

Análisis del Fenómeno Golpe de Ariete en la Tubería de Aducción entre el Embalse de
Bucaramanga y la PTAP los Angelinos

Nicolás Meneses Parra y Jefe Daniel Patiño Pedraza

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniero Civil

Director

Andrés Almeyda Ortiz

Maestría en Recursos Hídricos y Saneamiento Ambiental

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas
Escuela de Ingeniería Civil
Bucaramanga

2021

Tabla de Contenido

	Pág.
1 Objetivos	14
1.1 Objetivo General.....	14
1.2 Objetivos Específicos.....	14
2. Antecedentes Tubería De Aducción Entre El Embalse De Bucaramanga Y La Ptap Los Angelinos	14
3. Transitorios Hidráulicos.....	16
3.1 Modelización De Transitorios Hidráulicos	18
3.2 Sistemas De Protección Ante Transitorios Hidráulicos.....	22
4 Allievi	25
5 Método	26
5.1 Revisión Documentación Existente	27
5.2 Revisión Bibliográfica	31
5.3 Revisión De Sistema Existente	33
5.4 Definición De Características Y Variables	34
5.5 Investigación De Alternativas.....	36
6. Modelamiento En Allievi.....	40
6.1 Importación Del Modelo.....	40
6.2 Datos En El Modelo.....	41
6.3 Condiciones De Frontera Del Sistema.....	41
6.4 Coeficiente De Perdidas Menores.....	41
6.5 Ventosas	42

6.6 Válvulas De Regulación	43
6.7 Definición De Configuración De Calculo.....	45
6.8 Modelamiento De Escenarios De Maniobra De Válvulas	46
6.9 Modelamiento De Alternativas De Sistemas De Protección	55
7. Alternativa 1.....	56
8. Alternativa 2.....	63
9. Alternativa 3.....	69
10. Estudio De Costos Y Eficiencia.....	73
11. Resultados	75
11.1 Selección De Alternativa	75
12. Análisis De Resultados	75
12.1 Escenario De Maniobra Critico	75
12.2 Compatibilidad Del Modelo	76
12.3 Comparación De Resultados.....	78
13. Conclusiones	79
Referencias Bibliográficas	80

Lista de Tablas

Tabla 1. Memorando Técnico Estudios Hidráulicos C331-Mt-01.....	29
Tabla 2. Resumen de dispositivos de protección ante golpe de ariete usados comúnmente.....	37
Tabla 3 Manual técnico de GRP-Pavco.....	44
Tabla 4 Coeficientes de pérdida de carga con válvula de mariposa totalmente abierta.....	46
Tabla 5 Coeficientes típicos de rugosidad absoluta para diferentes materiales.....	49
Tabla 6. Cálculo de altura de chimenea en régimen permanente.	70
Tabla 7. Comparación de eficiencia para cada alternativa planteada.	74
Tabla 8. Datos presiones sobre la Aducción en régimen permanente obtenidos del modelo en ALLIEVI.....	77

Lista de Figuras

Figura 1. Geolocalización de la aducción entre el embalse de Bucaramanga y la PTAP Angelinos	15
Figura 2. Cavitación en tuberías. Fuente: Saldarriaga, Juan, 2007, Hidráulica de Tuberías Abastecimiento de Agua, Redes, Riegos, Editorial, Alfaomega, Bogotá, Colombia.	18
Figura 3. Malla temporal con líneas características C+ y C-.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 4. Funcionamiento de un tanque hidroneumático. Gustavo Adolfo Ortiz Masek (2006).	23
Figura 5. Funcionamiento de una válvula de alivio. Fuente: Sánchez, Martínez (2014).	23
Figura 6. Funcionamiento de una válvula de retención. Fuente: Sánchez, Martínez (2014).....	24
Figura 7. Funcionamiento de una chimenea de equilibrio. Fuente: Gustavo Adolfo Ortiz Masek (2006).....	25
Figura 8. Estrategia usada para el desarrollo del proyecto de investigación. Fuente: Autor.	27
Figura 9. Plano de localización planta. Fuente: Autor.	30
Figura 10. Perfil de presiones sobre la aducción. Fuente: Autor.	33
Figura 11. Presiones sobre la aducción en el régimen permanente. Fuente: Autor.	36
Figura 12. Modelo completo de la aducción en ALLIEVI. Fuente: Autor.....	40
Figura 13. Procedimiento de importación de red. Fuente: Autor.	41
Figura 14. Datos de la ventosa en admisión. Fuente: Memorando Técnico Estudios Hidráulicos C331-Mt-01.....	43
Figura 15. Datos de la ventosa en expulsión. Fuente: MEMORANDO TÉCNICO ESTUDIOS HIDRÁULICOS C331-MT-01	43

Figura 16. Diagrama de coeficiente de pérdidas de carga para válvula multichorro VH4 DINICOLA.	44
Figura 17. Configuración de la válvula multichorro en ALLIEVI.....	45
Figura 18. Configuración de parámetros de cálculo en ALLIEVI.....	45
Figura 19. Líneas de sobrepresión (roja), permanente (azul) y subpresión (verde) en la aducción escenario de operación con 3200 l/s-Cierre simultaneo de válvulas Angelinos y Bosconia en t=5s.	47
Figura 20. Diagrama de presión punto más crítico de sobrepresiones, válvula de regulación Bosconia escenario de operación con 3200 l/s-Cierre simultaneo de válvulas Angelinos y Bosconia en t=5s.....	48
Figura 21. Diagrama de presión punto más crítico de subpresiones, válvula de regulación Angelinos escenario de operación con 3200 l/s-Cierre simultaneo de válvulas Angelinos y Bosconia en t=5s.....	49
Figura 22. Líneas de sobrepresión (roja) , permanente (azul) y subpresión (verde) en la aducción Escenario de operación con 1200 l/s- cierre de válvula Bosconia en t=5s.....	49
Figura 23. Diagrama de presión punto más crítico de sobrepresiones, válvula de regulación Bosconia -escenario de operación con 1200 l/s- cierre de válvula Bosconia en t=5s.....	50
Figura 24. Diagrama de presión punto más crítico de subpresiones, válvula de regulación Angelinos escenario de operación con 1200 l/s- cierre de válvula Bosconia en t=5s	51
Figura 25. Líneas de sobrepresión (roja) , permanente (azul) y subpresión (verde) en la aducción-escenario de operación con 2000 l/s- Cierre de válvulas Angelinos en t=5s.....	51
Figura 26. Diagrama de presión punto más crítico de sobrepresiones, válvula de regulación Bosconia- escenario de operación con 2000 l/s- Cierre de válvulas Angelinos en t=5s.....	52

Figura 27. Diagrama de presión punto más crítico de subpresiones, válvula de regulación Angelinos escenario de operación con 2000 l/s- Cierre de válvulas Angelinos en t=5s.**¡Error!**

Marcador no definido.

Figura 28. Líneas de sobrepresión (roja) , permanente (azul) y subpresión (verde) en la aducción-escenario de operación con 3200 l/s- Cierre simultaneo de todas las válvulas (Angelinos, Bosconia, Embalse) en t=5s..... 54

Figura 29. Diagrama de presión punto más crítico de sobrepresiones, válvula de regulación Bosconia Escenario de operación con 3200 l/s- Cierre simultaneo de todas las válvulas (Angelinos, Bosconia, Embalse) en t=5s..... 54

Figura 30. Diagrama de presión punto más crítico de subpresiones, válvula de regulación Angelinos Escenario de operación con 3200 l/s- Cierre simultaneo de todas las válvulas (Angelinos, Bosconia, Embalse) en t=5s 55

Figura 31. Modelo de tanque hidroneumático tipo..... 56

Figura 32. Ubicación de sistemas de protección válvulas de regulación Angelinos y Bosconia. 57

Figura 33. Ubicación de sistema de protección válvula de regulación Embalse**¡Error!**

Marcador no definido.

Figura 34. Modelo de conexión de tanque hidroneumático a la línea de conducción..... 58

Ilustración 35. Asistente de ALLIEVI para cálculo de coeficientes de pérdidas de tanque hidroneumático. 59

Figura 36. Asistente para cálculo de presión de hinchado dentro del tanque hidroneumático.... 59

Figura 37. Líneas de sobrepresión (rojo) , permanente (azul) y subpresión (verde) en la aducción implementando alternativa 1 60

Figura 38. Diagrama de presión punto más crítico de sobrepresiones, válvula de regulación Bosconia implementando alternativa 1.....	61
Figura 39. Diagrama de presión punto más crítico de subpresiones, válvula de regulación Angelinos implementando alternativa 1.	61
Figura 40. Presión interior dentro de los sistemas de tanques hidroneumáticos durante el transitorio.....	62
Figura 41. Válvulas de alivio ubicadas a inicio (A12) y final (A11) de zona de altas sobrepresiones (zona baja y cercana a estructura de regulación Bosconia demarcada en una elipse roja) en la línea de aducción.	63
Figura 42. Válvula de retención ubicada a inicio de zona de altas subpresiones (zona elevada y cercana a estructura de regulación Angelinos) en la línea de aducción.....	64
Figura 43. Válvula de alivio tipo 52-01. Fuente: CLA-VAL.	64
Figura 44. Válvula de retención DINICOLA tipo 558-1 serie 48. Fuente: Manual válvulas de retención DINICOLA.	65
Figura 45. Diagrama de pérdida de carga válvula de retención tipo 558-1 serie 48. Fuente: Manual válvulas de retención DINICOLA.	66
Figura 46. Líneas de sobrepresión (rojo) , permanente (azul) y subpresión (verde) en la aducción implementando alternativa 2.....	67
Figura 47. Diagrama de presión punto más crítico de sobrepresiones, válvula de regulación Bosconia implementando alternativa 2.....	68
Figura 48. Diagrama de presión punto más crítico de subpresiones, válvula de regulación Embalse (efecto provocado por ventosa) implementando alternativa 2.....	68
Figura 49. Ubicación chimenea de equilibrio en la aducción.....	69

Figura 50. Asistente de cálculo de coeficientes de entrada y salida de chimenea.	70
Figura 51. Válvulas de alivio implementadas en la alternativa 3.	71
Figura 52. Líneas de sobrepresión (rojo), permanente (azul) y subpresión (verde) en la aducción implementando alternativa 3.....	72
Figura 53. Diagrama de presión punto más crítico de sobrepresiones, inicio de zona de incremento de presión implementando alternativa 3.	72
Figura 54. Diagrama de presión punto más crítico de subpresiones, válvula de regulación Embalse implementando alternativa 3.....	73
Figura 55. Estimación de costo directo para cada alternativa.....	74
Figura 56. Perfil de presiones sobre la Aducción en régimen permanente.....	76

Resumen

Título: Análisis del fenómeno golpe de ariete en la tubería de aducción entre el embalse de Bucaramanga y la PTAP Los Angelinos

Autor: Nicolás Meneses Parra, Jefte Daniel Patiño Pedraza

Palabras Clave: Golpe de ariete, Variación de presiones, Conservación de masa, Régimen permanente, Tanque hidroneumático, Válvulas, Calderín, Allievi

Descripción

El golpe de ariete es un fenómeno hidráulico el cual se manifiesta mediante las variaciones de presión debido a fluctuación de las velocidades del flujo debido a la manipulación o falla de instrumentos hidráulicos. El presente proyecto de investigación tuvo como finalidad obtener una solución para el control del golpe de ariete generado en la tubería de aducción entre el embalse de tona y la PTAP los Angelinos lo cual beneficiara a las entidades involucradas (Universidad Industrial de Santander y Acueducto metropolitano de Bucaramanga) mediante la formulación de diferentes alternativas. Se realizo el debido análisis enfocado al montaje del modelo y se estimaron los factores que alteraron el proceso del estudio en cuestión. Se tuvieron en cuenta las principales características del sistema y con ello se plantearon los escenarios para estudiar el mismo, fueron estipulados 3 casos en los cuales se realizaron simulaciones en el sistema existente con el objetivo de implementar tanques hidroneumáticos, una chimenea de equilibrio (calderines) o unas válvulas de alivio, y así regula la sobrepresión y depresión producidas en la tubería. Las alternativas fueron evaluadas mediante la modelación en el software Allievi el cual permitió implementar los controles a lo largo de la tubería, esto permitió simular el transitorio hidráulico mientras se tenían en cuenta las variables y se protegían las instalaciones mediante la disminución de la amplitud de onda generada por las oscilaciones de flujo, esto con el propósito de mantenerlas dentro de rangos aceptables y así proteger el sistema.

Abstract

Title: Analysis of the water hammer phenomenon in the adduction pipe between Bucaramanga reservoir and the PTAP Los Angelinos

Author: Nicolás Meneses Parra, Jefte Daniel Patiño Pedraza

Key Words: Water hammer, Pressure variation, Mass conservation, Permanent regime, Hydropneumatic tank, Valves, Boiler, Allievi

Description

Water hammer is a hydraulic phenomenon which is manifested by pressure variations due to fluctuating flow speeds due to manipulation or failure of hydraulic instruments. The purpose of this research project was to obtain a solution to control the water hammer generated in the adduction pipeline between the tona reservoir and the Los Angelinos PTAP, which would benefit the entities involved (Universidad Industrial de Santander and Aqueducto metropolitano de Bucaramanga) by formulating different alternatives. The due analysis focused on the assembly of the model was carried out and the factors that altered the process of the study in question were estimated. The main characteristics of the system were taken into account and with this the scenarios were proposed to study it, 3 cases were stipulated in which simulations were carried out in the existing system with the aim of implementing hydropneumatic tanks, a balance chimney (boilers) or some relief valves, and thus regulates the overpressure and depression produced in the pipeline. The alternatives were evaluated through modeling in the Allievi software which allowed to implement the controls along the pipeline, this allowed to simulate the hydraulic transient while taking into account the variables and protecting the facilities by reducing the wave amplitude. generated by flow oscillations, this in order to keep them within acceptable ranges and thus protect the system.

Degree work

Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Andrés Almeyda Ortiz
Maestría en Recursos Hídricos y Saneamiento Ambiental

Introducción

El golpe de ariete es un fenómeno hidráulico el cual se manifiesta mediante las variaciones de presión debido a fluctuación de las velocidades del flujo debido a la manipulación o falla de instrumentos hidráulicos. Este fenómeno es el resultado de una transformación repentina de energía cinética a energía de presión dentro de una tubería.

En el departamento de Santander se está realizando la construcción de la planta de tratamiento de agua potable (PTAP) Los Angelinos la cual se abastecerá gracias al embalse de Tona; para esto actualmente se está llevando a cabo la construcción de la tubería de aducción del sistema y esta no es ajena al golpe de ariete debido a sus altos caudales y sus variaciones de presiones.

La aducción tiene como objetivo el transporte de distintos caudales suministrados por el embalse con diferentes alternativas de operación, lo que puede llevar a producir variaciones en los flujos a través de la operación de válvulas, por este motivo se decidió estudiar, analizar y controlar el golpe de ariete.

La tubería de aducción se está construyendo en materiales combinados; una parte de ella será construida en fibra de vidrio GRP y la otra será de acero.

Se obtuvieron todos los datos respecto al sistema gracias a la documentación suministrada por parte del Acueducto Metropolitano De Bucaramanga, en el cual se evidenciaron la memorias técnicas y planos de cada tramo con las especificaciones de materiales, dimensiones, coeficientes y demás factores que pudieran alterar el sistema, con esto se llevó a cabo el montaje del sistema para así mismo poder analizarlo.

Se realizó la modelación del sistema mediante el software Allievi el cual permitió simular escenarios en los cuales mediante controles ubicados a lo largo de la tubería como lo fueron

tanques hidroneumáticos, calderines y válvulas de alivio se logró satisfactoriamente controlar el problema anteriormente mencionado.

Se logró disminuir la onda producida por los cambios de presión en la tubería gracias a los cambios abruptos de caudales, esto con el fin de la protección del sistema de aducción y así garantizar su correcto funcionamiento al momento de iniciar con el funcionamiento de la PTAP y con ella de la tubería de aducción.

La tubería de aducción es un sistema el cual ya se encuentra diseñado y contiene controles para el golpe de ariete los cuales planean ser ejecutados de forma manual por un operario. Cabe aclarar que las soluciones anteriormente mencionadas fueron pensadas con el fin de ser autosuficientes.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Definir el sistema de protección a emplear en la tubería de aducción entre el embalse de Bucaramanga y la PTAP Angelinos para contrarrestar el fenómeno de golpe de ariete.

1.2 Objetivos Específicos

Conocer y revisar la situación actual de la tubería de aducción entre el embalse de Bucaramanga y la PTAP Angelinos.

Investigar y estudiar alternativas para la solución del golpe de ariete en la aducción entre el embalse de Bucaramanga y la PTAP Angelinos mediante la utilización del software Allievi.

Seleccionar una de las alternativas para la solución del golpe de ariete estudiadas basándose en costos y eficiencia.

2. Antecedentes tubería de aducción entre el embalse de Bucaramanga y la PTAP los Angelinos

El embalse de Bucaramanga está situado en el curso del río Tona, a sólo 12 kilómetros del casco urbano, 600 metros aguas arriba del cruce de los ríos Tona y Suratá, en el sitio conocido como Puente Tona, en la vía Bucaramanga – Matanza, en el departamento de Santander, Colombia, tal como lo muestra la figura 1. Es un embalse de gravedad que ocupa 54 hectáreas, comprende una represa de 103 metros de altura que almacena un volumen de 17.6 millones de metros cúbicos de agua regulando un caudal de 1000 litros de agua por segundo, adicionales al sistema del Acueducto de Bucaramanga y equivalente a una reserva de agua para tres meses de consumo. Así

mismo la obra está conformada por una Planta de Tratamiento de 1.200 litros por segundo de capacidad, una Línea de Aducción de 3.8 kilómetros y una Línea de Conducción en tubería de 1.2 metros de diámetro y de 15 kilómetros de longitud hasta el Municipio de Girón. Este embalse está planeado como reserva de agua potable para el consumo en el área de influencia del Acueducto de Bucaramanga hasta el año 2050 (Bucaramanga, Floridablanca y Girón). (Conalvias construcciones; IEH GRUCON S.A. “Diseño para construcción variante de la tubería de aducción sistema de acueducto de Bucaramanga”)

Figura 1.

Geolocalización de la aducción entre el embalse de Bucaramanga y la PTAP Angelinos



El proyecto de construcción del Embalse de Bucaramanga parte de la concepción de represar el Río Tona. Iniciando desde el año 2001, cuando el Banco Interamericano de Desarrollo suscribió el Convenio de Cooperación Técnica no Reembolsable y de Recuperación Técnica Contingente “Agua Potable para Bucaramanga”, con el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial y la empresa de Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A. (amb) prestadora del servicio de acueducto en la región, con lo cual se inicia el proyecto para estructurar el esquema más apropiado bajo un marco técnico, financiero, institucional y legal, dirigido a lograr

la sostenibilidad del servicio de acueducto en el largo plazo para los municipios de Bucaramanga, Floridablanca y Girón. (Conalvias construcciones; IEH GRUCON S.A. “Diseño para construcción variante de la tubería de aducción sistema de acueducto de Bucaramanga).

La Empresa CONALVIAS, en enero del año 2011, es seleccionada por amb para la realización de los estudios, diseños, construcción, suministro e instalación de equipos, operación y mantenimiento temporal de la presa, obras complementarias, aducción y bypass de la planta de tratamiento Bosconia para el Proyecto de Regulación del río Tona - Embalse de Bucaramanga, en el departamento de Santander. (Conalvias construcciones; IEH GRUCON S.A. “Diseño para construcción variante de la tubería de aducción sistema de acueducto de Bucaramanga).

3. Transitorios hidráulicos

Los transitorios hidráulicos generan sobrepresiones y/o depresiones, que son parámetros importantes en el diseño de sistemas de bombeo de fluidos. (Yalán Cano, C. H. (2014). Análisis de transitorios hidráulicos en sistemas de bombeo de agua para el sector minero.).

El golpe de ariete es un transitorio que se refleja mediante las variaciones excesivas de presión en el momento en que la velocidad del flujo se ve afectada mediante manipulación o falla de instrumentos hidráulicos. (https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/sistema-espaniol-gestion-agua/34transporteaguacanalesconduccionesytrasvasesdisenoconstruccionyexplotacion_tcm30-215757.pdf). Este fenómeno se caracteriza por la transformación instantánea de energía cinética a energía de empuje, dado por ondas de presión con gran magnitud al momento de interceptar o iniciar el recorrido de un sistema, estas disminuyen a lo largo del tiempo hasta que la tubería tiene

la capacidad de absorber la energía del impacto y se regula el sistema (Twyman, J. (2018). Golpe de ariete en una red de tuberías debido al cierre rápido de una válvula. Revista ingeniería de construcción, 33(2), 193-200.). El golpe de ariete se origina debido a que el fluido es ligeramente elástico, por lo tanto, al interrumpir el flujo repentinamente las partículas que se han detenido son empujadas por las que vienen inmediatamente detrás y que siguen aún en movimiento, esto origina una sobrepresión que se desplaza por la tubería a una velocidad que puede superar la velocidad del sonido (Conalvias construcciones; IEH GRUCON S.A. “Diseño para construcción variante de la tubería de aducción sistema de acueducto de Bucaramanga”).

Existen varias formas donde se puede inducir al golpe de ariete entre ellas se tienen: Cierre y Apertura de Válvulas (maniobra de válvulas), arranque de bombas, detención de bombas, funcionamiento irregular de bombas, llenado inicial y vaciado de tuberías, cambios de nivel en los tanques (Luis E. PÉREZ FARRÁS, Adolfo GUITELMAN (2005), ESTUDIO DE TRANSITORIOS: GOLPE DE ARIETE. UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES.).

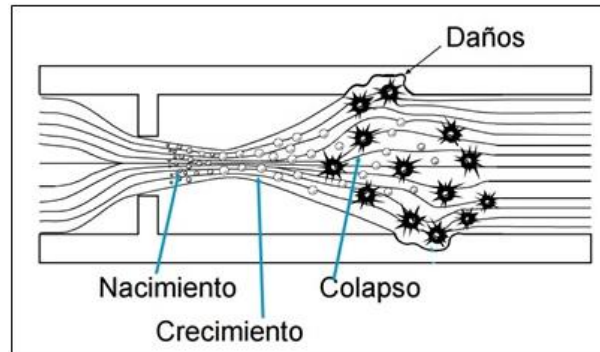
Con la ocurrencia de este suceso se pone en riesgo todo el sistema ya que la sobrepresión generada puede encontrarse entre 60 y 100 veces la presión normal de la tubería, ocasionando roturas en las tuberías y los accesorios instalados en los extremos (Twyman, J. (2018). Golpe de ariete en una red de tuberías debido al cierre rápido de una válvula. Revista ingeniería de construcción, 33(2), 193-200.).

Por otra parte, cuando una tubería que conduce algún fluido la presión interna decrece por debajo de presión atmosférica se inicia el vacío. A medida que desciende la presión, el vacío aumenta, aunque el agua sigue líquida. (Gustavo Adolfo Ortiz Masek (2006). EL GOLPE DE ARIETE EN SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE. Universidad de San Carlos de Guatemala). Desde un valor definido de vacío cuando el líquido cambia de estado y se

transforma en vapor, en ese punto libera gases que se localizan diluidos y se crean burbujas que viajan con la corriente líquida y que al lograr una presión mayor aguas abajo, estas desaparecen explotando con violencia. (Gustavo Adolfo Ortiz Masek (2006). EL GOLPE DE ARIETE EN SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE. Universidad de San Carlos de Guatemala). Es lo que se conoce como cavitación.

Figura 2.

Cavitación en tuberías



Nota: Saldarriaga, Juan, 2007, Hidráulica de Tuberías Abastecimiento de Agua, Redes, Riegos, Editorial, Alfaomega, Bogotá, Colombia.

3.1 Modelización de transitorios hidráulicos

En un conducto a presión el transitorio hidráulico se modela aplicando las ecuaciones de conservación de masa y cantidad de movimiento a un volumen de control que incluye la onda de presión que se mueve a lo largo de la conducción. De aquí se obtiene un sistema de dos ecuaciones diferenciales no lineales con dos incógnitas como se muestra en las ecuaciones 1 y 2.

$$\frac{\delta H}{\delta t} + \frac{V \delta H}{\delta x} + \frac{a^2 \delta V}{g \delta x} = 0 \quad (1)$$

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

Donde δH es la derivada parcial de pérdida de carga, V es la velocidad, a es la aceleración, δV es la derivada parcial de la velocidad, δt es la derivada parcial del tiempo, δx es la derivada parcial de la distancia, D es el diámetro de la tubería, f es el factor de fricción y g es la aceleración de la gravedad

Dado que este sistema no tiene solución analítica para su integración, el proceso habitual es admitir que el resultado se obtendrá en instantes de tiempo determinados y en un punto concreto sobre la conducción, cumpliéndose la ecuación 3.

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

Siendo “ a ” la celeridad de la onda de presión en la tubería, Δx es intervalo de distancia en la conducción y Δt es un intervalo de tiempo dado.

Esta celeridad, para el caso del agua se calcula por medio de la ecuación 4:

$$a = \frac{9900}{\sqrt{476 + C * \frac{D}{e}}} \quad (4)$$

El sistema tiene solución para cada punto intervención de cálculo excepto en los extremos, en donde se necesita una de las dos ecuaciones. Para este caso la ecuación que se necesita se reemplaza por la ecuación o conjunto de ecuaciones que evidencia el comportamiento del elemento enlazado en los extremos, esto se denomina “condiciones de contorno” (Amarís Castro, G. E., Guerrero Barbosa, T. E., & Sánchez Ortiz, E. A. (2015)).

Es importante calcular las sobrepresiones y las subpresiones en la conducción durante el transitorio en el modelo. La sobrepresión en la tubería se calcula mediante la ecuación 7.

$$\Delta H = \mp a \frac{\Delta V}{g} \quad (7)$$

En donde ΔH es la sobrepresión debida al fenómeno del golpe de ariete en (mca), a es la celeridad de onda (m/s), ΔV es el valor absoluto de la variación de velocidades en régimen permanente antes y después del golpe de ariete (m/s), g valor de la aceleración de la gravedad (m/s^2) (Amarís Castro, G. E., Guerrero Barbosa, T. E., & Sánchez Ortiz, E. A. (2015)).

La subpresión para la tubería se calcula con la ecuación 8:

$$\Delta H = \mp \frac{2L\Delta V}{gt} \quad (8)$$

En donde ΔH es la subpresión debida al fenómeno del golpe de ariete en (mca), ΔV es el valor absoluto de la variación de velocidades en régimen permanente antes y después del golpe de

ariete (m/s), g valor de la aceleración de la gravedad (m/s^2), L es la longitud de la tubería (m) y t es el tiempo de cierre efectivo (s) (Amarís Castro, G. E., Guerrero Barbosa, T. E., & Sánchez Ortiz, E. A. (2015)).

Otro factor para tener en cuenta en el modelamiento de transitorios es el tiempo de cierre de válvulas efectivo, este es el tiempo que se demora la onda de presión en recorrer toda la tubería. La ecuación 9 se utiliza para determinarlo.

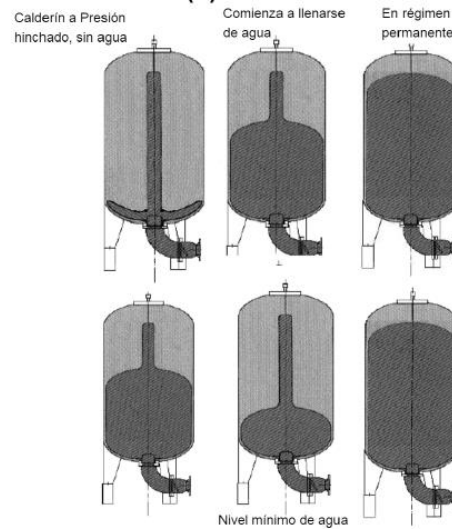
$$t \geq \frac{2L}{a} \quad (9)$$

En donde t es el tiempo efectivo de cierre (s), a es la celeridad de onda (m/s), y L es la longitud de la tubería (m) (Street, Robert L., Watters, Gary Z., Vennard, John K., 1996, Mecánica Elemental de Fluidos – Séptima Edición (“Elementary Fluid Mechanics, Seventh Edition”), John Wiley and Sons, USA.).

3.2 Sistemas de protección ante transitorios hidráulicos.

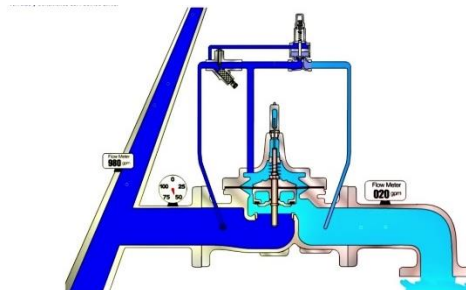
Existen diversas formas para reducir el impacto del fenómeno en las tuberías y/o canales, dentro de las cuales se tienen: tanques hidroneumáticos, válvulas de alivio y chimeneas de equilibrio (Gustavo Adolfo Ortiz Masek (2006)).

Un tanque hidroneumático contiene aire y agua bajo presión. El aire comprimido sirve como un cojín para ejercitar o absorber presión (Jung, B.S.; Karney, B.W.; Boulos, P.F.; Wood, D.J. (2007)), se ilustra su funcionamiento en la figura 4.

Figura 4.*Funcionamiento de un tanque hidroneumático*

Nota : Gustavo Adolfo Ortiz Masek (2006).

Las válvulas de alivio o compensadores de presión, son dispositivos que pueden atraer alteraciones repentinas de presión por medio de la expulsión de agua a través de sí mismas, tienen una salida de desfogue ante el exceso de presión tal como se ilustra en la figura 5 (Jung, B.S.; Karney, B.W.; Boulos, P.F.; Wood, D.J. (2007),).

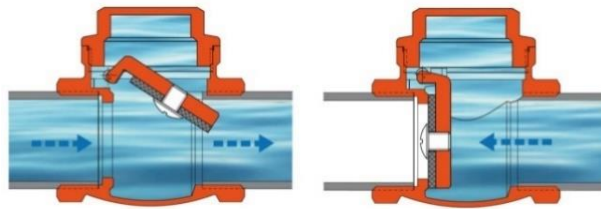
Figura 5.*Funcionamiento de una válvula de alivio*

Nota: Sánchez, Martínez (2014).

Las válvulas de retención se ejecutan al momento en el cual el caudal circula en sentido directo y dejan de funcionar cuando dicho caudal se regula en un sentido opuesto. Se consideran elementos ideales, cerrando instantáneamente en el mismo momento en que el caudal a la salida de la válvula se transforma en negativo como lo muestra la figura 6 (Yalán Cano, C. H. (2014)).

Figura 6.

Funcionamiento de una válvula de retención

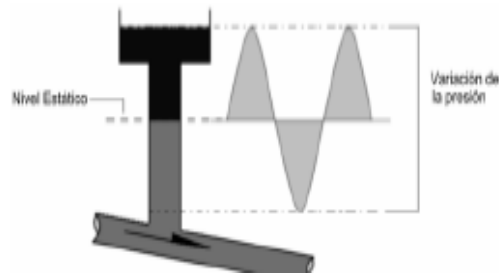


Nota: Sánchez, Martínez (2014)

Una chimenea de equilibrio es un depósito abierto a la atmósfera en su extremo superior conectado perpendicularmente a la tubería de conducción (Gustavo Adolfo Ortiz Masek (2006).) .La chimenea tiene por objeto recibir la onda de sobrepresión del golpe de ariete disipándola, como se muestra en la figura 7. Dependiendo de la magnitud del golpe de ariete que pueda ocurrir en el sistema (de acuerdo con los análisis), pueden construirse dos tipos de chimeneas: verticales o con cámara de expansión (para reducir la altura del depósito) (Sanchez, Martinez. (2014)).

Figura 7.

Funcionamiento de una chimenea de equilibrio



Nota: Gustavo Adolfo Ortiz Masek (2006).

4. Allievi

El programa ALLIEVI es un paquete informático que tiene como finalidad suponer y/o analizar los efectos transitorios en un sistema hidráulico a presión tanto en régimen permanente como en régimen transitorio (Amarís Castro, G. E., Guerrero Barbosa, T. E., & Sánchez Ortiz, E. A. (2015).), cuando las propiedades y características del flujo, en cada punto del espacio, permanecen invariables en el transcurso del tiempo, el flujo se llama estacionario o régimen permanente; en caso contrario, se llama no estacionario o régimen transitorio (Marchi, E., & Rubatta, A. (1981).). El programa permite la circulación por gravedad del fluido en el interior del sistema mediante una serie de depósitos elevados, los cuales están estimulados por un agregado de estaciones de bombeo o combinaciones de depósitos y estaciones de bombeo. El líquido transitará a presión por la parte interna de las tuberías de la estructura, las cuales tienen la capacidad de construir una red de tipo ramificada, mallada o mixta (Marchi, E., & Rubatta, A. (1981).). El sistema debe regular el caudal circulante de las tuberías, es por esto que tiene a su disposición diferentes tipos de válvulas instaladas en serie con dichas tuberías.

ALLIEVI utiliza como fundamento de cálculo el método de las características descrito anteriormente en la sección 2.3 (Marchi, E., & Rubatta, A. (1981).).

Teniendo en cuenta los posibles efectos adversos generados en el desarrollo de un transitorio hidráulico, la manera de solucionar la situación es suministrar al sistema una resistencia mecánica que posea la capacidad de soportar las fluctuaciones de presión, o preservar la instalación con el objetivo de mitigar la amplitud de dichas oscilaciones y conservarlas dentro de los términos aceptables. Así mismo, para continuar con la ejecución se requiere de un programa informático el cual suponga el transitorio y facilite, entre otros resultados, las oscilaciones de empuje o presión generadas después de efectuarse una maniobra determinada. Este es el objetivo principal del programa ALLIEVI (Marchi, E., & Rubatta, A. (1981).).

ALLIEVI es un software que puede ser empleado en fases de diseño y de verificación del funcionamiento de sistemas hidráulicos, de manera complementaria. En la fase inicial, correspondiente al diseño, el programa puede adjuntar al sistema diferentes mecanismos de resguardo (tanques hidroneumáticos, chimeneas de equilibrio, válvulas de alivio, etc), de manera que las fluctuaciones o vibraciones de presión causadas por diferentes maniobras de los elementos del sistema, estén dentro de rangos fijados previamente. Por otra parte, en la fase de verificación el programa concede la visualización los efectos transitorios generados al ejecutarse maniobras en una instalación que ha sido diseñada con anterioridad (Marchi, E., & Rubatta, A. (1981).).

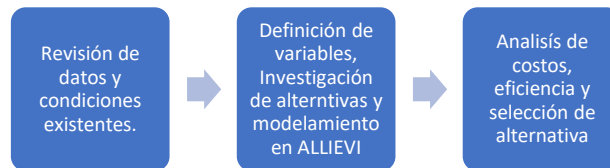
5. Método

Para desarrollar este proyecto de investigación se implementó el flujograma mostrado en la figura 8, el cual consta de 3 fases, el punto de partida inicial es la revisión de datos, bibliografía

y condiciones del sistema existente; paso siguiente planteo de alternativas, definición de variables y modelamiento en ALLIEVI; por último, el análisis de cada una de las alternativas y la selección de la más eficiente para el sistema.

Figura 8.

Estrategia usada para el desarrollo del proyecto de investigación



Fuente: Autor.

5.1 Revisión documentación existente

La revisión de la documentación existente se realizó obteniendo los documentos correspondientes a la aducción entre el embalse de Bucaramanga y la PTAP los Angelinos. Como documento base del diseño de la tubería de aducción se encontró el MEMORANDO TÉCNICO ESTUDIOS HIDRÁULICOS C331-MT-01 suministrado por la empresa CONALVIAS, el informe corresponde a las memorias de cálculo hidráulico y a la evaluación de alternativas para el alineamiento de la línea de aducción del Embalse de Bucaramanga.

Adicionalmente, como parte de la información entregada por CONALVIAS, se encuentran los documentos correspondientes al estudio denominado “Estudio de prefactibilidad del

alineamiento de la tubería de aducción por el canal Zaragoza”, realizado por la firma INTEGRAL INGENIEROS CONSULTORES en el año 2014, en el cual se encuentran:

- Memorias de cálculo aducción Canal Zaragoza.
- Informe aducción Canal Zaragoza.
- Memorando Técnico Sistema Aducción Descarga Fondo.
- Memorias de cálculo tubería y bloques de anclaje.
- Memorias de cálculo - Hidráulica Transitoria.
- Planos de detalles planta perfil y cortes.

Con los datos suministrados se estableció que el sistema está conformado por una línea de tubería de aproximadamente 4 km, parte del portal de salida de la galería de la presa y llega a la estructura de regulación y control de la PTAP Angelinos, adicionalmente cuenta con una derivación que conduce a la estructura de regulación y control de la PTAP Bosconia. En el proyecto se emplean tuberías compuesta de los materiales de GRP (poliéster reforzado con fibra de vidrio) y acero, la aducción cuenta con tuberías de diámetro nominal (DN) desde 600 mm hasta 1400 mm, se empleó para el GRP una rugosidad absoluta de 0.03 mm y para el acero una rugosidad de 0.90 mm. Se estableció el valor de la celeridad de onda para cada tipo de material, acero con un valor de 1000 m/s y GRP el cual presenta una celeridad de onda de 445 m/s.

Se estableció el nivel mínimo de operación del embalse en 843.00 msnm y el nivel máximo en la cota 885.75 msnm; para fines de análisis de transitorios se usó el nivel máximo, adicionalmente el nivel del agua en la entrega de la estructura de control los Angelinos se previó

en el nivel 837,00 msnm, y para la derivación hacia la estructura de control Bosconia en el nivel 693,40 msnm. Se definió un caudal de $1,2 \text{ m}^3/\text{s}$ para la PTAP Angelinos y $2 \text{ m}^3/\text{s}$ para la PTAP Bosconia.

El sistema cuenta con 3 válvulas de diferentes diámetros nominales (DN) que hacen parte de las estructuras de regulación de caudal. La estructura de regulación de caudal de la PTAP los Angelinos está compuesta de 2 válvulas multichorro VH4 DN 600 de marca DINICOLA, la estructura de regulación de caudal de la PTAP Bosconia está compuesta por una válvula multichorro VH4 DN 600 de marca DINICOLA. A la salida del embalse se encuentra una válvula de seguridad. Esta válvula es tipo mariposa DN 1400 de la marca ERHARD.

El sistema cuenta con una serie de ventosas DN 200 instaladas a lo largo de la línea de aducción. Estas se identificaron en el memorando técnico de estudios hidráulicos, a continuación, se presenta la ubicación de estas ventosas por medio de la tabla 1.

Tabla 1. Ventosas planteadas en el sistema.

Tabla 1.

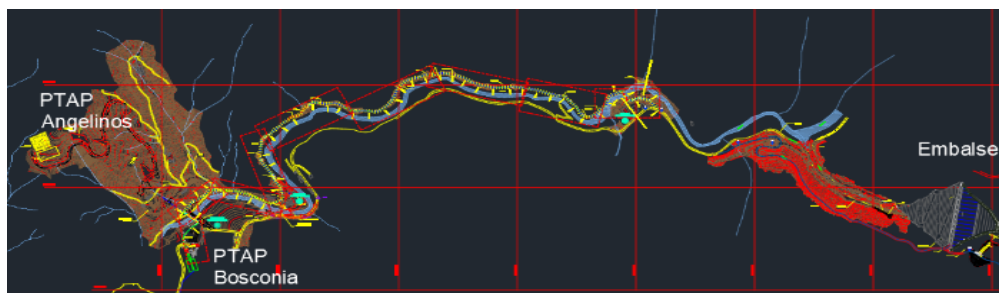
Memorando Técnico Estudios Hidráulicos C331-Mt-01

Ventosa	Abscisa	Φ Ventosa(in)
1	K0+117	8
2	K0+569	8
3	K0+961	8
4	K01+431	8
5	K01+781	8
6	K02+093	8
7	K02+161	8
8	K0+008	8
9	K0+102	8

Los planos de detalle planta y perfil suministraron datos de geolocalización y altura para cada uno de los elementos del sistema, la figura 9 ilustra el plano de localización-planta del sistema.

Figura 9.

Plano de localización planta



Fuente: Autor.

5.2 Revisión bibliográfica

Utilizado las bases de datos brindadas por la Universidad Industrial de Santander (Dialnet, Taylor & Francis, ProQuest, Springer, Science Direct) y Google académico, se realizó el análisis de 20 artículos, los cuales están directamente relacionados con el golpe de ariete y todo lo que en él se comprende, ya sean metodologías, variables, causas, modelos de solución, entre otros; en donde se logró observar que las investigaciones sobre esta temática se han desarrollado desde mediados del siglo XX, ya que autores como De Assas y Liñan (1984), basaron su estudio en la amortiguación de las fluctuaciones de presión generadas por el golpe de ariete utilizando el método de escalas múltiples, describiendo de manera acertada el movimiento generado en la fluctuación de las ondas y con esto las consecuencias que conlleva.

De los artículos encontrados en las bases de datos, fue posible observar los diferentes métodos de análisis y protección para la inspección y control del golpe de ariete y de esta forma tener estudios base para la realización del presente proyecto.

Estudios realizados anteriormente, han propuesto una serie de alternativas con el fin de mitigar la ocurrencia del golpe de ariete mediante el desarrollo de diferentes modelos físicos; fue así como Twyman (2017) en su investigación sobre el análisis del fenómeno en un sistema de distribución de agua, utiliza el método de las características gracias a la facilidad que posee a la hora de adjuntar diferentes dispositivos hidráulicos, ya sean bombas, válvulas, tanques hidroneumáticos, calderines, entre otros. Buscando resolver las dificultades generadas por el golpe de ariete en el sistema, se empleó un tanque de cota constante equivalente a 70 m; 45 tuberías las cuales presentaban longitudes diferentes (120 m para tuberías rectas; 169,7 m correspondiente a las tuberías diagonales); así mismo, estas presentaban distintos valores en sus diámetros (rango:

75 mm y 300 mm) espesores entre 1 y 2 (mm). Finalmente, se manejaos diferentes valores de caudales iniciales (entre 115 L/s y 2 L/s) y tres tipos de materiales (PVC, cobre y acero).

Análogamente, Chong, Liu, Zhaoa, Yan y Hibiki (2020) estudiaron las características de oscilación del golpe de ariete inducido por condensación periódica con vapor descargado a través de tubo horizontal; mediante la propuesta de un modelo experimental se pretendía reducir la probabilidad de ocurrencia del fenómeno y disminuir las consecuencias que genera el suceso, es así como la metodología que usaron en el proyecto involucraba una caldera (330 kW con un caudal de vapor máximo de 400 kg / h y una presión de vapor máxima de 0,7 MPa), un tanque de compensación y de agua cuadrado, tuberías de vapor y medidores de flujo, así como una tubería de prueba horizontal, una lámpara LED y una cámara de video de alta velocidad. Los investigadores lograron controlar de manera aceptable el flujo másico por medio de una válvula de control, y el mismo fue discretizado con un medidor de fujo Coriolis (rango de 0 a 100 kg / hy su precisión de 0,15% FS).

Para todos los niveles de complejidad del sistema, y con la condición de que la tubería de aducción excede los 200 mm de diámetro, el análisis hidráulico de las tuberías de aducción y/o conducción debe abarcar un estudio de golpe de ariete el cual estime y tenga en cuenta todos los efectos hidráulicos de flujo no permanente ocasionados por la operación y el desarrollo normal de la conducción, operaciones bajo situaciones de mantenimiento y en posiciones de emergencias, incluyendo el establecimiento de la calidad de la tubería para soportar estos esfuerzos agregados.

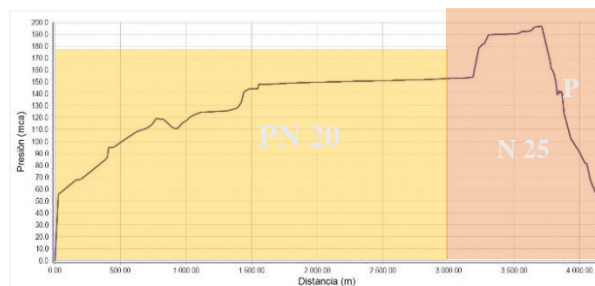
5.3 Revisión de sistema existente

Se realizó una revisión de calidad del sistema mediante las normas de la RAS2000 título B6 según la resolución No. 1096 del 17 de noviembre del 2000 y la resolución 330 de 2017. En esta revisión se evaluó los estándares de calidad y requerimientos de operación para aducciones propuestos por la norma.

La presión máxima de operación del sistema según la norma debe ser inferior en un 30% a la presión máxima resistente de la tubería según la norma RAS2000 y la resolución 330 de 2017 para conducciones por gravedad. Con respecto a la presión mínima, según la resolución 330 de 2017, la onda de subpresión no debe generar presiones manométricas inferiores a 10 mca. La figura 10 se ilustra el perfil de presión del sistema donde se observó que cumple con la norma.

Figura 10.

Perfil de presiones sobre la aducción



Fuente: Autor.

la velocidad máxima se limitó conforme a la norma RAS2000 título B.6 a 6 m/s por el posible transporte de elemento abrasivos como arena que comprometan la integridad de la tubería,

la velocidad mínima se limitó a 1 m/s con el objetivo de evitar el aumento y mantener bajo control el desprendimiento de películas biológicas y/o minerales.

Según el título B.6 de la norma RAS el golpe de ariete en conducciones a presión puede producirse por condiciones normales de operación o por condiciones excepcionales de operación.

Las condiciones excepcionales en flujo a presión por gravedad son:

- La falla en cualquiera de los terminales de protección y control contra el golpe de ariete.
- Las maniobras impropias de las válvulas, en divergencia con las reglas de operación especificadas en el diseño del proyecto.
- La ruptura de la tubería de aducción o conducción en la sección de máxima presión bajo un flujo permanente.

Para el caso de este proyecto de investigación, se analizó el golpe de ariete producido por la maniobra inadecuada de las válvulas, es decir, un cierre abrupto de una o más válvulas. El tiempo de cierre mínimo de válvulas se obtuvo por medio de la ecuación 8; se consideró que la conducción parte desde la presa hasta la planta de tratamiento de Angelinos, se consideró una longitud aproximada de tubería de 2540 metros, y se obtuvo un tiempo mínimo de cierre de 5 segundos.

5.4 Definición de características y variables

El primer aspecto por definir fue el escenario crítico de maniobra de válvulas, es decir, el escenario donde la conducción tendría que soportar la mayor oscilación de presiones. Se establecieron posibles escenarios de maniobras de válvulas donde estas se cerraban abruptamente en un tiempo mínimo de 5 segundos. Los escenarios planteados fueron:

- Escenario de operación con 3200 l/s-Cierre simultaneo de válvulas Angelinos y Bosconia en $t=5s$.
- Escenario de operación con 1200 l/s- cierre de válvula Bosconia en $t=5s$.
- Escenario de operación con 2000 l/s- Cierre de válvulas Angelinos en $t=5s$.
- Escenario de operación con 3200 l/s- Cierre simultaneo de todas las válvulas (Angelinos, Bosconia, Embalse) en $t=5s$.

Un aspecto importante fue la evaluación de puntos críticos durante el transitorio en el sistema, estos puntos se encuentran en:

- Las zonas con mayores valores de presiones en el régimen permanente mostradas en la figura 11 cabe aclarar que estas zonas son influenciadas por la cota a la que se encuentra la tubería, a menor cota mayor presión y viceversa.
- Las zonas con altas velocidades de flujo.
- Las zonas aledañas a las válvulas de regulación.

Figura 11.

Presiones sobre la aducción en el régimen permanente



.Fuente: Autor.

5.5 Investigación de alternativas

Se realizó la investigación de posibles alternativas para la implementación de sistemas de protección ante golpe de ariete para la aducción. Para ello se partió de la norma RAS título B.6 “Los dispositivos que pueden ser considerados para el control del golpe de ariete son: Válvulas de retención, válvulas con una o dos velocidades de cierre, válvulas de alivio, cámara de aire bajo presión, ventosas de doble efecto, tanques de compensación unidireccionales, almenaras, volantes, tanques hidroneumáticos”. Según la normativa RAS lo cual engloba el marco legal y ecológico, se siguieron y cumplieron los parámetros plasmados en ella como los son los siguientes.

El análisis del golpe de ariete debe considerarse en los siguientes casos:

1. Proyectos de nuevas tuberías por bombeo.
2. Proyectos de nuevas tuberías por gravedad.
3. En las instalaciones existentes donde se diseñen ampliaciones/extensiones ocasionadas por un aumento en la demanda, en las que se empleen bombas nuevas, en las que se construyan nuevos tanques o embalses o en las que se presenten variaciones de presión en cualquier sección de la línea de aducción o conducción.

4. En las instalaciones existentes cuando hay cambios en las condiciones regulares de operación y en las condiciones excepcionales de operación.

5. En las instalaciones existentes que van a ser incorporadas a un nuevo sistema, aun cuando no sufran modificaciones de ninguna índole.

Se analizó la información recopilada en la sección 3.2 con respecto a sistemas de protección ante golpe de ariete planteados en anteriores proyectos, con base a ello se presenta un cuadro resumen de dispositivos de protección anti-golpe de ariete y algunas características de estos, tal como se muestra en la tabla 2.

Tabla 2.

Resumen de dispositivos de protección ante golpe de ariete usados comúnmente

Dispositivo	Finalidad	Comentarios
Válvulas de retención	Evitar velocidades de rotación inversas en el grupo	Necesidad de una caracterización dinámica [8].
	Posibilidad de utilizar válvula compensadora de impulsos	Necesitan complementarse con otros dispositivos de protección [17].

Tanque	Limitar	Muy
hidroneumático	sobrepresiones y subpresiones [17].	importante el estudio de condiciones de entrada y salida.
		Muy eficaz, pero con elevado costo [16].
		Exige mantenimiento
Chimenea de	Limitar	En el punto de
equilibrio	sobrepresiones y subpresiones	instalación la presión debe ser muy pequeña para una altura discreta en el tanque [15].
Válvulas de	Limitar	Con llevan en
alivio	sobrepresiones (muy eficaces)	ocasiones a perdida de agua [17].
		Exigen mantenimiento

Pueden		
instalarse a lo largo de toda la conducción		
Volantes de inercia	Limitar sobrepresiones y subpresiones [17].	economía y ausencia de mantenimiento
Posibles		
dificultades de arranque [17].		
Tanques unidireccionales	Limitar subpresiones	Muy eficaces y de sencilla instalación [6].

Con base a la recopilación de la información encontrada se plantearon las siguientes alternativas de sistemas de protección ante golpe de ariete para la aducción entre el embalse de Bucaramanga y la PTAP los Angelinos:

- Sistema de tanques hidroneumáticos
- Sistema de válvulas de alivio y retención.
- Sistema de chimenea de equilibrio apoyada por válvulas de alivio.

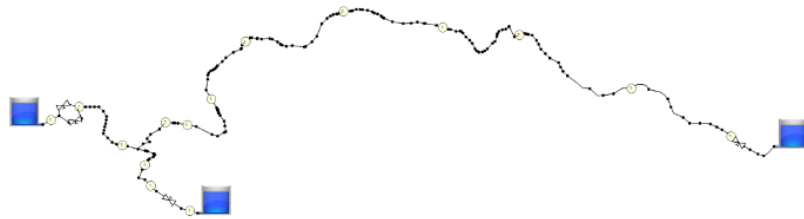
La ubicación de los diferentes dispositivos de protección mencionados para cada alternativa se realizó teniendo en cuenta las zonas de mayor oscilación de presiones.

6. Modelamiento en ALLIEVI

Se realizó el modelamiento de la tubería de aducción entre el embalse de Bucaramanga y la PTAP los Angelinos, tal como se muestra en la figura 12.

Figura 12.

Modelo completo de la aducción en ALLIEVI



.Fuente: Autor.

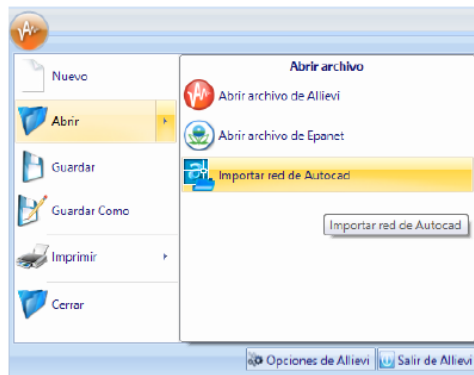
El modelamiento del sistema se llevó a cabo siguiendo el procedimiento descrito en los numerales siguientes.

6.1 Importación del modelo

El primer paso es la importación de datos para el modelo, esta se llevó a cabo de la siguiente forma. Se definió el formato de entrada a ALLIEVI, como datos de entrada se tienen los planos de la aducción en formato DWG, por medio de ALLIEVI se hizo la conversión de este tipo de formato al programa por medio de la opción “importar red de AutoCAD”, tal como se muestra en la figura 13.

Figura 13.

Procedimiento de importación de red



Fuente: Autor.

6.2 Datos en el modelo

Se alimentó el modelo con los datos conocidos de la aducción, como cotas para los nudos, datos de longitud de tubería, rugosidad de tubería, diámetro de tubería, espesor interno para tuberías, de acuerdo con lo especificado en la sección 3.1.

6.3 Condiciones de frontera del sistema

Se definieron las condiciones de frontera del sistema, el Embalse de Bucaramanga y las PTAP Angelinos y Bosconia. Estos se modelaron por medio de un depósito de grandes dimensiones (DGD).

6.4 Coeficiente de pérdidas menores

Se introdujo en el modelo el coeficiente adimensional de pérdidas menores (k). El valor de este coeficiente se obtuvo para cada tipo de accesorio según la tabla 3.

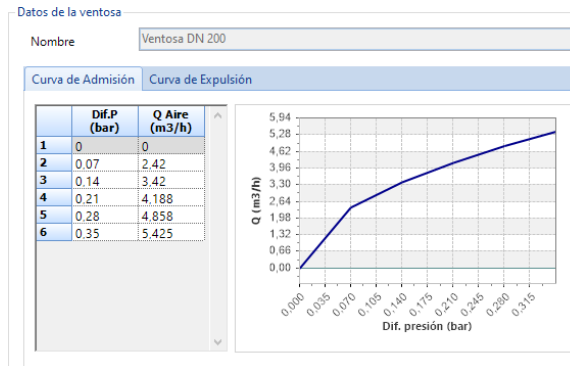
Tabla 3.*Manual técnico de GRP-Pavco.*

COEFICIENTES TÍPICOS DE PÉRDIDAS MENORES	
Tipo de accesorio	Factor K
Codo 15°	0,06
Codo 30°	0,15
Codo 45°	0,14
Codo 60°	0,24
Codo 90°	1,4
Tee 180°	1,3
Reducción	0,7

6.5 Ventosas

Se insertaron las ventosas identificadas previamente en la sección 3.1. Para la inserción de las ventosas en el sistema, el primer paso fue definir la ventosa a insertar, para ello se manejaron los datos definidos en MEMORANDO TÉCNICO ESTUDIOS HIDRÁULICOS C331-MT-01, se utilizaron ventosas de 200 mm de diámetro con características de admisión y expulsión de aire ilustrados en las figuras 14 y 15.

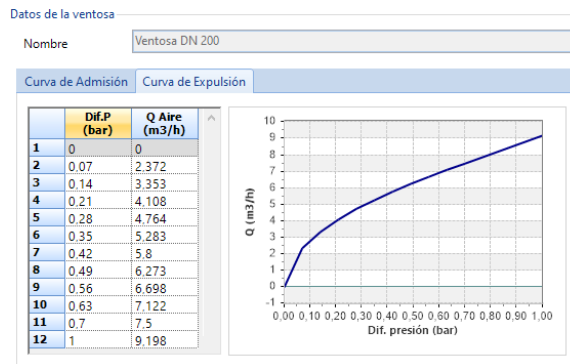
Figura 14.*Datos de la ventosa en admisión.*



Fuente: Memorando Técnico Estudios Hidráulicos C331-MT-0

Figura 15.

Datos de la ventosa en expulsión



Fuente: Memorando Técnico Estudios Hidráulicos C331-MT-01

6.6 Válvulas de regulación

Se introdujeron las válvulas de regulación del sistema al modelo, válvula ON-OFF del embalse, estructura de regulación Angelinos y la estructura de regulación Bosconia.

El sistema de regulación del embalse consta de una válvula de DN 1400 tipo mariposa de marca ERHARD. se definió un coeficiente de pérdida de carga (K), de 0,16 según la tabla 4.

Tabla 3.

Coefficientes de pérdida de carga con válvula de mariposa totalmente abierta

DN	PN 10	PN 16
500	0,23	0,29
600	0,20	0,26
700	0,18	0,23
800	0,16	0,21
900	0,15	0,19
1000	0,13	0,18
1100	0,13	0,17
1200	0,12	0,16
1300	0,12	0,16
1400	0,12	0,16

Los sistemas de regulación de Bosconia y Angelinos compuestos de válvulas multichorro modelo VH4 de la marca DINICOLA. Su comportamiento de pérdida de carga definido por el fabricante se presenta en la figura 16.

Figura 16.

Diagrama de coeficiente de pérdidas de carga para válvula multichorro VH4

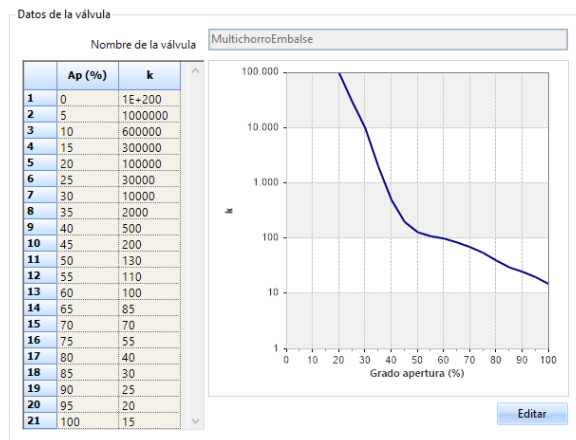


DINICOLA.

Este tipo de válvula debió ser introducida en el modelo con su respectivo diagrama, para ello se creó un nuevo tipo de válvula en la base de datos del programa como lo muestra la figura

Figura 17.

Configuración de la válvula multichorro en ALLIEVI




6.7 Definición de configuración de calculo

Se configuraron las variables para cálculo tanto de régimen permanente como régimen transitorio en el programa, tales como la presión atmosférica, gravedad, intervalo de cálculo y otros parámetros de cómputo, esto se ilustra en la figura 18.

Figura 18.

Configuración de parámetros de cálculo en ALLIEVI.

 Configuración del cálculo. Personalice sus parámetros de simulación

Cálculo del régimen permanente	
Intervalo de tiempo para el cálculo del régimen permanente : (s)	0,05000
Sección depósitos: (m ²)	25,00
Velocidad inicial en tuberías: (m/s)	0,50
Cálculo del régimen transitorio	
Intervalo de tiempo para el cálculo en conductos a presión: (s)	0,00090
Intervalo de tiempo para el cálculo en conductos a lámina libre: (s)	0,50000
Tiempo máximo de simulación: (s)	195,00
Otras opciones de cálculo	
Aceleración de la gravedad: (m/s ²)	9,81000
Presión atmosférica: (bar)	1,01340
Cálculo con cavitación:	<input type="radio"/> Sí <input checked="" type="radio"/> No
Tipo de fluido:	Agua
Constante de grabación de resultados en tuberías	31
Número máximo de iteraciones para resolución de sistemas:	1.000
Coefficiente de estabilidad de Courant:	1,33
Calado mínimo (lámina libre): (mm)	0,25
Caudal mínimo (lámina libre): (l/s)	0,50

Los transitorios analizados fueron evaluados en un intervalo de 190 segundos.

La presión atmosférica de 10 mca aproximadamente se consideró como el 0 en los valores de presión.

Se realizó el cálculo sin cavitación, es decir, sin tener en cuenta el cambio de fase del agua, es decir, de líquido a gaseoso por efecto de la presión, esto repercutió a la hora de presentar los resultados ya que se ilustran presiones con valores negativos, es decir, por debajo del vacío, estos valores fueron meramente numéricos, sin significado físico, para poder observar el transitorio completamente.

6.8 Modelamiento de escenarios de maniobra de válvulas

Se evaluó el efecto del transitorio en el sistema producido por diferentes maniobras de operación de válvulas. Cada maniobra de válvulas mencionada en la sección 3.4 fue configurada

en ALLIEVI y posteriormente se realizó el cálculo del régimen transitorio producido por cada maniobra.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos para cada escenario de maniobra.

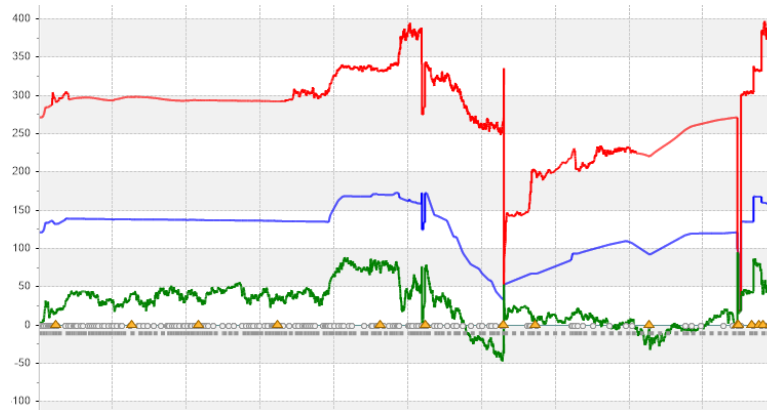
- Escenario de operación con 3200 l/s-Cierre simultaneo de válvulas Angelinos y Bosconia en $t=5s$

En este escenario el sistema parte entregando caudal tanto a la PTAP Angelinos como a la PTAP Bosconia, es decir, un caudal transportado de 3200 l/s , se procedió a cerrar la estructura de regulación Angelinos y la estructura de regulación Bosconia simultáneamente en un tiempo de 5 segundos. Se obtuvo una línea de presiones sobre la aducción durante el transitorio tal como se muestra en la figura 19.

La sobrepresión máxima alcanzada en la conducción fue de aproximadamente 400 mca , la subpresión mínima fue de aproximadamente -60mca.

Figura 19.

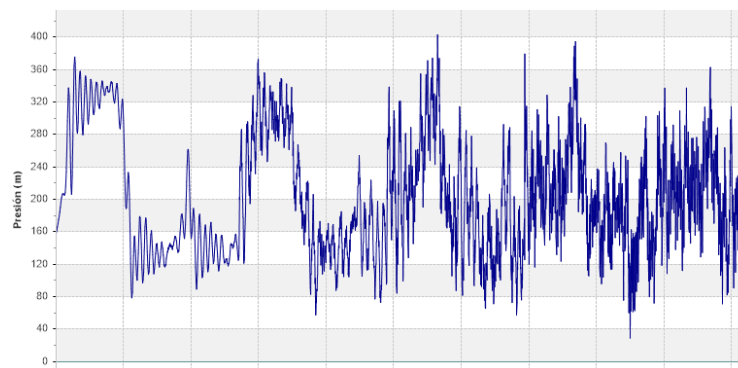
Líneas de sobrepresión (roja), permanente (azul) y subpresión (verde) en la aducción escenario de operación con 3200 l/s-Cierre simultaneo de válvulas Angelinos y Bosconia en $t=5s$.



La figura 20 ilustra la oscilación de presiones en el tiempo sobre la válvula de regulación Bosconia donde se presentó la máxima sobrepresión en el sistema, en ella se observó una subpresión máxima de 400 mca.

Figura 20.

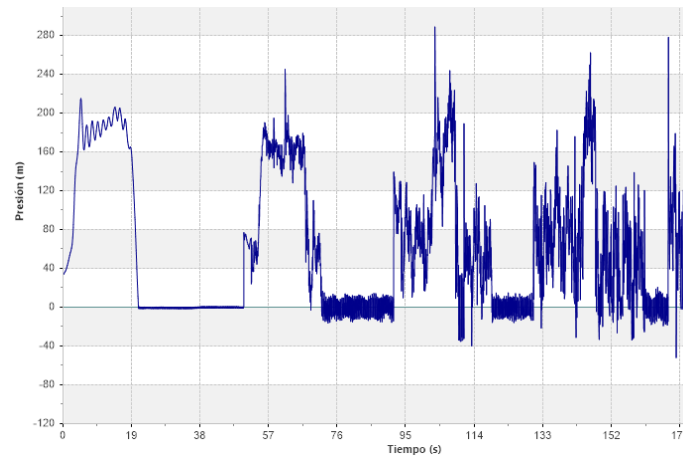
Diagrama de presión punto más crítico de sobrepresiones, válvula de regulación Bosconia escenario de operación con 3200 l/s-Cierre simultaneo de válvulas Angelinos y Bosconia en $t=5s$.



La figura 21 ilustra la oscilación de presiones en el tiempo sobre la válvula de regulación Angelinos donde se presentó la máxima subpresión en el sistema, en ella se observó la subpresión máxima de -60 mca.

Figura 21.

Diagrama de presión punto más crítico de subpresiones, válvula de regulación Angelinos escenario de operación con 3200 l/s-Cierre simultaneo de válvulas Angelinos y Bosconia en $t=5s$.

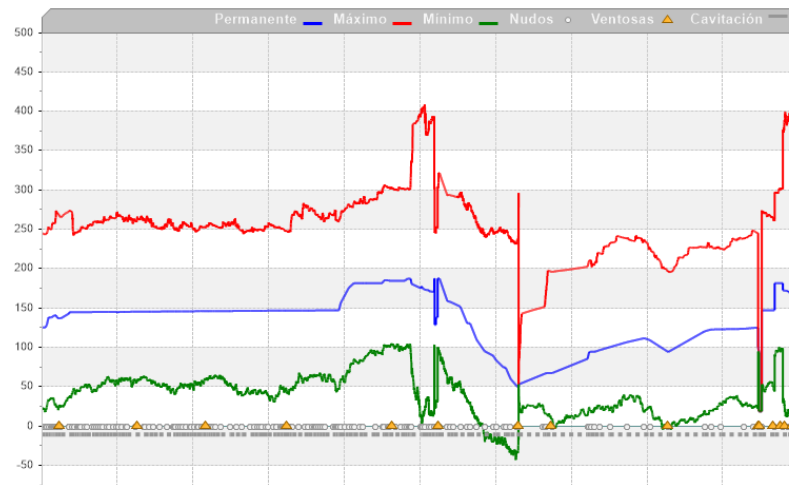


- Escenario de operación con 1200 l/s- cierre de válvula Bosconia en $t=5s$

En este escenario el sistema parte de entregar flujo a la PTAP Bosconia solamente, es decir, un caudal de transporte en la aducción de 1200 l/s , se procedió a cerrar la estructura de regulación Bosconia en un tiempo de 5 segundos. Se obtuvo una línea de presiones sobre la aducción durante el transitorio tal como se muestra en la figura 22. La sobrepresión máxima alcanzada en la conducción fue de aproximadamente 420 mca , la subpresión máxima alcanzada fue de aproximadamente -50 mca.

Figura 22.

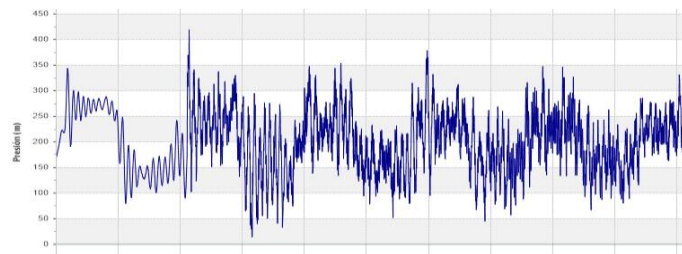
Líneas de sobrepresión (roja) , permanente (azul) y subpresión (verde) en la aducción Escenario de operación con 1200 l/s- cierre de válvula Bosconia en $t=5s$.



La figura 23 ilustra la oscilación de presiones en el tiempo sobre la válvula de regulación Bosconia donde se presentó la máxima sobrepresión en el sistema, en ella se observó una sobrepresión máxima de 420 mca.

Figura 23.

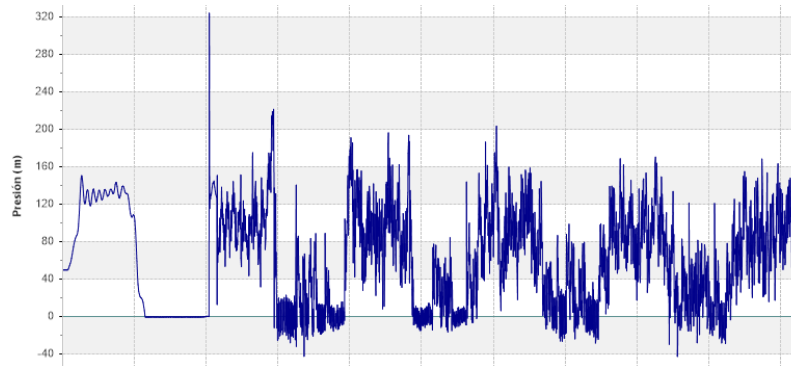
Diagrama de presión punto más crítico de sobrepresiones, válvula de regulación Bosconia - escenario de operación con 1200 l/s- cierre de válvula Bosconia en $t=5s$



La figura 24 ilustra la oscilación de presiones en el tiempo sobre la válvula de regulación Angelinos donde se presentó la máxima subpresión en el sistema, en ella se observó una subpresión de -50 mca.

Figura 24.

Diagrama de presión punto más crítico de subpresiones, válvula de regulación Angelinos escenario de operación con 1200 l/s- cierre de válvula Bosconia en $t=5s$

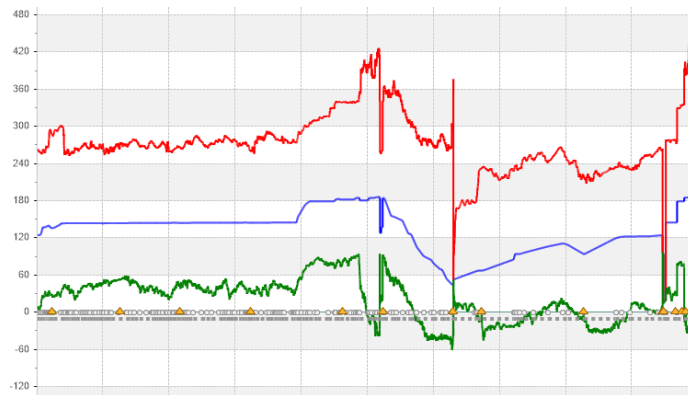


- Escenario de operación con 2000 l/s- Cierre de válvulas Angelinos en $t=5s$.

En este escenario el sistema parte de entregar flujo a la PTAP Angelinos, es decir, un caudal de transporte en la aducción de 2000 l/s, se procedió a efectuar la maniobra de cierre en la estructura de regulación Angelinos en un tiempo de 5 segundos. Se obtuvo una línea de presiones sobre la aducción durante el transitorio tal como se muestra en la figura 25. La sobrepresión máxima alcanzada en la conducción fue de aproximadamente 440 mca , la subpresión máxima alcanzada fue de aproximadamente -100 mca.

Figura 25.

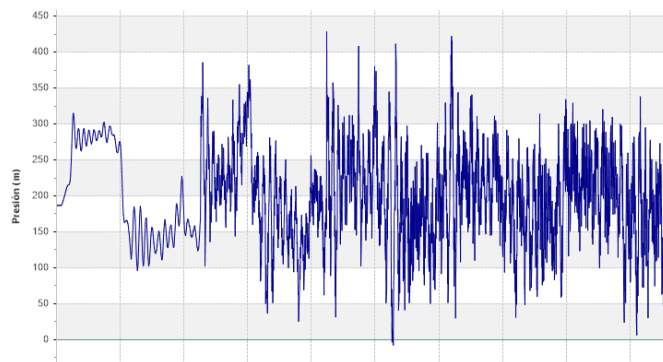
Líneas de sobrepresión (roja) , permanente (azul) y subpresión (verde) en la aducción- escenario de operación con 2000 l/s- Cierre de válvulas Angelinos en $t=5s$



La figura 26 ilustra la oscilación de presiones en el tiempo sobre la válvula de regulación Bosconia donde se presentó la máxima sobrepresión en el sistema, en ella se observó una sobrepresión máxima de 440 mca.

Figura 26.

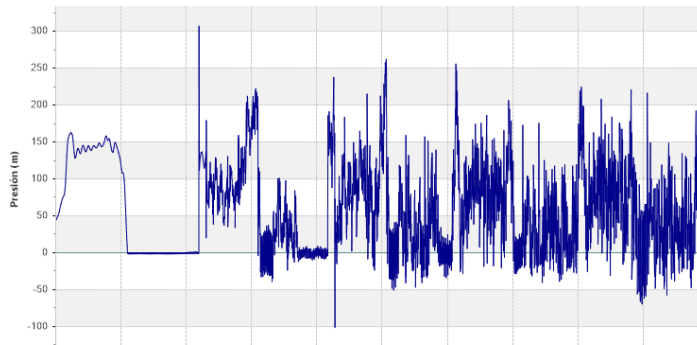
Diagrama de presión punto más crítico de sobrepresiones, válvula de regulación Bosconia- escenario de operación con 2000 l/s- Cierre de válvulas Angelinos en $t=5s$.



La figura 27 ilustra la oscilación de presiones en el tiempo sobre la válvula de regulación Angelinos donde se presentó la máxima subpresión en el sistema, en ella se observó una subpresión de -100 mca.

Figura 27.

Diagrama de presión punto más crítico de subpresiones, válvula de regulación Angelinos escenario de operación con 2000 l/s- Cierre de válvulas Angelinos en $t=5s$

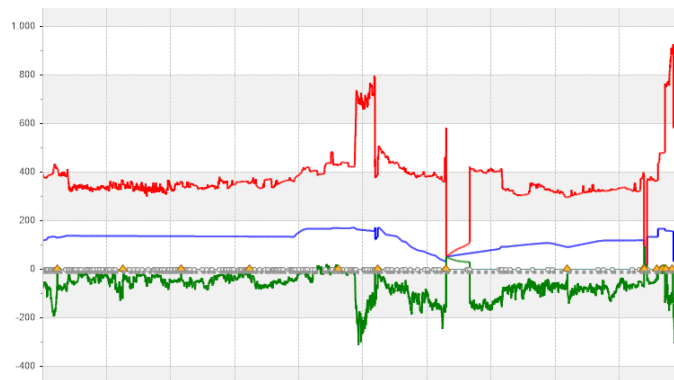


- Escenario de operación con 3200 l/s- Cierre simultaneo de todas las válvulas (Angelinos, Bosconia, Embalse) en $t=5s$.

En este escenario el sistema parte de entregar flujo a la PTAP Angelinos y a la PTAP Bosconia, es decir, un caudal de transporte total de 3200 l/s, se procedió a efectuar la maniobra de cierre en las estructuras de regulación Angelinos, Bosconia y la válvula del embalse simultáneamente en un tiempo de 5 segundos. Se obtuvo una línea de presiones sobre la aducción durante el transitorio tal como se muestra en la figura 28. La sobrepresión máxima alcanzada en la conducción fue de aproximadamente 940 mca, la subpresión máxima alcanzada fue de aproximadamente -270 mca. Este fue el escenario crítico de maniobra ya que presentó la mayor oscilación de presiones.

Figura 28.

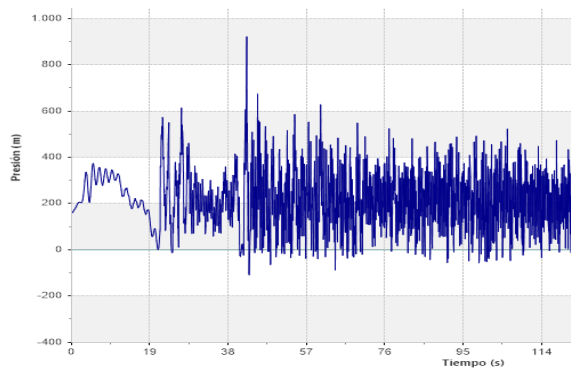
Líneas de sobrepresión (roja), permanente (azul) y subpresión (verde) en la aducción-escenario de operación con 3200 l/s- Cierre simultaneo de todas las válvulas (Angelinos, Bosconia, Embalse) en $t=5s$.



La figura 29 ilustra la oscilación de presiones en el tiempo sobre la válvula de regulación Bosconia donde se presentó la máxima sobrepresión en el sistema, en ella se observó una sobrepresión de 940 mca.

Figura 29.

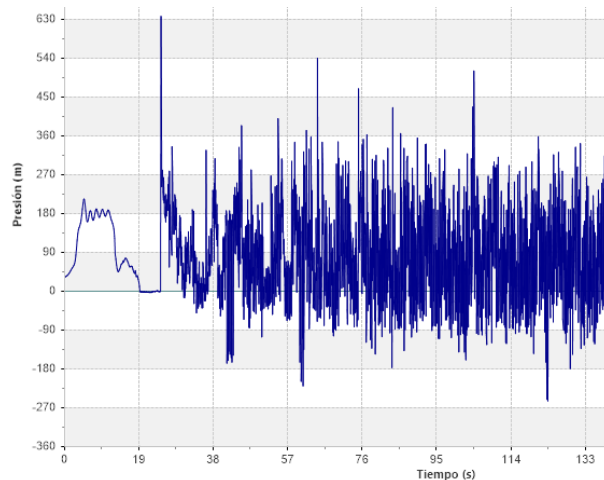
Diagrama de presión punto más crítico de sobrepresiones, válvula de regulación Bosconia Escenario de operación con 3200 l/s- Cierre simultaneo de todas las válvulas (Angelinos, Bosconia, Embalse) en $t=5s$



La figura 30 ilustra la oscilación de presiones en el tiempo sobre la válvula de regulación Angelinos donde se presentó la máxima subpresión en el sistema, en ella se observó una subpresión de -270 mca.

Figura 30.

Diagrama de presión punto más crítico de subpresiones, válvula de regulación Angelinos Escenario de operación con 3200 l/s- Cierre simultaneo de todas las válvulas (Angelinos, Bosconia, Embalse) en $t=5s$



6.9 Modelamiento de alternativas de sistemas de protección

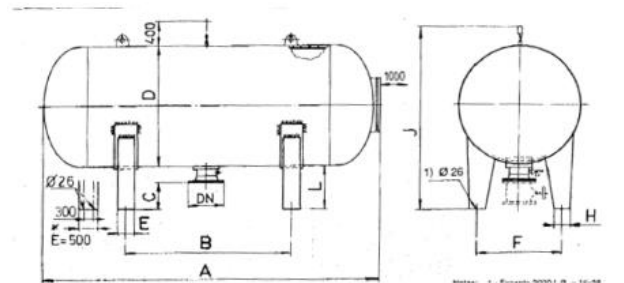
Se realizó el modelamiento y diseño de cada una de las alternativas investigadas y planteadas en la sección 3.5 por medio de ALLIEVI. Para cada una de las alternativas planteadas a continuación se tuvo como base el reducir la oscilación de presiones presentadas en el escenario de maniobra crítico definido en la sección 3.6.8 (escenario de operación con 3200 l/s- Cierre simultaneo de todas las válvulas (Angelinos, Bosconia, Embalse) en $t=5s$) para encontrarse dentro del rango de resistencia de la tubería y evitar la cavitación del sistema.

7. Alternativa 1

La primera alternativa planteada fue un sistema de tanques hidroneumáticos. Para iniciar el diseño se definió el tipo de tanque hidroneumático a utilizar. se usó un tanque horizontal en acero galvanizado de 36 bar o 367,2 mca de resistencia de la marca HIERROTAN, el cual tiene una capacidad de 40 m³, con un diámetro de 2,5 m y una longitud de 8,15 m, el modelo del tanque es presentado en la figura 31.

Figura 31.

Modelo de tanque hidroneumático tipo.



Se estableció el valor de rugosidad al interior del tanque, este valor se obtuvo de la tabla 5.

Tabla 4.

Coefficientes típicos de rugosidad absoluta para diferentes materiales.

Material	coeficiente de rugosidad absoluta e (mm)
Asbesto cemento	0.0015
Latón	0.0015
Tabique	0.6
Fierro fundido	0.26
Concreto (cimbra metalica)	0.18
Concreto (cimbra madera)	0.6
Concreto simple	0.36
Cobre	0.0015
Acerro corrugado	45
Acerro galvanizado	0.15
Acerro (esmalado)	0.0048
Acerro (nuevo, sin recubrim)	0.045
Acerro (remachado)	0.9
Plomo	0.0015
Plástico (PVC)	0.0015
Madera (duelas)	0.18
Vidrio	0.0015

Se definieron posibles ubicaciones para sistemas de tanques hidroneumáticos. Primero se localizaron los puntos más críticos del sistema, generalmente estos puntos se presentaron cerca de las estructuras de regulación involucradas en la maniobra de cierre, por esta razón se definió un sistema de tanques hidroneumáticos conectados en paralelo para las zonas próximas a cada válvula de regulación, es decir 3 sistemas de tanques hidroneumáticos a lo largo de la conducción, tal como se presenta en las figuras 32 y 33.

Figura 32.

Ubicación de sistemas de protección válvulas de regulación Angelinos y Bosconia.

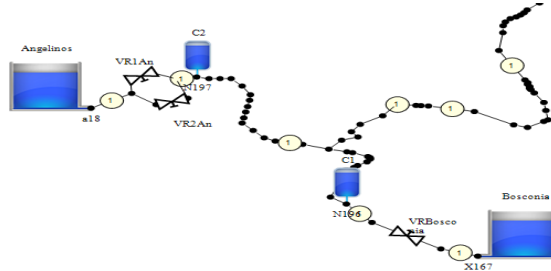
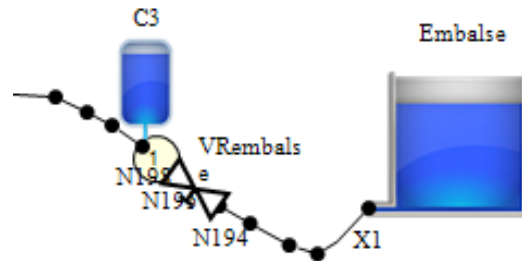


Figura 33.

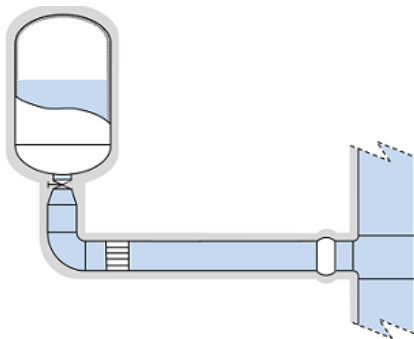
Ubicación de sistema de protección válvula de regulación Embalse



Para la tubería de unión entre el sistema de tanques y la línea principal de aducción se usó tubería en acero de 2 metros de longitud tal como lo muestra la figura 34

Figura 34.

Modelo de conexión de tanque hidroneumático a la línea de conducción.



Se calcularon los coeficientes de pérdidas de entrada ($K_{entrada}$) y salida (K_{salida}) para cada sistema de tanques. Para eso se usó el asistente de ALLIEVI, ilustrado en la figura 35, el cual con los datos de la tubería de conexión calculó dichos coeficientes.

Figura 35.

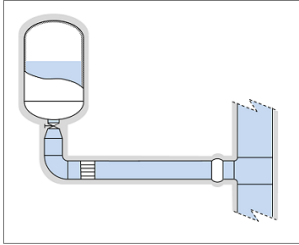
Asistente de ALLIEVI para cálculo de coeficientes de pérdidas de tanque hidroneumático.

Cálculo de los coeficientes de pérdidas de salida y entrada al calderín

El asistente permite el cálculo de los coeficientes de pérdidas del calderín seleccionado

Número de calderines	<input type="text" value="1"/>
Diámetro ramal de unión	<input type="text" value="300"/> mm
Sin by-pass	<input type="checkbox"/>
Sin dissipador	<input type="checkbox"/>
K de salida del calderín	<input type="text" value="68,948"/> $m/(m^3/s)^2$
K de entrada al calderín	<input type="text" value="102,6"/> $m/(m^3/s)^2$

[Asistente avanzado](#)



La presión de hinchado del gas dentro del tanque se halló utilizando el asistente para cálculo de presión de hinchado de ALLIEVI, ilustrado en la figura 36, para esto se introdujo el volumen de aire inicial calculado en régimen permanente y la presión del gas calculada en el régimen permanente.

Figura 36.

Asistente para cálculo de presión de hinchado dentro del tanque hidroneumático.

🔴 Cálculo de la presión de hinchado del calderín C1

Cálculo de la presión de hinchado del calderín seleccionado

Permite asignar un valor a la presión de hinchado o calcularla mediante la introducción de tres parámetros

Especificar presión de hinchado

Presión de hinchado (bar)

Calcular presión de hinchado

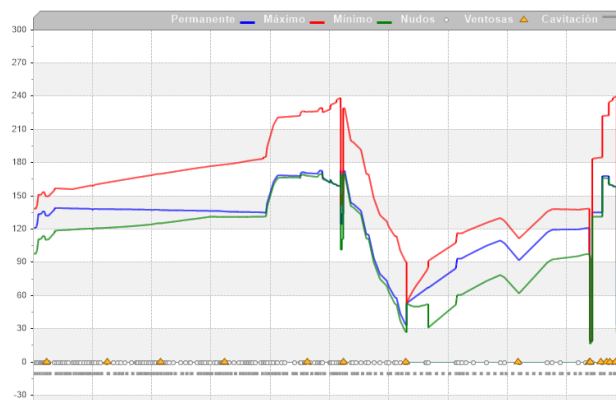
Volumen del calderín (m3)	<input type="text" value="40,01"/>
Volumen inicial gas (m3)	<input type="text" value="5,12"/>
Presión inicial gas (m)	<input type="text" value="159,11"/>
Presión de hinchado (bar)	<input type="text" value="1,11"/>

El último paso consistió en encontrar el número de tanques óptimo donde se buscó cumplir los parámetros de presiones máximas indicadas por la norma RAS título B.6. Se realizó una iteración modificando el número de tanques de cada sistema. Se encontró como solución final que cada sistema de tanques hidroneumáticos debía ser conformado por unos cinco tanques conectados en paralelo.

Se realizó el cálculo del régimen transitorio en el sistema para el escenario de maniobra de válvulas crítico implementando la alternativa 1. La figura 37 ilustra la línea de presión sobre la aducción durante el transitorio implementado la alternativa 1 como sistema de protección. Se obtuvo una sobrepresión máxima de aproximadamente 240 mca y una subpresión máxima de aproximadamente 15 mca.

Figura 37.

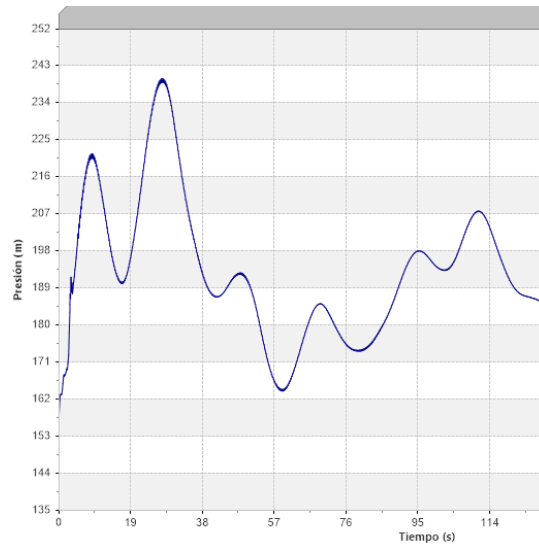
Líneas de sobrepresión (rojo), permanente (azul) y subpresión (verde) en la aducción implementando alternativa 1



La figura 38 ilustra la oscilación de presiones sobre la válvula de regulación Bosconia donde se presentó la máxima sobrepresión en el sistema.

Figura 38.

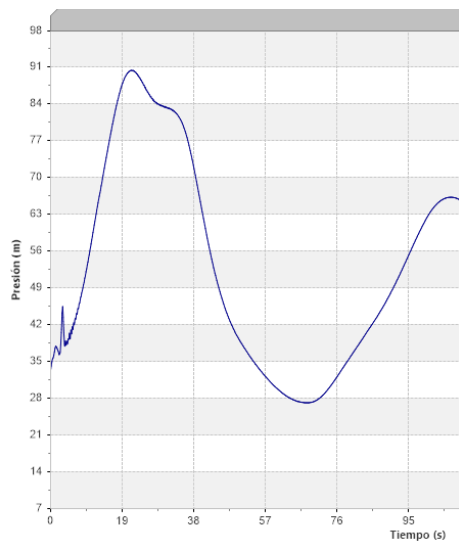
Diagrama de presión punto más crítico de sobrepresiones, válvula de regulación Bosconia implementando alternativa 1.



La figura 39 ilustra la oscilación de presiones sobre la válvula de regulación Bosconia donde se presentó la máxima subpresión en el sistema.

Figura 39.

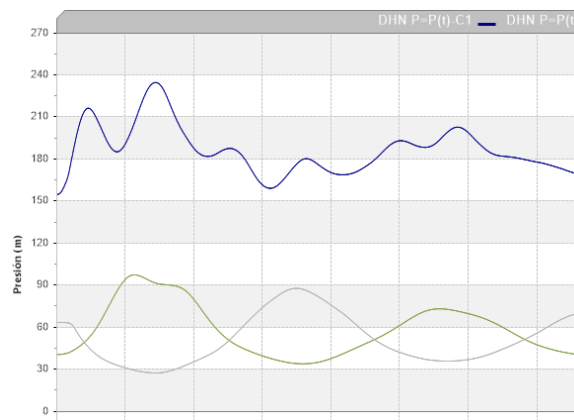
Diagrama de presión punto más crítico de subpresiones, válvula de regulación Angelinos implementando alternativa 1.



Finalmente revisó la presión interior dentro de los sistemas de tanques para verificar que no fuese comprometida su integridad durante el transitorio, tal como lo muestra la figura 40 la máxima presión fue de aproximadamente 248 mca en el sistema de tanques C1, la cual es inferior a la resistencia máxima del tanque (367,2 mca).

Figura 40.

Presión interior dentro de los sistemas de tanques hidroneumáticos durante el transitorio.



8. Alternativa 2

En esta alternativa se planteó un sistema de 2 válvulas de alivio y una válvula de retención.

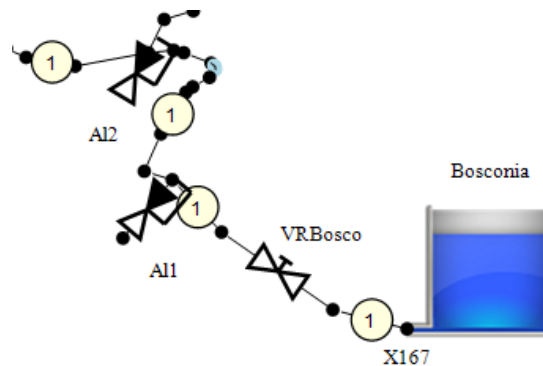
La ubicación de las válvulas de alivio se propuso de acuerdo con:

- Inicio de zonas de altas sobrepresiones en el sistema.
- Inicio de zonas de altas velocidades de flujo dentro del sistema.

La figura 41 ilustra la ubicación de las válvulas de alivio, estas se ubicaron al inicio y al final de la zona de altas sobrepresiones.

Figura 41.

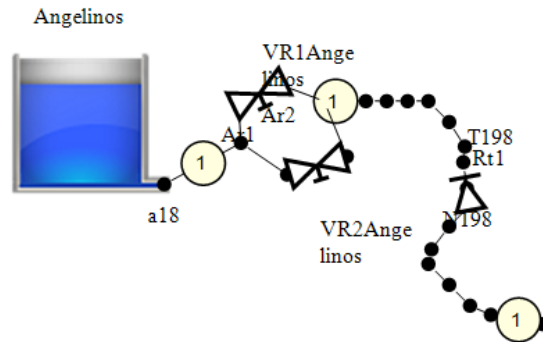
Válvulas de alivio ubicadas a inicio (AI2) y final (AI1) de zona de altas sobrepresiones (zona baja y cercana a estructura de regulación Bosconia demarcada en una elipse roja) en la línea de aducción.



La ubicación de la válvula de retención obedeció a la zona de máximas supresiones en el sistema, tal como lo muestra la figura 42.

Figura 42.

Válvula de retención ubicada a inicio de zona de altas subpresiones (zona elevada y cercana a estructura de regulación Angelinos) en la línea de aducción.



Para las válvulas de alivio se usó válvulas anticipadoras de golpe de ariete tipo globo modelo 52-01 de marca CLA-VAL de diferentes diámetros, ilustrada en la figura 43.

Figura 43.

Válvula de alivio tipo 52-01. Fuente: CLA-VAL.



Para definir el diámetro de válvula a utilizar en el sistema se hizo uso del Anexo 1, teniendo como datos de entrada el caudal y el diámetro de la tubería en las zonas seleccionadas anteriormente.

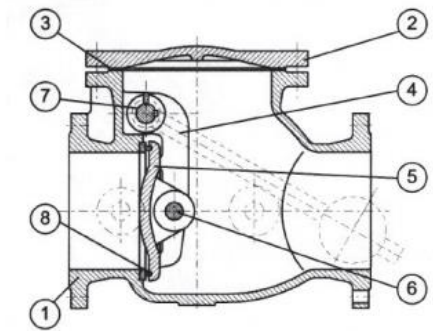
De esta selección se implementaron dos válvulas de DN 350. En ALLIEVI se introdujo los datos básicos de cada válvula de alivio como: diámetro nominal, cota de la válvula, tipo de válvula, coeficiente de pérdidas. El valor de coeficiente de pérdidas se obtiene según el anexo 2.

Un aspecto importante de las válvulas de alivio es la maniobra de la válvula. Se introdujo una presión de apertura máxima de válvula y una presión de cierre de válvula, para esto se obtuvo el dato de presión en régimen permanente para cada nodo donde se conecta una válvula de alivio, este valor se estableció como el de cierre de válvula; como valor máximo se estableció un valor cercano al valor máximo de presión resistente de la tubería.

La válvula de retención usada fue de la marca DINICOLA tipo 558-1 serie 48 de DN 900, esta se ilustra en la figura 45.

Figura 44.

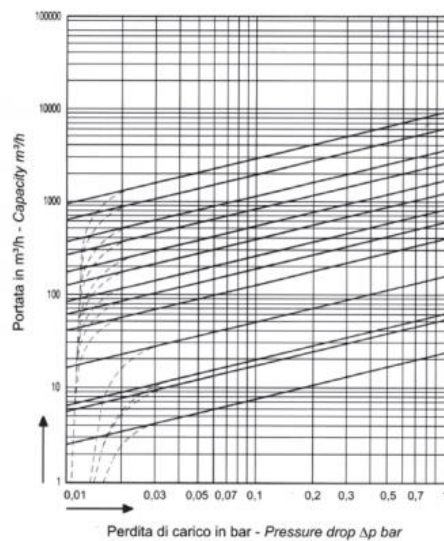
Válvula de retención DINICOLA tipo 558-1 serie 48. Fuente: Manual válvulas de retención DINICOLA.



En el programa se introdujo los datos básicos de la válvula, diámetro nominal y coeficiente de perdidas adimensional, adicional se introduce el coeficiente de pérdidas en función de la apertura de la válvula, para ello se empleó la figura 48.

Figura 45.

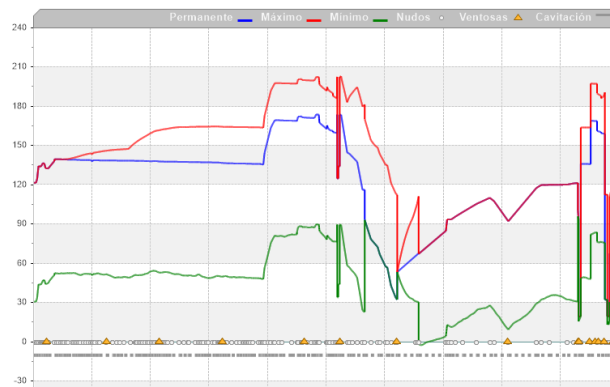
Diagrama de perdida de carga válvula de retención tipo 558-1 serie 48. Fuente: Manual válvulas de retención DINICOLA.



Finalmente, se ejecutó el régimen transitorio para la maniobra de válvulas crítica implementado el sistema de protección alternativa 2. La figura 47 ilustra la línea de presión sobre la aducción durante el transitorio implementado la alternativa 2 como sistema de protección. Se obtuvo una sobrepresión máxima de aproximadamente 200 mca y una subpresión máxima de aproximadamente 0 mca.

Figura 46.

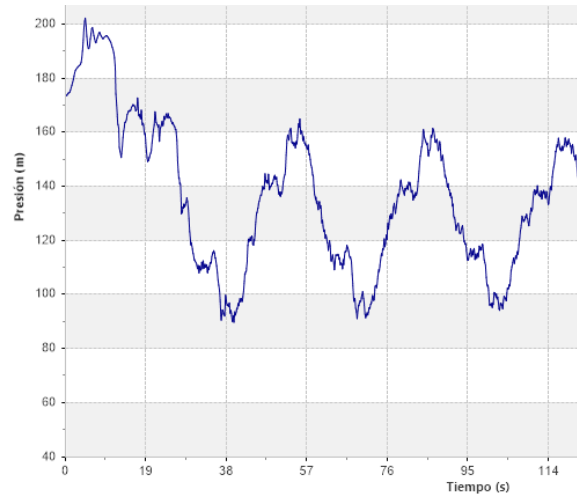
Líneas de sobrepresión (rojo), permanente (azul) y subpresión (verde) en la aducción implementando alternativa 2.



La figura 48 ilustra la oscilación de presiones sobre la válvula de regulación Bosconia donde se presentó la máxima sobrepresión en el sistema.

Figura 47.

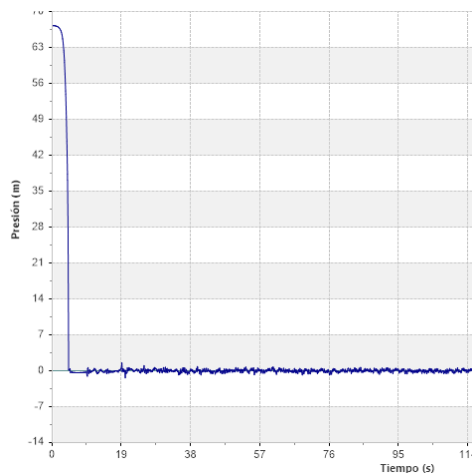
Diagrama de presión punto más crítico de sobrepresiones, válvula de regulación Bosconia implementando alternativa 2.



La figura 49 ilustra la oscilación de presiones sobre la válvula de regulación Embalse donde se presentó la máxima subpresión en el sistema.

Figura 48.

Diagrama de presión punto más crítico de subpresiones, válvula de regulación Embalse (efecto provocado por ventosa) implementando alternativa 2.



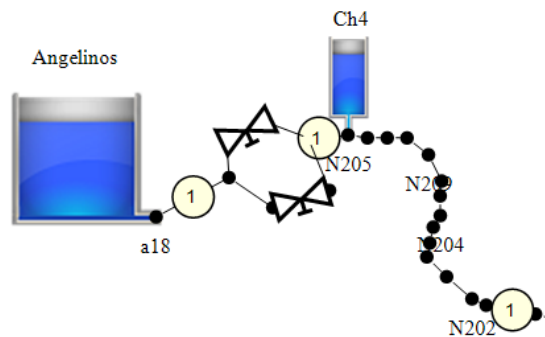
9. Alternativa 3

En esta alternativa se planteó una chimenea de equilibrio apoyada por válvulas de alivio distribuidas en la conducción.

La ubicación de la chimenea de equilibrio sobre la línea se hizo en el punto más alto de la aducción esto con el fin de obtener la chimenea de menor dimensión tal como lo muestra la figura 50.

Figura 49.

Ubicación chimenea de equilibrio en la aducción



Se realizó un diseño preliminar de la chimenea para ello se introdujo los datos básicos de la chimenea en el programa como: tipo de chimenea, sección constante (SC), diámetro, rugosidad de las paredes internas y cota; posteriormente se ejecutó el régimen permanente y este calculó la altura necesaria de la chimenea, como se muestra en la tabla 6 se propuso una chimenea de aproximadamente 43 m de altura.

Tabla 5.

Cálculo de altura de chimenea en régimen permanente.

	Nombre	Nivel (m)	Vol. gas (m3)
1	Ch4	42.32	

Para la tubería de conexión entre la chimenea de equilibrio y la línea principal se usó tubería en acero DN 500.

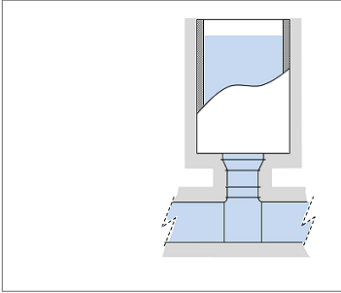
Se realizó el cálculo de los coeficientes de pérdidas a la entrada y salida de la chimenea, para ello se usó el asistente de ALLIEVI como lo muestra la figura 51.

Figura 50.

Asistente de cálculo de coeficientes de entrada y salida de chimenea

Tubería de impulsión	<input type="text" value="1000"/>	mm
Ramal de unión	<input type="text" value="500"/>	mm
Orificio de la chimenea	<input type="text" value="500"/>	mm
Chimenea	<input type="text" value="20"/>	m
Sin codos en ramal de unión		
K de salida de la chimenea	<input type="text" value="0,75066"/>	$m/(m^3/s)^2$
K de entrada a la chimenea	<input type="text" value="2,4796"/>	$m/(m^3/s)^2$

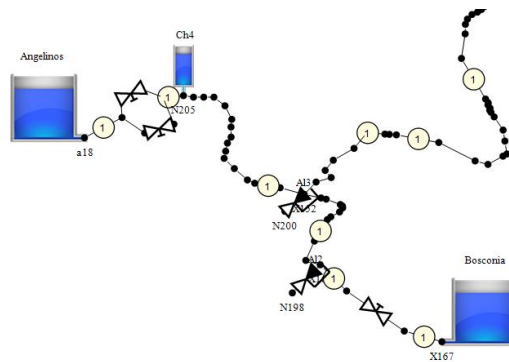
[Asistente avanzado](#)



Las válvulas de alivio planteadas en el sistema fueron de iguales características y ubicación a las usadas en la alternativa 2, como se ilustra en la figura 52.

Figura 51.

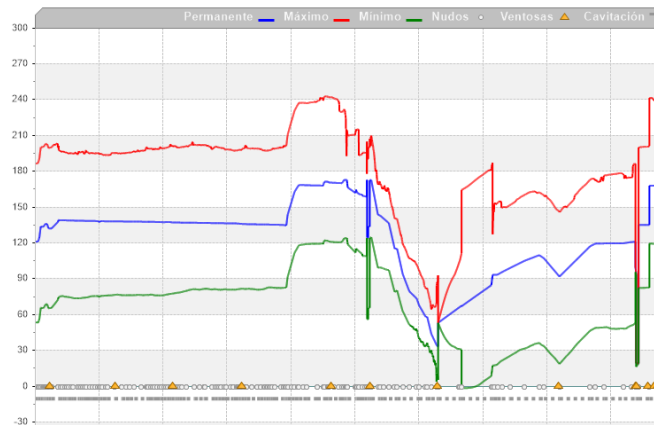
Válvulas de alivio implementadas en la alternativa 3.



Finalmente se ejecutó el régimen transitorio para la maniobra de válvulas crítica implementando el sistema de protección alternativa 3 y se obtuvo los siguientes resultados. La figura 53 ilustra la línea de presión sobre la aducción durante el transitorio implementado la alternativa 3 como sistema de protección. Se obtuvo una sobrepresión máxima de aproximadamente 240 mca y una subpresión máxima de aproximadamente 0 mca.

Figura 52.

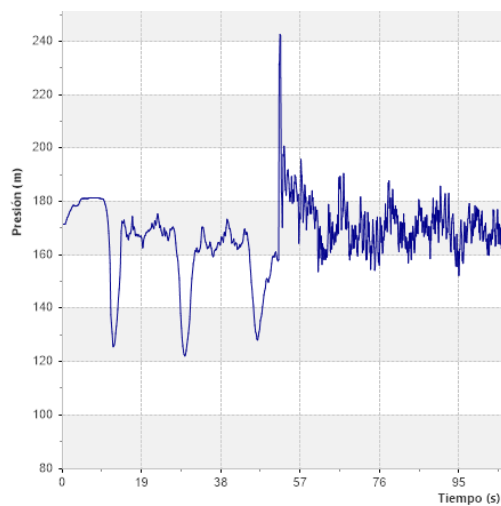
Líneas de sobrepresión (rojo), permanente (azul) y subpresión (verde) en la aducción implementando alternativa 3



La figura 54 ilustra la oscilación de presiones sobre la válvula de regulación Bosconia donde se presentó la máxima sobrepresión en el sistema.

Figura 53.

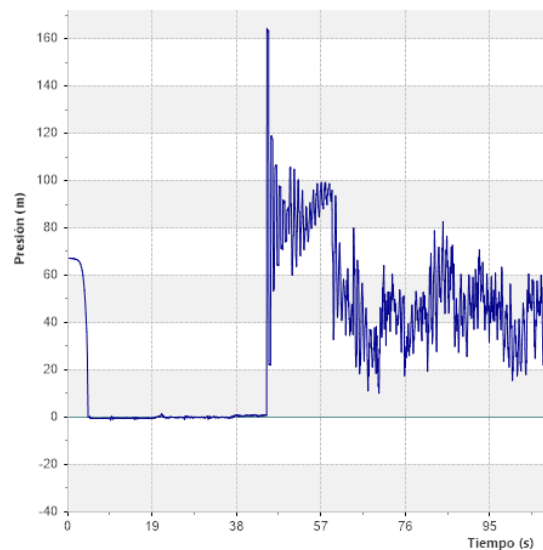
Diagrama de presión punto más crítico de sobrepresiones, inicio de zona de incremento de presión implementando alternativa 3.



La figura 55 ilustra la oscilación de presiones sobre la válvula de regulación Embalse donde se presentó la máxima subpresión en el sistema.

Figura 54.

Diagrama de presión punto más crítico de subpresiones, válvula de regulación Embalse implementando alternativa 3



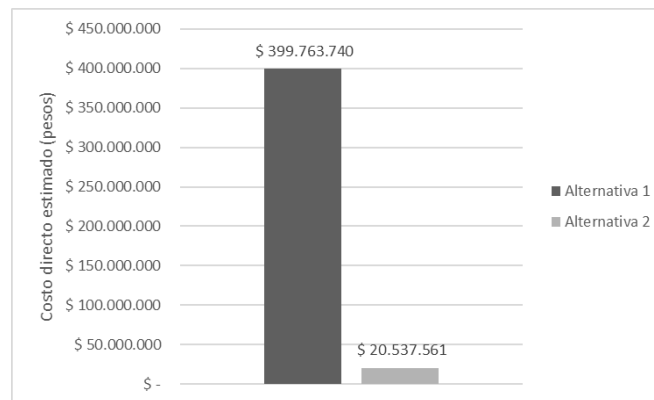
10. Estudio de costos y eficiencia

Se realizó una estimación de costo directo de implementación para cada una de las alternativas de sistemas de protección planteadas. La estimación de costo se realizó de manera general teniendo en cuenta el costo de equipos, material e instalación del sistema de protección. La alternativa 3 no fue evaluada ya que, al requerir de una chimenea de equilibrio de grandes dimensiones es inadecuada su construcción, por ende, esta alternativa fue descartada

automáticamente. Solo se compararon las alternativas 1 y 2. Los resultados de la estimación de costo directo son ilustrados en la figura 56

Figura 55.

Estimación de costo directo para cada alternativa.



La comparación de eficiencia se hizo mediante un cuadro comparativo ilustrado en la tabla 9. El criterio principal de evaluación fue la capacidad del sistema para reducir las sobrepresiones y subpresiones, la evaluación se realizó mediante la asignación de un valor de 1 a 3, donde 1 es el valor más bajo de eficiencia y 3 el valor más alto de eficiencia. Se observó que la alternativa 1 era la mejor controlando subpresiones y la alternativa 2 controlando sobrepresiones.

Tabla 6.

Comparación de eficiencia para cada alternativa planteada.

Alternativa	Control de sobrepresiones	Control de subpresiones
1	2	3
2	3	2
3	1	2

11. Resultados

11.1 Selección de alternativa

Para la selección de alternativa se tuvo en cuenta aspectos de:

- Eficiencia, comportamiento de presiones de la línea durante el transitorio
- Costos, el costo directo de implementación del sistema de protección.

Analizando la comparación de alternativas realizada en la sección 3.7, se obtuvo que la mejor opción fue la planteada como **alternativa 2**. En cuanto al estudio de eficiencia esta fue más eficiente para el control de sobrepresiones que las demás alternativas, pero menos eficiente para el control de subpresiones que la alternativa 1 pero con relación al estudio de costo directo realizado, es la más económica por una amplia diferencia con respecto a la alternativa 1.

12. Análisis de resultados

12.1 Escenario de maniobra crítico

Observando los datos obtenidos de las diferentes maniobras de válvulas modeladas en la sección 3.6.8, se obtuvo que el escenario de maniobra crítico fue el **escenario de operación con 3200 l/s- Cierre simultaneo de todas las válvulas (Angelinos, Bosconia, Embalse) en t=5s**, el cual presentó las oscilaciones más bruscas de presión en la línea. Las figuras 28, 29 y 30 representan la oscilación de presiones durante el transitorio. La sobrepresión máxima fue de 940 mca, este valor indicó que la sobrepresión máxima en este escenario excedió aproximadamente 4 veces la resistencia máxima de la tubería. En cuanto a la subpresión máxima de -270 mca, este valor indicó que el sistema entró en cavitación. Estos valores indican que es completamente necesario la implementación de un sistema de protección en el sistema si se llegase a presentar este escenario de maniobra crítico.

12.2 Compatibilidad del modelo

Se realizó una evaluación de compatibilidad del modelo realizado en ALLIEVI para ello se partió de evaluar los valores de presión en la aducción obtenidos al ejecutar el modelo en ALLIEVI en régimen permanente presentados en la tabla 10, posteriormente se compararon con los datos presentados en el MEMORANDO TÉCNICO ESTUDIOS HIDRÁULICOS C331-MT-01 ilustrados en la figura 57.

Figura 56.

Perfil de presiones sobre la Aducción en régimen permanente.

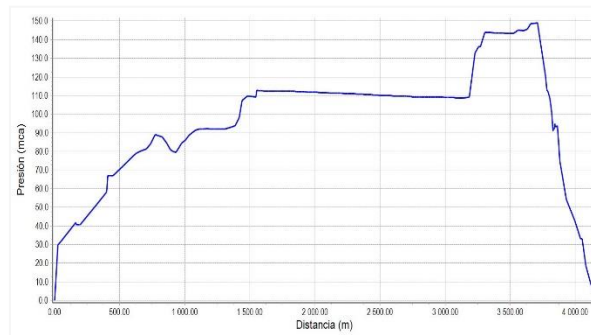


Tabla 7.

Datos presiones sobre la Aducción en régimen permanente obtenidos del modelo en ALLIEVI.

Resultados del régimen permanente. Escenario: Principal

Permite visualizar los resultados del cálculo para el régimen permanente, seleccionando el tipo de elemento

	Nombre	H(m)	Pr(m)
103	X123	868.60	135.85
104	X124	868.39	135.79
105	X125	868.28	135.74
106	X126	867.94	135.67
107	X127	867.81	135.54
108	X128	867.67	135.43
109	X129	867.54	135.32
110	X130	867.41	135.20
111	X131	867.25	144.11
112	X132	867.09	155.45
113	X133	866.97	163.47
114	X134	866.85	167.89

Comparando el perfil de presiones del MEMORANDO TÉCNICO ESTUDIOS HIDRÁULICOS C331-MT-01 y los datos obtenidos de ALLIEVI, se observó que la presión máxima del sistema es 150 m y 167.89 m respectivamente; Al ser muy similares se aceptó que los modelos son compatibles.

12.3 Comparación de resultados

Se evaluaron los diferentes sistemas de protección planteados anteriormente con los usados en otros proyectos similares.

Lahlou, M en su investigación del golpe de ariete para el The National Environmental Services Center en 2005 usó como sistema de protección para una conducción un sistema de tanques hidroneumáticos intercalados en la tubería de impulsión. Lahlou concluye “ Este dispositivo favorece, al igual que las chimeneas de equilibrio, la oscilación de la masa de agua, sin necesidad de alcanzar las alturas de éstas. Resultan efectivas para la reducción del golpe de ariete, pero son caros y requieren constante mantenimiento para la reposición de las pérdidas de aire” lo cual esta acorde a los resultados mostrados al implementar la alternativa 1 como sistema de protección en la aducción.

Twyman, J en su investigación “ANÁLISIS DEL GOLPE DE ARIETE EN UN SISTEMA DE DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA (2017)” utilizó válvulas de retención intercaladas, al usar varias de estas válvulas, lo consiguió dividir la tubería en tramos. Cada tramo tendrá su propio golpe, aunque disminuido, por tener menos longitud crítica. En nuestro proyecto la válvula de retención usada en la alternativa 2 logró aislar la zona de subpresiones evitando que existieran presiones inferiores a la atmosférica tal como lo establece Twyman en su sistema.

De Assas, P; Liñán en su proyecto “AMORTIGUACIÓN DE LAS OSCILACIONES E PRESIÓN PRODUCIDAS POR EL GOLPE DE ARIETE (1995)” Plantearon el uso de una chimenea de equilibrio como sistema de protección ante una maniobra rápida de válvulas.

Establecieron que la chimenea de equilibrio facilita la oscilación de la masa de agua, eliminando la sobrepresión originada en un golpe, pero sus dimensiones limitan su uso al ser considerablemente grande dependiendo obviamente del diámetro de la conducción y de la distancia a transportar el caudal. Para nuestro proyecto de transporte de un gran caudal a una distancia considerable implementando la alternativa 3 se obtiene una chimenea de equilibrio de una altura de 43 m aproximadamente lo cual hace inapropiado su uso.

Discusión. Hace referencia a la evaluación e interpretación de las implicaciones de los resultados que arrojó el estudio. Se enfatiza en las consecuencias teóricas de los resultados y la validez de las conclusiones.

13. Conclusiones

Se realizó un análisis completo de la línea de aducción identificando antecedentes, elementos, características y funcionamiento del sistema

Se realizó un análisis de posibles puntos críticos en la evaluación de transitorios y posteriormente se corroboró su ubicación.

Se estableció un escenario de maniobra de válvulas, en el cual se cierran las 4 principales válvulas del sistema en tiempo mínimo ($t=5s$) que genera un transitorio crítico produciendo grandes oscilaciones de presión y por ende las máximas sobrepresiones y subpresiones, las cuales ponen en riesgo la integridad de toda la línea y marcan la necesidad de implementar un sistema de protección ante el transitorio.

La implementación de tanques hidroneumáticos como sistema de protección produjo una gran reducción en la oscilación de presiones durante el transitorio, pero es una alternativa muy costosa.

Se recomienda la implementación de la alternativa 2 como sistema de protección ante transitorios para la aducción entre el embalse de Bucaramanga y la PTAP los Angelinos.

La implementación de ALLIEVI como software de apoyo para el análisis de transitorios y sistemas de protección es notablemente satisfactoria, un programa que permite la versatilidad de análisis otorgando la capacidad de generar diferentes escenarios y evaluando distintos puntos del sistema. Además, como herramienta para diseño de sistemas de protección resulta muy útil debido a su simplicidad y fácil aplicación dentro del sistema. El software es de uso libre y de sencillo entendimiento, haciendo notable su aplicación en el ámbito académico como sistema de apoyo para el entendimiento de transitorios en sistemas de conducción.

Referencias Bibliográficas

Abreu J.; Cabrera E.; Espert V.B.; Garcia-Serra J.; Sanz F. “Transitorios hidráulicos del régimen estacionario al golpe de ariete.

Amarís Castro, G. E., Guerrero Barbosa, T. E., & Sánchez Ortiz, E. A. (2015). Comportamiento de las ecuaciones de Saint-Venant en 1D y aproximaciones para diferentes condiciones en régimen permanente y variable. *Revista Tecnura*, 19(45), 75-87. doi: 10.14483/udistrital.jour.tecnura.2015.3.

Conalvias construcciones; IEH GRUCON S.A. “Diseño para construcción variante de la tubería de aducción sistema de acueducto de Bucaramanga”

Eduardo Rodal Canales, Alejandro Sánchez Huerta y René Autrique Ruiz (2014). ESTUDIO EN MODELO FÍSICO DEL FENÓMENO DE SEPARACIÓN DE

- COLUMNAPERMITIENDO EL INGRESO DE AIRE. Ingeniería, I. De, Universitaria, C., & México, D. F.
- González Casas, Fernando, Zamudio Huertas, Eduardo, & García Ubaque, César Augusto. (2015). Demostración y análisis del golpe de ariete por el método de los promedios aritméticos. *Tecnura*, 19(spe), 143-151.
- Gustavo Adolfo Ortiz Masek (2006). EL GOLPE DE ARIETE EN SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE. Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Jung, B.S.; Karney, B.W.; Boulos, P.F.; Wood, D.J. (2007), The Need for Comprehensive Transient Analysis of Distribution Systems. *Journal AWWA*, 112-123
- Luis E. PÉREZ FARRÁS, Adolfo GUITELMAN (2005), ESTUDIO DE TRANSITORIOS: GOLPE DE ARIETE. UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES.
- Marchi, E., & Rubatta, A. (1981). *Meccanica dei fluidi : principi e applicazioni idrauliche*.
- RAS 2000, Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico RAS – 2000, Título B, pp. 89 - 171, Ministerio de Desarrollo Económico Dirección de Agua Potable y Saneamiento Básico, Bogotá, Colombia.
- Saldarriaga, Juan, 2007, *Hidráulica de Tuberías Abastecimiento de Agua, Redes, Riegos*, Editorial, Alfaomega, Bogotá, Colombia.
- Sanchez, Martinez. (2014). FLUJO TRANSITORIO EN SISTEMAS A PRESIÓN DISPOSITIVOS DE PROTECCIÓN. Instituto tecnológico de aguas calientes-México.
- Street, Robert L., Watters, Gary Z., Vennard, John K., 1996, *Mecanica Elemental de Fluidos – Septima Edición (“Elementary Fluid Mechanics, Sevent Edition”)*, John Wiley and Sons, USA.

Twyman, J. (2018). Golpe de ariete en una red de tuberías debido al cierre rápido de una válvula.

Revista ingeniería de construcción, 33(2), 193-200.

Twyman Q., John. (2018). Water hammer analysis using an implicit finite-difference method.

Ingeniare. Revista chilena de ingeniería, 26(2), 307-318.

<https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/sistema-espaniol-gestion->

[agua/34transporteaguacanalesconduccionesytrasvasesdisenoconstruccionyexplotacion_tm](https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/sistema-espaniol-gestion-agua/34transporteaguacanalesconduccionesytrasvasesdisenoconstruccionyexplotacion_tm30-215757.pdf)

[m30-215757.pdf](https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/sistema-espaniol-gestion-agua/34transporteaguacanalesconduccionesytrasvasesdisenoconstruccionyexplotacion_tm30-215757.pdf)

Victor L. Streeter, E. Benjamin Wylie, (1967) Hydraulic transients.

Yalán Cano, C. H. (2014). Análisis de transitorios hidráulicos en sistemas de bombeo de agua para

el sector minero.