

PROYECTO DE GRADO INGENIERIA CIVIL

**ESTRUCTURAS PARA EL AMORTIGUAMIENTO DE GOLPE DE ARIETE
EN SISTEMAS DE DISTRIBUCION DE AGUA POTABLE**

RUBEN MAURICIO ROBAYO ARAQUE

Asesor: Juan G. Saldarriaga Valderrama



**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C.
2021**

AGRADECIMIENTOS

Al Centro de Investigaciones de Acueductos y Alcantarillados - CIACUA en cuyas instalaciones tuve la oportunidad de realizar investigaciones experimentales y teóricas a través de las cuales adquirí mucho conocimiento en el área de la hidráulica de flujos a presión.

A mi familia y amigos por apoyarme desde el comienzo hasta el último día de mi pregrado y darme el animo necesario en los momentos más difíciles.

A Juan Saldarriaga por su dirección y asesoría en la realización del presente trabajo de grado, por compartir conmigo parte de su conocimiento gracias al cual, estoy seguro seré un mejor profesional.

A la empresa PAVCO S.A por la catedra y su colaboración con los materiales para la construcción del montaje de laboratorio que permitió el desarrollo de esta tesis.

Tabla de contenido

Índice de Tablas	10
Introducción:	11
Objetivos	11
Objetivo General:	11
Objetivos Específicos:	11
Marco Teórico:	14
Conceptos Básicos del Golpe de Ariete:	14
Ecuación de Continuidad:	14
Principio de Bernoulli:	14
Perdidas de Energía:	15
Teoría de Emisores:	16
Golpe de Ariete:	16
Normas e Investigaciones Previas:	17
NTC 1500:	17
Investigation of Water Hammer Effect Through Pipeline System:	17
Water Hammer Arresters:	18
Performance Requirements for Water Hammer Arresters (ASSE #1010):	20
Descripción del Montaje de Laboratorio:	22
Aparatos Sanitarios:	22
Válvulas de Ejecución de Golpe:	22
Amortiguadores de Golpe Evaluados:	23
Amortiguador Tubería PVC 1m:	23
Amortiguador Tubería PVC 15cm:	24
Amortiguador Tipo Pistón 1”:	24
Amortiguador Tipo Pistón ½”:	25
Lectores de Presión:	26
Red Elevada y de Acueducto:	27
Mediciones de Caudal:	29
Modelos Evaluados:	31
Evaluaciones de cada Modelo:	32



Resultados de la Ejecución de Pruebas:	36
Resultados Pruebas Modelo - María Fernanda Fonseca –	36
Resultados Pruebas Modelo – Tubería ½” Red Elevada 1 Ducha Caudal Mínimo –	44
Resultados Pruebas Modelo – Tubería ½” Red Elevada 1 Ducha –	47
Resultados Pruebas Modelo – Tubería ½” Red Elevada 2 Duchas –	52
Resultados Pruebas Modelo – Tubería ½” Red Elevada 3 Duchas –	54
Resultados Pruebas Modelo – Tubería ½” Red Acueducto 1 Ducha Caudal Mínimo –	56
Resultados Pruebas Modelo – Tubería ½” Red Acueducto 1 Ducha –	59
Resultados Pruebas Modelo – Tubería ½” Red Acueducto 2 Duchas –	64
Resultados Pruebas Modelo – Tubería ½” Red Acueducto 3 Duchas –	65
Resultados Pruebas Modelo – Tubería ½” Red Combinada 1 Ducha –	66
Resultados Pruebas Modelo – Tubería ½” Red Combinada 2 Duchas –	69
Resultados Pruebas Modelo – Tubería ½” Red Combinada 3 Duchas –	72
Resultados Pruebas Modelo – Tubería 1” Red Elevada 1 Ducha Caudal Mínimo –	75
Resultados Pruebas Modelo – Tubería 1” Red Elevada 1 Ducha –	78
Resultados Pruebas Modelo – Tubería 1” Red Elevada 2 Duchas –	81
Resultados Pruebas Modelo – Tubería 1” Red Elevada 3 Duchas –	84
Resultados Pruebas Modelo – Tubería 1” Red Acueducto 1 Ducha Caudal Mínimo –	87
Resultados Pruebas Modelo – Tubería 1” Red Acueducto 1 Ducha –	90
Resultados Pruebas Modelo – Tubería 1” Red Acueducto 2 Duchas –	93
Resultados Pruebas Modelo – Tubería 1” Red Acueducto 3 Duchas –	96
Análisis de Resultados:	99
Análisis Pruebas Modelo - María Fernanda Fonseca –	99
Análisis Pruebas Modelo – Tubería ½” Red Elevada –	99
Análisis Pruebas Modelo – Tubería ½” Red Acueducto –	100
Análisis Pruebas Modelo – Tubería ½” Red Combinada –	101
Análisis Pruebas Modelo – Tubería 1” Red Elevada –	101
Análisis Pruebas Modelo – Tubería 1” Red Acueducto –	102



Conclusiones:	103
Recomendaciones:	103
Referencias	104

Índice de Figuras

Figura 1: Montaje de Laboratorio Proyecto Revisión de Métodos de Diseño... (Fonseca, 2009).....	12
Figura 2: Tanque de Almacenamiento de Agua. (Fonseca, 2009)	13
Figura 3: Tanque de Recirculación del Agua. (Fonseca, 2009)	13
Figura 4: valores de velocidad de honda según RDE comerciales. (WAVIN, 2020)	17
Figura 5: Modelo de Pruebas de Amortiguadores de Golpe de Ariete. (PDI, 2017).....	18
Figura 6: Estándares de Amortiguación de Presión. (PDI, 2017)	19
Figura 7: Unidades de carga según aparato y la relación del acumulado del sistema con el amortiguador a instalar. (PDI, 2017).....	19
Figura 8: Selección del tamaño del amortiguador según la carga y presiones del sistema de distribución. (PDI, 2017).....	20
Figura 9: Ejemplo de selección de amortiguador según método PDI. (PDI, 2017)	20
Figura 10: Modelo de Pruebas de Amortiguadores de Golpe de Ariete. (American Society of Sanitary Engineering, 2004).....	21
Figura 11: Estándares de Amortiguación de presión ASSE 1010. (American Society of Sanitary Engineering, 2004).....	21
Figura 12: Aparatos Sanitarios	22
Figura 13: Válvula de cierre rápido.....	23
Figura 14: Amortiguador de tubería PVC 1m	23
Figura 15: Amortiguador de tubería PVC 15 cm.	24
Figura 16: Amortiguador Zurn Tipo Pistón 1’’	25
Figura 17: Amortiguador Zurn Tipo Pistón ½’’	26
Figura 18: Transmisor de Presión Vegabar 14. (Instrumatic Ltda., 2021).....	27
Figura 19: Derivación Red Acueducto	28
Figura 20: Derivación de la Red Elevada.....	28
Figura 21: Conexión de la Red Elevada y Acueducto al Modelo de Duchas.....	29
Figura 22: Caudalímetro Red María Fernanda	30
Figura 23: Caudalímetro red elevada y acueducto	31
Figura 24: Sistema de Una Ducha Evaluado	32
Figura 25: Sistema de Tres Duchas	32
Figura 26: Golpe de Ariete a 0,10 Mpa en Modelo María Fernanda – Amortiguador Tubería 15 cm long –	36
Figura 27: Golpe de Ariete a 0,13 Mpa en Modelo María Fernanda – Amortiguador Tubería 15 cm long -	37
Figura 28: Golpe de Ariete a 0,2 Mpa en Modelo María Fernanda – Amortiguador Tubería 15 cm long –	38
Figura 29: Golpe de Ariete a 0,1 Mpa en Modelo María Fernanda – Amortiguador Tubería 1 m long –	39
Figura 30: Golpe de Ariete a 0,12 Mpa en Modelo María Fernanda – Amortiguador Tubería 1 m long –	40

Figura 31: Golpe de Ariete a 0,1 Mpa en Modelo María Fernanda – Amortiguador Pistón 1’’	41
Figura 32: Golpe de Ariete a 0,13 Mpa en Modelo María Fernanda – Amortiguador Pistón 1’’	42
Figura 33: Golpe de Ariete a 0,2 Mpa en Modelo María Fernanda – Amortiguador Pistón 1’’	43
Figura 34: Golpe de Ariete a 0,13 Mpa en Modelo tubería ½’’ 1 Ducha – Sin Amortiguador	44
Figura 35: Golpe de Ariete a 0,13 Mpa en Modelo tubería ½’’ 1 Ducha – Amortiguador Tub 1m long	45
Figura 36: Golpe de Ariete a 0,13 Mpa en Modelo tubería ½’’ 1 Ducha – Amortiguador Tipo Pistón ½’’	46
Figura 37: Golpe de Ariete a 0,14 Mpa en Modelo tubería ½’’ 1 Ducha – Sin Amortiguador	47
Figura 38: Golpe de Ariete a 0,14 Mpa en Modelo tubería ½’’ 1 Ducha – Amortiguador Tub 1m long	48
Figura 39: Golpe de Ariete a 0,15 Mpa en Modelo tubería ½’’ 1 Ducha – Amortiguador Tub 15 cm long	49
Figura 40: Golpe de Ariete a 0,15 Mpa en Modelo tubería ½’’ 1 Ducha – Amortiguador Tipo Pistón 1’’	50
Figura 41: Golpe de Ariete a 0,15 Mpa en Modelo tubería ½’’ 1 Ducha – Amortiguador Tipo Pistón ½’’	51
Figura 42: Golpe de Ariete a 0,15 Mpa en Modelo tubería ½’’ 2 Duchas – Sin Amortiguador	52
Figura 43: Golpe de Ariete a 0,15 Mpa en Modelo tubería ½’’ 2 Duchas – Amortiguador Tipo Pistón ½’’	53
Figura 44: Golpe de Ariete a 0,15 Mpa en Modelo tubería ½’’ 3 Duchas – Sin Amortiguador	54
Figura 45: Golpe de Ariete a 0,15 Mpa en Modelo tubería ½’’ 3 Duchas – Amortiguador Tipo Pistón ½’’	55
Figura 46: Golpe de Ariete a 0,1 Mpa en Modelo tubería ½’’ Caudal Mínimo – Sin Amortiguador	56
Figura 47: Golpe de Ariete a 0,1 Mpa en Modelo tubería ½’’ Caudal Mínimo – Amortiguador Tub 1m long	57
Figura 48: Golpe de Ariete a 0,1 Mpa en Modelo tubería ½’’ Caudal Mínimo – Amortiguador Tipo Pistón ½’’	58
Figura 49: Golpe de Ariete a 0,13 Mpa en Modelo tubería ½’’ – Sin Amortiguador	59
Figura 50: Golpe de Ariete a 0,13 Mpa en Modelo tubería ½’’ – Amortiguador Tub 1m Long	60
Figura 51: Golpe de Ariete a 0,13 Mpa en Modelo tubería ½’’ – Amortiguador Tub 15 cm Long	61
Figura 52: Golpe de Ariete a 0,13 Mpa en Modelo tubería ½’’ – Amortiguador Tipo Pistón 1’’	62



Figura 53: Golpe de Ariete a 0,13 Mpa en Modelo tubería ½’’ – Amortiguador Tipo Pistón ½’’ –	63
Figura 54: Golpe de Ariete a 0,14 Mpa en Modelo tubería ½’’ – Amortiguador Tipo Pistón ½’’ –	64
Figura 55: Golpe de Ariete a 0,14 Mpa en Modelo tubería ½’’ – Amortiguador Tipo Pistón ½’’	65
Figura 56: Golpe de Ariete a 0,15 Mpa en Modelo tubería ½’’ – Sin Amortiguador –	66
Figura 57: Golpe de Ariete a 0,15 Mpa en Modelo tubería ½’’ – Amortiguador Tub 1m Long –	67
Figura 58: Golpe de Ariete a 0,15 Mpa en Modelo tubería ½’’ – Amortiguador Pistón ½’’ –	68
Figura 59: Golpe de Ariete a 0,15 Mpa en Modelo tubería ½’’ – Sin Amortiguador –	69
Figura 60: Golpe de Ariete a 0,15 Mpa en Modelo tubería ½’’ – Amortiguador Tub 1m Long –	70
Figura 61: Golpe de Ariete a 0,15 Mpa en Modelo tubería ½’’ – Amortiguador Pistón ½’’ –	71
Figura 62: Golpe de Ariete a 0,15 Mpa en Modelo tubería ½’’ – Sin Amortiguador –	72
Figura 63: Golpe de Ariete a 0,15 Mpa en Modelo tubería ½’’ – Amortiguador Tub 1m Long –	73
Figura 64: Golpe de Ariete a 0,15 Mpa en Modelo tubería ½’’ – Amortiguador Pistón ½’’ –	74
Figura 65: Golpe de Ariete a 0,15 Mpa en Modelo tubería 1’’ – Sin Amortiguador–	75
Figura 66: Golpe de Ariete a 0,15 Mpa en Modelo tubería 1’’ – Amortiguador Tub 1m Long –	76
Figura 67: Golpe de Ariete a 0,15 Mpa en Modelo tubería 1’’ – Amortiguador Pistón ½’’ –	77
Figura 68: Golpe de Ariete a 0,16 Mpa en Modelo tubería 1’’ – Sin Amortiguador –	78
Figura 69: Golpe de Ariete a 0,16 Mpa en Modelo tubería 1’’ – Amortiguador Tub 1m Long –	79
Figura 70: Golpe de Ariete a 0,16 Mpa en Modelo tubería 1’’ – Amortiguador Pistón ½’’ –	80
Figura 71: Golpe de Ariete a 0,15 Mpa en Modelo tubería 1’’ – Sin Amortiguador–	81
Figura 72: Golpe de Ariete a 0,15 Mpa en Modelo tubería 1’’ – Amortiguador Tub 1m Long –	82
Figura 73: Golpe de Ariete a 0,15 Mpa en Modelo tubería 1’’ – Amortiguador Pistón ½’’ –	83
Figura 74: Golpe de Ariete a 0,15 Mpa en Modelo tubería 1’’ – Sin Amortiguador–	84
Figura 75: Golpe de Ariete a 0,14 Mpa en Modelo tubería 1’’ – Amortiguador Tub 1m Long –	85
Figura 76: Golpe de Ariete a 0,15 Mpa en Modelo tubería 1’’ – Amortiguador Pistón ½’’ –	86
Figura 77: Golpe de Ariete a 0,11 Mpa en Modelo tubería 1’’ – Sin Amortiguador –	87



Figura 78: Golpe de Ariete a 0,11 Mpa en Modelo tubería 1’’ – Amortiguador Tub 1m Long –.....	88
Figura 79: Golpe de Ariete a 0,11 Mpa en Modelo tubería 1’’ – Amortiguador Pistón ½’’ –	89
Figura 80: Golpe de Ariete a 0,21 Mpa en Modelo tubería 1’’ – Sin Amortiguador –.....	90
Figura 81: Golpe de Ariete a 0,21 Mpa en Modelo tubería 1’’ – Amortiguador Tub 1m Long –.....	91
Figura 82: Golpe de Ariete a 0,21 Mpa en Modelo tubería 1’’ – Amortiguador Pistón ½’’ –	92
Figura 83: Golpe de Ariete a 0,15 Mpa en Modelo tubería 1’’ – Sin Amortiguador –.....	93
Figura 84: Golpe de Ariete a 0,15 Mpa en Modelo tubería 1’’ – Amortiguador Tub 1m Long –.....	94
Figura 85: Golpe de Ariete a 0,15 Mpa en Modelo tubería 1’’ – Amortiguador Pistón ½’’ –	95
Figura 86: Golpe de Ariete a 0,13 Mpa en Modelo tubería 1’’ – Sin Amortiguador –.....	96
Figura 87: Golpe de Ariete a 0,13 Mpa en Modelo tubería 1’’ – Amortiguador Tub 1m Long –.....	97
Figura 88: Golpe de Ariete a 0,13 Mpa en Modelo tubería 1’’ – Amortiguador Pistón ½’’ –	98

Índice de Tablas

Tabla 1: Evaluaciones de Amortiguadores y Presiones Iniciales. Modelo María Fernanda	33
Tabla 2: Evaluaciones de Amortiguadores Tubería 1/2". Red Elevada.....	33
Tabla 3: Evaluaciones de Amortiguadores Tubería 1/2". Red Acueducto	34
Tabla 4: Evaluaciones de Amortiguadores Tubería 1/2" Red Combinada	34
Tabla 5: Evaluaciones de Amortiguadores Tubería 1". Red Acueducto	35
Tabla 6: Evaluaciones de Amortiguadores Tubería 1". Red Elevada.....	35
Tabla 7: Presiones Máximas Registradas - Modelo María Fernanda -.....	43
Tabla 8: Presiones Máximas Registradas - Modelo Tubería 1/2" Red Elevada -.....	55
Tabla 9: Presiones Máximas Registradas - Modelo Tubería 1/2" Red Acueducto -	65
Tabla 10: Presiones Máximas Registradas - Modelo Tubería 1/2" Red Combinada -	74
Tabla 11: Presiones Máximas Registradas - Modelo Tubería 1" Red Elevada -.....	86
Tabla 12: Presiones Máximas Registradas - Modelo Tubería 1" Red Acueducto -	98

Introducción:

Se conoce al golpe de ariete como el fenómeno que ocurre en ciertos sistemas de distribución de agua potable el cual, se caracteriza por un aumento súbito de presión debido a una disminución repentina en la velocidad del fluido circulante. Este suceso ocurre comúnmente a causa del cierre abrupto de accesorios de distribución de agua los cuales, operen por medio de válvulas de cierre rápido como bien son las griferías de duchas y lavamanos. Dicho cambio continuo de presión en la tubería repercute directamente en el estado y vida útil de estas y los accesorios pertenecientes al sistema de distribución. Teniendo en cuenta esto, en la actualidad se ha tenido la idea de incorporar a estos sistemas distintos mecanismos de amortiguación de sobrepresión de manera que, la presión máxima producto de un golpe de ariete efectuado sea menor y en consecuencia, no se presente ningún desgaste en los elementos adjuntos a las tuberías.

El presente trabajo busca validar la incorporación de ciertos amortiguadores en un sistema de distribución con relación a lo que se experimenta sin tener presente ninguna clase de estos accesorios, ante la ejecución de un golpe de ariete. Es con esta finalidad que, se realizaron distintas pruebas en modelos construidos en el laboratorio de hidráulica de la Universidad de Los Andes donde, a cada modelo se le efectuaron golpes de ariete por medio de válvulas de cierre rápido adjuntas a un sistema de distribución de regaderas. Adicional a esto, se ubicó en la red un acceso para la instalación del amortiguador de presión evaluado y otros dos, uno aguas arriba y otro aguas abajo del amortiguador, con el fin de incorporar allí los lectores de presión de manera que, estos cumplieran la funcionalidad de leer la presión resultante antes y después del amortiguador instalado.

Al final, se planteó un análisis de los resultados obtenidos de acuerdo con los picos de presión registrados para cada modelo ante el uso, o no, de un amortiguador. De igual forma, se prestó interés a los registros de pico de presión por cada uno de los transductores de manera que, se quería evaluar si el sistema de distribución experimentaba una diferencia de presión entre la sección aguas arriba y aguas abajo del amortiguador de presión instalado.

Objetivos

Objetivo General:

Establecer la bondad y aplicabilidad de los amortiguadores de golpe de ariete en los sistemas de distribución de agua potable los cuales, son utilizados con el fin de disminuir la presión resultante del cierre abrupto de una red por medio de válvulas.

Objetivos Específicos:

- Diseñar un modelo físico el cual, cumpla con los requerimientos necesarios para evaluar el comportamiento de una red de distribución ante la ejecución de golpes de ariete.
- Construir e instrumentar el modelo de manera tal que este permita el registro de las variaciones de presión en el sistema producto del golpe de ariete efectuado.
- Establecer la funcionalidad y aplicabilidad de distintos amortiguadores de presión en los sistemas de distribución de agua potable.

Antecedentes

En los siguientes renglones se explicará parte del montaje en el cual se ejecutaron los primeros golpes de ariete teniendo en cuenta que, el laboratorio del CIACUA de la Universidad de Los Andes cuenta constantemente con la ejecución de distintos proyectos de investigación por parte de estudiantes, tanto de pregrado como de posgrado. Es por esto que, con ánimos de optimizar el tiempo disponible para el registro y obtención de datos preliminares, se procedió con la adecuación y posterior uso de una red de distribución de agua potable ya instalada en el laboratorio la cual, en años anteriores fue construida y utilizada por la ingeniera María Fernanda Acero Fonseca con el fin de “realizar un estudio del consumo real de aparatos sanitarios instalados comúnmente en sistemas de distribución de agua potable” (Fonseca, 2009).

El montaje de laboratorio diseñado por la Ingeniera María Fernanda Acero asemeja las condiciones hidráulicas existentes en las instalaciones típicas de edificaciones nacionales de manera que, esta cuenta con un tanque de almacenamiento de agua en fibra de vidrio con un volumen de 3m^3 . Adicional a esto el modelo posee un tanque elevado de manera que, este se encargue de recibir el agua de los aparatos sanitarios y devolverla, por gravedad, al tanque de reserva. De esta forma, el sistema funciona por medio de una recirculación del fluido con el objetivo de que la red no ejecute ningún tipo de desperdicio innecesario de agua.



Figura 1: Montaje de Laboratorio Proyecto Revisión de Métodos de Diseño... (Fonseca, 2009)

De igual manera, este sistema cuenta con un equipo de bombeo conformado por 3 bombas serie VP-135 con un motor de 6.6 hp, de la marca IHM. Cada una cuenta con una cabeza

máxima de 85 m.c.a y una variación de caudal de 4.7 l/s. Además de lo anterior, se cuenta con un tanque hidroneumático el cual cumple la función de mantener presurizada la red y evitar un funcionamiento de las bombas en consumos bajos que requieran baja presión.



Figura 2: Tanque de Almacenamiento de Agua. (Fonseca, 2009)



Figura 3: Tanque de Recirculación del Agua. (Fonseca, 2009)

Esta es una descripción de manera muy general del funcionamiento del modelo que se utilizó preliminarmente para efectuar los primeros golpes de ariete y lecturas de presión

correspondientes a este. Más adelante en este documento, se entra en el detalle de las adecuaciones realizadas a dicho modelo con el fin realizar la correcta toma de datos.

Marco Teórico:

Conceptos Básicos del Golpe de Ariete:

Con el ánimo de entender el fenómeno estudiado, a continuación se presentan los principios que rigen la hidráulica de tuberías a presión y golpe de ariete. Este último con la adición de algunas simplificaciones hechas por nuestro proveedor de insumos y creadores de la cátedra de este proyecto: PAVCO.

Ecuación de Continuidad:

Esta ecuación trata a cerca de la conservación de la masa de un fluido a través de dos secciones de un conducto (tubería). En síntesis, describe el hecho de que la masa del fluido que ingresa al conducto es igual a la masa que sale de este.

Con base en lo anterior, para el caso de un tramo de tubería la ecuación se expresa como:

Ecuación 1

$$\rho_i V_i A_i = \rho_f V_f A_f$$

De manera que, si se tiene un único fluido, la densidad (ρ) se cancela y por tanto, la ecuación se describe como:

Ecuación 2

$$\begin{aligned} V_i A_i &= V_f A_f \\ Q_i &= Q_f \end{aligned}$$

Donde,

V = velocidad del flujo. m/s

A = área de la sección transversal del conducto. m²

Q = caudal que circula en el conducto. m³ /s

Principio de Bernoulli:

Este se basa en el planteamiento de la ley de la conservación de la energía que debe suceder a lo largo de un tramo de flujo. Se toma un conducto el cual presenta un determinado flujo, una sección 1 en cualquier lugar, y más adelante, en la dirección en la que se desplaza el fluido una sección 2. De esta forma, la conservación de la energía se plantea:

Ecuación 3

$$Z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + h_{1-2}$$

Donde,

Z = posición con respecto al nivel de referencia. m

p/ρg = altura de presión. m

v²/2g = altura de velocidad. m

h (1-2) = pérdidas de energía entre 1 y 2. m

Perdidas de Energía:

Las pérdidas de energía en un flujo a presión se producen por 2 razones:

1. A causa de la fricción que ocurre entre el fluido y la pared del conducto que la transporta
2. La presencia en el recorrido del fluido de accesorios que alteren el recorrido del flujo como son: tees, válvulas, codos, etc.

Perdidas de Energía por Fricción:

Esta se debe al rozamiento entre el fluido que avanza por el conducto y las paredes de este. Lo anterior produce una fuerza contraria a la dirección del fluido que se conoce como esfuerzo cortante. De esta forma, surgen pérdidas de energía las cuales, se describen en función de la rugosidad del material (o de las paredes) del cual está hecha la tubería.

Para el cálculo de dichas pérdidas, históricamente se han empleado diferentes ecuaciones como:

- Ecuación de pérdidas de Hazen-Williams
- Ecuación de Pérdidas de Darcy – Weisbach.

Se destaca la aplicabilidad de esta última en el presente proyecto debido a naturaleza de esta, pues bien, es físicamente basada y se desarrolló aplicando las leyes del físico Isaac Newton.

Ecuación De Darcy-Weisbach:

La descripción de la ecuación es la siguiente:

Ecuación 4

$$h_f = f \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g}$$

Donde,

h_f = pérdidas por fricción

f = coeficiente de fricción.

l = longitud del tramo de tubería evaluado.

d = diámetro de la tubería.

v = velocidad del flujo.

g = constante gravitacional

Nota:

Para el cálculo de f se han empleado distintas ecuaciones, sin embargo, las más utilizada por los ingenieros es la de Colebrook – White:

Ecuación 5

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{k_s/d}{3.7} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f}} \right)$$

Donde,

f = factor de fricción. Adimensional

K_s = rugosidad absoluta del material. m

d = diámetro interno real de la tubería. m

K_s/d = rugosidad relativa. Adimensional

Re = número de Reynolds. Adimensional

Teoría de Emisores:

Se conoce a un emisor como un accesorio el cual permite la salida de un caudal determinado en función de la presión que presente este punto de descarga. Teniendo en cuenta lo anterior, con base en el caudal que el ingeniero requiera para la modelación de dicho emisor se determina la geometría de este y la presión requerida en la red de distribución.

La ecuación de un emisor de describe a continuación:

Ecuación 6

$$Q = K_e h^{n_e}$$

Donde,

Q = caudal en la salida del emisor.

Ke = coeficiente del emisor. Se determina de acuerdo con sus características geométricas

h = Altura de presión en el sitio del emisor.

ne = exponente del emisor. Se determina de acuerdo con sus características geométricas

Golpe de Ariete:

Producto del cambio abrupto en la velocidad del flujo a causa del cierre repentino de la red de distribución, la inercia del fluido se convierte en un incremento casi que instantáneo de presión en el sistema.

Se describe la sobre presión resultante como:

Ecuación 7

$$p = \frac{aV}{g}$$

De manera que:

Ecuación 8

$$a = \frac{1420}{\sqrt{1 + (K/E)(RDE - 2)}}$$

Donde,

p = sobre presión. m

a = velocidad de la onda. m/s

v = cambio de velocidad del agua m/s

g = constante gravitacional

K = módulo de compresión del fluido. (Agua = 2.06×10^4 Kg/cm²)

E = módulo de elasticidad de la tubería. (PVC Tipo1 Grado1: 2.81×10^4 Kg/cm²)

RDE = relación diámetro exterior/espesor mínimo de la tubería.

Nota:

Nuestro proveedor de insumos PAVCO, de acuerdo con análisis de laboratorio realizados previamente, ha establecido los valores de velocidad de honda (a) según la RDE comercializada por la empresa:

Valores de "a" en Función del RDE	
RDE	a (m/s)
9	573
11	515
13.5	390
21	368
26	330
32.5	294
41	261

Figura 4: valores de velocidad de honda según RDE comerciales. (WAVIN, 2020)

Normas e Investigaciones Previas:

Con el fin de dar cuenta de, que es lo que recomienda la normativa colombiana e internacional ante la ocurrencia del fenómeno de golpe de ariete en sistemas de distribución de agua potable, a continuación, se presenta algunas recomendaciones e investigaciones previas referentes a esta área. Estas dan una idea del por qué la sobrepresión producida ante el cierre abrupto de una válvula tiene la relevancia que presenta hoy en día en el área hidráulica.

NTC 1500:

Con referencia a la regulación local, se especifica “La velocidad del flujo del sistema de distribución de agua debe ser controlada, para reducir las posibilidades de golpe de ariete. Se debe instalar un reductor de golpe de ariete donde se utilicen válvulas de cierre rápido. Los reductores de golpe de ariete se deben instalar de acuerdo con las instrucciones del fabricante y estos deben cumplir con la ASSE 1010” (Icontec, 2020)

Investigation of Water Hammer Effect Through Pipeline System:

Este artículo realizado por: Wee Choon Tan, Kheng Aik Lim, Eng Aik Lim y Thean Hin Teoh en el año 2012 presenta un estudio de las variables físicas a tener en cuenta en una tubería con relación a la ocurrencia de un golpe de ariete. Se parte del hecho que, el golpe de ariete es un fenómeno el cual puede causar el rompimiento de una tubería si la presión es lo suficientemente alta. Es por esto que, también se prueba un mecanismo de prevención del efecto de golpe de ariete y se evalúa, si dicho método es exitoso en reducir la sobrepresión producida o no. El amortiguamiento que se utiliza es la instalación de una tubería de derivación con válvula de retención de manera que, el experimento se ejecuta capturando la señal de la celeridad de onda usando un dispositivo de adquisición de datos y un acelerómetro. La señal de presión se obtiene después de un repentino cierre de la válvula, se analiza con el fin de establecer la velocidad de la onda de sobrepresión. El modelo se ejecuta con variaciones en: el material de tubería, longitud de tubería, diámetro de entrada de tubería y presión en la tubería. El resultado muestra que, la tubería de material de menor resistencia (rugosidad), la tubería de diámetro de entrada más pequeño y la tubería más larga lidiarán con un efecto del golpe de ariete más grande y por ende un pico de presión más alta. Además, las pruebas del método de prevención del golpe, mediante la instalación de una tubería alterna

con válvula de retención, logró reducir el pico de presión en un 33,33% de la presión registrada sin este.

Water Hammer Arresters:

Con relación a la instalación y dimensionamiento de los supresores de golpe de ariete de cámara de aire de tipo pistón, las empresas miembro del Plumbing and Drainage Institute en Estados Unidos realizaron un estudio de este fenómeno en el año 2017. En este se establecen distintas recomendaciones de efectividad para la disminución de la sobrepresión registrada en una red producto del golpe de ariete, de manera que, queda como sugerencia un rango de disipación de presión mínimo con el cual se debería diseñar este tipo de productos. De esta manera, este grupo ejecuta apenas una sugerencia a los fabricantes de lo que se esperaría de cualquier instrumento que garantice al ingeniero la disminución del golpe de presión registrado dado el cierre abrupto de una válvula en el sistema.

Por medio de un modelo de ejecución golpes de ariete y lectura de presiones en una red, previamente diseñada por este instituto en Fairfield (Nueva Jersey), se realizaron pruebas a distintos amortiguadores comercializados en el mercado. La finalidad de esto consistió en establecer el rango adecuado de disminución de pico de presión en la red teniendo en cuenta la demanda en esta y el supresor evaluado. De esta forma, se determinó un estándar de presión suprimida (160 psi) y un número mínimo (10) de registro de presiones consecutivas iguales o mayores a 160 psi tras la ejecución de 10000 golpes de ariete. Así, cada fabricante que quiera tener el visto bueno por parte de este instituto tenga en cuenta estos datos para el diseño de sus amortiguadores.

Certification Testing Equipment

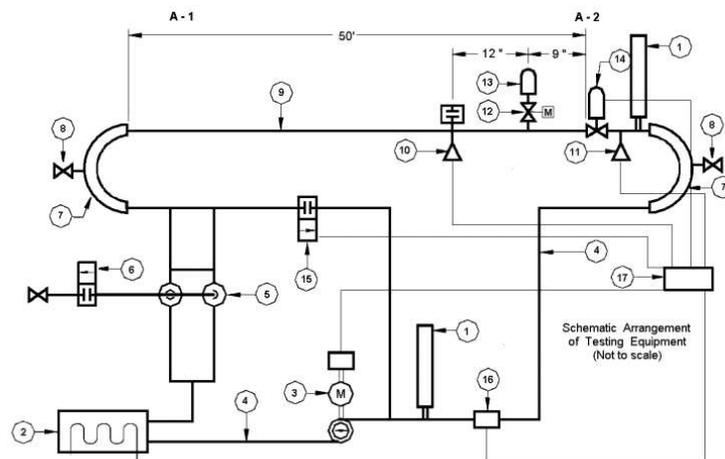


Figura 5: Modelo de Pruebas de Amortiguadores de Golpe de Ariete. (PDI, 2017)

P.D.I. Size	Pipe Size	Pipe Length (ft.)	*Total Pressure - Flow + Surge Less Arrester (P.S.I.G.)	*Max. Reduced Pressure Flow + Surge with Arrester (P.S.I.G.)
AA	1/2"	50	250	150
A	1/2"	50	400	150
B	3/4"	50	400	150
C	1"	50	400	150
D	1-1/4"	50	400	150
E	1-1/2"	50	400	150
F	2"	50	400	150

Figura 6: Estándares de Amortiguación de Presión. (PDI, 2017)

Por otro lado, The Plumbing and Drainage Institute también realiza un estimativo del dimensionamiento de supresor de golpe de ariete con relación a la demanda de sistema para en el cual se está trabajando. Dicho dimensionamiento del supresor esta parametrizado por medio de una tabla de unidades según los accesorios de descarga de la red (similar a la establecida por el Método Hunter) de manera que, según la sumatoria representativa de unidades de descarga adjuntas al sistema, se seleccione el tamaño del supresor adecuado para el caso de evaluación en particular.

Fixture	Type of Supply Control	Weight in Fixture - Units					
		Public			Private		
		Total	C.W.	H.W.	Total	C.W.	H.W.
Water Closet 1.66 PF	Flush Valve	8	8	-	5	5	-
Water Closet 1.66 PF	Flush Tank	5	5	-	2.5	2.5	-
Pedestal Urinal 1.06 PF	Flush Valve	4	4	-	-	-	-
Stall or Wall Urinal	Flush Valve 1.06 PF	4	4	-	-	-	-
Stall or Wall Urinal	Flush Tank 1.06 PF	2	2	-	-	-	-
Lavatory	Faucet	2	1-½	1-½	1	1	1
Bathtub	Faucet	4	2	3	2	1-½	1-½
Shower Head	Mixing Valve	4	2	3	2	1	2
Bathroom Group	Flush Valve Closet	-	-	-	8	8	3
Bathroom Group	Flush Tank Closet	-	-	-	6	6	3
Separate Shower	Mixing Valve	-	-	-	2	1	2
Service Sink	Faucet	3	3	3	-	-	-
Laundry Tubs (1-3)	Faucet	-	-	-	3	3	3
Combination Fixture	Faucet	-	-	-	3	3	3

P.D.I. Units	AA	A	B	C	D	E	F
FIXTURE-UNITS	1-3	1-11	12-32	33-60	61-113	114-154	155-330

Figura 7: Unidades de carga según aparato y la relación del acumulado del sistema con el amortiguador a instalar. (PDI, 2017)

TABLE VI						
WATER PRESSURES UP TO 65 P.S.I.G.						
P.D.I. WATER HAMMER ARRESTERS						
Nominal Pipe Diameter						
Length of Pipe	1/2"	3/4"	1"	1-1/4"	1-1/2"	2"
25	A	A	B	C	D	E
50	A	B	C	D	E	F
75	B	C	D	AE	F	EF
100	C	D	E	F	CF	FF
125	C	D	F	AF	EF	EFF
150	D	E	F	DF	FF	FFF

TABLE VI-A						
WATER PRESSURES 65 P.S.I.G. TO 85 P.S.I.G.						
P.D.I. WATER HAMMER ARRESTERS						
Nominal Pipe Diameter						
Length of Pipe	1/2"	3/4"	1"	1-1/4"	1-1/2"	2"
25	B	B	C	D	E	F
50	B	C	D	E	F	CF
75	C	D	E	F	CF	FF
100	D	E	F	CF	EF	EFF
125	D	E	CF	DF	FF	BFFF
150	E	F	CF	FF	DF	FFFF

Figura 8: Selección del tamaño del amortiguador según la carga y presiones del sistema de distribución. (PDI, 2017)

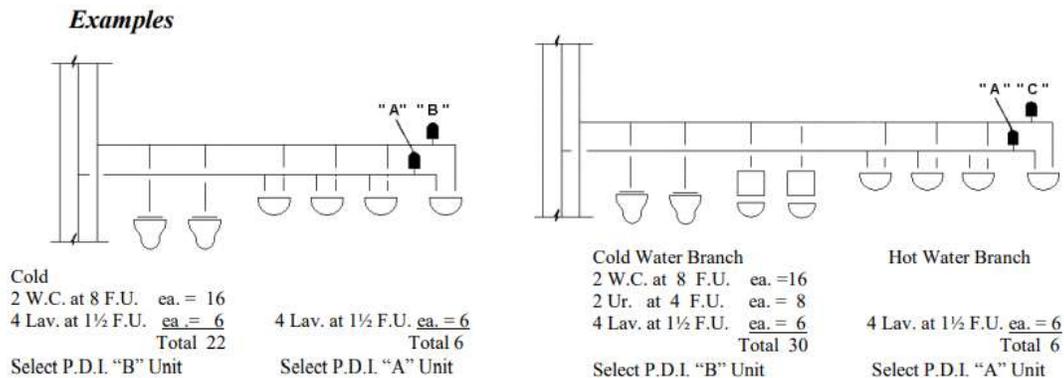


Figura 9: Ejemplo de selección de amortiguador según método PDI. (PDI, 2017)

Performance Requirements for Water Hammer Arresters (ASSE #1010):

De manera similar a lo planteado por el PDI, The American Society of Sanitary Engineering establece un procedimiento de prueba con el fin de verificar la eficiencia de los amortiguadores que distintos fabricantes norteamericanos comercializan. El método de aprobación es similar al del Plumbing and Draining Institute, pues bien, por medio de un modelo de pruebas en el cual, se ejecutan 5000 golpes de ariete con agua a temperatura ambiente y otros 5000 golpes con el fluido a más de 82°C, se establece al promedio del registro de pico de presión de estos ensayos como el valor a comparar con los estándares de presión máxima que para esta norma es admisible presentar en el sistema.

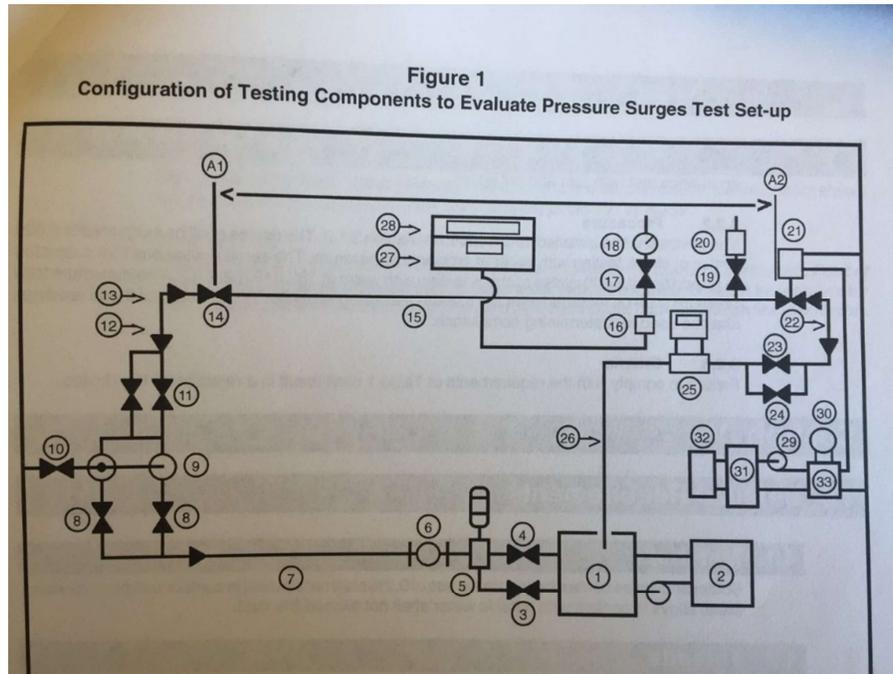


Figura 10: Modelo de Pruebas de Amortiguadores de Golpe de Ariete. (American Society of Sanitary Engineering, 2004)

Table 1

Size	Pipe Size		Pipe Length		Total Pressure - Flow + Surge Less Arrester ¹		Max. Reduced Pressure Flow + Surge with Arrester ²	
	NPS/CTS	DN	feet	m	psig	kPa	psig	kPa
AA	½	15	50.0	15.2	250.0	1723.8	150.0	1034.3
A	½	15	50.0	15.2	400.0	2760.0	150.0	1034.3
B	¾	20	50.0	15.2	400.0	2760.0	150.0	1034.3
C	1	25	50.0	15.2	400.0	2760.0	150.0	1034.3
D	1¼	32	50.0	15.2	400.0	2760.0	150.0	1034.3
E	1½	40	50.0	15.2	400.0	2760.0	150.0	1034.3
F	2	50	50.0	15.2	400.0	2760.0	150.0	1034.3

1. Peak pressure shall be defined as the highest average total pressure measured over an average 2.5 millisecond portion of the calibration and performance test periods.
 2. The device shall pass the endurance test by completing 10,000 cycles without the reduced pressure exceeding 160.0 psig (1103.2 kPa) maximum pressure plus tolerance.

Figura 11: Estándares de Amortiguación de presión ASSE 1010. (American Society of Sanitary Engineering, 2004)

Descripción del Montaje de Laboratorio:

Adicional a los antecedentes del modelo ya presentados, a continuación se describen las adecuaciones realizadas a este con el objetivo de lograr un montaje el cual permitiera un registro de presión adecuado. Esto con la intención de realizar posteriormente un análisis de calidad conforme a la importancia o no de la incorporación de amortiguadores de golpe de ariete en redes de distribución de agua potable.

Aparatos Sanitarios:

Dadas las limitantes que se presentaban en esta temporalidad, la disponibilidad de aparatos en el laboratorio del CIACUA era limitada. Teniendo en cuenta esto, a lo largo del experimento únicamente se contó de tres duchas como aparatos de descarga del sistema diseñado.



Figura 12: Aparatos Sanitarios

Válvulas de Ejecución de Golpe:

De igual forma, y como se puede visualizar en la siguiente imagen, para la generación de golpe de ariete se optó por la utilización de válvulas de bola o de cierre rápido de manera que, estas fueron operadas manualmente para cada uno de los montajes realizados.

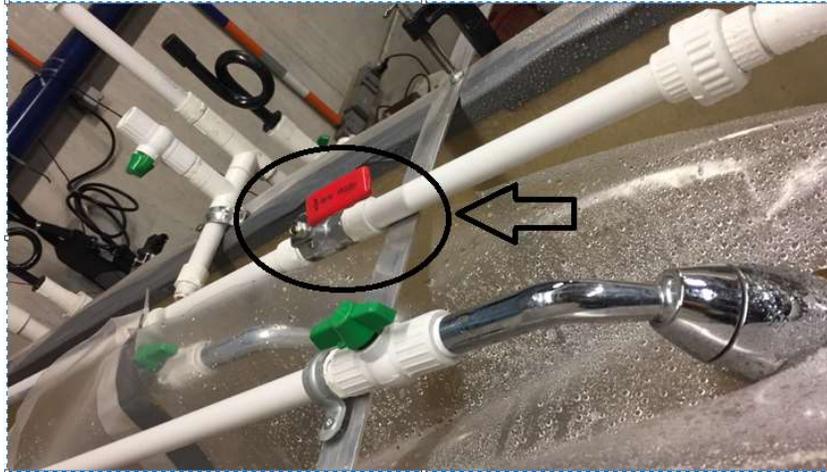


Figura 13: Válvula de cierre rápido

Amortiguadores de Golpe Evaluados:

Amortiguador Tubería PVC 1m:

Consta de una tubería PAVCO PVC 13.5 de un metro de longitud adherida verticalmente a la red. Esta es instalada entre los dos lectores de presión. De acuerdo con indagaciones realizadas a algunos ingenieros hidráulicos, es común encontrar este tipo de tuberías con el argumento de que la columna de aire, que se encuentra dentro de esta instalación, permite apaciguar la sobrepresión producida ante el cierre abrupto de una válvula.



Figura 14: Amortiguador de tubería PVC 1m

Amortiguador Tubería PVC 15cm:

De manera similar al amortiguador presentado anteriormente, este consta de una tubería de 15 cm instalada de manera vertical entre los transductores de presión. Este accesorio se utilizó con el fin de verificar si la disminución de la tubería vertical, y en consecuencia de la columna de aire dentro de la misma, afectaba de manera proporcional al apaciguamiento del golpe de ariete producido.



Figura 15: Amortiguador de tubería PVC 15 cm.

Amortiguador Tipo Pistón 1”:

Por otro lado, se utilizó un amortiguador de golpe de ariete de la marca estadounidense Zurn tipo pistón de 1”. Cabe mencionar que los amortiguadores tipo pistón utilizados en este trabajo cumplen con la norma ASSE 1010 y están aprobados por el PDI, entidades que fueron presentadas previamente. Este accesorio se utilizó con el fin de evaluar la disminución del pico de presión de manera que, se pone a prueba la capacidad de este para apaciguar el golpe de ariete producido por el cierre abrupto de la válvula. (ZURN, 2021)

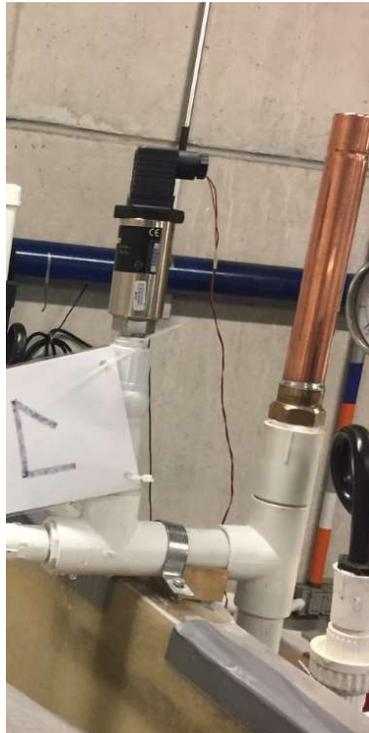


Figura 16: Amortiguador Zurn Tipo Pistón 1"

Amortiguador Tipo Pistón ½”:

De igual forma y con la misma intención que el amortiguador tipo pistón de 1”’, este de un diámetro menor se utilizó con la intención de, además de verificar la eficacia de la disminución de la presión, se pudiese constatar si el hecho de reducir el tamaño del pistón de amortiguación afectaba en alguna proporcionalidad el apaciguamiento del golpe de ariete producido.



Figura 17: Amortiguador Zurn Tipo Pistón 1/2"

Lectores de Presión:

Se utilizaron dos transmisores de presión con celda de medición cerámica del fabricante Megabar. Estos aparatos cumplieron con la función de registrar la presión del sistema de distribución y las variaciones que experimentaba este ante el cierre abrupto de la válvula y posterior golpe de ariete producido. De igual forma, la instalación de estos en la red se pensó de manera tal que uno registrara la presión aguas abajo del amortiguador evaluado, y otro aguas arriba. Lo anterior se aplicó bajo la sospecha de que, ante un golpe de ariete la red experimentaba dos presiones distintas (una antes del amortiguador y otra después) consecuencia de la efectividad de la instalación de un instrumento que apaciguara la sobrepresión del golpe.



Figura 18: Transmisor de Presión Vegabar 14. (Instrumatic Ltda., 2021)

Red Elevada y de Acueducto:

Adicional al modelo de María Fernanda Fonseca y las adecuaciones realizadas a este. Se construyó un sistema anexo de manera tal que, se derivó de la red elevada de suministro del laboratorio de hidráulica de la universidad y del acueducto del edificio MI, una conexión hacia el modelo de duchas construido. Lo anterior se ejecutó con el fin de proporcionar un suministro de presión distinto a la red de duchas, pues bien, debido a posibles anomalías en los resultados preliminares producto de la alta presión suministrada por las bombas del modelo de María Fernanda, no se vio viable continuar con el uso de este sistema de suministro. A continuación, se presenta las derivaciones realizadas y la conexión al modelo de duchas construido.



Figura 19: Derivación Red Acueducto



Figura 20: Derivación de la Red Elevada

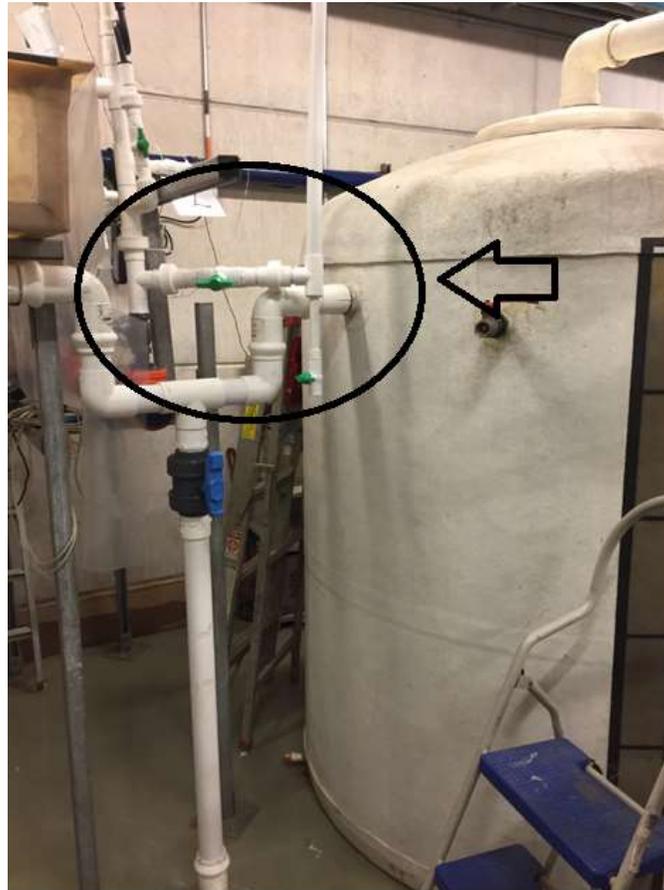


Figura 21: Conexión de la Red Elevada y Acueducto al Modelo de Duchas

Mediciones de Caudal:

Teniendo en cuenta la necesidad de ejecutar un análisis entre el caudal circulante por las tuberías y la magnitud del golpe de ariete provocado. Se instalaron caudalímetros en cada una de las redes de suministro de manera que, estos se encargaron de dimensionar la cantidad de litros por segundo que presentaba el sistema. De esta forma, se pudo realizar análisis de correlación con las presiones presentes y el caudal circulante.



Figura 22: Caudalímetro Red María Fernanda



Figura 23: Caudalímetro red elevada y acueducto

Modelos Evaluados:

A continuación se presentan los sistemas en los cuales se efectuaron los golpes de ariete. Se aclara que, a lo largo de las evaluaciones se ejecutaron cambios con relación al modelo original producto de errores en las mediciones, sesgo en el registro de picos de presión y carga insuficiente para evaluar los amortiguadores.



Figura 24: Sistema de Una Ducha Evaluado



Figura 25: Sistema de Tres Duchas

Evaluaciones de cada Modelo:

Con ánimo de facilitar la lectura del presente documento, a continuación se presenta las evaluaciones de golpe de ariete realizadas. Cada una de esta cuenta con determinado diámetro de tubería de instalación, número de duchas operando, presiones iniciales de trabajo, caudal y amortiguador de golpe de ariete evaluado, ítems que se tendrán en cuenta en el futuro

análisis de resultados obtenidos. De igual forma, cabe mencionar que cada evaluación tuvo el mismo procedimiento en general donde:

1. Se instala el amortiguador a evaluar en el modelo de pruebas.
2. Se da apertura al sistema de distribución trabajado hasta que el caudal determinado se estabilice y sea homogéneo en toda la red.
3. Se confirma que el programa de lectura de presiones este tomando los datos de manera adecuada y acto seguido se ejecuta el cierre, de manera abrupta (alrededor de 0,2 segundos), de la válvula encargada de la generación del golpe en el sistema.
4. La válvula generadora del golpe permanece cerrada por un periodo de tiempo arbitrario, con un máximo de 300 segundos y un mínimo de 100 segundos.
5. Pasado el tiempo estimado de cierre, se da apertura la válvula y el sistema vuelve a permanecer abierto.
6. Se detiene la lectura de datos y se extraen los resultados en una hoja de cálculo tipo Excel.

Tabla 1: Evaluaciones de Amortiguadores y Presiones Iniciales. Modelo María Fernanda

Evaluaciones - Modelo de María Fernanda -			
Amortiguadores	# Duchas en Sistema	Presión Inicial (Mpa)	Caudal (l/s)
Tubería 1" - 15 cm long	1	0,1	0,9
		0,13	1
		0,2	1,5
Tubería 1" - 1m long	1	0,1	0,9
		0,12	1
Pistón 1"	1	0,1	0,9
		0,13	1
		0,2	1,5

Tabla 2: Evaluaciones de Amortiguadores Tubería 1/2". Red Elevada

Evaluaciones Tubería 1/2" - Modelo Red Elevada -			
Amortiguadores	# Duchas	Presión Inicial (Mpa)	Caudal (l/s)
Sin Amortiguador	1	0,13	0,26
	1	0,14	0,34
	2	0,15	0,6
	3	0,15	0,67
Tubería 1" - 1m long -	1	0,13	0,26

	1	0,14	0,39
Tubería 1" - 15 cm long	1	0,15	0,39
-			
Pistón 1"	1	0,15	0,39
Pistón 1/2"	1	0,13	0,26
	1	0,15	0,39
	2	0,15	0,6
	3	0,15	0,67

Tabla 3: Evaluaciones de Amortiguadores Tubería 1/2". Red Acueducto

Evaluaciones Tubería ½" - Modelo Red Acueducto -			
Amortiguadores	#Duchas	Presión Inicial (Mpa)	Caudal (l/s)
Sin Amortiguador	1	0,11	0,15
		0,13	0,55
Tubería 1" - 1m long	1	0,11	0,15
		0,13	0,55
Tubería 1" - 15 cm long	1	0,13	0,55
Pistón 1"	1	0,13	0,55
Pistón 1/2"	1	0,11	0,15
		0,13	0,55
	2	0,14	0,61
	3	0,13	0,61

Tabla 4: Evaluaciones de Amortiguadores Tubería 1/2" Red Combinada

Evaluaciones Tubería 1/2" - Modelo Red Combinada -			
Amortiguadores	# Duchas	Presión Inicial (Mpa)	Caudal (l/s)
Sin Amortiguador	1	0,15	0,55
	2	0,15	0,61
	3	0,15	0,61
Tubería 1" - 1m long	1	0,15	0,55
	2	0,15	0,61
	3	0,15	0,61
Pistón 1/2"	1	0,15	0,55

	2	0,15	0,61
	3	0,15	0,61

Tabla 5: Evaluaciones de Amortiguadores Tubería 1". Red Acueducto

Evaluaciones Tubería 1" - Modelo Red Acueducto -			
Amortiguador	# Duchas	Presión Inicial (Mpa)	Caudal (l/s)
Sin Amortiguador	1	0,11	0,15
	1	0,21	0,53
	2	0,14	0,6
	3	0,13	0,6
Tubería 1" - 1m long -	1	0,11	0,15
	1	0,21	0,53
	2	0,14	0,6
	3	0,13	0,6
Pistón 1/2"	1	0,11	0,15
	1	0,21	0,53
	2	0,14	0,6
	3	0,13	0,6

Tabla 6: Evaluaciones de Amortiguadores Tubería 1". Red Elevada

Evaluaciones Tubería 1" - Modelo Red Elevada -			
Amortiguador	# Duchas	Presión Inicial (Mpa)	Caudal (l/s)
Sin Amortiguador	1	0,15	0,34
	1	0,15	0,388
	2	0,15	0,62
	3	0,14	0,765
Tubería 1" - 1m long -	1	0,15	0,34
	1	0,15	0,388
	2	0,15	0,62
	3	0,14	0,765
Pistón 1/2"	1	0,15	0,34
	1	0,15	0,388
	2	0,15	0,62
	3	0,14	0,765

Resultados de la Ejecución de Pruebas:

Teniendo en cuenta los ensayos listados anteriormente, a continuación se presentan las gráficas del comportamiento de la onda del golpe junto con sus respectivas tablas de presión máxima registrada para cada ensayo.

Resultados Pruebas Modelo - María Fernanda Fonseca –

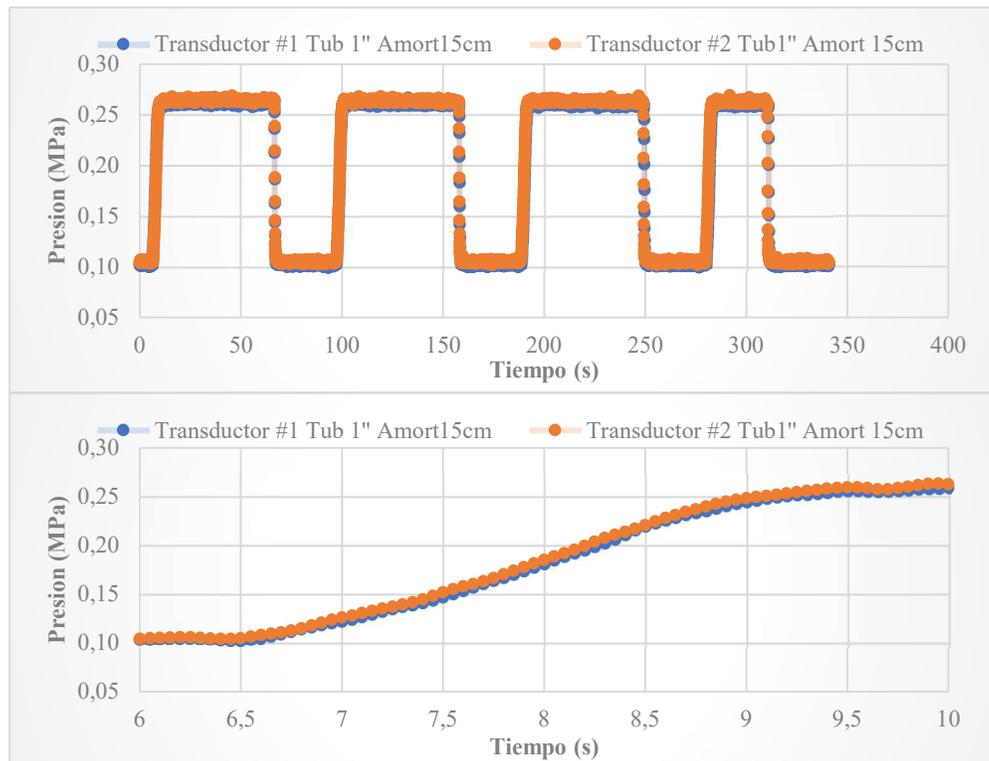


Figura 26: Golpe de Ariete a 0,10 Mpa en Modelo María Fernanda - Amortiguador Tubería 15 cm long –

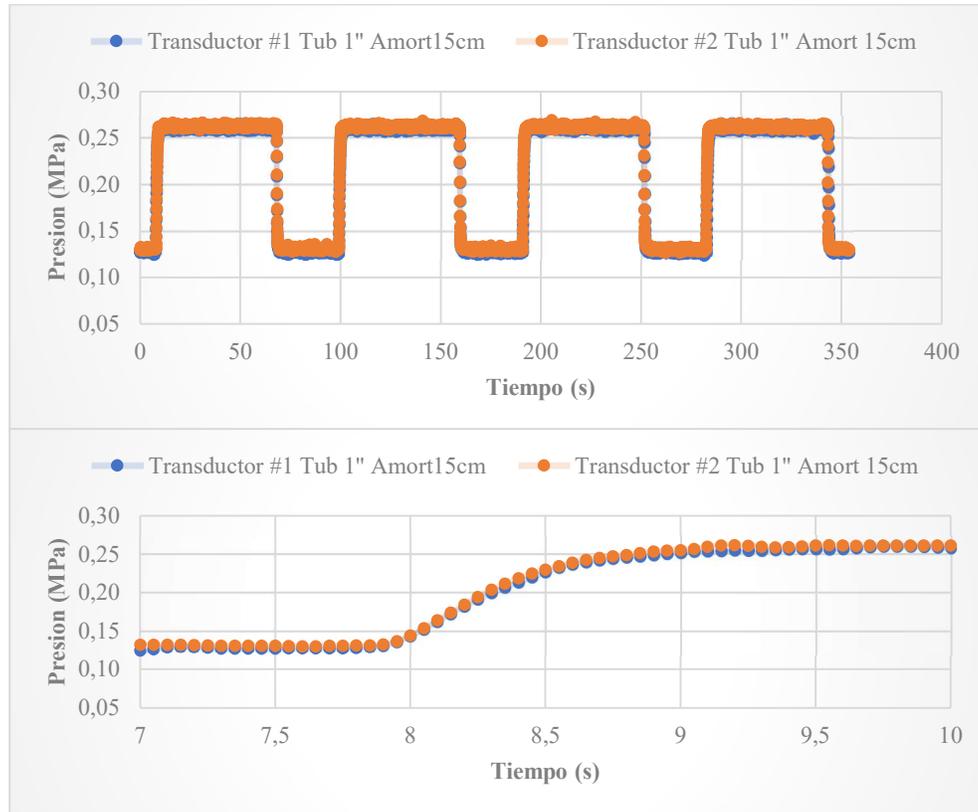


Figura 27: Golpe de Ariete a 0,13 Mpa en Modelo María Fernanda - Amortiguador Tubería 15 cm long -

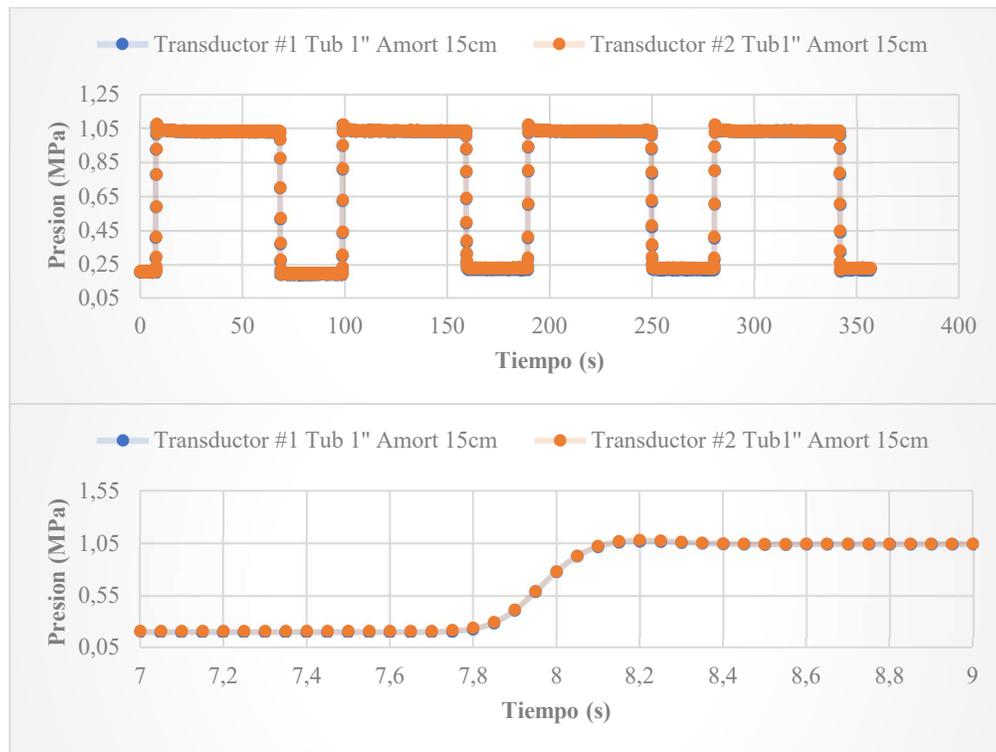


Figura 28: Golpe de Ariete a 0,2 Mpa en Modelo María Fernanda – Amortiguador Tubería 15 cm long –

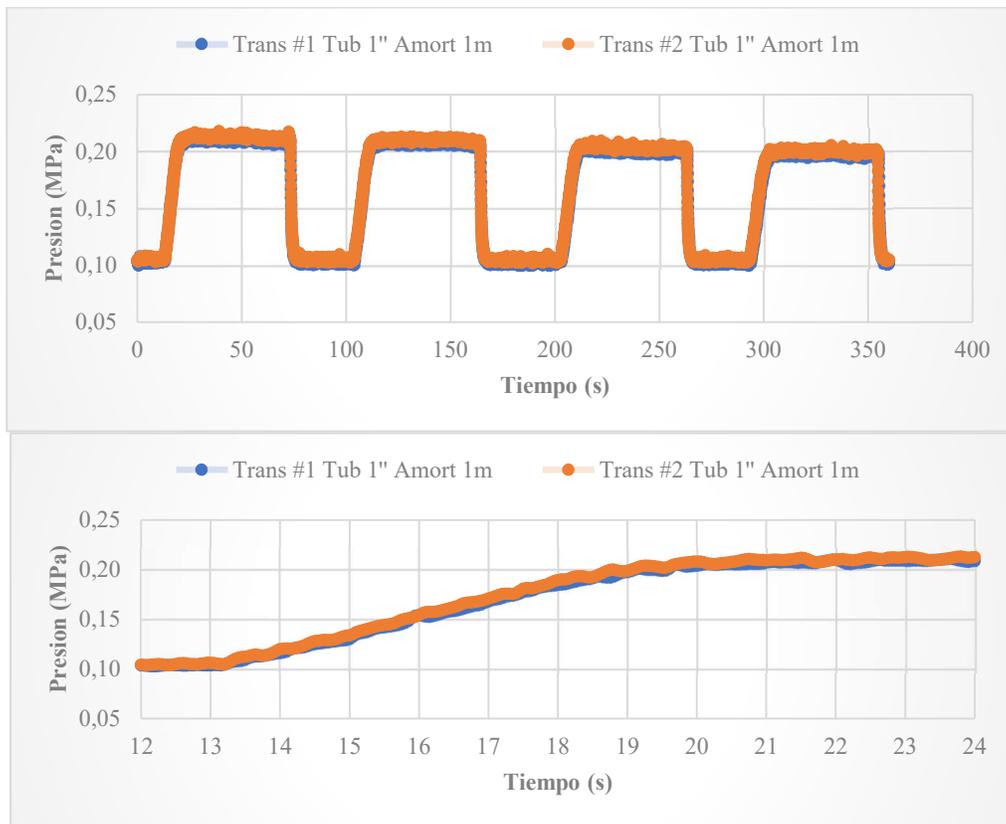


Figura 29: Golpe de Ariete a 0,1 Mpa en Modelo María Fernanda – Amortiguador Tubería 1 m long –

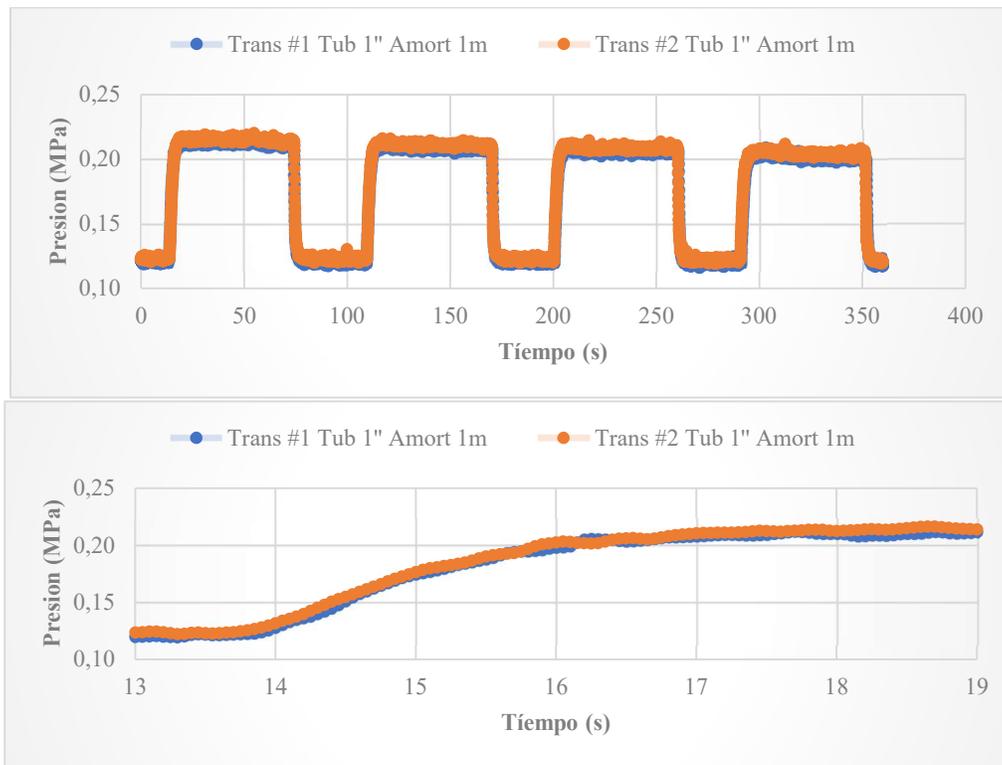


Figura 30: Golpe de Ariete a 0,12 Mpa en Modelo María Fernanda – Amortiguador Tubería 1 m long –

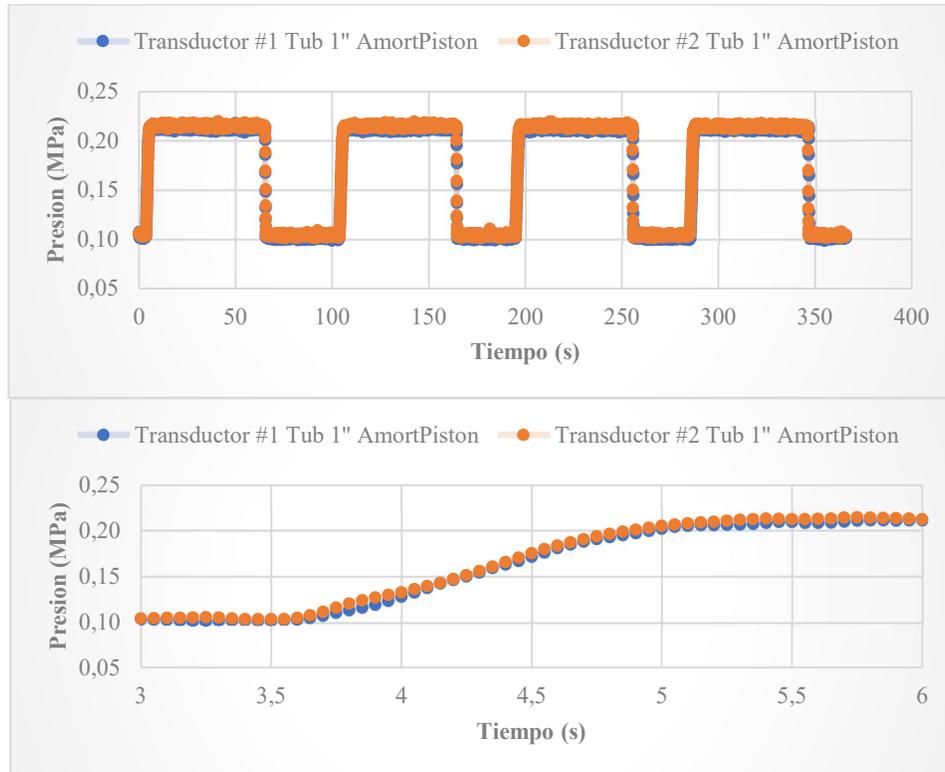


Figura 31: Golpe de Ariete a 0,1 Mpa en Modelo María Fernanda – Amortiguador Pistón 1" –

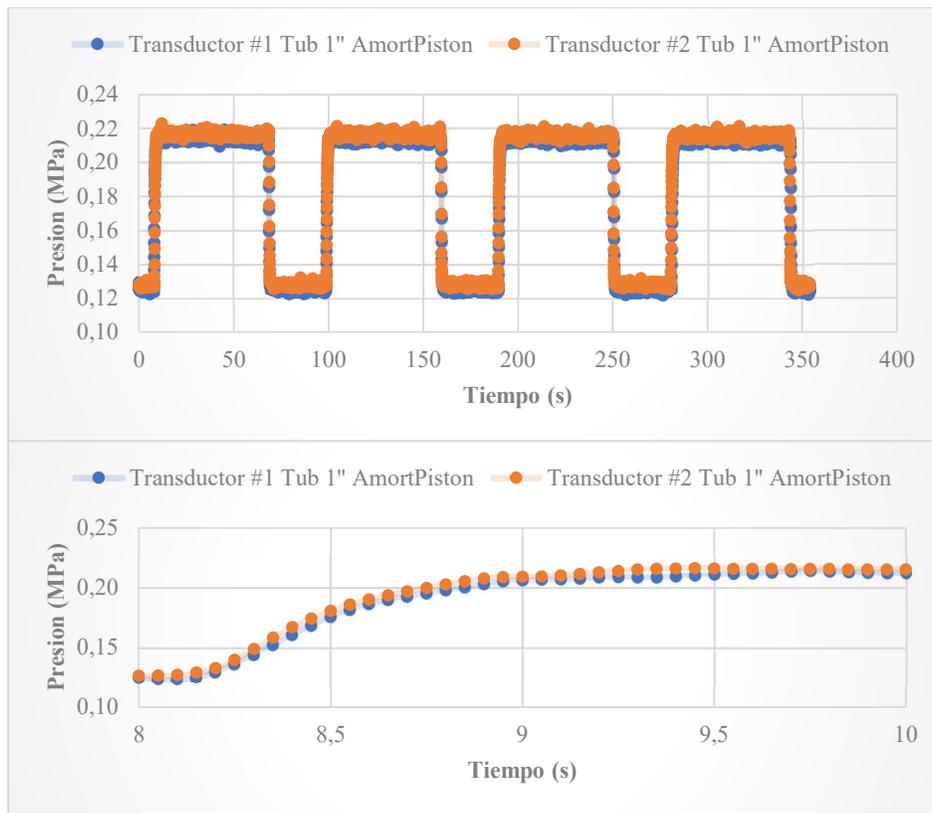


Figura 32: Golpe de Ariete a 0,13 Mpa en Modelo María Fernanda – Amortiguador Pistón 1" –

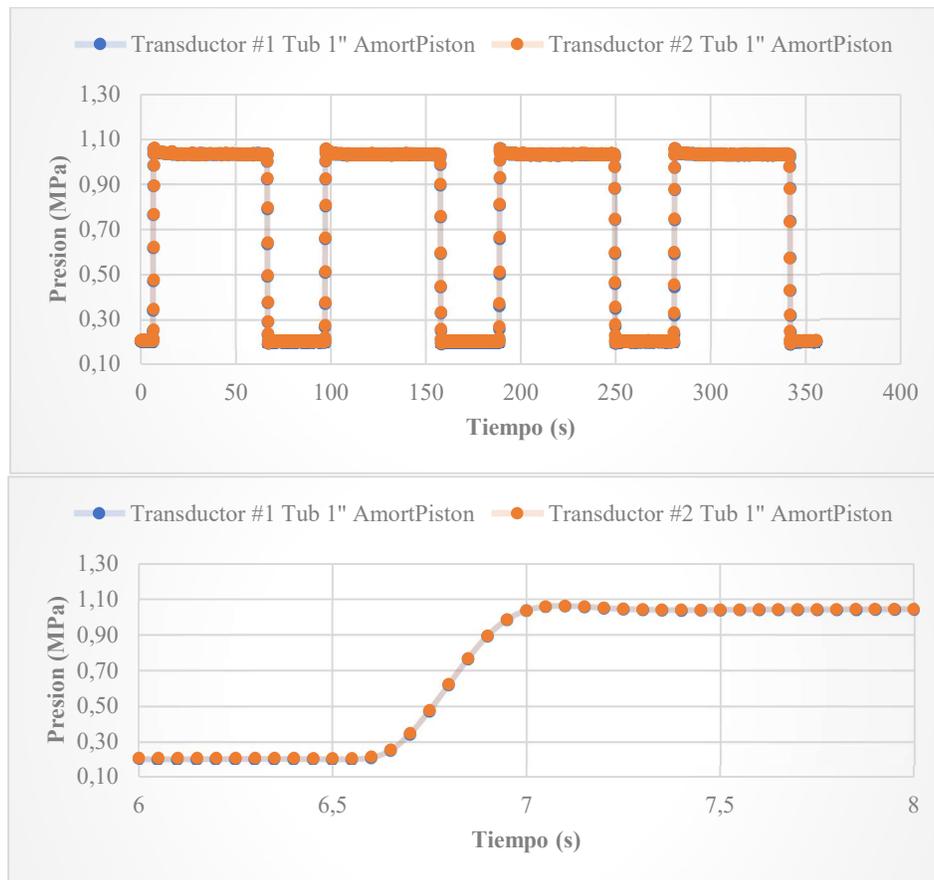


Figura 33: Golpe de Ariete a 0,2 Mpa en Modelo María Fernanda – Amortiguador Pistón 1" –

Tabla 7: Presiones Máximas Registradas - Modelo María Fernanda -

Evaluaciones - Modelo de María Fernanda -		
Amortiguador	Presión Inicial (Mpa)	Presión Máxima (Mpa)
Tubería 1" - 15 cm long	0,1	0,26
Tubería 1" - 1m long		
Pistón 1"		
Tubería 1" - 15 cm long	0,14	0,26
Tubería 1" - 1m long		
Pistón 1"		
Tubería 1" - 15 cm long	0,2	1,06
Tubería 1" - 1m long		

Pistón 1"

Resultados Pruebas Modelo – Tubería ½” Red Elevada 1 Ducha Caudal Mínimo –

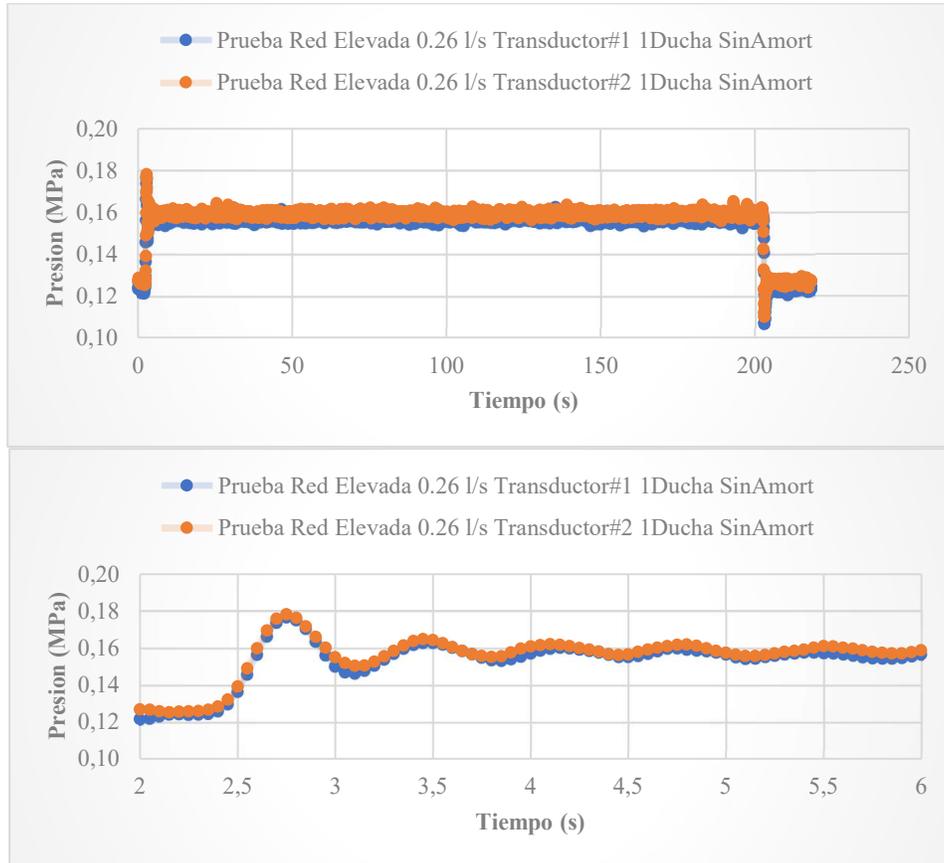


Figura 34: Golpe de Ariete a 0,13 Mpa en Modelo tubería 1/2" 1 Ducha – Sin Amortiguador –

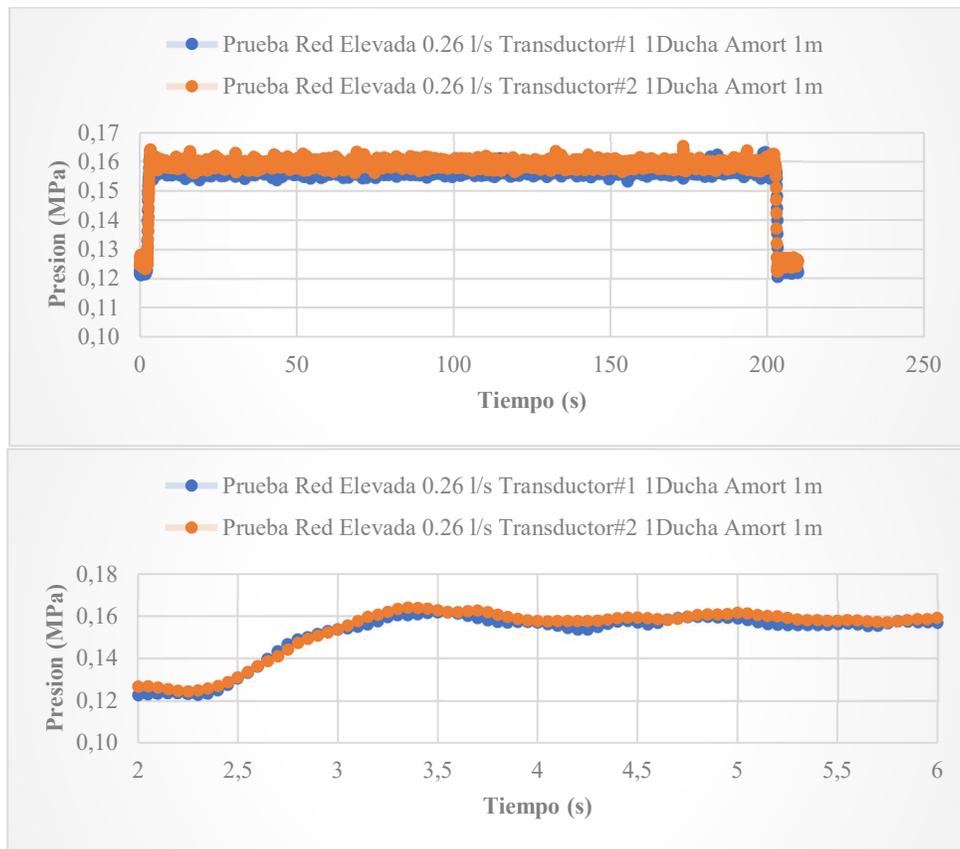


Figura 35: Golpe de Ariete a 0,13 Mpa en Modelo tubería 1/2" 1 Ducha – Amortiguador Tub 1m long–

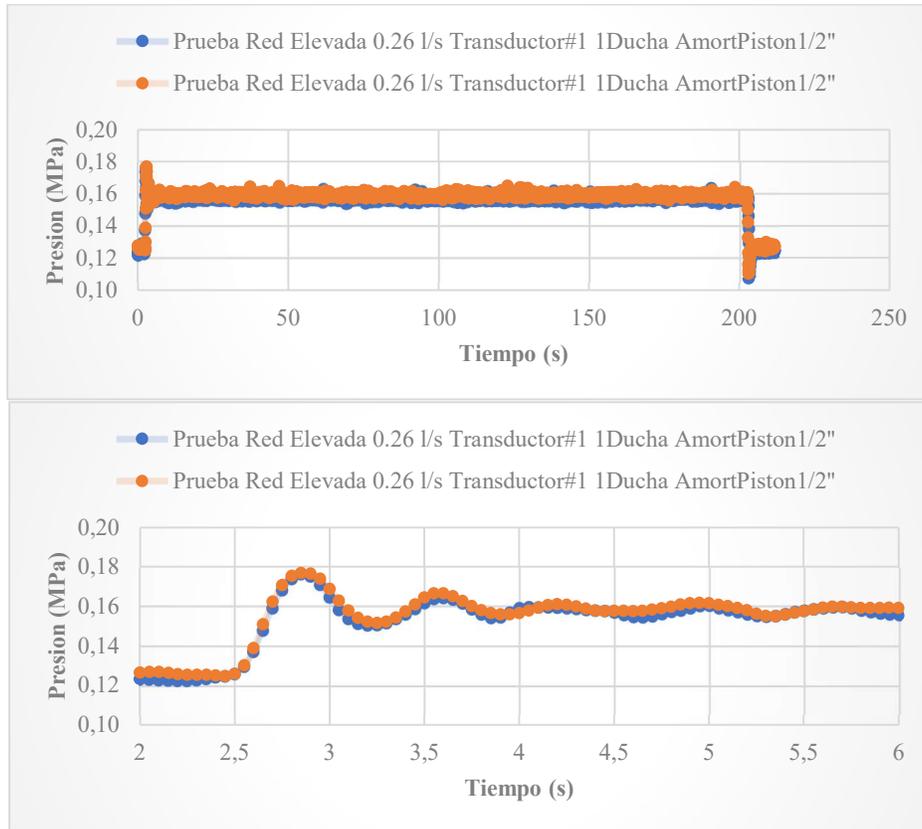


Figura 36: Golpe de Ariete a 0,13 Mpa en Modelo tubería 1/2" 1 Ducha – Amortiguador Tipo Pistón 1/2" –

Resultados Pruebas Modelo – Tubería ½” Red Elevada 1 Ducha –

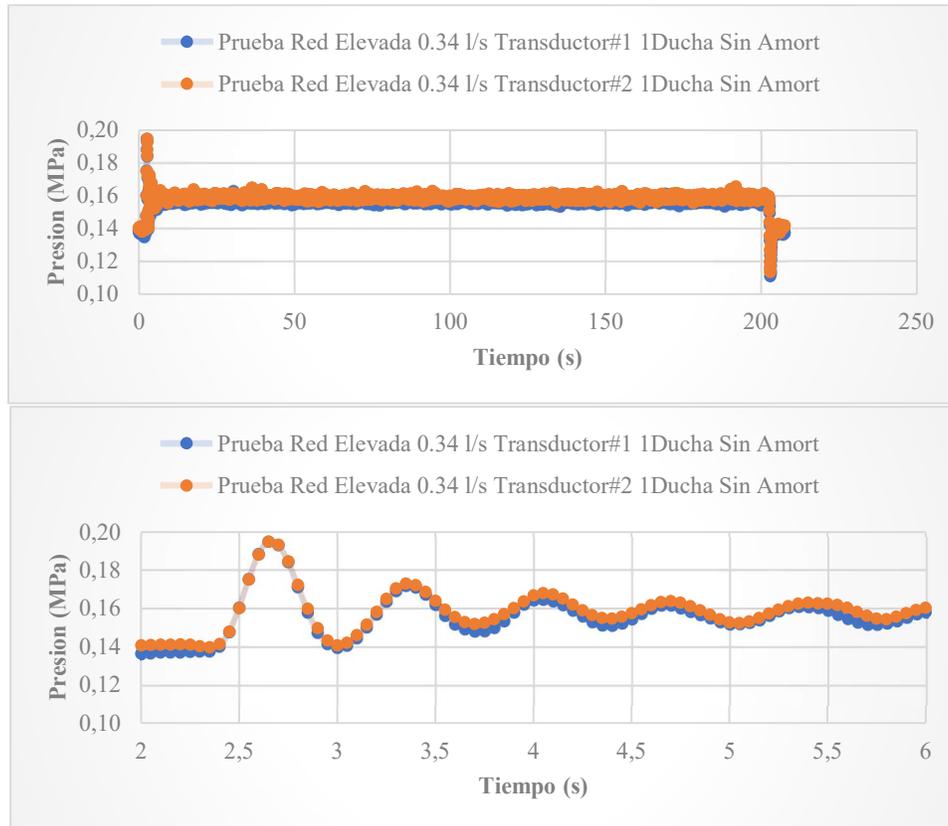


Figura 37: Golpe de Ariete a 0,14 Mpa en Modelo tubería 1/2" 1 Ducha – Sin Amortiguador –

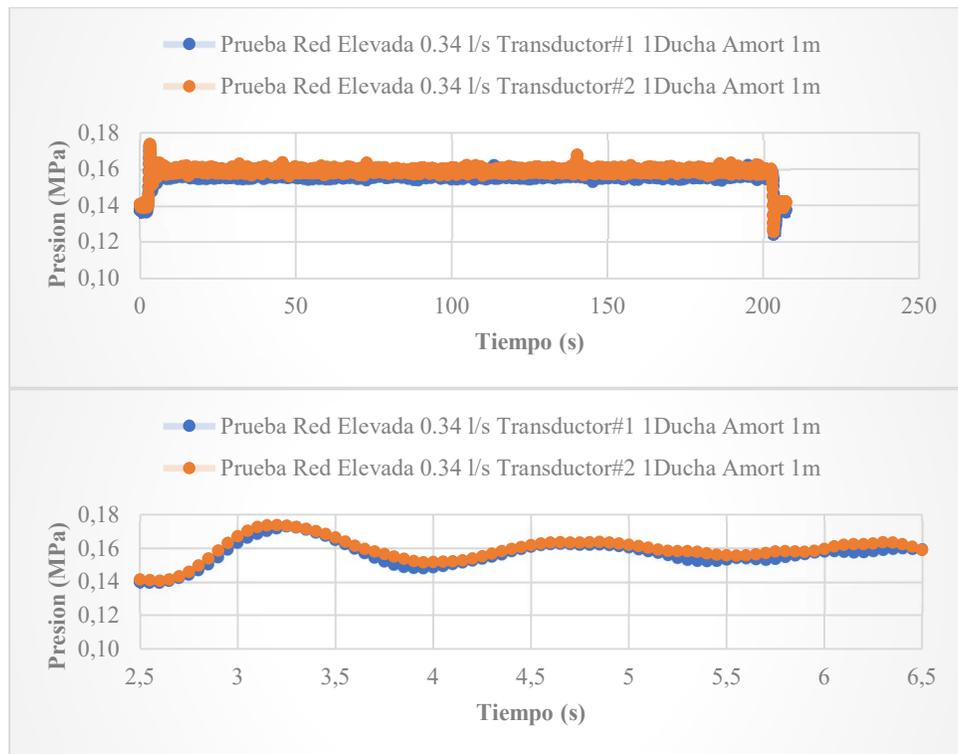


Figura 38: Golpe de Ariete a 0,14 Mpa en Modelo tubería 1/2" 1 Ducha – Amortiguador Tub 1m long –

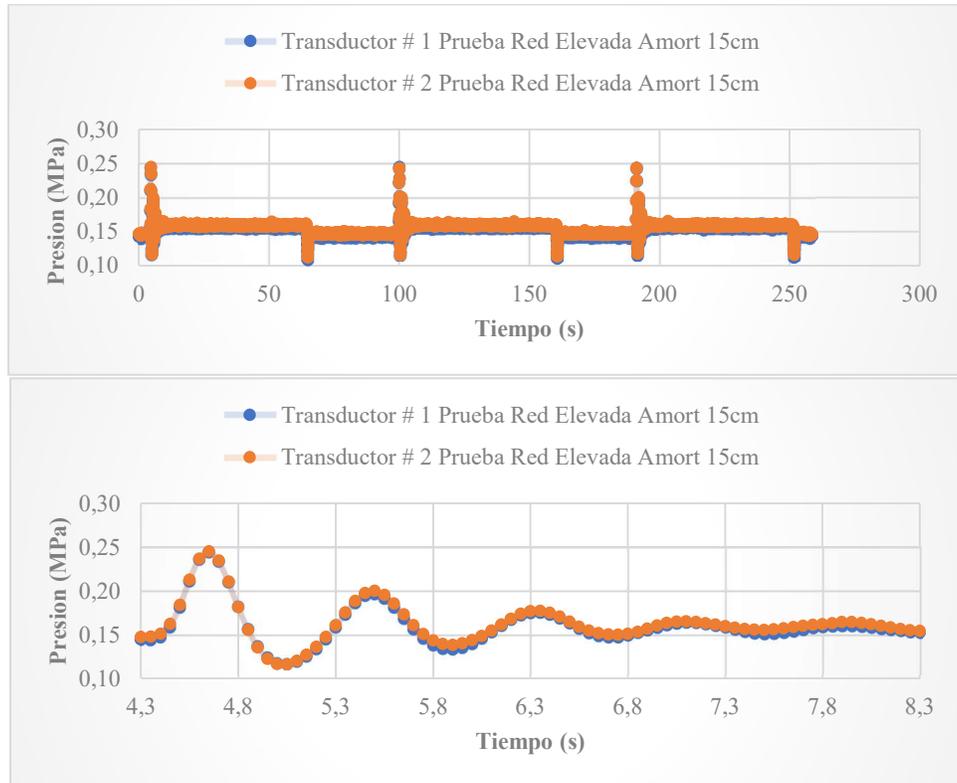


Figura 39: Golpe de Ariete a 0,15 Mpa en Modelo tubería 1/2" 1 Ducha – Amortiguador Tub 15 cm long –

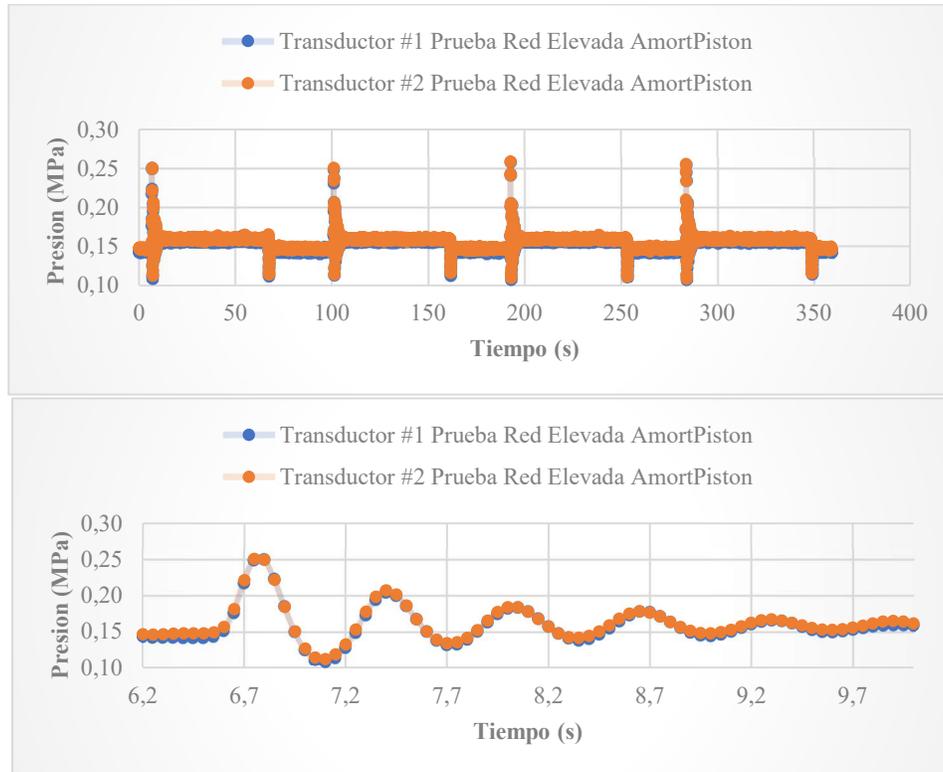


Figura 40: Golpe de Ariete a 0,15 Mpa en Modelo tubería 1/2" 1 Ducha – Amortiguador Tipo Pistón 1" –

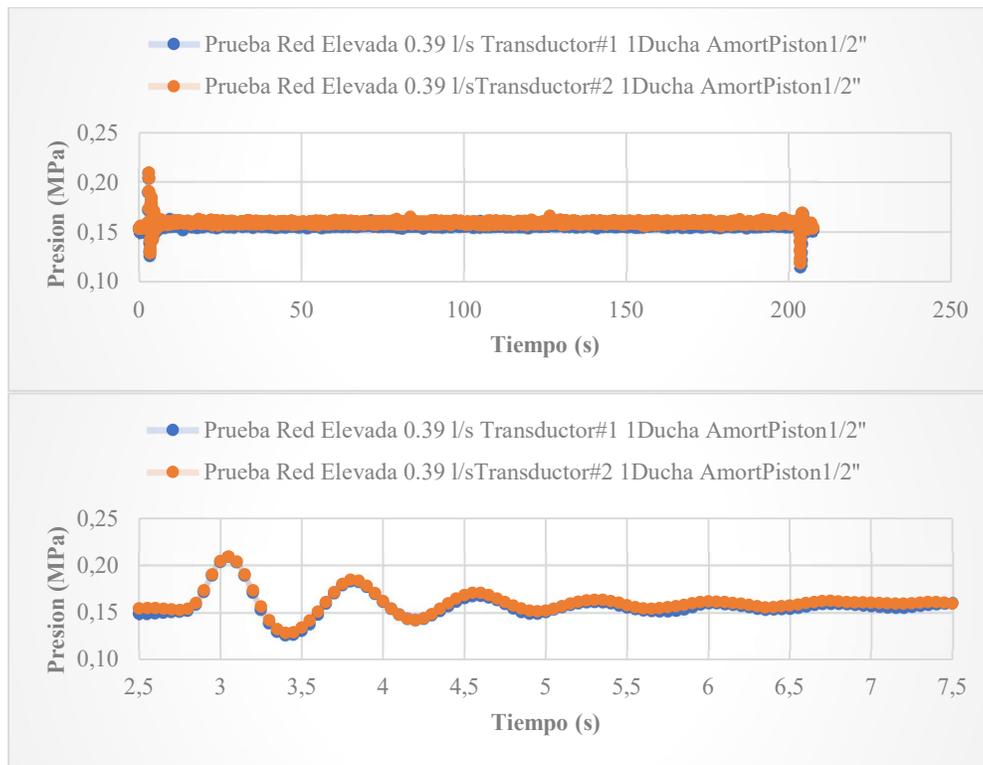


Figura 41: Golpe de Ariete a 0,15 Mpa en Modelo tubería 1/2" 1 Ducha – Amortiguador Tipo Pistón 1/2" –

Resultados Pruebas Modelo – Tubería ½” Red Elevada 2 Duchas –

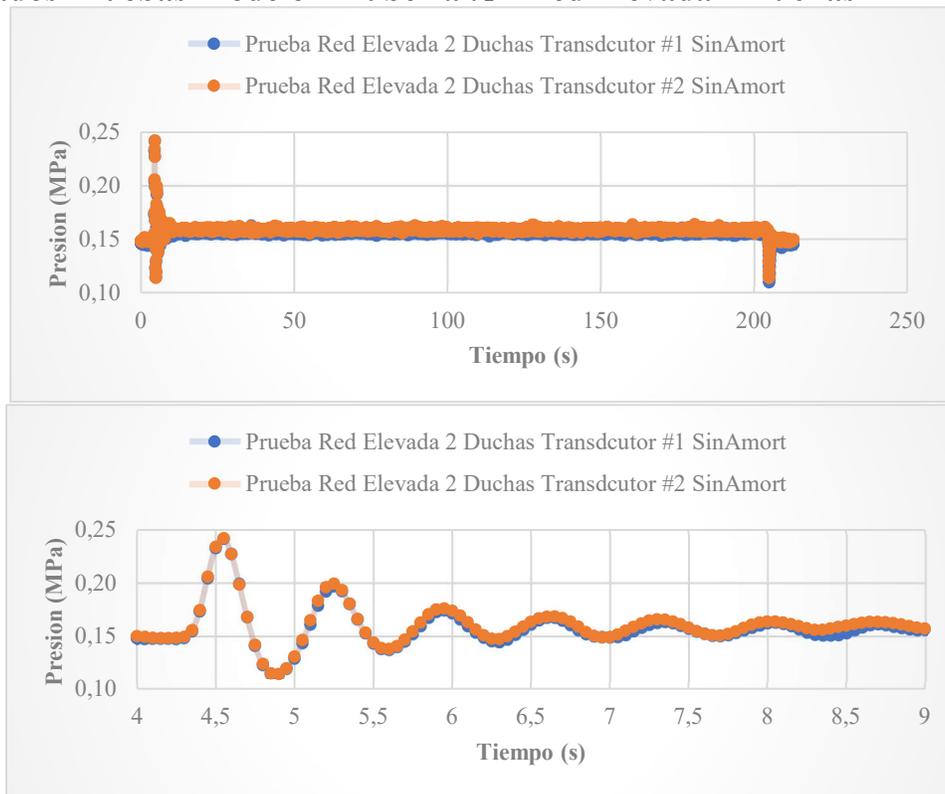


Figura 42: Golpe de Ariete a 0,15 Mpa en Modelo tubería 1/2" 2 Duchas – Sin Amortiguador –

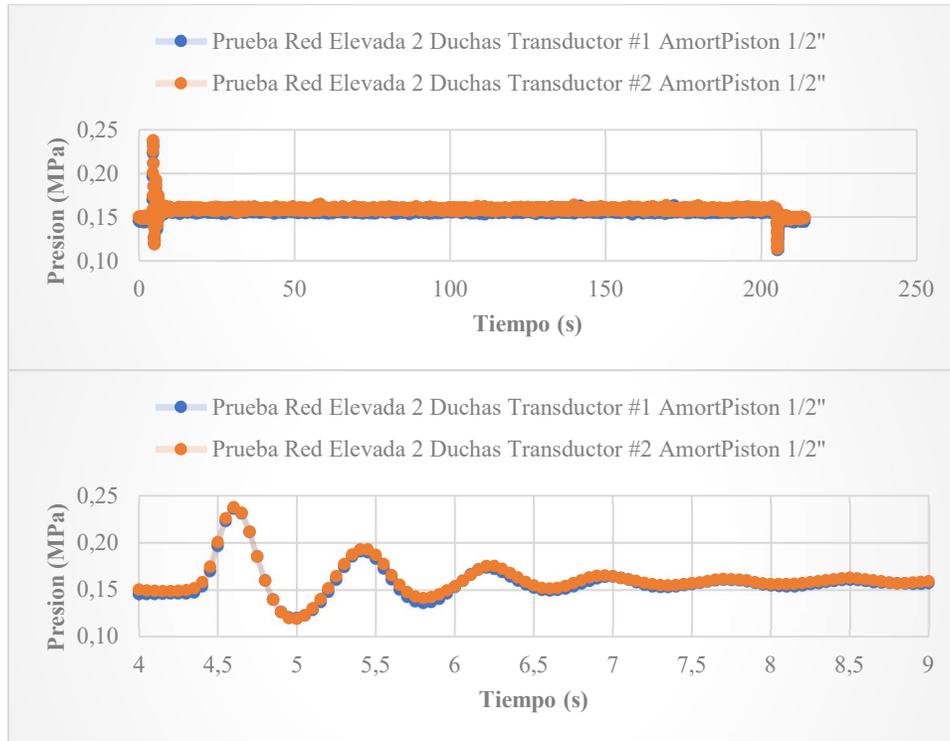


Figura 43: Golpe de Ariete a 0,15 Mpa en Modelo tubería 1/2" 2 Duchas –Amortiguador Tipo Pistón 1/2" –

Resultados Pruebas Modelo – Tubería 1/2” Red Elevada 3 Duchas –

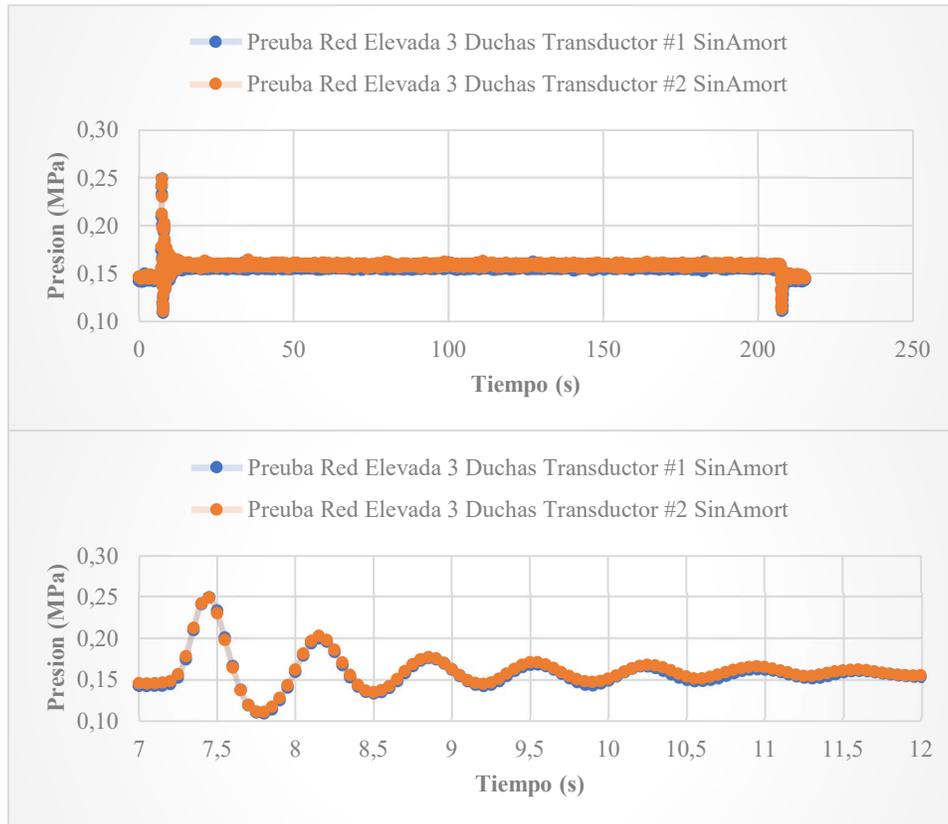


Figura 44: Golpe de Ariete a 0,15 Mpa en Modelo tubería 1/2" 3 Duchas – Sin Amortiguador –

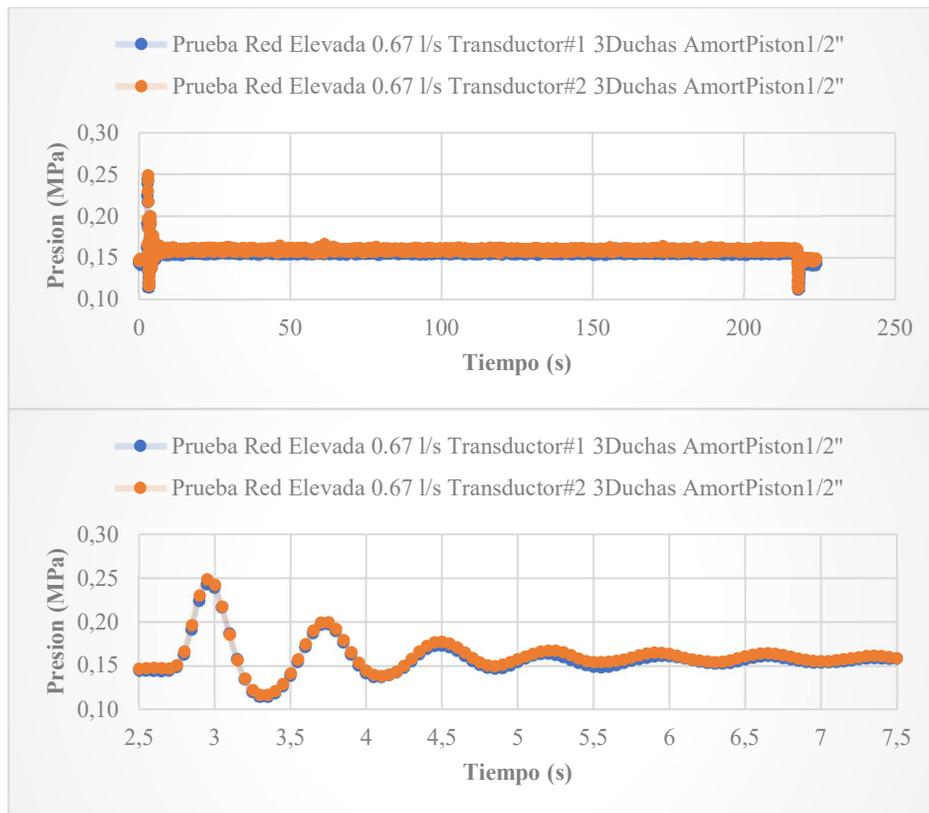


Figura 45: Golpe de Ariete a 0,15 Mpa en Modelo tubería 1/2" 3 Duchas – Amortiguador Tipo Pistón 1/2" –

Tabla 8: Presiones Máximas Registradas - Modelo Tubería 1/2" Red Elevada -

Evaluaciones Tubería 1/2" - Modelo Red Elevada -				
Amortiguadores	Caudal (l/s)	# Duchas	Presión Inicial (Mpa)	Presión Máxima (Mpa)
Sin Amortiguador	0,26	1	0,13	0,18
Tubería 1" - 1m long -			0,13	0,162
Pistón 1/2"			0,13	0,18
Sin Amortiguador	0,34	1	0,14	0,195
Tubería 1" - 1m long -			0,14	0,17
Tubería 1" - 15 cm long -			0,15	0,25
Pistón 1"			0,15	0,25
Pistón 1/2"			0,15	0,22

Sin Amortiguador	0,6	2	0,15	0,246
Pistón 1/2"			0,15	0,246
Sin Amortiguador	0,67	3	0,15	0,25
Pistón 1/2"			0,15	0,25

Resultados Pruebas Modelo – Tubería ½” Red Acueducto 1 Ducha Caudal Mínimo –

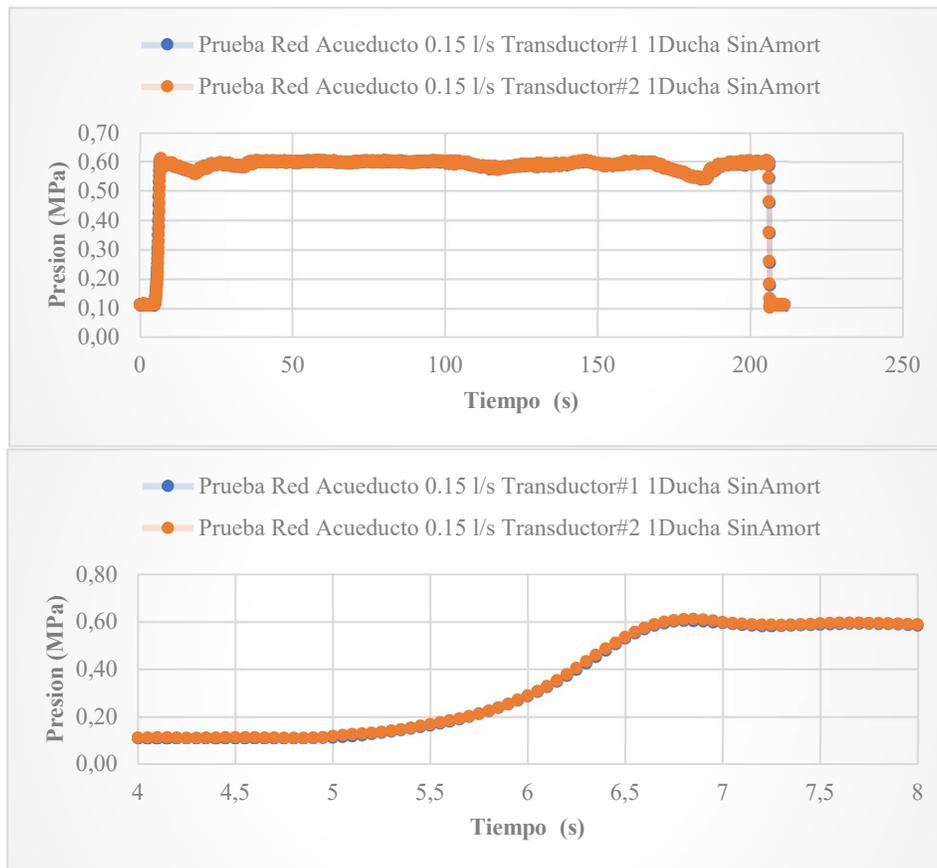


Figura 46: Golpe de Ariete a 0,1 Mpa en Modelo tubería 1/2" Caudal Mínimo – Sin Amortiguador –

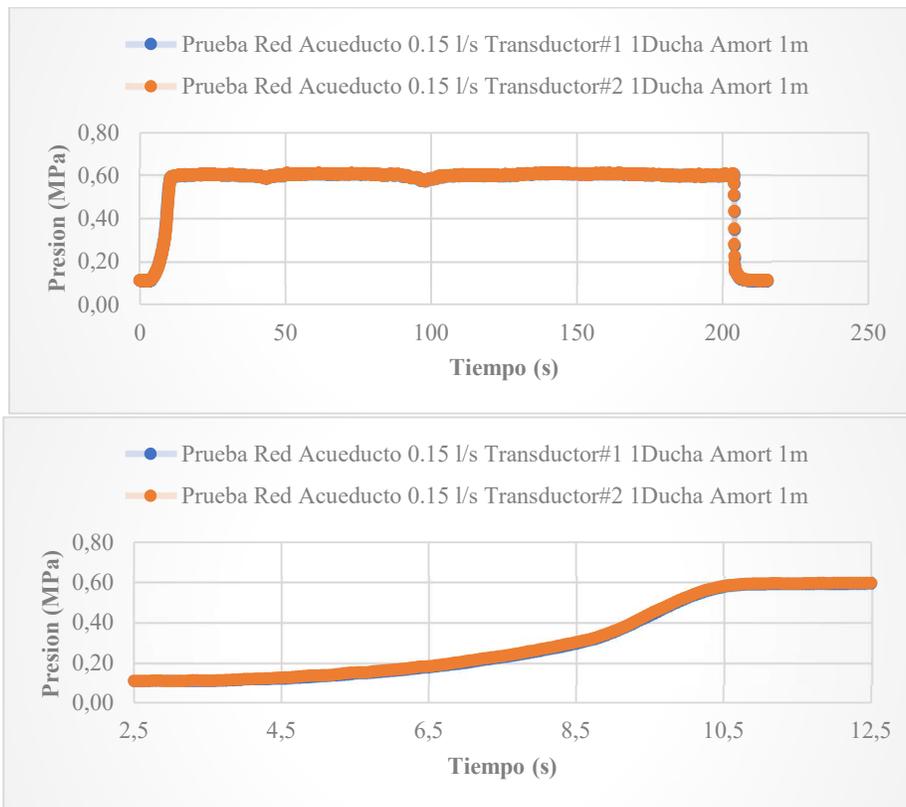


Figura 47: Golpe de Ariete a 0,1 Mpa en Modelo tubería 1/2" Caudal Mínimo – Amortiguador Tub 1m long–

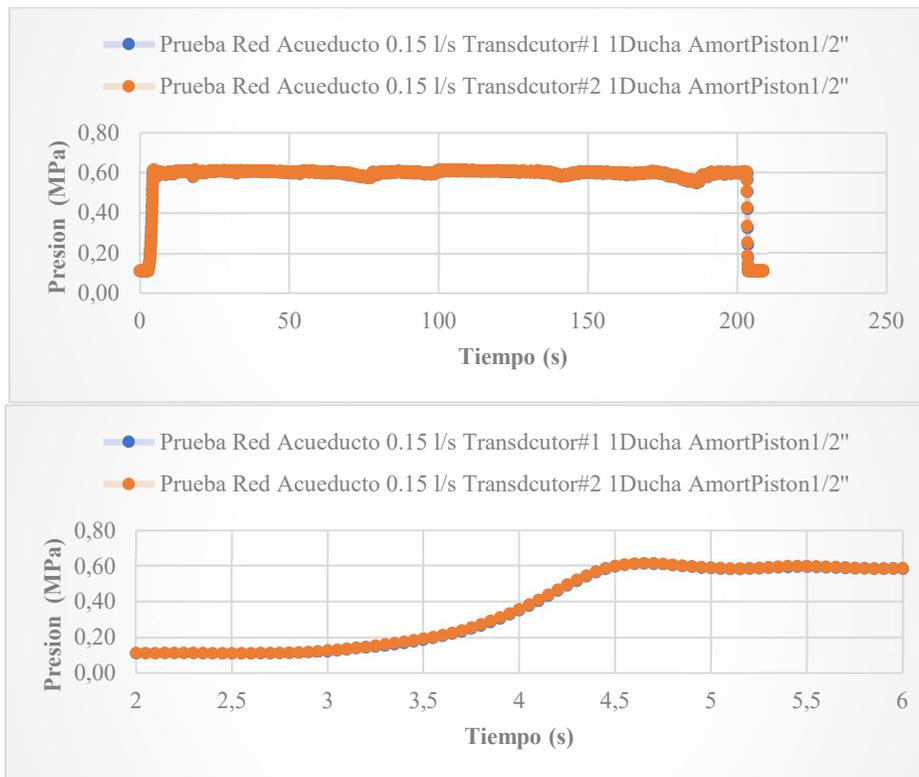


Figura 48: Golpe de Ariete a 0,1 Mpa en Modelo tubería 1/2" Caudal Mínimo – Amortiguador Tipo Pistón 1/2"–

Resultados Pruebas Modelo – Tubería ½” Red Acueducto 1 Ducha –

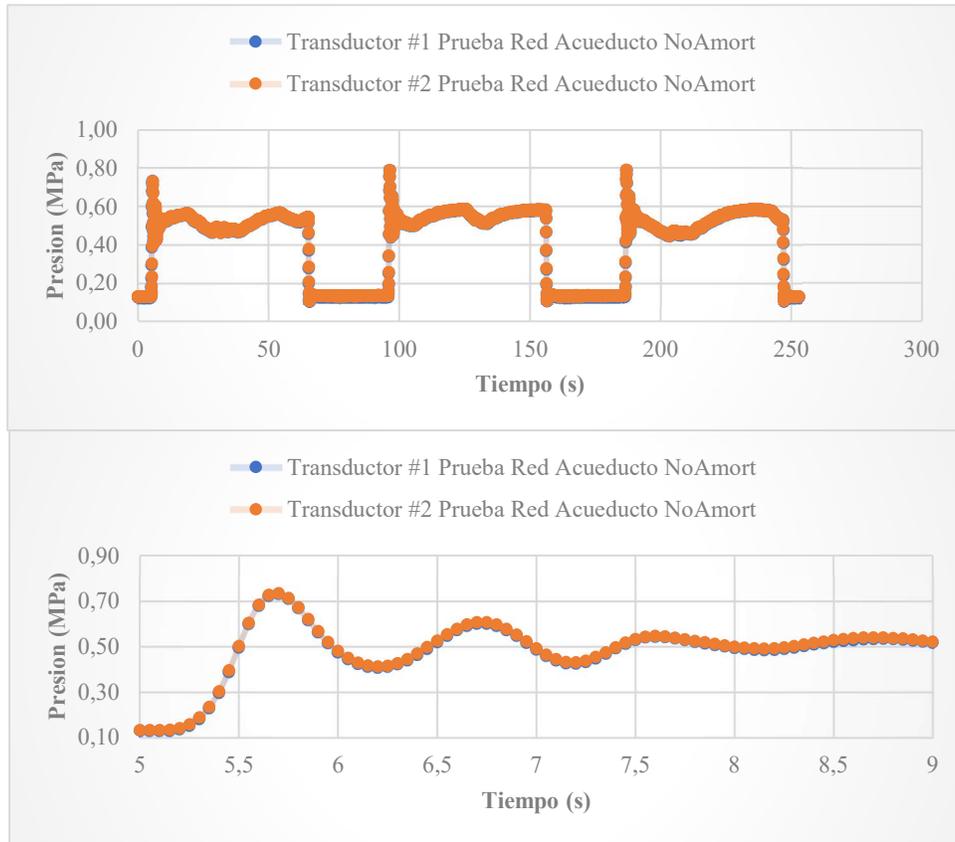


Figura 49: Golpe de Ariete a 0,13 Mpa en Modelo tubería 1/2" – Sin Amortiguador –

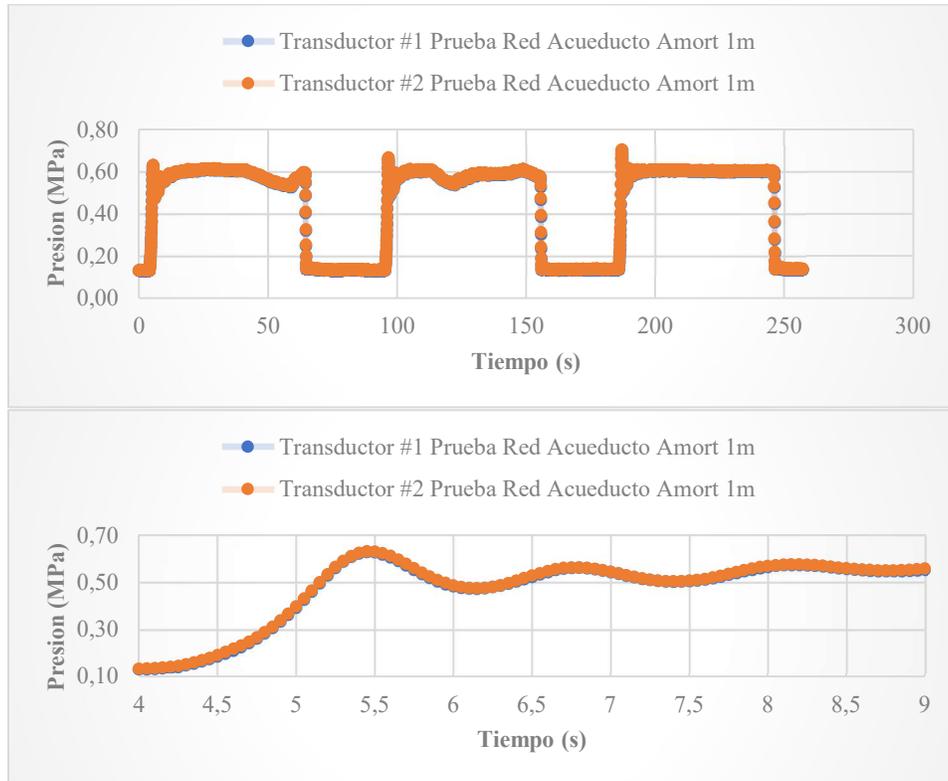


Figura 50: Golpe de Ariete a 0,13 Mpa en Modelo tubería 1/2" – Amortiguador Tub 1m Long–



Figura 51: Golpe de Ariete a 0,13 Mpa en Modelo tubería 1/2" – Amortiguador Tub 15 cm Long–

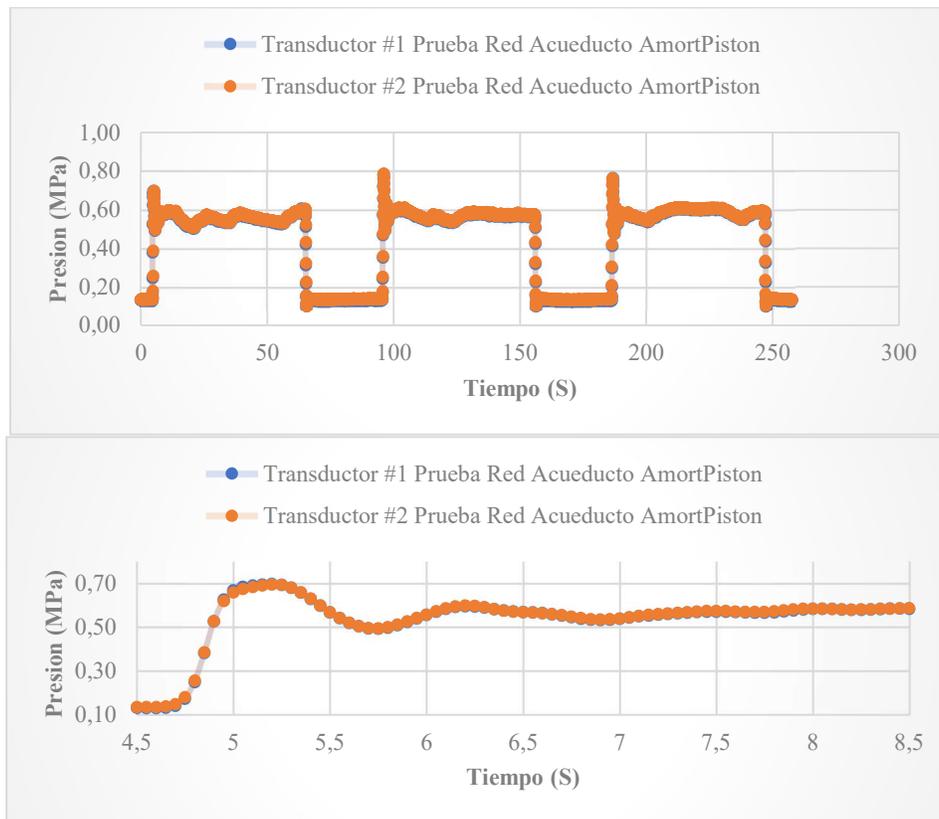


Figura 52: Golpe de Ariete a 0,13 Mpa en Modelo tubería 1/2" – Amortiguador Tipo Pistón 1"-

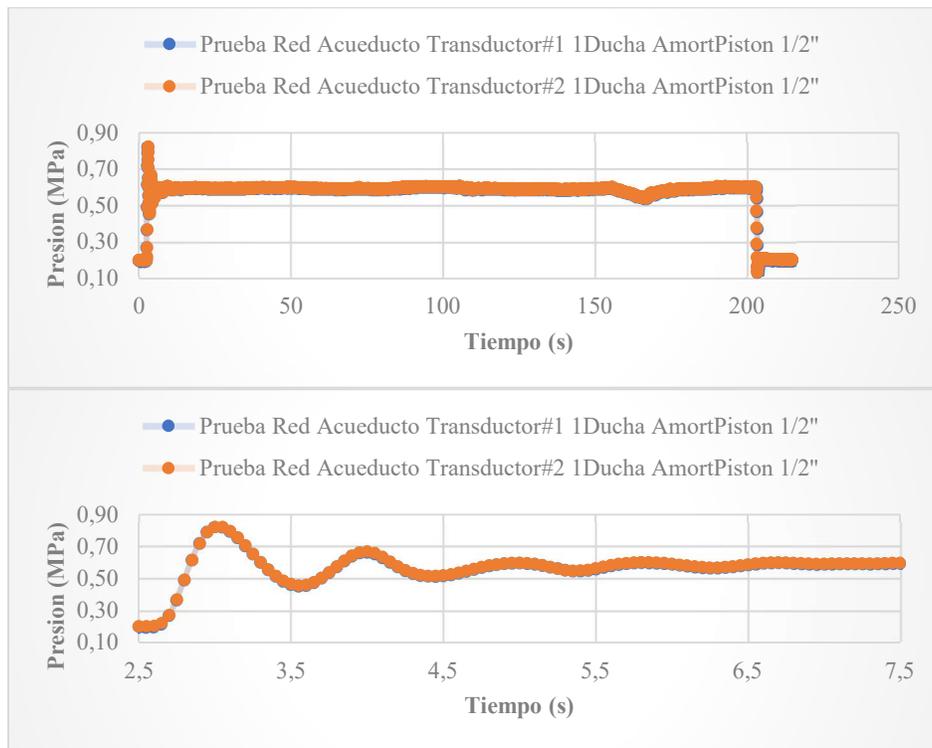


Figura 53: Golpe de Ariete a 0,13 Mpa en Modelo tubería 1/2" – Amortiguador Tipo Pistón 1/2"–

Resultados Pruebas Modelo – Tubería ½” Red Acueducto 2 Duchas –

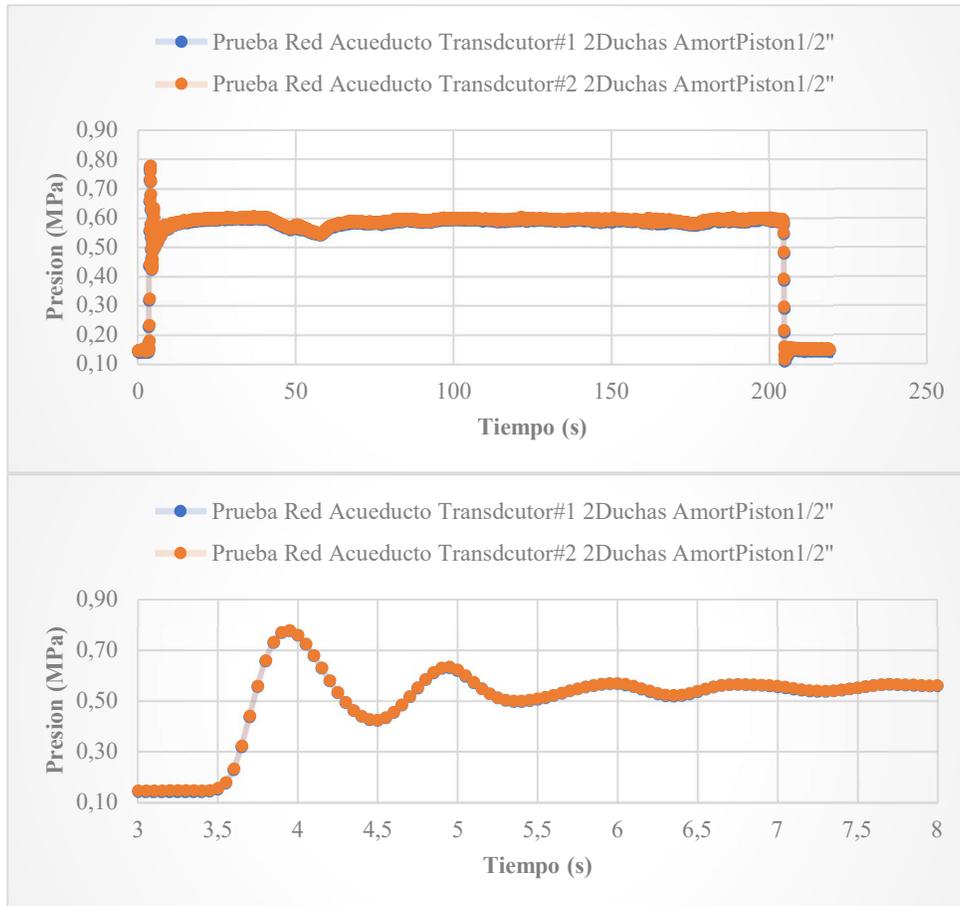


Figura 54: Golpe de Ariete a 0,14 Mpa en Modelo tubería 1/2" – Amortiguador Tipo Pistón 1/2"–

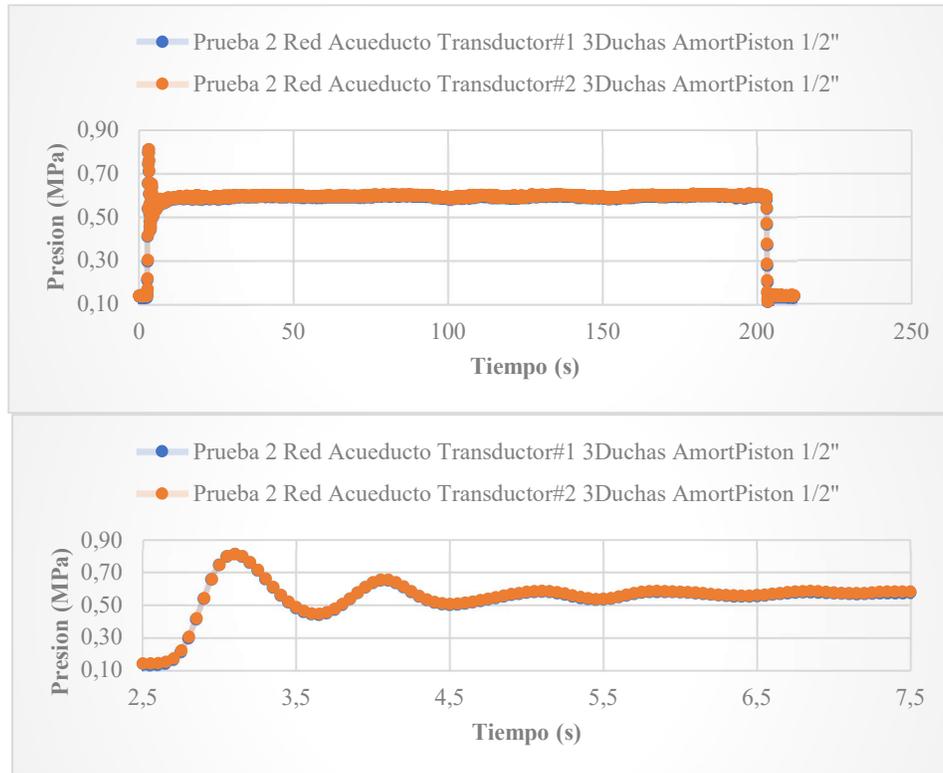
Resultados Pruebas Modelo – Tubería ½” Red Acueducto 3 Duchas –


Figura 55: Golpe de Ariete a 0,14 Mpa en Modelo tubería 1/2” – Amortiguador Tipo Pistón 1/2”

Tabla 9: Presiones Máximas Registradas - Modelo Tubería 1/2" Red Acueducto -

Evaluaciones Tubería 1/2" - Modelo Red Acueducto -				
Amortiguadores	Caudal (l/s)	# Duchas	Presión Inicial (Mpa)	Presión Máxima (Mpa)
Sin Amortiguador	0,15	1	0,11	0,18
Tubería 1" - 1m long - Pistón 1/2"			0,11	0,162
			0,11	0,18
Sin Amortiguador	0,55	1	0,13	0,195
Tubería 1" - 1m long -			0,13	0,17
Tubería 1" - 15 cm long -			0,13	0,25
Pistón 1"			0,13	0,25
Pistón 1/2"			0,13	0,22
Pistón 1/2"	0,61	2	0,14	0,246
Pistón 1/2"	0,61	3	0,13	0,25

Resultados Pruebas Modelo – Tubería ½” Red Combinada 1 Ducha –

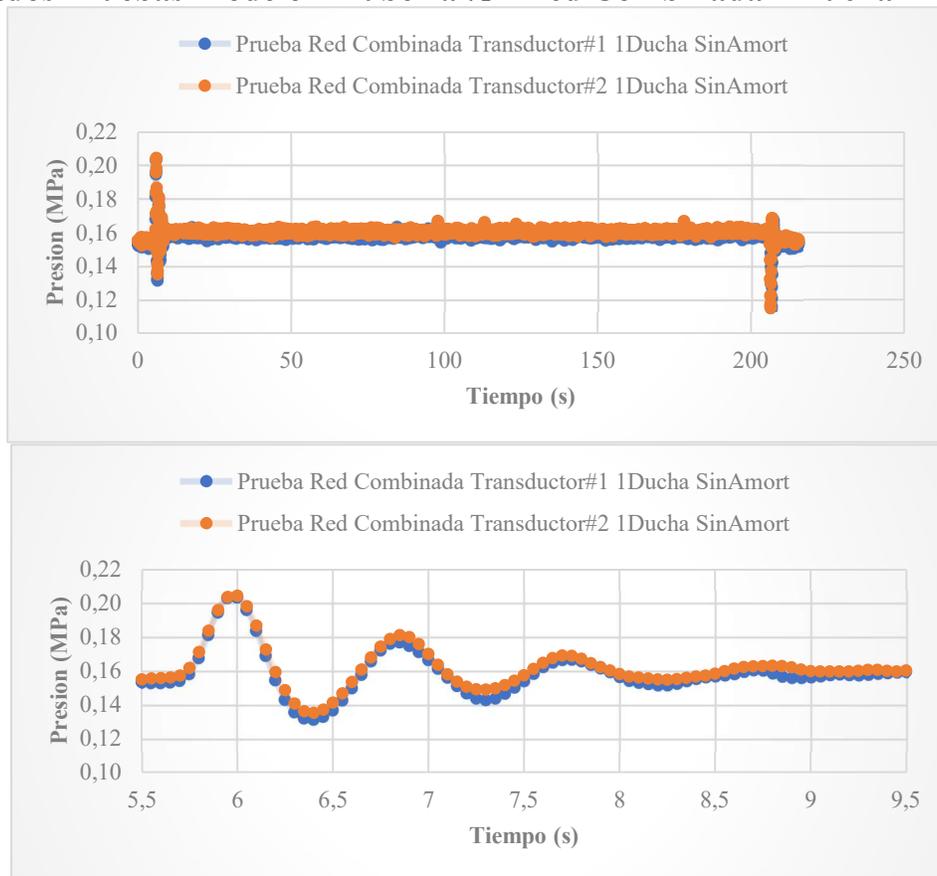


Figura 56: Golpe de Ariete a 0,15 Mpa en Modelo tubería 1/2" – Sin Amortiguador –

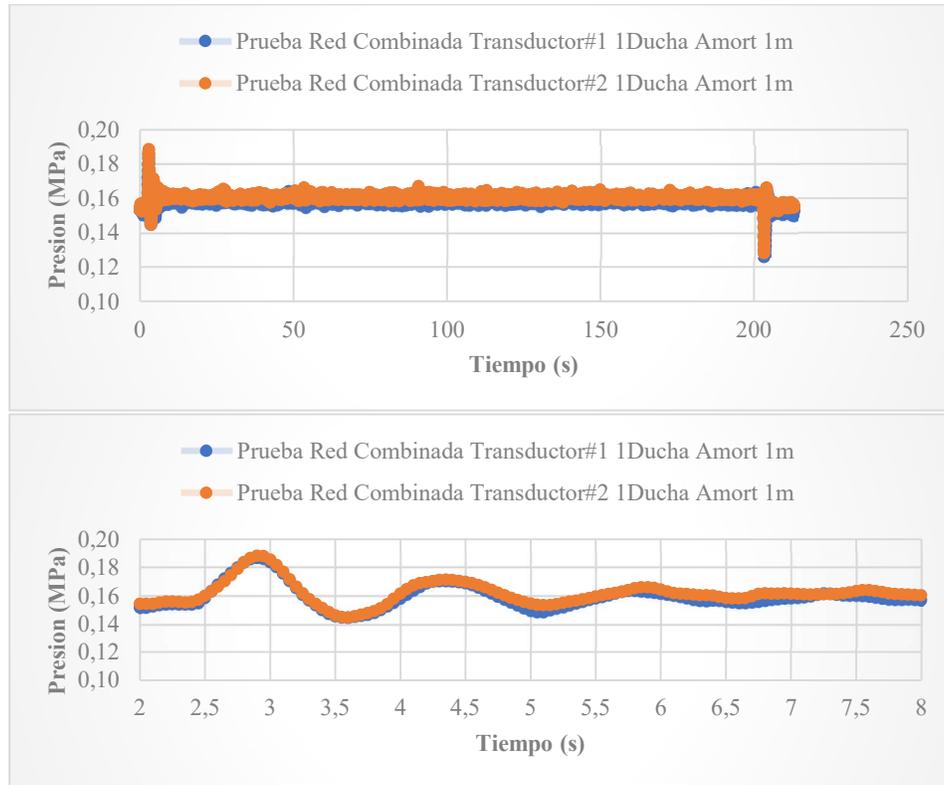


Figura 57: Golpe de Ariete a 0,15 Mpa en Modelo tubería 1/2" – Amortiguador Tub 1m Long –

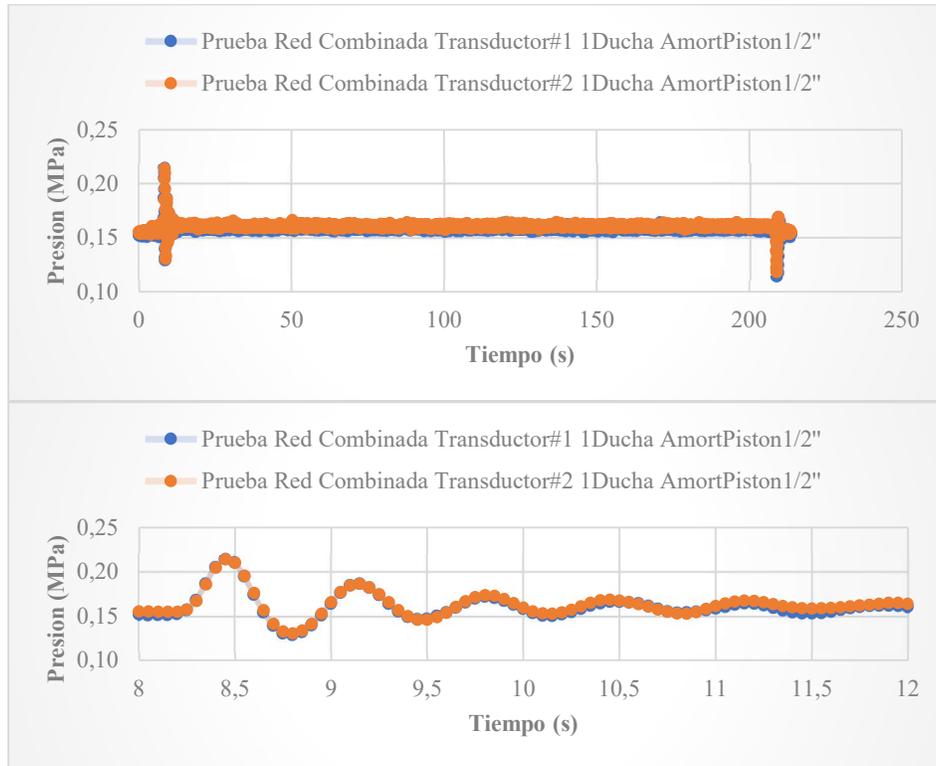


Figura 58: Golpe de Ariete a 0,15 Mpa en Modelo tubería 1/2" – Amortiguador Pistón 1/2" –

Resultados Pruebas Modelo – Tubería ½” Red Combinada 2 Duchas –

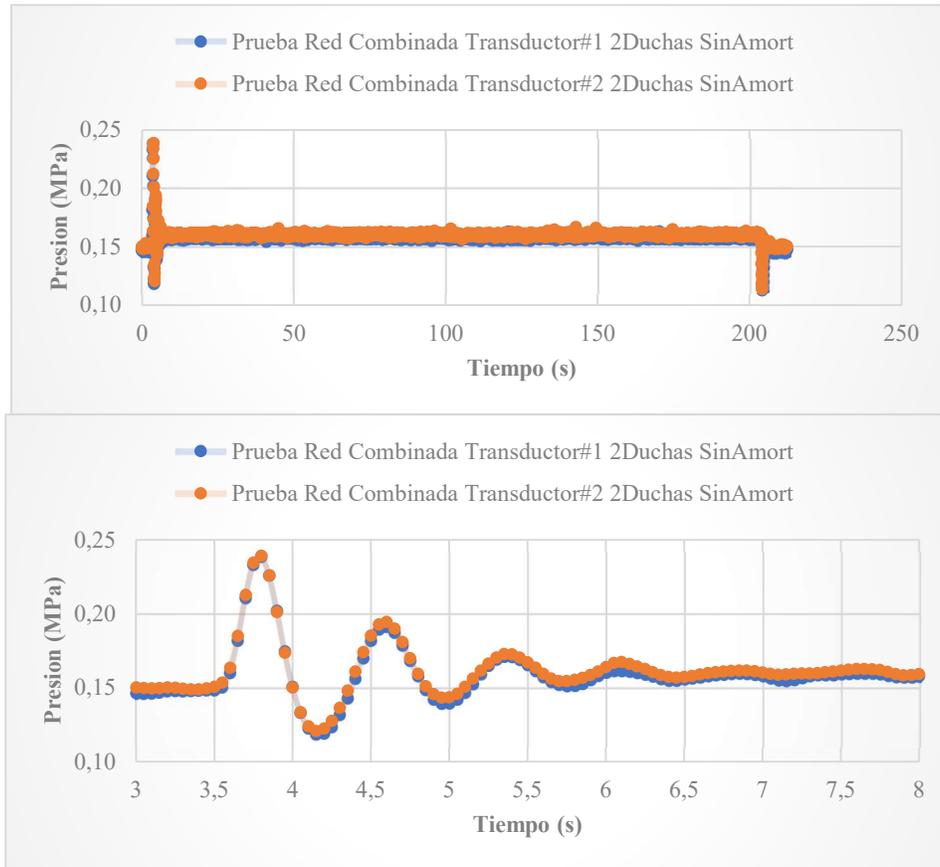


Figura 59: Golpe de Ariete a 0,15 Mpa en Modelo tubería 1/2" – Sin Amortiguador –

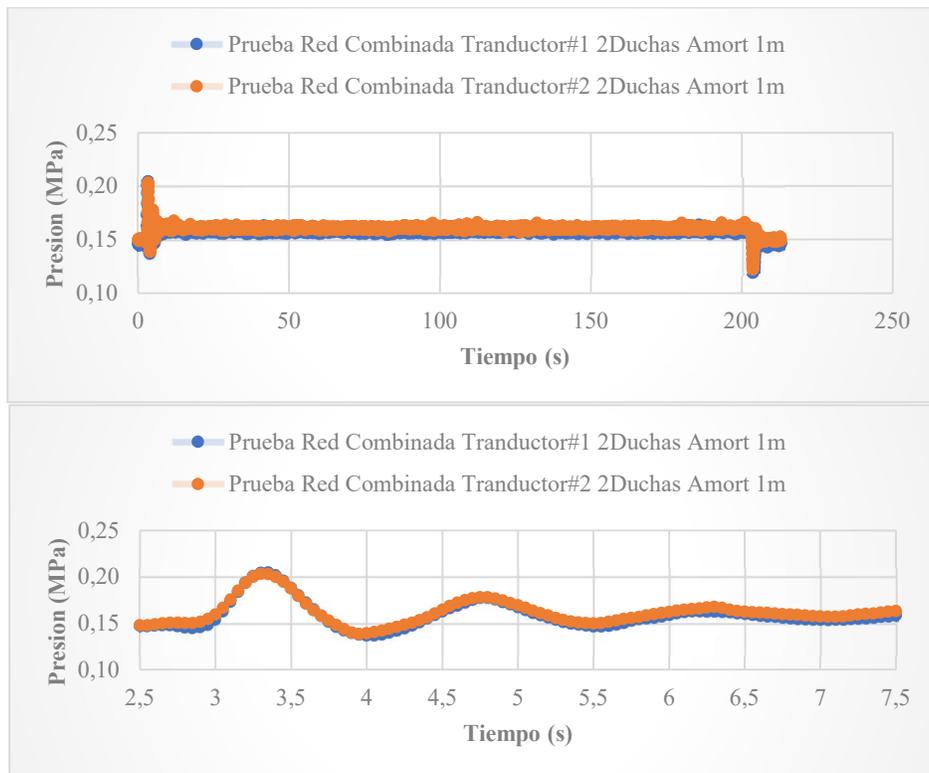


Figura 60: Golpe de Ariete a 0,15 Mpa en Modelo tubería 1/2" – Amortiguador Tub 1m Long –

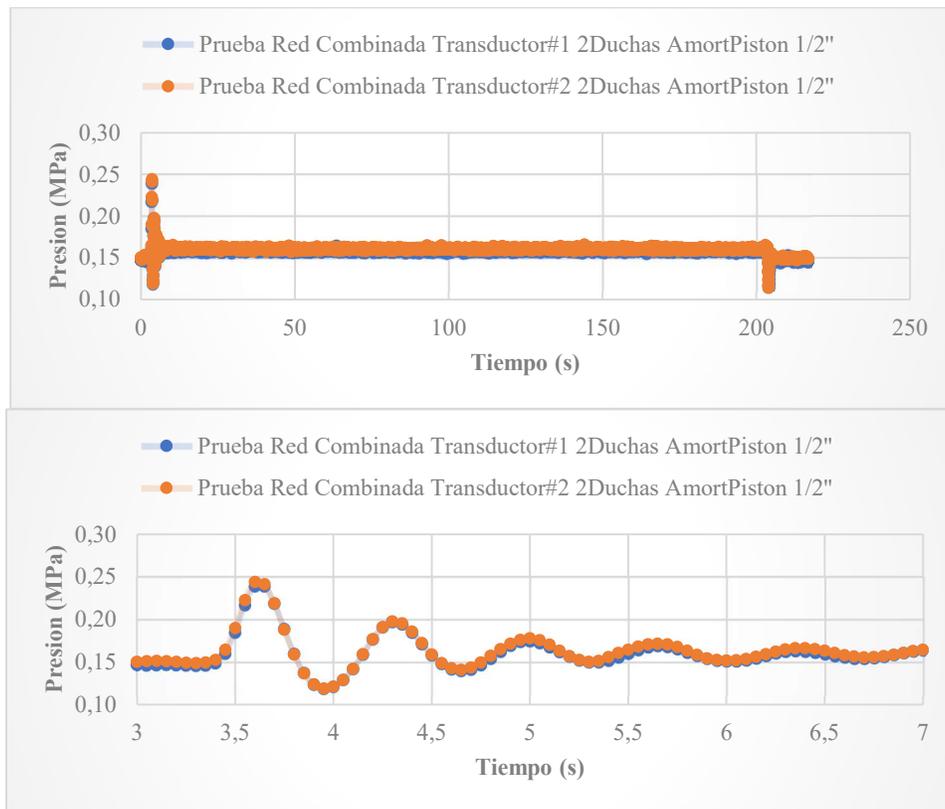


Figura 61: Golpe de Ariete a 0,15 Mpa en Modelo tubería 1/2" – Amortiguador Pistón 1/2" –

Resultados Pruebas Modelo – Tubería ½” Red Combinada 3 Duchas –

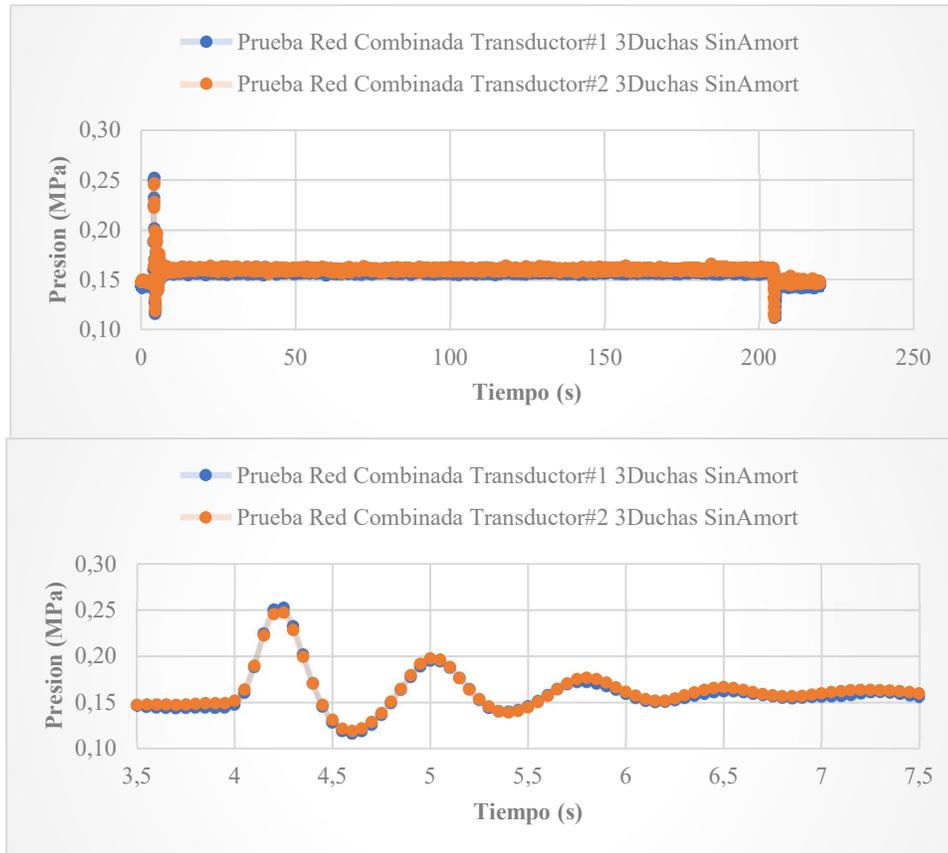


Figura 62: Golpe de Ariete a 0,15 Mpa en Modelo tubería 1/2" – Sin Amortiguador –

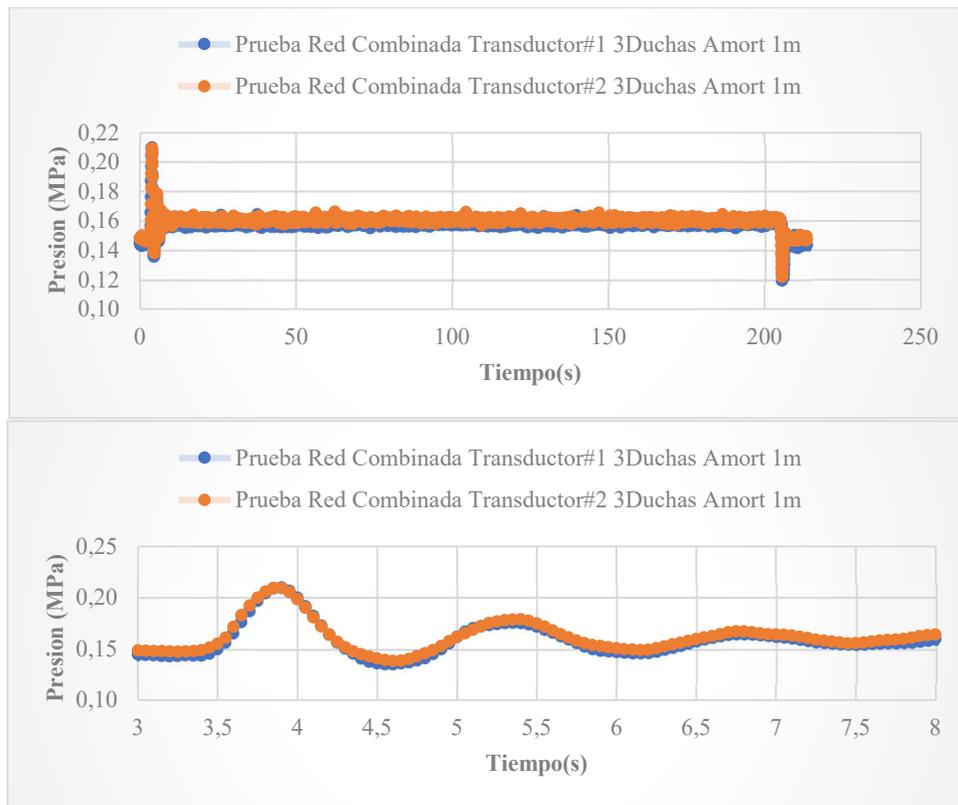


Figura 63: Golpe de Ariete a 0,15 Mpa en Modelo tubería 1/2" – Amortiguador Tub 1m Long –

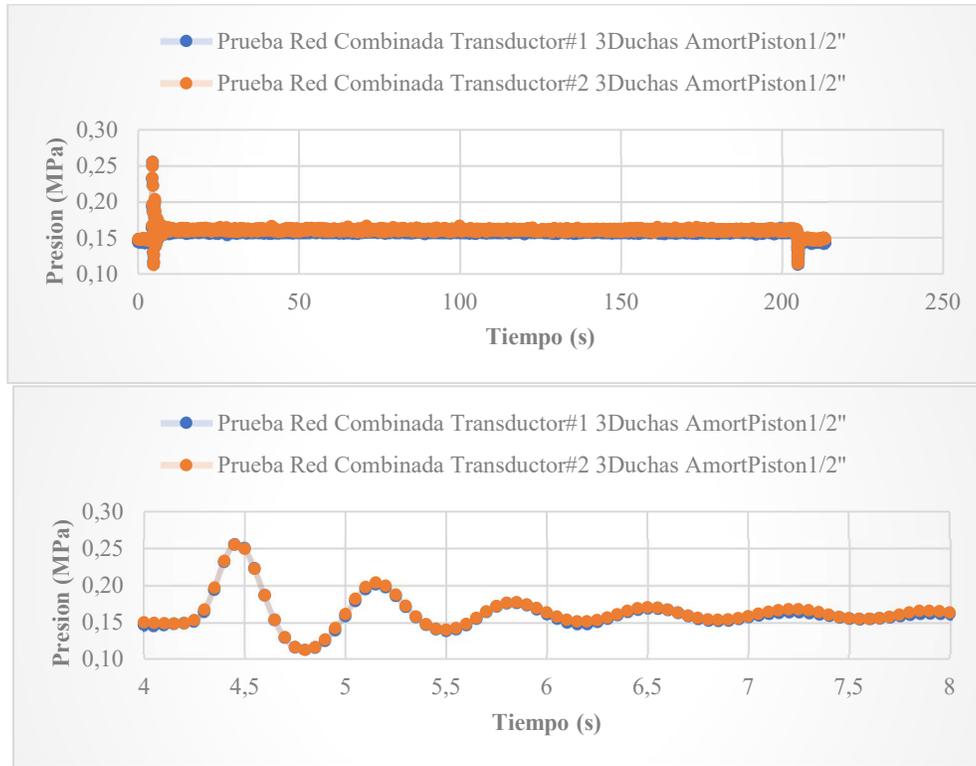


Figura 64: Golpe de Ariete a 0,15 Mpa en Modelo tubería 1/2" – Amortiguador Pistón 1/2" –

Tabla 10: Presiones Máximas Registradas - Modelo Tubería 1/2" Red Combinada -

Evaluaciones Tubería 1/2" - Modelo Red Combinada -				
Amortiguadores	Caudal (l/s)	# Duchas	Presión Inicial (Mpa)	Presión Máxima (Mpa)
Sin Amortiguador	0,55	1	0,15	0,21
Tubería 1" - 1m long - Pistón 1/2"			0,15	0,19
			0,15	0,21
Sin Amortiguador	0,61	2	0,15	0,24
Tubería 1" - 1m long - Pistón 1/2"			0,15	0,21
			0,15	0,24
Sin Amortiguador	0,61	3	0,15	0,25
Tubería 1" - 1m long - Pistón 1/2"			0,15	0,21
			0,15	0,25

Resultados Pruebas Modelo – Tubería 1” Red Elevada 1 Ducha Caudal Mínimo –

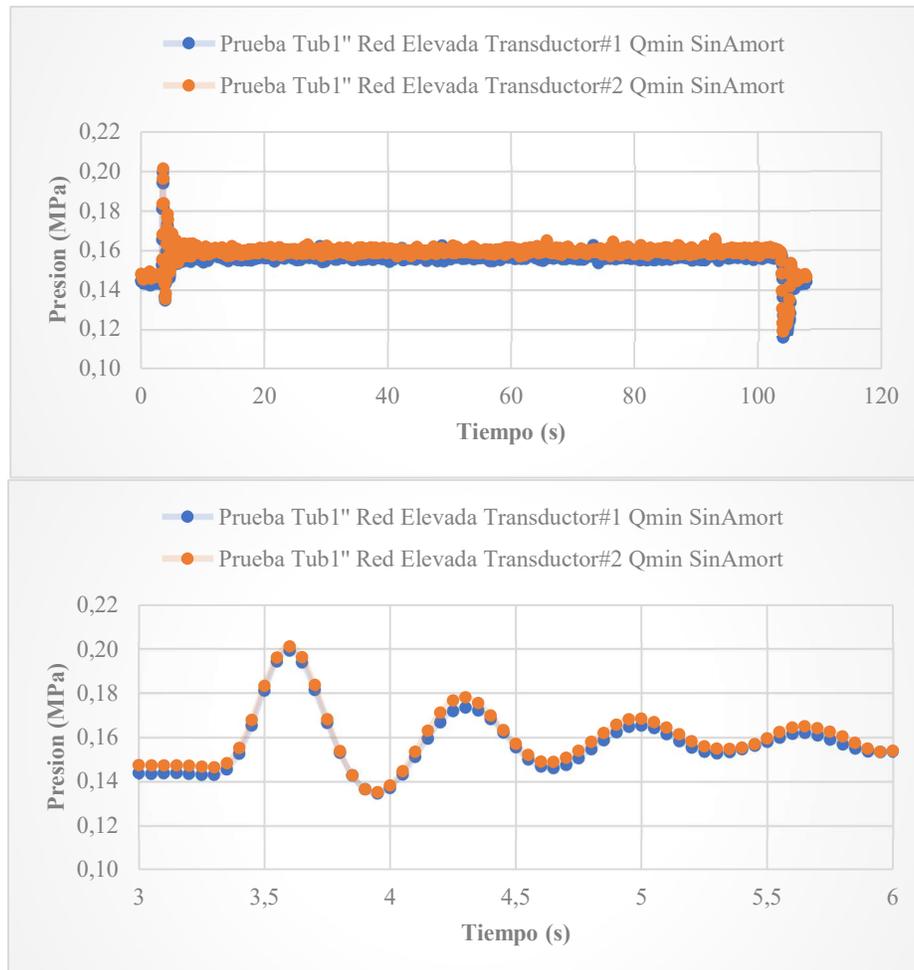


Figura 65: Golpe de Ariete a 0,15 Mpa en Modelo tubería 1" – Sin Amortiguador–

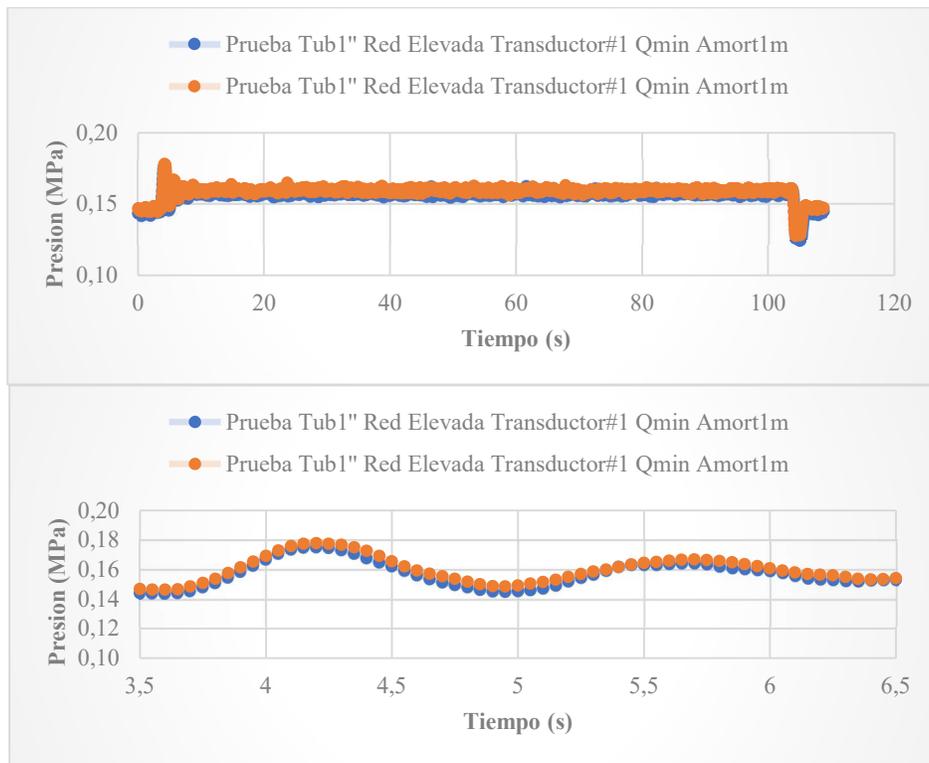


Figura 66: Golpe de Ariete a 0,15 Mpa en Modelo tubería 1" – Amortiguador Tub 1m Long –

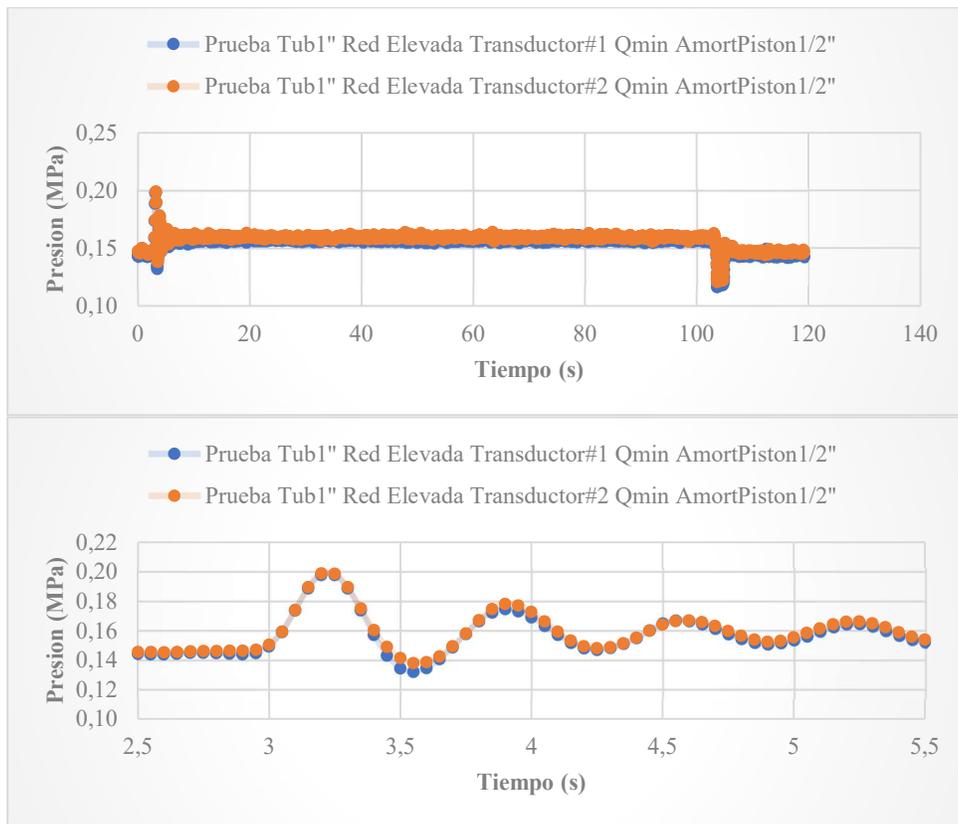


Figura 67: Golpe de Ariete a 0,15 Mpa en Modelo tubería 1" – Amortiguador Pistón 1/2" –

Resultados Pruebas Modelo – Tubería 1” Red Elevada 1 Ducha –

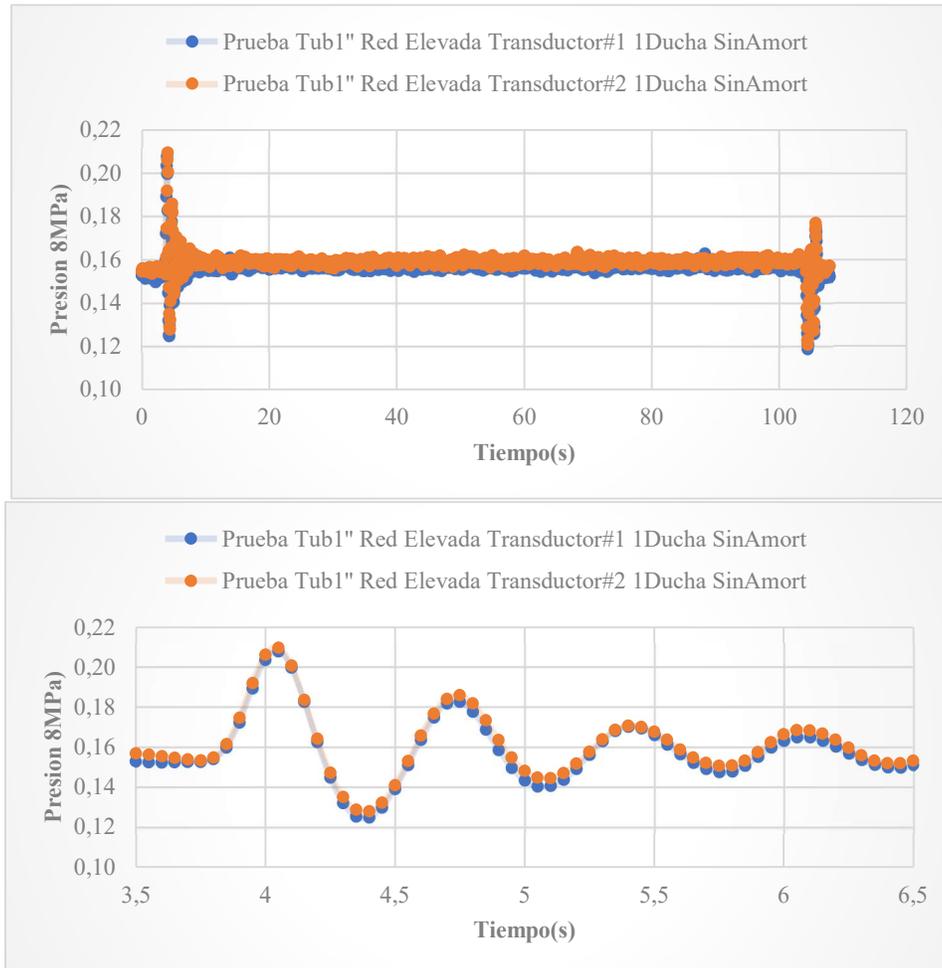


Figura 68: Golpe de Ariete a 0,16 Mpa en Modelo tubería 1" – Sin Amortiguador –

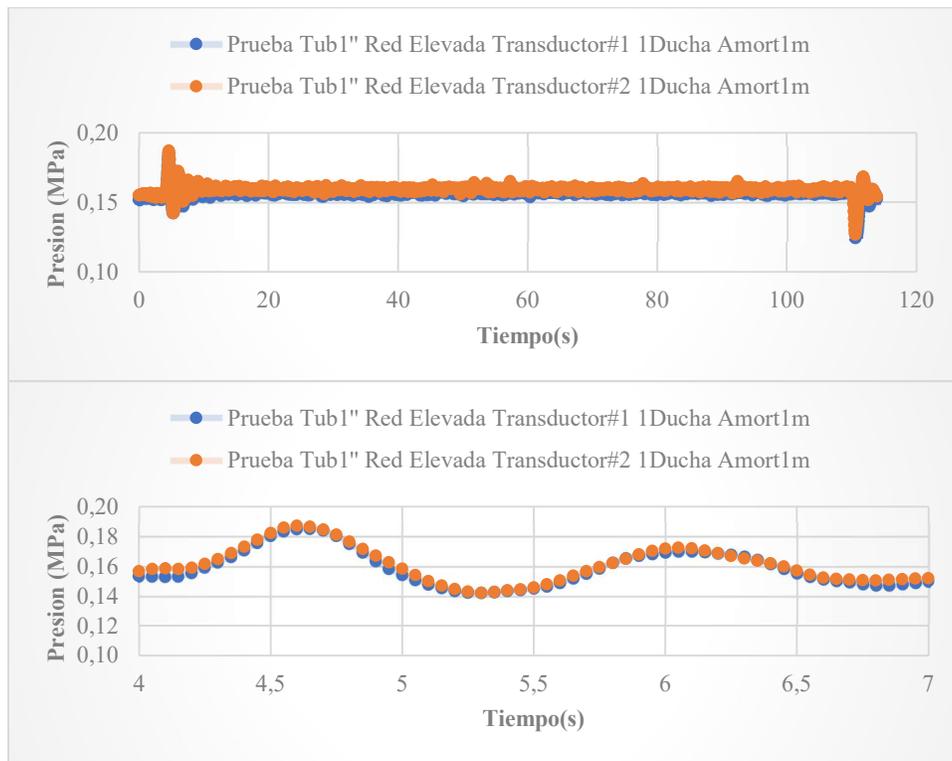


Figura 69: Golpe de Ariete a 0,16 Mpa en Modelo tubería 1" – Amortiguador Tub 1m Long –

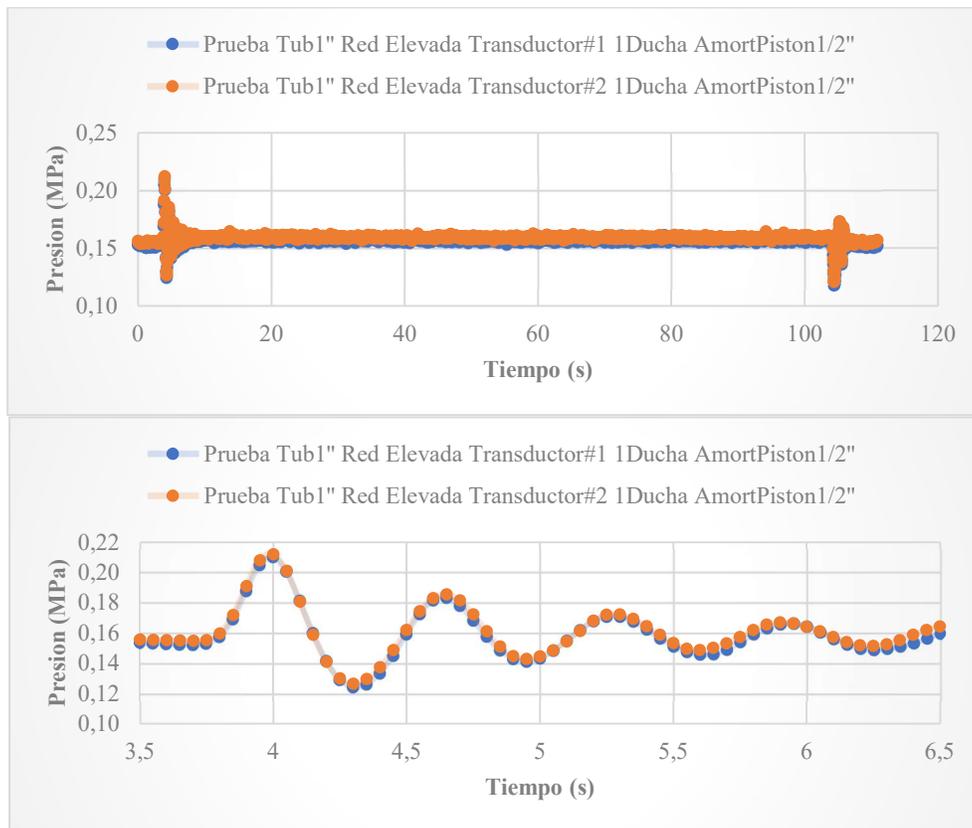


Figura 70: Golpe de Ariete a 0,16 Mpa en Modelo tubería 1" – Amortiguador Pistón 1/2" –

Resultados Pruebas Modelo – Tubería 1” Red Elevada 2 Duchas –

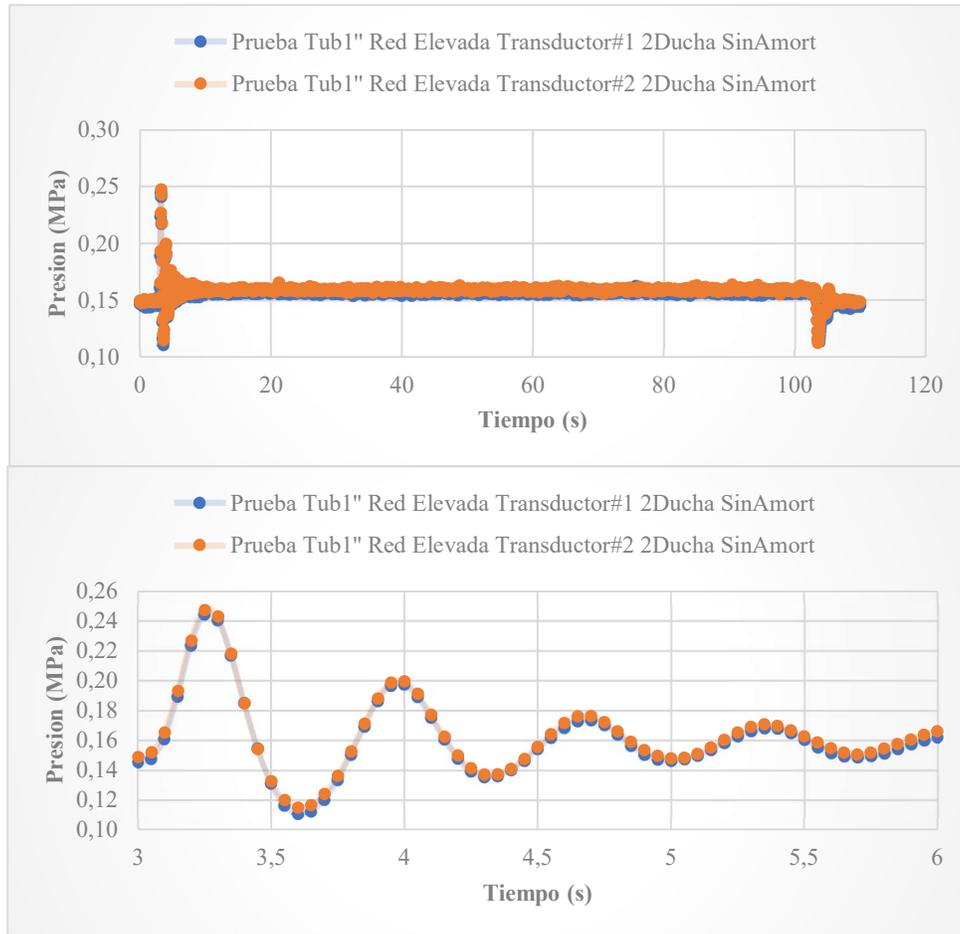


Figura 71: Golpe de Ariete a 0,15 Mpa en Modelo tubería 1” – Sin Amortiguador–

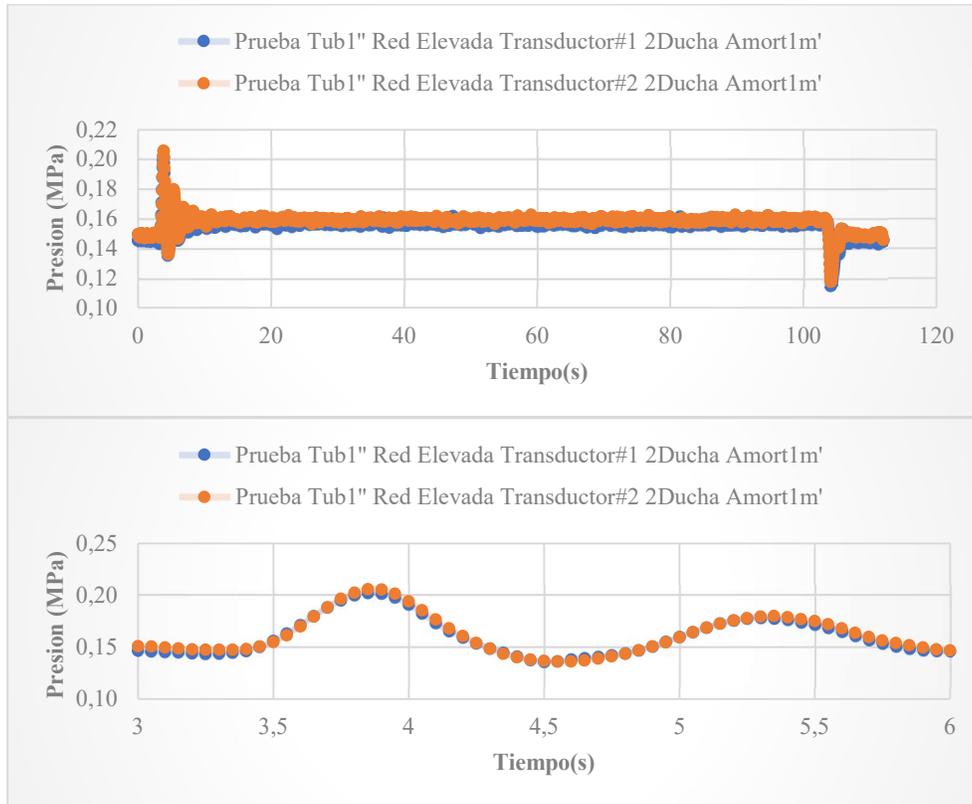


Figura 72: Golpe de Ariete a 0,15 Mpa en Modelo tubería 1" – Amortiguador Tub 1m Long –

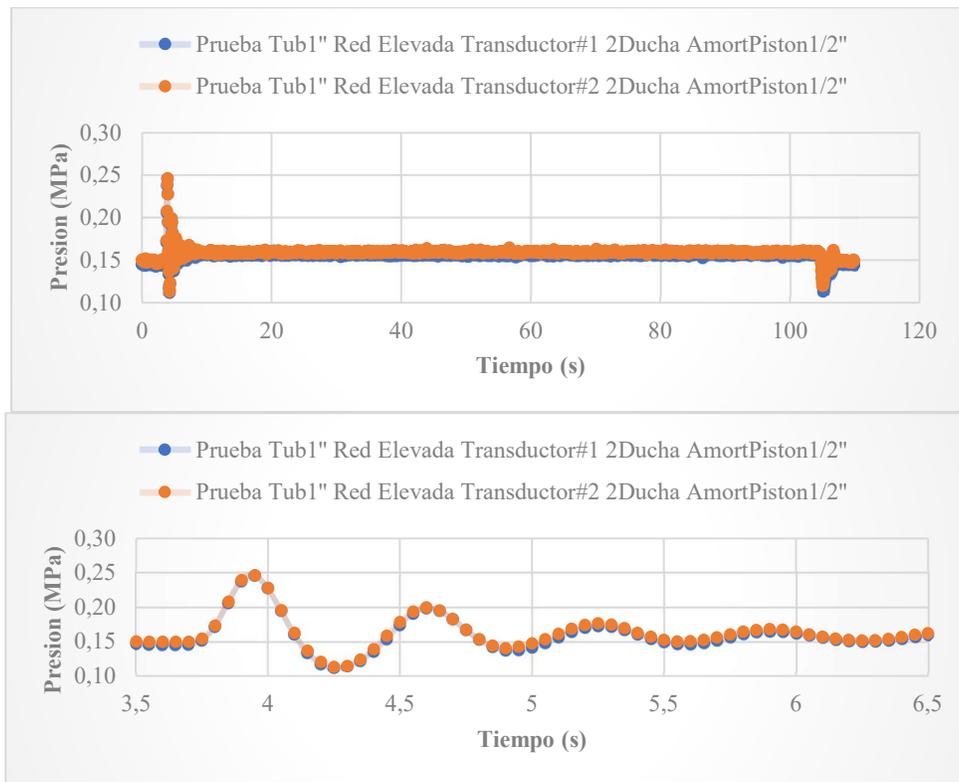


Figura 73: Golpe de Ariete a 0,15 Mpa en Modelo tubería 1" – Amortiguador Pistón 1/2" –

Resultados Pruebas Modelo – Tubería 1” Red Elevada 3 Duchas –

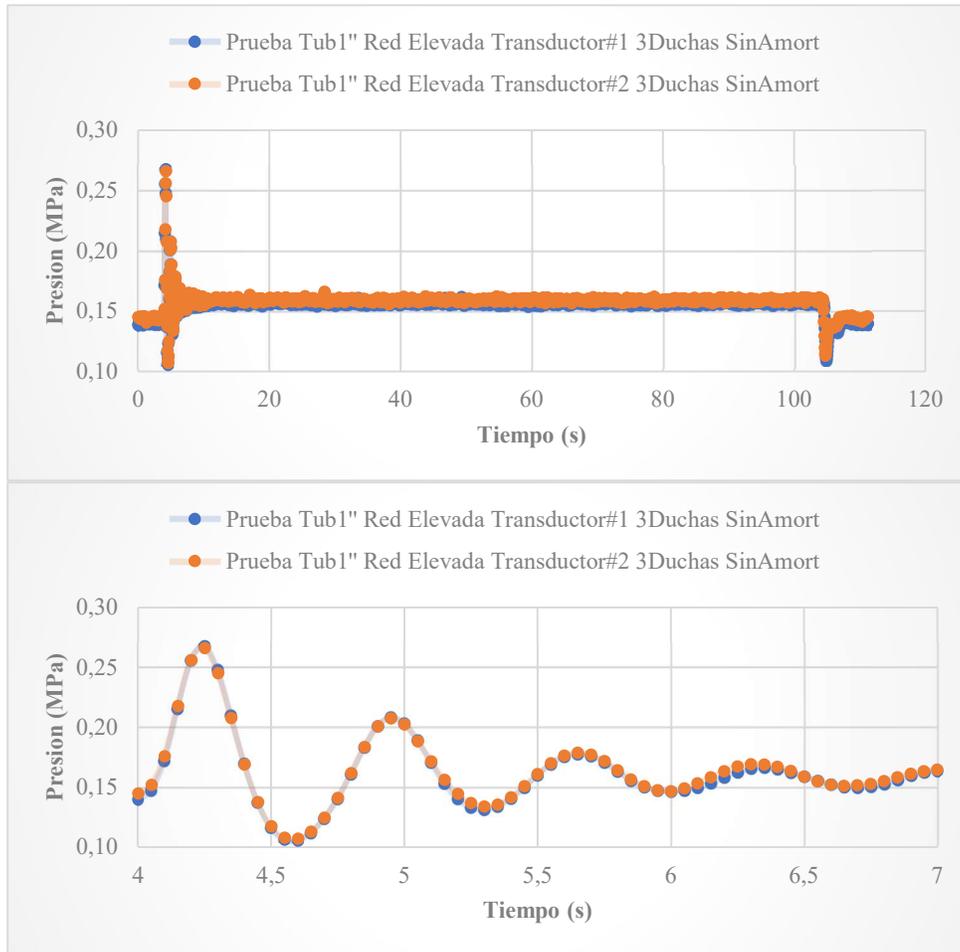


Figura 74: Golpe de Ariete a 0,15 Mpa en Modelo tubería 1" – Sin Amortiguador–

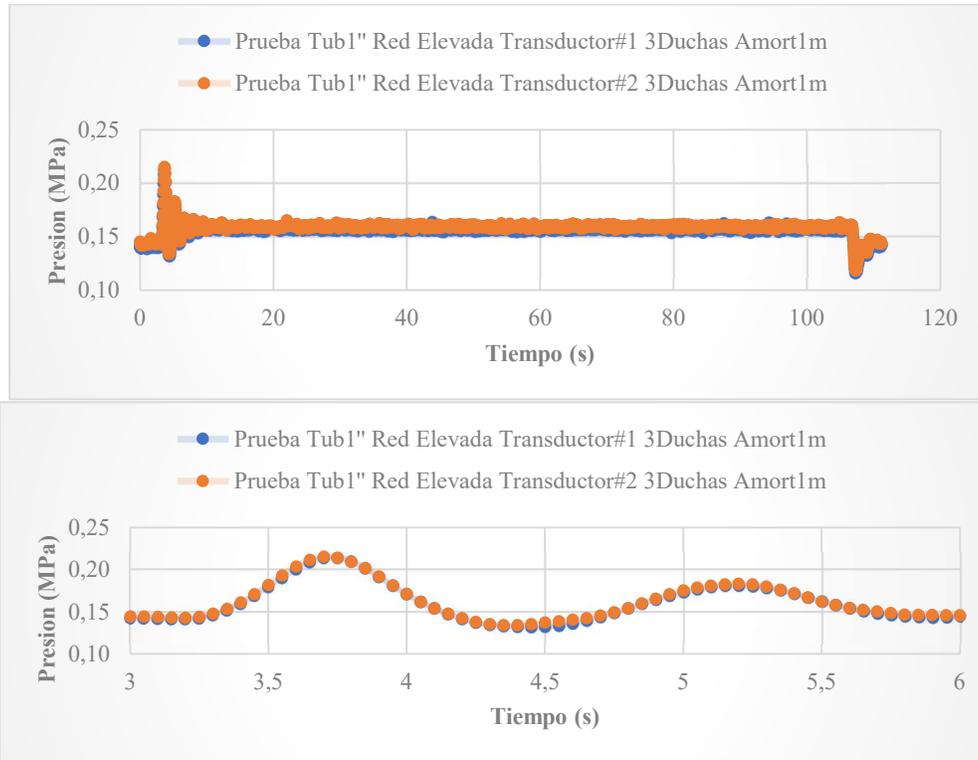


Figura 75: Golpe de Ariete a 0,14 Mpa en Modelo tubería 1" – Amortiguador Tub 1m Long –

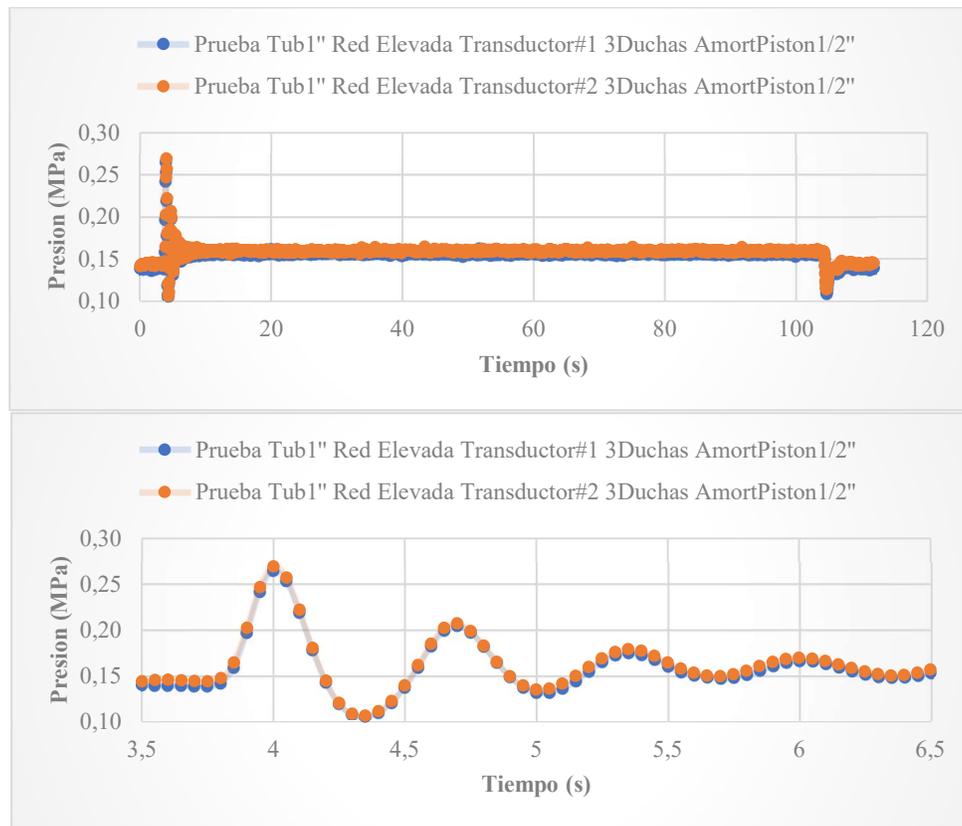


Figura 76: Golpe de Ariete a 0,15 Mpa en Modelo tubería 1" – Amortiguador Pistón 1/2" –

Tabla 11: Presiones Máximas Registradas - Modelo Tubería 1" Red Elevada -

Evaluaciones Tubería 1" - Modelo Red Elevada -				
Amortiguadores	Caudal (l/s)	# Duchas	Presión Inicial (Mpa)	Presión Máxima (Mpa)
Sin Amortiguador	0,34	1	0,15	0,2
Tubería 1" - 1m long - Pistón 1/2"			0,15	0,18
			0,15	0,2
Sin Amortiguador	0,388	1	0,15	0,21
Tubería 1" - 1m long - Pistón 1/2"			0,15	0,18
			0,15	0,21
Sin Amortiguador	0,62	2	0,15	0,25
Tubería 1" - 1m long - Pistón 1/2"			0,15	0,21
			0,15	0,25
Sin Amortiguador	0,77	3	0,14	0,27

Tubería 1" - 1m long -		0,14	0,22
Pistón 1/2"		0,14	0,27

Resultados Pruebas Modelo – Tubería 1” Red Acueducto 1 Ducha Caudal Mínimo –

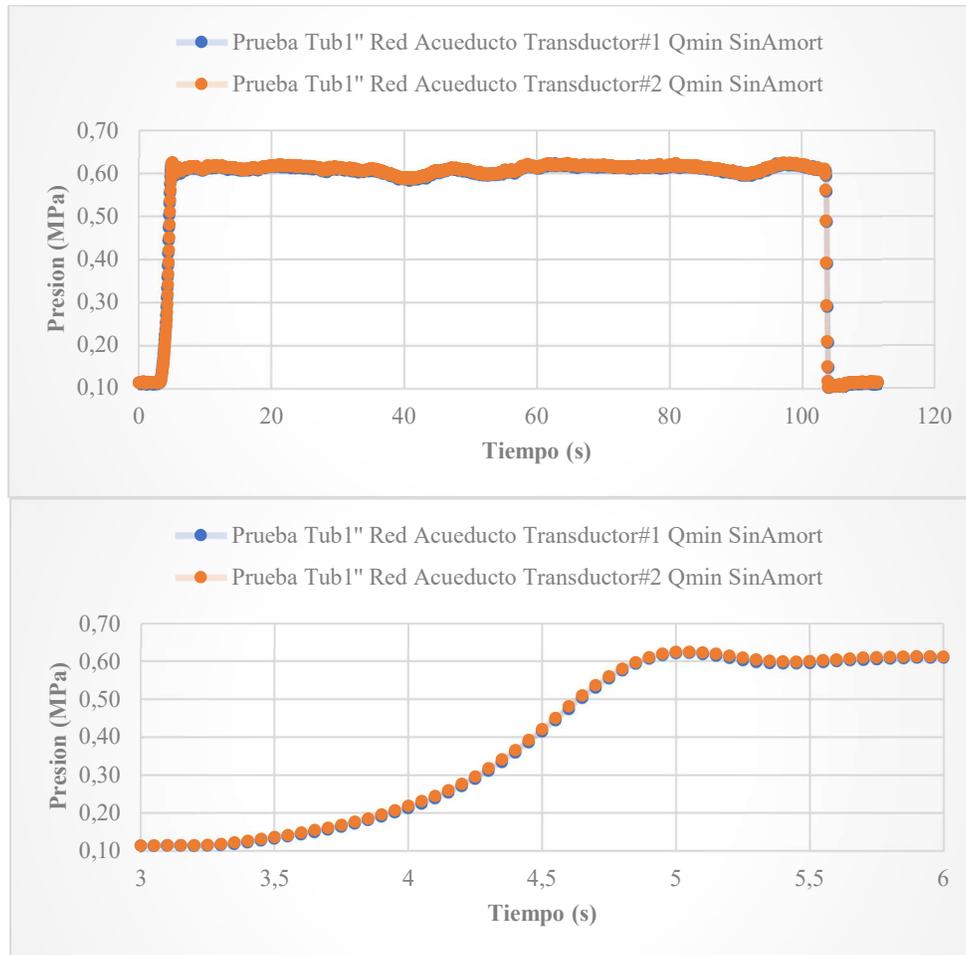


Figura 77: Golpe de Ariete a 0,11 Mpa en Modelo tubería 1" – Sin Amortiguador –

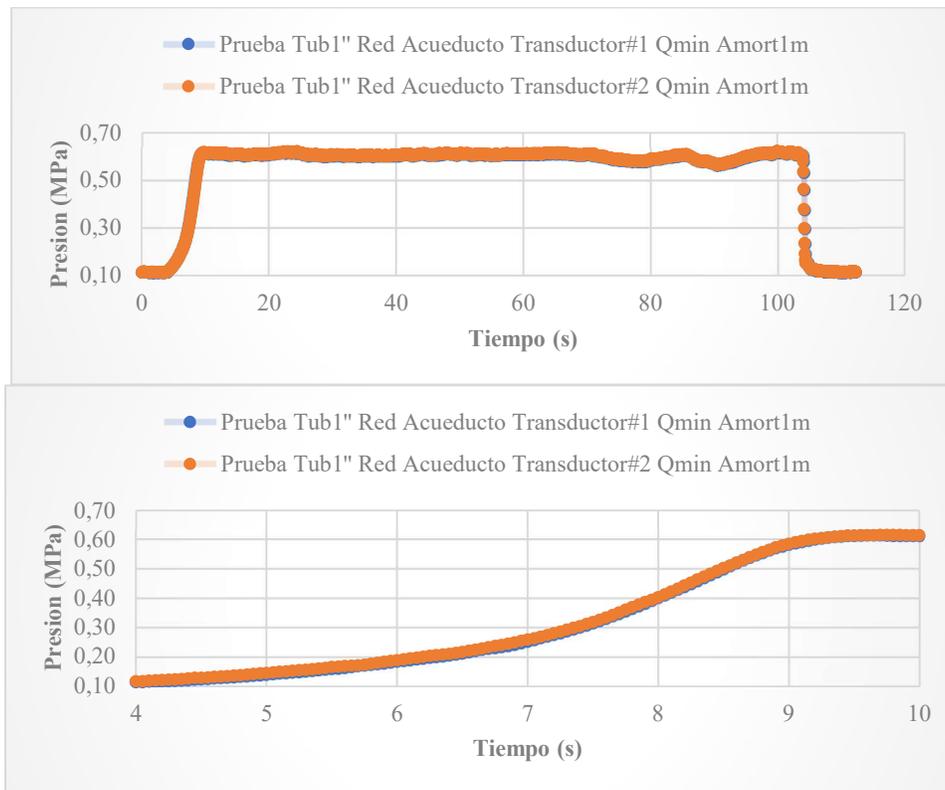


Figura 78: Golpe de Ariete a 0,11 Mpa en Modelo tubería 1" – Amortiguador Tub 1m Long –

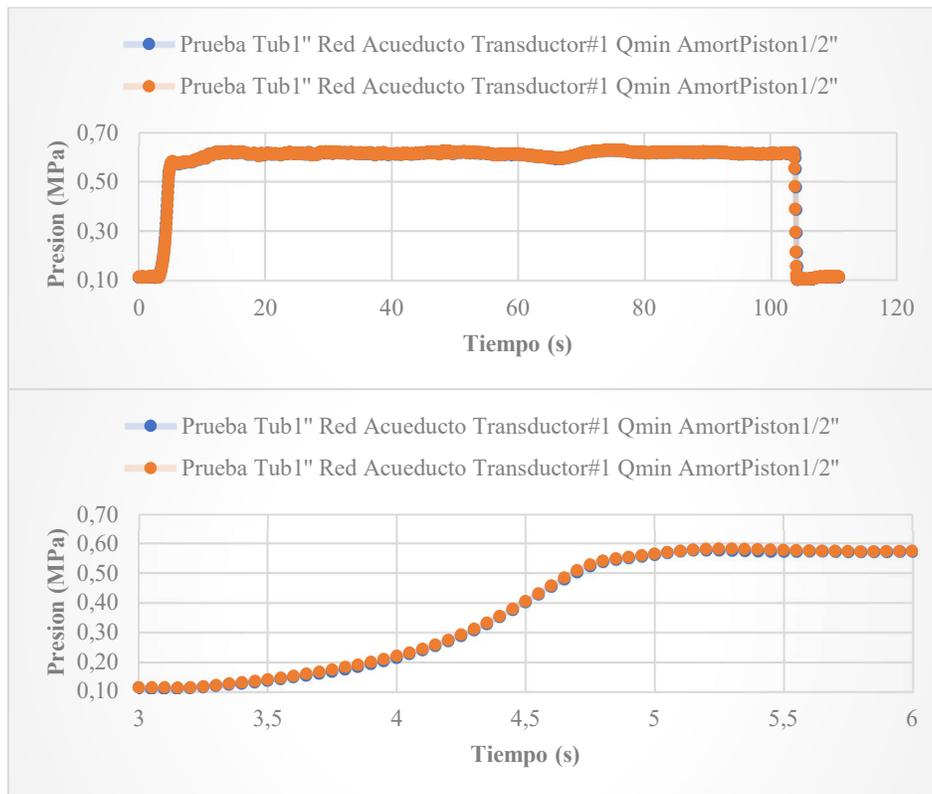


Figura 79: Golpe de Ariete a 0,11 Mpa en Modelo tubería 1" – Amortiguador Pistón 1/2" –

Resultados Pruebas Modelo – Tubería 1” Red Acueducto 1 Ducha –

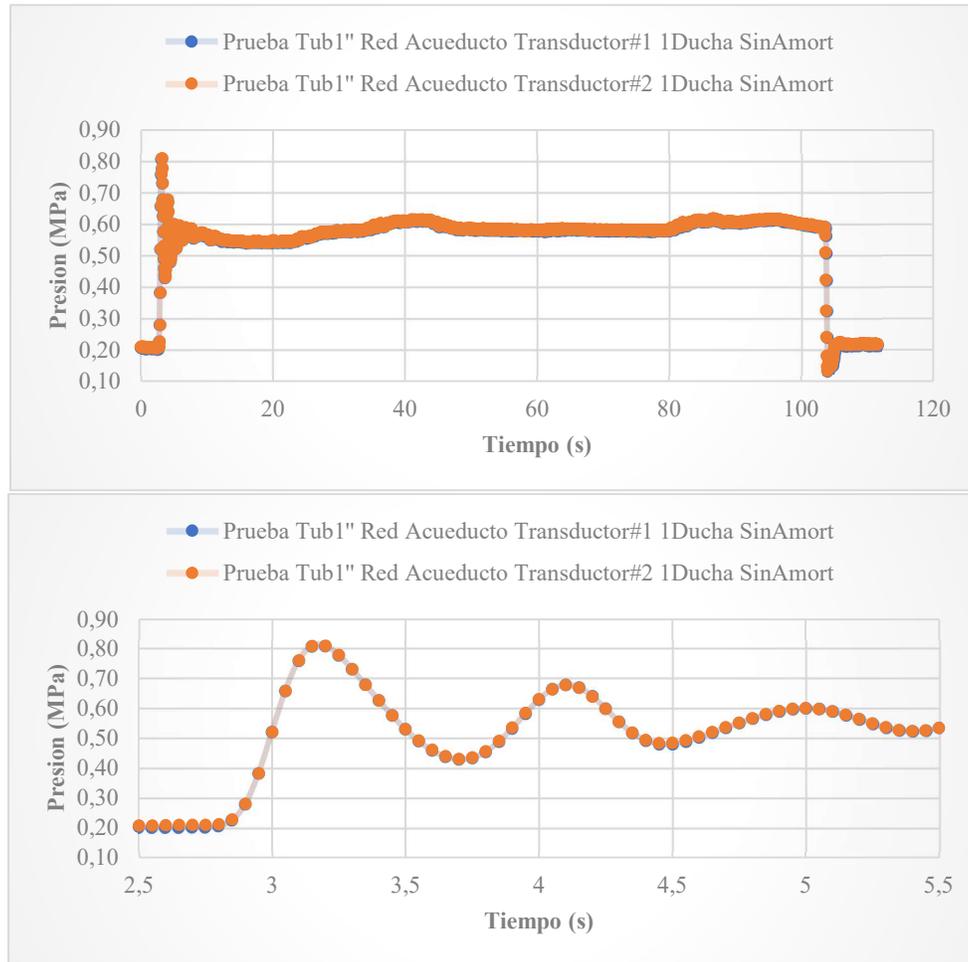


Figura 80: Golpe de Ariete a 0,21 Mpa en Modelo tubería 1" – Sin Amortiguador –

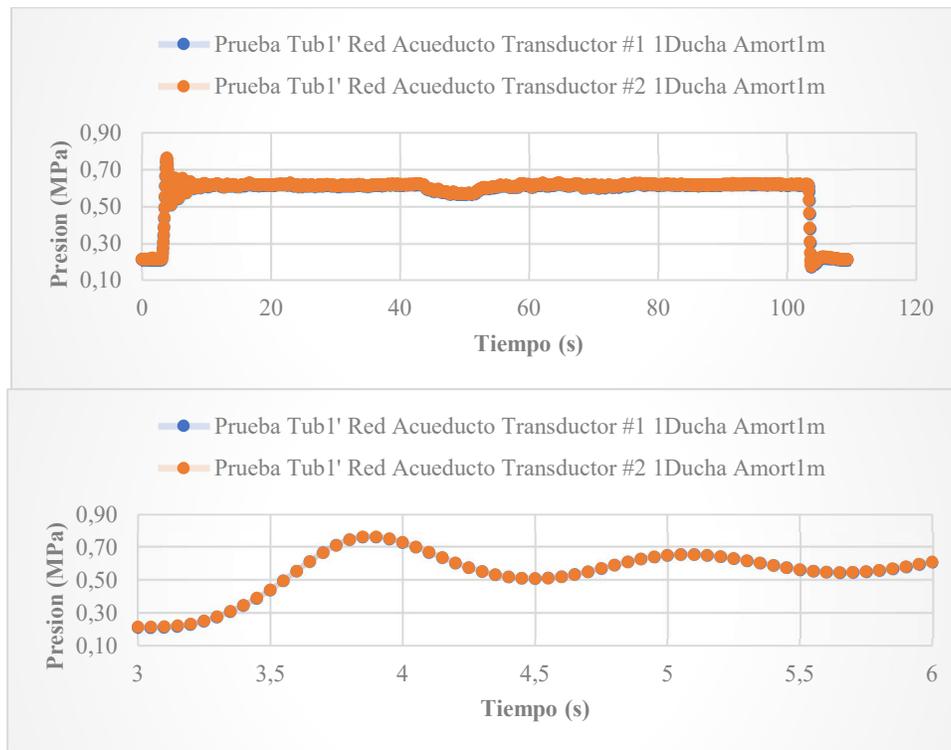


Figura 81: Golpe de Ariete a 0,21 Mpa en Modelo tubería 1" – Amortiguador Tub 1m Long –

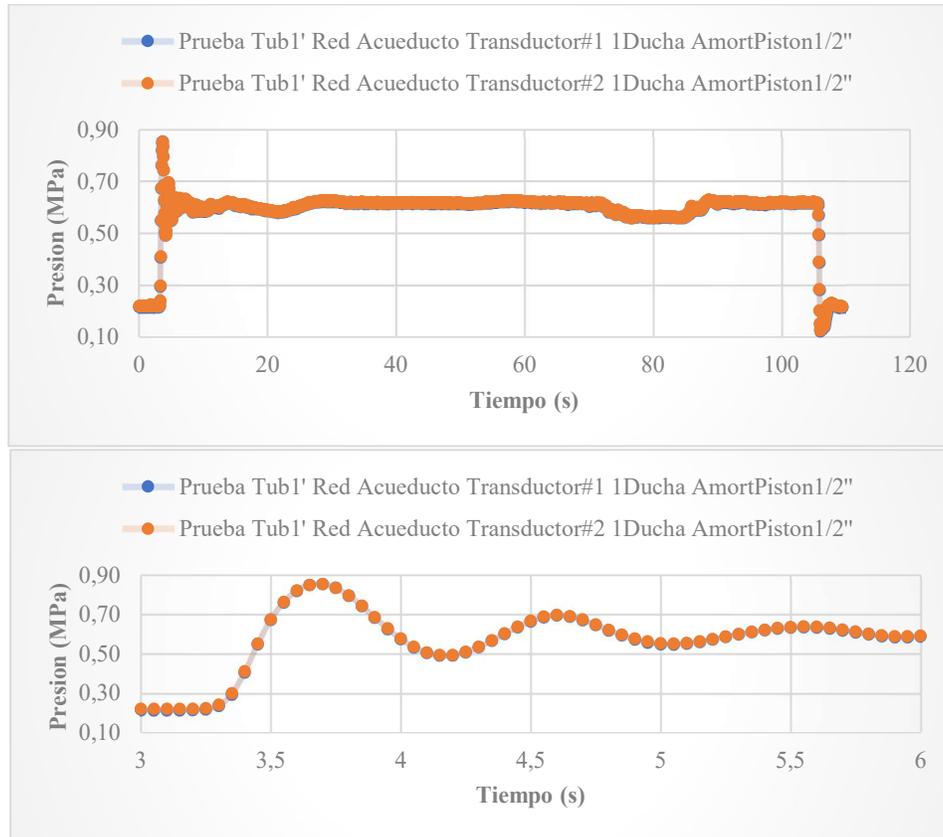


Figura 82: Golpe de Ariete a 0,21 Mpa en Modelo tubería 1" – Amortiguador Pistón 1/2" –

Resultados Pruebas Modelo – Tubería 1” Red Acueducto 2 Duchas –

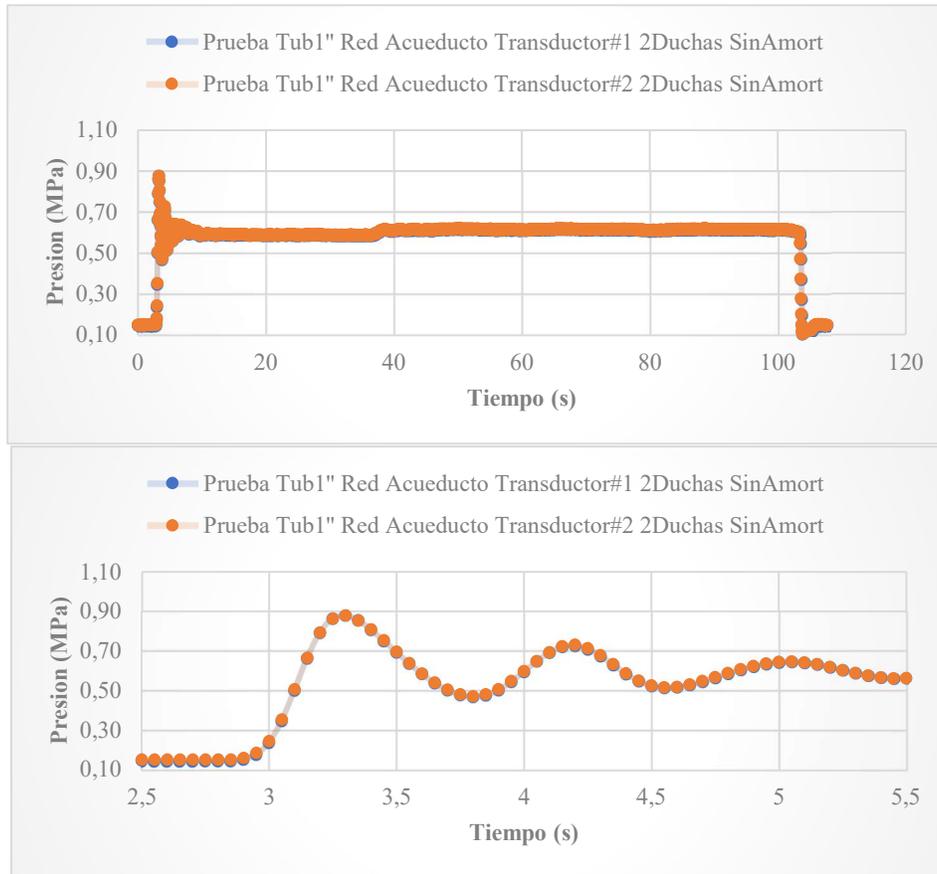


Figura 83: Golpe de Ariete a 0,15 Mpa en Modelo tubería 1" – Sin Amortiguador –

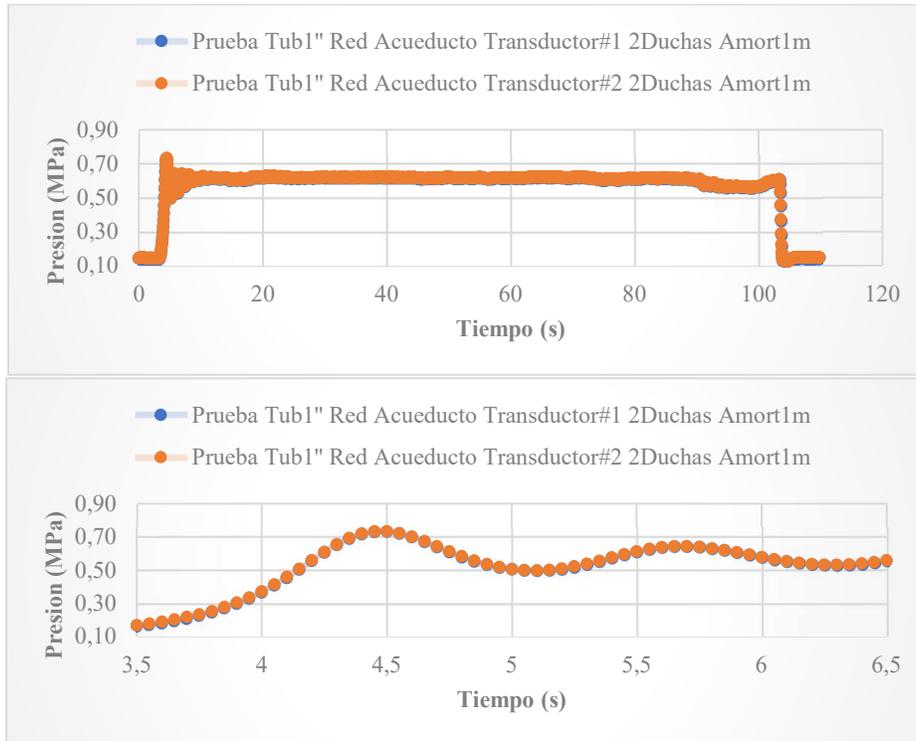


Figura 84: Golpe de Ariete a 0,15 Mpa en Modelo tubería 1" – Amortiguador Tub 1m Long –

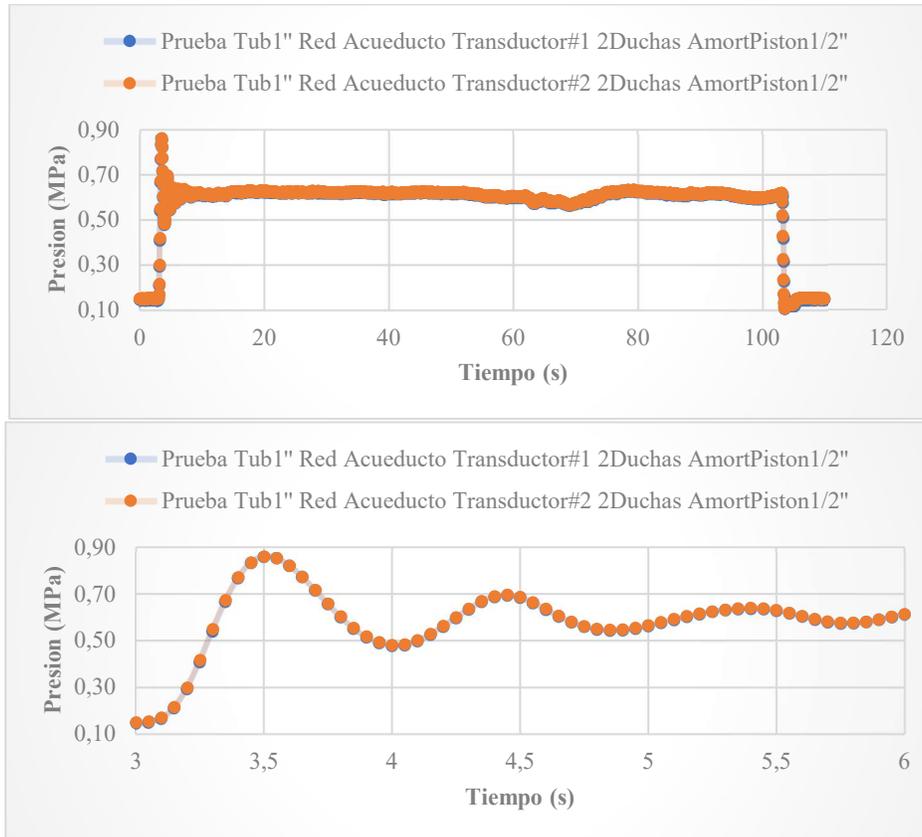


Figura 85: Golpe de Ariete a 0,15 Mpa en Modelo tubería 1" – Amortiguador Pistón 1/2" –

Resultados Pruebas Modelo – Tubería 1” Red Acueducto 3 Duchas –

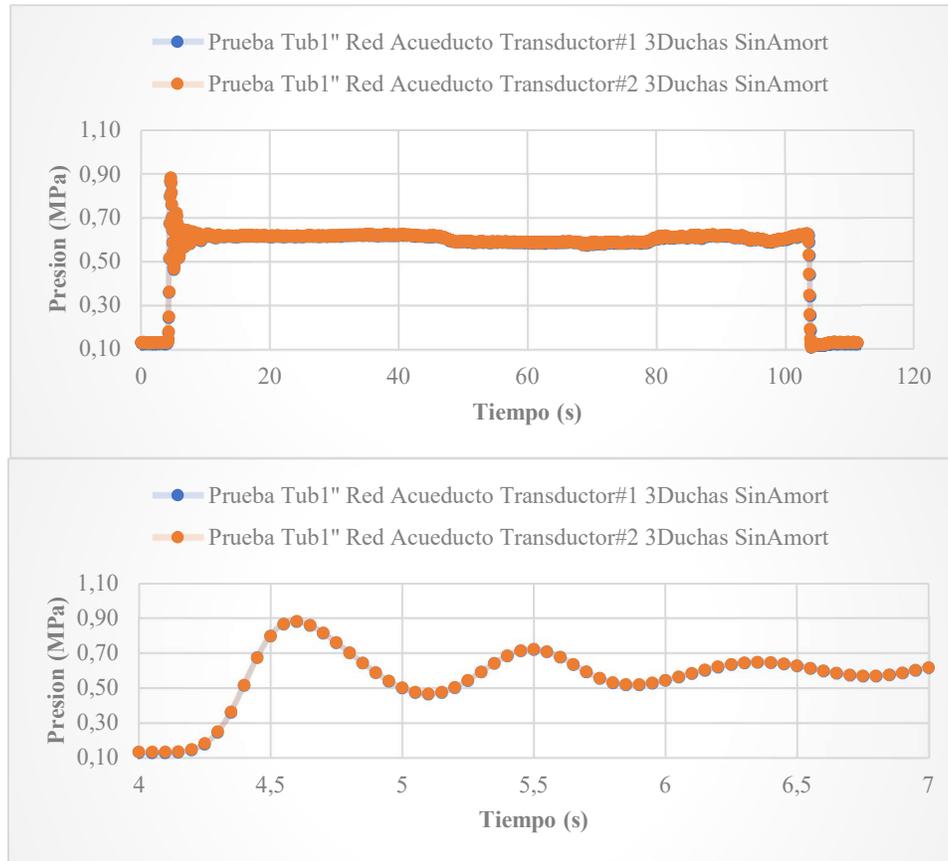


Figura 86: Golpe de Ariete a 0,13 Mpa en Modelo tubería 1" – Sin Amortiguador –

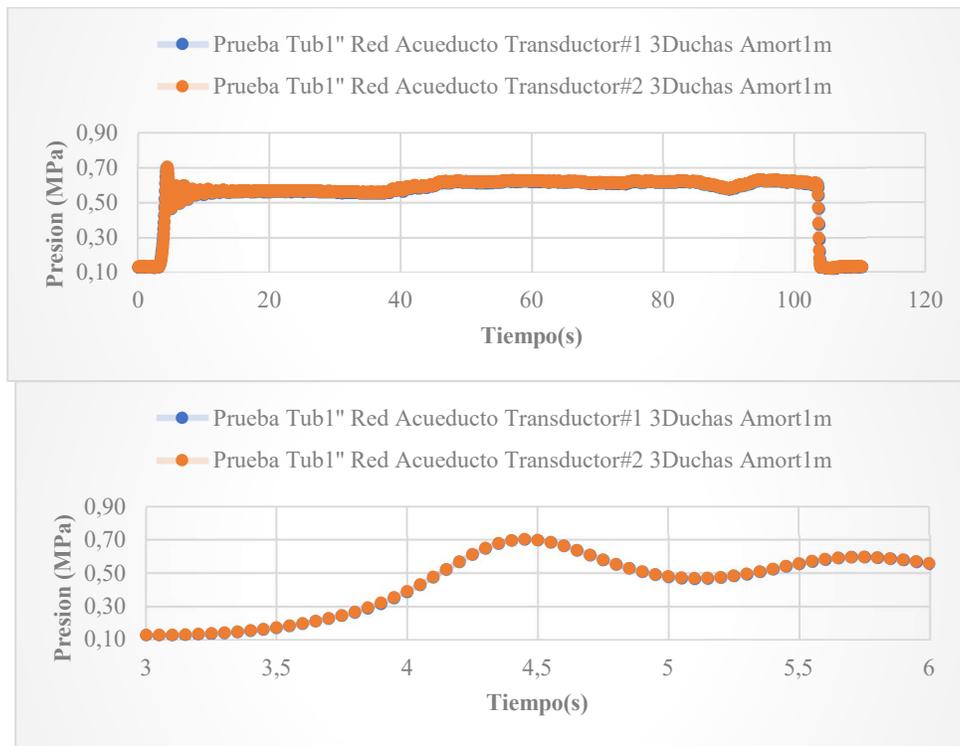


Figura 87: Golpe de Ariete a 0,13 Mpa en Modelo tubería 1" – Amortiguador Tub 1m Long –

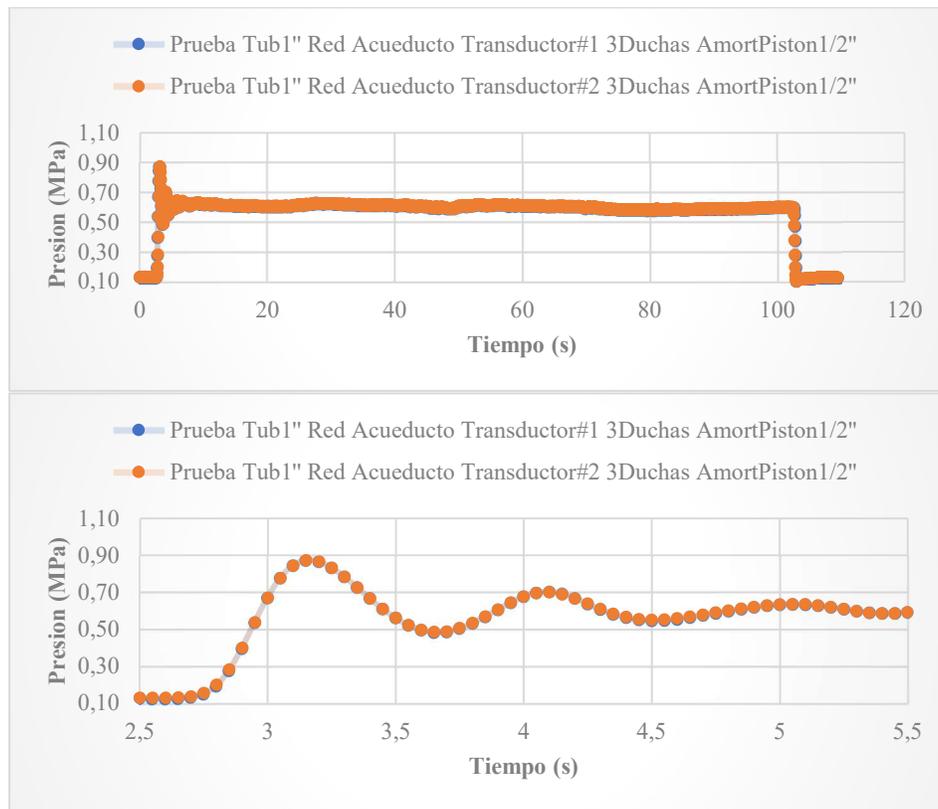


Figura 88: Golpe de Ariete a 0,13 Mpa en Modelo tubería 1" – Amortiguador Pistón 1/2" –

Tabla 12: Presiones Máximas Registradas - Modelo Tubería 1" Red Acueducto -

Evaluaciones Tubería 1" - Modelo Red Acueducto -				
Amortiguadores	Caudal (l/s)	# Duchas	Presión Inicial (Mpa)	Presión Máxima (Mpa)
Sin Amortiguador	0,15	1	0,11	0,62
Tubería 1" - 1m long - Pistón 1/2"			0,11	0,62
			0,11	0,62
Sin Amortiguador	0,53	1	0,21	0,8
Tubería 1" - 1m long - Pistón 1/2"			0,21	0,73
			0,21	0,8
Sin Amortiguador	0,6	2	0,14	0,9
Tubería 1" - 1m long - Pistón 1/2"			0,14	0,7
			0,14	0,90
Sin Amortiguador	0,6	3	0,13	0,9
Tubería 1" - 1m long - Pistón 1/2"			0,13	0,7

Pistón 1/2"			0,13	0,90
-------------	--	--	------	------

Análisis de Resultados:

Análisis Pruebas Modelo - María Fernanda Fonseca –

- Como se puede evidenciar en las gráficas adjuntas para este modelo, de manera general ante la ejecución del golpe de ariete y cierre abrupto del sistema, se registra un pico de presión sostenida proporcional a la presión inicial en la que se realizan las pruebas de los amortiguadores. De esta manera, sin importar el tipo de aparato disipador de golpe, los máximos para determinada presión evaluada no están subordinados a algún accesorio del sistema más allá de las bombas lo alimentan.
- De igual forma, no hay discriminación en los picos de presión registrada ante el golpe de ariete según el tipo de amortiguador utilizado. En los registros presentados para este modelo, los máximos de presión son los mismos para todos los amortiguadores por lo que, o todos logran disminuir en el mismo grado la sobrepresión producida, o ninguno cumple su función.
- Por otro lado, de manera general para este modelo no se obtiene una diferencia de presión entre los registros de los lectores de presión aguas abajo del amortiguador y aguas arriba de este. En otras palabras, pese a la incorporación de distintos amortiguadores, la presión máxima es homogénea en todo el sistema y por ende, al menos para este modelo, no hay una razón por la cual se piense en la necesidad de agregar a un sistema de distribución los accesorios evaluados.
- Cabe mencionar que, los resultados presentados de presiones máximas registradas pueden estar enmarcados y regulados por la presión parametrizada que maneja la bomba que alimenta al modelo de María Fernanda. Es por esto que, se realizó una variación en el sistema de distribución de manera que, la bomba de este modelo no suministre la presión para la red de los otros presentados en el documento.

Análisis Pruebas Modelo – Tubería ½” Red Elevada –

- Como se puede evidenciar en las gráficas referentes a lo enunciado, el comportamiento de la celeridad, pico y variación de presiones en la red conforme se ejecuta el golpe de ariete no es sostenido. En otras palabras, el cambio de sistema de presión realizado al modelo nos permite ver gráficamente el comportamiento de sobrepresión que ocurre ante el cierre abrupto de la válvula sin ningún tipo de distorsión en la lectura de datos producto de las bombas de provisión.
- Con relación a la efectividad de los amortiguadores evaluados, se denota que el accesorio compuesto por la tubería de una pulgada de un metro de longitud es el que presenta el menor pico de presión en los casos en los que este se evaluó. Para el caudal mínimo y el caudal que proporciona el sistema para una ducha, este fue el amortiguador que logro apaciguar el golpe de ariete en una mayor magnitud.

- Referente a la eficiencia del amortiguador tipo pistón, el cual es el comúnmente comercializado, no hay una diferenciación marcada de las evaluaciones hechas con este en relación con los casos en los que no se implementó ningún tipo de disipador de presión u otro amortiguador evaluado diferente a la tubería de un metro de longitud.
- Por otro lado, para esta evaluación se destaca que el hecho de que la magnitud del pico de presión producto del cierre del sistema presenta cierta proporcionalidad a la magnitud del caudal en operación. De esta forma, entre mayor sea el número de duchas o de aparatos sanitarios en el sistema, ante un cierre abrupto de este se puede esperar que la sobrepresión en la red sea mayor.
- Al analizar la presión inicial de operación en la red y la sobrepresión producida por el golpe de ariete. En este caso de evaluación, en el modelo no hay una dependencia entre estas, pues bien, pese a que en varias pruebas (independiente del número de duchas) se evalúa la misma presión inicial, los picos de presión posteriores presentan una magnitud distinta de manera que, no se permite pensar en la existencia de alguna correlación entre estas.

Análisis Pruebas Modelo – Tubería ½” Red Acueducto –

- Con relación al acoplamiento de la red de acueducto de la universidad en el modelo de duchas evaluado, de manera general se evidencia que pese a que las gráficas muestran una disminución de la presión en el sistema después de haber alcanzado la presión máxima producto del golpe, dicha reducción no es la suficiente para alcanzar el nivel inicial. Como se puede constatar en las gráficas referentes a este enunciado, después de un tiempo de haber ejecutado el cierre abrupto de la red, la presión se estabiliza en una magnitud mayor a la que presentaba inicialmente la red abierta. Es por esto que, se piensa que las bombas y presiones manejadas por la red de distribución de la universidad presentan relevancia a la hora de caracterizar el comportamiento de la onda de celeridad en el modelo.
- Por otro lado, el amortiguador descrito por la tubería de un metro de longitud es el que presenta los menores picos de presión al comparar sus registros con los demás accesorios de disipación de golpe de ariete.
- De igual forma y de acuerdo con los resultados, los amortiguadores de pistón, que son los comercialmente más utilizados; para el caso evaluado de una ducha presentan un pico de presión mayor al de la tubería de un metro de longitud y, no presentan variación alguna en la presión registrada con relación a los registros de la prueba en la que no se utilizó ningún tipo de accesorio disipador. En otras palabras, la efectividad y funcionalidad de estos aparatos, al menos para esta evaluación, no se ve registrada por las gráficas y por ende, no se puede pensar que el pistón ejerza una reducción en la presión que pueda llegar a sentir el sistema dado su cierre abrupto.

Análisis Pruebas Modelo – Tubería ½” Red Combinada –

- De acuerdo con los resultados descritos por las gráficas, la existencia de una proporcionalidad entre el caudal demandado por el sistema y la magnitud del golpe de ariete está presente para este modelo. La evaluación registra que, entre mayor es el número de duchas en operación, al cerrar abruptamente el sistema, mayor será la sobrepresión producida sin dar relevancia a la presión inicial que se esté manejando en la red.
- Por otro lado, para este caso la estabilización de la presión después de la ejecución del golpe tiene lugar a la misma magnitud de la presión inicial en la que opera el sistema. Es por esto que, se puede decir que el comportamiento de la onda de celeridad para estas pruebas no está influenciado por la presión parametrizada de las bombas que alimentan a esta red.
- De igual forma, el amortiguador que menor pico de presión registro para los casos de estudio evaluados fue el descrito por la tubería de un metro de longitud. Este logro disminuir el golpe de ariete en una magnitud de 0,3 megapascuales menos con referencia a los registros del pistón de media pulgada y a las pruebas en las que no se implanto ningún accesorio disipador.
- Además de lo anterior, cabe resaltar que para estas pruebas las presiones registradas en el caso de estudio del pistón de media pulgada y en el caso en el que no hay accesorio de amortiguamiento alguno; el comportamiento de la onda de presiones es el mismo. El pico se alcanza bajo el mismo periodo de tiempo y con la misma magnitud de registro. Es por esto que, se piensa que también en esta prueba el amortiguador mayormente comercializado no ejecuta ninguna función en la red de pruebas.

Análisis Pruebas Modelo – Tubería 1” Red Elevada –

- Para este conjunto de casos evaluados, según lo evidenciado en las gráficas, la caracterización del sistema de distribución permite una estabilización de la presión (posterior a la ejecución del golpe) en la misma magnitud de la presión inicial. Esto quiere decir que, las bombas que alimentan al presente sistema no causan alteración alguna en las presiones registradas por el cierre de este.
- Al igual que en las evaluaciones anteriormente mostradas, en el presente modelo la magnitud del pico de presión producido por el golpe de ariete está estrechamente relacionada con la magnitud del caudal demandado para la operación del sistema. De igual manera, la presión inicial de operación de la red no presenta relación alguna con la sobrepresión producida por el cierre donde, como se evidencia en la correspondiente tabla de resultados, la mayor sobrepresión se alcanza con una presión inicial de 0,14 megapascuales la cual, no es la magnitud mayor que se trabaje para este conjunto de pruebas.

- De igual forma, el amortiguador que logra los menores picos de presión es el descrito por la tubería de un metro de longitud. Este, de acuerdo con las gráficas, es el que alcanza una menor sobrepresión en un periodo de tiempo mayor en comparación a los demás accesorios evaluados. Lo anterior se evidencia en que, de acuerdo con el caudal trabajado, este es capaz de disminuir la presión entre 0,2 y 0,4 magapascales en comparación con los otros disipadores evaluados.
- Referente al amortiguador de pistón, los resultados de esta evaluación y el comportamiento gráfico de la onda de presión en la red no difieren en mayor medida si se les compara con las pruebas efectuadas sin algún tipo de accesorio de amortiguación. En otras palabras, al igual que en las evaluaciones previas, la funcionalidad de este tipo de aparatos no se ve reflejada en las pruebas realizadas debido a que, el comportamiento de la onda de celeridad es el mismo con este accesorio que sin este.

Análisis Pruebas Modelo – Tubería 1” Red Acueducto –

- Al igual que en el modelo compuesto por la tubería de ½”, la presión (después de haber ejecutado el golpe) se estabiliza en una magnitud mayor a la inicial. De esta forma, queda constatado que al menos en los casos donde se utiliza la red del acueducto, el registro de presiones del sistema cerrado está influenciado por las bombas reguladoras de presión que alimentan a la presente red.
- Un hecho particular tiene que ver con los altos picos de presión registrados en este conjunto de pruebas. Si bien en los anteriores modelos se alcanzaban máximos de 0,25 megapascales, en este en particular se lograron de 0,6 a 0,9 megapascales de acuerdo con el caudal evaluado. Esto permite constatar la gran influencia sobre la sobrepresión que tienen las bombas que alimentan a un sistema de distribución, pues bien, de acuerdo con estas es que la magnitud de los máximos de sobrepresión y la estabilización del sistema, ante un cierre abrupto, puede llegar a ser menor o mayor.
- De la misma forma que en evaluaciones previas, este modelo soporta aún más el hecho de que el factor determinante a la hora de incrementar la sobrepresión producto del golpe de ariete, es el caudal demandado de la red. Siempre que se incrementa este, la magnitud del pico de presión aumenta en algún grado.
- Por otro lado, para el caudal mínimo evaluado (0,15 l/s) todos los registros representan la misma sobrepresión independientemente del amortiguador ensayado. Lo anterior remarca el hecho de que, ante un caudal menor de trabajo, la capacidad del amortiguador descrito por la tubería de un metro de longitud se reduce; pues bien, a medida que se incrementa esta variable en las evaluaciones, la eficacia en la disipación del golpe para este accesorio aumenta en contraste con los otros puestos a prueba.
- La eficacia del amortiguador compuesto por un pistón de ½” otra vez no se ve reflejada en el resultado de las pruebas. El comportamiento de la celeridad y los máximos de presión alcanzados no difieren en mayor medida al contrastarlos con los

registros de presiones en las pruebas efectuadas sin algún tipo de accesorio disipador adjunto a la red.

Conclusiones:

- En primer lugar, la efectividad en la disipación de golpe de ariete de los amortiguadores de pistón queda en entredicho en la medida en que para este trabajo, ninguno de los evaluados logro disminuir la sobrepresión producto del golpe de ariete.
- Sumado a lo anterior, el accesorio que logra disminuir en algún grado el golpe de ariete en las presentes pruebas es uno que no es comúnmente utilizado debido a las complicaciones de instalación de una tubería de esta longitud en el hogar. Es por esto que según los resultados obtenidos, se puede decir que no hay eficiencia alguna en la disipación del golpe de ariete en las instalaciones sanitarias presentes.
- La variable que determina la proporcionalidad del golpe de ariete y por ende la presión máxima registrada en la red ante un cierre abrupto es el caudal demandado en el sistema de distribución. En todos los casos presentados en el documento fue este ítem el que tuvo alguna relación de proporcionalidad con la presión pico y, en consecuencia, da razones que determinan su relevancia en el diseño de la sobrepresión máxima que se quiera presentar en un sistema.
- De igual forma, la importancia de la caracterización de las bombas que alimentan al sistema de distribución es un ítem para tener en cuenta, pues bien, en casos puntuales como la red de acueducto, esta será la variable determinante de magnitud de la sobrepresión y estabilización de la misma. Lo ideal sería que, el diseño de las bombas permita un manejo de presiones no muy elevadas ante el cierre abrupto del sistema, pues bien, una gran magnitud con relación a caudales bajos de trabajo no genera más si no un riesgo y deterioro en la red.

Recomendaciones:

- Según el método de diseño e instalación de amortiguadores del P.D.I (ver figura 8 y 9), la carga del sistema de distribución con relación al amortiguador que se desea implementar es de suma importancia. Lo anterior hace referencia a que, una de las posibles causas a evaluar del por qué ninguno de los amortiguadores de pistón funciona puede llegar a ser la falta de caudal demandado o aparatos sanitarios cargados al sistema. Para futuras evaluaciones, vale la pena pensar en un incremento en el número de estos aparatos o, simular la demanda concerniente a una instalación sanitaria completa. De esta forma y según el diseño de los amortiguadores de pistón, el sistema presente las unidades sanitarias requeridas para que ante un cierre abrupto, el amortiguador pueda operar.
- Por otro lado, la precariedad de las pruebas efectuadas puede verse como un limitante a la hora de evaluar la eficacia de los amortiguadores comercialmente utilizados por

la industria. Lo anterior hace referencia a que, según las normas enunciadas en el presente documento, el diseño de los reductores de presión debe ser puesto a prueba en un modelo automatizado y en el cual se ejecutan alrededor de diez mil golpes de ariete. El nuestro fue uno accionado manualmente con limitantes de tiempo en ejecución, presiones y caudales disponibles. De esta manera, para futuras pruebas se puede evaluar la construcción de una red hidroneumática para la cual, la operación sea mucho más fácil y los golpes de ariete se realicen de manera programada.

- De igual forma, la disponibilidad de una gran variedad de caudales de diseño proporcionaría un amplio rango de evaluaciones de carga para los amortiguadores que se quieran probar. Debido a que en el presente ensayo se contaba con un máximo de tres duchas, se puede considerar que la carga del sistema no simulaba de manera real una instalación sanitaria completa y por ende, industrialmente la relevancia de las evaluaciones no entraría a aplicar para construcciones complejas e industriales.

Referencias

- American Society of Sanitary Engineering. (2004). *Performance Requirements for Water Hammer Arresters ASSE 1010M*. Westlake, Ohio: American Society of Sanitary Engineering.
- Fonseca, M. F. (2009). *Revisión Crítica de Métodos de Diseño de Abastecimiento de Agua Potable al Interior de Edificaciones*. Bogotá: Universidad de Los Andes.
- Icontec. (25 de 11 de 2020). Norma Técnica Colombiana NTC 1500. Bogotá, Colombia.
- Instrumatic Ltda,. (2021). *VEGA*. Obtenido de VEGABAR 14: <https://www.vega.com/es-us/productos/cat%C3%A1logo-de-productos/sensores-de-presi%C3%B3n/presi%C3%B3n-del-proceso/vegabar-14>
- PDI. (2017). *Water Hammer Arresters - Standard PDI-WH 201* -. North Andover: The Plumbing and Drainage Institute.
- WAVIN, P. (2020). *Manual Técnico Tubosistemas Presión PVC*. Bogotá, Colombia: Orbia.
- ZURN. (2021). *ZURN Industries LLC*. Obtenido de Water Hammer Arrestor 1260 XL: <https://www.zurn.com/products/building-drainage/hydrants/1260xl>