

**MONTAJE DE UN MODELO FÍSICO PARA LA PRUEBA DE LA INCIDENCIA
DEL FENÓMENO DE GOLPE DE ARIETE EN DIVERSAS LONGITUDES DE
TUBERÍA**

**DAVID CAMILO BOHÓRQUEZ FORERO
CAMILO ANDRÉS VELÁSQUEZ LEÓN**

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C.
2015**

**MONTAJE DE UN MODELO FÍSICO PARA LA PRUEBA DE LA INCIDENCIA
DEL FENÓMENO DE GOLPE DE ARIETE EN DIVERSAS LONGITUDES DE
TUBERÍA**

**DAVID CAMILO BOHÓRQUEZ FORERO
CAMILO ANDRÉS VELÁSQUEZ LEÓN**

**Trabajo de grado para optar al título de
Ingeniero Civil**

**Director
ALEX MAURICIO GONZÁLEZ MÉNDEZ
Ingeniero Civil, M.Sci.**

**Asesor
JUAN SEBASTIÁN DE PLAZA SOLÓRZANO
Ingeniero Civil**

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C.
2015**



Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)

La presente obra está bajo una licencia:
Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)

Para leer el texto completo de la licencia, visita:
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.5/co/>

Usted es libre de:



Compartir - copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra
hacer obras derivadas

Bajo las condiciones siguientes:



Atribución — Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciante (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o que apoyan el uso que hace de su obra).



No Comercial — No puede utilizar esta obra para fines comerciales.

Nota de aceptación

Director de Investigación
Ing. Alex Mauricio González Méndez

Asesor Metodológico
Ing. Javier

Jurado

Bogotá D.C., noviembre de 2015

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	11
1. GENERALIDADES	12
1.1 ANTECEDENTES	12
1.2 PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	14
1.2.1 Descripción del problema	14
1.2.2. Formulación del problema	14
1.3 OBJETIVOS	15
1.3.1 Objetivo general	15
1.4 JUSTIFICACIÓN	15
1.5 DELIMITACIÓN	15
1.5.1 Espacio	15
1.5.2 Tiempo	16
1.5.3 Contenido	16
1.5.4 Alcance	16
2. MARCO REFERENCIAL	17
2.1 OSCILACIONES DE PRESIÓN EN LA TUBERÍA	21
2.2 TIEMPO DE CIERRE DE LA VÁLVULA Y TIEMPO DE PARADA DE BOMBAS. CIERRE LENTO Y CIERRE RÁPIDO	25
2.3 ECUACIONES FUNDAMENTALES DE MICHAUD Y ALLIEVI	28
2.4 ALLIEVI UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA (SOFTWARE)	28
3. METODOLOGÍA	31
3.1 TIPO DE ESTUDIO	31
3.2 FUENTES DE INFORMACIÓN	31
3.3 DISEÑO METODOLÓGICO	31
3.1.1 Modelo matemático	31
3.1.1.1 Descripción del modelo	31
3.1.1.2 Ecuaciones	32
3.1.1.3 Longitud, número de vueltas y altura bobina	32
3.1.2 Modelo físico	33
3.1.2.1 Descripción teórica	33
3.1.2.2 Descripción práctica	34
4. RESULTADOS	47
4.1 MODELO FÍSICO	47
4.1.1 Esquema montaje final	47
4.1.2 Resultados montaje físico	48
4.2 SIMULACIÓN EN ALLIEVI	52

	pág.	
4.2.1	Primera simulación	53
4.2.2	Segunda simulación	54
4.2.3	Tercera simulación	56
4.2.4	Gráficas de presiones y caudal al cierre de la válvula	58
5.	CONCLUSIONES	61
6.	RECOMENDACIONES	62
	BIBLIOGRAFÍA	63
	ANEXOS	65

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Valores orientativos de k para la fórmula de Allievi	20
Tabla 2. Valores del coeficiente K según Mendiluce	27
Tabla 3. Ecuaciones Michaud y Allievi (Real)	28
Tabla 4. Valores iniciales para el cálculo de la longitud	32
Tabla 5. Datos iniciales depósitos primera simulación	53
Tabla 6. Datos iniciales tuberías primera simulación	53
Tabla 7. Datos iniciales válvula de regulación primera simulación	53
Tabla 8. Datos iniciales depósitos segunda simulación	54
Tabla 9. Datos iniciales tuberías segunda simulación	54
Tabla 10. Datos iniciales válvula de regulación segunda simulación	55
Tabla 11. Datos iniciales de ley segunda simulación	55
Tabla 12. Datos iniciales depósitos tercera simulación	56
Tabla 13. Datos iniciales tuberías tercera simulación	56
Tabla 14. Datos iniciales válvula de regulación tercera simulación	56
Tabla 15. Datos iniciales ley tercera simulación	56

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Cierre de válvula en B	18
Figura 2. Cierre rápido de válvula en B	19
Figura 3. Cierre de válvula instante $t=0$	21
Figura 4. Cierre de válvula al instante $t=L/a$	22
Figura 5. Cierre de válvula al instante $t= (L/2)$	22
Figura 6. Cierre de válvula al instante $t= (3L/2)/a$	23
Figura 7. Cierre de válvula al instante $t = 2L/a$	23
Figura 8. Cierre de válvula al instante $t = 3L/a$	24
Figura 9. Cierre de válvula $t = (5L/2)/a$	24
Figura 10. Cierre de válvula al instante $t = 4L/a$	25
Figura 11. Coeficiente vs pendiente hidráulica	26
Figura 12. Coeficiente K	27
Figura 13. Toma de datos Caudal volumétrico	35
Figura 14. Montaje prueba bomba	35
Figura 15. Especificaciones Bomba Wolfgang	36
Figura 16. Construcción mesa montaje y tanque.	36
Figura 17. Mesa montaje definitivo y ubicación de tanque y bomba.	37
Figura 18. Instalación empates tubería cobre	38
Figura 19. Tubería de cobre con diámetro definitivo e instalación de manómetros y acoples de tubería de cobre a PVC	38
Figura 20. Instalación 1 tubería PVC.	39
Figura 21. Instalación 2 tubería PVC.	39
Figura 22. Montaje inicial	40
Figura 23. Montaje final (Vista frontal)	41
Figura 24. Montaje final (Vista lateral izquierda)	41
Figura 25. Instalación usada para el sistema de ducha en un hogar	42
Figura 26. Cámara de aire montaje	43
Figura 27. Vista lateral derecha	44
Figura 28. Vista posterior	44
Figura 29. Vista lateral derecha	45
Figura 30. Manómetro 1	45
Figura 31. Manómetro 2, tanque de almacenamiento y bomba	46
Figura 32. Vista frontal	46
Figura 33. Dirección de flujo y ubicación de elementos (vista frontal)	47
Figura 34. Dirección de flujo y ubicación de elementos (vista frontal)	48
Figura 35. Prueba vs Presión Final (1/2" y 20 cm)	49
Figura 36. Prueba vs Presión Final (1/2" vs 30 cm)	49
Figura 37. Prueba vs Presión Final (1/2" y 40 cm)	50
Figura 38. Prueba vs Presión Final (1" y 20 cm)	50
Figura 39. Prueba vs Presión Final (1"y 30 cm)	51
Figura 40. Prueba vs Presión Final (1" y 40 cm)	51

	pág.
Figura 41. Tubos vs Presión Final	52
Figura 42. Primera simulación	54
Figura 43. Segunda simulación	55
Figura 44. Tercera simulación	57
Figura 45. Presión vs Tiempo (Nodo 1)	58
Figura 46. Presión vs Tiempo (Nodo 2)	58
Figura 47. Presión vs Tiempo (Nodo 3)	59
Figura 48. Presión vs Tiempo (Nodo 4)	59
Figura 49. Presión vs Tiempo (Nodo 5)	60
Figura 50. Caudal vs Tiempo (Cierre de Válvula)	60

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Tabla de resultados de ensayos de modelo físico	65
Anexo B. Planos generales de modelo físico	83

INTRODUCCIÓN

El golpe de ariete es un fenómeno que se reconoce por el aumento de presión en tuberías debido al cierre de válvulas, el cierre gradual o rápido de una válvula hace que el sistema de tuberías genere depresión y sobrepresión debido al movimiento oscilatorio del agua en el interior de la tubería, lo que quiere decir una variación de presión en el sistema de tuberías.

El suministro de agua potable en hogares permite identificar que el uso de válvulas de cierre rápido es muy común, para esto se pensó en realizar un montaje que abarque cada una de las características de las instalaciones de suministro de agua potable, para este caso se medirá el golpe de ariete y se lograra determinar, teniendo en cuenta diferentes diámetros y longitudes de tubería que puedan ser usadas para trabajar como las cámaras de presión, para el montaje del modelo físico se van a mostrar dos formas de suministro de agua potable que son las más usuales, el suministro por bombeo y suministro por acometida.

El suministro por bombeo se implementara una bomba de medio caballo de fuerza que permitirá simular el suministro adecuado a una vivienda, para el suministro por acometida se utilizara una conexión a una llave manguera, donde la simulación en este caso será lo más cercano a una instalación de suministro de una vivienda.

El material usado en la actualidad para las instalaciones hidrosanitarias de hogares es el PVC, para el modelo físico a implementar se va a utilizar este material, pero como material adicional se utilizara el cobre, el cual nos permite una mayor resistencia a la sobrepresión, ya que sus especificaciones técnicas apropiadas por el fabricante nos permiten darle mayor seguridad al montaje, donde por el sistema de bombeo se alcanzaran presiones aproximadamente de 40 PSI en el momento en que la válvula es cerrada instantáneamente, también se tuvo en cuenta que el cobre hace que el comportamiento del fluido sea mejor.

1. GENERALIDADES

1.1 ANTECEDENTES

En el año 2005, se realizó en el laboratorio de hidráulica de la Universidad Católica de Colombia, un montaje del golpe de ariete, el cual fue una tesis de grado de ingeniería civil hecha por los estudiantes **VÍCTOR ALEJANDRO BOSA ABRIL y JEFREY ALEJANDRO CASTRO MORENO**, dada con el nombre de **“DISEÑO, CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA PARA MEDIR EL GOLPE DE ARIETE EN EL LABORATORIO”**.¹

A continuación se relaciona la introducción y las conclusiones de la tesis ya nombrada.

- Introducción. En todo sistema de conducción de agua o de cualquier fluido se pueden presentar cierres de válvulas o cambios bruscos de presión las cuales pueden llegar a causar grandes inconvenientes en especial en las conducciones largas, debido a esto es de una gran importancia conocerlos no solo analítica sino experimentalmente observando a una escala adecuada. Como esta necesidad no se suple en la universidad, surgió el propósito de diseñar para el laboratorio un sistema en el cual se pueda medir la presión generada por este fenómeno.

Para poder cumplir con todos los objetivos propuestos para el presente trabajo se diseñó una metodología en 4 fases o etapas en las cuales se distribuyó el trabajo de forma progresiva según como se fuera consiguiendo la información y los materiales necesarios para la construcción del montaje.

En la primera etapa se recopiló información de los diferentes métodos tales como bibliográficos, electrónicos, además de visitas a las universidades donde sí se encuentra instalado el montaje para hacer esta práctica, teniendo en cuenta las ventajas y desventajas de ellos.

Después en la segunda etapa se diseñó un montaje que satisficiera las necesidades del laboratorio de la universidad y se organizaron las pruebas que se deben realizar a dicho montaje, consiguiendo a la vez el material necesario para la construcción del mismo. Teniendo construido el montaje se procedió a hacer pruebas de funcionamiento y analizar los datos arrojados dando unas conclusiones y creando un informe de lo realizado.

¹ BOSA ABRIL, Víctor Alejandro y CASTRO MORENO, Jeffrey Alejandro. Diseño, construcción de un sistema para medir el golpe de ariete en el laboratorio. Trabajo de grado. Ingeniero Civil. Bogotá D.C: Universidad Católica de Colombia. Facultad de Ingeniería. Programa de Ingeniería Civil, 2005. 112 p.

El presente trabajo se espera no sirva solamente al personal de la universidad sino que pueda ser utilizado por estudiantes de otras instituciones que estén interesados, ayudando así a aumentar la calidad de la ingeniería en nuestro país.

Teniendo en cuenta esto se trató realizó un montaje de fácil manejo y adaptación a cualquier espacio dejando las partes posibles separadas una de otra, de aquí que pueda ser tomado como elemento completo o por separado para la realización de otros estudios ya sea en la universidad o en otro ente educativo.

- Conclusiones.

- Para el estudio del agua se deben adoptar algunos supuestos como que esta es un fluido ideal.

- Las variables más importantes para tener en cuenta en el estudio del golpe de ariete son el diámetro de la tubería, la longitud, el material, la columna de presión que se presente, el caudal y la velocidad de agua dentro del sistema.

- El golpe de ariete se presenta en mayor o menor cantidad dependiendo de la apertura de la válvula de cierre lento, la cual influye directamente en el caudal a fluir dentro del sistema.

- El sistema de cálculo de la sobrepresión arroja resultados un poco mayores a los reales pero se siguen adoptando debido a la seguridad y aproximación de los mismos a la realidad.

- Al instalar una almenara a un sistema donde se presenta golpe de ariete la función de esta es reducir los efectos presentados por el mismo.

- La sobrepresión máxima generada con respecto al nivel del tanque de presión constante fue de 1.6 cm. El periodo de la onda máximo para todas las prácticas fue de 53 segundos.

- El aporte del sistema para medir el golpe de ariete se verá en su verdadera magnitud cuando los estudiantes de la universidad católica puedan realizar la práctica en el laboratorio.

Durante el transcurso de cada una de las asignaturas de la línea de aguas se ha hablado sobre “golpe de ariete”, en el cual sólo se tratan aspectos teóricos y matemáticos, los cuales apenas permiten tener una idea básica de lo que es este fenómeno.

La importancia de realizar un modelo físico para el fenómeno del golpe de ariete es tener en cuenta que es fundamentalmente llevar este tema a la práctica por medio de un montaje que permite observar, analizar, comparar, calcular y

comprender aspectos fundamentales de este fenómeno, así afianzando los conocimientos aprendidos en la cátedra.

1.2 PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.2.1 Descripción del problema. El análisis del golpe de ariete es muy importante para poder determinar posibles problemas que estén afectando la tubería de suministro de un hogar, para suministro el aparato más crítico es la ducha encontrado que al cerrar la válvula se está generando una sobrepresión, es por esto que en obra se es puesta una tubería que sale lateralmente antes del mezclador que permite disipar este golpe, reteniendo aire para que no se genere movimiento de tuberías al cierre de la válvula.

1.2.2. Formulación del problema. Para la simulación del sistema de abastecimiento de agua potable para hogares, se utilizara una bomba de medio caballo de fuerza la cual dispondrá de un caudal de 0.6 l/s , con una conducción aproximada entre 30 y 40 metros de tubería de cobre en forma de bobina, se hará la instalación de dos válvulas las cuales demostraran dos formas de golpe de ariete, uno al inicio del suministro el cual tardará una fracción de segundo en registrar el delta de presión en el manómetro, la otra válvula se instalara al final de la conducción, en esta el golpe de ariete será registrado instantáneamente en el manómetro, para demostrar la longitud efectiva de las cámaras de presión, un instante de la válvula a final de la conducción se hará un montaje el cual permitirá el uso de diferentes longitudes y diámetros de tubería en PVC que pueden ser utilizadas para evitar esta incidencia.

Se logrará determinar para esta tubería lateral que ayuda a disipar este golpe, que diámetro y que longitud es más apropiada, calculando el golpe de ariete en cada caso, así encontrando diferentes valores que determinaran que caso es menos crítico al cierre de la válvula. Es importante tener en cuenta que se harán diferentes pruebas para cada uno de los casos, para obtener mayor exactitud y precisión en la toma de resultados y así mismo en los datos finales.

El modelo físico nos da la posibilidad de demostrar los dos tipos de ariete encontrados comúnmente, al inicio de la conducción una sobrepresión negativa (Golpe de ariete negativo) y al final de la conducción sobrepresión positiva (Golpe de ariete positivo).

Para las instalaciones hidrosanitarias en este caso suministro de agua potable, para el diseño de este tipo de redes el aparato más crítico es la ducha ya que es el aparato que necesita mayor presión para garantizar el buen funcionamiento de los demás aparatos y así mismo la presión de servicio en la instalación. La instalación de la ducha tiene un mezclador en el cual se puede generar golpe de ariete al cierre de las válvulas, para evitar este fenómeno se instala un sistema de tubería

denominado “cámara de aire”, este sistema es totalmente empírico, la finalidad del montaje a realizar es poder llegar a un diseño que nos permita identificar las longitudes y diámetros efectivas para las presiones de trabajo de las instalaciones hidrosanitarias.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo general. Implementar un diseño de modelo físico y matemático para el fenómeno del golpe de ariete aplicado en las instalaciones hidrosanitarias.

1.3.2 Objetivos específicos.

- Analizar y comprender la ocurrencia del fenómeno del golpe de ariete.
- Desarrollar el montaje físico para simular el fenómeno del golpe de ariete en las instalaciones hidrosanitarias.
- Comparar los resultados del modelo del golpe de ariete, con los resultados de la simulación matemática con el software Allievi de la Universidad Politécnica de Valencia.

1.4 JUSTIFICACIÓN

Durante el transcurso de cada una de las asignaturas de la línea de aguas se ha hablado sobre “golpe de ariete”, en el cual solo se tratan aspectos teóricos y matemáticos los cuales solo permiten tener una idea básica de lo que es este fenómeno.

La importancia de realizar un modelo físico para el fenómeno del golpe de ariete es tener en cuenta que es fundamentalmente llevar este tema a la práctica por medio de un montaje que permite observar, analizar, comparar, calcular y comprender aspectos fundamentales de este fenómeno, así afianzando los conocimientos aprendidos en la cátedra.

1.5 DELIMITACIÓN

1.5.1 Espacio. Para la representación física y simulación del fenómeno de golpe de ariete, el modelo físico se podrá desplazar para poder realizar una demostración en cualquier espacio de la universidad católica de Colombia, en el laboratorio de hidráulica se harán las diferentes pruebas y operaciones iniciales del modelo físico, en donde se tiene acceso a materiales y diferentes herramientas que permiten que el modelo se desarrolle de manera correcta.

La simulación del fenómeno se trabajara con el software Allievi con licencia gratuita y proporcionada por la Universidad Politécnica de Valencia

1.5.2 Tiempo. Durante el transcurso del periodo 2015 – 3, y las fechas programadas por el programa de Ingeniería civil y facultad de Ingeniería para la entrega, presentación y sustentación de trabajo de grado.

1.5.3 Contenido. Para “MONTAJE DE UN MODELO FÍSICO PARA LA PRUEBA DE LA INCIDENCIA DEL FENÓMENO DE GOLPE DE ARIETE EN DIVERSAS LONGITUDES DE TUBERÍA” , en donde es dividido en varias partes para la lograr cada una de los objetivos planteados al inicio de este trabajo de grado, traerá un modelo matemático que permitirá definir cálculos y medidas iniciales para lograr el inicio del modelo físico y así mismo de la simulación en el software Allievi. El modelo físico permitirá a mayor escala interpretar el objetivo general de este trabajo de grado, teniendo como resultado de este un montaje que permita describir cada uno de los procedimientos definidos al inicio de este trabajo de grado, como resultado de este se tendrá un manual de usuario, especificaciones técnicas y por ultimo un laboratorio que permita el trabajo y conocimiento del golpe de ariete en las instalaciones hidrosanitarias. La simulación en Allievi nos permitirá interpretar el modelo matemático y físico en una simulación que permita definir características y ayude a interpretar diferentes resultados, con este software que es usado para grandes proyectos y por grandes compañías que trabajan con sistemas a presión.

1.5.4 Alcance. Lo descrito en el punto anterior permitirá el cumplimiento total de los objetivos, se describieron cada uno de los productos y resultados a entregar los cuales al final del tiempo definido por la facultad serán entregados a su totalidad; puede que hayan adicionales para el modelo físico pero ya sería algo para mejorar como en el caso de calibración y aspectos físicos.

2. MARCO REFERENCIAL

El fenómeno del golpe de ariete puede generar presiones extremas en las redes de distribución, lo cual puede llevar a fallas en la red y artefactos hidráulicos, e inclusive rupturas en las tuberías, con el consiguiente riesgo de corte del servicio, pérdidas de agua, intrusión de contaminantes al sistema, etc. Un golpe de ariete severo puede generar la separación de la columna de agua, con consecuencias desastrosas para la integridad de las tuberías. Debido a esto la simulación del flujo no-permanente y del golpe de ariete se ha convertido en un requisito esencial para asegurar el correcto diseño y operación de los sistemas de distribución de agua.

El estudio de los fenómenos de flujo no-permanente (golpe de ariete, conocido en inglés como “waterhammer”) ha sido tema de interés de connotados físicos y matemáticos desde hace mucho tiempo. El golpe de ariete aparece en las redes de tuberías cuando el estado de flujo permanente es perturbado mediante la modificación de la velocidad del flujo. En general, el cambio en la velocidad del flujo puede ser causado por la apertura o cierre de válvulas, falla de mecanismos hidráulicos, partida / parada de bombas, etc. El nombre ‘golpe de ariete’ proviene del sonido que generalmente acompaña al fenómeno, similar al ruido del martillo golpeando una tubería. Sin embargo, la magnitud del ruido no es equivalente a la magnitud de la onda de choque, ya que el sonido puede ser amortiguado mientras la onda de presión daña las instalaciones. El efecto más severo del golpe de ariete se produce generalmente cuando las bombas detienen su funcionamiento, dando lugar a presiones excesivas que pueden causar danos serios a tuberías y mecanismos hidráulicos, tales como rupturas, colapsos por vacío, etc., sin considerar otros efectos que también podrían generar costos humanos, materiales y financieros, incluyendo problemas sanitarios.²

Tenemos todos los golpes de ariete con experiencia en el país - la válvula de la ducha se cierra bruscamente, o la válvula del sistema de rociadores se cierra al final del ciclo, o los extremos del ciclo de llenado de lavadora, todas las tuberías en el sonajero casa. Siempre que tenga una alta velocidad de flujo, sobre todo en una carrera larga pipa, y hay un cambio repentino en la velocidad, puede ocurrir el golpe de ariete.

La onda de presión resultante se transmite en todo el sistema, sometiendo cada componente en el sistema a las presiones que se acercan 10 veces la presión normal del sistema. La presión vuelve a la normalidad sólo cuando se disipa por la pérdida por fricción, expansión de la tubería o cuando algo da - una válvula o sección de la tubería.

² TWYMAN, John. Golpe de ariete en redes de tuberías [en línea] Santiago: TWYMAN Ingenieros [citado: 20, ago., 2015]. Disponible en Internet: <URL: http://www.twyman.cl/TWYMAN_Golpe_de_Ariete_en_Reddes_de_Tuberias.pdf>.

Echemos un vistazo más de cerca de las causas de los golpes de ariete y considerar algunos remedios.

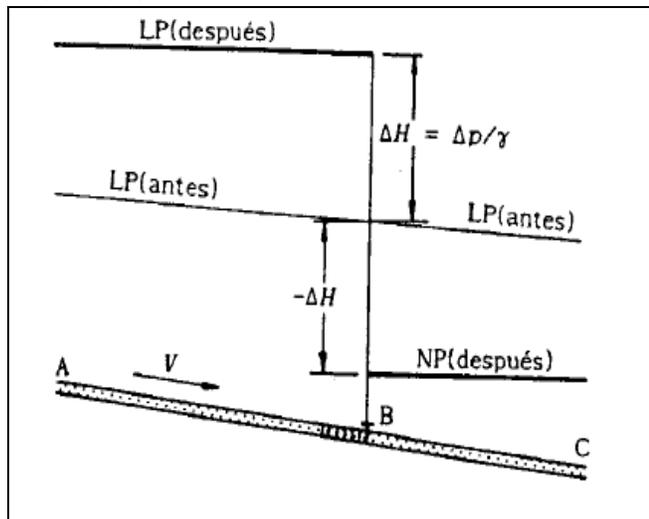
Para martillo de agua que se produzca cuatro condiciones deben estar presentes - velocidad suficiente flujo, un cambio brusco en la velocidad, un tiempo suficientemente largo conducto de tubería y un sistema de tubería rígida. En cuanto a la velocidad del flujo, por lo general, se acordó que las velocidades de flujo del agua por debajo de 5 pies por segundo (fps) excluyen la posibilidad de golpes de ariete. El cambio brusco de velocidad puede ser o bien una aceleración rápida (arranque de la bomba / apertura de la válvula) o puede ser rápida desaceleración (cierre Parada / válvula de la bomba).³

Al variar el régimen en una conducción, por ejemplo cerrando parcial o totalmente una válvula, aparece un fenómeno de compresibilidad en el flujo, que se traduce en una variación brusca de presión en la tubería.

Si en la conducción ABC (Figura 1) se anula el caudal en B, la primera rodaja de flujo aguas arriba de B queda parada en seco, a continuación se para la segunda comprimiendo a la primera, la tercera a la segunda y así sucesivamente hasta llegar a A.

En definitiva, aparece en B un aumento de presión DP, que como una onda se propaga aguas arriba a una velocidad a. Este aumento de presión es como un golpe que sufre la conducción en su interior, y que se conoce con el nombre de golpe de ariete y, recientemente, con el de transitorio.

Figura 1. Cierre de válvula en B.



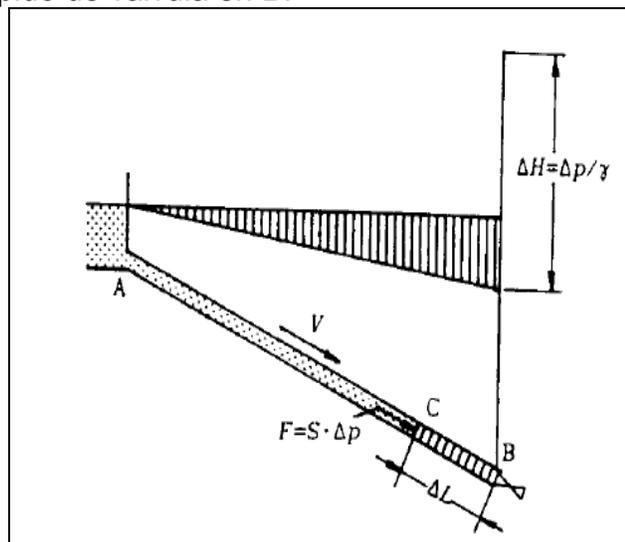
Fuente: Autor.

³ PELIKAN, R. Causas de los golpes de ariete [en línea] 2005 [citado: 20, ago., 2015]. Disponible en Internet: <URL: <http://search.proquest.com/docview/210613445?accountid=45660>>.

Al anularse el caudal en B, la primera rodaja de flujo aguas abajo de B queda también parada en seco. El flujo entre B y C tira de dicha rodaja, provocando en la misma una succión o disminución de presión, llamada golpe de ariete negativo. A veces se pueden originar en la tubería presiones inferiores a la atmosférica, incluso próximas al cero absoluto, que aplastarían la tubería si esta no está preparada para ello.

Al anularse el caudal en B (Figura 2) aparece un incremento de presión ΔP que, actuando sobre la sección transversal S del flujo, va comprimiendo a éste con la fuerza F . ($F = S \cdot \Delta P$)

Figura 2. Cierre rápido de válvula en B.



Fuente: Autor.

El impulso de dicha fuerza durante el tiempo t ($t = \Delta L/a$) que tarda el volumen de fluido comprendido en la longitud trozo de tubería ΔL en pararse, será igual a la variación de la cantidad de movimiento que ha sufrido la masa m de dicho volumen, al pararse o al pasar de una velocidad V a otra V' menor.

Ecuaciones para el cálculo del golpe de ariete:

- En el caso de cierre total ($\Delta V = V$), lógicamente el más peligroso, se obtiene:
 - o $\Delta P = \rho \cdot a \cdot V$ o $\Delta H = a \cdot V/g$

Expresión obtenida por Allievi, que calcula el máximo golpe de ariete que puede presentarse.

- Velocidad del sonido:

La expresión que da la variación de volumen por unidad de volumen que produce el incremento de presión DP. Recordando la definición del módulo de elasticidad

$$\text{volumétrico de un fluido } K = -\frac{\Delta P}{\Delta V/V}$$

$$S \cdot dx / S \cdot dL = \frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta P}{K}$$

$$V/c = \frac{\Delta P}{K} = \rho \cdot c \cdot \frac{V}{Kc^2} = \frac{K}{\rho}$$

Por tanto: $c = \sqrt{\frac{K}{\rho}}$

Para el caso del agua $K = 2,03 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$

La velocidad del sonido c en el agua es: $c = (2,03 \cdot 10^9 / 1000)^{1/2} = 1425 \text{ m/s}$

- Celeridad de la onda en tuberías.

Para el caso del agua, Allievi propuso una fórmula más fácil de recordar y manejar obtenida de la siguiente forma.

$$c = (K / \rho)^{1/2} = 1425 \text{ m/s}$$

Recordando que $K_{\text{agua}} = 2,03 \cdot 10^5 \text{ N/cm}^2$ y sustituyendo:

$$\alpha = \frac{1425}{\sqrt{1 + \frac{2,03 \cdot 10^5 \cdot D}{E \cdot e}}} = \frac{1425 \cdot \sqrt{48,3}}{\sqrt{48,3 + \frac{10^7 \cdot D}{E \cdot e}}}$$

$$\alpha = \frac{9900}{\sqrt{48,3 + \frac{k \cdot D}{e}}}$$

Siendo k el cociente adimensional $107/E(\text{N/cm}^2)$

Tabla 1. Valores orientativos de k para la fórmula de Allievi.

Valores orientativos de k para la fórmula de Allievi	
Hierro y acero	0,5
Hormigón	5
Hormigón armado	5
Fundición	1
Fibroceso	5,4 (5 / 6)
Poliéster	6,6

Valores orientativos de k para la fórmula de Allievi	
Plomo	5
PVC	33 (20 / 50)

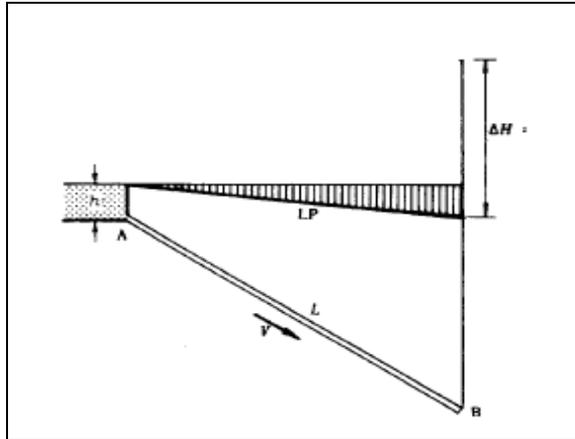
Fuente: Autor.

2.1 OSCILACIONES DE PRESIÓN EN LA TUBERÍA

A continuación se analiza lo que sucede en la conducción desde el instante $t = 0$ en que se produce el cierre instantáneo en B.

$t = 0$: Aparece en B el golpe DP y la onda de presión comienza a circular por la tubería hacia el depósito A.

Figura 3. Cierre de válvula instante $t=0$.

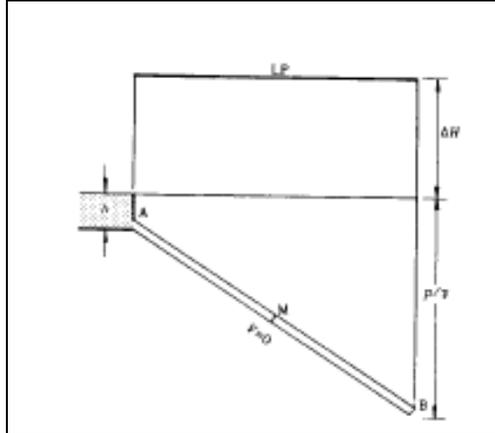


Fuente: Autor.

$t = L/a$: la onda de presión llega a A. Toda la tubería está dilatada por la sobrepresión y el fluido en su interior en reposo y comprimido. La presión en B es la estática más la sobrepresión del golpe. Es el momento más peligroso en la conducción.

En el depósito A solo puede existir la presión h debida a la altura del mismo. El golpe al llegar a A tiene que desaparecer automáticamente.

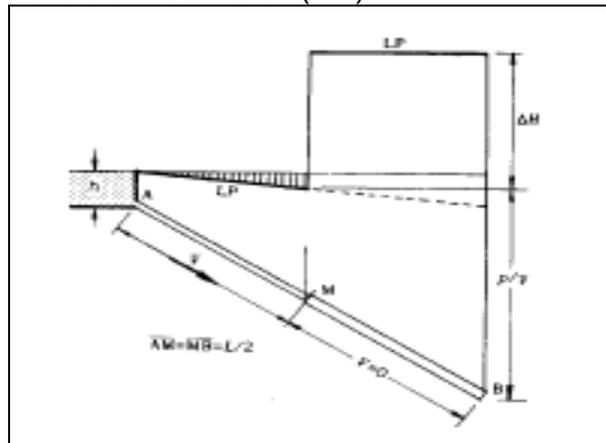
Figura 4. Cierre de válvula al instante $t=L/a$.



Fuente: Autor.

$t = (L/2)/a$: la onda de presión llega al punto medio M. El tramo de tubo MB está dilatado y el fluido en su interior en reposo y comprimido. En el tramo AM el fluido sigue circulando hacia M.

Figura 5. Cierre de válvula al instante $t = (L/2)$.

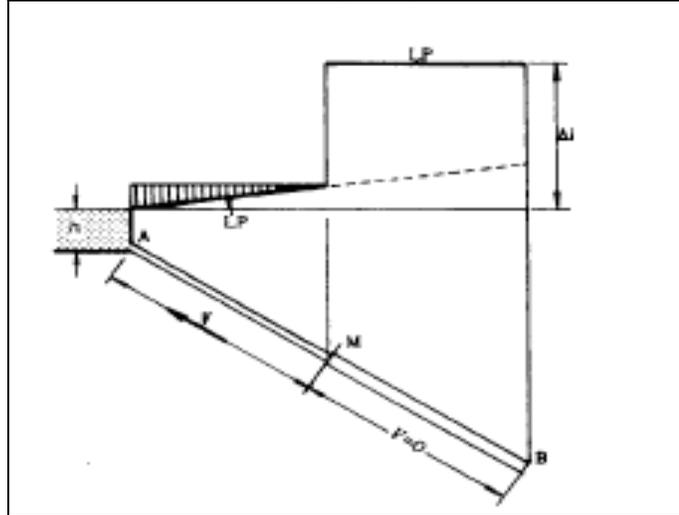


Fuente: Autor.

Igual que un resorte, el fluido de la tubería comienza a expandirse por A y comienza un flujo en dirección al depósito, a la vez que la presión se va estabilizando.

$t = (3L/2)/a$. La onda estabilizadora llega aM. La línea piezométrica en el tramo AM queda con inclinación decreciente hacia A ya que el flujo circula en ese sentido.

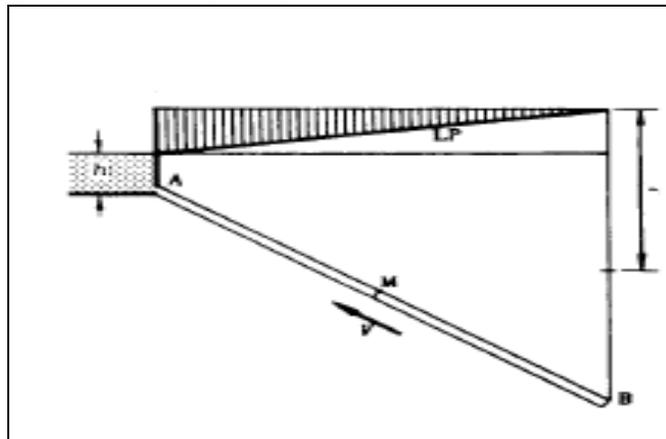
Figura 6. Cierre de válvula al instante $t = (3L/2)/a$.



Fuente: Autor.

$t = 2L / a$: La onda estabilizadora llega a B. El fluido de toda la tubería se mueve hacia el depósito, teóricamente a la misma velocidad V que llevaba antes de producirse el golpe. Como el tramo defluído próximo a B no puede moverse, el resto tira de él, provocando un DP negativo, teóricamente igual en valor absoluto a la sobrepresión del golpe. Esta onda se propaga hacia A.

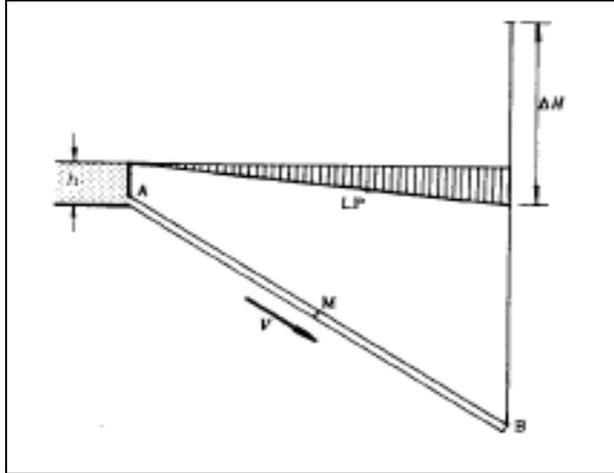
Figura 7. Cierre de válvula al instante $t = 2L/a$.



Fuente: Autor.

$t = 3L/a$: la onda llega a A. Toda la tubería está contraída por efecto de la depresión y el fluido en reposo y expandido. En A se inicia un flujo en dirección a B.

Figura 10. Cierre de válvula al instante $t = 4L/a$.



Fuente: Autor.

A partir de entonces el fenómeno vuelve a repetirse indefinidamente cada período $4L/a$, pero debido al rozamiento del agua en la tubería la onda de presión se va amortiguando hasta anularse totalmente.

Cuando el golpe de ariete es negativo, se podría alcanzar el cero absoluto, en el peor de los casos, verificándose un fenómeno ondulatorio análogo al anteriormente descrito. En consecuencia el golpe de ariete negativo puede ser tan nocivo como el positivo. (Gorka, Almandoz Berrondo, Jimenez Redal, Mongelos, & Pellejero, 2012)

2.2 TIEMPO DE CIERRE DE LA VÁLVULA Y TIEMPO DE PARADA DE BOMBAS. CIERRE LENTO Y CIERRE RÁPIDO

Se define el tiempo (T) como el intervalo entre el inicio y el término de la maniobra, sea cierre o apertura, total o parcial, ya que durante este tiempo se produce la modificación del régimen de movimiento del fluido. Este concepto es aplicable tanto a conducciones por gravedad como a impulsiones, conociéndose en el primer caso como tiempo de cierre de la válvula y como tiempo de parada en el segundo.

El tiempo de cierre de una válvula puede medirse con un cronómetro, es un tiempo físico y real, fácilmente modificable, por ejemplo, con des multiplicadores, cambiando la velocidad de giro en válvulas motorizadas, etc.

Por el contrario, en el caso de las bombas, el tiempo de parada no puede medirse de forma directa y es más difícil de controlar.

En resumen, en las conducciones por gravedad, el cierre de la válvula se puede efectuar a diferente ritmo, y por tanto, el tiempo T es una variable sobre la que se puede actuar, pero en las impulsiones el tiempo de parada viene impuesto y no es posible actuar sobre él, salvo adicionando un volante al grupo motobomba o un sistema similar.

Mendiluce propone la siguiente expresión para el cálculo del tiempo de parada:

$$T = C + \frac{K * L * v}{g * H_m}$$

Siendo: L: Longitud de la conducción (m)

v: Velocidad de régimen del agua (m/s)

g: Aceleración de la gravedad, 9.81 m/s²

H_m: Altura manométrica proporcionada por el grupo de bombeo

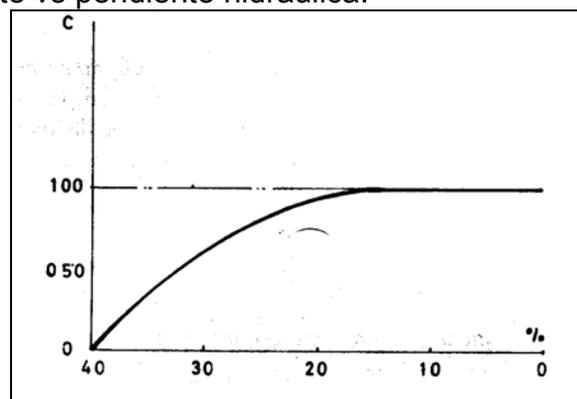
C y K: Coeficientes de ajuste empíricos

La altura geométrica o presión estática (H_g) se mide siempre inmediatamente aguas arriba de la bomba, por lo que la profundidad del agua en el pozo debe tenerse en cuenta en el caso de bombas sumergidas.

El coeficiente C (ver figura) es función de la pendiente hidráulica (m), siendo

$m = \frac{H_m}{L}$. Toma el valor C=1 para pendientes hidráulicas crecientes de hasta el 20%, y se reduce progresivamente a partir de este valor hasta hacerse cero para pendientes del 40%. Pendientes superiores al 50% implican paradas muy rápidas, aconsejándose considerar el golpe de ariete máximo de Allievi en toda la longitud de la tubería.

Figura 11. Coeficiente vs pendiente hidráulica.



Fuente: Autor.

$$\frac{H_m}{L} < 0.20 \rightarrow c = 1$$

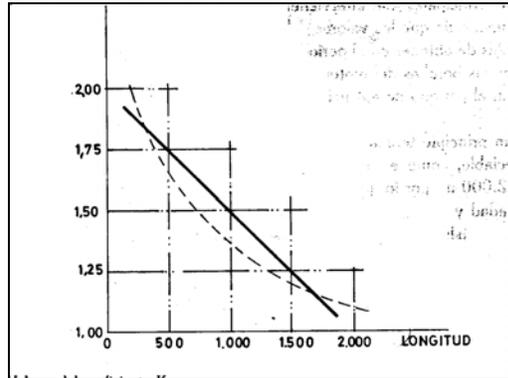
$$\frac{H_m}{L} \geq 0.40 \rightarrow c = 0$$

$$\frac{H_m}{L} \approx 0.30 \rightarrow c = 0.60$$

Valores del coeficiente C según Mendiluce

El coeficiente K depende de la longitud de la tubería y puede obtenerse a partir de la gráfica o de la tabla siguientes, propuestas por Mendiluce. Este autor recomienda la utilización de los valores de K redondeados recogidos en la tabla, ya que ha comprobado que las pequeñas diferencias respecto a la gráfica tienen una repercusión despreciable en el golpe de ariete y siempre del lado de la seguridad, y es de más sencillo manejo.

Figura 12. Coeficiente K.



Fuente: Autor.

Tabla 2. Valores del coeficiente K según Mendiluce

L	K
L < 500	2
L ≈ 500	1.75
500 < L < 1500	1.5
L ≈ 1500	1.25
L > 1500	1

Fuente: Autor.

Puesto que L es la longitud de la tubería y la celeridad a es la velocidad de propagación de la onda de presión, $\frac{2 \cdot L}{a}$ será el tiempo que tarda la onda de presión en dar una oscilación completa. Por lo tanto, si $T < \frac{2 \cdot L}{a}$, la maniobra ya habrá concluido cuando se produzca el retorno de la onda de presión y tendremos

un cierre rápido, alcanzándose la sobrepresión máxima en algún punto de la tubería. Sin embargo, si $T > \frac{2 \cdot L}{a}$, estaremos ante un cierre lento y ningún punto alcanzará la sobrepresión máxima, ya que la primera onda positiva reflejada regresa antes de que se genere la última negativa.

$$T < \frac{2 \cdot L}{a} : \text{Cierre Rápido}$$

$$T > \frac{2 \cdot L}{a} : \text{Cierre Lento}$$

El caso más desfavorable para la conducción (máximo golpe de ariete) es el cierre instantáneo ($T \gg 0$). En la práctica esto sólo ocurre en impulsiones de gran pendiente hidráulica, no siendo lo habitual.

Como a mayor tiempo T menor sobrepresión, si podemos controlar T limitaremos en gran medida los problemas en tuberías, siendo éste el caso de los abastecimientos por gravedad.(Real)

2.3 ECUACIONES FUNDAMENTALES DE MICHAUD Y ALLIEVI

- Si $L < L_c$, se trata de una impulsión (conducción) corta, que se correspondería con un cierre lento, calculándose el golpe de ariete mediante la fórmula de Michaud.
- Si $L > L_c$, entonces la impulsión (conducción) es larga y el cierre rápido, siendo el valor del golpe de ariete el dado por Allievi desde la válvula hasta el punto crítico y por Michaud en el resto.

Tabla 3. Ecuaciones Michaud y Allievi (Real).

$L < L_c$	Impulsión Corta	$T > \frac{2 \cdot L}{a}$	Cierre Lento	Michaud	$\Delta H = \frac{2 \cdot L \cdot v}{g \cdot T}$
$L > L_c$	Impulsión Larga	$T < \frac{2 \cdot L}{a}$	Cierre Rápido	Allievi	$\Delta H = \frac{a \cdot v}{g}$

Fuente: Autor.

2.4 ALLIEVI UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA (SOFTWARE)

Allievi es un software profesional para el cálculo y simulación de transitorios hidráulicos en sistemas a presión y en lámina libre. Representa la culminación de años de trabajo y el paquete de software más ambicioso nunca creado por el ITA.

Basado en un algoritmo propietario que viene utilizándose con éxito durante décadas en trabajos de consultoría y asesoría técnica, Allievi es uno de los pocos paquetes de software a nivel mundial que le permitirá calcular transitorios en sistemas hidráulicos de manera fiable.

Por qué usar Allievi:

- Cálculo del régimen permanente con las mismas ecuaciones del método de las características. Allievi calcula el régimen permanente como condiciones iniciales para la simulación del transitorio.
- Posibilidad de generación de escenarios de cálculo para una misma red, los cuales permiten optimizar los elementos de protección, o las maniobras de regulación, mediante comparación de resultados. Todo ello en un mismo fichero y de manera sencilla.
- Incorporación de curvas de pérdidas típicas de válvulas convencionales. Posibilidad de trabajar con datos de válvulas y ventosas comerciales.
- Incorporación del funcionamiento en régimen transitorio de válvulas automáticas, con función de reductoras de presión, sostenedor de presión y limitador de caudal.
- Posibilidad de inserción de ventosas y roturas en puntos intermedios en las tuberías, sin necesidad de modificar la topología de la red.
- Funcionamiento conjunto de canales en lámina libre y conductos a presión, para simular el funcionamiento en régimen transitorio de sistemas hidráulicos combinados.
- Simulación del funcionamiento de turbinas en instalaciones hidroeléctricas, incluyendo regulación PID en las condiciones de variación de la carga.
- Inclusión de las condiciones de contorno para simular el fenómeno de separación de columna líquida.
- Asistentes de cálculo para la celeridad, la presión de hinchado de calderines, el momento de inercia de los grupos de bombeo, así como recursos adicionales para la entrada de datos.

- Facilidades para simular el comportamiento en régimen transitorio de otros líquidos industriales y petroquímicos.⁴

⁴ VALENCIA, U. P. Allievi [en línea] 2015 [citado: 20, ago., 2015]. Disponible en Internet: <URL: <http://www.allievi.net>: <http://www.allievi.net/allievi-es.php>>.

3. METODOLOGÍA

3.1 TIPO DE ESTUDIO

La implementación de un modelo físico para el fenómeno del golpe de ariete que permita interpretar y relacionar este fenómeno en las instalaciones hidrosanitarias, así mismo la simulación de este modelo físico permitirá más a fondo mostrar cómo es su funcionamiento y su posible simulación en redes de hogar.

El montaje permitirá no solo el registro del golpe de ariete por bombeo, sino que también tendrá la posibilidad de generar un registro de este comportamiento con suministro por acometida, analizando diferentes factores que se pueden presentar en la vida cotidiana.

El fin del modelo físico es hallar la longitud y el diámetro más efectivo para que el que el golpe de ariete no sea nocivo para la tubería de suministro en una instalación hidrosanitaria.

3.2 FUENTES DE INFORMACIÓN

Para el diseño del montaje se tendrá en cuenta cada uno de los principios de la mecánica de fluidos y diferentes exponentes que intervinieron en el tema golpe de ariete, para definir el suministro por bombeo se tendrá en cuenta la teoría de Bernoulli con el cual se puede proceder a dar características al flujo a trabajar en el sistema de tuberías, para la selección del tipo de tubería se tendrá en cuenta los diámetros comerciales y frecuentes en una instalación hidrosanitaria, teniendo como base el libro del ingeniero Rafael Pérez Carmona.

La calibración del modelo físico en el cual entra en su aplicación el golpe de ariete, con el cual se quiere registrar el comportamiento de este fenómeno para diferentes casos que puedan ocurrir en la variación de longitudes y diámetros de las cámaras de aire y también cuando el sistema no trabaja con el beneficio de las cámaras de aire.

3.3 DISEÑO METODOLÓGICO

3.1.1 Modelo matemático.

3.1.1.1 Descripción del modelo. El modelo matemático dispone de unos cálculos previos que permitirán obtener un estimado de las dimensiones y características de flujo.

El cálculo de la longitud que en el modelo físico se dispondrá como la bobina de tubería de cobre, fue analizado con cada uno de los datos exigidos por la fórmula

de Allievi, siempre teniendo en cuenta que la presión a trabajar para el modelo matemático y así mismo físico será de 40 psi, teniendo:

Datos iniciales:

Tabla 4. Valores iniciales para el cálculo de la longitud.

e (mm)	0.00102
k	0.02
∅ (in)	0.50
∅ (cm)	1.27
v (m/s)	4.73
Q (l/s)	0.6
Q (m ³ /s)	0.0006
c	1
Hm	35
g (m ² /s)	9.81
ΔH (PSI)	40
ΔH (MCA)	280

Fuente: Autor.

3.1.1.2 Ecuaciones.

$$TC = \frac{2Lc}{\alpha} \text{ . (Ecuación de Allievi para cierre rápido)}$$

$$\Delta H = \frac{2 * L * V}{g * T} \text{ (Ecuación de Michaud para cierre lento)}$$

$$\alpha = \frac{9900}{\sqrt{48.3 + k * \frac{D}{e}}} \text{ (Ecuación de celeridad)}$$

3.1.1.3 Longitud, número de vueltas y altura bobina. Mediante un proceso de iteración utilizando Excel e involucrando cada uno de los datos y formulas anteriormente nombradas, se obtuvo que el valor con el cual se va a trabajar la longitud de tubería es de 30 metros.

Para el cálculo de número de vueltas altura de la bobina se tomaron como datos iniciales la longitud ya calculada, el diámetro de la tubería y el diámetro de la bobina.

Datos Iniciales:

L= 30 m

Diámetro tubería = 1/2"

Diámetro Bob = 40 cm

El cálculo de la altura de la bobina y la cantidad de vueltas se hizo mediante un proceso de iteración mediante el cual arrojo resultados de 40 vueltas y la altura de la bobina de 70 centímetros.

3.1.2 Modelo físico.

3.1.2.1 Descripción teórica. Para la elaboración del modelo físico para la simulación del fenómeno del golpe de ariete se desarrollara en el espacio del laboratorio de hidráulica ubicado en la sede claustro de la universidad católica de Colombia.

- Características materiales. Para la elaboración de este modelo se utilizara una bomba de medio caballo de fuerza, para su construcción se utilizaron materiales como el cobre flexible que aparte de su fácil manejabilidad para realizar los giros de la bobina y así mismo es ideal para los sistemas agua potable así mismo como el PVC, también es capaz de soportar altas presiones y temperaturas extremas (altas y bajas); en exteriores, es impermeable al oxígeno y resiste los rayos UV y los cambios de temperatura, además el cobre es el único material utilizado para el transporte de agua potable que tiene propiedades higiénicas inherentes, lo que minimiza el riesgo de proliferación de bacterias patógenas como la Legionella y ayuda a proteger la salubridad del agua. Diversos estudios han demostrado estas propiedades higiénicas y algunos hospitales han decidido instalar tuberías de cobre para proteger la salud de sus pacientes. Además, las tuberías de cobre sólo pueden liberar iones de cobre al agua, que son necesarios para el metabolismo de nuestro cuerpo: el agua que bebemos y utilizamos no contendrá aditivos, pigmentos, compuestos orgánicos volátiles u otros compuestos sintéticos.⁵

El PVC se utilizó este material ya que en las instalaciones hidrosanitarias es usado para realizar todo tipo de instalación, así mismo las Tuberías PVC resisten golpes que irremediamente romperían las tuberías convencionales, las tuberías en PVC son considerablemente más livianas que las tuberías metálicas o de asbesto-cemento facilitando enormemente su manipulación, almacenaje e instalación.⁶

⁵ COBRE, I. E. Copperalliance [en línea] 2015 [citado: 20, ago., 2015]. Disponible en Internet: <URL: <http://www.copperalliance.es/aplicaciones/sistemas-de-tuber%C3%ADas>>.

⁶ PAVCO. Manual técnico de tubosistemas PAVCO [en línea] Bogotá: La Empresa [citado: 20, ago., 2015]. Disponible en Internet: <URL: <http://www.pavco.com.co/?dw=b396c99d80c2076845e6bd13629e2186w2r2>>.

Para el sistema de aforo de caudal se usó un tanque de vidrio que permite el almacenamiento de agua para realizar aforos. Para medir las presiones en el sistema se instalaron dos manómetros de glicerina, que permiten la medición de la presión del sistema en puntos estratégicos para poder registrar golpe de ariete positivo y negativo.

- Materiales y accesorios definitivos. A continuación se relacionan todos los accesorios usados en el montaje definitivo:

- Tubería de PVC (1" y 2")
- Accesorios de PVC (1" y 2")
- ❖ Reducción Excéntrica (2" a 1")
- ❖ Reducción Concéntrica (1" a 1/2")
- ❖ Unión universal (1/2" y 1")
- ❖ Codo 90° (1")
- ❖ Ampliación (1/2" a 1")
- ❖ Válvula de globo (1")
- ❖ Tee (1")
- Tubería en cobre (1/2")
- Accesorios en cobre (1/2")
- ❖ Unión (1/2")
- ❖ Tee (1/2")
- Manómetro de glicerina.
- Bomba Wolfgang 1/2 HP
- Tanque de almacenamiento en fibra de vidrio (0.30x0.40x0.50), capacidad máxima 60 litros.
- Mesa de soporte.
- Tanque de vidrio para aforo.

3.1.2.2 Descripción práctica. Para el montaje del modelo físico se obtuvieron valores iniciales calculados en el modelo matemático que permiten la compra de materiales que permiten la realización del modelo físico.

Primero que todo se hizo prueba de la bomba que permitirá la impulsión de agua del tanque al sistema, calculando como punto inicial el caudal con el cual puede trabajar.

Figura 13. Toma de datos caudal volumétrico.



Fuente: Autor.

Figura 14. Montaje prueba bomba.



Fuente: Autor.

Luego de varios ensayos de caudal por medio volumétrico se obtuvo un caudal de 0.6 L/s , lo cual nos permite dar paso a la compra de la tubería de cobre de $\frac{1}{2}$ " y a la construcción de la mesa del montaje.

Figura 15. Especificaciones bomba Wolfgang.



Fuente: Autor.

Figura 16. Construcción mesa montaje y tanque.



Fuente: Autor.

Se realizaron últimos acabado de la mesa como pintura de cada una de las partes, así mismo se hizo la instalación del tanque de almacenamiento y ubicación fija de la bomba.

Figura 17. Mesa montaje definitivo y ubicación de tanque y bomba.



Fuente: Autor.

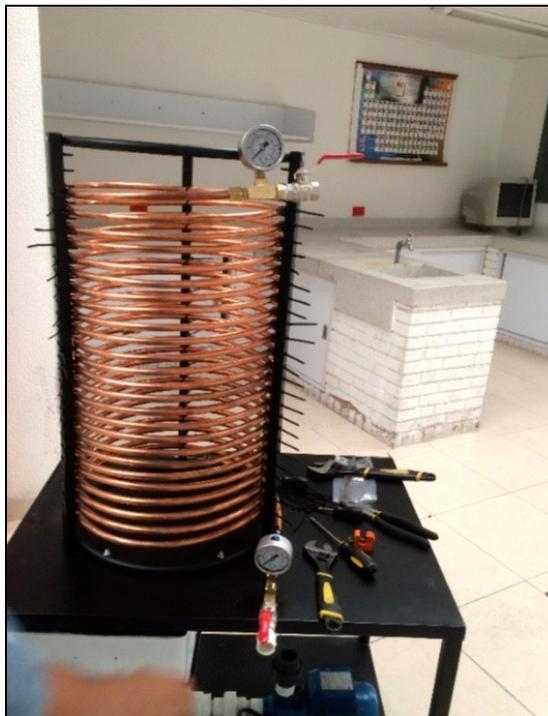
Se inicia la instalación de tubería de PVC, así mismo empates de tubería de cobre. Se manejó del número de vueltas de la tubería de cobre y así mismo el diámetro estos definidos el modelo matemático.

Figura 18. Instalación empates tubería cobre.



Fuente: Autor.

Figura 19. Tubería de cobre con diámetro definitivo e instalación de manómetros y acoples de tubería de cobre a PVC.



Fuente: Autor.

Figura 20. Instalación 1 tubería PVC.



Fuente: Autor.

Figura 21. Instalación 2 tubería PVC.



Fuente: Autor.

Luego de terminar el montaje inicial, el ingeniero Juan Sebastián de Plaza Solórzano asesor de la presente tesis decide realizar algunas modificaciones para mejorar el comportamiento del montaje para parámetros hidráulicos y así mismo para permitir el mejor rendimiento de la bomba y lograr trabajar con muy pocas pérdidas de energía en el sistema.

Figura 22. Montaje inicial.



Fuente: Autor.

Se decidió trabajar sin cheque ya que luego de la salida de la bomba se encuentra un bypass que dirige el agua hacia el tanque, lo cual permitirá que cuando la válvula sea cerrada el agua se regrese por el bypass y no vaya directamente a la bomba.

Se determinó realizar un tanque para permitir la medición de caudal por el método volumétrico, permitiendo el mejor manejo de condiciones hidráulicas del sistema.

El tanque permitirá realizar varias mediciones de caudal del sistema, donde tendrá regreso al tanque para la realimentación del sistema.

Así también algunas modificaciones de conexión de tubería para mejorar el rendimiento hidráulico.

Figura 23. Montaje final (vista frontal).



Fuente: Autor.

Figura 24. Montaje final (vista lateral izquierda).



Fuente: Autor.

Se han hecho varias pruebas del sistema en cada uno de los procesos, así mismo se han hecho correcciones de instalación de tubería según el resultado de estas pruebas.

Lo ideal del montaje aparte de mostrar e identificar el fenómeno del golpe de ariete es demostrar que longitud es la más correcta y óptima para disipar este fenómeno en las instalaciones hidrosanitarias. La cámara de aire instalada en los sistemas para duchas, el cual permite disipar el golpe de ariete, es instalado en obra y no se encuentran catálogos ni información que permitan definir cuál longitud es más correcta para la instalación.

Figura 25. Instalación usada para el sistema de ducha en un hogar.



Fuente: Autor.

El modelo físico permitirá realizar diferentes mediciones, lo cual dará como resultado la longitud más permitida para la instalación en el sistema de ducha de un hogar.

Figura 26. Cámara de aire montaje.



Fuente: Autor.

Luego de tener en cuenta varios comentarios por parte del director Mauricio González y el asesor Juan Sebastián De Plaza Solórzano, se tiene el montaje final dispuesto para realizar las pruebas mencionadas anteriormente.

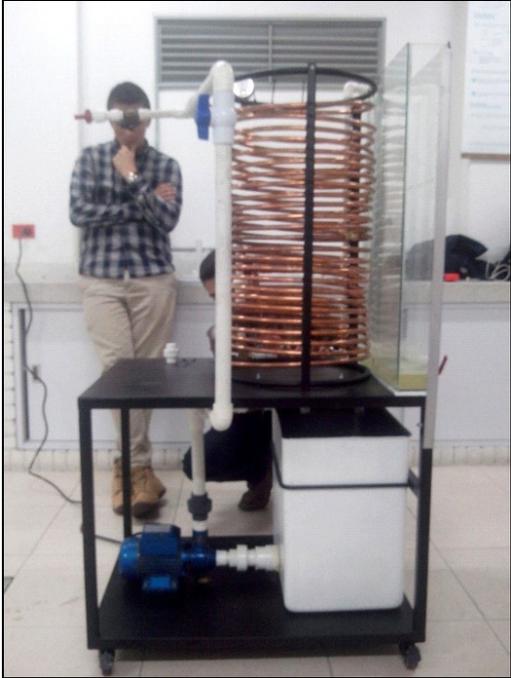
En el anexo A se encuentran los planos de diseños definitivos que permiten interpretar los materiales usados y la ubicación de cada uno de los accesorios, así mismo se lograra tener una mayor claridad del montaje definiéndose en estos dirección de flujo y especificaciones.

Figura 27. Vista lateral derecha.



Fuente: Autor.

Figura 28. Vista posterior.



Fuente: Autor.

Figura 29. Vista lateral derecha.



Fuente: Autor.

Figura 30. Manómetro 1.



Fuente: Autor.

Figura 31. Manómetro 2, tanque de almacenamiento y bomba.



Fuente: Autor.

Figura 32. Vista frontal.



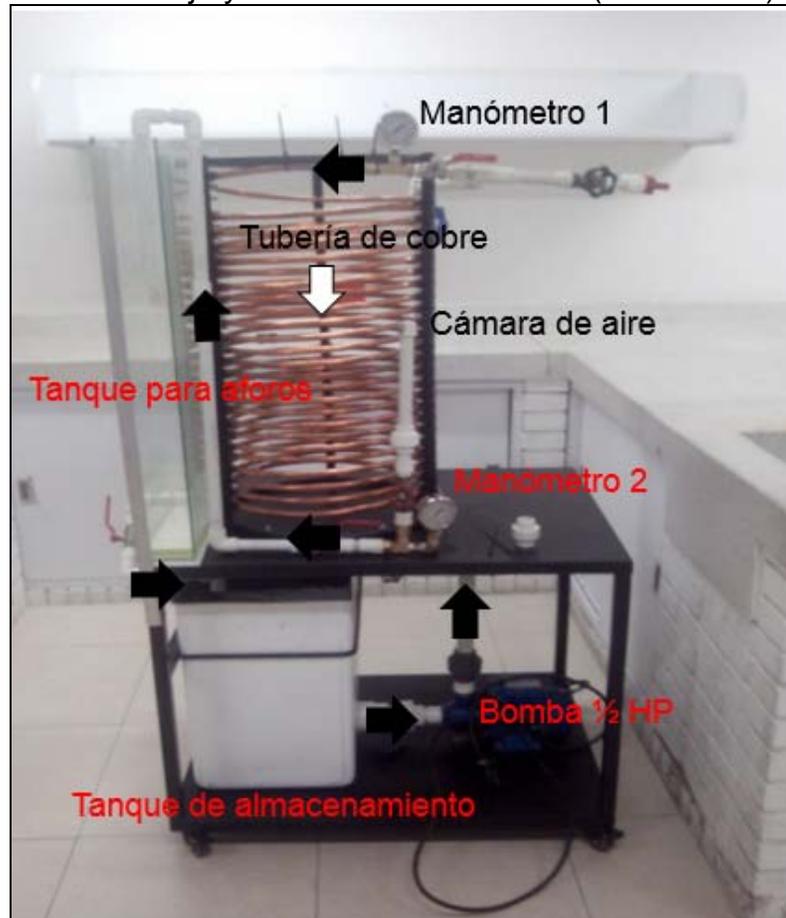
Fuente: Autor.

4. RESULTADOS

4.1 MODELO FÍSICO

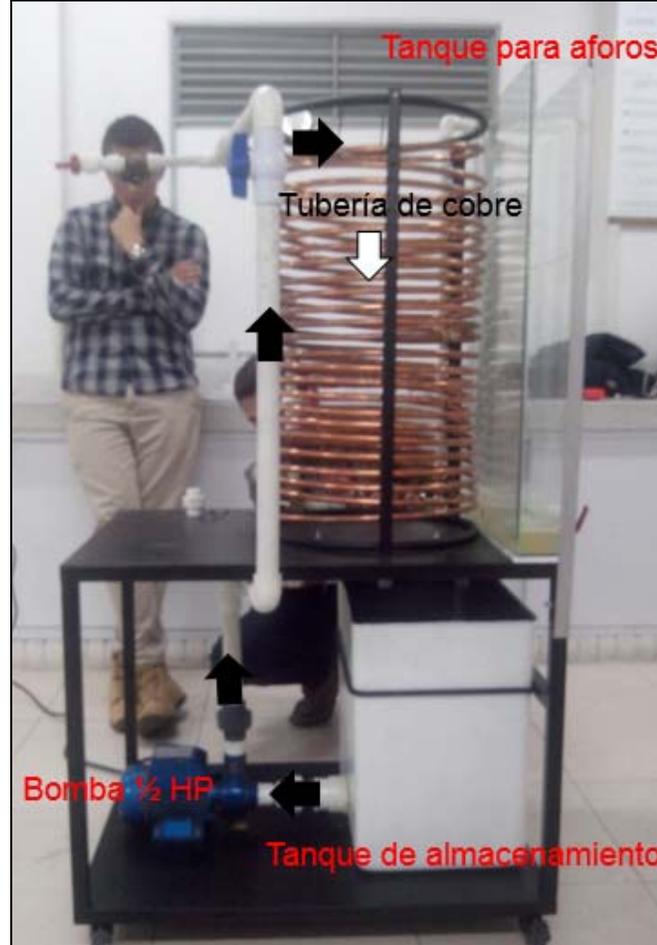
4.1.1 Esquema montaje final. Para el análisis de resultado se realizó un esquema del montaje final, para poder ubicar los manómetros y la dirección del flujo.

Figura 33. Dirección de flujo y ubicación de elementos (vista frontal).



Fuente: Autor.

Figura 34. Dirección de flujo y ubicación de elementos (vista frontal).



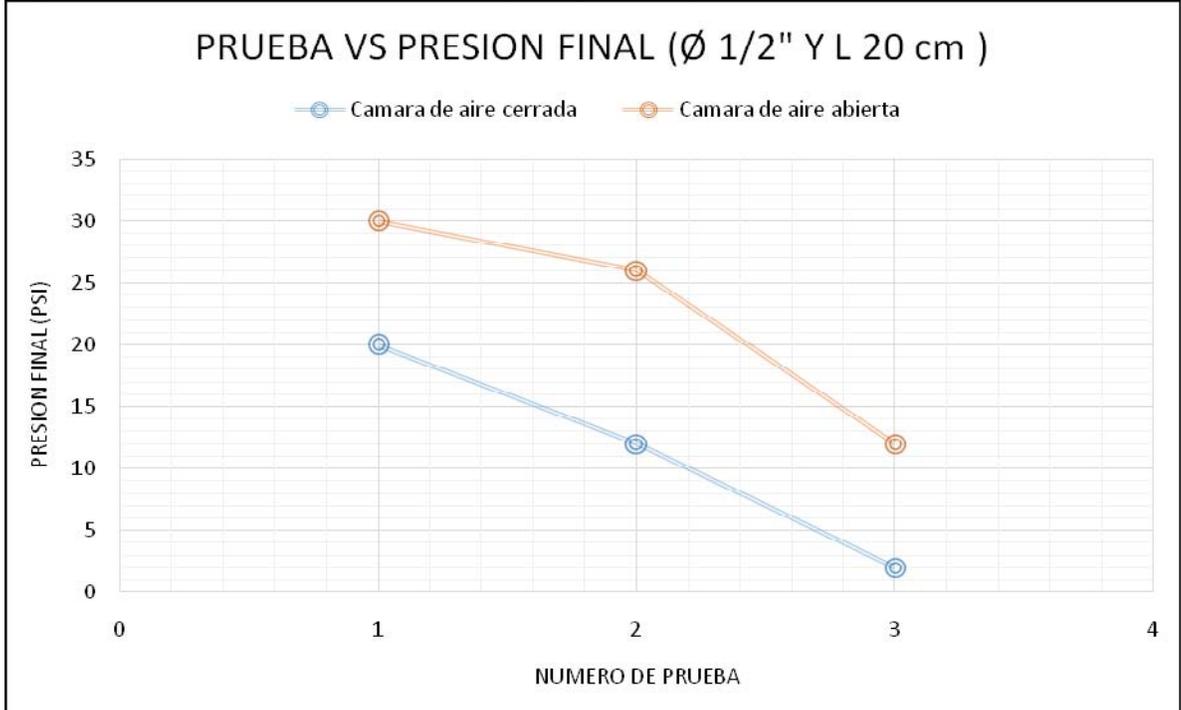
Fuente: Autor.

4.1.2 Resultados montaje físico. Para la toma de datos se realizaron 6 tomas con longitudes y diámetros diferentes para la prueba de la cámara de aire, así mismo se realizó un aforo volumétrico para el cálculo del caudal del sistema teniendo en cuenta la apertura de la válvula del bypass, se debe tener en cuenta que se registraron datos con la válvula de la cámara de aire abierta y cerrada.

Para cada longitud y diámetro se realizaron tres tomas de datos con diferentes presiones para lograr definir si la cámara de aire logra disipar ese golpe y movimiento de la onda.

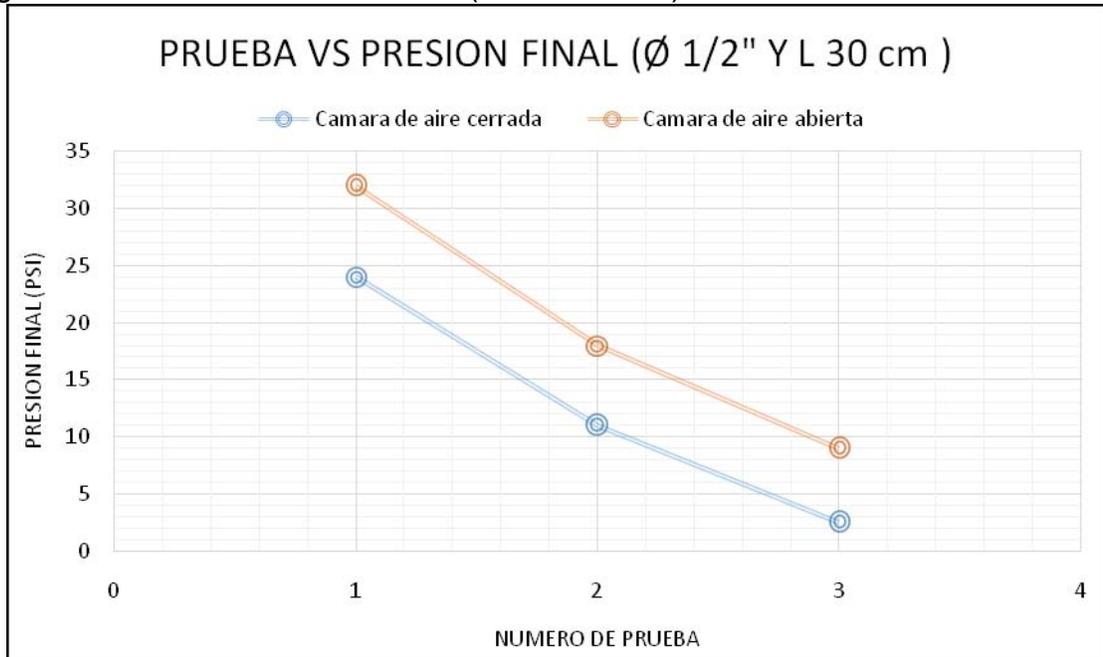
En el Anexo A se encuentran las tablas con las tomas de datos de los ensayos realizados en el laboratorio de Hidráulica, para estas tablas se realizaron graficas que permiten un análisis detallado de los datos registrados en el laboratorio.

Figura 35. Prueba vs Presión Final (1/2" y 20 cm).



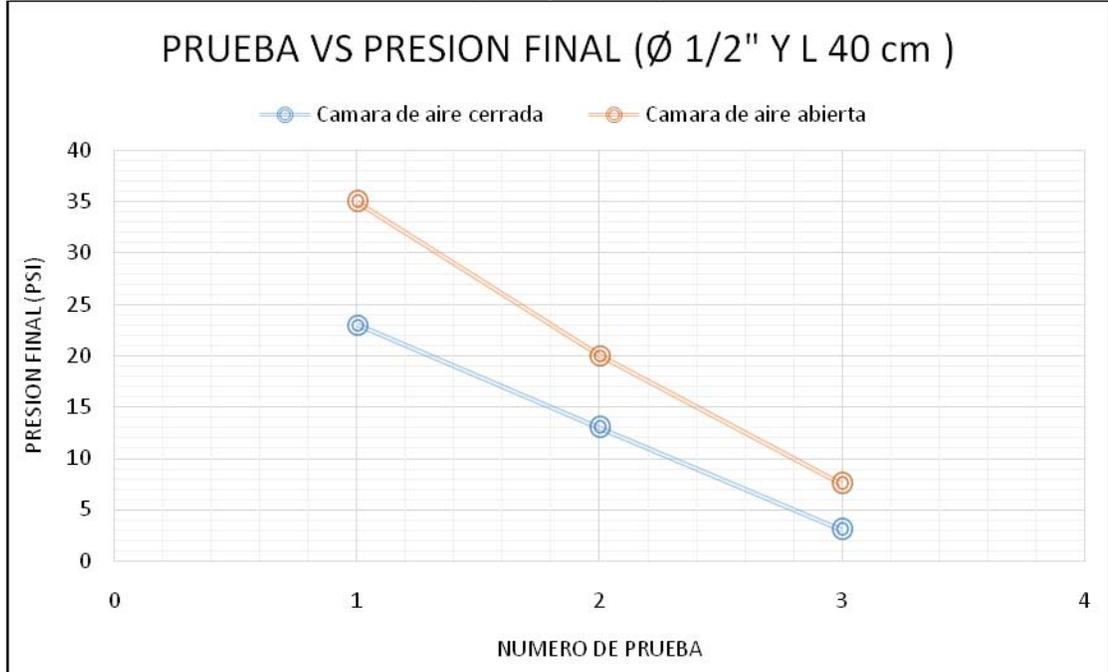
Fuente: Autor.

Figura 36. Prueba vs Presión Final (1/2" vs 30 cm).



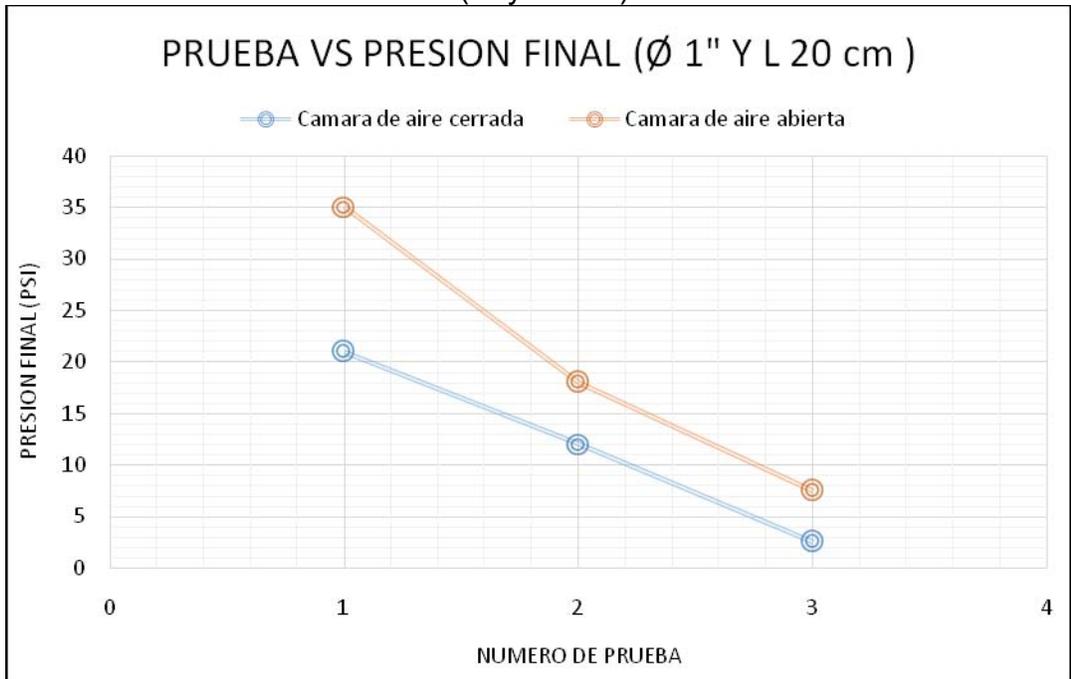
Fuente: Autor.

Figura 37. Prueba vs Presión Final (1/2" y 40 cm).



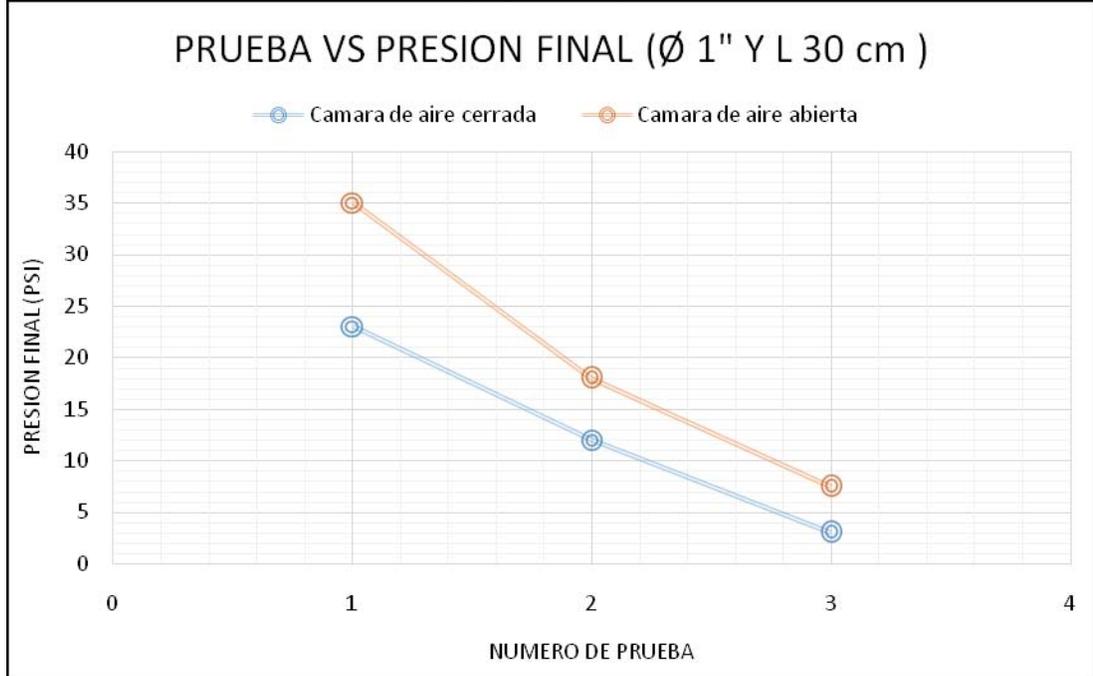
Fuente: Autor.

Figura 38. Prueba vs Presión Final (1" y 20 cm).



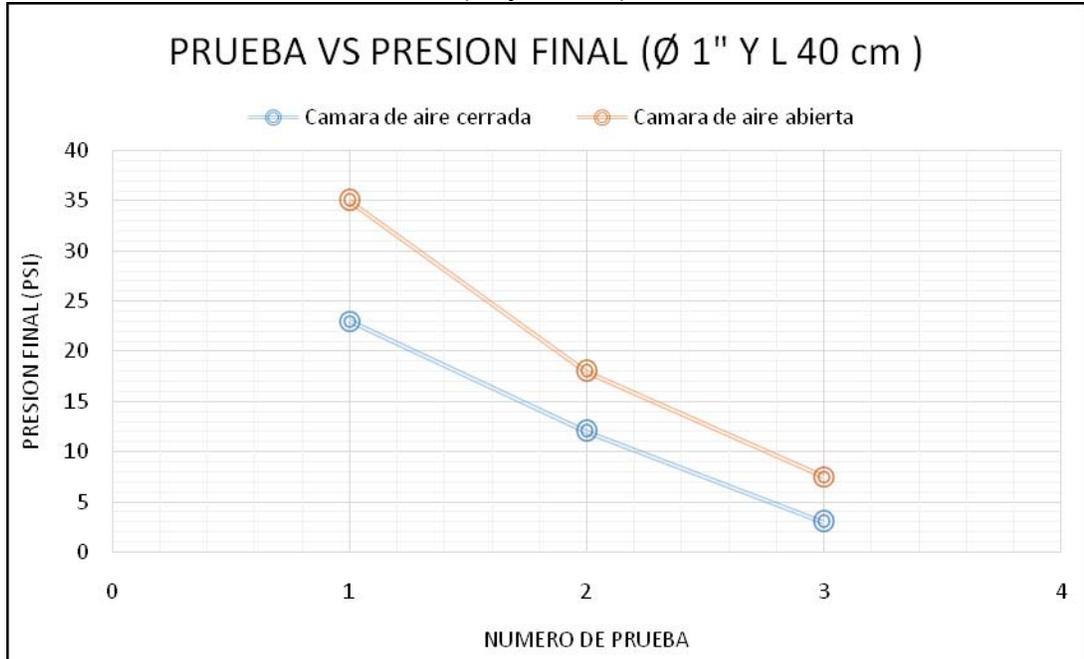
Fuente: Autor.

Figura 39. Prueba vs Presión Final (1"y 30 cm)



Fuente: Autor.

Figura 40. Prueba vs Presión Final (1" y 40 cm).



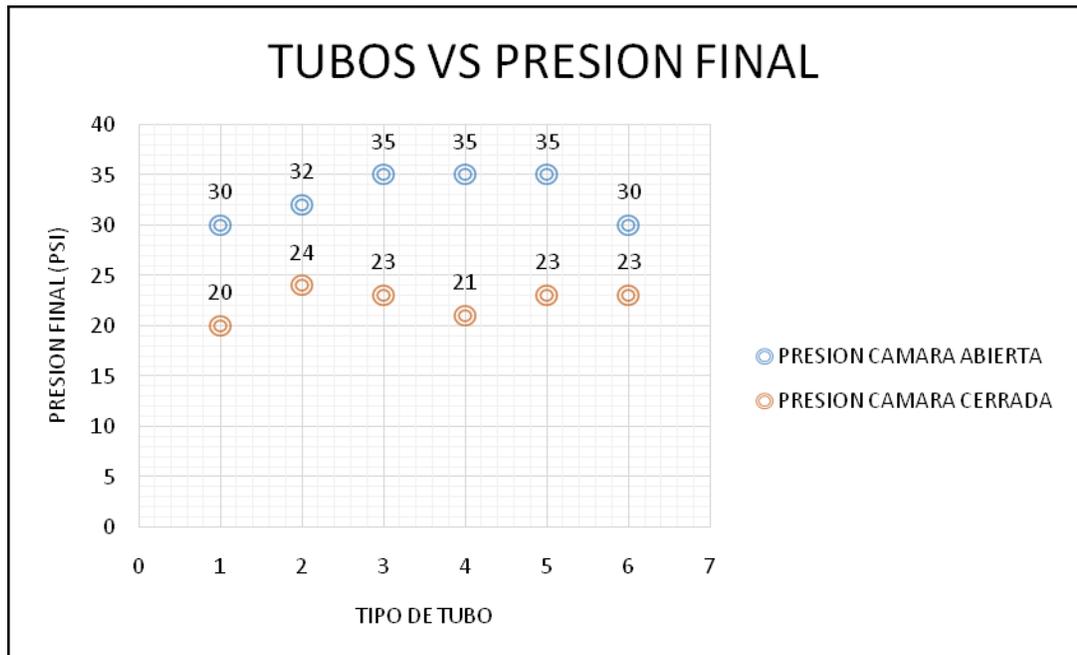
Fuente: Autor.

Observando las figuras anteriores, se puede identificar un comportamiento similar en cada una de ellas, el cual demuestra que la capacidad de disipación de la cámara de aire al variar la presión inicial en el sistema no se ve afectada.

En la primera grafica se puede observar un comportamiento ideal para una cámara de aire al variar la presión inicial del sistema.

En la siguiente grafica se presentan los resultados de las pruebas con la presión más crítica que se puede presentar en el sistema, siendo esta de 25 psi.

Figura 41. Tubos vs Presión Final.



Fuente: Autor.

Siendo 25 psi la presión más crítica del sistema, se puede observar que en la anterior grafica la tubería numero 4 ($\varnothing 1''$ y longitud 20 cm) es la que presenta mayor capacidad de disipación de energía con un porcentaje de 167 %.

Para la tubería numero 1 ($\varnothing 1/2''$ y longitud 20 cm) es la que presenta mejor comportamiento con un porcentaje de disipación de energía del 150 %.

El promedio del porcentaje de disipación en las tuberías de $1/2''$ es de 147 % y en las tuberías de $1''$ es del 150 %.

4.2 SIMULACIÓN EN ALLIEVI

Para la simulación en Allievi se tomaron los datos del montaje final para insertarlos en el software Allieviy lograr interpretar los resultados, a continuación se muestra

el proceso que se llevó a cabo para lograr obtener resultados de Allievi a partir de datos iniciales.

4.2.1 Primera simulación.

- Datos iniciales.

Tabla 5. Datos iniciales depósitos primera simulación.

Depósitos - Datos básicos								
Nombre	Ni	Nf	Zs (m)	Tipo	S (m ²)	Z0 (m)	Zvar	
D1	---	N1	0	GD	-	35	-	-

Fuente: Autor.

Tabla 6. Datos iniciales tuberías primera simulación.

Tuberías - Datos básicos											Pérdidas	
Nombre	Ni	Zi (m)	Nf	Zf (m)	DN (mm)	L (m)	e (mm)	a (m/s)	Perfil	Rug (mm)	k	
T1	N1	0	N2	0	30,2	30	1,6	400	Calc.	---	0,0015	0,32
T3	N4	0	N5	0	18,18	30	1,58	400	Calc.	---	0,0015	0,32
T2	N2	0	N3	0	15,16	30	0,71	400	Calc.	---	0,0015	0,36

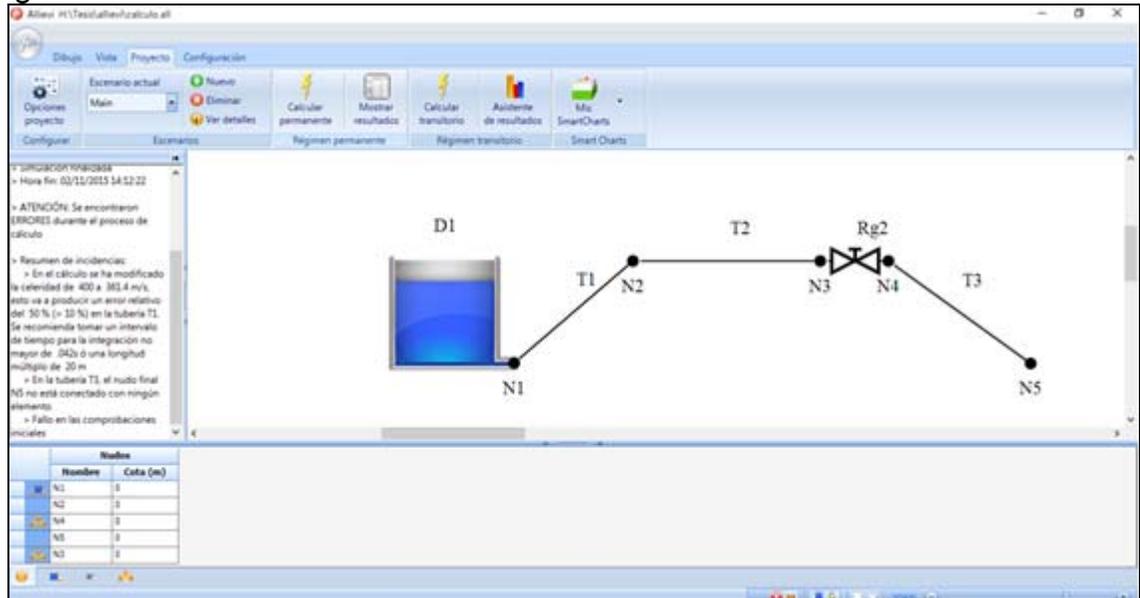
Fuente: Autor.

Tabla 7. Datos iniciales válvula de regulación primera simulación.

Válvula Regulación - Datos básicos							
Nombre	Ni	Nf	Z (m)	DN (mm)	k Ramal	Tipo	
Rg2	N3	N4	0	25,4	9,2	De globo	-

Fuente: Autor.

Figura 42. Primera simulación.



Fuente: Autor.

Se hace la primera simulación con la válvula abierta.

Presenta problemas de velocidades en la tubería y se debe especificar el caudal de demanda en el nodo 5, se realizaron correcciones para realizar una segunda prueba.

4.2.2 Segunda simulación.

- Datos iniciales.

Tabla 8. Datos iniciales depósitos segunda simulación.

Depósitos - Datos básicos								
Nombre	Ni	Nf	Zs (m)	Tipo	S (m ²)	Z0 (m)	Zvar	
D1	---	N1	0	GD	-	35	-	-

Fuente: Autor.

Tabla 9. Datos iniciales tuberías segunda simulación

Tuberías - Datos básicos											Filtrados	
Nombre	Fin	Zi (m)	Ni	Zf (m)	Nf	Q (m ³ /s)	L (m)	n	α (m/s)	Perfil	Rug (mm)	h
T1	N1	0	N2	0	N2	0,000	30	0,01	400	Circ.	0,0001	0,32
T2	N2	0	N3	0	N3	0,000	30	0,01	400	Circ.	0,0001	0,32
T3	N3	0	N4	0	N4	0,000	30	0,01	400	Circ.	0,0001	0,36

Fuente: Autor.

Tabla 10. Datos iniciales válvula de regulación segunda simulación.

Válvula Regulación - Datos básicos							
Nombre	Ni	Nf	Z (m)	DN (mm)	k Ramal	Tipo	
Rg2	N3	N4	0	25,4	9,2	De globo	-

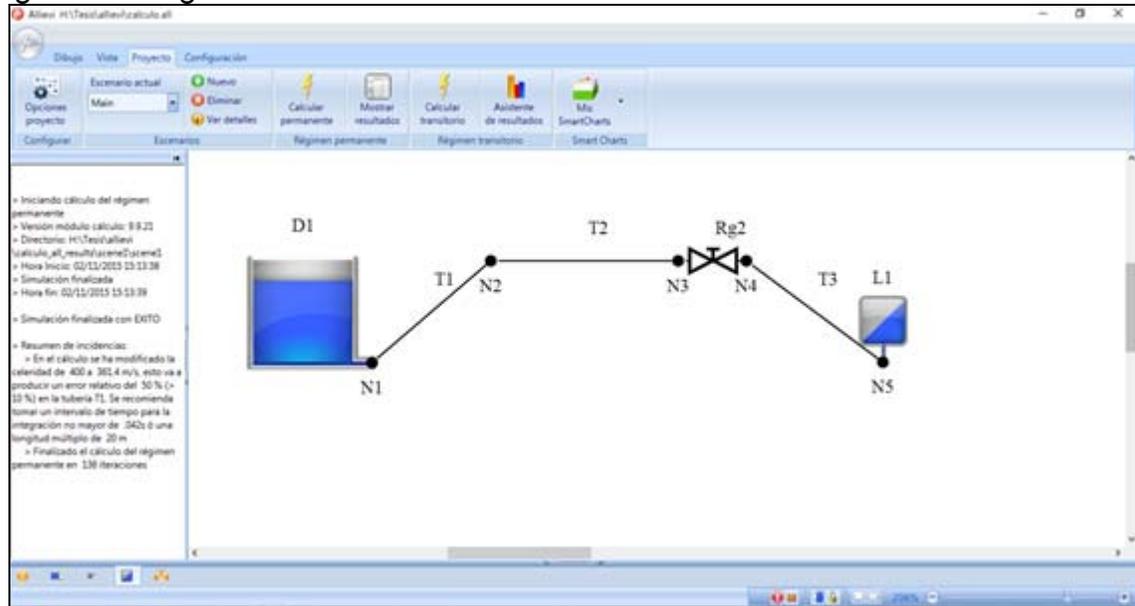
Fuente: Autor.

Tabla 11. Datos iniciales de Ley segunda simulación.

Ley - Datos básicos						
Nombre	Nudo	Z (m)	Tipo	Imp Q	Q imp (l/s)	
L1	N5	0	Q	-	Por tabla	-

Fuente: Autor.

Figura 43. Segunda simulación.



Fuente: Autor.

Se hace a prueba con la válvula abierta.

Se soluciona el problema del caudal de demanda en el nodo 5 insertando una ley que permite regular el caudal de demanda o la presión requerida en el nodo, en este caso el caudal que se requiere en la salida del sistema es de 0.17 l/s, el cual corresponde al caudal arrojado por los ensayos del montaje físico con todo el bypass cerrado y la bomba a toda potencia.

4.2.3 Tercera simulación.

- Datos iniciales.

Tabla 12. Datos iniciales depósitos tercera simulación.

Depósitos - Datos básicos								
Nombre	Ni	Nf	Zs (m)	Tipo	S (m ²)	Z0 (m)	Zvar	
D1	---	N1	0	GD		35		-

Fuente: Autor.

Tabla 13. Datos iniciales tuberías tercera simulación.

Tuberías - Datos básicos												Pérdidas	
Nombre	Ni	Zi (m)	Nf	Zf (m)	Dint (mm)	L (m)	e (mm)	a (m/s)	Perfil	Rug (mm)	k		
T1	N1	0	N2	0	20,2	62	1,6	341,5113	Calc.	0,0015	0,32		
T3	N4	0	N5	0	18,18	62	1,58	429,6777	Calc.	0,0015	0,32		
T2	N2	0	N3	0	14,453	90	0,71	336,3566	Calc.	0,0015	0,38		

Fuente: Autor.

Tabla 14. Datos iniciales válvula de regulación tercera simulación.

Válvula Regulación - Datos básicos						
Nombre	Ni	Nf	Z (m)	DN (mm)	k Ramal	Tipo
Rg2	N3	N4	0	25,4	9,2	De globo

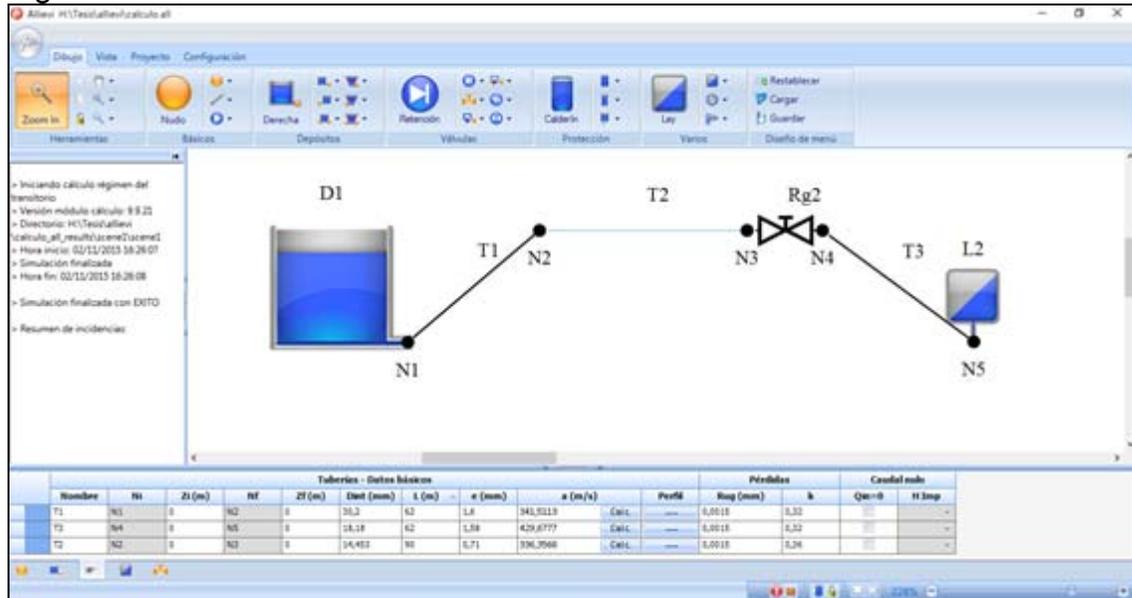
Fuente: Autor.

Tabla 15. Datos iniciales ley tercera simulación.

Ley - Datos básicos				
Nombre	Nudo	Z (m)	Tipo	Imp Q
L1	N5	0	Q	Port tabla

Fuente: Autor.

Figura 44. Tercera simulación.



Fuente: Autor.

Se hace la simulación con tiempos de cerrado y apertura de la válvula para simular el golpe de ariete.

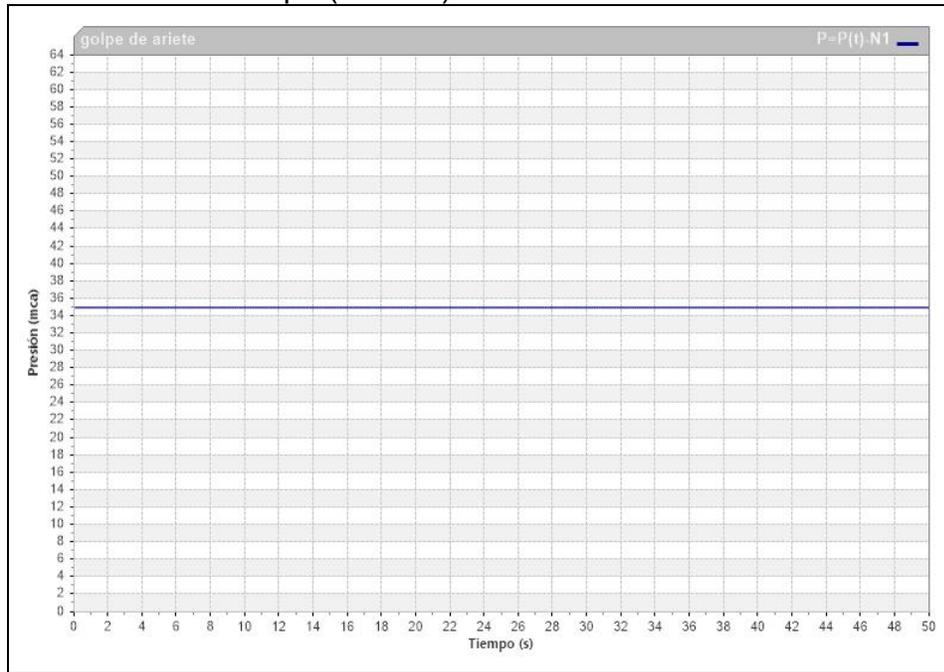
Para poder corregir el error arrojado en la segunda simulación se hace la modificación del régimen de la válvula y de la ley por régimen transitorio y se hace una serie de iteraciones en el cambio de diámetros y longitudes en la tubería.

Con al cual se puede demostrar que solo fue necesario hacer el cambio de longitudes de tubería para poder hacer una simulación sin ningún tipo de error.

Simulación exitosa.

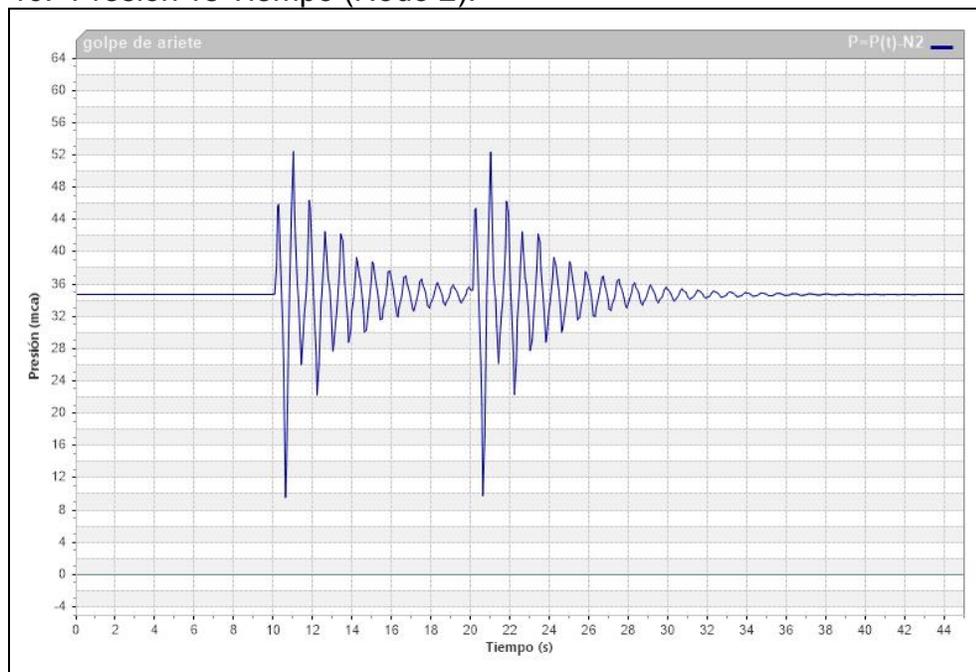
4.2.4 Gráficas de presiones y caudal al cierre de la válvula.

Figura 45. Presión vs Tiempo (Nodo 1).



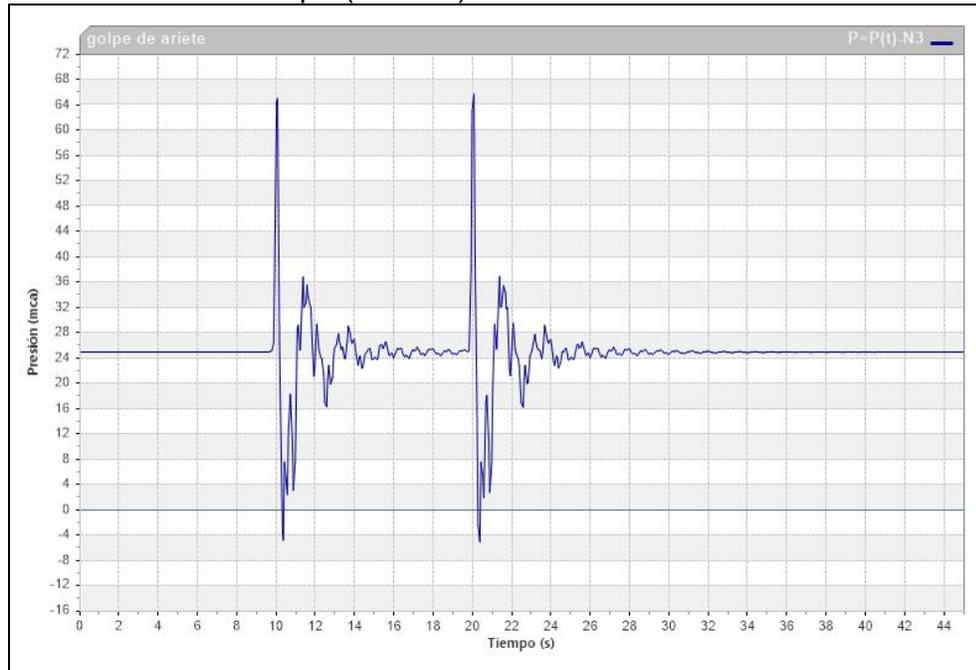
Fuente: Autor.

Figura 46. Presión vs Tiempo (Nodo 2).



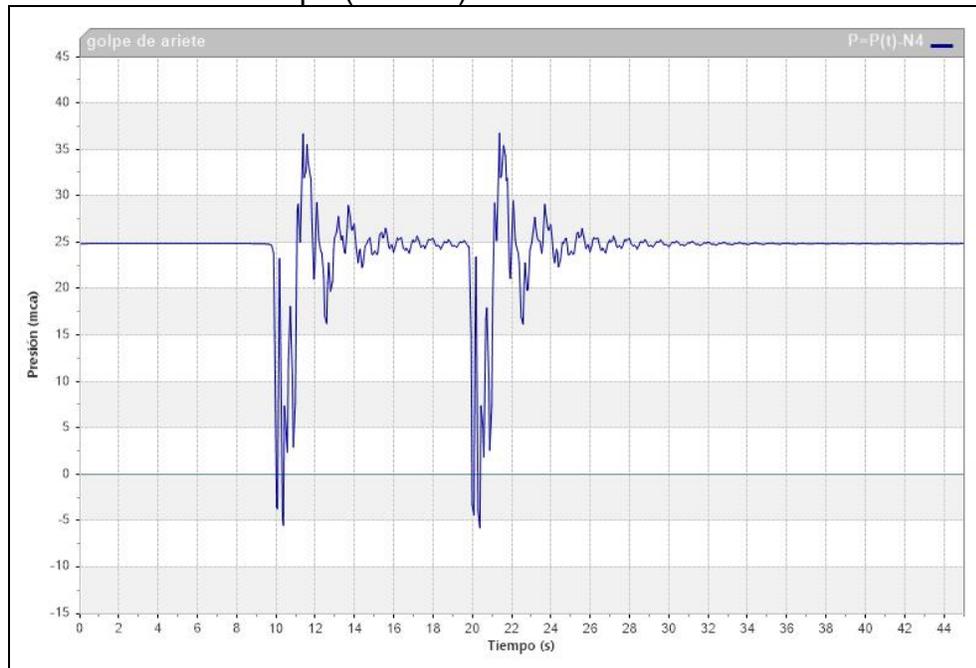
Fuente: Autor.

Figura 47. Presión vs Tiempo (Nodo 3).



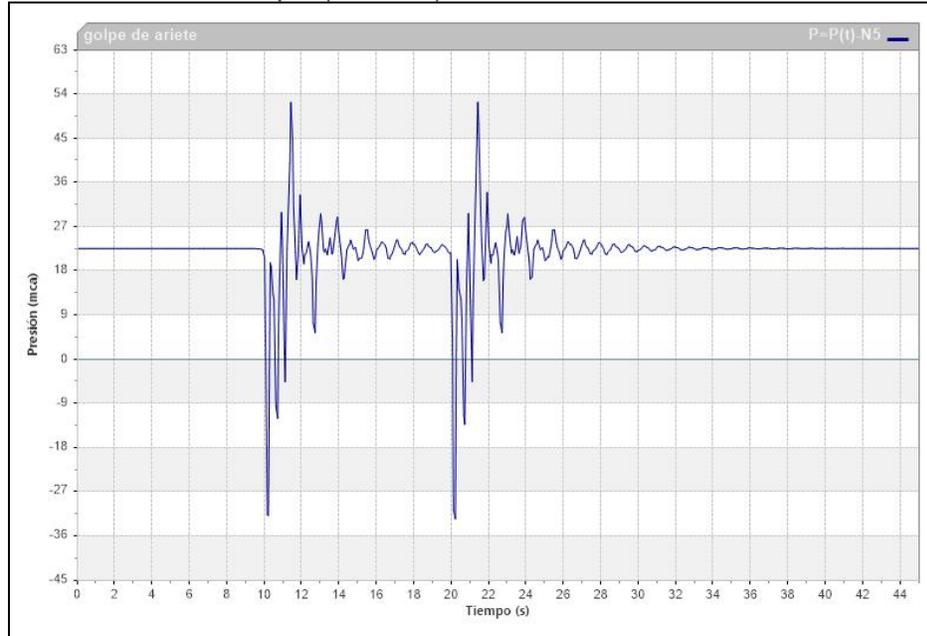
Fuente: Autor.

Figura 48. Presión vs Tiempo (Nodo 4).



Fuente: Autor.

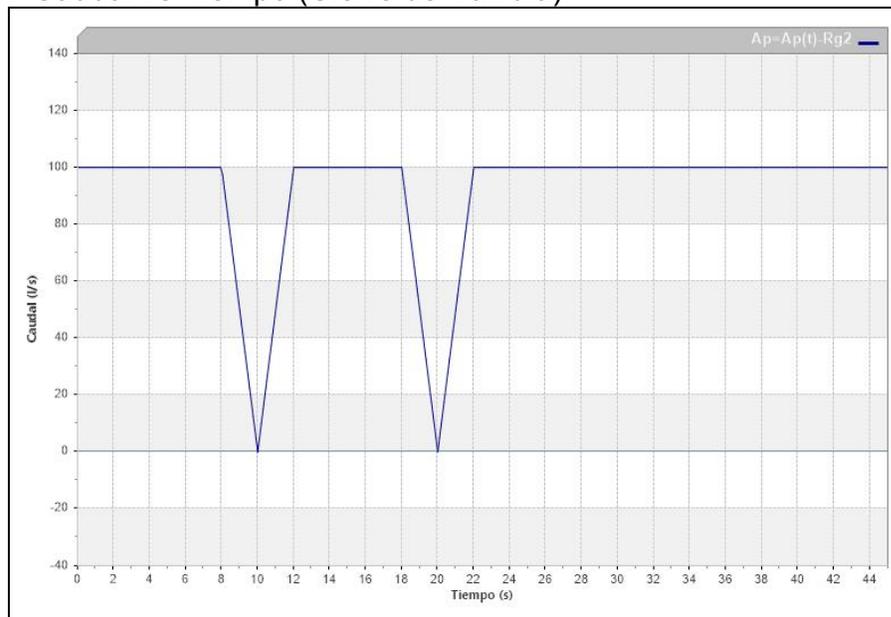
Figura 49. Presión vs Tiempo (Nodo 5).



Fuente: Autor.

Al momento del cierre de la válvula también se genera una gráfica que describe el caudal en el momento en el que se genera el cierre.

Figura 50. Caudal vs Tiempo (Cierre de Válvula).



Fuente: Autor.

5. CONCLUSIONES

- Como resultado de los datos obtenidos en el montaje físico, es posible concluir que la cámara de aire entre más longitud y diámetro se tenga lograra disipar el golpe de ariete.
- Para cada prueba de diámetro y longitud de la cámara de aire se realizaron aforos de caudal, dando como resultado que los caudales son muy cercanos en cada uno de los datos obtenidos siendo así una calibración correcta del tanque para realizar aforos de caudal en el modelo físico.
- Se debe tener en cuenta que para la práctica se hicieron pruebas para la cámara de aire de diámetro una pulgada, es posible determinar que para las instalaciones hidrosanitarias en un hogar no es correcto realizar una instalación con este diámetro, ya que estas instalaciones son realizadas a media pulgada y constructivamente son más eficiente.
- El tiempo de operación de cierre de la válvula para evitar el golpe de ariete es de 15 segundos.
- Al momento del cierre de la válvula la cámara de aire disipa la energía de la presión del agua, así mismo la onda está generando entre dos y tres golpes lo que dice que por no tener un cheque a la salida de la bomba la onda regresa a la bomba y el manómetro numero dos marca los golpes de esta cada vez que va y vuelve.
- Como resultado de la simulación en Allieve se trabajaron con longitudes de tubería por encima de las reales, ya que el software corrige que la onda de choque no logra distribuirse correctamente por la tubería, los valores teóricos aplicados en la simulación fueron por encima de 30 metros de los reales.
- Para las presiones en cada una de los nodos arrojados luego de a simulación en Allievi, se debe tener en cuenta que al momento del cierre de la válvula en un tiempo de 10 segundos el nodo que más genera presión positiva es el nodo 3 con una presión de 64 mca ya que es el nodo que se encuentra antes de la válvula así mismo el nodo que más genera presión negativa es el nodo 4, el cual se encuentra entre -27 mca y -36 mca, siendo este el nodo que se encuentra un instante después de la válvula.
- Para el caudal de la simulación con las características ya nombradas en un tiempo de 10 segundos al momento del cierre de la válvula es de 100 l/s.

6. RECOMENDACIONES

- Para el modelo físico se decidió trabajar sin cheque a la salida de la bomba ya que generaba muchas pérdidas, es recomendable realizar pruebas con un cheque para realizar comparaciones de la onda que genera el choque.
- Para trabajar con mayor presión en el sistema sería factible trabajar con una bomba de mayor caballo de fuerza para lograr hacer comparaciones de presión en el sistema.
- Es importante realizar la instalación de una cámara de aire antes de la tubería de cobre para lograr la medición del fenómeno de golpe de ariete que pueda generar la bomba.
- Para el tiempo de espera del cierre de la válvula, es recomendable esperar 10 segundos como mínimo y registrar el golpe.

BIBLIOGRAFÍA

AZOURY, H., BAASIRI, M., ASCE, M., & NAJM, H. Effect of valve closure shedule on water hammer [en línea] 1986 [citado: 20, ago., 2015]. Disponible en Internet: <URL: <http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%290733-9429%281986%29112%3A10%28890%29>>.

BLACOH. 2012). Prevenga el golpe de ariete & subida de tensión Blacoh [en línea] Estados Unidos [citado: 20, ago., 2015]. Disponible en Internet: <URL: <https://www.youtube.com/watch?v=cqmdaye0i6g>>.

BOSA ABRIL, Víctor Alejandro y CASTRO MORENO, Jeffrey Alejandro. Diseño, construcción de un sistema para medir el golpe de ariete en el laboratorio. Trabajo de grado. Ingeniero Civil. Bogotá D.C: Universidad Católica de Colombia. Facultad de Ingeniería. Programa de Ingeniería Civil, 2005. 112 p.

CHAUDRY, M. H. Applied hydraulic transients. Estados Unidos: Van Nostrand Reinhold Ltda., 1979. 413 p.

COBRE, I. E. Copperalliance [en línea] 2015 [citado: 20, ago., 2015]. Disponible en Internet: <URL: <http://www.copperalliance.es/aplicaciones/sistemas-de-tuber%C3%ADas>>.

ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERÍA AGRÍCOLA DE CIUDAD REAL. Cátedra de Ingeniería Rural: Tema 10. El golpe de ariete [en línea] Universidad de Castilla-La Mancha [citado: 20, ago., 2015]. Disponible en Internet: <URL: https://www.uclm.es/area/ing_rural/Trans_hidr/Tema10.PDF>.

GORKA, A., ALMANDOZ BERRONDO, J., JIMÉNEZ REDAL, R., MONGELOS, B. y PELLEJERO, I. Mecánica de fluidos apuntes. Donostia, San Sebastián, España, 2012. 379 p.

INGENIEROS, U. D. Guiones de las prácticas del laboratorio de mecánica de fluidos. Pamplona: Alfabeta. 2009. 193 p.

JARABA LOZANO, E., MÉNDEZ NAVARRO, A., y SALAZAR CANTOR, G. Golpe de ariete, línea de energía y compresibilidad del aire por medio de almenaras. Tesis de Grado. Corporación Universitaria Minuto de Dios, 2009. 123 p.

JOE EVANS, P. Pumps and Systems [en línea] 2008 [citado: 20, ago., 2015]. Disponible en Internet: <URL: <http://www.pumpsandsystems.com/topics/pumps/pumps/causes-water-hammer-part-one>>.

LÓPEZ CUALLA, Ricardo Alfredo. Elementos de diseño para acueductos y alcantarillados. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería, 2003. 646 p.

MOHAMED, S. G. Urban Water Journal [en línea] 2010 [citado: 20, ago., 2015]. Disponible en Internet: <URL: <http://www.tandfonline.com/loi/nurw20#.Vf7y-vTNLo0>>.

MOTT, Robert L. Mecánica de fluidos. 6 ed. México: Pearson, 2006. 626 p.

PAVCO. Manual técnico de tubosistemas PAVCO [en línea] Bogotá: La Empresa [citado: 20, ago., 2015]. Disponible en Internet: <URL: <http://www.pavco.com.co/?dw=b396c99d80c2076845e6bd13629e2186w2r2>>.

PELIKAN, R. Causas de los golpes de ariete [en línea] 2005 [citado: 20, ago., 2015]. Disponible en Internet: <URL: <http://search.proquest.com/docview/210613445?accountid=45660>>.

PÉREZ CARMONA, Rafael. Instalaciones hidrosanitarias y de gas para edificaciones. 6 ed. Bogotá: Ecoe, 2010. 546 p.

SANG-GYUN, K., KYE-BOCK, L., y KYUNG-YUP, K.. Water hammer in the pump-rising pipeline system with an air chamber [en línea] 2014 [citado: 20, ago., 2015]. Disponible en Internet: <URL: <http://www.sciencedirect.com>>.

TLV. TLV Compañía especialista en vapor [en línea] 2015 [citado: 20, ago., 2015]. Disponible en Internet: <URL: <http://www.tlv.com/global/LA/steam-theory/what-is-waterhammer.html>>.

TWYMAN, John. Golpe de ariete en redes de tuberías [en línea] Santiago: TWYMAN Ingenieros [citado: 20, ago., 2015]. Disponible en Internet: <URL: http://www.twyman.cl/TWYMAN_Golpe_de_Ariete_en_Redde_de_Tuberias.pdf>.

VALENCIA, U. P. Allievi [en línea] 2015 [citado: 20, ago., 2015]. Disponible en Internet: <URL: <http://www.allievi.net>: <http://www.allievi.net/allievi-es.php>>.

Anexo A. Tabla de resultados de ensayos de modelo físico.

A continuación se muestran las tablas de resultados de los ensayos resultados en el modelo físico.

Para la primera prueba con una tubería de 20 centímetros de longitud y un diámetro de ½” se tienen los siguientes resultados:

Prueba No. 1 Longitud 20 cm y diámetro. ½” (25 PSI)

PRUEBA # 1			
CÁMARA DE AIRE CERRADA			
Manómetro	Presión inicial (PSI)	Presión final (PSI)	Δ Presión (PSI)
1	25	4	-20
2	0	20	20
CÁMARA DE AIRE ABIERTA			
Manómetro	Presión inicial (PSI)	Presión final (PSI)	Δ Presión (PSI)
1	25	2	-22
2	0	30	30
CÁLCULO DEL CAUDAL (L/S)			
Tiempos (s)	Tiempo promedio (s)	Volumen (L)	Q (L/S)
5,91	6,059	1	0,17
6,32			
6,18			
5,7			
5,98			
6,25			
5,88			
6,41			
5,83			
6,13			
V (m/s)			

Prueba No. 2 Longitud 20 cm y diámetro 1/2" (15 PSI).

PRUEBA # 2			
CÁMARA DE AIRE CERRADA			
Manómetro	Presión inicial (PSI)	Presión final (PSI)	Δ Presión (PSI)
1	15	2	-13
2	0	12	12
CÁMARA DE AIRE ABIERTA			
Manómetro	Presión inicial (PSI)	Presión final (PSI)	Δ Presión (PSI)
1	15	2	-13
2	0	26	26
CÁLCULO DEL CAUDAL (L/S)			
Tiempos (s)	Tiempo promedio (s)	Volumen (L)	Q (L/S)
8,3	7,822	1	0,13
8,38			
7,68			
6,9			
8,11			
7,76			
7,95			
7,86			
7,9			
7,38			
V (m/s)			

Prueba No.3 Longitud 20 cm y diámetro 1/2" (10 PSI).

PRUEBA # 3			
CÁMARA DE AIRE CERRADA			
Manómetro	Presión inicial (PSI)	Presión final (PSI)	Δ Presión (PSI)
1	10	2	-8
2	0	2	2
CÁMARA DE AIRE ABIERTA			
Manómetro	Presión inicial (PSI)	Presión final (PSI)	Δ Presión (PSI)
1	10	2	-8
2	0	12	12
CÁLCULO DEL CAUDAL (L/S)			
Tiempos (s)	Tiempo promedio (s)	Volumen (L)	Q (L/S)
10,25	9,43	1	0,11
8,58			
9,13			
9,18			
9,23			
9,35			
9,51			
10,15			
9,41			
9,51			
V (m/s)	0,837126295		

Para la segunda prueba con una tubería de 30 centímetros de longitud y un diámetro de 1/2" se tienen los siguientes resultados:

Prueba No.1 Longitud 30 cm y diámetro 1/2" (25 PSI).

PRUEBA # 1			
CÁMARA DE AIRE CERRADA			
Manómetro	Presión inicial (PSI)	Presión final (PSI)	Δ Presión (PSI)
1	25	10	-16
2	0	24	24
CÁMARA DE AIRE ABIERTA			
Manómetro	Presión inicial (PSI)	Presión final (PSI)	Δ Presión (PSI)
1	25	5	-21
2	0	32	32
CÁLCULO DEL CAUDAL (L/S)			
Tiempos (s)	Tiempo promedio (s)	Volumen (L)	Q (L/S)
4,73	5,582	1	0,17914726
5,88			
5,61			
4,61			
6,56			
5,38			
5,73			
5,91			
5,38			
6,03			
V (m/s)	1,414206551		

Prueba No.2 Longitud 30 cm y diámetro ½" (15 PSI).

PRUEBA # 2			
CÁMARA DE AIRE CERRADA			
Manómetro	Presión inicial (PSI)	Presión final (PSI)	Δ Presión (PSI)
1	15	5	-10
2	0	11	11
CÁMARA DE AIRE ABIERTA			
Manómetro	Presión inicial (PSI)	Presión final (PSI)	Δ Presión (PSI)
1	15	5	-10
2	0	18	18
CÁLCULO DEL CAUDAL (L/S)			
Tiempos (s)	Tiempo promedio (s)	Volumen (L)	Q (L/S)
8,08	7,743	1	0,13
7,55			
7,46			
7,68			
7,48			
7,6			
8,36			
7,21			
8,18			
7,83			
V (m/s)	1,019514525		

Prueba No.3 Longitud 30 cm y diámetro ½" (10 PSI).

PRUEBA # 3			
CÁMARA DE AIRE CERRADA			
Manómetro	Presión inicial (PSI)	Presión final (PSI)	Δ Presión (PSI)
1	10	5	-5
2	0	2,5	2,5
CÁMARA DE AIRE ABIERTA			
Manómetro	Presión inicial (PSI)	Presión final (PSI)	Δ Presión (PSI)
1	10	5	-5
2	0	9	9
CÁLCULO DEL CAUDAL (L/S)			
Tiempos (s)	Tiempo promedio (s)	Volumen (L)	Q (L/S)
9,3	9,505	1	0,11
10,65			
8,81			
9,28			
9,06			
9,58			
9,58			
9,96			
9,13			
9,7			
V (m/s)	0,83052088		

Para la tercera prueba con una tubería de 40 centímetros de longitud y un diámetro de ½" se tienen los siguientes resultados:

Prueba No.1 Longitud 40 cm y diámetro ½" (25 PSI)

PRUEBA # 1			
CÁMARA DE AIRE CERRADA			
Manómetro	Presión inicial (PSI)	Presión final (PSI)	Δ Presión (PSI)
1	25	5	-20
2	0	23	23
CÁMARA DE AIRE ABIERTA			
Manómetro	Presión inicial (PSI)	Presión final (PSI)	Δ Presión (PSI)
1	25	5	-20
2	0	35	35
CÁLCULO DEL CAUDAL (L/S)			
Tiempos (s)	Tiempo promedio (s)	Volumen (L)	Q (L/S)
5,25	5,886	1	0,16989467
6,26			
6,08			
5,33			
5,86			
6,3			
5,86			
5,93			
5,91			
6,08			
V (m/s)			

Prueba No.2 Longitud 40 cm y diámetro 1/2" (15 PSI).

PRUEBA # 2			
CÁMARA DE AIRE CERRADA			
Manómetro	Presión inicial (PSI)	Presión final (PSI)	Δ Presión (PSI)
1	15	5	-10
2	0	13	13
CÁMARA DE AIRE ABIERTA			
Manómetro	Presión inicial (PSI)	Presión final (PSI)	Δ Presión (PSI)
1	15	5	-10
2	0	20	20
CÁLCULO DEL CAUDAL (L/S)			
Tiempos (s)	Tiempo promedio (s)	Volumen (L)	Q (L/S)
7,83	7,608	1	0,13
7,35			
7,95			
7,23			
7,45			
7,46			
7,3			
7,73			
7,93			
7,85			
V (m/s)	1,037605279		

Prueba No.3 Longitud 40 cm y diámetro 1/2" (10 PSI).

PRUEBA # 3			
CÁMARA DE AIRE CERRADA			
Manómetro	Presión inicial (PSI)	Presión final (PSI)	Δ Presión (PSI)
1	10	5	-5
2	0	3	3
CÁMARA DE AIRE ABIERTA			
Manómetro	Presión inicial (PSI)	Presión final (PSI)	Δ Presión (PSI)
1	10	5	-5
2	0	7,5	7,5
CÁLCULO DEL CAUDAL (L/S)			
Tiempos (s)	Tiempo promedio (s)	Volumen (L)	Q (L/S)
9,75	9,625	1	0,10
9,61			
9,36			
9,7			
9,1			
9,76			
9,81			
9,7			
9,81			
9,65			
V (m/s)	0,820166334		

Para la cuarta prueba con una tubería de 20 centímetros de longitud y un diámetro de 1" se tienen los siguientes resultados:

Prueba No.1 Longitud 20 cm y diámetro 1" (25 PSI).

PRUEBA # 1			
CÁMARA DE AIRE CERRADA			
Manómetro	Presión inicial (PSI)	Presión final (PSI)	Δ Presión (PSI)
1	25	5	-20
2	0	21	21
CÁMARA DE AIRE ABIERTA			
Manómetro	Presión inicial (PSI)	Presión final (PSI)	Δ Presión (PSI)
1	25	5	-20
2	0	35	35
CÁLCULO DEL CAUDAL (L/S)			
Tiempos (s)	Tiempo promedio (s)	Volumen (L)	Q (L/S)
5,49	5,54409543	1	0,18037208
5,35			
5,15			
5,56			
6,37			
5,18			
5,67			
5,81			
5,14			
5,71			
V (m/s)		1,423875376	

Prueba No.2 Longitud 20 cm y diámetro 1" (15 PSI).

PRUEBA # 2			
CÁMARA DE AIRE CERRADA			
Manómetro	Presión inicial (PSI)	Presión final (PSI)	Δ Presión (PSI)
1	15	5	-10
2	0	12	12
CÁMARA DE AIRE ABIERTA			
Manómetro	Presión inicial (PSI)	Presión final (PSI)	Δ Presión (PSI)
1	15	5	-10
2	0	18	18
CÁLCULO DEL CAUDAL (L/S)			
Tiempos (s)	Tiempo promedio (s)	Volumen (L)	Q (L/S)
7,36	7,55209378	1	0,13
7,94			
7,97			
8,02			
7,22			
7,43			
7,50			
7,83			
7,13			
7,12			
V (m/s)	1,045286407		

Prueba No.3 Longitud 20 cm y diámetro 1" (10 PSI).

PRUEBA # 3			
CÁMARA DE AIRE CERRADA			
Manómetro	Presión inicial (PSI)	Presión final (PSI)	Δ Presión (PSI)
1	10	5	-5
2	0	2,5	2,5
CÁMARA DE AIRE ABIERTA			
Manómetro	Presión inicial (PSI)	Presión final (PSI)	Δ Presión (PSI)
1	10	5	-5
2	0	7,5	7,5
CÁLCULO DEL CAUDAL (L/S)			
Tiempos (s)	Tiempo promedio (s)	Volumen (L)	Q (L/S)
9,48	9,97993878	1	0,10
10,29			
10,20			
10,26			
10,15			
10,27			
9,46			
9,95			
9,66			
10,08			
V (m/s)			

Para la quinta prueba con una tubería de 30 centímetros de longitud y un diámetro de 1" se tienen los siguientes resultados:

Prueba No.1 Longitud 30 cm y diámetro 1" (25 PSI).

PRUEBA # 1			
CÁMARA DE AIRE CERRADA			
Manómetro	Presión inicial (PSI)	Presión final (PSI)	Δ Presión (PSI)
1	25	5	-20
2	0	23	23
CÁMARA DE AIRE ABIERTA			
Manómetro	Presión inicial (PSI)	Presión final (PSI)	Δ Presión (PSI)
1	25	5	-20
2	0	35	35
CÁLCULO DEL CAUDAL (L/S)			
Tiempos (s)	Tiempo promedio (s)	Volumen (L)	Q (L/S)
5,55	5,94554217	1	0,16819324
6,14			
6,05			
6,36			
6,13			
5,70			
6,02			
5,43			
5,97			
6,11			
V (m/s)			

Prueba No.2 Longitud 30 cm y diámetro 1" (15 PSI).

PRUEBA # 2			
CÁMARA DE AIRE CERRADA			
Manómetro	Presión inicial (PSI)	Presión final (PSI)	Δ Presión (PSI)
1	15	5	-10
2	0	12	12
CÁMARA DE AIRE ABIERTA			
Manómetro	Presión inicial (PSI)	Presión final (PSI)	Δ Presión (PSI)
1	15	5	-10
2	0	17	17
CÁLCULO DEL CAUDAL (L/S)			
Tiempos (s)	Tiempo promedio (s)	Volumen (L)	Q (L/S)
7,14	7,76306699	1	0,13
8,03			
7,68			
7,45			
8,11			
8,16			
7,58			
7,44			
7,86			
8,19			
V (m/s)		1,016879151	

Prueba No.3 Longitud 30 cm y diámetro 1" (10 PSI).

PRUEBA # 3			
CÁMARA DE AIRE CERRADA			
Manómetro	Presión inicial (PSI)	Presión final (PSI)	Δ Presión (PSI)
1	10	5	-5
2	0	3	3
CÁMARA DE AIRE ABIERTA			
Manómetro	Presión inicial (PSI)	Presión final (PSI)	Δ Presión (PSI)
1	10	5	-5
2	0	5	5
CÁLCULO DEL CAUDAL (L/S)			
Tiempos (s)	Tiempo promedio (s)	Volumen (L)	Q (L/S)
10,46	9,94187334	1	0,10
10,39			
10,37			
10,47			
9,98			
10,05			
9,27			
9,32			
9,66			
9,43			
V (m/s)			

Para la última prueba con una tubería de 40 centímetros de longitud y un diámetro de 1" se tienen los siguientes resultados:

Prueba No.1 Longitud 40 cm y diámetro 1" (25 PSI).

PRUEBA # 1			
CÁMARA DE AIRE CERRADA			
Manómetro	Presión inicial (PSI)	Presión final (PSI)	Δ Presión (PSI)
1	25	5	-20
2	0	23	23
CÁMARA DE AIRE ABIERTA			
Manómetro	Presión inicial (PSI)	Presión final (PSI)	Δ Presión (PSI)
1	25	5	-20
2	0	30	30
CÁLCULO DEL CAUDAL (L/S)			
Tiempos (s)	Tiempo promedio (s)	Volumen (L)	Q (L/S)
5,77	5,65718879	1	0,17676624
5,92			
6,33			
5,30			
5,68			
5,07			
5,98			
5,06			
6,24			
5,23			
V (m/s)			

Prueba No.2 Longitud 40 cm y diámetro 1" (15 PSI).

PRUEBA # 2			
CÁMARA DE AIRE CERRADA			
Manómetro	Presión inicial (PSI)	Presión final (PSI)	Δ Presión (PSI)
1	15	5	-10
2	0	12	12
CÁMARA DE AIRE ABIERTA			
Manómetro	Presión inicial (PSI)	Presión final (PSI)	Δ Presión (PSI)
1	15	5	-10
2	0	15	15
CÁLCULO DEL CAUDAL (L/S)			
Tiempos (s)	Tiempo promedio (s)	Volumen (L)	Q (L/S)
8,13	7,74225516	1	0,13
7,55			
8,15			
7,60			
7,99			
7,17			
7,76			
7,65			
7,26			
8,15			
V (m/s)	1,019612607		

Prueba No.3 Longitud 40 cm y diámetro 1" (10 PSI).

PRUEBA # 3			
CÁMARA DE AIRE CERRADA			
Manómetro	Presión inicial (PSI)	Presión final (PSI)	Δ Presión (PSI)
1	10	5	-5
2	0	3	3
CÁMARA DE AIRE ABIERTA			
Manómetro	Presión inicial (PSI)	Presión final (PSI)	Δ Presión (PSI)
1	10	5	-5
2	0	5	5
CÁLCULO DEL CAUDAL (L/S)			
Tiempos (s)	Tiempo promedio (s)	Volumen (L)	Q (L/S)
9,63	9,78973907	1	0,10
9,75			
10,38			
9,03			
10,16			
10,30			
10,09			
9,22			
10,17			
9,16			
V (m/s)	0,806364798		

Anexo B. Planos generales de modelo físico.

