciones técnicas y el catálogo de la válvula control de bomba usado en el modelamiento.

4.3.2 Control del fenómeno de golpe de ariete. Para los casos en que se tengan paradas no programadas de la bomba debido a problemas eléctricos o cuando se tenga una interrupción brusca del flujo como consecuencia de una mala operación se producirán transitorios a lo largo de la tubería.

En la figura 12 se presenta la simulación de golpe de ariete a producirse en el sistema en caso no se cuente con un adecuado sistema de protección, para evitar este escenario se modeló el sistema considerando una válvula anticipadora de onda en el manifold de descarga ubicada en la estación de bombeo.

Tabla 16. Válvula de control anticipadora de onda.

Características de válvula control anticipadora de onda	
Modelo	: 835
Cuerpo	: Acero al carbono ASTM A-216 WCB
Cantidad	: 1 und.
Diámetro	: 2 pulgadas
Bridas	: ANSI 300
Presión de trabajo	: PN40

FUENTE: Propia.

A lo largo de la tubería se consideraron válvulas ventosas de acuerdo con el análisis, a fin de evitar problemas de vacío y colapso de la tubería. En el Anexo 1, se encuentran las

especificaciones técnicas y el catálogo de la válvula anticipadora de onda usado en el modelamiento.

4.3.3 Control de aire en la tubería. La formación de vacío dentro del sistema de impulsión puede llevar al colapso de la tubería o fallas en las bombas, se debe drenar eficientemente el sistema eliminando las bolsas de aire que se acumulan en la tubería. A fin de prevenir esta condición se modeló la línea considerando dispositivos de venteo en la línea de descarga para garantizar el correcto funcionamiento del sistema.

4.3.3.1 Información requerida para el análisis ARIavCad. El software requiere la siguiente información, ([ARIavCAD](#) , s.f.):

- Función requerida por las válvulas de aire en un proyecto:
 - Descarga de aire cuando el sistema está bajo presión y al llenar la línea.
 - Introducción de aire en el sistema para protección contra vacío y durante la separación de la columna de agua.
- Datos del perfil de la línea en AutoCAD. En los perfiles la línea que representa la tubería debe ser una polilínea para que se analice la sección completa de la tubería.
- Deben considerarse los aumentos o reducciones en el flujo a lo largo de la tubería por conexiones a otras líneas de suministro o distribución.
- Diámetro y material de la tubería para cada sección de la línea, se debe incluir el coeficiente de Hazen-Williams y la celeridad de cada sección de tubería.

El modelamiento del sistema se realizó empleando el software ARIavCad, el que permitió dimensionar las válvulas ventosas combinadas, tabla 17, que brinda una adecuada protección del sistema contra vacíos extremos.

En el Anexo 3, se encuentran las especificaciones técnicas y el catálogo de las válvulas control de aire, D-014 HF-ARI, D-060 HF-ARI y D-062 HF-ARI.

Tabla 17. Válvula control de aire.

Características válvulas ventosas combinadas			
Modelo	: D-014 HF	Cantidad	: 3 unidades
		Diámetro	: 2 pulgadas
		Presión de trabajo	: PN40
Modelo	: D-062 HF	Cantidad	: 1 unidades
		Diámetro	: 2 pulgadas
		Presión de trabajo	: PN25
Modelo	: D-060 HF	Cantidad	: 3 unidades
		Diámetro	: 2 pulgadas
		Presión de trabajo	: PN16

Fuente: Propia.

V. CONCLUSIONES

1. Los resultados obtenidos en el modelamiento de los transitorios hidráulicos sin considerar dispositivos de protección (tabla 10) se alcanzaron presiones de 614 m.c.a. en la posición O-N00 correspondiente a la descarga de la bomba y una presión mínima de -9.5 m.c.a. con tiempo reversa de 112.95 en la posición N17.
2. Para el caso de las presiones modelando el sistema en régimen transitorio considerando los dispositivos de protección (tabla 13), se obtuvo una presión máxima de 385 m.c.a. en la posición O-N00 y -8.61 m.c.a. con tiempo reversa de 0.35 en la posición N14.
3. Se concluye de las tablas 10 y 13, que el sistema de válvulas de control modeladas en la línea de impulsión permitió una disminución de 229 m.c.a. de sobrepresión en el nodo O-N00 correspondiente al punto más crítico en la descarga de bomba.
4. La optimización de la ubicación, dimensionamiento y características técnicas de las válvulas ventosas se obtuvieron con el software ARIavCAD, las que fueron validadas con el modelamiento del golpe de ariete.

VI. RECOMENDACIONES

1. El diseño de una línea de impulsión debe considerar desde su formulación el efecto de los transitorios y las presiones que se ejercen sobre el sistema y los equipos instalados como bombas, tuberías y accesorios.
2. Se debe valorar el entorno y la repercusión del proyecto sobre el medio ambiente y la seguridad del personal que realiza la operación de los equipos, permitiendo minimizar los efectos sobre el ecosistema y evitar accidentes por sobrepresiones no controladas.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abreu, JM; Cabrera, E; Iglesias, PL; Izquierdo, J. 1995d. El golpe de ariete en tuberías de impulsión. Comentarios a las expresiones de Mendiluce. Ingeniería del agua. 2(2); 37-52.
- Abreu, JM; Cabrera, E; Izquierdo, J; García-Serra, J. 1995a. Flow Modelling in pressurized systems. From water hammer to steady state. I: Fundamentals, Remitido al Journal of Hydraulics Engineering, ASCE.
- Abreu, JM; Cabrera, E; Izquierdo, J; García-Serra, J. 1995b, Flow Modelling in pressurized systems. From water hammer to steady state. II: Examples. Remitido al Journal of Hydraulics Engineering, ASCE.
- Abreu, JM; Guarga, R; Izquierdo, J. Editores, 1995c. Transitorios y oscilaciones en sistemas hidráulicos a presión. Ed. U.D. Mecánica de Fluidos. Universidad Politécnica de Valencia.
- Abuiziah, I; Oulhaj, A; Sebari, K; Ouazar, D. 2013. Simulating Flow Transients in Conveying Pipeline Systems by Rigid Column and Full Elastic Methods: Pump Combined with Air Chamber. World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering. 7 (12); 1-7.
- ARI Flow Control Accesories Ltd. s. f. AriaVcad. (en línea)
<https://www.arivalves.com/es/design-tools>
- ARI Flow Control Accesories Ltd. s.f. Recomendaciones para válvulas de aire. (en línea)
<https://vdocuments.mx/ari-valvulas-de-aire-teoria.html>
- AWWA. 2002. Manual M51: Air Release, Air/ Vacuum, and Combination Air Valves, Manual of Water Supply Practices. AWWA. Denver.

Bentley HAMMER CONNECT Edition Help. s. f. (en línea)
<https://docs.bentley.com/LiveContent/web/Bentley%20HAMMER%20SS6-v1/en/GUID-BA171441-890E-4DDB-8A07-CA2A0BBB7A9E.html>

Bergant, A; Simpson, AR. 1999. Pipeline column separation flow regimes. *Journal of Hydraulic Engineering*, American Society of Civil Engineers. 125(8); 835-848.

Chaudhry, MH. 2014. *Applied Hydraulic Transients*. 3 Ed. New York. Van Nostrand Reinhold Company.

Chaudhry, MH. 1979. *Applied Hydraulic Transients*. Ed. rev. New York. Van Nostrand Reinhold Company.

Curtis, AR; Reid, JK. 1972. On the Automatic Scaling of Matrices for Gaussian Elimination. *IMA Journal of Applied Mathematics*. 10(1); 118-124.

Donsky, B. 1961. Complete pump characteristics and the effect of specific speeds in hydraulic transients. *Journal of Basic Engineering, Transactions, American Society of Mechanical Engineers*. 83(4): 685-699.

Gandarillas, JI. s. f. Utilización de ventosas como elemento de protección en transitorios hidráulicos. ARI Flow Control Accesories Ltd. (en línea).
<https://arivalves.com/es/library/articles/ventosas/item/utilizacion-de-ventosas-como-elemento-de-proteccion-en-transitorios-hidraulicos-2>

Iglesias, PL; Izquierdo, S; Fuerte, MV. 2003. *Ingeniería hidráulica en los abastecimientos de agua*. Ed. Rev. Valencia, España. UPV. p.372.

Knight Piésold Consultores S.A. 2009. *Minera La Zanja S.R.L.* Lima. (En Línea)
http://intranet2.minem.gob.pe/web/archivos/dgaam/estudios/lazanja/Texto_1.pdf.

Kumar, S; Ruchi, K. 2017. Effect of Pump Inertia & Valve Closure time on the Transient Flow Condition of a Water Supply Network: A Case Study. *International Journal of Engineering Trends and Technology*. 49(2); 115-121.

KYPipe, LLC. 2010. *KYPipe Reference Manual*.

- Lee, TS; Leow, LC. 1999. Numerical study on the effects of air valve characteristics on pressure surges during pump trip in pumping systems with air entrainment. *International journal for numerical methods in fluids*, 29(6): 645-655.
- Li, G; Baggett, CC; Rosario, RA. 2009. “Air/Vacuum Valve Breakage Caused by Pressure Surges-Analysis and Solution”. *World Environmental and Water Resources Congress 2009*. pp: 112-121.
- Marchal, M; Flesh, G; Suter, P. 1965. The Calculation of Water-hammer Problems by Means of the Digital Computer, *Proc. Int. Symp. Chicago, USA . Water hammer Pumped Storage Projects*, ASME.
- Nerella, R; Rathnam EV. 2015. Fluid transients and wave propagation in pressurized conduits due to valve closure. *International Conference on Computational Heat and Mass Transfer-2015*. 127: 1158 – 1164.
- Parmakian, J. 1963. *Water Hammer Analysis*. 1 ed. New York. Dover Publication Inc.
- Pozos - Estrada, O; Fuentes, O; Sánchez, A; Rodal, EA; Luna, F. 2017. Análisis de los efectos del aire atrapado en transitorios hidráulicos en acueductos a bombeo. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*. 33(1); 79-89.
- Rodríguez, C; Pallares, MR. 2007. Modelo numérico del golpe de ariete con SCILAB. 27(3); 98-105.
- Soares, KA; Covas, CI; Ramos, MH. 2013, Damping analysis of hydraulic transients in pump-rising mains systems. *Journal of Hydraulic Engineering*. 39(2):233-243.
- Stephenson, D. 1984. *Pipe flow Analysis*. 1 ed. New York. Elsevier Science. (En línea). <https://www.elsevier.com/books/pipeflow-analysis/stephenson/978-0-444-42283-5>
- Stephenson, D. 2002 Simple guide for design of air vessels for water hammer protection of pumping lines. *Journal of hydraulic engineering*. 128(8): 792-797.
- Streeter, V. L. 1983. Transient cavitating pipe flow. *Journal of Hydraulic Engineering*. ASCE. 109(11), 1408–1423.

- Tullis, JP. 1989. *Hydraulics Of Pipelines, Pumps, Valves, Cavitation, Transients*. 3 ed. New York. Willie. p.186.
- Wan, W; Huang, W. 2011. Investigation on complete characteristics and hydraulic transient of centrifugal pump. *Journal of Mechanical Science and Technology* 25 (10): 2583-2590.
- Wan, W; Li, F. 2016. Sensitivity Analysis of Operational Time Differences for a Pump-Valve System on a Water Hammer Response. *Journal of Pressure Vessel Technology*. 138(1): 1-8.
- Wan, W; Zhang, B. 2018. Investigation of Water Hammer Protection in Water Supply Pipeline. *Energies*. 12(1); 1-20.
- Wood, DJ; Rayes, A. 1981. Reliability of Algorithms for Pipe Network Analysis. *Journal of Hydraulic Division, ASCE*. 107(HY10): 1145-1161.
- Wu, Y; Xu, Y ; Wang, C. 2015. Research on air valve of water supply pipelines. *Procedia Engineering* 119: 884 – 891.
- Wylie, CR. 1967. *Advange Engineering Mathematics*. 3 ed. New York. McGraw- Hill Book Co.
- Wylie, EB; Streeter, VL. 1978. *Fluid Transients*. 1 ed. New York. McGraw-Hill Inc.

VIII. ANEXOS

ANEXO 1 :Válvulas de control hidráulico.

Válvula control de bomba.

La Válvula Control de Bomba, tiene como función automatizar los arranques y paradas de las bombas a fin de evitar la presencia de golpes de ariete en cada una de estas operaciones programadas. Para esto debe tener la posibilidad de regular tanto la velocidad de apertura como de cierre de la válvula.

Para la automatización, la válvula debe contar con una válvula de bola motorizada y un interruptor de fin de carrera, que serán interconectados al tablero de control de la bomba.

Al darse la orden de arranque, la válvula de bola motorizada del circuito de control se coloca en su posición de apertura (dejando sin resistencia a la válvula control de bomba para su apertura), y se da el llenado progresivo y controlado de las tuberías.

Al darse la orden de parada, la válvula de bola motorizada del circuito de control se coloca en su posición de cierre, lo cual produce el cierre gradual de la válvula control de bomba, y al llegar ésta a su fin de carrera, el interruptor ordenará la parada de la bomba.

Ante un fallo de la energía eléctrica, la válvula funcionará hidráulicamente como una Válvula de Retención convencional.

Características de diseño:	: Globo de funcionamiento hidráulico con accionador de pistón.
Tipo	: En Y. Material: Acero al carbono ASTM A-216 WCB
Bridas	: ANSI 300
presión de trabajo	: PN40
Accionador	: De Pistón, de fácil desmontaje para mantenimiento del cuerpo sin retirar el mismo de la línea
cierre del accionador	: Cierre Lento Amortiguado al final de la carrera de la válvula. Función: Evitar Golpes de Ariete
Sello	: NBR, Resistente a la contaminación con cobre y al ataque del Ozono (ISO 10221 e ISO 4633); o superior.
Asiento	: Acero Inoxidable SAE 304. De Paso Total sin obstrucciones.
Disco de cierre	: :Íntegramente en Acero Inoxidable SAE 303
Vástago	: Acero Inoxidable SAE 303
Resorte	: Acero Inoxidable SAE 303
Tornillos de ajuste	: Acero Zincado Grado 8.8 DIN 267-1967
Protección ext./int	: Revestimiento de la válvula con pintura epóxica aprobada por norma NSF61 para uso de agua potable
Válvula bola motorizada	: Tres vías, dos posiciones. Material Acero Inox. SAE 316 220 VAC 60 Hz
Interruptor de fin de carrera	: Contactos NC, NO, 220VAC
Accesorios de control	: Dispositivo para regular la velocidad de apertura,
Circuito de control	: Dispositivo para regular la velocidad de apertura, válvulas de bola para aislamiento, filtro (35 mesh)
Niples y accesorios	: Tubería de acero inoxidable SAE 316.

Disco anticavitante	:	No requiere
Garantía por defectos	:	Garantía de mantenimiento y soporte técnico del fabricante
Mantenimiento	:	Periodo no menor de tres (03) años, mediante entrega de certificado
Certificaciones	:	ISO 9001 2000
Marca	:	BERMAD
Modelo	:	840
Procedencia	:	ISRAEL

Válvula anticipadora de onda ANSI 300.

La Válvula Anticipadora de Onda, tiene como función proteger a los sistemas de bombeo de los efectos negativos del golpe de ariete, como consecuencia de una parada brusca de los equipos de bombeo o cierre intempestivos de válvulas.

La válvula posee dos pilotos de control, uno de baja presión para atenuar la fase depresiva del golpe de ariete, y otro de alta presión para atenuar la sobre presión del golpe de ariete.

Requiere la instalación de una tubería sensora a conectarse en la tubería principal a la salida de la estación de bombeo.

Características de diseño:

Tipo	: Globo de funcionamiento hidráulico con accionador de pistón y regulado por piloto.
Cuerpo	: En Y. Material: Acero al carbono ASTM A-216 WCB, con extremos bridados
Bridas	: ANSI 300
Presión de trabajo	: PN 40 (40 bar)
Accionador	: De pistón, de fácil desmontaje para mantenimiento del cuerpo sin retirar el mismo de la línea
Cierre del accionador	: Cierre Lento Amortiguado al final de la carrera de la válvula. Función: Evitar Golpes de Ariete
Diafragma	: BUNA-N o superior
Protección de diafragma	: Carcasa inferior que evite el contacto dinámico del diafragma con el fluido.
Sello	: BUNA-N o superior
Asiento	: Acero Inoxidable SAE 316
Eje	: Acero Inoxidable SAE 316
Resorte	: Acero Inoxidable SAE 316
Limitador de flujo	: Acero Inoxidable SAE 316
Tornillos de ajuste	: Acero Inoxidable SAE 316
Pilotos	: De baja presión (reductor) y de alta presión (sostenedor), regulables con ajuste a la presión deseada, material Acero Inoxidable ASTM CF8M
Accesorios de control	: Dispositivo para regular la velocidad de apertura y cierre, válvula de bola para aislamiento, filtro (40 mesh)
Circuito de control	: Tubería de Acero Inoxidable SAE 316
Garantía por defectos	: Periodo no menor de tres (03) años, mediante otorgación de certificado
Mantenimiento	: Garantía de mantenimiento y soporte técnico del fabricante
Certificaciones	: I.S.O. 9001 CERTIFICADO DE ORIGEN DE FABRICA
Marca	: BERMAD
Modelo	: 835-M
Procedencia	: ISRAEL

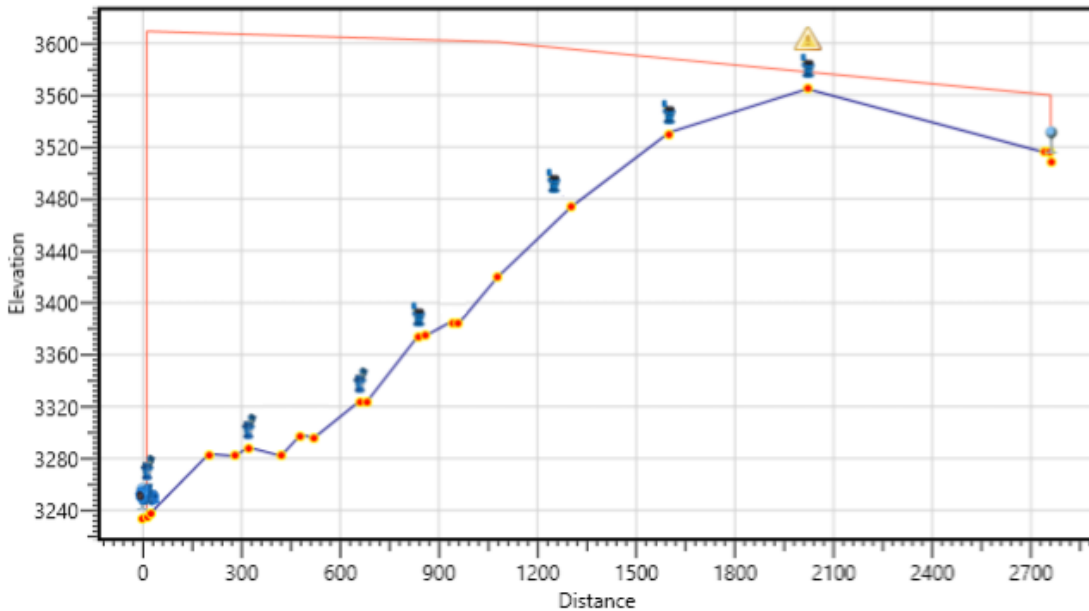
ANEXO 2: Reporte de ARIavCAD.

ARIavCAD project: LA ZANJA

Bombeo


Report date:	6/12/2018	Project date:	2/17/2018
Designer:	BERMAD	Distance units:	Meter
Application:	Municipal	Elevation units:	Meter
Fluid type:	Water	Diameter units:	Millimeter
Analysis type:	FillRate, Rupture	Flow units:	Meters³/hour
Burst ratio:	25%	Pressure units:	MetersWater










Profile view






ARIavCAD does not perform water hammer or surge analysis. A.R.I. Flow Control Accessories, or its representatives, are not responsible for any damages resulting from actions taken in response to ARIavCAD analysis results.

Clarification: ARIavCAD analysis assumes full-pipe pressurized flow in all pipe sections. Pipe sections with partial flow, either constant or intermittent, require special treatment, not covered by ARIavCAD. ARIavCAD analysis is suitable only to A.R.I air valves !!

Station ID	Distance	Elevation	Accessories
Maximum Negative Pressure: 4 ,Section Diameter: 119.8,Pipe Material: 150			
N0	0.00	3,235.00	 Reservoir / Water tower Flowrate: 0.00, Water level: 3,237.00

N00	12.00	3,235.03	 Pump station Is inline: Yes, Flowrate: 100.00, Pressure: 383.8  D-014 HF Selected diameter: 2
N01	22.00	3,237.62	
N02	200.00	3,283.42	
N03	280.00	3,281.86	
N04	320.00	3,288.64	 D-014 HF Selected diameter: 2
N05	420.00	3,282.00	
N06	480.00	3,298.42	
N07	520.00	3,295.80	
N08	660.00	3,324.50	 D-014 HF Selected diameter: 2
N09	680.00	3,323.46	
N10	840.00	3,375.55	 D-062-C HF Selected diameter: 2
N11	860.00	3,374.66	
N12	940.00	3,385.75	
N13	960.00	3,384.01	
Section Diameter: 155.2 ,Pipe Material: 140 ,Maximum Negative Pressure: 2			
N14	1,080.00	3,420.19	
N15	1,300.00	3,473.42	 D-060-C HF Selected diameter: 2
Section Diameter: 176.2QPipe Material: 150 ,Maximum			
N16	1,600.00	3,531.24	 D-060-C HF Selected diameter: 2
N17	2,020.00	3,564.75	 D-060-C HF Selected diameter: 2
N18	2,740.00	3,516.00	
N19	2,755.00	3,516.00	
N20	2,760.00	3,510.00	 Reservoir / Water tower Flowrate: 0.00, Water level: 3,516.00

Summary

Quantity	Accessory name
3	 D-014 HF 2"
1	 D-062-C HF 2"
3	 D-060-C HF 2"

ANEXO 3: Válvulas control de aire.

Válvula Ventosa Combinada D-014 Hf

La Válvula Ventosa Combinada incorpora en una sola válvula las funciones Cinética y Automática para la descarga y admisión de aire.

El componente Cinético permite admitir y descargar grandes cantidades de aire cuando la tubería se encuentre despresurizada: tanto al inicio del llenado como al vaciado de la misma.

El componente Automático permite descargar las burbujas de aire que se acumulan en la tubería cuando ésta se encuentra presurizada.

Características de diseño:

TIPO	: Combinada, de dos cuerpos.
CUERPO	: Hierro dúctil ASTM A536
CONEXIÓN	: BRIDA: 50mm a 250mm (2" a 10")
BRIDAS	: ANSI 300
PRESIÓN DE TRABAJO	: PN 40 (40 bar)
PRESIÓN DE CIERRE PREMATURO	: 0,8 bar
SELLO DE ORIFICIO	: EPDM / BUNA – N, Según ASTM D 1763
ASIENTO DE ORIFICIO	: Bronce ASTM B62
FLOTADOR CINÉTICO	: 2" - 8" Policarbonato/Acero Inoxidable SAE 304 10" Acero Inoxidable SAE 304
TORNILLOS DE AJUSTE	: Acero Zincado Grado 8.8 DIN 267-1967
PROTECCIÓN EXT./INT.	: Revestimiento de la válvula con pintura epóxica aprobada por norma NSF61 para uso de agua potable
ESPESOR DEL REVESTIMIENTO	: Espesor mínimo 150 micras según DIN30677 apartado 2
LIMPIEZA	: ISO 8501 – 1 Grado SA 2.5
GARANTÍA POR DEFECTOS	: Periodo no menor de tres (03) años, mediante entrega de certificado.
MANTENIMIENTO	: Garantía de mantenimiento y soporte técnico del fabricante.
CERTIFICACIONES	: I.S.O. 9001-2000
MARCA	: A.R.I.

Características del Orificio Cinético:

TAMAÑO NOMINAL	DIMENSIONES MÍNIMAS DEL ORIFICIO CINÉTICO Área: mm ²
DN 50 (2")	1960
DN 80 (3")	5030
DN 100 (4")	7850
DN 150 (6")	17662
DN 200 (8")	3140
DN 250 (10")	49087

Válvula ventosa combinada D-062-Hf

La Válvula Ventosa Combinada incorpora en una sola válvula las funciones Cinética y Automática para la descarga y admisión de aire.

El componente Cinético permite admitir y descargar grandes cantidades de aire cuando la tubería se encuentre despresurizada: tanto al inicio del llenado como al vaciado de la misma.

El componente Automático permite descargar las burbujas de aire que se acumulan en la tubería cuando ésta se encuentra presurizada.

Características de diseño:

TIPO	: Combinada, de dos cuerpos.
CUERPO	: Automático: Hierro dúctil ASTM-A536 Cinético: Hierro dúctil ASTM A-536
CONEXIÓN	: BRIDA: 50mm a 250mm (2" a 10")
BRIDAS	: ANSI 300
PRESIÓN DE TRABAJO	: PN 25 (25 bar)
PRESIÓN DE CIERRE PREMATURO	: 0,8 bar
SELLO DE ORIFICIO	: EPDM / BUNA – N, Según ASTM D 1763
ASIENTO DE ORIFICIO	: Bronce ASTM B62
FLOTADOR CINÉTICO	: 2" - 8" Policarbonato/Acero Inoxidable SAE 304 10" Acero Inoxidable SAE 304
TORNILLOS DE AJUSTE	: Acero Zincado Grado 8.8 DIN 267-1967
PROTECCIÓN EXT./INT.	: Revestimiento de la válvula con pintura epóxica aprobada por norma NSF61 para uso de agua potable
ESPESOR DEL REVESTIMIENTO	: Espesor mínimo 150 micras según DIN30677 apartado 2
LIMPIEZA	: ISO 8501 – 1 Grado SA 2.5
GARANTÍA POR DEFECTOS	: Período no menor de tres (03) años, mediante entrega de certificado.
MANTENIMIENTO	: Garantía de mantenimiento y soporte técnico del fabricante.
CERTIFICACIONES	: I.S.O. 9001-2000
MARCA	: A.R.I.

Dimensiones Mínimas del Orificio Automático:

9 mm ² para todos los diámetros de Válvulas Ventosas

Características del Orificio Cinético:

TAMAÑO NOMINAL	DIMENSIONES MÍNIMAS DEL ORIFICIO CINÉTICO Área: mm ²
DN 50 (2")	1960
DN 80 (3")	5030
DN 100 (4")	7850
DN 150 (6")	17662
DN 200 (8")	3140
DN 250 (10")	49087

Válvula ventosa combinada D-060-HF

Válvula Ventosa Combinada incorpora en una sola válvula las funciones Cinética y Automática para la descarga y admisión de aire.

El componente Cinético permite admitir y descargar grandes cantidades de aire cuando la tubería se encuentre despresurizada: tanto al inicio del llenado como al vaciado de la misma.

El componente Automático permite descargar las burbujas de aire que se acumulan en la tubería cuando ésta se encuentra presurizada.

Características de diseño:

TIPO	: Combinada, de dos cuerpos.
CUERPO	: Automático: Nylon reforzado Cinético: Hierro dúctil ASTM A-536
CONEXIÓN	: BRIDA: 50mm a 250mm (2" a 10")
BRIDAS	: ANSI 150
PRESIÓN DE TRABAJO	: PN 16 (16 bar)
PRESIÓN DE CIERRE PREMATURO	: 0,8 bar
SELLO DE ORIFICIO	: EPDM / BUNA – N, Según ASTM D 1763
ASIENTO DE ORIFICIO	: Bronce ASTM B62
FLOTADOR CINÉTICO	: 2" - 8" Policarbonato/Acero Inoxidable SAE 304 10" Acero Inoxidable SAE 304
TORNILLOS DE AJUSTE	: Acero Zincado Grado 8.8 DIN 267-1967
PROTECCIÓN EXT./INT.	: Revestimiento de la válvula con pintura epóxica aprobada por norma NSF61 para uso de agua potable
ESPESOR DEL REVESTIMIENTO	: Espesor mínimo 150 micras según DIN30677 apartado 2
LIMPIEZA	: ISO 8501 – 1 Grado SA 2.5
GARANTÍA POR DEFECTOS	: Período no menor de tres (03) años, mediante entrega de certificado.
MANTENIMIENTO	: Garantía de mantenimiento y soporte técnico del fabricante.
CERTIFICACIONES	: I.S.O. 9001-2000
MARCA	: A.R.I.

Dimensiones Mínimas del Orificio Automático:

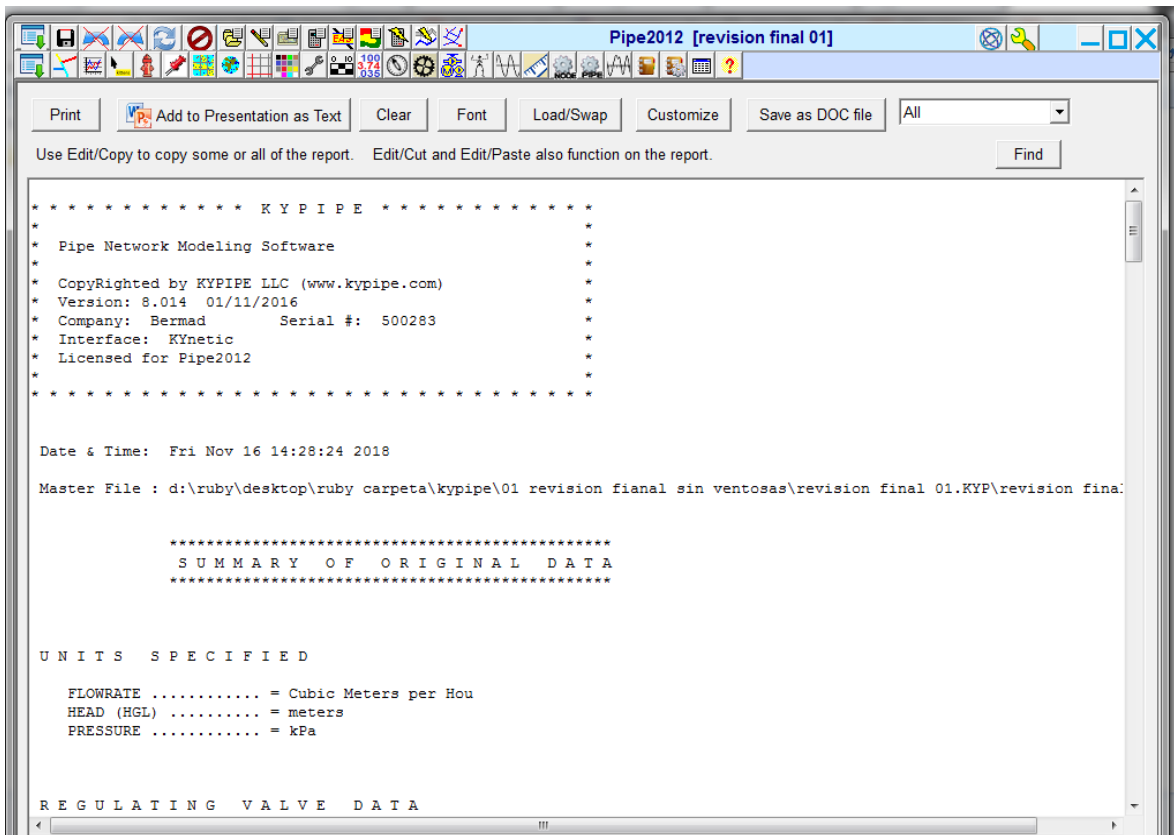
12 mm ² para todos los diámetros de Válvulas Ventosas
--

Características del Orificio Cinético:

TAMAÑO NOMINAL	DIMENSIONES MÍNIMAS DEL ORIFICIO CINÉTICO Área: mm ²
DN 50 (2")	1960
DN 80 (3")	5030
DN 100 (4")	7850
DN 150 (6")	17662
DN 200 (8")	3140
DN 250 (10")	49087

ANEXO 4: Resultados de Kypipe.

Resultados y gráficas en régimen permanente



Condiciones de operación de la bomba

Pipe2012 [permante]

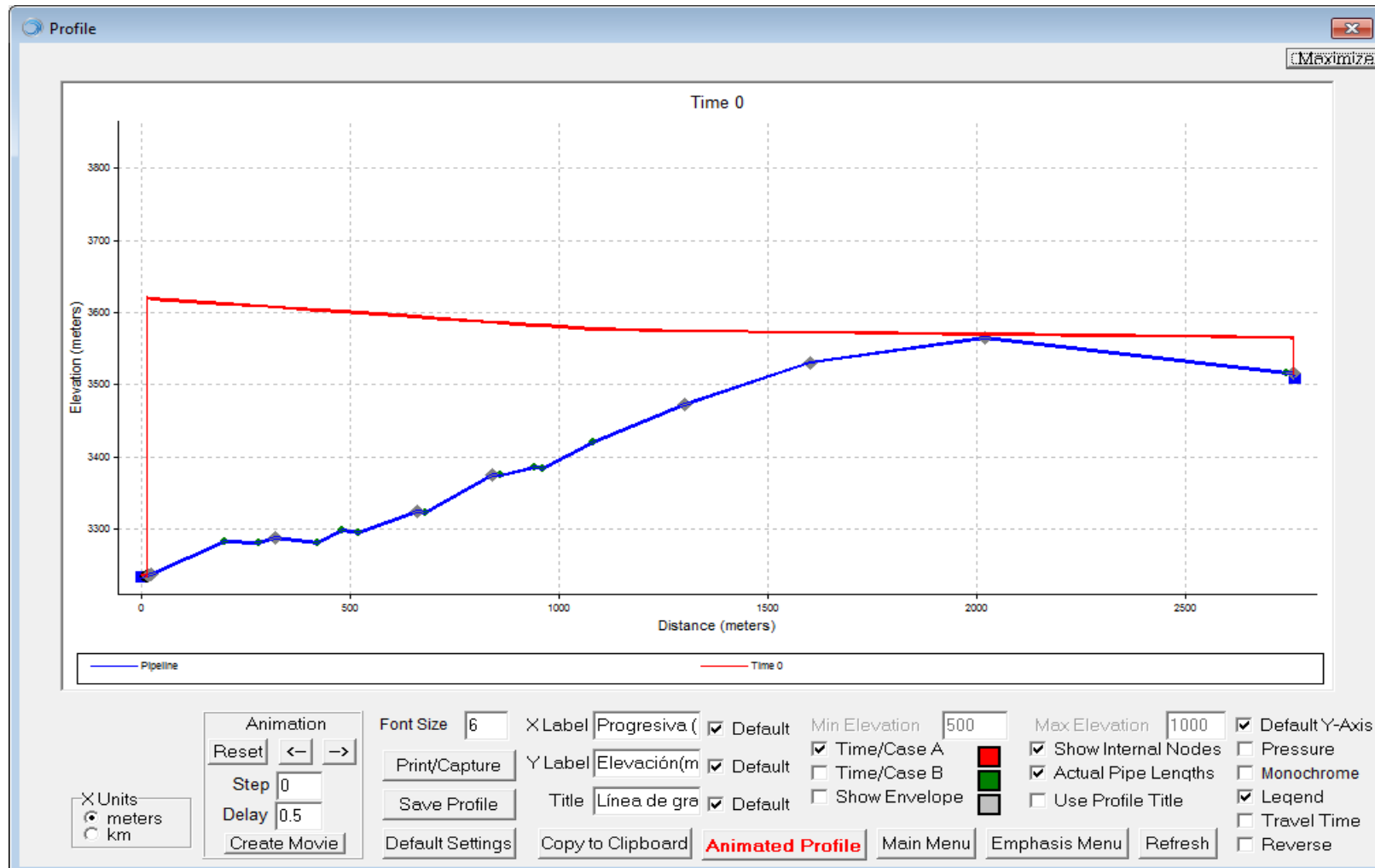
Print Add to Presentation as Text Clear Font Load/Swap Customize Save as DOC file Pump Report Find

Use Edit/Copy to copy some or all of the report. Edit/Cut and Edit/Paste also function on the report.

NAME	FLOWRATE CMH	HEAD m	HEAD m	HEAD m	ENCY %	POWER kW	COST \$	COST \$	PARALLEL	SERIES	Avail. m
N00	100.00	1.48	385.28	383.8	75.00	0.	0.0	0.0	**	**	11.3

Resultados en régimen permanente:

- Perfil de la línea de impulsión y gradiente hidráulico



Resultados y gráficas en régimen transitorio sin elementos de protección

- Resultados obtenidos del Kypipe, máximas y mínimas presiones.

Pipe2012 [revision final 01] 0 secs

Print Add to Presentation as Text Clear Font Load/Swap Customize Save as DOC file All Find

Use Edit/Copy to copy some or all of the report. Edit/Cut and Edit/Paste also function on the report.

Max/Min Summary

SUMMARY OF MAXIMUM AND MINIMUM HEADS:

Position no.	MaxHead m	MinHead m	Time Reverse Grad.	MaxPressure kpa	MinPressure kpa	MaxTime (sec)	MinTime (sec)
N0	2.00	2.00	0.000	19.620	19.620	0.01000	0.01000
O-N00	614.22	90.52	67.456	6025.525	887.977	18.18032	26.93052
N000	610.04	99.10	0.000	5984.472	972.126	18.19032	7.59008
N01	609.97	98.09	0.000	5983.830	962.269	18.16032	7.58008
N02	483.64	65.85	0.000	4744.493	645.956	17.98032	6.96006
N03	484.33	66.23	0.000	4751.230	649.707	24.61047	27.26053
N04	488.13	21.50	0.000	4788.540	210.919	24.69047	27.25053
N05	459.63	88.03	0.000	4508.973	863.599	17.78031	6.76006
N06	447.93	78.72	0.000	4394.158	772.202	24.61047	6.70006
N07	504.46	71.11	0.000	4948.756	697.569	18.83034	14.70024
N08	471.95	35.06	0.000	4629.835	343.938	24.49047	14.84024
N09	457.58	33.57	0.000	4488.831	329.325	24.45046	14.84024
N10	430.79	-0.12	0.010	4226.082	-1.168	17.35030	28.57056
N11	423.31	-9.50	0.020	4152.639	-93.195	17.32030	20.03036
N12	380.48	1.37	0.000	3732.471	13.405	17.34030	28.50056
N13	364.02	0.32	0.000	3571.005	3.101	11.82018	12.89020
N14	324.05	-9.50	0.580	3178.884	-93.195	11.69017	14.11023
N15	259.60	-9.50	2.280	2546.699	-93.195	11.42017	7.15007
N16	183.13	-9.50	23.980	1796.523	-93.195	11.17016	6.88006
N17	5.67	-9.50	112.946	55.653	-93.195	2.04000	7.10007
N18	50.00	34.93	0.000	490.485	342.619	2.78000	7.82008
O-N19	0.47	-1.94	0.000	4.583	-19.078	7.86009	7.80008

- Resultados obtenidos por el modelamiento en Kypipe indicando donde se generan zonas de presión negativa.

Pipe2012 [revision final 01] 0 secs

Print Add to Presentation as Text Clear Font Load/Swap Customize Save as DOC file All Find

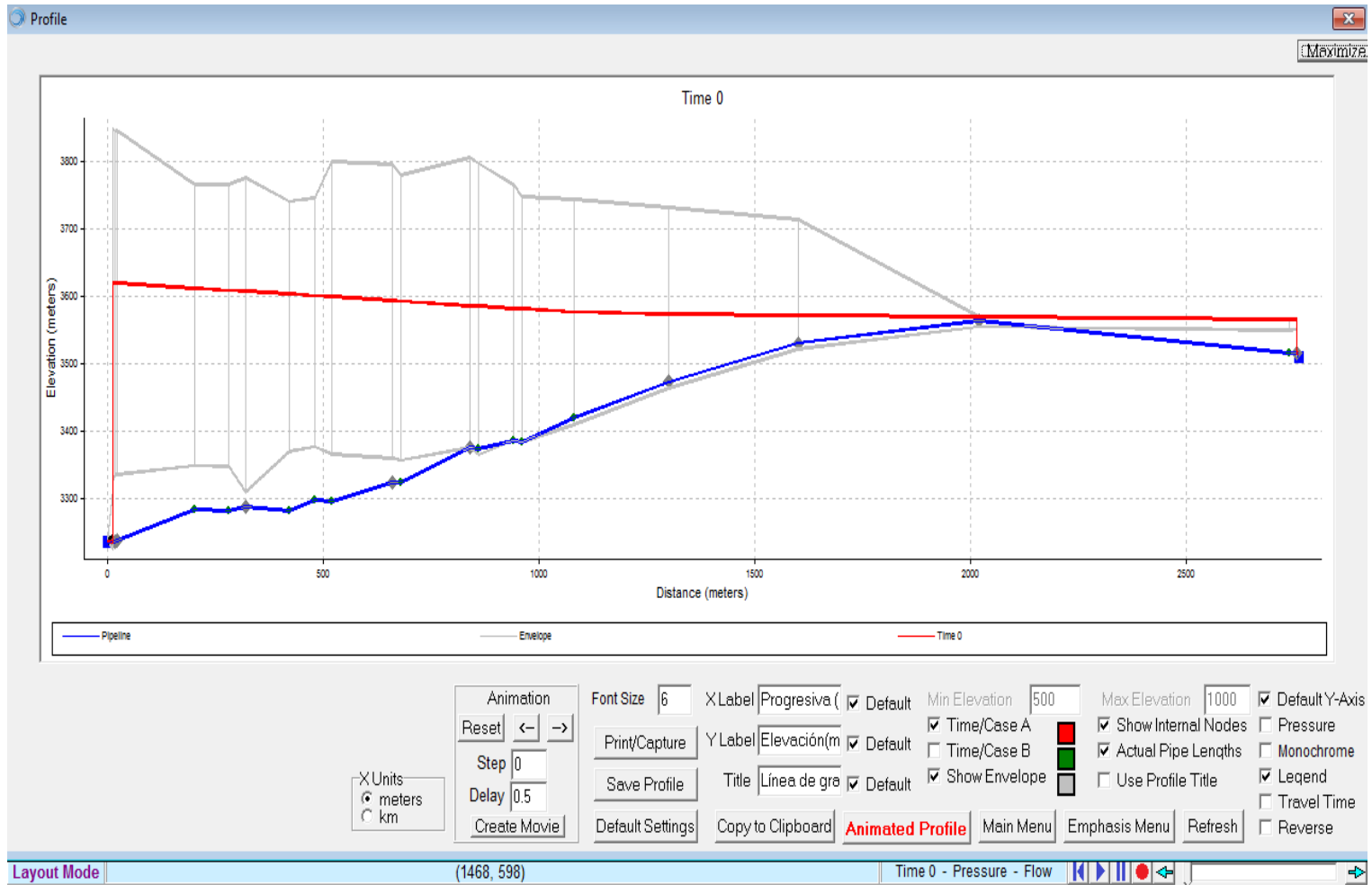
Use Edit/Copy to copy some or all of the report. Edit/Cut and Edit/Paste also function on the report.

Max/Min Line Pressures

SUMMARY OF MAX/MIN LINE PRESSURES:

START NODE	END NODE	MAX PRESS. kpa	MIN PRESS. kpa	
NO	I-N00	764.26	-93.20	Cavitation
O-N00	N000	6025.52	887.98	
N000	N01	5984.47	962.27	
N01	N02	5983.82	645.96	
N02	N03	4751.23	645.96	
N03	N04	4788.54	210.92	
N04	N05	4788.54	210.92	
N05	N06	4508.97	772.20	
N06	N07	4948.76	697.57	
N07	N08	4948.76	343.94	
N08	N09	4629.84	329.33	
N09	N10	4488.83	-1.17	
N10	N11	4226.08	-93.20	Cavitation
N11	N12	4152.64	-93.20	Cavitation
N12	N13	3732.47	3.10	
N13	N14	3571.00	-93.20	Cavitation
N14	N15	3178.88	-93.20	Cavitation
N15	N16	2546.70	-93.20	Cavitation
N16	N17	1796.52	-93.20	Cavitation
N17	N18	490.49	-93.20	Cavitation
N18	I-N19	490.49	342.62	
O-N19	N20	57.88	-19.08	

- Gráfica de resultados



Resultados y gráficas en régimen transitorio con elementos de protección

- Resultados obtenidos del Kypipe, máximas y mínimas presiones.

Max/Min Summary

SUMMARY OF MAXIMUM AND MINIMUM HEADS:

Position no.	MaxHead m	MinHead m	Time Reverse Grad.	MaxPressure kpa	MinPressure kpa	MaxTime (sec)	MinTime (sec)
N0	2.00	2.00	0.000	19.620	19.620	0.01000	0.01000
O-N00	385.28	34.38	74.217	3779.638	337.240	4.92002	7.53008
N000	384.12	33.79	0.000	3768.180	331.449	1.03000	7.52008
N01	382.30	32.55	0.000	3750.335	319.325	0.89000	7.51008
N02	329.34	-6.13	0.710	3230.785	-60.144	5.18002	6.73006
N03	327.68	-1.80	0.030	3214.518	-17.680	5.24003	6.65006
N04	319.29	-0.01	0.580	3132.220	-0.105	5.21002	6.88006
N05	321.91	4.72	0.000	3157.897	46.295	5.10002	6.74006
N06	303.07	-5.58	0.160	2973.141	-54.720	5.04002	6.77006
N07	304.08	2.42	0.000	2983.057	23.778	5.00002	6.81006
N08	278.16	-0.01	0.210	2728.795	-0.102	16.36028	6.97006
N09	281.48	2.93	0.000	2761.326	28.721	16.38028	6.87006
N10	253.50	-0.01	0.730	2486.824	-0.106	16.14027	7.05007
N11	258.75	2.80	0.000	2538.382	27.509	16.16027	7.36007
N12	258.74	2.34	0.000	2538.230	22.963	16.08027	7.28007
N13	263.44	7.29	0.000	2584.384	71.526	16.09027	7.26007
N14	243.33	-8.61	0.350	2387.090	-84.442	15.93027	7.14007
N15	190.24	-0.01	0.670	1866.207	-0.122	15.76027	7.31007
N16	115.59	-0.14	4.190	1133.907	-1.339	15.48026	8.34010
N17	5.67	-0.55	112.946	55.653	-5.370	3.51000	15.07025
N18	50.00	43.93	0.000	490.485	430.995	2.78000	7.80008
O-N19	0.36	-1.69	0.000	3.508	-16.585	9.31012	7.79008

- Resultados obtenidos del modelamiento en Kypipe indicando donde se generan zonas con presiones negativas.

Pipe2012 [revision final 01] 0 secs

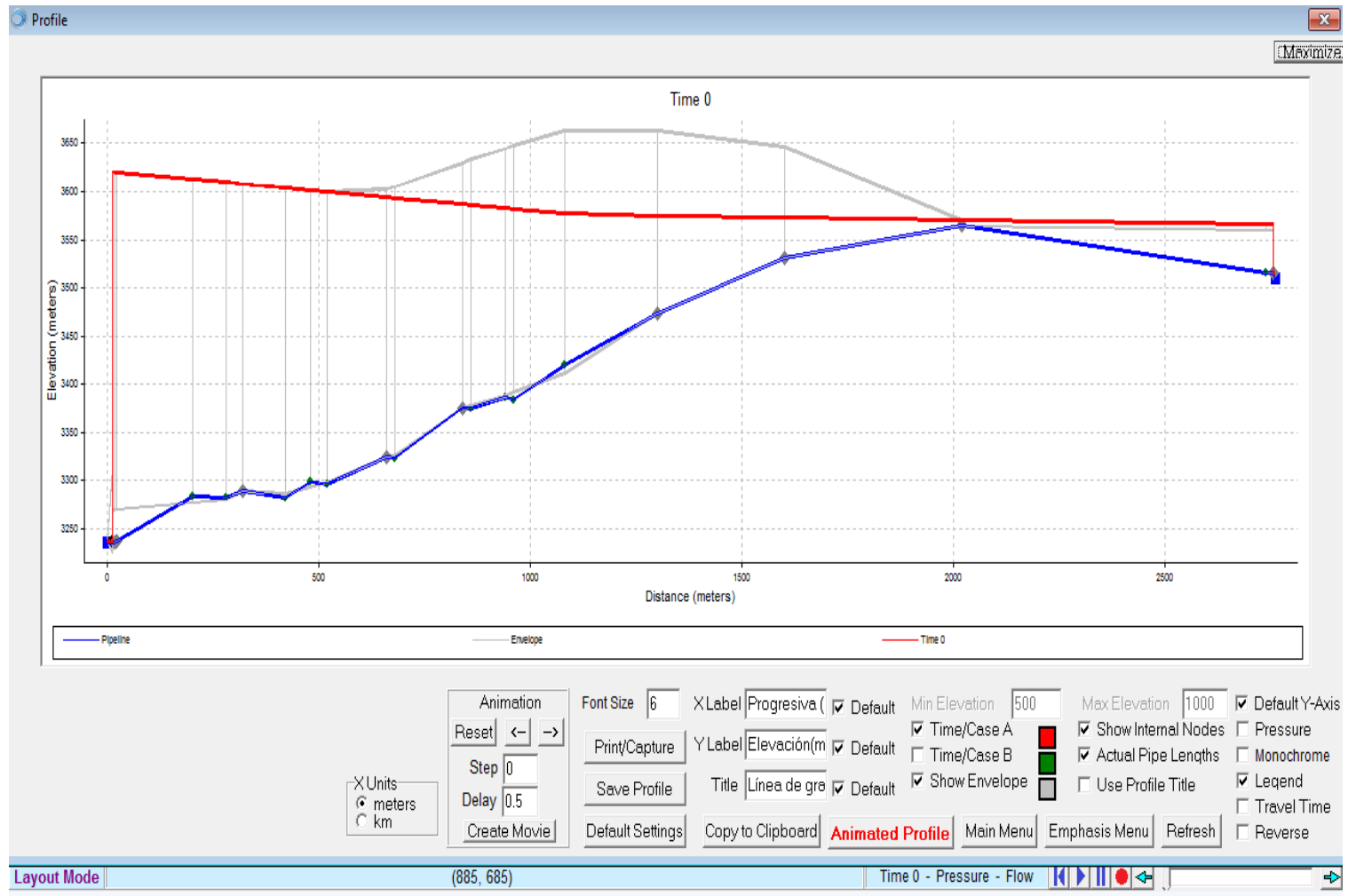
Print Add to Presentation as Text Clear Font Load/Swap Customize Save as DOC file All Find

Use Edit/Copy to copy some or all of the report. Edit/Cut and Edit/Paste also function on the report.

```

*****
START      END      MAX PRESS.  MIN PRESS.
NODE       NODE       kpa         kpa
-----
  N0       I-N00     747.13     -93.20  Cavitation
O-N00     N000     3779.64     331.45
N000_O    N01      3768.18     319.32
N01_O     N02      3750.34     -60.14
N02       N03      3230.79     -60.14
N03       N04      3214.52     -17.68
N04_O     N05      3157.90     -0.10
N05       N06      3157.90     -54.72
N06       N07      2983.06     -54.72
N07       N08      2983.06     -0.10
N08_O     N09      2761.33     -0.10
N09       N10      2761.33     -0.11
N10_O     N11      2538.38     -0.11
N11       N12      2538.38     22.96
N12       N13      2584.38     22.96
N13       N14      2584.38     -84.44
N14       N15      2387.09     -84.44
N15_O     N16      1866.21     -1.34
N16_O     N17      1133.91     -5.37
N17_O     N18      490.49      -5.37
N18       I-N19     490.49     431.00
O-N19     N20      57.88      -16.59
  
```

- Gráficas en régimen transitorio con elementos de protección



ANEXO 5: Especificaciones de la bomba.

Hojas de datos



Nº de posición del cliente:
 Pedido fechado: 02/12/2019
 Doc. no.: Quick quote
 Cantidad: 1

Número: ES 2
 Nº de artículo: 100
 Desde: 02/12/2019
 Página: 1 / 11

Multitec A 65/ 5B-6.1 17.67

Versión rF.: 1

Datos de trabajo

Caudal bombeado requerido	100,00 m ³ /h	Corriente volumétrica	100,00 m ³ /h
Altura de bombeo requerida	383,80 m	Altura de bombeo	395,32 m
Medio bombeado	agua	Eficiencia	76,3 %
	Agua limpia	Absorción de potencia	140,75 kW
	No contiene sustancias químicas o mecánicas que afecten a los materiales	Velocidad de rotación de la bomba	3584 rpm
Contenido sólidos máx. 50 ppm		NPSH requerido	4,40 m
Temperatura ambiente	20,0 °C	Presión permitida de trabajo	63,00 bar.r
Temperatura del medio a bombear	20,0 °C	Pres. descarga	38,69 bar.r
Densidad del fluido	998 kg/m ³	Presión en el punto de caudal cero	46,70 bar.r
Viscosidad del medio a bombear	1,00 mm ² /s	Mín.gasto másico para curva estable	14,02 kg/s
Máx presión de aspiración	0,00 bar.r	Mín.gasto másico permitido para funcionamiento continuo	4,29 kg/s
Presión del vapor	0,02 bar.a	Mín.gasto másico permitido para funcionamiento de corta duración	4,29 kg/s
Rata de caudal de masa	27,72 kg/s	Altura de bombeo en el punto de caudal cero	477,16 m
Potencia máxima de curva	155,53 kW	Caudal máximo admisible	114,79 m ³ /h
Mínimo caudal para curva estable	50,56 m ³ /h	Caudal de masa máximo admisible	31,82 kg/s
Mín.caudal permitido para funcionamiento continuo	15,48 m ³ /h	Diseño	Bomba individual 1 x 100% Ninguno;tolerancias s/ISO 9906 Clase 3B; por debajo de 10 kW de acuerdo con párrafo 4.4.2
Mínimo caudal permitido para funcionamiento de corta duración	15,48 m ³ /h		

Hojas de datos



Nº de posición del cliente :
 Pedido fechado: 02/12/2019
 Doc. no.: Quick quote
 Cantidad: 1

Número: ES 2
 Nº de artículo: 100
 Desede: 02/12/2019
 Página: 2

Multitec A 65/ 5B-6.1 17.67

Versión nº.: 1

Ejecución

Variante	A	Plan de estanqueidad	Mecánico de simple efecto E (circulación externa)
Número de etapas	5	Pumped liquid without abrasive solids	
Tambor de compensación	con pistón	Cámara de montaje de la junta	Cámara estándar de juntas
Diseño	Para montaje sobre la placa de base	Anillo rozante	Anillo partido
Orientación	Horizontal	Diámetro del rodete	214,0 / 196,0 mm
Diam. Nominal de aspiración	DN 125	Diámetro mínimo del impulsor	192,0 mm
Presión nominal de aspiración	PN 25	Diámetro completo del rodete	214,0 mm
Posición de aspiración	axial	Tamaño paso libre	12,5 mm
Brida de aspiración taladrada de acuerdo con norma	EN 1092-1	Dirección de rotación del arrastre	Sentido agujas del reloj
Diám.nominal descarga	DN 65	Construcción de la abrazadera de sujeción	estándar (normal)
Presión nominal de descarga	PN 63	Tamaño del soporte del cojinete	65
Posición de la tubuladura de presión	arriba (0° / 360°)	Junta de cojinete	Lanzador
Brida de descarga taladrada de acuerdo con la norma.	EN 1092-1	Tipo de cojinete	Rodamiento
Cierre del eje	GLRD de efecto sencillo	Tipo de lubricación	Grasa
Fabricante	Burgmann	Tipo de cojinete (orientado hacia adentro)	Cojinete de fricción
Type	H7N	Tipo de lubricación (a bordo)	lubricado con medio
Código de material	Q1BE4GG	Sonda térmica PT100 lado del motor	Sin
Código	67	Color	Azul ultramarino (RAL 5002) Azul KSB

Hojas de datos



Nº de posición del cliente :
Pedido fechado: 02/12/2019
Doc. no.: Quick quote
Cantidad: 1

Número: ES 2
Nº de artículo: 100
Desede: 02/12/2019
Página: 3

Multitec A 65/ 5B-6.1 17.67

Versión nº.: 1

Accionamiento, accesorios

Fabricante	Flender	Frecuencia	60 Hz
Tipo de acoplamiento	Euper N	Voltaje de régimen	460 V
Tamaño nominal	180	Potencia dimensionada P2	180,00 kW
Tipo de protección de acoplamiento	Ligero, no resistente a las pisadas (ZN79)	Reserva disponible	27,89 %
Tamaño de la protección de acoplamiento	B254	Corriente de régimen	259,0 A
Material de la protección de acoplamiento	ST TZN	Relación de la corriente de arranque	7
Tipo de placa de base	Placa base de acero para Multitec	Clase de aislamiento	F según IEC 34-1
Tamaño de la placa base	GP12	Clase de protección del motor	IP 55
Tipo de accionamiento	Motor eléctrico	Coseno phi a plena carga (4/4)	0,92
Accionamiento mecán. estándar	IEC	Rendimiento del motor a plena carga (4/4)	95,4 %
Accionamiento eléct. estándar	IEC	Órgano sensorio de temperatura	3 termistores
Modelo (marca)	Siemens	Posición de la caja de bornes	0° (arriba) visto desde el accionamiento
Accionamiento suministrado por	Motor estándar suministrado por KSB - montado por KSB	Bobinado del motor	460 / 795 V
Formato constructivo del motor	B3	Nº de polos	2
Tamaño del motor	315L	Clase de conexión	triángulo
Clase de rendimiento	IE2 según IEC 60034-30	Método de refrigeración del motor	Enfriamiento de la superficie
Velocidad del motor	3584 rpm	Material del motor	Fundición gris GG/CAST IRON
		Nivel de presión acústica del motor	79 dBa

Materiales 17

Indicaciones		Junta tórica (412)	EPDM 80
Criterios generales para un análisis de agua:pH-valor>=7; contenido cloruro (Cl)<=250 mg/kg. Cloro (Cl2)<=0.6 mg/kg.		Revestimiento cierre del eje (441)	Fundición gris EN-GJL-250
Carcasa de aspiración (106)	Acero GP240GH-N	Anillo partido (502.1)	Fundición gris EN-GJL-250
Carcasa de descarga (107)	Acero GP240GH-N	Casquillo del eje (523)	Acero al cromo 1.4057+QT800
Cuerpo de etapa (108)	Fundición gris EN-GJL-250	Casquillo de cojinete (529)	SSiC cerámico
Eje (210)	Acero bonificado C45+N	Cojinete (540)	Fundición gris EN-GJL-250
Rodete (230)	Fundición gris EN-GJL-250	Disco (550.1)	Acero CrNi 1.4301
Rodete de aspiración (231)	Fundición gris EN-GJL-250	Pistón (59-4)	Acero al cromo 1.4021QT700+SR
Caja del cojinete (350)	Fundición gris EN-GJL-250	Tirante (905)	30NCD16
Alojamiento del cojinete (381)	SSiC cerámico		

Hoja de datos compacta

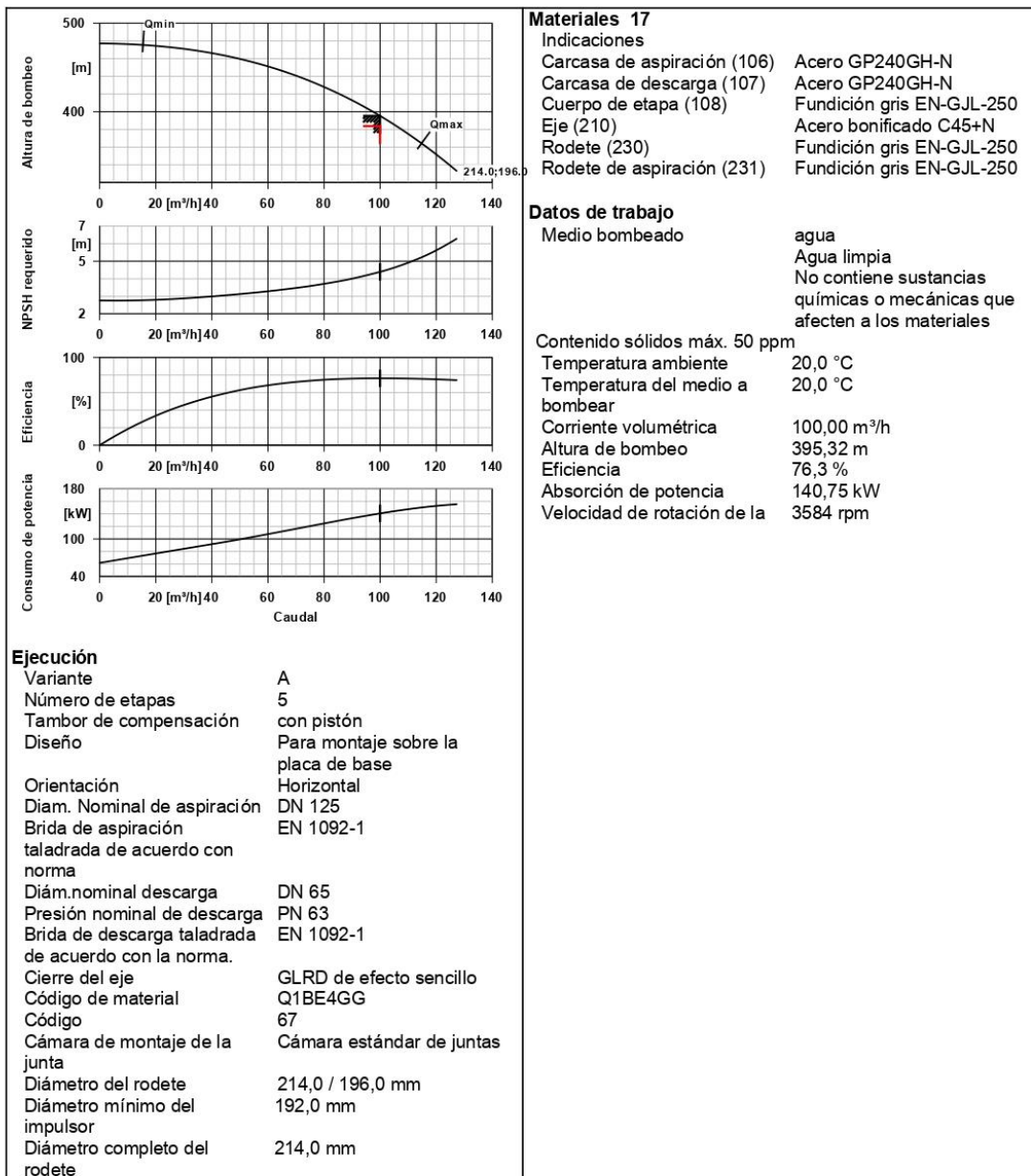


Nº de posición del cliente:
 Pedido fechado: 02/12/2019
 Doc. no.: Quick quote
 Cantidad: 1

Número: ES 2
 Nº de artículo: 100
 Desede: 02/12/2019
 Página: 4

Multitec A 65/ 5B-6.1 17.67

Versión nº.: 1



Materiales 17

Indicaciones

Carcasa de aspiración (106)	Acero GP240GH-N
Carcasa de descarga (107)	Acero GP240GH-N
Cuerpo de etapa (108)	Fundición gris EN-GJL-250
Eje (210)	Acero bonificado C45+N
Rodete (230)	Fundición gris EN-GJL-250
Rodete de aspiración (231)	Fundición gris EN-GJL-250

Datos de trabajo

Medio bombeado: agua
 Agua limpia
 No contiene sustancias químicas o mecánicas que afecten a los materiales

Contenido sólidos máx. 50 ppm

Temperatura ambiente: 20,0 °C
 Temperatura del medio a bombear: 20,0 °C

Corriente volumétrica: 100,00 m³/h
 Altura de bombeo: 395,32 m
 Eficiencia: 76,3 %
 Absorción de potencia: 140,75 kW
 Velocidad de rotación de la:

Ejecución

Variante	A
Número de etapas	5
Tambor de compensación	con pistón
Diseño	Para montaje sobre la placa de base
Orientación	Horizontal
Diam. Nominal de aspiración	DN 125
Brida de aspiración taladrada de acuerdo con norma	EN 1092-1
Diám.nominal descarga	DN 65
Presión nominal de descarga	PN 63
Brida de descarga taladrada de acuerdo con la norma.	EN 1092-1
Cierre del eje	GLRD de efecto sencillo
Código de material	Q1BE4GG
Código	67
Cámara de montaje de la junta	Cámara estándar de juntas
Diámetro del rodete	214,0 / 196,0 mm
Diámetro mínimo del impulsor	192,0 mm
Diámetro completo del rodete	214,0 mm

Hoja de datos compacta



Nº de posición del cliente:
 Pedido fechado: 02/12/2019
 Doc. no.: Quick quote
 Cantidad: 1

Número: ES 2
 Nº de artículo:100
 Desede: 02/12/2019
 Página: 5

Multitec A 65/ 5B-6.1 17.67

Versión nº.: 1

Tamaño paso libre	12,5 mm	bomba	
Dirección de rotación del arrastre	Sentido agujas del reloj	Diseño	Bomba individual 1 x 100%
Tipo de lubricación (a bordo)	lubricado con medio	Accionamiento, accesorios	
Sonda térmica PT100 lado del motor	Sin	Fabricante	Flender
		Tipo de acoplamiento	Euper N
		Tamaño nominal	180
		Tipo de protección de acoplamiento	Ligero, no resistente a las pisadas (ZN79)
		Tamaño de la protección de acoplamiento	B254
		Material de la protección de acoplamiento	ST TZN
		Tipo de placa de base	Placa base de acero para Multitec
		Tamaño de la placa base	GP12
		Tipo de accionamiento	Motor eléctrico
		Accionamiento mecán. estándar	IEC
		Accionamiento eléct. estándar	IEC
		Clase de rendimiento	IE2 según IEC 60034-30
		Velocidad del motor	3584 rpm
		Frecuencia	60 Hz
		Voltaje de régimen	460 V
		Potencia dimensionada P2	180,00 kW
		Reserva disponible	27,89 %
		Corriente de régimen	259,0 A
		Relación de la corriente de arranque	7
		Clase de aislamiento	F según IEC 34-1
		Clase de protección del motor	IP 55
		Órgano sensorio de temperatura	3 termistores
		Posición de la caja de bornes	0° (arriba)
		Bobinado del motor	460 / 795 V
		Nivel de presión acústica del motor	79 dBa

Hoja de curvas

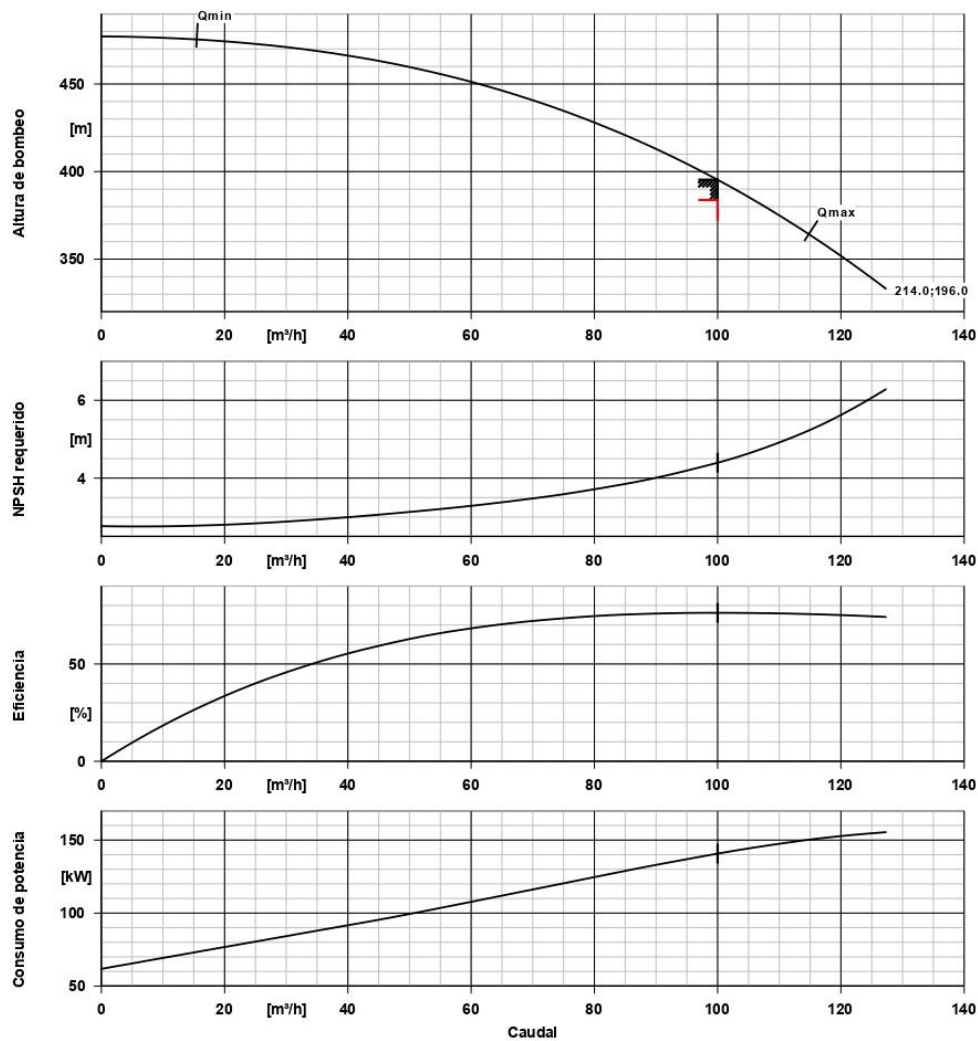


Nº de posición del cliente:
 Pedido fechado: 02/12/2019
 Doc. no.: Quick quote
 Cantidad: 1

Número: ES 2
 Nº de artículo: 100
 Desede: 02/12/2019
 Página: 6

Multitec A 65/ 5B-6.1 17.67

Versión nº.: 1



Datos de curvas

Velocidad de giro	3584 rpm	Eficiencia	76,3 %
Densidad del fluido	998 kg/m ³	Absorción de potencia	140,75 kW
Viscosidad	1,00 mm ² /s	NPSH requerido	4,40 m
Corriente volumétrica	100,00 m ³ /h	Número de curva	1777.407521/05 GG
Caudal bombeado requerido	100,00 m ³ /h	Diámetro del rodete	214,0 / 196,0 mm
Altura de bombeo	395,32 m	Estándar de aceptación	Ninguno; tolerancias s/ISO 9906 Clase 3B; por debajo de 10 kW de acuerdo con párrafo 4.4.2
Altura de bombeo requerida	383,80 m		

Curva de velocidad

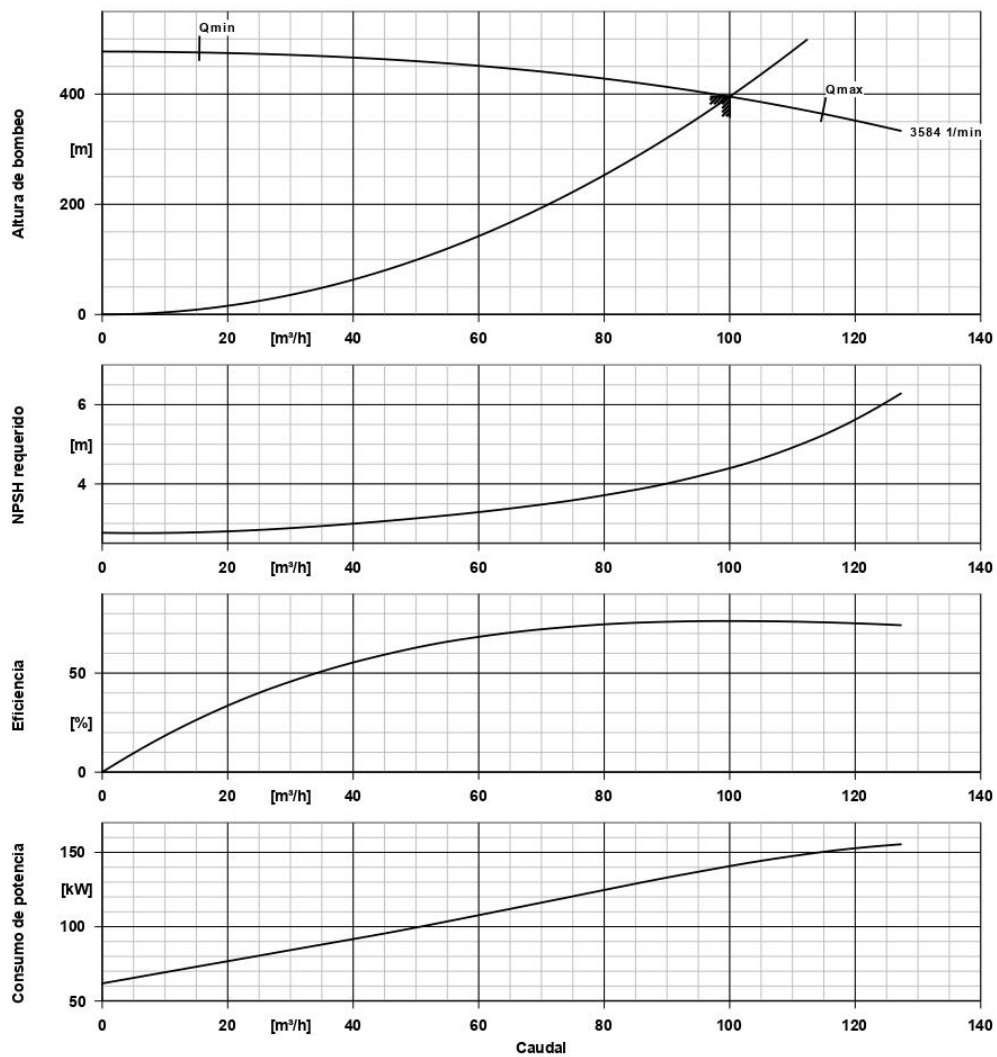


Nº de posición del cliente:
 Pedido fechado: 02/12/2019
 Doc. no.: Quick quote
 Cantidad: 1

Número: ES 2
 Nº de artículo: 100
 Desede: 02/12/2019
 Página: 7

Multitec A 65/ 5B-6.1 17.67

Versión nº.: 1



Datos de curvas

Densidad del fluido	998 kg/m ³	Altura de bombeo	395,32 m
Viscosidad	1,00 mm ² /s	Altura de bombeo requerida	383,80 m
Caudal bombeado requerido	100,00 m ³ /h	Diámetro efectivo del rodete	214,0 mm

Plano de instalación

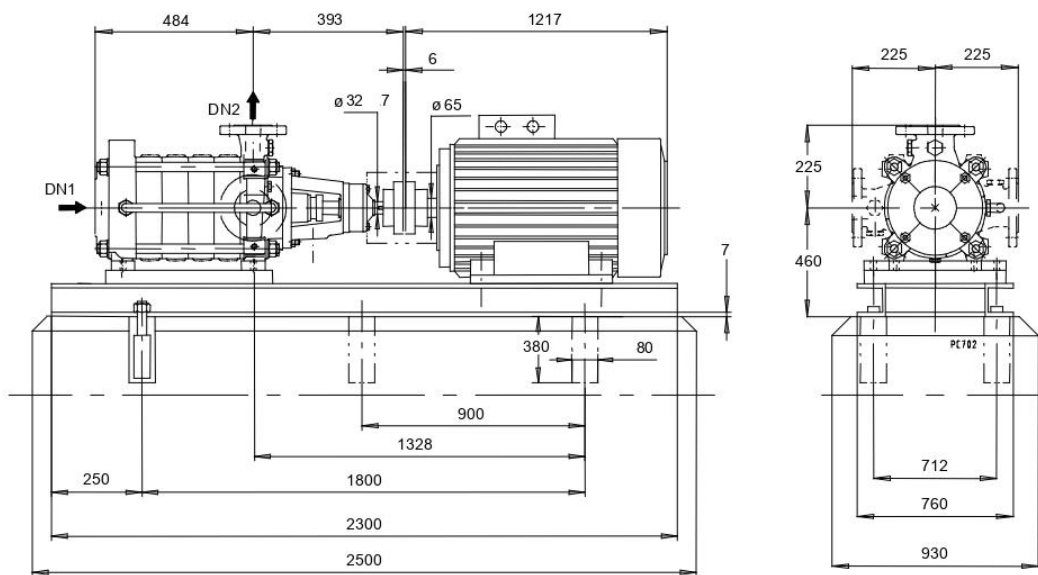


Nº de posición del cliente:
 Pedido fechado: 02/12/2019
 Doc. no.: Quick quote
 Cantidad: 1

Número: ES 2
 Nº de artículo: 100
 Desede: 02/12/2019
 Página: 8

Multitec A 65/ 5B-6.1 17.67

Versión nº.: 1



El plano no es para medir

Dimensiones en mm

Motor

Fabricante del motor	Siemens
Tamaño del motor	315L
Potencia del motor	180,00 kW
Nº de polos	2
Velocidad de giro	3584 rpm
Posición de la caja de bornes	0° (arriba)
	visto desde el accionamiento

Conexiones

Diámetro nominal aspiración	DN 125 / EN 1092-1
DN1	
Tamaño descarga nominal	DN 65 / EN 1092-1
DN2	
Presión nominal de aspiración	PN 25
Régimen presión de descarga	PN 63

Placa de base

Ejecución	Placa base de acero para Multitec
Tamaño	GP12
Material	
Placa base drenaje fugas (8B)	Rp1, Sin
Pernos de anclaje	M20x320 (No en ámbito de suministro)

Acoplamiento

Fabricante de acoplamiento	Flender
Tipo de acoplamiento	Euper N
Tamaño de acoplamiento	180
Pieza de separación	0,0 mm

Peso neto

Bomba	187 kg
Placa de base	251 kg
Acoplamiento	14 kg
Proteccion del acoplamiento	3 kg
Motor	930 kg
Total	1385 kg

Plano de instalación



Nº de posición del cliente :
Pedido fechado: 02/12/2019
Doc. no.: Quick quote
Cantidad: 1

Número: ES 2
Nº de artículo:100
Desede: 02/12/2019
Página: 9

Multitec A 65/ 5B-6.1 17.67

Versión nº.: 1

Conectar tuberías sin tensión o resistencia

Tolerancias dimensionales para altura de eje : DIN 747

Dimensiones sin tolerancias, tolerancias medias seg ún :

Dimensiones de conexión para bombas :

Dimensiones sin tolerancias - partes soldadas:

Dimensiones sin tolerancias - partes de hierro fundido gris:

ISO 2768-m

EN735

ISO 13920-B

ISO 8062-CT9

**Ver plano extra para las conexiones
auxiliares**

Esquema de conexiones

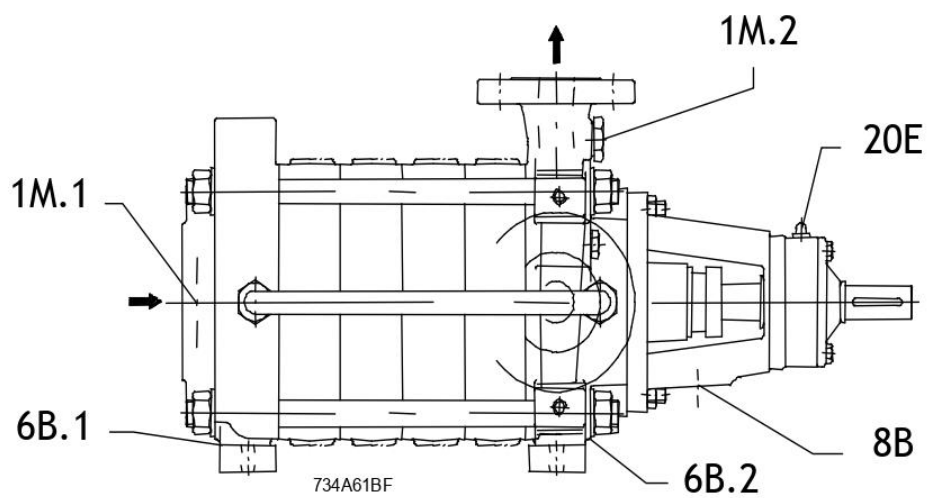


Nº de posición del cliente:
 Pedido fechado: 02/12/2019
 Doc. no.: Quick quote
 Cantidad: 1

Número: ES 2
 Nº de artículo: 100
 Desede: 02/12/2019
 Página: 10

Multitec A 65/ 5B-6.1 17.67

Versión nº.: 1



Conexiones

1M.1 Conexión de aparato medidor de la presión	G 1/2	Taladrado y cerrado
1M.2 Conexión de aparato medidor de la presión	G 1/2	Taladrado y cerrado
6B.1 Drenaje de líquido bombeado	G 1/4	Taladrado y cerrado
6B.2 Drenaje líquido bombeado	G 1/2	Taladrado y cerrado
8B Vaciado de líquido de fugas	Rp 3/8	Taladrado
20E Conector para engrasar a presión		montado en fábrica

Fuerza y límites de par

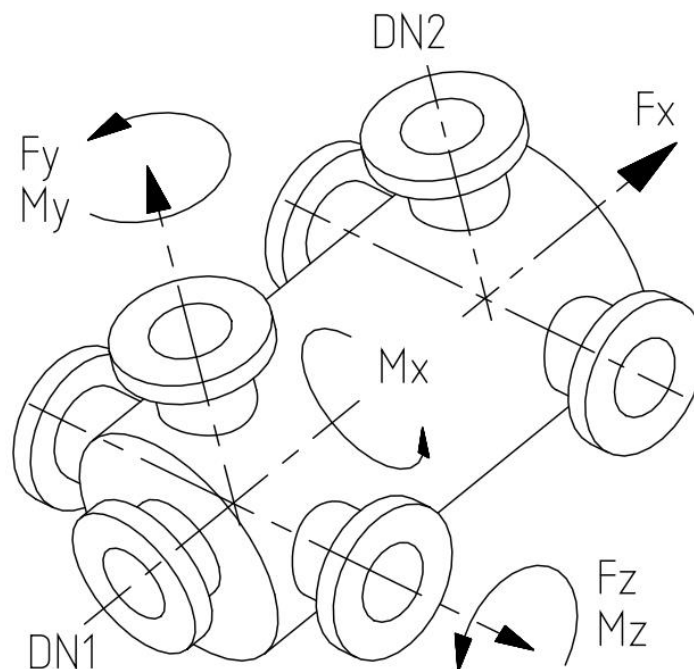


Nº de posición del cliente:
 Pedido fechado: 02/12/2019
 Doc. no.: Quick quote
 Cantidad: 1

Número: ES 2
 Nº de artículo: 100
 Desede: 02/12/2019
 Página: 11

Multitec A 65/ 5B-6.1 17.67

Versión nº.: 1



El plano no es para medir

Fuerza y límites de par

Brida de aspiración		Brida de descarga	
Posición de aspiración	axial	Posición de la tubuladura de presión	arriba (0° / 360°)
Fx s	2590 N	Fx d	895 N
Fy s	1710 N	Fy d	1120 N
Fz s	2060 N	Fz d	730 N
Mx s	1730 Nm	Mx d	645 Nm
My s	1300 Nm	My d	490 Nm
Mz s	925 Nm	Mz d	335 Nm
Válido para temperatura	20,0 °C		

Las toberas de descarga y aspiración tienen que ser contempladas por separado