

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL ARIETE HIDRÁULICO EN FUNCIÓN DEL VOLUMEN DEL ACUMULADOR Y LA CONSTANTE ELÁSTICA DEL RESORTE

Diego Alejandro Penagos Vásquez

Tecnología en sistemas electromecánicos

Sebastián Vélez García

INSTITUTO TECNOLÓGICO METROPOLITANO

19 de octubre del 2018

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

RESUMEN

El ariete hidráulico es un dispositivo que permite elevar agua a un sitio de mayor altura sin necesidad de utilizar energía externa, donde este aprovecha un fenómeno denominado el golpe de ariete.

En la búsqueda de la literatura, se encontraron algunos trabajos experimentales llevados a cabo, donde se evidenció la modificación de ciertos parámetros del dispositivo convencional para buscar que este obtenga una mayor eficiencia y rendimiento volumétrico. Sin embargo, se pudo notar un vacío con referencia a un aspecto importante que es la relación entre el volumen del acumulador y la constante elástica del resorte de la válvula de impulso. Por tal motivo, se realizó el análisis experimental respecto a las variables mencionadas, donde se utilizó tres resortes de diferente constante elástica y seis acumuladores con diferentes dimensiones constructivas, manteniendo las demás características del dispositivo constantes.

Como resultado, a una misma altura de elevación y descarga, la variación de la constante elástica mostró un comportamiento significativo en el dispositivo, mientras que el dimensionamiento del acumulador no generó ningún cambio con respecto a los caudales de desperdicio y descarga. Por otro lado, al evaluar a diferentes alturas de elevación y descarga, se obtuvo nuevamente una gran influencia de la constante elástica, mientras que el acumulador no tuvo efecto en el caudal de descarga, pero si hubo variación en el caudal desperdiciado.

En consecuencia, se obtuvo que la constante elástica del resorte ejerce una gran influencia en el comportamiento del dispositivo, mientras que el dimensionamiento del acumulador solo mostró unos breves cambios con respecto al caudal de desperdicio al evaluarse en diferente altura de alimentación y descarga.

Palabras clave: Acumulador, constante elástica, golpe de ariete, caudal y fluido.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

RECONOCIMIENTOS

Quiero expresar mis mayores agradecimientos a las siguientes personas que me apoyaron en la realización de este proyecto.

A mis padres, que fueron las personas que me motivaron a que este proyecto se realizara y me ayudaron con sus sabios consejos.

A mi asesor de trabajo de grado Sebastián Vélez, un excelente docente guía que siempre estuvo presente durante el desarrollo del proyecto, brindándome un gran apoyo incondicional en cada sesión y aconsejándome el mejor camino a tomar.

A los laboratoristas del laboratorio de fluidos de la universidad, que siempre tuvieron una gran disposición en brindarme el espacio y las herramientas que requería cuando las necesitaba.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

ACRÓNIMOS

Pa Pascal

PSI pound per square inch

m³ metro(s) cúbico(s)

m³/s metro(s) cúbico(s) por segundo

ft³/s Pie(s) cúbico(s) por segundo

N/m Newton por metro

mm Milímetros

WHO World health organization

OMS Organización mundial de la salud

PVC Policloruro de vinilo (tabla de materiales)

l/min Litros por minuto

PE Polietileno (tabla de materiales)

PAD Presentar, describir, analizar

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	2
RECONOCIMIENTOS.....	3
ACRÓNIMOS	4
TABLA DE CONTENIDO.....	5
ÍNDICE DE FIGURAS.....	9
ÍNDICE DE TABLAS.....	11
ÍNDICE DE GRÁFICAS.....	12
ÍNDICE DE ECUACIONES.....	12
1. CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....	14
1.1. GENERALIDADES	14
1.2. OBJETIVOS.....	15
1.3. ORGANIZACIÓN DE LA TESIS	15
2. CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO.....	17
2.1. CONCEPTOS BÁSICOS GENERALES.....	17
2.2. SITUACIÓN ACTUAL DE LOS PROTOTIPOS	19
2.3. ABASTECIMIENTO DE AGUA	24
2.3.1. CANTIDAD DE AGUA NECESARIA PARA EL CONSUMO DIRECTO.....	25
2.3.2. AGUA NECESARIA PARA LA ELABORACIÓN DE COMIDA.	25
2.3.3. CANTIDAD DE AGUA NECESARIA PARA LA HIGIENE.	26
2.3.4. CONSUMO TOTAL MÍNIMO POR HABITANTE.....	26
2.3.5. DIFERENCIA ENTRE PAÍSES.....	27
2.4. GOLPE DE ARIETE.....	28
2.4.1. DEFINICIÓN.....	28
2.4.2. CAUSAS DEL FENÓMENO.....	30
2.4.3. ¿COMO EVITAR EL GOLPE DE ARIETE?.....	30
2.5. ARIETE HIDRÁULICO.....	30
2.5.1. ANTECEDENTES HISTÓRICOS.....	31

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

2.5.2.	¿QUÉ ES UN ARIETE HIDRÁULICO?	32
2.5.3.	COMPONENTES DEL ARIETE HIDRÁULICO.	33
2.5.3.1.	CAJA DE VÁLVULAS.	33
2.5.3.2.	VÁLVULA DE IMPULSO.	35
2.5.3.3.	VÁLVULA DE DESCARGA.....	38
2.5.3.4.	ACUMULADOR.	39
2.5.3.5.	ADMISIÓN DE AIRE AL ACUMULADOR.....	40
2.5.3.6.	TUBERÍA DE ALIMENTACIÓN.....	41
2.5.3.7.	TUBERÍA DE DESCARGA.	42
2.5.4.	VARIABLES DEL PROCESO	43
2.5.5.	PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO.	44
2.5.6.	MAPA DE INSTALACIÓN DEL ARIETE HIDRÁULICO.....	48
2.5.7.	CONFIGURACIONES DE OPERACIÓN.....	49
2.5.8.	CONFIGURACIONES CONSTRUCTIVAS.	51
2.5.9.	EJEMPLOS DE ARIETES HIDRÁULICOS.....	53
2.5.10.	COMPARACIÓN CON OTROS TIPOS DE BOMBEO.....	56
2.5.11.	REQUISITOS DE INSTALACIÓN.....	57
2.5.11.1.	REQUISITOS GEOGRÁFICOS.....	57
2.5.11.2.	ALIMENTACIÓN Y DESCARGA.....	58
3.	CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA	59
3.1.	MODELO MATEMÁTICO.....	59
3.1.1.	ALTURA DE ALIMENTACIÓN.....	59
3.1.2.	DIAMETRO DE LA TUBERÍA DE ALIMENTACIÓN.....	60
3.1.3.	DIÁMETRO DE LA TUBERÍA DE DESCARGA	60
3.1.4.	CÁLCULO DEL CAUDAL DE DESCARGA	61
3.1.4.1.	CAUDAL LIBRE.	61
3.1.4.2.	COEFICIENTE DE DESCARGA.....	61
3.1.4.3.	VELOCIDAD DE CIERRE DE LA VÁLVULA DE IMPULSO.....	62
3.1.4.4.	CAUDAL DE DESCARGA.	62
3.1.5.	POTENCIA DEL ARIETE HIDRÁULICO	63
3.1.6.	PRESIÓN MÁXIMA EN LA CAJA DE VÁLVULAS	63
3.1.7.	DIMENSIONAMIENTO DEL ACUMULADOR	63
3.1.7.1.	VOLUMEN DEL ACUMULADOR.	64

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

3.1.7.2.	<i>VOLUMEN MÁXIMO DE AGUA AL INTERIOR DEL ACUMULADOR.....</i>	64
3.1.8.	EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA.....	65
3.1.8.1.	<i>EFICIENCIA DE D'AUBUISSON.....</i>	65
3.1.8.2.	<i>EFICIENCIA RANKINE.....</i>	65
3.1.8.3.	<i>EFICIENCIA DE FABRICACIÓN.....</i>	66
3.1.9.	RENDIMIENTO VOLUMÉTRICO.....	66
3.2.	CÁLCULO DEL DIMENSIONAMIENTO DEL ACUMULADOR.....	67
3.2.1.1.	<i>VOLUMEN DEL ACUMULADOR.....</i>	67
3.2.1.2.	<i>VOLUMEN MÁXIMO DE AGUA AL INTERIOR DEL ACUMULADOR.....</i>	68
3.3.	DETERMINACIÓN DE LA CONSTANTE ELÁSTICA DE LOS RESORTES.....	70
3.3.1.	PROCEDIMIENTO APLICADO.....	73
3.3.2.	DATOS OBTENIDOS.....	75
3.3.3.	SELECCIÓN DEL RESORTE.....	77
3.4.	ANÁLISIS FINANCIERO.....	78
3.5.	FABRICACIÓN DE COMPONENTES FALTANTES.....	79
3.5.1.	HERRAMIENTAS UTILIZADAS.....	79
3.5.2.	COMPONENTES FABRICADOS.....	81
3.6.	MONTAJE EXPERIMENTAL.....	87
3.6.1.	LUGAR DE IMPLEMENTACIÓN.....	87
3.6.2.	INSTALACIÓN DEL ARIETE HIDRÁULICO.....	88
3.6.2.1.	<i>MATERIALES UTILIZADOS.....</i>	88
3.6.2.2.	<i>ENSAMBLE.....</i>	88
3.6.2.3.	<i>DIMENSIONES DEL ARIETE HIDRÁULICO.....</i>	90
3.6.2.4.	<i>ABASTECIMIENTO O ALIMENTACIÓN.....</i>	90
3.6.2.5.	<i>CONTROL DE VARIABLES.....</i>	92
3.7.	PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO Y TOMA DE DATOS.....	95
3.7.1.	PROCEDIMIENTO APLICADO.....	95
3.7.2.	PRUEBAS EXPERIMENTALES.....	96
3.7.3.	RESUMEN DE LOS DATOS OBTENIDOS.....	98
3.7.4.	INCONVENIENTES PRESENTADOS.....	100
3.7.5.	PROPUESTA DE MEJORA.....	102
4.	CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	103
4.1.	GRÁFICAS DE COMPORTAMIENTO DEL ARIETE HIDRÁULICO.....	103

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

4.1.1.	ALTURA DE ALIMENTACIÓN Y DESCARGA DE 1,50 m	103
4.1.2.	ALTURA ALIMENTACIÓN DE 1,00 m DE ALTURA DESCARGA DE 1.50 m.	109
4.2.	EFFECTO DE LA CONSTANTE ELÁSTICA DEL RESORTE	116
4.3.	EFFECTO DEL ACUMULADOR.....	117
4.4.	EFICIENCIA Y RENDIMIENTO VOLUMÉTRICO.....	117
4.5.	DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS.....	120
4.6.	COMPARACIÓN CON OTROS AUTORES	123
5.	CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO.	126
5.1.	CONCLUSIONES.....	126
5.2.	RECOMENDACIONES.....	127
5.3.	LÍNEAS DE ACCIÓN PARA FUTUROS PROYECTOS.....	128
	REFERENCIAS	130
	APÉNDICE.....	133
	Apéndice A. Variables del proceso.	133
	Apéndice B. Dimensionamiento de los resortes.....	134
	Apéndice C. Tabla de datos obtenidos para el resorte 2.....	135
	Apéndice D. Gráfica para la obtención de la constante elástica del resorte 2.....	136
	Apéndice E. Tabla de datos obtenidos para el resorte 3.....	136
	Apéndice F. Gráfica para la obtención de la constante elástica del resorte 3.	137
	Apéndice G. Tabla de datos obtenidos para el resorte 4.	137
	Apéndice H. Gráfica para la obtención de la constante elástica del resorte 4.....	138
	Apéndice I. Tabla de datos obtenidos para el resorte 5.....	138
	Apéndice J. Gráfica para la obtención de la constante elástica del resorte 5.....	139
	Apéndice K. Tabla de datos obtenidos para el resorte 6.....	140
	Apéndice L. Gráfica para la obtención de la constante elástica del resorte 6.....	141
	Apéndice M. Tabla de datos obtenidos para el resorte 7.	141
	Apéndice N. Gráfica para la obtención de la constante elástica del resorte 7.....	142
	Apéndice O. Tabla de datos obtenidos para el resorte 8.	142
	Apéndice P. Gráfica para la obtención de la constante elástica del resorte 8.	143
	Apéndice Q. Costo de los materiales utilizados.....	144
	Apéndice R. Diámetros nominales para tuberías de presión.	146
	Apéndice S. Diámetros nominales para tuberías de ventilación y sanitaria.	147
	Apéndice T. Materiales utilizados en el proyecto.	148

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Comportamiento de la presión.....	18
Figura 2. Partes del ariete hidráulico.....	20
Figura 3. Consumo total por habitante.....	27
Figura 4. Agua de consumo promedio por persona con respecto a otros países	28
Figura 5. Comportamiento del fluido al generarse el golpe de ariete.....	29
Figura 6. Cuerpo fabricado con tubería.....	34
Figura 7. Cuerpo fabricado con juntas de bridas.....	34
Figura 8. Cuerpo fabricado mediante fundición.....	35
Figura 9. Válvula con resorte de pletina	36
Figura 10. Válvula regulada por resorte	36
Figura 11. Válvula con pesas encima	37
Figura 12. Válvula con pesas debajo.....	37
Figura 13. Válvula de retención de columpio	38
Figura 14. Válvula con plato perforado	39
Figura 15. Válvula con resorte	39
Figura 16. Acumuladores utilizados en el proyecto.....	40
Figura 17. Localización del orificio de admisión de aire	41
Figura 18. Instalación de la tubería de alimentación.....	42
Figura 19. Localización de la tubería de descarga en el ariete hidráulico	43
Figura 20. Diagrama de control de las variables del proceso	44
Figura 21. Esquema de la fase 1	45
Figura 22. Esquema de la fase 2	45
Figura 23. Esquema de la fase 3	46
Figura 24. Esquema de la fase 4	47
Figura 25. Esquema de la fase 5	47
Figura 26. Esquema de la fase 6	48
Figura 27. Mapa de instalación del ariete hidráulico	49

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Figura 28. Arietes en serie	50
Figura 29. Arietes en paralelo.....	50
Figura 30. Ariete hidráulico con una válvula de impulso.....	51
Figura 31. Ariete hidráulico con una válvula de impulso dispuesta horizontalmente	52
Figura 32. Ariete hidráulico multipulsor	52
Figura 33. Ariete hidráulico con dos cámaras de aire y una válvula de impulso.....	53
Figura 34. Ariete hidráulico fabricado en latón polipropileno	54
Figura 35. Ariete hidráulico multipulsor AHM CITA 6-L3V	54
Figura 36. Ariete hidráulico multipulsor AHM CITA 3-L3V-AG	55
Figura 37. Ariete hidráulico multipulsor AH-4 (IMPAG)	55
Figura 38. Ariete hidráulico multipulsor DANÉS.....	56
Figura 39. Resortes adquiridos	71
Figura 40. Banco de prueba para la determinación de la constante elástica.....	72
Figura 41. Medida del diámetro interno del resorte 5	73
Figura 42. Prueba experimental para la toma de datos de los resortes.....	75
Figura 43. Perforaciones realizadas en la base de madera	82
Figura 44. Modificación hecha a la válvula de impulso	83
Figura 45. Recipientes utilizados para almacenar el caudal de desperdicio	84
Figura 46. Acumuladores construidos	85
Figura 47. Ajuste del ariete a la base de madera por medio de cauchos.....	86
Figura 48. Recipiente adherido a la válvula de impulso	87
Figura 49. Prototipo ensamblado	89
Figura 50. Tanque de alimentación utilizado en el experimento	91
Figura 51. Recipiente utilizado para medir el caudal de descarga	93
Figura 52. Recipiente utilizado para medir el caudal desperdiciado.....	94
Figura 53. Montaje experimental del ariete hidráulico.....	98
Figura 54. Efecto sifón producido durante las pruebas iniciales	101

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Cantidad de agua estimada de hidratación por individuo	25
Tabla 2. Requisitos mínimos para mantener una condición mínima de higiene.....	26
Tabla 3. Comparación del ariete hidráulico con respecto a otros tipos de bombeo	56
Tabla 4. Datos experimentales obtenidos del resorte 2.....	76
Tabla 5. Selección del resorte	78
Tabla 6. Costo total del proyecto.....	78
Tabla 7. Herramientas utilizadas	80
Tabla 8. Dimensión de los acumuladores	84
Tabla 9. Dimensiones del ariete hidráulico	90
Tabla 10. Variación del nivel del tanque en el trabajo experimental.....	92
Tabla 11. Dimensiones del recipiente utilizado para medir el caudal de descarga.....	94
Tabla 12. Resumen de los cambios realizados para cada prueba	97
Tabla 13. Toma de datos experimentales 1.....	99
Tabla 14. Toma de datos experimentales 2.....	99
Tabla 15. Toma de datos experimentales 3.....	99
Tabla 16. Toma de datos experimentales 4.....	100
Tabla 17. Eficiencia y rendimiento volumétrico de la Tabla 13	119
Tabla 18. Eficiencia y rendimiento volumétrico de la Tabla 14.....	119
Tabla 19. Eficiencia y rendimiento volumétrico de la Tabla 15.....	120
Tabla 20. Eficiencia y rendimiento volumétrico de la Tabla 16.....	120

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Comportamiento obtenido del resorte 1	77
Gráfica 2. Comportamiento de los caudales de desperdicio y descarga (1)	104
Gráfica 3. Comportamiento de los caudales de desperdicio y descarga (2)	105
Gráfica 4. Comportamiento de los caudales de desperdicio y descarga (3)	106
Gráfica 5. Comportamiento de los caudales de desperdicio y descarga (4)	107
Gráfica 6. Comportamiento del caudal de alimentación (1)	108
Gráfica 7. Comportamiento del caudal de alimentación (2)	108
Gráfica 8. Comportamiento de los caudales de desperdicio y descarga (5)	110
Gráfica 9. Comportamiento de los caudales de desperdicio y descarga (6)	110
Gráfica 10. Comportamiento de los caudales de desperdicio y descarga (7)	112
Gráfica 11. Comportamiento de los caudales de desperdicio y descarga (8)	113
Gráfica 12. Comportamiento del caudal de alimentación (3)	114
Gráfica 13. Comportamiento del caudal de alimentación (4)	115

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Cálculo para determinar la altura de alimentación	60
Ecuación 2. Diámetro de la tubería de alimentación.....	60
Ecuación 3. Diámetro de la tubería de descarga	60
Ecuación 4. Cálculo del caudal libre	61
Ecuación 5. Ecuación general de la energía	61
Ecuación 6. Cálculo del coeficiente de descarga.....	62
Ecuación 7. Velocidad de cierre de la válvula de impulso	62
Ecuación 8. Cálculo del caudal de descarga.....	62
Ecuación 9. Cálculo teórico de la potencia del ariete hidráulico	63
Ecuación 10. Presión máxima en la caja de válvulas.....	63
Ecuación 11. Calculo del volumen del acumulador	64
Ecuación 12. Volumen total de agua al interior del acumulador	64

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Ecuación 13. Volumen que ocupan las esferas.....	64
Ecuación 14. Eficiencia de D'Aubuisson.....	65
Ecuación 15. Eficiencia Rankine	65
Ecuación 16. Cálculo de la eficiencia de fabricación del ariete hidráulico	66
Ecuación 17. Expresión matemática del rendimiento volumétrico	66

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

1.CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1. GENERALIDADES

El ariete hidráulico, también conocido como bomba ariete, es un dispositivo que aprovecha cierta caída de agua para elevar una parte de esta a un sitio de mayor altura sin necesidad de utilizar fuentes de energía externa, aprovechando un fenómeno denominado el golpe de ariete. Pese a que este tipo de equipo de bombeo tiene buena aceptación en zonas rurales, posee una gran desventaja: su baja eficiencia y por ende el bajo rendimiento volumétrico que obtiene del caudal que le ingresa; esto si lo comparamos con diferentes dispositivos de bombeo que hay en el mercado como, por ejemplo, bombas eléctricas, motobombas, entre otros. A pesar de que el dispositivo no genera costos en su operación, aun no tiene un amplio reconocimiento para emplearse como alternativa de bombeo de agua, debido a su desconocimiento y a su alto consumo del fluido.

Con base en las investigaciones consultadas y analizadas en este documento, se propone construir un ejemplar con el fin de variar dos de sus aspectos constructivos, con el propósito de ver el comportamiento de la eficiencia en la bomba, pero realizando un método diferente al encontrado en la literatura. Para ello se tomará la iniciativa encontrada por los autores (Quiroga, Sierra, & Biancha, 2013). donde estos realizaron un trabajo experimental al variar aspectos propios del ariete hidráulico como lo es la constante elástica del resorte, el área de la válvula de impulso y de descarga y el volumen del acumulador. Sin embargo, se encontró que hay una inconsistencia en dos de estos aspectos: no hay una relación directa entre la constante elástica del resorte y el volumen del acumulador. Por lo tanto, se pretende variar las dimensiones del acumulador y la constante elástica del resorte de la válvula de impulso, manteniendo los demás factores del ariete constantes, sin entrar en detalles en aspectos como la presión y la frecuencia de golpes de la válvula de impulso; debido a que, en los demás documentos consultados no hay fiabilidad ni registro del cómo

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

se comportan estas dos características en conjunto como tal. Con ello, se busca mejorar el dispositivo actual para que, los posibles resultados obtenidos, se pueda encontrar una relación directa entre la constante elástica y el dimensionamiento del acumulador, para dar una conclusión válida que aporte para futuras investigaciones y así el dispositivo tenga un mayor margen de aplicación.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. OBJETIVO GENERAL.

Analizar experimentalmente el comportamiento del ariete hidráulico cuando se efectúan variaciones en el volumen del acumulador y la constante elástica del resorte de la válvula de impulso.

1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- Investigar la literatura actual de ariete hidráulico.
- Diseñar y construir el cuerpo del ariete hidráulico, utilizando diferentes acumuladores y resortes.
- Evaluar experimentalmente el comportamiento del ariete hidráulico con cada una de las configuraciones resorte/acumulador para inferir la influencia de dichos parámetros.

1.3. ORGANIZACIÓN DE LA TESIS

El presente documento está dividido en cinco capítulos, en los que se abordarán diferentes temáticas para presentar la investigación realizada con los resultados y conclusiones obtenidas.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

En el capítulo 1 se presenta la introducción del documento, donde se muestra el problema planteado, describiendo una posible solución para mejorar la eficiencia del ariete hidráulico y los objetivos a lograr. Además, se describen cada uno de los capítulos del documento para conocer más en detalle el contenido de este.

Luego, en el capítulo 2 se puede apreciar el componente teórico de la bomba ariete. En esta parte se puede encontrar las investigaciones más recientes realizadas en el dispositivo, conjunto con sus componentes, características y demás detalles que este tiene.

Después, en el capítulo 3 se encuentra la parte matemática que rige a la bomba, las pruebas realizadas para determinar la constante elástica de los resortes, los componentes y el costo de la fabricación del equipo de bombeo, montaje y resultados obtenidos por medio de las pruebas experimentales.

Con referencia a lo anterior, en el capítulo 4 se describe de forma detallada los resultados obtenidos con las pruebas experimentales hechas. Además, se realiza un análisis del comportamiento de las variables modificadas por medio de gráficas, donde se muestra el comportamiento del dispositivo. Después, se detalla la eficiencia y el rendimiento volumétrico para definir las configuraciones más y menos eficientes obtenidas. Por último, se compara el análisis obtenido con respecto a otros autores que realizaron investigaciones similares.

Finalmente, en el capítulo 5 se presentan las conclusiones a las que se llegó con respecto al análisis práctico de las variables estudiadas, las recomendaciones para mejorar la experimentación del ariete hidráulico y el trabajo futuro teniendo en cuenta lo encontrado por los autores.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

2.CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

En este capítulo se abordarán los temas que explican el concepto teórico del ariete hidráulico con respecto a lo encontrado en la literatura.

2.1. CONCEPTOS BÁSICOS GENERALES

En esta sección se describen los conceptos principales abordados en el documento, con lo que se busca tener una mejor comprensión en los temas abordados.

Fluido. Sustancia que puede tomar casi cualquier forma, donde sus partículas no tienen tendencia de recuperar su forma original si esta se modifica.

Presión. Se refiere a la fuerza ejercida sobre un área. Cuando hay un cuerpo involucrado en un determinado espacio, la fuerza del fluido presente se ejerce perpendicularmente hacia la superficie del cuerpo en todas las direcciones. A continuación, describirán dos ejemplos de lo anteriormente descrito.

Al sumergir un objeto dentro de un fluido, la fuerza que se ejerce es perpendicular a toda la superficie de este, por lo que a medida que se hunde más, la presión es mayor. A esto se le conoce como presión hidrostática.

De igual forma, el aire ejerce cierta presión dependiendo del lugar donde se tome como referencia. Al nivel del mar la presión ejercida es mayor que si se está en un sitio más elevado. A lo anterior se le conoce como presión atmosférica.

En la Figura 1 se puede apreciar las líneas de presión ejercidas en referencia a la presión hidrostática (izquierda) y la presión atmosférica (derecha).

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

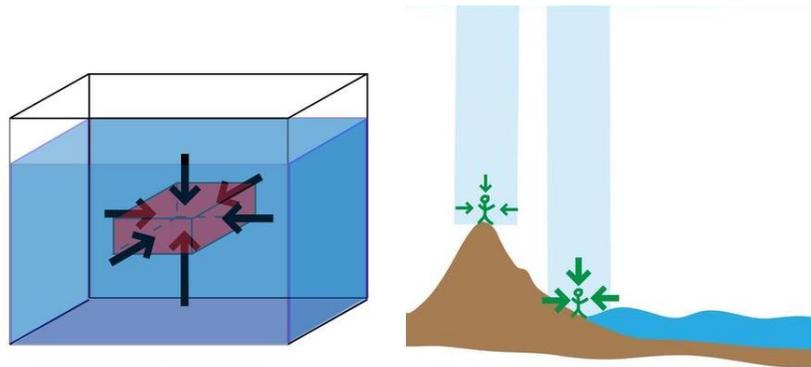


Figura 1. Comportamiento de la presión.

Fuente: (Ayarzagüena Porras, Barroso Pellico, Illescas, Losada Doval, & Yagüe Anguís, s.f., <http://meteolab.fis.ucm.es/meteorologia/presion-atmosferica--2>)

La unidad de medición de la presión en el sistema internacional es N/m^2 (Newton por metro cuadrado), que es equivalente a un Pa (Pascal); mientras que en el sistema inglés es el PSI (pound per square inch). Existen diferentes instrumentos para medir esta magnitud, en los que se encuentra el manómetro, el vacuómetro, el barómetro, sensores destinados para ello, entre otros más.

Volumen. Esta magnitud hace referencia a la cantidad de espacio que ocupa un cuerpo. En el sistema internacional, este se mide en m^3 (metros cúbicos), mientras que en el sistema inglés se utiliza con más frecuencia el galón.

Caudal. Es la cantidad de fluido que pasa por una sección transversal en un tiempo determinado. En el sistema internacional se mide en m^3/s (metros cúbicos por segundo), mientras que en el sistema inglés se mide en ft^3/s (pies cúbicos por segundo).

Densidad. Es la relación entre la masa de un objeto en relación con el volumen que ocupa. Con respecto a lo anterior, esta magnitud es inversamente proporcional al volumen del objeto, por lo que un mismo fluido que ocupe un espacio menor a otro mayor, presenta

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

variación en su densidad. Por ejemplo, el agua en estado líquido es más densa que si está en estado gaseoso.

Tubería. Es el conjunto de tramos de tubo y accesorios adaptados, que se utiliza para el transporte de fluidos de un lugar a otro.

Válvula. Es un accesorio mecánico que se utiliza para modificar la trayectoria de un fluido.

Resorte. Es un elemento elástico en forma de espiral que recupera su longitud natural después de haber sufrido una compresión o descompresión.

Constante elástica. Magnitud que indica la fuerza necesaria para comprimir o tensionar un resorte. En el sistema internacional se expresa en unidades de N/m (Newton por metro).

Para efectos de esta investigación se utilizará el sistema internacional de unidades, a excepción del volumen, donde este se medirá en litros.

2.2. SITUACIÓN ACTUAL DE LOS PROTOTIPOS

Para llevar a cabo la investigación del estado del arte sobre el ariete hidráulico, se realizó una búsqueda extensiva en diversas bases de datos y trabajos de grado de autores que investigaron sobre el dispositivo.

El ariete hidráulico, también conocido como bomba ariete, es un sistema diseñado con el objetivo de provocar un fenómeno llamado “golpe de ariete”, donde la energía obtenida de una columna de líquido se aprovecha para elevar cierta cantidad de agua a un lugar más alto; durante cada ciclo que el dispositivo efectúa, hay una cantidad de agua que se pierde,

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

esto para compensar el fluido que se eleva a un sitio de mayor altura (Rengifo & Gallego, 2016).

Arenas (2014) en su trabajo de grado acerca del estudio del golpe de ariete, especifica que:

El golpe de ariete es un fenómeno transitorio que se manifiesta por medio de vibraciones y ruido a lo largo de una sección de un sistema hidráulico, producto del cambio súbito en las condiciones de flujo y el subsecuente intercambio entre energía cinética y de deformación en el medio adyacente que producen un cambio imprevisto de la presión del fluido (p. 3).

Además, este fenómeno produce roturas en las redes hidráulicas domesticas e industriales y produce sonidos característicos; una forma simple de evitar el golpe de ariete es bloquear el paso del fluido de forma lenta y no repentina para así amortiguar la sobrepresión que se genera (Bustamante & Quezada, 2009).

Quiroga, Sierra, & Biancha (2013) mencionan los nombres específicos de las partes del cuerpo del ariete. En la Figura 2 se presenta el esquema.

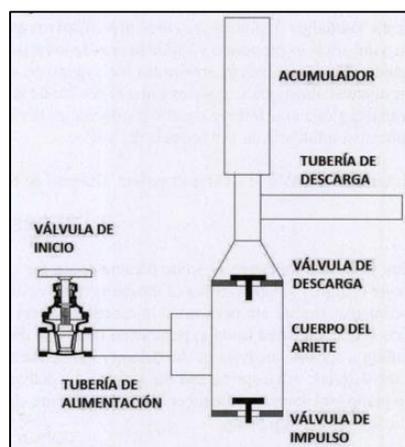


Figura 2. Partes del ariete hidráulico.

Fuente: (Quiroga et al., 2013, p. 30)

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

El anterior esquema presenta total coherencia con otras imágenes de la literatura consultada, donde la estructura del ariete es similar, es decir, no hay componentes extras ni faltantes; solo en algunos casos cambian los nombres.

El ariete hidráulico presenta ciertas ventajas y desventajas: una de sus ventajas es que eleva agua hacia un lugar de mayor altura sin necesidad de recurrir a fuentes de energía externa, como la energía eléctrica; por lo que se obtiene como beneficio que puede trabajar continuamente sin generar ningún costo; otra de sus ventajas es que no necesita de tanto mantenimiento, tal y como lo requiere una bomba eléctrica o de combustión interna.

Las desventajas que presenta el sistema es que el caudal de alimentación debe ser constante; el alto ruido generado por el accionamiento de la válvula de impulso y su baja eficiencia por el desperdicio de agua; este último aspecto ha llevado a muchos investigadores a intentar mejorar el dispositivo con el fin de que bombee más agua y la válvula de impulso desperdicie menos.

A continuación, se presentan los diferentes aspectos investigados sobre algunas modificaciones que se han realizado al ariete; variando aspectos estructurales para observar su comportamiento; con el propósito de hacer mejoras.

Rengifo & Gallego (2016) desarrollaron un prototipo del ariete hidráulico con una válvula de impulso tipo cheque, donde variaron el caudal de admisión y evaluaron el comportamiento de este con diferentes alturas de elevación respectivas, para medir el caudal de descarga y así poder verificar la eficiencia máxima que se podría tener. En los resultados presentados, observaron que el comportamiento era casi lineal, donde a un mayor caudal de alimentación, mayor caudal de entrega, pero menor rendimiento volumétrico. Esto nos lleva a deducir que, al tener un mayor caudal de entrada con una altura constante de entrega, se logra un mayor caudal de entrega, pero menor rendimiento volumétrico.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Acitores (2012) llevó a cabo el diseño y construcción de un ariete hidráulico donde se variaron los siguientes aspectos: el ángulo de inclinación de la tubería de alimentación, donde se encontró que el ariete presenta un mayor rendimiento cuando a la entrada de este no presenta inclinación; la altura de elevación, donde se comprobó que a medida que aumenta la altura de la tubería de descarga, la eficiencia del ariete disminuye; la altura de alimentación al ariete, donde se encontró que el caudal de elevación es mayor al aumentar la altura de alimentación, pero solo hasta un punto, es decir, no presenta un comportamiento lineal; el efecto de la longitud de la tubería de alimentación, donde se comprobó que al aumentar la misma, esta presenta muchas pérdidas debido a la fricción con el material, pero sin embargo aumenta la eficiencia.

Quiroga et al. (2013) evaluaron la influencia de la constante elástica del resorte en la válvula de impulso, donde encontraron que para bajas alturas de alimentación es mejor utilizar un resorte con una constante de elasticidad menor para que el ariete sea más eficiente. También investigaron a cerca de la influencia del acumulador, donde variaron el volumen de este y concluyeron que no influye en gran medida en la eficiencia que puede tener el ariete. Finalmente, evaluaron la relación de las válvulas de impulso y de descarga demostrando que:

... La relación de las áreas de las válvulas de impulso y descarga afecta considerablemente la eficiencia global del sistema, se requiere que el área de la válvula de descarga sea igual o mayor que el área de la válvula de impulso. Si se mantiene el área de la válvula de descarga fija, el aumento del área de la válvula de impulso producirá un ariete más eficiente. Adicionalmente, una válvula de descarga con mayor área permite un mayor flujo másico en el sistema (p. 34).

Hussin et al. (2017) encontraron algo diferente con lo planteado por Quiroga et al. (2013). En sus experimentos, determinaron que mientras el diámetro de la cámara de

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

compresión sea más pequeño, y más alta la cabeza de suministro, genera una mayor presión.

Jara, Campoverde, & Pizarro (2011) llevaron a cabo la construcción de una rueda hidráulica y de un ariete hidráulico para el abastecimiento de agua por irrigación. En los experimentos que realizaron, notaron que mientras más carrera tenga el vástago de la válvula de impulso, más fuerte es el golpe que se genera y por ende puede deformar las pesas que este soporta, por lo que recomiendan mejor el uso de resorte en la bomba, ya que estos autores a diferencia de los mencionados previamente emplearon pesas para reemplazar el resorte de la válvula de impulso. Además, también concluyeron que el dimensionamiento del volumen del acumulador es proporcional a la altura de descarga y el caudal de entrega.

Para el caso de Arapa (2016), también llevó a cabo un prototipo del ariete hidráulico, donde varió la carrera de la válvula de impulso, la altura de descarga y la longitud de la tubería de alimentación; con el fin de encontrar la eficiencia volumétrica basándose en el caudal de desperdicio y elevado. La mayor eficiencia volumétrica en una altura considerable de elevación de 45 metros se obtuvo con una carrera de 9 mm de la válvula de impulso y a una altura de alimentación de 3 m. dicho valor fue de 0,61%, donde elevó un caudal de 0,19 l/min con un caudal de entrada de 31,24 l/min.

Inthachot, Saehaeng, Max, Müller, & Spreer (2015) llevaron a cabo algo poco usual. Instalaron la válvula de impulso con resorte puesta de forma horizontal. Los resultados obtenidos presentan que, a pesar de que se evita la pérdida debida al codo, no hay mayor relevancia en la eficiencia, debido a que tal pérdida es insignificante para el ariete; con lo anterior, se puede obviar colocar la válvula de impulso en esa posición, aunque si se quiere mejorar la eficiencia considerando todos los factores, se puede pensar en ello.

Bustamante & Quezada (2009) desarrollaron un ariete denominado "multimpulsor". Este consta de tres válvulas de impulso en serie. Realizaron pruebas donde variaron el peso que debían soportar dichas válvulas y la carrera de la válvula de impulso; donde

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

mantuvieron el caudal y la altura de alimentación constante; con lo que demostraron que tener esa configuración en las válvulas de impulso el ariete genera una mayor eficiencia, altura de entrega del fluido y caudal de entrega; esto si se le compara con uno convencional; además, las pérdidas en la caja de válvulas debido a la fricción disminuyen; la inversión de la construcción del dispositivo es un poco mayor que un ariete convencional. Al igual que Jara et al. (2011), concuerdan que el ariete debe funcionar al menos por 20 minutos para que obtenga estabilidad, y así poder tomar medidas experimentales; finalmente, ambos corroboraron que tener tres válvulas de impulso en serie si es más factible que solo teniendo una.

Pinto (2015) realizó la construcción de un ariete multipulsor (diferente al mencionado anteriormente), con válvulas en disposición circular. En su experimento, no logró los resultados esperados debido al sobredimensionamiento de la caja de válvulas, además no logro tener un buen caudal de descarga. En su conclusión de trabajo de grado, aclara que “no se logró obtener los resultados idóneos como se puede evidenciar en la curva característica detallada en la fig. 46. Tomando en cuenta los resultados se puede concluir que ambas cámaras están sobredimensionadas provocando excesivas pérdidas de presión” (p. 98).

2.3. ABASTECIMIENTO DE AGUA

En esta sección se va a tratar de explicar a cerca de las estadísticas sobre las necesidades básicas de agua que necesita el ser humano para su consumo y subsistencia. Para esto se va a basar en la investigación realizada por Acitores (2012), donde relacionó los datos obtenidos de una importante organización: la OMS (organización mundial de la salud).

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

2.3.1. CANTIDAD DE AGUA NECESARIA PARA EL CONSUMO DIRECTO.

El agua es un elemento fundamental para la supervivencia de todo ser humano, por lo que es casi inimaginable pensar en realizar una actividad en la que haya ausencia de esta. De acuerdo con los datos de la OMS, se estima que 1,2 millones de personas no tienen acceso seguro al líquido, lo que representa que una de cada cinco carece de infraestructura para el abastecimiento de esta.

La cantidad de consumo directo de agua depende de muchos factores, entre ellos los ambientales. En la Tabla 1 se presenta la cantidad de agua necesaria para la hidratación con respecto a las condiciones ambientales y dependiendo del sexo del individuo, de acuerdo con datos de la OMS.

	Volumen de agua (litros/día)		
	Condiciones medias	Trabajo a altas temperaturas	Necesidades en periodo de embarazo
Mujer	2,2	4,5	4,8 - 5,5
Hombre	2,9	4,5	-
Niño/niña	1,0	4,5	-

Tabla 1. Cantidad de agua estimada de hidratación por individuo.

Fuente: (Acitores, 2012, p. 7)

2.3.2. AGUA NECESARIA PARA LA ELABORACIÓN DE COMIDA.

La cantidad diaria de agua estimada para la elaboración de comida depende de factores como el hábito de alimentación y la cultura presente en el lugar. La OMS estima que es necesario un volumen de dos litros al día para su determinado uso.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

2.3.3. CANTIDAD DE AGUA NECESARIA PARA LA HIGIENE.

El agua destinada para el uso de la higiene básica representa un consumo superior al gasto de la suma del consumo directo y la cantidad necesaria para la preparación de alimentos. En la Tabla 2 se muestra un ejemplo de los requisitos mínimos de saneamiento para mantener la condición óptima de higiene de 250 personas; llevado a cabo por el proyecto esfera.

	Indicador PROYECTO ESFERA
Requisito mínimo de agua limpia (litros/persona/día)	15
Distancia mínima desde el hogar a una toma de agua o a puntos de distribución (metros)	500
Máximo número de personas por toma de agua	250

Tabla 2. Requisitos mínimos para mantener una condición mínima de higiene.

Fuente: (Acitores, 2012, p. 7)

2.3.4. CONSUMO TOTAL MÍNIMO POR HABITANTE.

La OMS valoró como cantidad mínima de supervivencia de 20 litros por persona al día, aunque esta debería aumentar a 50 litros con el fin de asegurar un correcto estado salud. Además, para el uso en la agricultura y la industria, el valor mínimo pasa de 75 a 100 litros como máximo. En la Figura 3 se puede ver el comportamiento de la anterior información de forma porcentual.

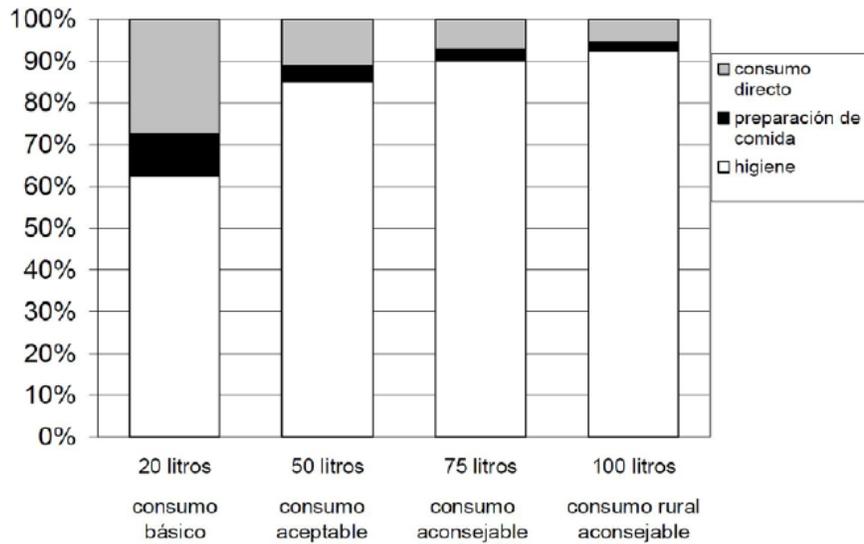


Figura 3. Consumo total por habitante.

Fuente: (Acitores, 2012, p. 8)

2.3.5. DIFERENCIA ENTRE PAÍSES.

Como se mencionó anteriormente, el consumo mínimo de agua para una condición mínima de supervivencia en condiciones saludables es de 50 litros. A pesar de esto, algunos países no cumplen con la expectativa mínima para ello. En la Figura 4 se puede ver el consumo promedio de agua dulce por día (en litros) de algunos países.

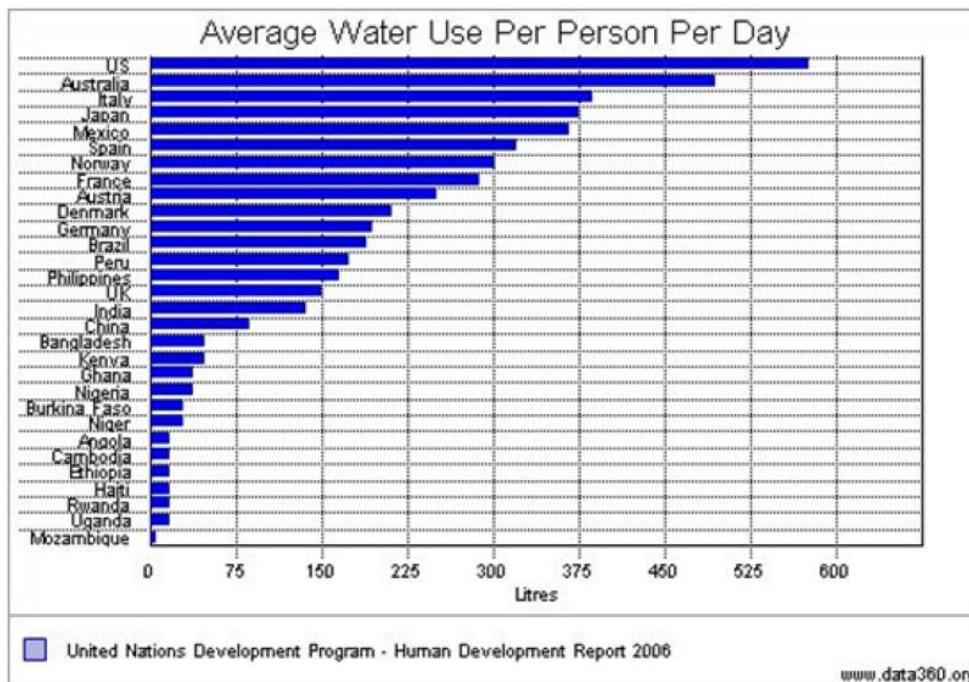


Figura 4. Agua de consumo promedio por persona con respecto a otros países.

Fuente: (Acitores, 2012, p. 9)

2.4. GOLPE DE ARIETE

En esta sección se presentará la definición básica del golpe de ariete con sus posibles causas y soluciones planteadas.

2.4.1. DEFINICIÓN.

El golpe de ariete se define como un fenómeno que se manifiesta con la variación brusca de la presión en el interior de una tubería, debido al cambio del estado de movimiento de un fluido (V. F. Jiménez, 2011).

Al cerrar una válvula de forma repentina, la columna del líquido que viaja a través de la tubería se detiene en forma instantánea. Entonces, el flujo interno tiende a comprimirse hasta que la energía cinética desde el origen del flujo es cero. Luego hay una

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

descompresión, por lo que el flujo retorna en dirección contraria a la inicial, generando una depresión en el punto donde la válvula que se cerró y, posterior a ello, la columna del fluido retorna nuevamente y el líquido vuelve a comprimirse y a descomprimirse, repitiendo la secuencia hasta que se detiene por efecto de la fricción interna de la tubería.

De igual forma, al abrir una llave ligeramente después de estar en reposo, se produce una depresión interna, produciendo el efecto contrario a lo dicho anteriormente. Este fenómeno es indeseable en redes domésticas e industriales, debido a los daños que se pueden ocasionar. Bustamante & Quezada (2009) mencionan que dicho fenómeno puede provocar roturas o incluso el aplastamiento de la tubería. En la Figura 5 se muestra el comportamiento del fluido dentro de una tubería al bloquearse rápidamente su paso.

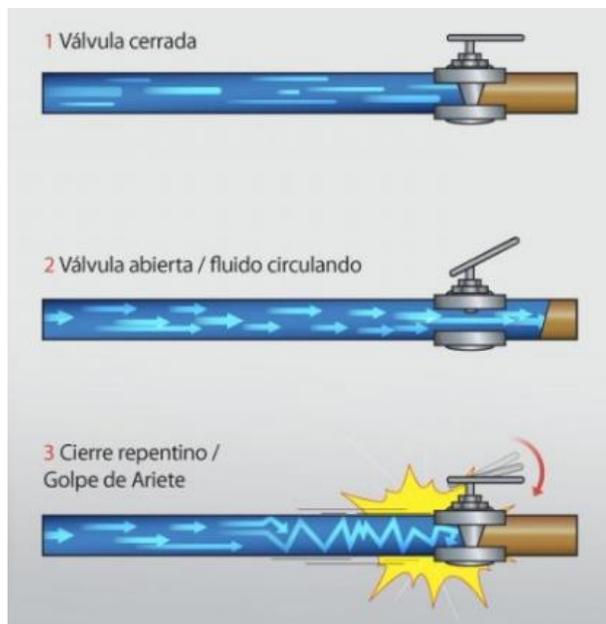


Figura 5. Comportamiento del fluido al generarse el golpe de ariete.

Fuente: (Zárate & Monroy, 2016, <https://www.0grados.com/golpe-de-ariete-consecuencias-y-prevenciones/>)

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

2.4.2. CAUSAS DEL FENÓMENO.

Como se explicó anteriormente, la principal causa del fenómeno se debe al cierre o apertura repentina de una válvula. En una investigación realizada por Orozco, Lopez, & Ramírez (2003), estos enuncian que el fenómeno aparece en una bomba cuando ocurre un paro repentino ocasionado por la interrupción de la energía eléctrica que la alimenta o incluso si hay fallas mecánicas presentes en el dispositivo.

Además, el golpe de ariete también se puede producir en turbinas hidráulicas, debido al cambio en la demanda de la potencia y vibraciones en el impulsor de esta (Rengifo & Gallego, 2016).

2.4.3. ¿COMO EVITAR EL GOLPE DE ARIETE?

Para evitar el efecto generado por el golpe de ariete, se recomienda que el método más eficiente es realizar un cierre lento de la válvula que va a bloquear el paso del fluido (Bustamante & Quezada, 2009, p. 5).

Por otra parte, Arenas (2014) llevó a cabo la fabricación de una chimenea de equilibrio para analizar el comportamiento del golpe de ariete en tuberías rectas, donde logró que este elemento disipara la energía de presión y así este pudo servir como elemento de protección. Con lo anteriormente presentado, se puede observar que es posible amortiguar el fenómeno por medio de accesorios y elementos mecánicos.

2.5. ARIETE HIDRÁULICO

En esta sección se dará a conocer todo lo relacionado con el ariete hidráulico, abordando temas como su historia, definición, componentes constructivos y las diferentes configuraciones con base en lo encontrado en la literatura.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

2.5.1. ANTECEDENTES HISTÓRICOS.

En esta parte, se tomó como referencia lo dicho por Campaña & Guamán (2011), donde se exponen las primeras personas documentadas que formaron parte del desarrollo del dispositivo.

El ariete hidráulico hace parte de los equipos de bombeo más antiguos utilizados por el hombre. Inicialmente se emplearon en el antiguo Egipto, China, India, Roma y Grecia, donde en este último se conoce un equipo utilizado en el año 300 AC. Para su mala fortuna, el dispositivo entró en desuso, pero en el siglo XVI se volvió a retomar gracias a la publicación de una traducción al idioma alemán de la palabra griega que denomina dicha bomba.

Posterior a esto, al inglés John Whitehurst le fue atribuida la invención del ariete hidráulico en el año 1775. Este construyó un aparato que se accionaba manualmente por medio de un grifo ubicado en una tubería conectada a un tanque, por medio del cual provocaba el golpe de ariete, donde el líquido fue elevado a una altura superior. Cabe agregar que su trabajo fue empírico. Dicha invención fue reconocida en el año 1776.

Después de la muerte del inglés, algunos investigadores se enfocaron en descifrar el funcionamiento del dispositivo, donde le fueron realizadas diferentes modificaciones. En el año 1794, los hermanos franceses Joseph-Michel y Jacques-Étienne Montgolfier fabricaron un ariete que, a diferencia del desarrollado por Whitehurst, trabajaba por sí mismo sin necesidad de ser accionado de forma manual, donde los hermanos lo denominaron “le belier hydraulique” (golpe hidráulico). Cabe destacar que estos fueron reconocidos principalmente por haber inventado el globo aerostático.

En el año 1796, Joseph Montgolfier patentó el dispositivo. Al igual que en la actualidad, este aprovechaba un pequeño salto de agua para elevar una parte de esta a un nivel superior. Para el 1816, su hijo Pierre François Montgolfier diseñó una válvula para introducirla en la cámara de aire, donde la bomba obtuvo un mejor rendimiento.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Luego, el ariete hidráulico tuvo una gran acogida por todo el mundo, tanto así que fue utilizado en reconocidos sitios como, por ejemplo, en las fuentes del Taj Mahal y en el Ameer de Afganistán. Desafortunadamente, a partir de la década de 1950, el dispositivo entró casi en abandono total, debido a la aparición de la bomba hidráulica y el uso del petróleo.

2.5.2. ¿QUÉ ES UN ARIETE HIDRÁULICO?

Esta parte se basa en lo dicho por Montecinos Larrosa & Gallardo Quiñones (2004), con respecto a la definición del ariete hidráulico, donde también exaltan una comparación interesante entre el dispositivo y un transformador elevador.

Una bomba ariete, también conocido como ariete hidráulico, es un dispositivo que utiliza la energía de cierta cantidad de líquido proveniente de un desnivel superior para elevar una parte de este a una altura mayor que la inicial, aprovechando el fenómeno físico conocido como golpe de ariete. Dicho dispositivo es capaz de trabajar continuamente sin necesidad de recurrir a fuentes de energía externa, por lo que su funcionamiento no representa ningún costo de operación.

Además, estos autores dicen que es posible hacer una analogía del dispositivo tratado con respecto a un transformador eléctrico elevador de tensión, debido a que este en la entrada recibe un bajo nivel de voltaje y una corriente eléctrica mayor, y en la salida se obtiene un voltaje superior y una corriente menor; en el caso de ariete hidráulico, este le ingresa un gran caudal con una altura de alimentación menor, y en la descarga bombea solo una porción de este caudal a una altura considerablemente mayor, pero con una menor eficiencia que el transformador.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

2.5.3. COMPONENTES DEL ARIETE HIDRÁULICO.

En el planteamiento de los componentes que posee el ariete hidráulico, se tomó como referencia los trabajos llevados a cabo por Campaña & Guamán (2011) para las secciones 2.5.3.1, 2.5.3.2 y 2.5.3.3, Acitores (2012) para la sección 2.5.3.4, Hernández Murillo (2015) para la sección 2.5.3.5 y Rengifo & Gallego (2016) para las secciones 2.5.3.6 y 2.5.3.7.

2.5.3.1. CAJA DE VÁLVULAS.

La caja de válvulas del ariete hidráulico, también conocida como el cuerpo del dispositivo, es el elemento que une la válvula de descarga y la válvula de impulso. El diseño de este debe ser capaz de soportar la presión con la que el agua ingresa al ariete. Basado en lo consultado, es posible construir el cuerpo del ariete de las tres siguientes formas:

Cuerpo fabricado con tubería. La unión de las válvulas de descarga e impulso a la tubería se pueden efectuar a través de accesorios de PVC o por medio de unión por soldadura con tubos metálicos. Su diseño no es complejo, pero tiene la desventaja de que el cambio en la sección transversal es muy brusco. En la Figura 6 se muestra la ilustración del cuerpo del ariete fabricado con tubería metálica.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

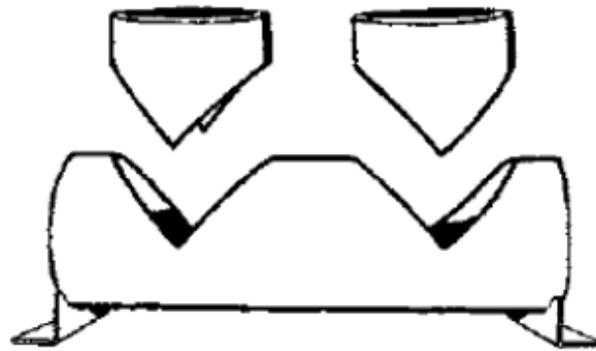


Figura 6. Cuerpo fabricado con tubería.

Fuente: (Campaña & Guamán, 2011, p. 89)

Juntas por medio de bridas. Con este diseño se aumenta el volumen del cuerpo del dispositivo, además de que no hay pérdidas de presión y velocidad gracias a la hidrodinámica que este presenta. Por otra parte, su fabricación es más compleja que si se construyera con tubos. En la Figura 7 se muestra un modelo digital hecho por medio de bridas.

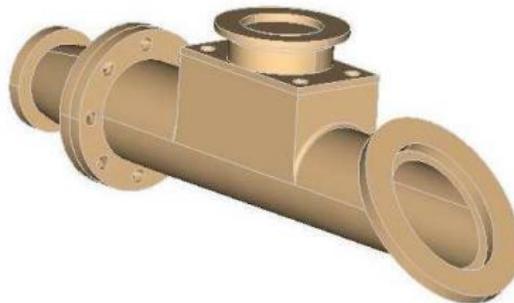


Figura 7. Cuerpo fabricado con juntas de bridas.

Fuente: (Campaña & Guamán, 2011, p. 90)

Cuerpo fabricado mediante fundición. Este proceso se caracteriza por la fundición de un material (comúnmente hierro) para elaborar la caja de válvulas. Este tipo de diseño supone una sección transversal definida para suavizar un cambio repentino de dirección del

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

fluido, pero su costo es muy elevado. En la Figura 8 se presenta un modelo construido mediante fundición.



Figura 8. Cuerpo fabricado mediante fundición.

Fuente: (Campaña & Guamán, 2011, p. 90)

El dispositivo llevado a cabo en este proyecto se elaboró con tubería de PVC, debido al presupuesto con el que se contaba para entonces.

2.5.3.2. VÁLVULA DE IMPULSO.

La válvula de impulso es el elemento que provoca el golpe de ariete. Es fundamental en la construcción del dispositivo, ya que su regulación afecta el comportamiento del ariete. En la literatura consultada se identificaron cuatro posibles formas constructivas de la válvula de impulso.

Válvula con resorte de pletina. Su fabricación no es compleja y se puede llevar a cabo con materiales que se pueden conseguir en ferreterías. Por otra parte, la regulación de esta se realiza dándole movimiento a las tuercas de los tornillos ubicados a ambos extremos del diseño. En la Figura 9 se muestra el esquema de la válvula descrita.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

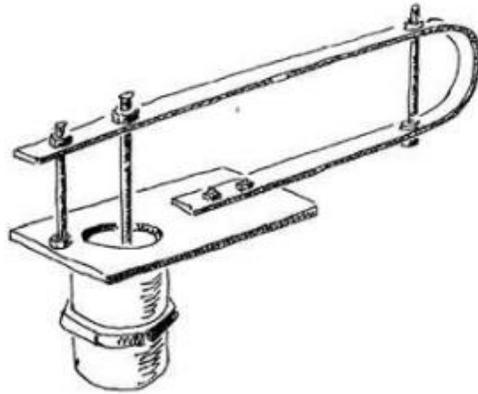


Figura 9. Válvula con resorte de pletina.

Fuente: (Campaña & Guamán, 2011, p. 76)

Válvula regulada por resorte. La distancia que recorre la válvula de impulso depende del ajuste que el resorte tenga. Su diseño no es complejo e incluso en el mercado son fáciles de encontrar. En la Figura 10 se puede ver el esquema de dicho diseño.

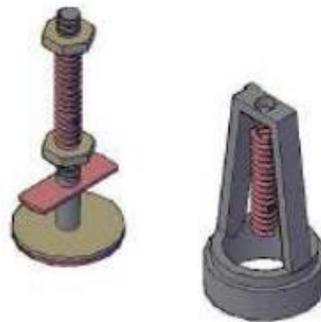


Figura 10. Válvula regulada por resorte.

Fuente: (Campaña & Guamán, 2011, p. 77)

Válvula con pesas encima. Su diseño incluye una serie de pesas, ubicadas verticalmente en la parte superior de un vástago, que actúan por el efecto de la gravedad. Pese a que su fabricación no es complicada, posee la desventaja de que estas tienden a deformarse con el tiempo, por lo que es necesario seleccionar materiales acordes al tipo de trabajo que la válvula desempeñe. En la Figura 11 se puede observar un corte transversal de esta.

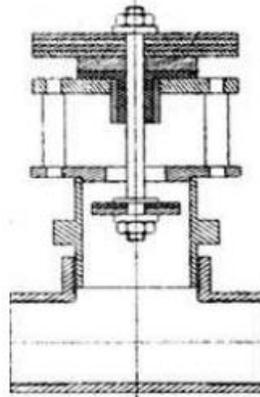


Figura 11. Válvula con pesas encima.

Fuente: (Campaña & Guamán, 2011, p. 78)

Válvula con pesas debajo. Tiene semejanza con diseño anterior, con la diferencia de que los pesos incorporados se ubican al interior de la válvula. En la Figura 12 se puede ver la ilustración correspondiente.

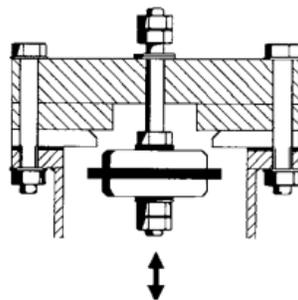


Figura 12. Válvula con pesas debajo.

Fuente: (Campaña & Guamán, 2011, p. 78)

En el prototipo llevado a cabo se seleccionó la válvula regulada por resorte, debido a que era necesaria para la evaluación de la constante elástica.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

2.5.3.3. VÁLVULA DE DESCARGA.

La válvula de descarga es el componente del ariete que no permite que el agua retorne a la caja de válvulas. Con base en lo consultado, se encontraron tres tipos diferentes de estas.

Válvula de retención de columpio. Este diseño posee una bisagra que se abre cuando hay suficiente presión en la caja de válvulas, y se cierra cuando el agua intenta ir en dirección contraria a la de entrada. Es recomendable su uso cuando hay cambios frecuentes en el sentido de circulación del fluido. En la Figura 13 se muestra el esquema de esta válvula.

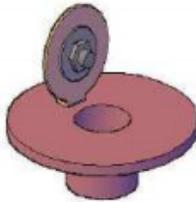


Figura 13. Válvula de retención de columpio.

Fuente: (Campaña & Guamán, 2011, p. 84)

Válvula con plato perforado. Consta de un plato ahuecado que permite el paso del agua a través de los agujeros. A medida que la presión en el acumulador aumenta, la goma adherida al plato va bloqueando el paso del fluido, hasta el punto de que esta sella por completo. Esta configuración es muy sensible a cambios de dirección en el movimiento del agua. En la Figura 14 se muestra la dirección que el líquido toma en este tipo de válvula.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

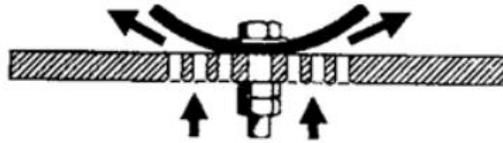


Figura 14. Válvula con plato perforado.

Fuente: (Campaña & Guamán, 2011, p. 85)

Válvula con resorte. Esta válvula posee un resorte interno que permite tener una mayor sensibilidad en el cierre rápido, con un leve aumento de la presión en el interior del acumulador. Es fácil de conseguir, ya que son del tipo check. En la Figura 15 se muestra el esquema interno que esta posee.

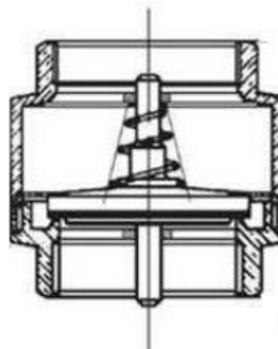


Figura 15. Válvula con resorte.

Fuente: (Campaña & Guamán, 2011, p. 85)

En el dispositivo construido se empleó la válvula con resorte, debido a la fácil adquisición de esta en el mercado.

2.5.3.4. ACUMULADOR.

Este elemento es una cámara que permite mantener un colchón de aire en su interior. Dicho aire tiene como fin absorber la sobrepresión que se genera en su interior por el efecto

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

del golpe de ariete que, a medida que se comprime, se libera y se aprovecha para elevar cierta cantidad de agua por medio de la tubería de descarga. El acumulador debe estar después de la válvula de descarga y de la salida de la tubería de elevación. A continuación, en la Figura 16 se pueden observar los acumuladores construidos para este proyecto.



Figura 16. Acumuladores utilizados en el proyecto.

Fuente: propia

2.5.3.5. ADMISIÓN DE AIRE AL ACUMULADOR.

La admisión de aire es fundamental para el ariete hidráulico, debido a que en cada golpe de ariete el acumulador va perdiendo cierta cantidad de este fluido. Por lo tanto, es necesario asegurar que haya un nivel de este lo más constante posible. Para ello hay dos métodos.

Válvula de aire. Es una válvula que permite la entrada de unas pocas burbujas de aire al acumulador. Es regulable, aunque su adaptación al dispositivo supone un accesorio más.

Orificio. Es un pequeño agujero que se realiza antes de la válvula de descarga. Tiene la gran desventaja de que, si el agujero es muy grande, el acumulador se llena de aire por

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

completo; mientras que, si este es muy pequeño, no ingresa suficiente fluido para mantener el colchón de aire como tal. En la Figura 17 se muestra el lugar de la perforación en el dispositivo.



Figura 17. Localización del orificio de admisión de aire.

Fuente: (Hernández Murillo, 2015, 6:25)

Bolas internas. Para mantener el colchón de aire, se utilizan pelotas plásticas o bolas de tenis que van ubicadas al interior del acumulador. Con estas no es necesario adaptar la válvula de aire o hacerle un agujero al ariete.

Para la construcción de los acumuladores de este proyecto se utilizaron pelotas plásticas y bolas de pimpón. Las cantidades específicas se encuentra en la Tabla 8.

2.5.3.6. TUBERÍA DE ALIMENTACIÓN.

Es el medio por la que se conduce agua al ariete hidráulico. Es primordial tener las siguientes consideraciones al instalar la tubería de alimentación: debe estar lo más recta posible para evitar las pérdidas debido a accesorios que desvíen o modifiquen la trayectoria

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

del caudal y el material de diseño debe resistir el impacto producido por el golpe de ariete. En la Figura 18 se puede ver un ejemplo de la instalación de la tubería tratada.



Figura 18. Instalación de la tubería de alimentación.

Fuente: (Rengifo & Gallego, 2016, p. 74)

2.5.3.7. TUBERÍA DE DESCARGA.

Esta tubería sirve para conducir el agua hasta el lugar donde se pretende almacenarla. Es necesario que esta siempre vaya hacia arriba, debido a que se pueden formar columnas de aire que impiden el libre paso del fluido. Para evitar que el agua impulsada por el dispositivo no se devuelva al acumulador, se puede colocar una válvula antirretorno tipo check. En la Figura 19 se puede ver la instalación de esta antes del acumulador.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22



Figura 19. Localización de la tubería de descarga en el ariete hidráulico.

Fuente: propia

2.5.4. VARIABLES DEL PROCESO

De acuerdo con el principio de funcionamiento y las componentes del ariete hidráulico, en el apéndice A se muestran las posibles variables que puede tener en dispositivo. Además, se muestra en la Figura 20 el diagrama de control de las variables del proceso.

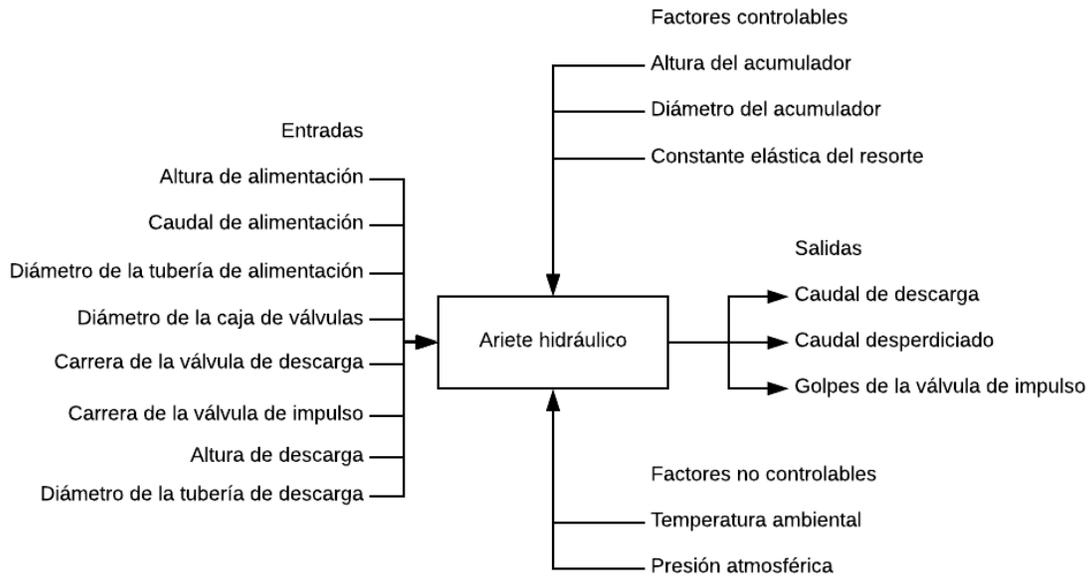


Figura 20. Diagrama de control de las variables del proceso.

Fuente: propia

2.5.5. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO.

Para esta parte, se va a describir el funcionamiento del ariete hidráulico con respecto a lo planteado por Acitores (2012). En referencia a las figuras mostradas, la válvula de impulso es tipo cheque y no utiliza resorte, tal y como se planteó construir el dispositivo de estudio.

Fase 1. El caudal de alimentación baja a través de una tubería y llega a la válvula de impulso, donde esta inicialmente se encuentra abierta y permite que se desperdicie cierta cantidad de agua. El comportamiento de esta fase se puede ver en la Figura 21.

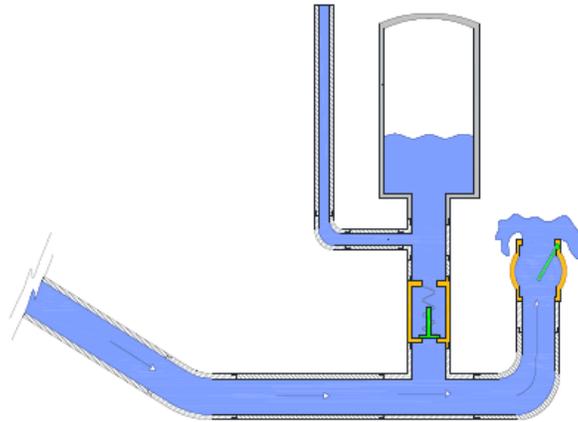


Figura 21. Esquema de la fase 1.

Fuente: (Acitores, 2012, p. 16)

Fase 2. A medida que el agua pasa por la válvula de impulso, el fluido va generando cierta presión en la tapa de dicha válvula, hasta obtener la suficiente para cerrarla instantáneamente y así producir el golpe de ariete. El comportamiento de esta fase se puede ver en la Figura 22.

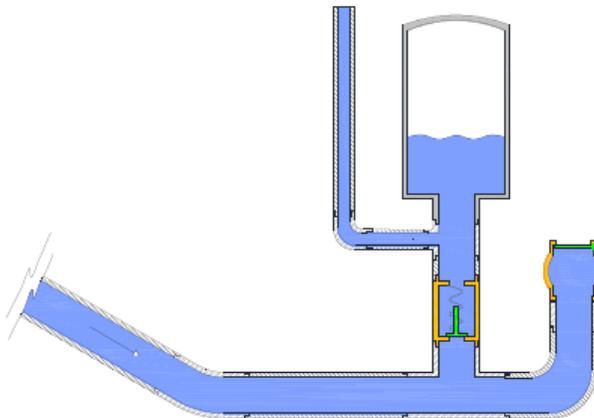


Figura 22. Esquema de la fase 2.

Fuente: (Acitores, 2012, p. 17)

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Fase 3. Cuando la tapa de la válvula de impulso se cierra bruscamente, se genera una sobrepresión en el cuerpo del ariete debido a la velocidad que posee la columna de líquido en la tubería de alimentación. El comportamiento de esta fase se puede ver en la Figura 23.

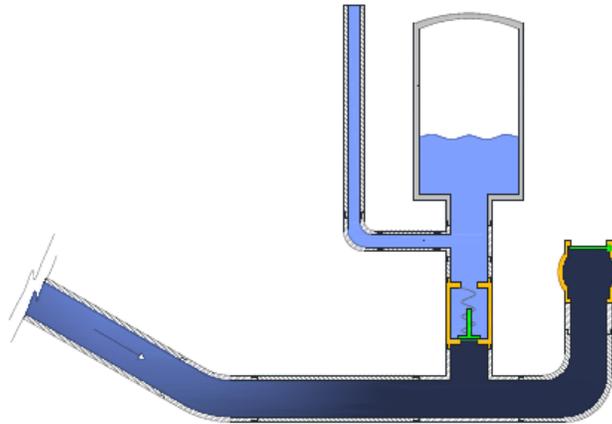


Figura 23. Esquema de la fase 3.

Fuente: (Acitores, 2012, p. 17)

Fase 4. Mientras que hay presión en el cuerpo del ariete, la válvula de descarga se empieza a abrir, permitiendo el paso del agua hacia el acumulador, generando presión al interior de este. El comportamiento de esta fase se puede ver en la Figura 24.

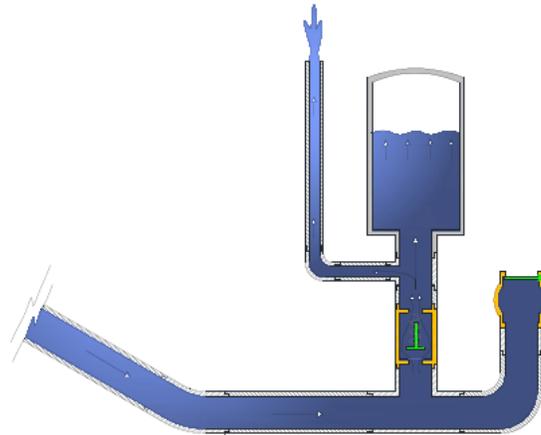


Figura 24. Esquema de la fase 4.

Fuente: (Acitores, 2012, p. 18)

Fase 5. Cuando la presión es la misma en ambos lados de la válvula de descarga, esta se cierra y se genera una especie de colchón de aire que permite generar una descompresión al interior del acumulador, por lo que se eleva cierta parte del caudal a través de la tubería de descarga. El comportamiento de esta fase se puede ver en la Figura 25.

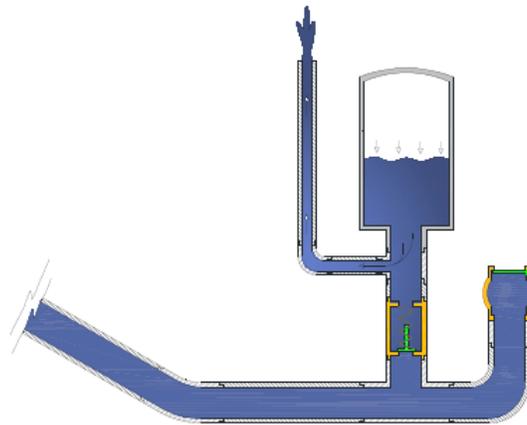


Figura 25. Esquema de la fase 5.

Fuente: (Acitores, 2012, p. 18)

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Fase 6. Por último, la caja de válvulas va perdiendo presión hasta el punto de que el tapón de la válvula de impulso se abre. A partir de esto, el ariete completa un ciclo y retorna a la fase 1, haciendo esto indefinidamente. El comportamiento de esta fase se puede ver en la Figura 26.

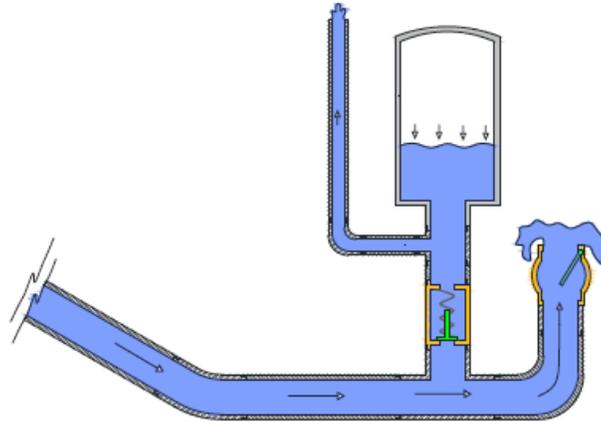


Figura 26. Esquema de la fase 6.

Fuente: (Acitores, 2012, p. 19)

2.5.6. MAPA DE INSTALACIÓN DEL ARIETE HIDRÁULICO.

En la Figura 27 se puede ver de forma gráfica la instalación del ariete, desde el tanque de alimentación hasta el depósito donde se va a almacenar el agua elevada. Cabe decir que la nomenclatura utilizada es diferente con respecto al desnivel de trabajo (altura de alimentación), caudal elevado (caudal de descarga) y altura de elevación (altura de descarga).

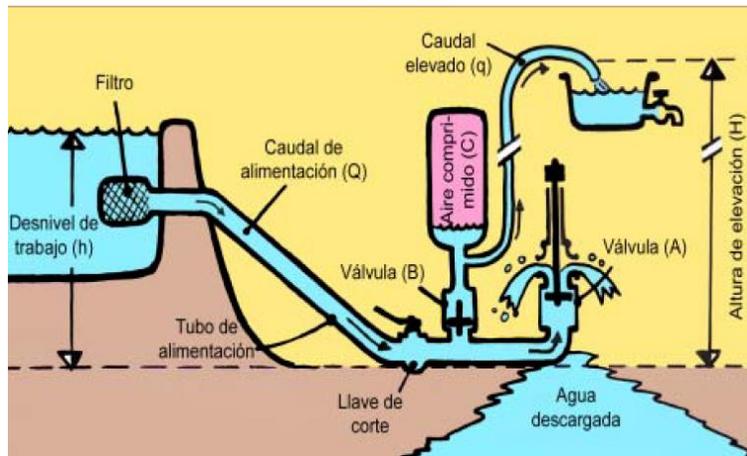


Figura 27. Mapa de instalación del ariete hidráulico.

Fuente: (J. M. Jiménez, s.f., p. 1)

2.5.7. CONFIGURACIONES DE OPERACIÓN.

Al momento de colocar a funcionar más de dos arietes hidráulicos, se pueden disponer en las dos siguientes configuraciones.

Configuración en serie. Si se piensa en elevar agua a un nivel superior, se pueden colocar dos o más arietes hidráulicos en serie, donde el dispositivo que está ubicado en la altura mayor se alimenta del caudal de descarga del que está más abajo. A medida que se van instalando uno tras otro, estos se deben reducir en tamaño. En la Figura 28 es posible ver el diagrama de instalación de dos arietes dispuestos en serie.

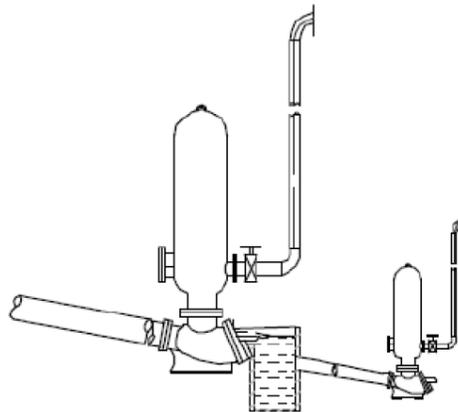


Figura 28. Arietes en serie.

Fuente: (Chi, 2002, p. 103)

Configuración en paralelo. Esta configuración se puede instalar siempre y cuando la demanda de agua sea alta y un solo ariete por sí mismo no sea capaz de suplirla. Para ello, se alimentan dos o más dispositivos con sus respectivas tuberías de alimentación y, posteriormente se unen a la misma tubería de descarga. En la Figura 29 se puede ver el diagrama de instalación de tres arietes dispuestos en paralelo.

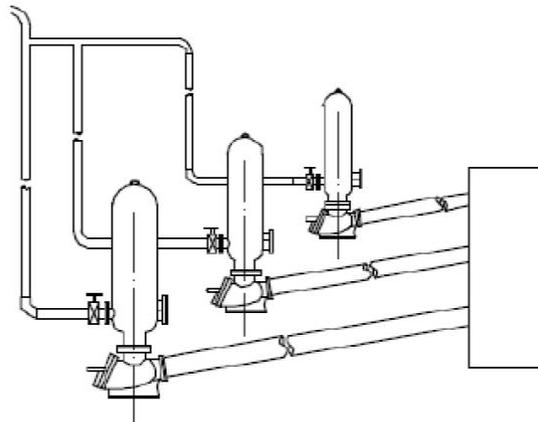


Figura 29. Arietes en paralelo.

Fuente: (Chi, 2002, p. 102)

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

2.5.8. CONFIGURACIONES CONSTRUCTIVAS.

En la revisión de la literatura, se encontraron cuatro diferentes formas constructivas del ariete hidráulico. Estas se describirán a continuación.

Con una válvula de impulso. Es el ariete más común que se puede encontrar. Su fabricación no es compleja y no representa una mayor inversión económica. En la Figura 30 se puede ver un ejemplar para este tipo de configuración.



Figura 30. Ariete hidráulico con una válvula de impulso.

Fuente: (Arapa, 2016, p. 159)

Con una válvula de impulso dispuesta horizontalmente. En este tipo de construcción, la válvula de impulso se coloca seguida de la te del cuerpo del ariete. Con respecto a lo encontrado por los autores Inthachot et al. (2015), la operación de esta configuración permite un breve aumento de la eficiencia del dispositivo si se coloca dicha válvula verticalmente, debido a que no hay pérdidas por parte del codo que une la válvula de impulso con el cuerpo del ariete. En la Figura 31 se puede un ejemplo para este tipo de configuración.



Figura 31. Ariete hidráulico con una válvula de impulso dispuesta horizontalmente.

Fuente: (Inthachot et al., 2015, p. 111)

Multipulsor. Es un tipo de ariete hidráulico que consta de tres válvulas de impulso colocadas en serie. Se demostró por medio de pruebas de funcionamiento que esta configuración es capaz de elevar agua a alturas mayores que si se utiliza una sola de estas válvulas (Campoverde & Pizarro, 2011). Su construcción es un tanto compleja, debido a que es necesario utilizar piezas metálicas y soldadura. En la Figura 32 se puede ver el dispositivo tratado.



Figura 32. Ariete hidráulico multipulsor.

Fuente: (Campoverde & Pizarro, 2011, p. 32)

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Con dos cámaras de aire y una válvula de impulso. Es una bomba ariete que consta de una válvula de impulso que comparte dos acumuladores ubicados paralelamente. Por medio de pruebas, se comprobó que este dispositivo tiene un leve aumento en la eficiencia al tener esta configuración, pero es insignificante si se compara con un ariete sencillo (Castillo Bermúdez, Alzate Sierra, & Holguín, 2000). En la Figura 33 se pueden observar los planos de diseño respectivos.

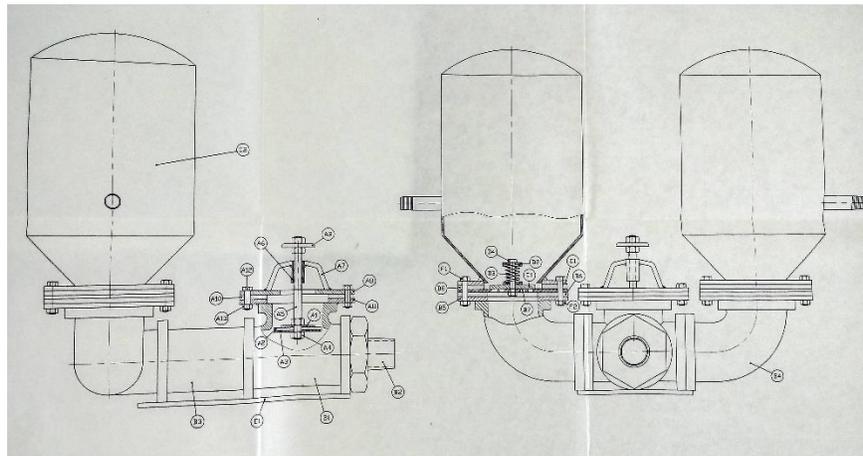


Figura 33. Ariete hidráulico con dos cámaras de aire y una válvula de impulso.

Fuente: (Castillo Bermúdez et al., 2000, p. 113)

Para efectos constructivos, el ariete llevado a cabo en el presente experimento se construyó con una válvula de impulso.

2.5.9. EJEMPLOS DE ARIETES HIDRÁULICOS.

A continuación, se presentan algunos prototipos de arietes hidráulicos, que servirán para ver la gran variedad que es posible encontrar de estos dispositivos.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22



Figura 34. Ariete hidráulico fabricado en latón polipropileno.

Fuente: (Alba, 2017, <http://arietesalba.es/descargar-pdf/index.html>)

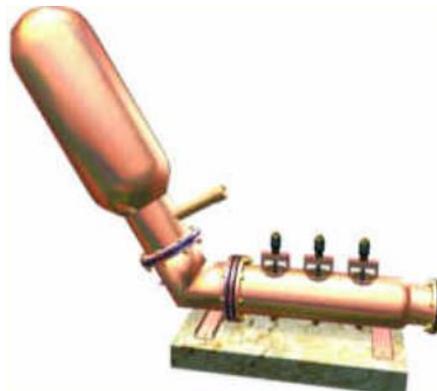


Figura 35. Ariete hidráulico multipulsor AHM CITA 6-L3V.

Fuente: (Montecinos Larrosa & Gallardo Quiñones, 2004, <https://bit.ly/2PKloYW>)

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22



Figura 36. Ariete hidráulico multipulsor AHM CITA 3-L3V-AG.

Fuente: (Montecinos Larrosa & Gallardo Quiñones, 2004, <https://bit.ly/2PKloYW>)



Figura 37. Ariete hidráulico multipulsor AH-4 (IMPAG).

Fuente: (Montecinos Larrosa & Gallardo Quiñones, 2004, <https://bit.ly/2PKloYW>)



Figura 38. Ariete hidráulico multipulsor DANÉS.

Fuente: (Montecinos Larrosa & Gallardo Quiñones, 2004, <https://bit.ly/2PKloYW>)

2.5.10. COMPARACIÓN CON OTROS TIPOS DE BOMBEO.

A continuación, en la Tabla 3 se muestra la comparación de los dos tipos de equipos de bombeo más comunes, comparado con el ariete hidráulico.

Descripción	Bomba-Motor	Bomba-Eléctrica	Ariete hidráulico
Energía Externa	Si	Si	No
Lubricantes	Si	Si	No
Inversión inicial	Alto	Bajo	Bajo
Mantenimiento	Si	Si	No
Confiabledad	Alta	Media	Alta
Ruido	Alto	Medio	Medio-alto
Eficiencia	Alto	Alto	Bajo

Tabla 3. Comparación del ariete hidráulico con respecto a otros tipos de bombeo.

Fuente: (Rengifo & Gallego, 2016, p. 32)

Como es posible observar en la tabla anterior, el ariete hidráulico tiene la gran ventaja de que no utiliza energía eléctrica o fósil, algún tipo de lubricante o requerimientos de mantenimiento, mientras que las bombas de motor y eléctricas esto es indispensable para

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

su supervivencia; aunque la gran desventaja que tiene el equipo en cuestión es su baja eficiencia, por lo que el ariete entraría en una gran desventaja al respecto, aún con las bondades mencionadas.

2.5.11. REQUISITOS DE INSTALACIÓN.

Es necesario considerar ciertos requisitos para seleccionar el ariete hidráulico como dispositivo de bombeo.

2.5.11.1. REQUISITOS GEOGRÁFICOS.

Este requisito hace referencia a las características del lugar donde se planea instalar el dispositivo. Para esto, es necesario tener en cuenta lo siguiente.

Cantidad de agua disponible. Es necesario que haya una corriente de agua fluyendo por una quebrada o un río y que esta sea apta para su destinación final, es decir, que no contenga químicos nocivos para la salud o que afecte la calidad de vida del usuario final.

Altura de alimentación. Es necesario que haya una caída mínima para que el agua obtenga presión y velocidad al llegar al ariete. Por tanto, no es posible instalar este dispositivo en zonas geográficamente planas en las que no haya alguna clase de desnivel, debido a que el dispositivo no trabajaría.

Sitio de disposición. Es necesario instalar el ariete en un lugar donde no se produzca la erosión del terreno, por lo que se recomienda construir una base sólida que sea muy resistente para evitar dicho efecto. Además, el sitio de instalación debe estar alejado del cauce del río o de la quebrada, con el fin de evitar que el agua en tiempos de invierno

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

ocasiona daños en el equipo. Por último, es necesario fijar muy bien el ariete para evitar movimientos bruscos ocasionados por el golpe generado por la válvula de impulso.

2.5.11.2. ALIMENTACIÓN Y DESCARGA.

Este requerimiento describe las condiciones mínimas que debe tener la admisión y descarga del agua de un ariete hidráulico. Estas se detallan a continuación.

Filtros en la tubería de alimentación. Es primordial garantizar la calidad del agua que ingresa al ariete, separando residuos no deseados para que no obstruyan el comportamiento del dispositivo. Para ello, se recomienda utilizar un tanque que contenga filtros de residuos sólidos, tales como mallas o espumas no muy tupidas. Para filtrar elementos más pequeños como la arena, es aconsejable instalar la tubería de alimentación al menos 20 cm más alto que el fondo del recipiente, con el fin de que el peso de este material permanezca en dicho lugar.

Tubería de alimentación. Esta debe ser fabricada de un material que sea capaz de soportar las sobrepresiones generadas por el golpe de ariete. Es necesario que se instale lo más recta posible (incluso hasta la entrada del dispositivo), con el fin de evitar pérdidas en accesorios como, por ejemplo, los codos.

Tubería de descarga. Esta tubería debe ir siempre hacia arriba y por ningún motivo debe tener variaciones que hagan que la trayectoria apunte hacia abajo, puesto que se producen burbujas de aire al interior de la sección transversal y se evita el correcto funcionamiento del dispositivo. Por último, cabe mencionar lo dicho por Hernández Murillo (2015), donde explica que para tener una ganancia de altura se puede construir una especie de acumulador con un recipiente que contenga esferas internas, con el fin de generar más presión en la salida (54:27).

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

3. CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA

En el presente capítulo se presenta el componente matemático del ariete hidráulico, las pruebas realizadas a los resortes, la fabricación del dispositivo, la experimentación y los resultados obtenidos.

3.1. MODELO MATEMÁTICO

En esta sección se presentan las ecuaciones que caracterizan al ariete hidráulico, con base en lo consultado en la literatura. Para ello, se basó en el trabajo realizado por Rengifo & Gallego (2016) para las secciones 3.1.1 hasta la sección 3.1.5, Bustamante & Quezada (2009) para las secciones 3.1.6 hasta la 3.1.8 (sin incluir la sección 3.1.8.3) y 3.1.9, y Arapa (2016) para la sección 3.1.8.3 Además, Se utilizó la nomenclatura de cada variable con respecto a la tabla ubicada en el Apéndice A.

Se hace la claridad de que lo presentado en esta sección sirve para ver las expresiones teóricas de la bomba ariete con respecto a los realizado por otros autores, por lo que para efectos de la presente investigación solo se realizará los cálculos respectivos de las secciones 3.1.12, 3.1.13.3 y 3.1.14, donde el resultado de estas dos últimas se puede encontrar en la Tabla 17 a la Tabla 20.

3.1.1. ALTURA DE ALIMENTACIÓN

De acuerdo con la relación encontrada por Watt (1975), el cálculo del desnivel necesario para la alimentación de agua al ariete hidráulico se obtiene por medio de la Ecuación 1, donde se puede observar que, la altura de alimentación (h_{al}) equivale a una tercera parte de la altura de descarga (h_{desc}). Se recomienda que el valor resultante este dentro del rango de 1 a 12 metros.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

$$h_{al} = \frac{1}{3} \cdot h_{desc}$$

Ecuación 1. Cálculo para determinar la altura de alimentación.

Fuente: (Rengifo & Gallego, 2016, p. 36)

3.1.2. DIÁMETRO DE LA TUBERÍA DE ALIMENTACIÓN

Para el buen funcionamiento del ariete, Watt (1975) recomienda utilizar la Ecuación 2, donde esta relaciona la longitud de la tubería de alimentación (L_{al}) y el diámetro interno (ϕ_{al}) de esta.

$$\phi_{al} = \frac{L_{al}}{150}$$

Ecuación 2. Diámetro de la tubería de alimentación.

Fuente: (Rengifo & Gallego, 2016, p. 37)

3.1.3. DIÁMETRO DE LA TUBERÍA DE DESCARGA

El diámetro de la tubería de descarga (ϕ_{desc}) se calcula como la mitad del diámetro interno de la tubería de alimentación. En la Ecuación 3 se puede ver dicha relación.

$$\phi_{desc} = \frac{\phi_{al}}{2}$$

Ecuación 3. Diámetro de la tubería de descarga.

Fuente: (Rengifo & Gallego, 2016, p. 37)

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

3.1.4. CÁLCULO DEL CAUDAL DE DESCARGA

3.1.4.1. CAUDAL LIBRE.

El caudal libre (Q_{libre}) es la cantidad de agua que sale por la válvula de impulso mientras esta se encuentra abierta, y el líquido fluye sin interrupción. Esta se calcula con respecto a la Ecuación 4, que relaciona la velocidad de salida del fluido (V_x) (calculada con la Ecuación 5, donde γ equivale al peso específico del agua) con respecto al área donde escapa el líquido (diferencia entre el área del tapón (A_{imp}) y la sección transversal interna de la válvula (A_{vi})).

$$Q_{libre} = V_x \cdot (A_{vi} - A_{imp})$$

Ecuación 4. Cálculo del caudal libre.

Fuente: (Rengifo & Gallego, 2016, p. 44)

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 + h_f + h_l$$

Ecuación 5. Ecuación general de la energía.

Fuente: (Mott, 2006, p. 233)

3.1.4.2. COEFICIENTE DE DESCARGA.

El coeficiente de descarga (C_d) es un valor adimensional que relaciona el desplazamiento del agua a través de la tubería de alimentación con el nivel que tiene el fluido en un tanque o embalse. Para ello, se utiliza la Ecuación 6, donde el denominador posee el área de la tubería de alimentación (A_{ta}), la gravedad y el diferencial de altura de alimentación y descarga.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

$$C_d = \frac{Q_{libre}}{A_{ta} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot (h_{desc} - h_{al})}}$$

Ecuación 6. Cálculo del coeficiente de descarga.

Fuente: (Rengifo & Gallego, 2016, p. 38)

3.1.4.3. VELOCIDAD DE CIERRE DE LA VÁLVULA DE IMPULSO.

La velocidad de cierre de la válvula de impulso (U_c) sirve para determinar el tiempo que tarda el tapón en cumplir su carrera (C_{imp}). Para esto, en la Ecuación 7 se relaciona la carrera de la válvula de impulso (C_{imp}) con una constante de frecuencia.

$$U_c = 0,135 \cdot C_{imp}$$

Ecuación 7. Velocidad de cierre de la válvula de impulso.

Fuente: (Rengifo & Gallego, 2016, p. 38)

3.1.4.4. CAUDAL DE DESCARGA.

Con respecto a lo anterior, se puede determinar el caudal de descarga (Q_{desc}). Este es el caudal teórico que el ariete hidráulico puede entregar. En la Ecuación 8 se puede ver la fórmula para su cálculo.

$$Q_{desc} = \frac{\pi \cdot h_{al} \cdot \phi_{al}^2 \cdot U_c \cdot C_d}{10 \cdot h_{desc}}$$

Ecuación 8. Cálculo del caudal de descarga.

Fuente: (Rengifo & Gallego, 2016, p. 37)

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

3.1.5. POTENCIA DEL ARIETE HIDRÁULICO

La potencia generada por el ariete hidráulico (P), se calcula por medio de la Ecuación 9, donde se realiza el producto del peso específico del agua (γ), el caudal de descarga y la altura de descarga.

$$P = \gamma \cdot Q_{desc} \cdot h_{desc}$$

Ecuación 9. Cálculo teórico de la potencia del ariete hidráulico.

Fuente: (Rengifo & Gallego, 2016, p. 43)

3.1.6. PRESIÓN MÁXIMA EN LA CAJA DE VÁLVULAS

Para el cálculo de la presión máxima que hay en la caja de válvulas (P_{max}), se utiliza la Ecuación 10, donde esta muestra el producto de la densidad del agua (ρ), la gravedad y la presión ejercida por el golpe de ariete (P_{ga}) y la altura de alimentación (P_{al}), respectivamente.

$$P_{max} = \rho \cdot g \cdot (P_{al} + P_{ga})$$

Ecuación 10. Presión máxima en la caja de válvulas.

Fuente: (Bustamante & Quezada, 2009, p. 24)

3.1.7. DIMENSIONAMIENTO DEL ACUMULADOR

Para este caso, se va a presentar el cálculo teórico del volumen del acumulador y la cantidad máxima de agua que puede ingresar en este con respecto a las bolas internas adicionadas.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

3.1.7.1. VOLUMEN DEL ACUMULADOR.

Para calcular el volumen de cada acumulador (V_{ac}), se utiliza la Ecuación 11.

$$V_{ac} = \frac{\pi}{4} \cdot \phi_{ac}^2 \cdot h_{ac}$$

Ecuación 11. Calculo del volumen del acumulador.

Fuente: propia (cambiar cita)

3.1.7.2. VOLUMEN MÁXIMO DE AGUA AL INTERIOR DEL ACUMULADOR.

El volumen máximo del agua al interior del acumulador (V_T) se calcula con la Ecuación 12, donde se hace referencia al volumen del acumulador menos el volumen que ocupan cada una de las esferas. Además, en la Ecuación 13 se muestra la expresión del cálculo del volumen total de las esferas, debido a que cada acumulador posee la misma variedad de estas. Cabe aclarar que no se tomó en cuenta la pequeña deformación que las bolas sufren debido a la presión interna del acumulador.

$$V_T = V_{ac} - V_{esferas}$$

Ecuación 12. Volumen total de agua al interior del acumulador.

Fuente: propia

$$V_{esferas} = \#_{esferas} \cdot \frac{\pi \cdot \phi_{esfera}^3}{6}$$

Ecuación 13. Volumen que ocupan las esferas.

Fuente: propia

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

3.1.8. EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA

Para determinar la evaluación de la eficiencia del dispositivo, se encontró tres posibles expresiones en la literatura consultada.

3.1.8.1. EFICIENCIA DE D'AUBUISSON.

La eficiencia de D'Aubuisson (η_λ) se calcula por medio de la Ecuación 14.

$$\eta_\lambda = \frac{Q_{desc} \cdot h_{desc}}{h_{al} \cdot (Q_{desp} + Q_{desc})}$$

Ecuación 14. Eficiencia de D'Aubuisson.

Fuente: (Bustamante & Quezada, 2009, p. 31)

3.1.8.2. EFICIENCIA RANKINE.

La eficiencia Rankine (η_R) se obtiene utilizando la Ecuación 15.

$$\eta_R = \frac{Q_{desc} \cdot h_{desc}}{h_{al} \cdot (Q_{desp} + Q_{desc})}$$

Ecuación 15. Eficiencia Rankine.

Fuente: (Bustamante & Quezada, 2009, p. 31)

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

3.1.8.3. EFICIENCIA DE FABRICACIÓN.

La eficiencia de fabricación del ariete hidráulico (η) se obtiene al relacionar el caudal y la altura de descarga con la alimentación, respectivamente. En la ecuación 16 se puede ver la expresión de ello.

$$\eta = \frac{Q_{desc} \cdot h_{desc}}{Q_{al} \cdot h_{al}}$$

Ecuación 16. Cálculo de la eficiencia de fabricación del ariete hidráulico.

Fuente: (Arapa, 2016, p. 158)

Para efectos de este documento, se va a utilizar esta eficiencia para determinar el comportamiento de la bomba ariete.

3.1.9. RENDIMIENTO VOLUMÉTRICO

El rendimiento volumétrico (η_v) hace referencia a la cantidad porcentual de agua que el ariete eleva con respecto al caudal de alimentación (suma entre el caudal elevado y desperdiciado). En la Ecuación 17 se puede ver la expresión para el cálculo de dicha variable.

$$\eta_v = \frac{Q_{desc}}{Q_{desp} + Q_{desc}} \cdot 100\%$$

Ecuación 17. Expresión matemática del rendimiento volumétrico.

Fuente: (Bustamante & Quezada, 2009, p. 31)

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

3.2. CÁLCULO DEL DIMENSIONAMIENTO DEL ACUMULADOR

Para este caso, se va a presentar el cálculo teórico del volumen del acumulador y la cantidad máxima de agua que puede ingresar en este con respecto a las bolas internas adicionadas.

3.2.1.1. VOLUMEN DEL ACUMULADOR.

Volumen del acumulador 1.

$$V_{ac. 1} = \frac{\pi}{4} \cdot \phi_{ac}^2 \cdot h_{ac} = \frac{\pi}{4} \cdot (54,58 \text{ mm})^2 \cdot 300\text{mm} = 701904,77\text{mm}^2 \cdot \frac{1 \text{ litro}}{10^6\text{mm}^2}$$

$$V_{ac. 1} = 0,702 \text{ litros}$$

Volumen del acumulador 2.

$$V_{ac. 2} = \frac{\pi}{4} \cdot \phi_{ac}^2 \cdot h_{ac} = \frac{\pi}{4} \cdot (54,58 \text{ mm})^2 \cdot 855\text{mm} = 2000428,61\text{mm}^2 \cdot \frac{1 \text{ litro}}{10^6\text{mm}^2}$$

$$V_{ac. 1} = 2,000 \text{ litros}$$

Volumen del acumulador 3.

$$V_{ac. 3} = \frac{\pi}{4} \cdot \phi_{ac}^2 \cdot h_{ac} = \frac{\pi}{4} \cdot (79,00 \text{ mm})^2 \cdot 300\text{mm} = 1470500,98\text{mm}^2 \cdot \frac{1 \text{ litro}}{10^6\text{mm}^2}$$

$$V_{ac. 1} = 1,471 \text{ litros}$$

Volumen del acumulador 4.

$$V_{ac. 4} = \frac{\pi}{4} \cdot \phi_{ac}^2 \cdot h_{ac} = \frac{\pi}{4} \cdot (79,00 \text{ mm})^2 \cdot 408\text{mm} = 1999881,34\text{mm}^2 \cdot \frac{1 \text{ litro}}{10^6\text{mm}^2}$$

$$V_{ac. 1} = 2,000 \text{ litros}$$

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Volumen del acumulador 5.

$$V_{ac. 5} = \frac{\pi}{4} \cdot \Phi_{ac}^2 \cdot h_{ac} = \frac{\pi}{4} \cdot (107,70 \text{ mm})^2 \cdot 300 \text{ mm} = 2733018,3 \text{ mm}^2 \cdot \frac{1 \text{ litro}}{10^6 \text{ mm}^2}$$

$$V_{ac. 1} = 2,733 \text{ litros}$$

Volumen del acumulador 6.

$$V_{ac. 6} = \frac{\pi}{4} \cdot \Phi_{ac}^2 \cdot h_{ac} = \frac{\pi}{4} \cdot (107,70 \text{ mm})^2 \cdot 220 \text{ mm} = 2004213,4 \text{ mm}^2 \cdot \frac{1 \text{ litro}}{10^6 \text{ mm}^2}$$

$$V_{ac. 1} = 2,000 \text{ litros}$$

Los resultados obtenidos se encuentran consignados en la Tabla 8. Para más información, véase la sección 3.5.2 en la parte de los acumuladores.

3.2.1.2. VOLUMEN MÁXIMO DE AGUA AL INTERIOR DEL ACUMULADOR.

Volumen máximo de agua al interior del acumulador 1.

$$V_{esferas} = \#_{esferas} \cdot \frac{\pi \cdot \Phi_{esfera}^3}{6} = 5 \cdot \frac{\pi \cdot (36 \text{ mm})^3}{6} = 122145,12 \text{ mm}^2 \cdot \frac{1 \text{ litro}}{10^6 \text{ mm}^2}$$

$$V_{esferas} = 0,122 \text{ litros}$$

$$V_T = V_{ac} - V_{esferas} = 0,702 \text{ litros} - 0,122 \text{ litros} = 0,580 \text{ litros}$$

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Volumen máximo de agua al interior del acumulador 2.

$$V_{esferas} = \#_{esferas} \cdot \frac{\pi \cdot \phi_{esfera}^3}{6} = 15 \cdot \frac{\pi \cdot (36 \text{ mm})^3}{6} = 366435,3 \text{ mm}^2 \cdot \frac{1 \text{ litro}}{10^6 \text{ mm}^2}$$

$$V_{esferas} = 0,366 \text{ litros}$$

$$V_T = V_{ac} - V_{esferas} = 2,000 \text{ litros} - 0,366 \text{ litros} = 1,634 \text{ litros}$$

Volumen máximo de agua al interior del acumulador 3.

$$V_{esferas} = \#_{esferas} \cdot \frac{\pi \cdot \phi_{esfera}^3}{6} = 3 \cdot \frac{\pi \cdot (75 \text{ mm})^3}{6} = 662679,7 \text{ mm}^2 \cdot \frac{1 \text{ litro}}{10^6 \text{ mm}^2}$$

$$V_{esferas} = 0,663 \text{ litros}$$

$$V_T = V_{ac} - V_{esferas} = 1,471 \text{ litros} - 0,663 \text{ litros} = 0,808 \text{ litros}$$

Volumen máximo de agua al interior del acumulador 4.

$$V_{esferas} = \#_{esferas} \cdot \frac{\pi \cdot \phi_{esfera}^3}{6} = 3 \cdot \frac{\pi \cdot (75 \text{ mm})^3}{6} = 662679,7 \text{ mm}^2 \cdot \frac{1 \text{ litro}}{10^6 \text{ mm}^2}$$

$$V_{esferas} = 0,663 \text{ litros}$$

$$V_T = V_{ac} - V_{esferas} = 2,000 \text{ litros} - 0,663 \text{ litros} = 1,337 \text{ litros}$$

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Volumen máximo de agua al interior del acumulador 5.

$$V_{esferas} = \#_{esferas} \cdot \frac{\pi \cdot \phi_{esfera}^3}{6} = 3 \cdot \frac{\pi \cdot (75 \text{ mm})^3}{6} = 662679,7 \text{ mm}^2 \cdot \frac{1 \text{ litro}}{10^6 \text{ mm}^2}$$

$$V_{esferas} = 0,663 \text{ litros}$$

$$V_T = V_{ac} - V_{esferas} = 2,733 \text{ litros} - 0,663 \text{ litros} = 2,070 \text{ litros}$$

Volumen máximo de agua al interior del acumulador 6.

$$V_{esferas} = \#_{esferas} \cdot \frac{\pi \cdot \phi_{esfera}^3}{6} = 2 \cdot \frac{\pi \cdot (75 \text{ mm})^3}{6} = 441786,5 \text{ mm}^2 \cdot \frac{1 \text{ litro}}{10^6 \text{ mm}^2}$$

$$V_{esferas} = 0,442 \text{ litros}$$

$$V_T = V_{ac} - V_{esferas} = 2000 \text{ litros} - 0,442 \text{ litros} = 1,558 \text{ litros}$$

3.3. DETERMINACIÓN DE LA CONSTANTE ELÁSTICA DE LOS RESORTES

En las variaciones planteadas para el ariete hidráulico, fue necesario determinar experimentalmente el valor de la constante elástica para los resortes planteados.

Inicialmente se adquirieron los resortes en un lugar especializado para ello. Debido a que se desconocía el valor de la constante elástica, fue necesario utilizar ocho de estos, puesto que se desconocía el valor de su constante elástica. En la Figura 39 se pueden apreciar dichos resortes.



Figura 39. Resortes adquiridos.

Fuente: propia

Para efectos del experimento, la denominación dada por los resortes de la Figura 39, de izquierda a derecha es: 5, 3, 8, 1, 7, 4, 2 y 6. A diferencia de los bancos utilizados para determinar la constante elástica de resortes de tensión, los utilizados en este proyecto son de compresión. Por lo tanto, fue necesario diseñar un equipo útil para este tipo de resortes, puesto que estos no se pueden alargar, debido a que se modificaría el valor de la constante elástica.

Posterior a esto, se construyó un banco de pruebas para obtener los datos necesarios en la determinación experimental de la constante elástica de los resortes de compresión. En la Figura 40 se puede ver dicho banco construido.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22



Figura 40. Banco de prueba para la determinación de la constante elástica.

Fuente: propia

Como se aprecia en la Figura 40, hubo diversidad con respecto al diámetro interno de los resortes, por lo que fue necesario utilizar tubos de diferente sección transversal.

Los materiales utilizados en la fabricación del banco fueron: una base, una plataforma y tres émbolos de madera, tres tubos y tapones soldados de PVC, 72 tuercas, seis arandelas, tres tornillos sin fin, una plataforma de nylon y tres émbolos de madera.

En la modificación de los materiales se utilizó diferentes herramientas, tales como: el torno, para los cortes de la plataforma de nylon; un taladro de banco con broca sierra, para la apertura de los huecos de la base de madera, y con broca normal para la apertura de los huecos de las plataformas; un mototool con lija, para eliminar la superficie sobresaliente; el esmeril, para modificar los émbolos de madera que se posicionan en el interior de cada tubo. Finalmente, se diseñó una regla en el émbolo, con el objetivo de tener una medida más clara al momento de medir la distancia que se había desplazado.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

3.3.1. PROCEDIMIENTO APLICADO.

Inicialmente se tomaron las medidas de las dimensiones de cada uno de los resortes involucrados con un pie de rey, donde estas incluían el diámetro interno y externo, el calibre, la longitud natural y el número de espiras. El error del instrumento fue de 0,05 mm. Esta información se puede encontrar en la tabla ubicada en el Apéndice B. En la Figura 41 se muestra la medida práctica del diámetro interno del resorte 5.

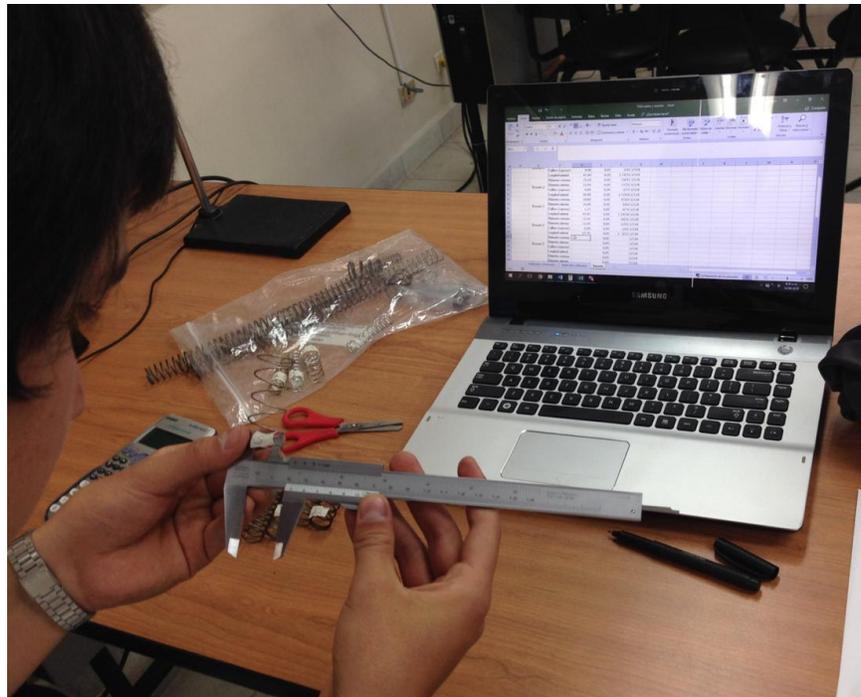


Figura 41. Medida del diámetro interno del resorte 5.

Fuente: propia

Luego, se procedió a realizar la prueba experimental para cada resorte en el banco creado para ello. Primero, se lubricó el interior del tubo con aceite para evitar la fricción al interior. Después de esto, se insertó el resorte al interior de este. Luego se midió el peso inicial con una balanza electrónica, donde dicho peso era el conjunto conformado por el émbolo, las tuercas y el tornillo. Posteriormente, al estar este peso inicial al interior del tubo

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

comprimiendo el resorte, se visualizó la distancia que deslizó el émbolo, donde esta se le restó a la longitud del tubo (la longitud del tubo se refiere a la distancia desde la base interna del tapón soldado hasta la parte superior del tubo PVC).

En seguida, se instaló la plataforma de madera al tornillo y, nuevamente, se visualizó el desplazamiento obtenido del émbolo y se le restó la longitud del tubo. Seguidamente, se iban añadiendo las pesas de laboratorio (cuyas magnitudes eran de 50, 100, 200 y 400 gramos), y se observaba el desplazamiento del émbolo. Cuando este estaba completamente dentro del tubo, se contaba la cantidad de tuercas que estaban en el rango interno de la longitud del tubo (longitud de 3,08 mm cada una). Cuando el peso estaba alrededor de los 440 gramos, se realizaba el cambio de plataforma de madera por la de nylon y luego se procedía a colocarle de nuevo pesas. La prueba terminaba cuando el resorte estaba comprimido casi por completo. Por último, se cambiaba el resorte, se introducía otro y se repetían los mismos pasos.

Como se pudo notar, la medida de la distancia desplazada por el émbolo y las tuercas luce un tanto compleja, por lo que fue necesario diseñar una tabla en Excel que cumpliera con los requisitos anteriores, donde esto se explica mejor en la sección 1.3.2. En la Figura 42 se puede observar la forma en la que se realizaba la prueba a uno de los resortes, utilizando la plataforma de nylon y un peso de 50 g, en el banco en el tubo de PVC de 1/2".

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22



Figura 42. Prueba experimental para la toma de datos de los resortes.

Fuente: propia

3.3.2. DATOS OBTENIDOS.

Al aplicar el procedimiento anterior, se realizó la toma de datos para cada una de las pruebas, donde estos se consignaron en las tablas diseñadas para ello.

En dichas tablas se puede ver la información consignada, entre la que está el número de pruebas realizadas por resorte, que varía dependiendo del mismo; masa añadida, que se refiere a las pesas de laboratorio que se iban agregando a la plataforma; longitud total del resorte, que se refería a la distancia que este tenía a medida que se iba comprimiendo; y la deformación que iba sufriendo este.

La longitud de tubo permanecía constante; la longitud del émbolo dependía del desplazamiento de este hasta el punto de que se introducía completamente en el tubo, donde permanecía constante; para la longitud de las tuercas, se contaban la cantidad de estas a medida que se iban introduciendo en el tubo, donde dicha cantidad se multiplicaba

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

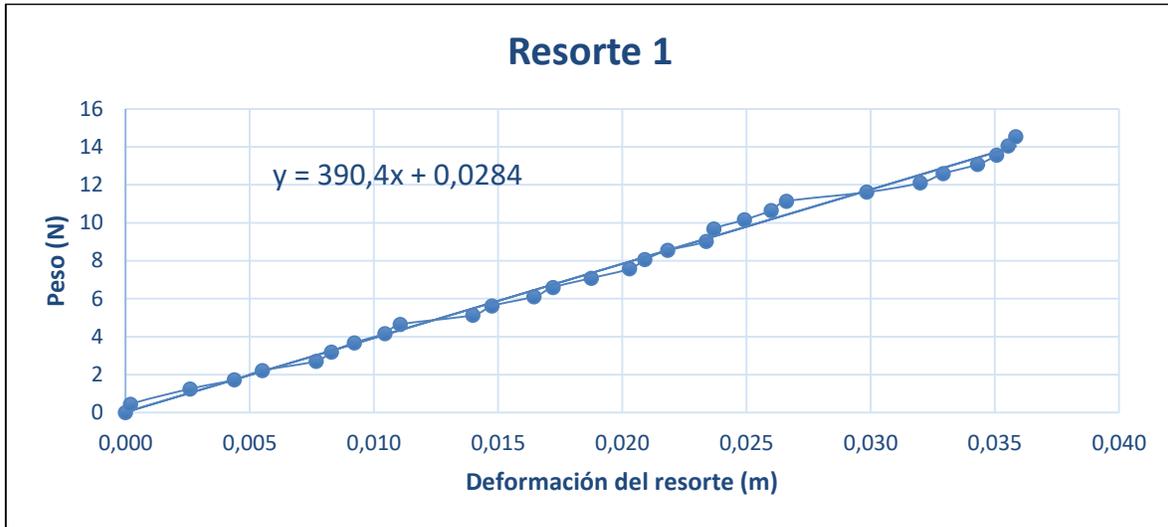
por la distancia de una individual (3,08 mm). En la Tabla 4 se muestra el ejemplo de los datos experimentales consignados para el resorte 1.

Determinación de la constante elástica del resorte												
Resorte		Masa y peso			Longitud del resorte							
Número del resorte	Número de Prueba	Masa añadida (g)	Masa total (Kg)	Peso (N)	Longitud del tubo (mm)	Longitud del embolo (mm)	Cantidad de tuercas	Longitud de las tuercas (mm)	Longitud total del resorte (mm)	Longitud total del resorte (m)	Deformación del resorte (mm)	Deformación del resorte (m)
1	1	0	0,000	0,000	75,40	28,40	0,00	0,0000	47,00	0,0470	0,00	0,0000
	2	45	0,045	0,439	75,40	28,60	0,00	0,0000	46,80	0,0468	0,20	0,0002
	3	128	0,128	1,249	75,40	31,00	0,00	0,0000	44,40	0,0444	2,60	0,0026
	4	177	0,177	1,728	75,40	32,78	0,00	0,0000	42,62	0,0426	4,38	0,0044
	5	227	0,227	2,216	75,40	33,30	0,20	0,6160	41,48	0,0415	5,52	0,0055
	6	277	0,277	2,704	75,40	33,30	0,90	2,7720	39,33	0,0393	7,67	0,0077
	7	327	0,327	3,192	75,40	33,30	1,10	3,3880	38,71	0,0387	8,29	0,0083
	8	377	0,377	3,680	75,40	33,30	1,40	4,3120	37,79	0,0378	9,21	0,0092
	9	427	0,427	4,168	75,40	33,30	1,80	5,5440	36,56	0,0366	10,44	0,0104
	10	476	0,476	4,646	75,40	33,30	2,00	6,1600	35,94	0,0359	11,06	0,0111
	11	526	0,526	5,134	75,40	33,30	2,95	9,0860	33,01	0,0330	13,99	0,0140
	12	576	0,576	5,622	75,40	33,30	3,20	9,8560	32,24	0,0322	14,76	0,0148
	13	626	0,626	6,110	75,40	33,30	3,75	11,5500	30,55	0,0306	16,45	0,0165
	14	676	0,676	6,598	75,40	33,30	4,00	12,3200	29,78	0,0298	17,22	0,0172
	15	726	0,726	7,086	75,40	33,30	4,50	13,8600	28,24	0,0282	18,76	0,0188
	16	776	0,776	7,574	75,40	33,30	5,00	15,4000	26,70	0,0267	20,30	0,0203
	17	826	0,826	8,062	75,40	33,30	5,20	16,0160	26,08	0,0261	20,92	0,0209
	18	876	0,876	8,550	75,40	33,30	5,50	16,9400	25,16	0,0252	21,84	0,0218
	19	925	0,925	9,028	75,40	33,30	6,00	18,4800	23,62	0,0236	23,38	0,0234
	20	991	0,991	9,672	75,40	33,30	6,10	18,7880	23,31	0,0233	23,69	0,0237
	21	1041	1,041	10,160	75,40	33,30	6,50	20,0200	22,08	0,0221	24,92	0,0249
	22	1091	1,091	10,648	75,40	33,30	6,85	21,0980	21,00	0,0210	26,00	0,0260
	23	1141	1,141	11,136	75,40	33,30	7,05	21,7140	20,39	0,0204	26,61	0,0266
	24	1190	1,190	11,614	75,40	33,30	8,10	24,9480	17,15	0,0172	29,85	0,0298
	25	1240	1,240	12,102	75,40	33,30	8,80	27,1040	15,00	0,0150	32,00	0,0320
	26	1290	1,290	12,590	75,40	33,30	9,10	28,0280	14,07	0,0141	32,93	0,0329
	27	1340	1,340	13,078	75,40	33,30	9,55	29,4140	12,69	0,0127	34,31	0,0343
	28	1390	1,390	13,566	75,40	33,30	9,80	30,1840	11,92	0,0119	35,08	0,0351
	29	1440	1,440	14,054	75,40	33,30	9,95	30,6460	11,45	0,0115	35,55	0,0355
	30	1490	1,490	14,542	75,40	33,30	10,05	30,9540	11,15	0,0111	35,85	0,0359

Tabla 4. Datos experimentales obtenidos del resorte 2.

Fuente: propia

Adicional a ello, se realizó la gráfica de la tabla anterior, donde el eje X hace referencia a la deformación del resorte en [m], y el eje Y al peso en [N]. Con ello, se obtuvo la tendencia de la línea restante (tendencia lineal). Por último, través de Excel se obtuvo la ecuación de la forma $y = mx + b$, donde m hace referencia al valor buscado: la constante elástica. En la Gráfica 1 se puede observar la tendencia que proporcionaron los resultados y la ecuación obtenida.



Gráfica 1. Comportamiento obtenido del resorte 1.

Fuente: propia

Para más información de los datos obtenidos con las respectivas gráficas de los demás resortes, consultar del Apéndice C al Apéndice P.

3.3.3. SELECCIÓN DEL RESORTE.

En el instante de tener los resultados del valor de la constante elástica para los resortes involucrados, no se había adquirido los componentes de la bomba ariete, entre ellos, la válvula de impulso. Al obtenerla, se observó que el tapón de esta tenía una especie de seguro para evitar que el empaque de caucho se saliera, el cual medía 15,50 mm de diámetro. Por lo tanto, de manera obligada, los resortes que tenían un diámetro inferior al anteriormente mencionado fueron descartados. En la Tabla 5 se puede ver la selección realizada con respecto a lo anterior.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Constante elástica de los resortes				
Resorte	Valor constante elástica (N/m)	Diámetro interno (mm)	Seleccionado	
			Si	No
1	390,4	11,65		X
2	248,31	13,45		X
3	461,25	16,00	X	
4	251,06	13,30		X
5	191,74	21,10	X	
6	504,54	11,00		X
7	164,75	10,90		X
8	1767,1	16,55	X	

Tabla 5. Selección del resorte.

Fuente: propia

Por fortuna, para los resortes aceptados hubo un buen rango de diferencia, lo que permitirá ver un análisis más amplio de la influencia que este tiene en el ariete hidráulico. A partir de este punto, la denominación de las constante elásticas seleccionadas será la siguiente: $K_1=191,74$ N/m, $K_2=461,25$ N/m y $K_3=1767,1$ N/m.

3.4. ANÁLISIS FINANCIERO

En la Tabla 6 se va a mostrar los costos involucrados para llevar a cabo este proyecto.

Análisis de costo	
Materiales comprados	\$ 331.995
Fabricación	\$ 0
Mano de obra	\$ 0
Operación del ariete	\$ 0
Otros costos	\$ 0
Costo total	\$ 331.995

Tabla 6. Costo total del proyecto.

Fuente: propia

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Como se puede observar en la Tabla 6, los materiales utilizados en el proyecto no poseen un costo considerable. Esto se debe a una ardua búsqueda de estos en ferreterías y puntos de venta similares, donde se pudo conocer los puntos de venta más económicos y más confiables. Para más información, en el Apéndice Q se detallan los componentes de forma individual, donde se puede ver las dimensiones, el costo individual y otros datos adicionales.

Por otra parte, en la fabricación del dispositivo no se requirió ayuda de personas ajenas al proyecto. Por parte de la mano de obra ocurre lo mismo que se dijo anteriormente: no fue necesario, debido a que no hubo dificultad alguna con el ensamble y la instalación del dispositivo.

Finalmente, el ariete hidráulico no generó un costo de operación como tal. Como se ha mencionado antes, el dispositivo no consume energía de fuentes externas.

3.5. FABRICACIÓN DE COMPONENTES FALTANTES

Fue necesario fabricar algunos componentes que eran necesarios para la adaptación al dispositivo.

3.5.1. HERRAMIENTAS UTILIZADAS.

A continuación, en la Tabla 7 se dará a conocer los equipos y las herramientas utilizadas para la fabricación de los elementos faltantes para llevar a cabo la construcción de la bomba ariete.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Recursos utilizados			
Herramienta o equipo	Uso	Laboratorio	Ubicación
Broca para madera	Perforación de la base de madera	Laboratorio de diseño industrial	H-104
Broca sierra	Corte de cilindro para la realización de las pruebas a los resortes y agujero en el recipiente recolector de agua	Laboratorio de diseño industrial	H-104
Esmeril	Pulida de los fragmentos resultantes de la varilla roscada Pulida del tornillo de la válvula de impulso	Taller de máquinas y herramientas	G-101
Flexómetro	Medida para el corte de la varilla roscada Medida en el diseño de la base de madera del ariete	Laboratorio de fluidos	G-405
Juego de pesas	Carga de 50, 200 y 400 gramos para la prueba realizada en los resortes	Laboratorio de física	G-306
Lijadora de madera	Lijada de la madera para la base del ariete y el banco de prueba de los resortes	Laboratorio de diseño industrial	H-104
Llave de tubo	Apriete y desapriete para la configuración del ariete al tanque	Taller de máquinas y herramientas	G-101
Llave para apretar tuercas	Apriete de las tuercas de la base de madera	Taller de máquinas y herramientas	G-101
Mototool	Corte de pestañas de la tapa de la válvula de impulso Lijada de la base de madera	Laboratorio de diseño industrial	H-104
Pesa electrónica	Medida del peso de los discos para determinar la deformación de los resortes	Laboratorio de física	G-306
Pie de rey	Medida de las dimensiones de los resortes Medida del tornillo de la válvula de impulso Medida del diámetro de la tubería y accesorios utilizados Medida de la altura del émbolo en la prueba realizada a los resortes	Laboratorio de diseño industrial, taller de máquinas, herramientas, Laboratorio de fluidos y Laboratorio de física	H-104, G-101 y G-405
Segueta	Corte de varilla roscada Corte de tubo PVC	Laboratorio de diseño industrial y taller de máquinas y herramientas	H-104 y G-101
Sierra circular	Corte de la madera de la base del banco de prueba de los resortes	Laboratorio de diseño industrial	H-103
Tanque	Depósito de alimentación del ariete	Laboratorio de fluidos	G-405
Taladro	Perforación de la base de madera	Laboratorio de diseño industrial	H-104
Torno	Construcción de la base de nailon para colocar las diferentes pesas en el banco de prueba de los resortes	Taller de máquinas y herramientas	G-101

Tabla 7. Herramientas utilizadas.

Fuente: propia

En la Tabla 7 se pueden ver los equipos y las herramientas utilizadas, su uso y el lugar de ubicación dentro de la universidad. Cabe decir que fue de muy buena ayuda contar con

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

los recursos anteriormente descritos, puesto que hubo un ahorro económico considerable debido a que no fue necesario alquilar o enviar a modificar las piezas a terceros.

3.5.2. COMPONENTES FABRICADOS.

A continuación, se mencionan los elementos fabricados para la implementación de la bomba ariete.

Banco de prueba para resortes. Fue necesario la construcción de un equipo en el que se pueda determinar la fuerza necesaria para comprimir un resorte (tipo compresión). En la sección 3.3 se detalla lo realizado para esta parte.

Base de madera para el soporte del ariete hidráulico. Fue indispensable fabricar un soporte para que el ariete se pueda mantener en la misma posición, para la realización de las pruebas experimentales. Fue necesario realizar un total de 18 perforaciones, distribuidas de la siguiente manera: cuatro para el soporte de la base al suelo, dos para sostener el codo que comunica el dispositivo con la válvula de impulso, dos que soporta la te que une la caja de válvulas con el acumulador y la tubería de descarga, y 10 para sostener el cuerpo del ariete con grapas de aluminio. Para las anteriores perforaciones, se introdujeron tornillos para unir la base con la bomba, a excepción de los tornillos que soportan la base con respecto al suelo. En la Figura 43 se muestran las perforaciones realizadas en la base de madera.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22



Figura 43. Perforaciones realizadas en la base de madera.

Fuente: propia

Válvula de impulso. Se realizó tres modificaciones diferentes para su funcionamiento. La primera consta de colocar el tapón en dirección contraria para poder generar el efecto del golpe de ariete, esto debido a que la válvula de pie comercial que se adquirió no estaba diseñada para trabajar con el dispositivo.

El segundo efecto que se realizó fue eliminarle siete de las 13 pestañas que tenía en la rejilla del diseño original, con la finalidad de poder variar la posición del tornillo con facilidad. Finalmente, se perforó la parte superior de la misma para poder ingresar el tornillo mencionado anteriormente. En la Figura 44 se puede apreciar las dos últimas modificaciones mencionadas.



Figura 44. Modificación hecha a la válvula de impulso.

Fuente: propia

Recipiente para almacenamiento del caudal desperdiciado. Fue necesario adquirir tres contenedores de 20 litros cada uno, donde se realizó un corte total en uno de sus lados, y uno parcial en la base de estos, con el fin de colocar los tubos que salen del recipiente adherido a la válvula de impulso. En la Figura 45 se muestran dichos recipientes.



Figura 45. Recipientes utilizados para almacenar el caudal de desperdicio.

Fuente: propia

Construcción de los acumuladores. Se planteó construir seis acumuladores con diferentes características constructivas. En la parte superior e inferior poseen un tapón de prueba, aunque fue necesario perforar uno de estos para adaptar una salida a tanque de 1", con el fin de poder acoplarse la cámara de aire al ariete. En el interior de estos se introdujeron varias esferas plásticas, con el fin de mantener un volumen constante en su interior. En la Tabla 8 se presenta el dimensionamiento que poseen y también la cantidad de bolas que contienen internamente.

Dimensión de los acumuladores						
Identificación	Diámetro comercial	Diámetro interior promedio (mm)	Altura (m)	volumen (litros)	Clase de tubería	Cantidad de esferas internas
$\varnothing_{ac.1}$	2"	54,58	0,300	0,702	Tubería a presión	5 con \varnothing : 36 mm
$\varnothing_{ac.2}$			0,855	2,000		15 con \varnothing : 36 mm
$\varnothing_{ac.3}$	3"	79,00	0,300	1,471	Tubería de ventilación	3 con \varnothing : 75 mm
$\varnothing_{ac.4}$			0,408	2,000		3 con \varnothing : 75 mm
$\varnothing_{ac.5}$	4"	107,70	0,300	2,733	Tubería sanitaria	3 con \varnothing : 75 mm
$\varnothing_{ac.6}$			0,220	2,000		2 con \varnothing : 75 mm

Tabla 8. Dimensión de los acumuladores.

Fuente: propia

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Como se puede observar en la anterior tabla, los acumuladores 1, 3 y 5 tienen un volumen igual, mientras que los acumuladores 2, 4 y 6 poseen la misma altura. Por tanto, el parámetro constructivo que no es constante varió con respecto al aumento o disminución del diámetro de cada cámara de aire.

Cabe mencionar que los diámetros internos presentados en la tabla anterior encajan perfectamente con los comerciales para la tubería de presión, de ventilación y sanitaria de los diámetros de 2", 3" y 4", respectivamente. Esta información se puede corroborar en el Apéndice R y Apéndice S. En la Figura 46 se muestran los acumuladores construidos. En su orden de numeración con respecto a la designación dada en la Tabla 8, de izquierda a derecha: 1, 3, 5, 2, 4 y 6.



Figura 46. Acumuladores construidos.

Fuente: propia

Utilización del neumático de motocicleta. Se fabricaron empaques con el fin de evitar fugas de agua en el recipiente adherido a la válvula de impulso y en la salida de tanque acoplada al acumulador. Además, se recortaron trozos cilíndricos del mismo para colocarlos alrededor del codo que comunica la ya anunciada válvula de impulso y en la te que

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

comunica la caja de válvulas con la cámara de aire y la tubería de descarga, esto con el fin de mantener firme el ariete a los tornillos instaurados para el soporte de este. En la Figura 47 se puede ver la posición del caucho con respecto a la última parte mencionada.



Figura 47. Ajuste del ariete a la base de madera por medio de cauchos.

Fuente: propia

Recipiente adherido a la válvula de impulso. Fue necesario modificar un recipiente plástico con capacidad para ocho litros, con el fin de recolectar el agua que desperdiciaba dicha válvula. Inicialmente se había realizado el ajuste con una jarra de cinco litros, donde a esta se le adaptó un desagüe con un tubo de 1/2", pero se presentó un gran inconveniente: el recipiente se llenaba muy rápido de agua y esta no drenaba rápidamente. Entonces, para evitar un inconveniente similar, se buscó que el dimensionamiento de un nuevo recipiente para evitar el problema anterior. Por lo tanto, se adaptaron dos tubos de 1" y el tubo anterior. Dicho ajuste fue el ideal, puesto que, en las pruebas experimentales llevadas a cabo no hubo llenado del contenedor, ni fugas inoportunas. En la Figura 48 se puede observar el desagüe que se le adaptó a la válvula.



Figura 48. Recipiente adherido a la válvula de impulso.

Fuente: propia

Pulida de los tornillos cortados. Fue necesario pulir las partes filosas que resultaban después de haber cortado los tornillos. Para ello, se utilizó el esmeril y se buscó darle una forma cónica para darle un mejor acabado a estos.

3.6. MONTAJE EXPERIMENTAL

A continuación, se describe todo lo referente al montaje experimental realizado en el laboratorio de fluidos, donde es posible encontrar detalles acerca del ensamble, lugar de implementación y las dimensiones de la instalación, control de variables, entre otros.

3.6.1. LUGAR DE IMPLEMENTACIÓN.

Como se anunció en la descripción de esta sección, la implementación se realizó en el laboratorio de fluidos con el que cuenta la universidad. Este laboratorio cuenta con los elementos necesarios para llevar a cabo las pruebas experimentales como, por ejemplo, el tanque de alimentación, mangueras y elementos de medida.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

3.6.2. INSTALACIÓN DEL ARIETE HIDRÁULICO.

El ensamble y la instalación del ariete hidráulico en el laboratorio de fluidos no representó un inconveniente mayor. A continuación, se hablará lo anterior con más detalle.

3.6.2.1. MATERIALES UTILIZADOS.

Los materiales comprados, presentados en la sección 3.4, se utilizaron en su totalidad. En la aplicación al prototipo, algunos de estos se emplearon para llevar a cabo tareas diferentes, como es el caso del neumático de motocicleta, o incluso las tuercas que se utilizaron en el banco de pruebas para los resortes, que al final sirvieron como guía para medir la distancia de desplazamiento. En el Apéndice T se puede observar con detalle la tabla representativa que muestra los componentes utilizados con su respectiva dimensión, material y la cantidad respectiva.

3.6.2.2. ENSAMBLE.

Para el ensamble se va a tomar como referencia la Figura 49, que muestra el ariete ya construido. Se describirá lo realizado a partir de la te de la caja de válvulas y de forma consecutiva de conexión.

Hacia la izquierda de la te de la caja de válvulas, se instaló la válvula de bola y posterior a ello una unión universal. En este punto se conecta la tubería de alimentación que está conformada por un tramo de tubería, un codo de 90° (la información siguiente no es mostrada en la figura), nuevamente una unión universal, otro tramo de tubería y, finalmente, un adaptador macho, por medio del cual se realiza la conexión al tanque de abastecimiento.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Luego, hacia la derecha se ensambló un codo de 90°, luego un recipiente de desagüe, después adaptador macho y finalmente la válvula de impulso.

Finalmente, hacia arriba se realizó la unión de un adaptador macho, luego la conexión de la válvula cheque, consigo se ensamblo otro adaptador macho y posterior a ello una te. A partir de dicho accesorio, hacia arriba se instaló un adaptador macho para poder instalar los diferentes acumuladores a analizar; hacia la izquierda se instauró una reducción a 1/2", luego un adaptador hembra y por último el acople PG, que sirve para adherir al ariete hidráulico con la tubería de alimentación. Con lo anterior cumplido, se adaptó a la base de madera por medio de grapas de aluminio unidas con tornillos.

Vale aclarar que a los accesorios que estaban antes del adaptador macho y el acople PG se unieron con soldadura PVC, mientras que los accesorios ubicados después de dicho acople se utilizó teflón.



Figura 49. Prototipo ensamblado.

Fuente: propia

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

3.6.2.3. **DIMENSIONES DEL ARIETE HIDRÁULICO.**

En la Tabla 9 se presenta el dimensionamiento obtenido del dispositivo ensamblado con sus respectivas medidas.

Dimensiones del ariete hidráulico				
Variable	Símbolo matemático	Valor	Símbolo unidad de medida	Nota
Diámetro de la tubería de alimentación	\varnothing_{al}	29,40	mm	Diámetro interno
Altura de alimentación	h_{al}	1,00-1,50	m	Depende de la prueba realizada
Longitud de la tubería de alimentación	L_{al}	1,45	m	Hasta la válvula de bola
Ángulo de inclinación de la tubería de alimentación	θ_{al}	0	°	Inclinación de la tubería hasta antes de la unión universal de 1"
Diámetro de la tubería del ariete	\varnothing_{ariete}	28,50	mm	No incluye la salida de la tubería de descarga de de 1/2"
Área de la válvula de impulso	A_{imp}	754,77	mm ²	
Carrera de la válvula de impulso	C_{imp}	11,25	mm	
Ángulo de inclinación de la válvula de impulso	θ_{imp}	90	°	
Área de la válvula de descarga	A_{desc}	1256,64	mm ²	
Carrera de la válvula de descarga	C_{desc}	9,00	mm	
Diámetro de la tubería de descarga	\varnothing_{desc}	15,35	mm	Diámetro interno
Altura de la tubería de descarga	h_{desc}	1,50	m	
Longitud de la tubería de descarga	L_{desc}	1,75	m	Parte desde el acople PG

Tabla 9. Dimensiones del ariete hidráulico.

Fuente: propia

3.6.2.4. **ABASTECIMIENTO O ALIMENTACIÓN.**

El tanque de alimentación utilizado tiene una capacidad volumétrica de 500 litros. Este sirvió como referencia de las variaciones de la altura de alimentación planteadas para el experimento. Por otro lado, la altura de descarga se mantuvo constante, por lo que solo se modificó el nivel de agua del tanque. En la Figura 50 se aprecia el tanque utilizado, cuando el nivel del agua tiene una altura de 1,00 m con respecto al ariete hidráulico.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22



Figura 50. Tanque de alimentación utilizado en el experimento.

Fuente: propia

Por otra parte, hubo cierta variación del nivel del tanque al realizar las pruebas experimentales. En la Tabla 10, se puede observar lo anteriormente dicho, aunque si se detalla bien, es prácticamente despreciable, debido a que se trató de tener el nivel de este lo más constante posible. Además, el agua recogida después de cada prueba era retornada al mismo, por lo que no hubo tanto desperdicio del fluido.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Tanque			
Referencia	Altura del tanque (m)	Altura con respecto al ariete (m)	Variación de altura promedio (m)
Alimentación	0,839	1,500	0,03
	0,332	1,000	
Descarga	0,839	1,500	

Tabla 10. Variación del nivel del tanque en el trabajo experimental.

Fuente: propia

3.6.2.5. CONTROL DE VARIABLES.

A continuación, se va a presentar la forma como se midieron las variables que hicieron parte del experimento.

Caudal de descarga. Debido a que esta magnitud no superó los siete litros, se utilizó el cubo presentado en la Figura 51, con niveles de medida de 500 ml, con una capacidad máxima de 10 litros. Al obtener el caudal en este recipiente, se procedió a observar la cota que tenía y, con base en ello, se tomaba apunte del dato, puesto que cada prueba tardó un minuto y la unidad de medida fue en l/min. En consecuencia, el error de medida es relativamente alto.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22



Figura 51. Recipiente utilizado para medir el caudal de descarga.

Fuente: propia

Caudal desperdiciado. Se utilizó el recipiente mostrado en la Figura 52. Debido que este no tenía una escala de medida, se procedió a tomar las dimensiones de este con el fin de mantener la altura y el largo constante. A medida que se realizaba cada prueba, los depósitos donde se alojaba el caudal desperdiciado se vertían en el recipiente y solo se procedía a medir la altura lograda por el fluido. En este caso ocurre lo mismo que con el caudal de descarga, donde el volumen obtenido fue equivalente al caudal promedio.

En la Tabla 11 se puede observar un ejemplo. Para ese caso, la altura lograda fue de 67 mm, donde el volumen total del agua al interior del depósito es de 13,990 litros, considerando con el volumen adicional que generaba el accesorio adaptado al extremo de uno de los lados del recipiente. Entonces, el caudal total, contando con el factor anteriormente nombrado, fue de 14,060 l/min. Para este caso, el error en la medida se considera menor con respecto al caudal de descarga.



Figura 52. Recipiente utilizado para medir el caudal desperdiciado.

Fuente: propia

Dimensionamiento del recipiente		
Dimensión	Valor	Unidad
Altura	67	mm
Largo	580	mm
Ancho	360	mm
Volumen adicional	0,070	Litros
Volumen total	13,990	Litros
Caudal total	14,060	l/min

Tabla 11. Dimensiones del recipiente utilizado para medir el caudal de descarga.

Fuente: propia

Golpes de la válvula de impulso. Los golpes se contaron de manera indirecta, donde se contaban los golpes obtenidos en un minuto con respecto a la frecuencia del sonido. Para ello, fue necesaria la ayuda de un compañero de la universidad, donde se obtuvo un resultado coherente. No obstante, se decidió que, si era imposible contar los impactos generados, se determinarían los golpes ejercidos en un segundo y luego llevarlo a términos de minuto multiplicando por 60. Finalmente cabe aclarar que este efecto no fue considerado como objeto de estudio en este proyecto.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Caudal de alimentación. Esta variable no se midió como tal, sino que se realizó la suma entre los caudales de descarga y desperdicio, debido a que la pérdida de agua fue insignificante entre cada experimento.

Longitud libre del resorte. Esta medida se refiere a la distancia entre el tapón de la válvula de impulso (en su punto más bajo) y la arandela que regula la distancia de compresión del resorte. Al tener una configuración óptima del resorte, se midió la distancia respectiva antes de iniciar las pruebas experimentales, y otra cuando se iba a realizar el cambio de este. Para todas las tomadas, no se obtuvo variación, debido al correcto ajuste que se realizaba a la válvula.

3.7. PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO Y TOMA DE DATOS

En esta sección se va a hablar acerca del proceso experimental realizado en la bomba ariete.

3.7.1. PROCEDIMIENTO APLICADO.

Inicialmente se busca la correcta regulación del resorte de la válvula de impulso, donde se permite el paso del fluido para ver si genera el golpe de ariete. Al obtenerla, se bloquea el paso del agua y se mide la longitud libre del resorte. Posteriormente, se realiza la puesta a punto al ariete durante un minuto, con el fin de que el equipo tenga una estabilidad con respecto a los caudales de descarga y desperdicio. Luego, se cierra la válvula de bola para evitar el paso del agua al dispositivo. Después, se procede a vaciar los depósitos donde se almacena el fluido de los caudales evaluados, porque en ese momento hay cierta cantidad de este por la realización de la puesta a punto anteriormente mencionada.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Por consiguiente, se abre la válvula de bola al mismo tiempo que se comienza a medir el tiempo de apertura de esta. Paralelo a ello, se cuentan los golpes generados por la válvula de impulso. Al pasar un minuto, se cierra la válvula de bola y se registran los datos de la frecuencia de los golpes. Luego se vierte el caudal desperdiciado de los tres contenedores al recipiente principal (ver Figura 52), donde se mide la altura que el fluido ejerce dentro de este y se calcula el volumen con respecto a las dimensiones de dicho recipiente.

Posteriormente se mide el caudal de descarga en un cubo (ver Figura 51). Al tener el apunte de los datos, se retorna el agua al tanque de alimentación. Después, se realiza el cambio de acumulador por otro diferente, y se repite el ciclo descrito anteriormente hasta que se hayan probado todos estos para el mismo resorte.

Finalmente, al terminar de evaluar el último acumulador, este no se cambia. En vez de eso se reemplaza el resorte por otro diferente y se realiza nuevamente el procedimiento descrito.

3.7.2. PRUEBAS EXPERIMENTALES.

Se llevó a cabo un total de 18 pruebas para cada configuración de altura, por lo que para las dos alturas de alimentación analizadas hubo 36 variaciones. En la Tabla 12 se muestra el resumen de los cambios efectuados para cada una de las variables del proceso, solo para una altura de alimentación.

Resumen de los cambios realizados para cada prueba				
Prueba	Constante elástica utilizada	Acumulador utilizado	Cambio efectuado	
			Resorte	Acumulador
1	K_1	$\emptyset_{ac.1}$	No	Si
2		$\emptyset_{ac.3}$	No	Si
3		$\emptyset_{ac.5}$	No	Si
4		$\emptyset_{ac.2}$	No	Si
5		$\emptyset_{ac.4}$	No	Si
6		$\emptyset_{ac.6}$	No	Si
7	K_2	$\emptyset_{ac.6}$	Si	No
8		$\emptyset_{ac.4}$	No	Si
9		$\emptyset_{ac.2}$	No	Si
10		$\emptyset_{ac.5}$	No	Si
11		$\emptyset_{ac.3}$	No	Si
12		$\emptyset_{ac.1}$	No	Si
13	K_3	$\emptyset_{ac.1}$	Si	No
14		$\emptyset_{ac.3}$	No	Si
15		$\emptyset_{ac.5}$	No	Si
16		$\emptyset_{ac.2}$	No	Si
17		$\emptyset_{ac.4}$	No	Si
18		$\emptyset_{ac.6}$	No	Si

Tabla 12. Resumen de los cambios realizados para cada prueba.

Fuente: propia

En la Figura 53 se muestra el montaje experimental realizado en el laboratorio.



Figura 53. Montaje experimental del ariete hidráulico.

Fuente: propia

3.7.3. RESUMEN DE LOS DATOS OBTENIDOS.

A continuación, se presentan las tablas obtenidas de la toma de los datos referente a las pruebas realizadas en el ariete hidráulico. Durante el experimento se tomó nota únicamente en las columnas de caudal de descarga, caudal desperdiciado, frecuencia de golpes y longitud libre del resorte, puesto que las dimensiones del acumulador y la constante elástica del resorte se determinaron con anterioridad.

Para el caso de los valores marcados con asterisco, estos son datos estimados, debido a la gran velocidad resultante de los golpes generados por la válvula de impulso durante las pruebas.

Medidas experimentales para la altura del acumulador constante y alturas de alimentación y descarga de 1,50 m																
Constante elástica del resorte (N/m)		Diámetro interior promedio del acumulador (mm)		Altura del acumulador (mm)	Volumen del acumulador (litros)		Caudal de alimentación promedio (L/min)		Caudal de descarga promedio (L/min)		Caudal desperdiciado promedio (L/min)		Frecuencia de golpes (golpes /minuto)	Longitud libre del resorte (mm)		
K_1	191,74	$\emptyset_{ac.1}$	54,58	$h_{ac.}$	300	$V_{ac.1}$	0,702	$Q_{al.1}$	32,487	$Q_{desc.1}$	4,400	$Q_{desp.1}$	28,087	$f_{golpes.1}$	305	54,05
K_2	461,25							$Q_{al.2}$	33,576	$Q_{desc.2}$	4,900	$Q_{desp.2}$	28,676	$f_{golpes.2}$	321	50,80
K_3	1767,1							$Q_{al.3}$	20,978	$Q_{desc.3}$	6,500	$Q_{desp.3}$	14,478	$f_{golpes.3}$	600*	51,10
K_1	191,74	$\emptyset_{ac.3}$	79,00			$V_{ac.3}$	1,471	$Q_{al.4}$	33,443	$Q_{desc.4}$	4,500	$Q_{desp.4}$	28,943	$f_{golpes.4}$	317	54,05
K_2	461,25							$Q_{al.5}$	33,072	$Q_{desc.5}$	4,500	$Q_{desp.5}$	28,572	$f_{golpes.5}$	319	50,80
K_3	1767,1							$Q_{al.6}$	20,728	$Q_{desc.6}$	6,250	$Q_{desp.6}$	14,478	$f_{golpes.6}$	600*	51,10
K_1	191,74	$\emptyset_{ac.5}$	107,70			$V_{ac.5}$	2,733	$Q_{al.7}$	33,526	$Q_{desc.7}$	4,750	$Q_{desp.7}$	28,776	$f_{golpes.7}$	323	54,05
K_2	461,25							$Q_{al.8}$	33,385	$Q_{desc.8}$	4,500	$Q_{desp.8}$	28,885	$f_{golpes.8}$	309	50,80
K_3	1767,1							$Q_{al.9}$	20,160	$Q_{desc.9}$	6,100	$Q_{desp.9}$	14,060	$f_{golpes.9}$	600*	51,10

Tabla 13. Toma de datos experimentales 1.

Medidas experimentales para el volumen del acumulador constante y alturas de alimentación y descarga de 1,50 m																
Constante elástica del resorte (N/m)		Diámetro interior promedio del acumulador (mm)		Volumen del acumulador (litros)	Altura del acumulador (mm)	Caudal de alimentación promedio (L/min)		Caudal de descarga promedio (L/min)		Caudal desperdiciado promedio (L/min)		Frecuencia de golpes (golpes /minuto)	Longitud libre del resorte (mm)			
K_1	191,74	$\emptyset_{ac.2}$	54,58	$V_{ac.}$	2,00	$h_{ac.2}$	855	$Q_{al.10}$	33,058	$Q_{desc.10}$	4,700	$Q_{desp.10}$	28,358	$f_{golpes.10}$	321	54,05
K_2	461,25							$Q_{al.11}$	33,067	$Q_{desc.11}$	4,600	$Q_{desp.11}$	28,467	$f_{golpes.11}$	330	50,80
K_3	1767,1							$Q_{al.12}$	20,511	$Q_{desc.12}$	6,200	$Q_{desp.12}$	14,311	$f_{golpes.12}$	600*	51,10
K_1	191,74	$\emptyset_{ac.4}$	79,00			$h_{ac.4}$	408	$Q_{al.13}$	33,694	$Q_{desc.13}$	4,500	$Q_{desp.13}$	29,194	$f_{golpes.13}$	320	54,05
K_2	461,25							$Q_{al.14}$	33,585	$Q_{desc.14}$	4,700	$Q_{desp.14}$	28,885	$f_{golpes.14}$	331	50,80
K_3	1767,1							$Q_{al.15}$	20,577	$Q_{desc.15}$	6,350	$Q_{desp.15}$	14,227	$f_{golpes.15}$	600*	51,10
K_1	191,74	$\emptyset_{ac.6}$	107,70			$h_{ac.6}$	220	$Q_{al.16}$	33,294	$Q_{desc.16}$	4,200	$Q_{desp.16}$	29,094	$f_{golpes.16}$	322	54,05
K_2	461,25							$Q_{al.17}$	33,698	$Q_{desc.17}$	4,500	$Q_{desp.17}$	29,198	$f_{golpes.17}$	316	50,80
K_3	1767,1							$Q_{al.18}$	20,564	$Q_{desc.18}$	6,400	$Q_{desp.18}$	14,164	$f_{golpes.18}$	600*	51,10

Tabla 14. Toma de datos experimentales 2.

Medidas experimentales para la altura del acumulador constante, altura de alimentación de 1,00 m y altura de descarga de 1,50 m																
Constante elástica del resorte (N/m)		Diámetro interior promedio del acumulador (mm)		Altura del acumulador (mm)	Volumen del acumulador (litros)	Caudal de alimentación promedio (L/min)		Caudal de descarga promedio (L/min)		Caudal desperdiciado promedio (L/min)		Frecuencia de golpes (golpes /minuto)	Longitud libre del resorte (mm)			
K_1	191,74	$\emptyset_{ac.1}$	54,58	$h_{ac.}$	300	$V_{ac.1}$	0,702	$Q_{al.1}$	25,130	$Q_{desc.1}$	2,300	$Q_{desp.1}$	22,830	$f_{golpes.1}$	210	57,00
K_2	461,25							$Q_{al.2}$	20,246	$Q_{desc.2}$	2,950	$Q_{desp.2}$	17,296	$f_{golpes.2}$	327	54,90
K_3	1767,1							$Q_{al.3}$	11,050	$Q_{desc.3}$	1,350	$Q_{desp.3}$	9,700	$f_{golpes.3}$	480*	51,00
K_1	191,74	$\emptyset_{ac.3}$	79,00			$V_{ac.3}$	1,471	$Q_{al.4}$	20,110	$Q_{desc.4}$	2,500	$Q_{desp.4}$	17,610	$f_{golpes.4}$	183	57,00
K_2	461,25							$Q_{al.5}$	20,560	$Q_{desc.5}$	2,950	$Q_{desp.5}$	17,610	$f_{golpes.5}$	408	54,90
K_3	1767,1							$Q_{al.6}$	9,200	$Q_{desc.6}$	0,600	$Q_{desp.6}$	8,600	$f_{golpes.6}$	480*	51,00
K_1	191,74	$\emptyset_{ac.5}$	107,70			$V_{ac.5}$	2,733	$Q_{al.7}$	19,542	$Q_{desc.7}$	2,350	$Q_{desp.7}$	17,192	$f_{golpes.7}$	217	57,00
K_2	461,25							$Q_{al.8}$	21,277	$Q_{desc.8}$	3,500	$Q_{desp.8}$	17,777	$f_{golpes.8}$	362	54,90
K_3	1767,1							$Q_{al.9}$	10,700	$Q_{desc.9}$	0,600	$Q_{desp.9}$	10,100	$f_{golpes.9}$	480*	51,00

Tabla 15. Toma de datos experimentales 3.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO		Código	FDE 089
			Versión	03
			Fecha	2015-01-22

Medidas experimentales para el volumen del acumulador constante, altura de alimentación de 1,00 m y altura de descarga de 1,50 m																				
Constante elástica del resorte (N/m)		Diámetro interior promedio del acumulador (mm)		Volumen del acumulador (litros)	Altura del acumulador (mm)		Caudal de alimentación promedio (L/min)		Caudal de descarga promedio (L/min)		Caudal desperdiciado promedio (L/min)		Frecuencia de golpes (golpes /minuto)	Longitud libre del resorte (mm)						
K_1	191,74	$\phi_{ac.2}$	54,58		$V_{ac.}$	2,00	$h_{ac.2}$	855	$Q_{al.10}$	21,004	$Q_{desc.10}$	2,350	$Q_{desp.10}$	18,654	$f_{golpes.10}$	228	57,00			
K_2	461,25			$Q_{al.11}$					18,830	$Q_{desc.11}$	3,100	$Q_{desp.11}$	15,730	$f_{golpes.11}$	365	54,90				
K_3	1767,1			$Q_{al.12}$					14,600	$Q_{desc.12}$	1,100	$Q_{desp.12}$	13,500	$f_{golpes.12}$	480*	51,00				
K_1	191,74	$\phi_{ac.4}$	79,00	$V_{ac.}$			2,00	$h_{ac.4}$	408	$Q_{al.13}$	23,050	$Q_{desc.13}$	2,100	$Q_{desp.13}$	20,950	$f_{golpes.13}$	238	57,00		
K_2	461,25									$Q_{al.14}$	18,495	$Q_{desc.14}$	3,600	$Q_{desp.14}$	14,895	$f_{golpes.14}$	370	54,90		
K_3	1767,1									$Q_{al.15}$	13,131	$Q_{desc.15}$	0,950	$Q_{desp.15}$	12,181	$f_{golpes.15}$	480*	51,00		
K_1	191,74	$\phi_{ac.6}$	107,70					$V_{ac.}$	2,00	$h_{ac.6}$	220	$Q_{al.16}$	23,866	$Q_{desc.16}$	2,080	$Q_{desp.16}$	21,786	$f_{golpes.16}$	237	57,00
K_2	461,25											$Q_{al.17}$	14,278	$Q_{desc.17}$	3,350	$Q_{desp.17}$	10,928	$f_{golpes.17}$	420*	54,90
K_3	1767,1											$Q_{al.18}$	13,281	$Q_{desc.18}$	1,100	$Q_{desp.18}$	12,181	$f_{golpes.18}$	480*	51,00

Tabla 16. Toma de datos experimentales 4.

3.7.4. INCONVENIENTES PRESENTADOS.

Durante la realización de las pruebas experimentales se presentaron los siguientes inconvenientes.

Regulación de la válvula de impulso. Fue necesario realizar varios ensayos para ver si el resorte estaba regulado correctamente. El problema radicó en que, si se permitía mucha distancia libre al resorte, el tapón cerraría y no generaba la frecuencia de los golpes, mientras que, si se le generaba mucha tensión a este, toda el agua se escapaba por la válvula.

Puesta a punto del ariete hidráulico. El ariete se puso en funcionamiento durante un minuto para que lograra un comportamiento estable. El problema radicó en que se debían vaciar los recipientes donde caía el agua desperdiciado por la válvula de impulso para realizar la medida experimental, por lo que se restringía el paso del caudal de alimentación al ariete.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Cambio del acumulador. Cada cambio efectuado produjo que el agua atrapada en la tubería de descarga escapara, por lo que había que limpiar constantemente el sitio donde se realizaron las pruebas.

Efecto sifón que alteró las medidas iniciales. En un principio, se colocó la tubería de descarga de la forma como se muestra en la Figura 54. Al experimentar con la constante elástica K_3 (después de haber realizado las pruebas con las constantes K_1 y K_2), hubo un instante en el que la válvula de impulso se cerró por completo, pero aun así continuaba saliendo agua por la tubería de descarga. En consecuencia, se debió modificar la forma de recoger el agua elevada y tomar medidas nuevamente.



Figura 54. Efecto sifón producido durante las pruebas iniciales.

Fuente: propia

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

3.7.5. PROPUESTA DE MEJORA.

Teniendo en cuenta los inconvenientes y problemas presentados con el prototipo llevado a cabo, se recomienda mejorar en los aspectos que se presenta a continuación.

Se sugiere diseñar un recipiente ubicado entre el adaptador macho que conecta el ariete y el acumulador, con el fin de evitar el desperdicio de agua cuando se realiza el cambio de la cámara de aire.

Se recomienda colocar la válvula de impulso de forma horizontal, para evitar la pérdida debido al cambio de direccionamiento del fluido.

Se aconseja modificar el tapón de la válvula de impulso para adaptarle resortes con un diámetro interno menor a los evaluados en este proyecto.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

4. CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos con respecto a las pruebas experimentales. Se va a realizar la descripción del comportamiento obtenido por medio de gráficas y el posterior análisis con respecto a otros autores que realizaron diferentes variaciones al ariete hidráulico.

4.1. GRÁFICAS DE COMPORTAMIENTO DEL ARIETE HIDRÁULICO

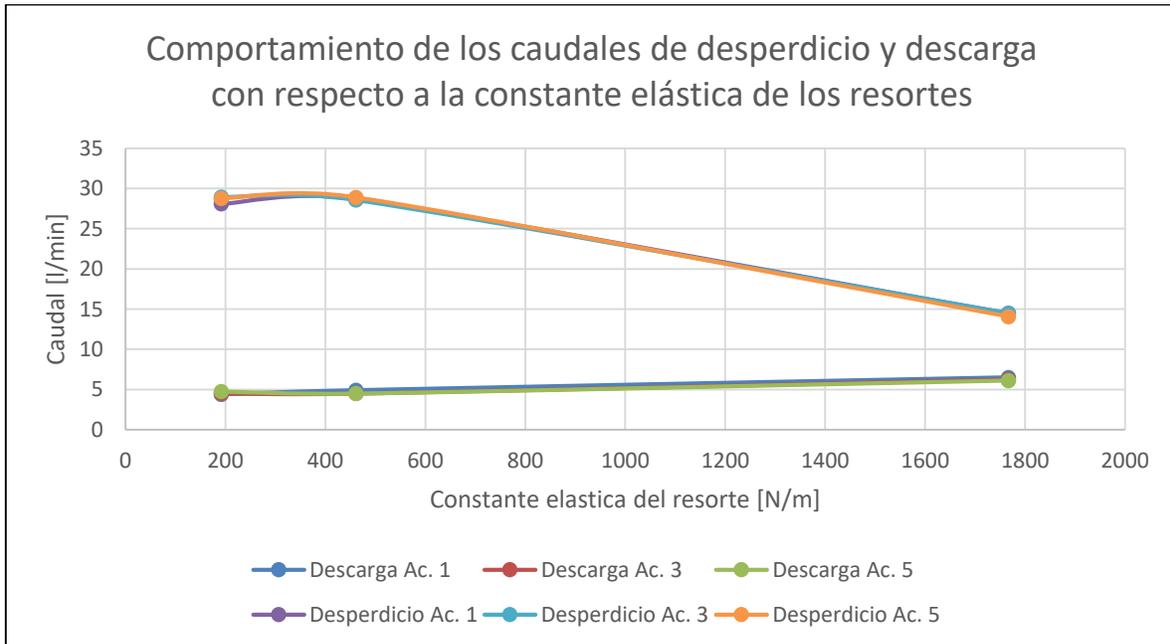
En el presente estudio se buscó encontrar la relación existente entre los caudales de descarga, de desperdicio y de alimentación con respecto a la constante elástica del resorte y las características volumétricas del acumulador. Por lo tanto, para interpretar la información de los datos obtenidos, se realizó las gráficas representativas para determinar el comportamiento del ariete hidráulico. Además, se empleó el método PDA para desarrollar el análisis de cada gráfica y así obtener una mayor comprensión de lo que se dice del comportamiento del ariete hidráulico.

4.1.1. ALTURA DE ALIMENTACIÓN Y DESCARGA DE 1,50 m

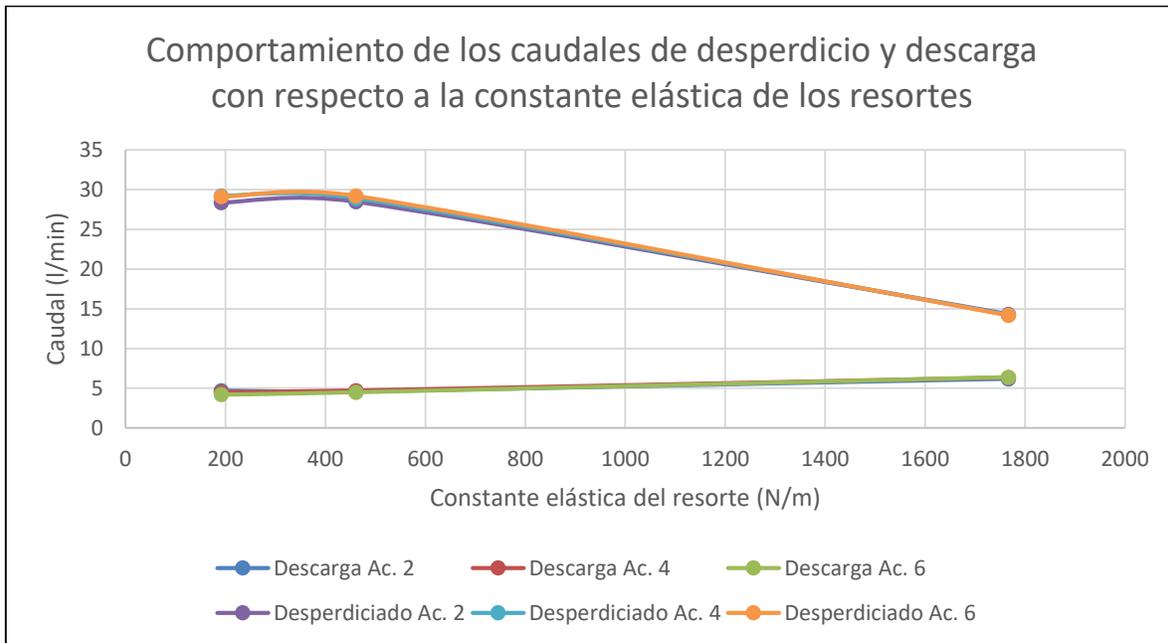
Se analizó la condición en donde la altura de alimentación y de descarga son iguales. Los resultados obtenidos en la Tabla 13 son aplicables para la Gráfica 2, Gráfica 4 y Gráfica 6; mientras que la Tabla 14 aplica para la Gráfica 3, Gráfica 5 y Gráfica 7.

La Gráfica 2 y Gráfica 3 muestra el comportamiento de los caudales de descarga y desperdicio para los diferentes resortes empleados, mientras se conserva de manera constante la altura del y el volumen del acumulador de las gráficas mencionadas con anterioridad.

En ambas gráficas es posible encontrar en el eje X las diferentes constantes elásticas de los resortes empleados en [N/m]. Por otra parte, en el eje Y se presenta el caudal en [l/min]. En las mismas es posible encontrar 6 curvas que se encuentran divididas en dos grupos; el primero de ellos corresponde al caudal de desperdicio, que comprende las líneas que se encuentra en la parte superior del plano, y que presenta un comportamiento decreciente; el segundo se refiere al caudal de descarga visto en la parte inferior del plano que, por el contrario, muestra un comportamiento creciente con respecto al primer grupo, aunque de menor magnitud. Para ambos grupos es posible observar la similitud presente entre las tres curvas que las conforman.



Gráfica 2. Comportamiento de los caudales de desperdicio y descarga (1).

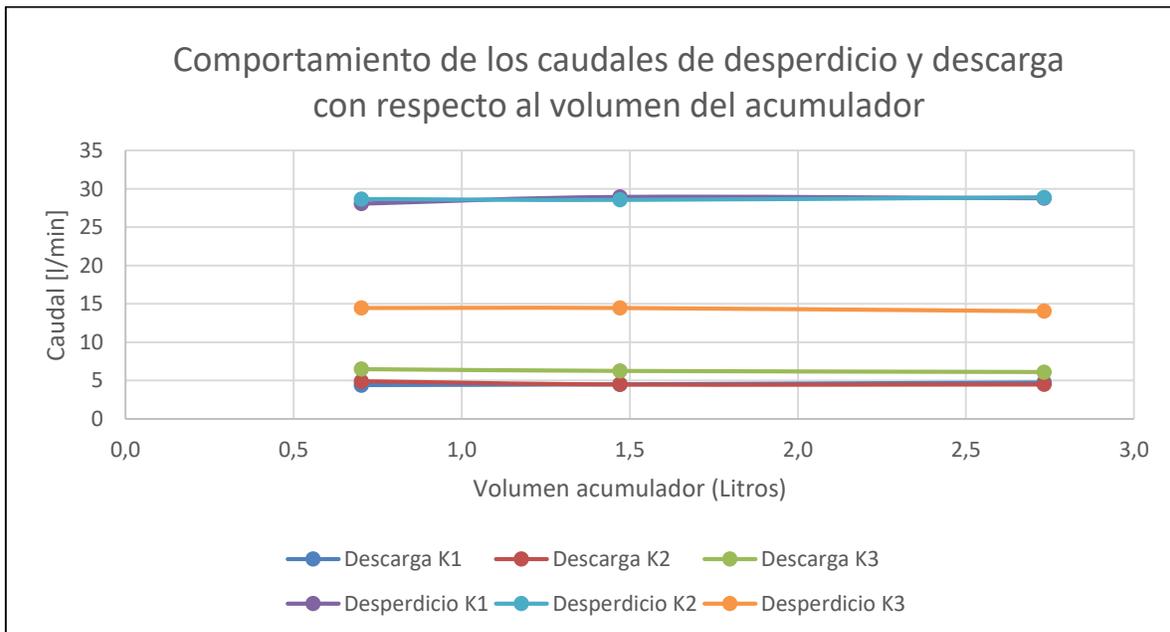


Gráfica 3. Comportamiento de los caudales de desperdicio y descarga (2).

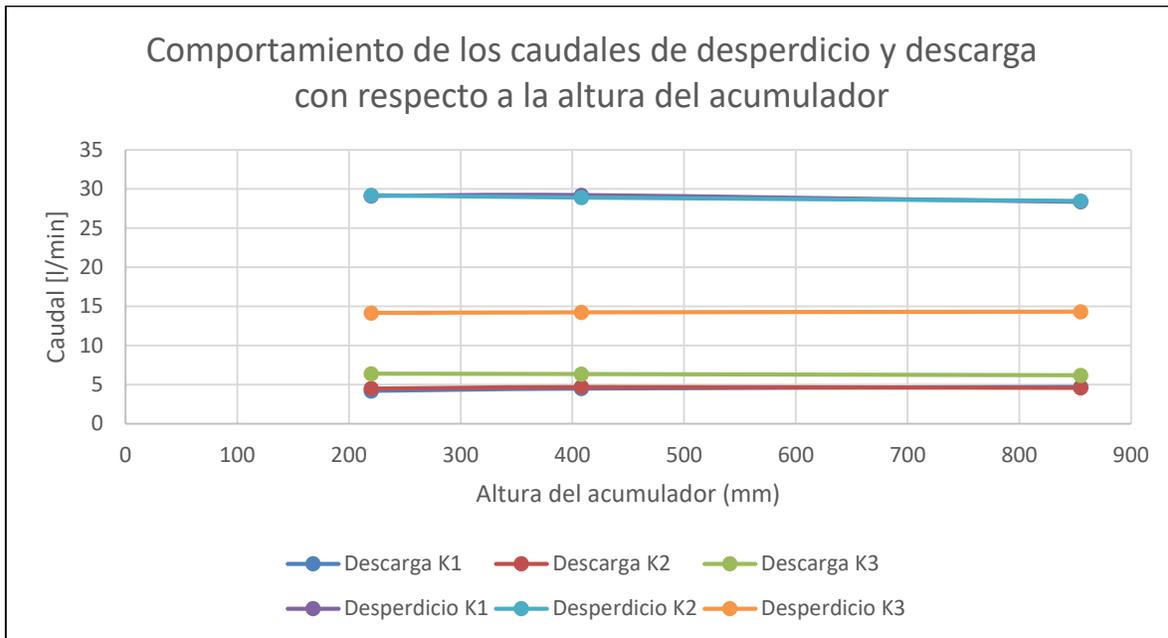
La similitud presentada entre las curvas de cada grupo en ambas gráficas permite observar que no hay incidencia con respecto al dimensionamiento del acumulador, pero si con respecto a la variación del resorte. Se puede notar que, a medida que aumenta el valor de la constante elástica, hay una menor pérdida del caudal a través de la válvula de impulso y hay un breve aumento del caudal de descarga, aunque no tan representativo. Lo anterior contradice con lo dicho por (Quiroga et al., 2013), donde expresan que un valor menor de la constante elástica proporciona una mayor eficiencia, donde en el prototipo que se llevó a cabo sucede prácticamente lo contrario (la anterior información se puede corroborar en la Tabla 17).

La Gráfica 4 y Gráfica 5 presenta el comportamiento de los caudales de descarga y desperdicio con respecto al el dimensionamiento de la cámara del aire, mientras se mantiene constante la altura y se modifica el volumen del acumulador (Gráfica 4) y se mantiene constante el volumen y se modifica la altura de este (Gráfica 5).

En ambas se observa en el eje Y el caudal en [l/min], y en el eje X aparece una diferencia para estas: en la Gráfica 4 se muestra la variación del volumen en [m³], y en la Gráfica 5 se presenta la variación de la altura en [mm], lo anterior para el acumulador. En cada una se puede observar un total de 6 líneas que representan el comportamiento con respecto a las variables evaluadas. Se puede notar que no hay un aumento o decremento de ambos caudales a medida que se varía el volumen del acumulador.



Gráfica 4. Comportamiento de los caudales de desperdicio y descarga (3).

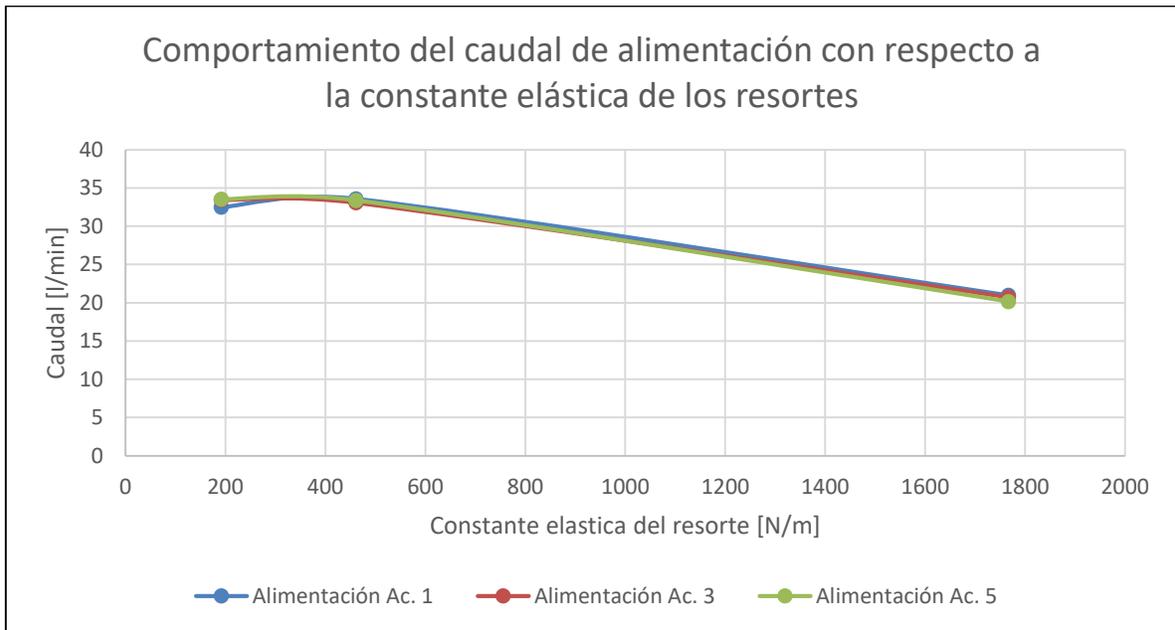


Gráfica 5. Comportamiento de los caudales de desperdicio y descarga (4).

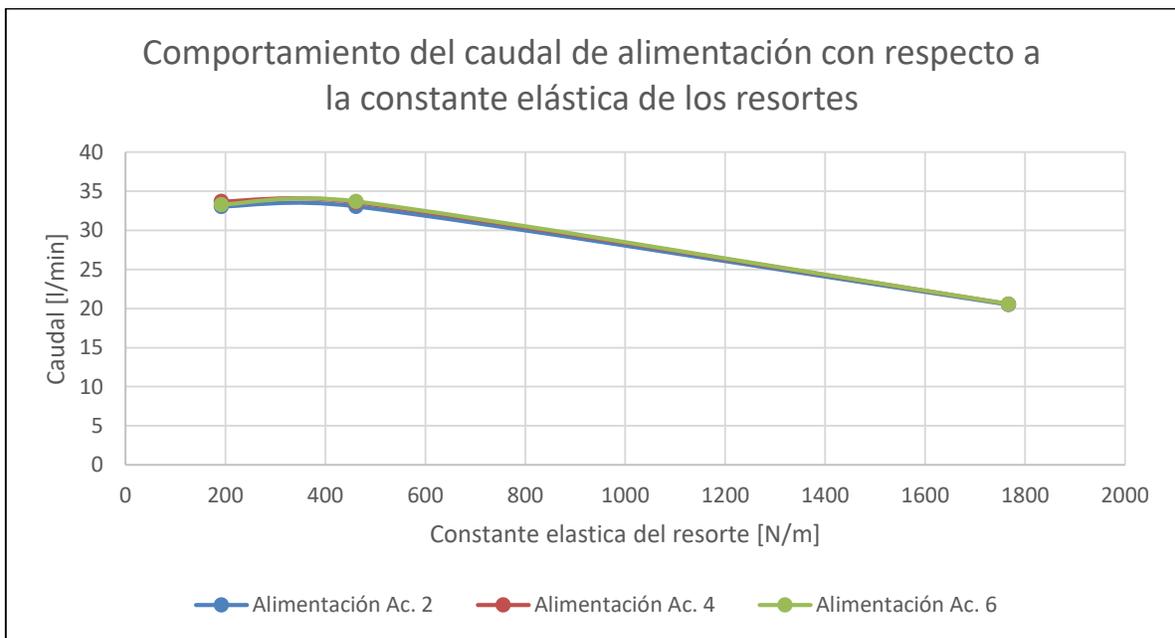
Con respecto a la tendencia de ambas gráficas mostradas, se puede inferir que los cambios en el dimensionamiento del acumulador no son representativos en el comportamiento del ariete hidráulico. Esto concuerda con lo encontrado por (Inthachot et al., 2015) y (Quiroga et al., 2013), puesto que ambos hallaron a través de pruebas realizadas para acumuladores diferentes que no hay una influencia significativa con respecto al comportamiento y la eficiencia del ariete.

En la Gráfica 6 y Gráfica 7 se puede observar el comportamiento del caudal de alimentación con respecto a la constante elástica del resorte, mientras se mantiene constante la altura y el volumen del acumulador respectivamente, a diferencia de la Gráfica 2 y Gráfica 3, que se apreciaba el caudal de descarga y desperdicio.

En dichas gráficas es posible observar en el eje X el caudal de alimentación en [l/min], y en el eje Y aparece la constante elástica del resorte en [N/m]. En ambas se observa un grupo de tres curvas que tienen un comportamiento prácticamente similar. Inicialmente se aprecian que estas tienen una tendencia constante, luego decrecen considerablemente.



Gráfica 6. Comportamiento del caudal de alimentación (1).



Gráfica 7. Comportamiento del caudal de alimentación (2).

De acuerdo con las pruebas realizadas, se puede decir que a medida que el valor de la constante elástica aumenta, el caudal de alimentación se reduce. Si se detalla la Tabla 13 y

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

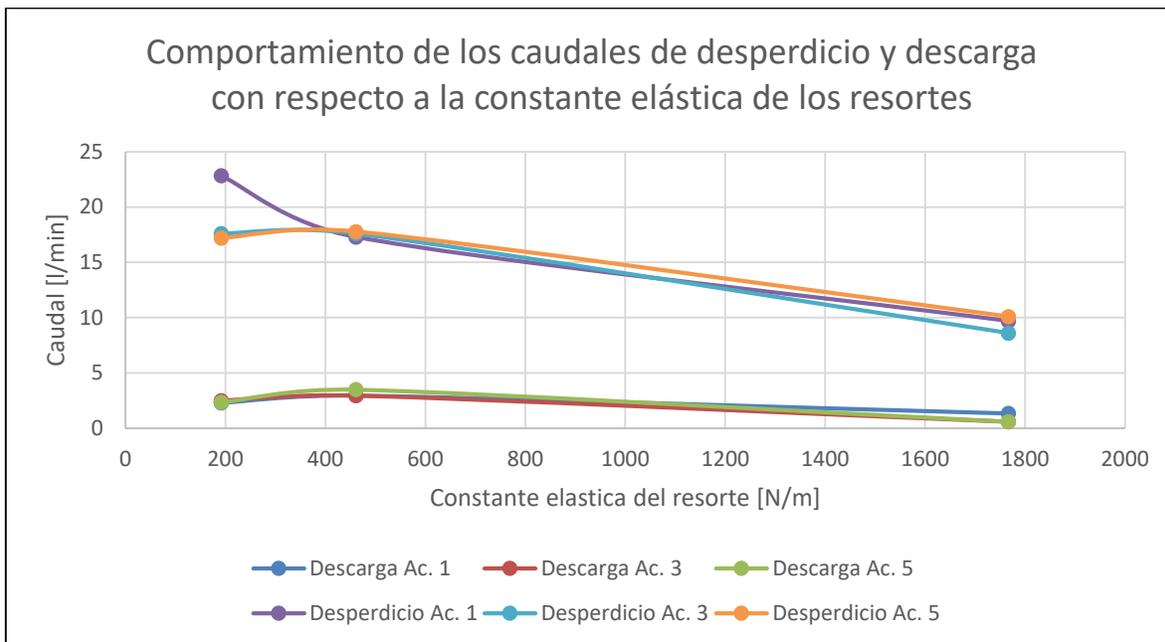
Tabla 14, para la constante elástica de mayor magnitud K_3 con respecto a K_1 y K_2 , la frecuencia de golpes de la válvula de impulso es mayor, por lo que es posible relacionar junto a la Gráfica 2 y Gráfica 3 que, entre más golpes efectúe la válvula de impulso, menor caudal desperdicia y mayor caudal eleva, esto evaluado para la misma altura de alimentación y de descarga, donde una teoría dicha por (Rengifo & Gallego, 2016), a cerca del funcionamiento del ariete hidráulico avala lo dicho anteriormente, donde enmarca que: que entre más lento sea el golpe, más agua utiliza y bombea.

4.1.2. ALTURA ALIMENTACIÓN DE 1,00 m DE ALTURA DESCARGA DE 1.50 m

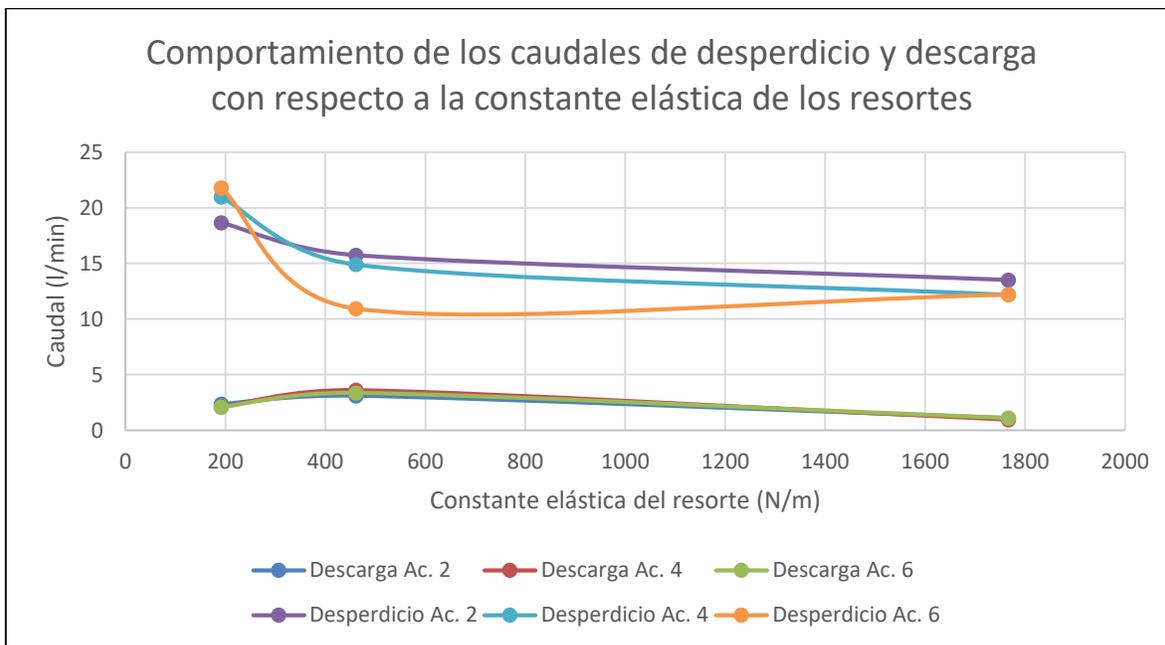
Se analizó la condición en donde la altura de alimentación es de 1,00 m y la altura de descarga es de 1,50 m. Los datos obtenidos de la Tabla 15 son aplicables para la Gráfica 8, Gráfica 10 y Gráfica 12; en cambio la Tabla 16 se aplica para la Gráfica 9, Gráfica 11 y Gráfica 13. Los resultados presentan una leve diferencia con respecto al análisis obtenido en el numeral anterior.

En la Gráfica 8 y Gráfica 9 se presenta el comportamiento de los caudales de descarga y desperdicio con respecto a las diferentes constantes elásticas utilizadas para el análisis experimental, donde se mantuvo constante la altura del acumulador y se modificaba el volumen de este (Gráfica 8) y se mantiene constante el volumen y se modifica la altura (Gráfica 9).

En ambas gráficas es posible observar en el eje X los diferentes valores de la constante elástica del resorte en [N/m], y en el eje Y establece los caudales anteriormente nombrados en [l/min]. Al igual que lo mostrado en las gráficas 1 y 2, aparecen dos grupos conformados por tres curvas cada uno. Se puede observar una breve diferencia con respecto a lo visto en las gráficas mencionadas previamente.



Gráfica 8. Comportamiento de los caudales de desperdicio y descarga (5).



Gráfica 9. Comportamiento de los caudales de desperdicio y descarga (6).

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Como se puede apreciar, en ambas gráficas el comportamiento del caudal de descarga es decreciente a medida que se aumenta la constante elástica del resorte. Por otra parte, los caudales de desperdicio poseen un comportamiento diferente. En la Gráfica 8 se observa un comportamiento similar al de la Gráfica 2 y Gráfica 3, a excepción del instante en el que se usó el acumulador 1, donde hubo un mayor caudal de desperdicio con la constante elástica K_1 . También cabe analizar que el caudal desperdiciado es menor que lo visto al realizar las pruebas desde la misma altura de alimentación y descarga.

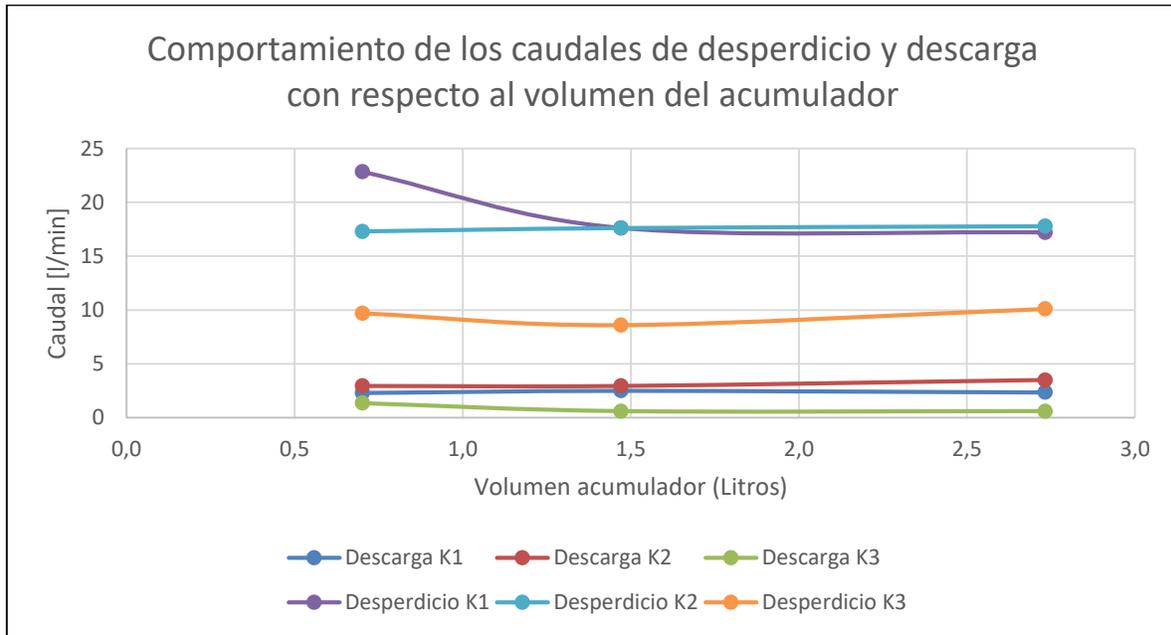
Por otra parte, la Gráfica 9 difiere en la tendencia de las curvas, donde estas decrecen en una mayor medida entre las constantes K_1 y K_2 , y a menor medida entre las constantes K_2 y K_3 ; al utilizar el acumulador 6, la tendencia del caudal desperdiciado parece aumentar entre las constantes K_2 y K_3 . Con lo dicho anteriormente, se pudo comprobar la conclusión dada por (Quiroga et al., 2013), donde enuncia que a un menor valor de la constante elástica proporciona una eficiencia mayor, para el case de bajas alturas (la anterior información se puede corroborar en la Tabla 19 y Tabla 20).

Con lo anterior se pudo ver que hay una breve variación en el comportamiento del ariete con respecto a las cámaras de aire, siendo más notorio en las constante elásticas K_1 y K_2 de los caudales de desperdicio al utilizar los acumuladores 1 y 6, respectivamente. Finalmente, se puede decir que, a diferencia de la Gráfica 2 y Gráfica 3, la frecuencia de los golpes de la válvula de impulso no influyó para que haya una tendencia creciente en el caudal de descarga que, por el contrario, es lo opuesto a lo experimentado cuando el ariete hidráulico trabaja a la misma altura de alimentación y elevación.

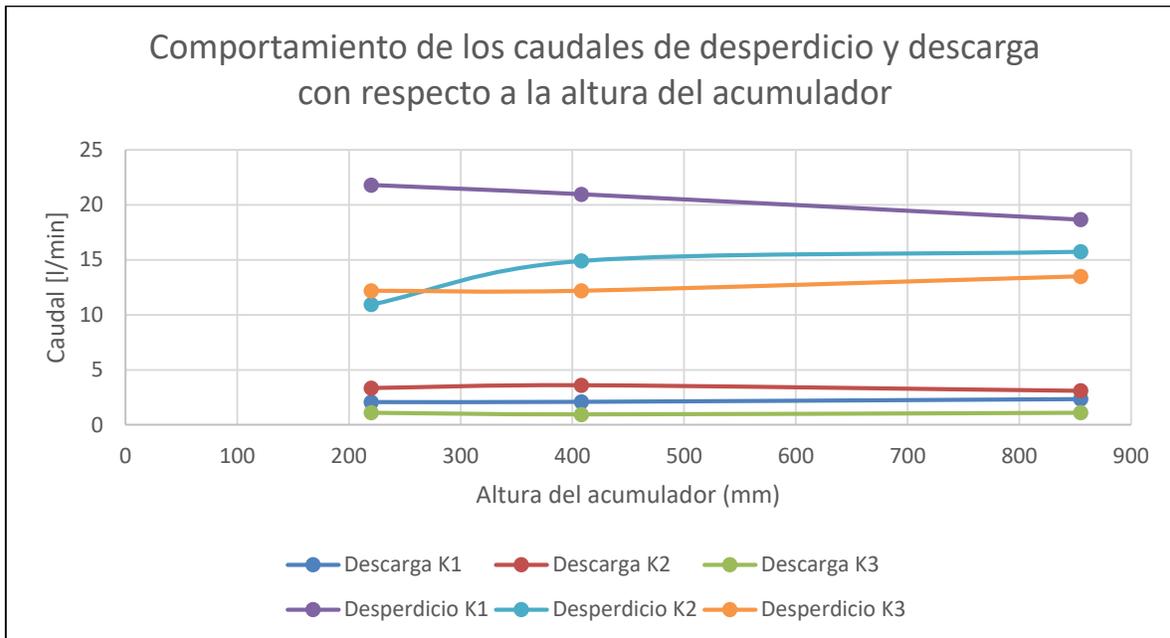
En la Gráfica 10 y Gráfica 11, se presentará la influencia del acumulador con respecto a los caudales de descarga y desperdicio, mientras se mantuvo constante la altura y el volumen del acumulador, respectivamente.

En dichas gráficas, se puede analizar en el eje X la variación del volumen del acumulador en litros (Gráfica 10), y la altura de este en mm (Gráfica 11) respectivamente; en el eje Y se puede ver el comportamiento del caudal en [l/min]. Se puede ver que la

tendencia de la gráfica es irregular, puesto que presenta comportamientos lineales, crecientes y decrecientes con respecto al caudal desperdiciado.



Gráfica 10. Comportamiento de los caudales de desperdicio y descarga (7).



Gráfica 11. Comportamiento de los caudales de desperdicio y descarga (8).

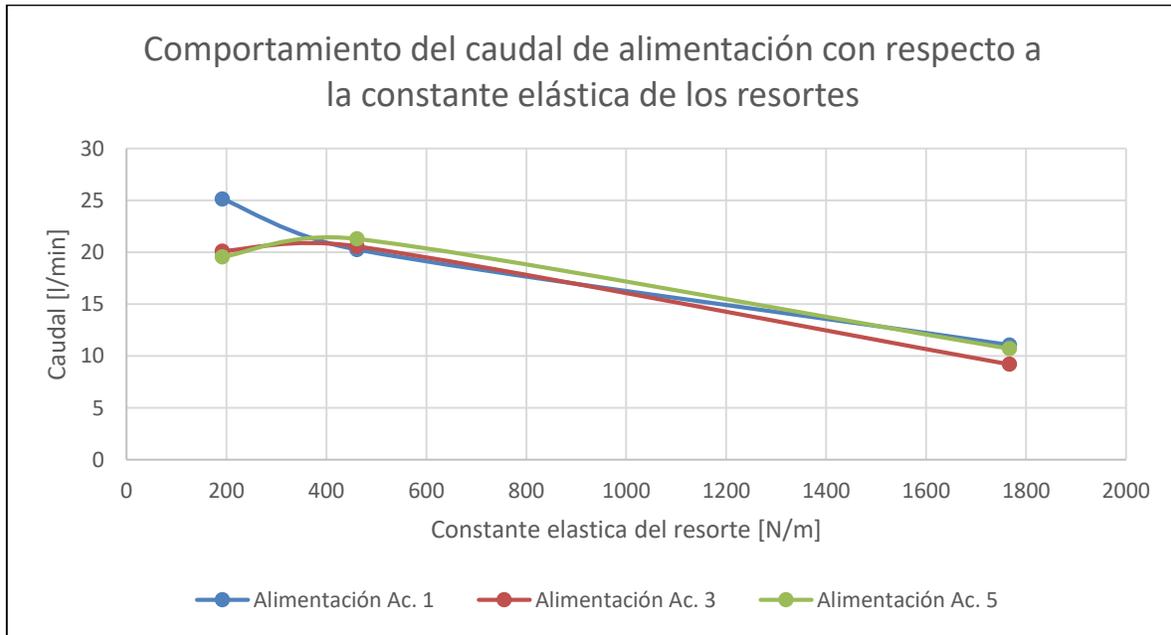
Respecto a ambas gráficas, el comportamiento del caudal de descarga es muy similar, aunque hay breves incrementos y decrementos que son insignificantes. Por otro lado, el caudal de desperdicio presentó una variación parcial: la constante elástica K_1 presentó un comportamiento decreciente en ambas gráficas; K_2 mostró un comportamiento creciente en la Gráfica 11; K_3 obtuvo una concavidad en la Gráfica 10, y un crecimiento en la Gráfica 11.

Por lo tanto, el dimensionamiento del acumulador tuvo cierto impacto en el caudal desperdiciado, pero fue insignificante para el caudal de descarga.

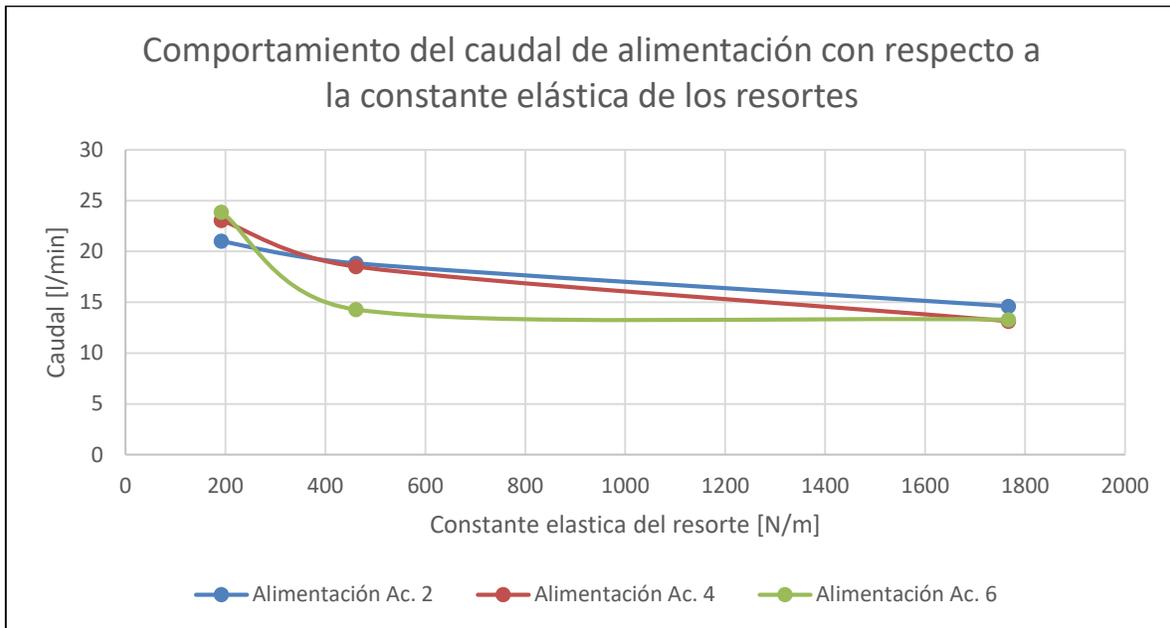
Finalmente, la Gráfica 12 y Gráfica 13 muestran el comportamiento del caudal de descarga con respecto a la constante elástica del resorte cuando hay un diferencial de altura, donde la Gráfica 12 y la Gráfica 13 representa la altura y el volumen de los acumuladores constante, respectivamente.

En lo que respecta a las gráficas anteriormente mencionadas, en el eje X se ubican las diferentes constantes elásticas utilizadas en [N/m], y en el eje Y se aprecia el caudal de

alimentación en [l/min]. Se puede observar en cada gráfica un grupo de tres curvas con un comportamiento decreciente al aumentar el valor de la constante elástica.



Gráfica 12. Comportamiento del caudal de alimentación (3).



Gráfica 13. Comportamiento del caudal de alimentación (4).

Como se puede apreciar, en la Gráfica 12 el comportamiento entre las constantes K_2 y K_3 es decreciente, pero entre K_1 y K_2 los acumuladores 3 y 5 presentan un breve crecimiento; en la Gráfica 13, la tendencia es netamente decreciente, aunque de K_2 a K_3 la magnitud de la disminución del caudal de alimentación es menor. Con respecto a las constantes elásticas, se puede notar que, al aumentar el valor de esta, el caudal de alimentación disminuye. Nuevamente se puede decir que hubo cierta influencia en el acumulador, tal y como se expresó en el análisis en la Gráfica 10 y Gráfica 11, donde se puede ver los espacios que hay entre las curvas. Por último, se referencia nuevamente el análisis hecho por Rengifo & Gallego (2016), donde se encontró que el ariete en cuestión, al generar menos golpes la válvula de impulso logró consumir un mayor caudal de agua.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

4.2. EFECTO DE LA CONSTANTE ELÁSTICA DEL RESORTE

Respecto a los análisis de las gráficas, se encontró que la constante elástica del resorte tiene una gran influencia con respecto al comportamiento del ariete hidráulico. Para la misma altura de alimentación y descarga, se observó que a medida que el valor de la constante elástica aumentaba, también lo hacía el caudal de descarga y disminuían los caudales de desperdicio y alimentación. Al analizar la Gráfica 2 y Gráfica 3, se puede notar una cercanía entre los puntos de ambos caudales (desperdicio y descarga) con respecto a la constante elástica K_3 , por lo que la eficiencia del dispositivo es mayor.

Por otra parte, cuando hubo una diferencia de altura, los caudales de desperdicio y alimentación obtuvieron una tendencia decreciente, con el aumento de la constante elástica. Por su parte el caudal de descarga tendía a cero. Con lo anterior, se puede decir que hay un valor límite de la constante elástica para lograr obtener un caudal de descarga, puesto que una menor constante elástica produjo un mayor flujo elevado, pero también un mayor caudal desperdiciado.

Como consecuencia de lo expuesto, la influencia de la constante elástica radica principalmente en el caudal de alimentación, puesto que, para ambas alturas evaluadas, este disminuye al aumentar el valor de la constante. Con respecto al caudal de descarga, el efecto de la constante elástica para ambas configuraciones de altura fue diferente: a la misma altura tenía una tendencia creciente, mientras que para diferente altura disminuía (mayor altura de descarga que de alimentación), el mismo tendía a cero. Finalmente, el caudal desperdiciado tuvo una tendencia de disminuir a medida que la constante elástica aumentaba de valor, aunque no de forma proporcional a la reducción del caudal de descarga.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

4.3. EFECTO DEL ACUMULADOR

Al analizar las gráficas expuestas, se encontró que el dimensionamiento del acumulador tiene un efecto parcial en el comportamiento de la bomba de ariete.

Al tener la misma altura de alimentación y descarga, se encontró que el dimensionamiento del acumulador no representó efecto alguno en el comportamiento del dispositivo, puesto que no modifica los caudales evaluados.

En cambio, al evaluar el ariete hidráulico a diferente altura, se notó unos cambios mínimos en el caudal de descarga para ambas modificaciones constructivas, por lo que se puede decir que la influencia del acumulador con respecto al agua elevada es insignificante.

Por el contrario, Hubo una mayor influencia referido al caudal desperdiciado, donde dicho caudal sufrió una mediana modificación al mantener el volumen del acumulador constante, por lo que se experimentó una mejor eficiencia con el acumulador de menor altura evaluado.

Dentro del análisis expuesto, es posible afirmar que a la misma altura de alimentación y descarga, el dimensionamiento de la cámara de aire fue indiferente; mientras que, a diferentes alturas, las modificaciones realizadas en el acumulador tuvieron cierto impacto en el caudal desperdiciado, pero su efecto es despreciable en el caudal de descarga.

4.4. EFICIENCIA Y RENDIMIENTO VOLUMÉTRICO

Con la toma de datos obtenidos en la Tabla 13, Tabla 14, Tabla 15 y Tabla 16, se procedió a realizar un análisis adicional para determinar el comportamiento del ariete hidráulico por medio de la eficiencia y el rendimiento volumétrico. Se realizó el cálculo con el programa ofimático Excel, donde por medio de las fórmulas anteriormente mencionadas, se podrá determinar de forma porcentual el comportamiento de los caudales obtenidos.

La Tabla 17, Tabla 18, Tabla 19 y Tabla 20 se presenta los valores de la constante elástica, los caudales del proceso con su respectiva eficiencia y rendimiento volumétrico.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Como se puede observar, no fue necesario reescribir los valores de las dimensiones del acumulador, debido a que las variables calculadas porcentualmente no dependen directamente del dimensionamiento de la cámara de aire ni de la constante elástica del resorte, donde este último valor fue digitado para servir como guía en el análisis.

Es importante recordar que el rendimiento volumétrico hace referencia a la cantidad de caudal elevado con respecto al que ingresa al ariete y la eficiencia relaciona el caudal y altura de descarga con respecto al caudal y altura de alimentación, respectivamente. Dichas variables se expresan de forma porcentual.

Inicialmente se va a centrar en el análisis de la Tabla 17 y Tabla 18. En ambas se puede observar que la mayor eficiencia y rendimiento volumétrico se obtuvo con el más alto valor de la constante elástica; esto se puede corroborar con la Gráfica 2 y Gráfica 3, donde los puntos de los caudales de desperdicio y descarga tienen un valor porcentual alrededor del 30% al estar más cerca entre sí que las demás constantes elásticas, por lo que se puede decir que, entre más cerca estén estos puntos, hay una mayor eficiencia en el comportamiento de la bomba de ariete.

Paralelo a ello, se puede ver una vez más la influencia de la constante elástica en esta configuración de alturas. En esta parte se puede corroborar la conclusión dada con respecto a que una mayor constante elástica proporciona una mejor eficiencia.

Para la Tabla 19 y Tabla 20 ocurre algo completamente distinto. En este caso la constante elástica K_3 fue la que presentó una menor eficiencia con respecto a las otras dos analizadas. Además, si se observa el resultado obtenido con E_{17} y η_{v17} con respecto a la Gráfica 9, se puede corroborar lo dicho anteriormente con respecto a la cercanía de los puntos en la gráfica. Por otro lado, para la variación de altura se puede ver que el único comportamiento consecutivo es el caudal desperdiciado, ya que las demás variables no cumplen una tendencia como tal. Finalmente, la constante K_2 fue la que obtuvo una mayor eficiencia y un mayor rendimiento volumétrico, para todos los casos.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Eficiencia y rendimiento volumétrico para la altura del acumulador constante y alturas de alimentación y descarga de 1,50 m											
Constante elástica del resorte (N/m)	Caudal de alimentación promedio (L/min)		Caudal de descarga promedio (L/min)		Caudal desperdiciado promedio (L/min)		Eficiencia (%)		Rendimiento volumétrico (%)		
	K_1	191,74	$Q_{al.1}$	32,487	$Q_{desc.1}$	4,400	$Q_{desp.1}$	28,087	E_1	13,54	$\eta_{v.1}$
K_2	461,25	$Q_{al.2}$	33,576	$Q_{desc.2}$	4,900	$Q_{desp.2}$	28,676	E_2	14,59	$\eta_{v.2}$	14,59
K_3	1767,1	$Q_{al.3}$	20,978	$Q_{desc.3}$	6,500	$Q_{desp.3}$	14,478	E_3	30,98	$\eta_{v.3}$	30,98
K_1	191,74	$Q_{al.4}$	33,443	$Q_{desc.4}$	4,500	$Q_{desp.4}$	28,943	E_4	13,46	$\eta_{v.4}$	13,46
K_2	461,25	$Q_{al.5}$	33,072	$Q_{desc.5}$	4,500	$Q_{desp.5}$	28,572	E_5	13,61	$\eta_{v.5}$	13,61
K_3	1767,1	$Q_{al.6}$	20,728	$Q_{desc.6}$	6,250	$Q_{desp.6}$	14,478	E_6	30,15	$\eta_{v.6}$	30,15
K_1	191,74	$Q_{al.7}$	33,526	$Q_{desc.7}$	4,750	$Q_{desp.7}$	28,776	E_7	14,17	$\eta_{v.7}$	14,17
K_2	461,25	$Q_{al.8}$	33,385	$Q_{desc.8}$	4,500	$Q_{desp.8}$	28,885	E_8	13,48	$\eta_{v.8}$	13,48
K_3	1767,1	$Q_{al.9}$	20,160	$Q_{desc.9}$	6,100	$Q_{desp.9}$	14,060	E_9	30,26	$\eta_{v.9}$	30,26

Tabla 17. Eficiencia y rendimiento volumétrico de la Tabla 13.

Eficiencia y rendimiento volumétrico para el volumen del acumulador constante y alturas de alimentación y descarga de 1,50 m											
Constante elástica del resorte (N/m)	Caudal de alimentación promedio (L/min)		Caudal de descarga promedio (L/min)		Caudal desperdiciado promedio (L/min)		Eficiencia (%)		Rendimiento volumétrico (%)		
	K_1	191,74	$Q_{al.10}$	33,058	$Q_{desc.10}$	4,700	$Q_{desp.10}$	28,358	E_{10}	14,22	$\eta_{v.10}$
K_2	461,25	$Q_{al.11}$	33,067	$Q_{desc.11}$	4,600	$Q_{desp.11}$	28,467	E_{11}	13,91	$\eta_{v.11}$	13,91
K_3	1767,1	$Q_{al.12}$	20,511	$Q_{desc.12}$	6,200	$Q_{desp.12}$	14,311	E_{12}	30,23	$\eta_{v.12}$	30,23
K_1	191,74	$Q_{al.13}$	33,694	$Q_{desc.13}$	4,500	$Q_{desp.13}$	29,194	E_{13}	13,36	$\eta_{v.13}$	13,36
K_2	461,25	$Q_{al.14}$	33,585	$Q_{desc.14}$	4,700	$Q_{desp.14}$	28,885	E_{14}	13,99	$\eta_{v.14}$	13,99
K_3	1767,1	$Q_{al.15}$	20,577	$Q_{desc.15}$	6,350	$Q_{desp.15}$	14,227	E_{15}	30,86	$\eta_{v.15}$	30,86
K_1	191,74	$Q_{al.16}$	33,294	$Q_{desc.16}$	4,200	$Q_{desp.16}$	29,094	E_{16}	12,61	$\eta_{v.16}$	12,61
K_2	461,25	$Q_{al.17}$	33,698	$Q_{desc.17}$	4,500	$Q_{desp.17}$	29,198	E_{17}	13,35	$\eta_{v.17}$	13,35
K_3	1767,1	$Q_{al.18}$	20,564	$Q_{desc.18}$	6,400	$Q_{desp.18}$	14,164	E_{18}	31,12	$\eta_{v.18}$	31,12

Tabla 18. Eficiencia y rendimiento volumétrico de la Tabla 14.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Eficiencia y rendimiento volumétrico para la altura del acumulador constante, altura de alimentación de 1,00 m y altura de descarga de 1,50 m											
Constante elástica del resorte (N/m)	Caudal de alimentación promedio (L/min)		Caudal de descarga promedio (L/min)		Caudal desperdiciado promedio (L/min)		Eficiencia (%)		Rendimiento volumétrico (%)		
	K	Q_{al}	Q_{desc}	Q_{desc}	Q_{desp}	Q_{desp}	E	E	η_v	η_v	
K_1	191,74	$Q_{al.1}$	25,130	$Q_{desc.1}$	2,300	$Q_{desp.1}$	22,830	E_1	13,73	$\eta_{v.1}$	9,15
K_2	461,25	$Q_{al.2}$	20,246	$Q_{desc.2}$	2,950	$Q_{desp.2}$	17,296	E_2	21,86	$\eta_{v.2}$	14,57
K_3	1767,1	$Q_{al.3}$	11,050	$Q_{desc.3}$	1,350	$Q_{desp.3}$	9,700	E_3	18,33	$\eta_{v.3}$	12,22
K_1	191,74	$Q_{al.4}$	20,110	$Q_{desc.4}$	2,500	$Q_{desp.4}$	17,610	E_4	18,65	$\eta_{v.4}$	12,43
K_2	461,25	$Q_{al.5}$	20,560	$Q_{desc.5}$	2,950	$Q_{desp.5}$	17,610	E_5	21,52	$\eta_{v.5}$	14,35
K_3	1767,1	$Q_{al.6}$	9,200	$Q_{desc.6}$	0,600	$Q_{desp.6}$	8,600	E_6	9,78	$\eta_{v.6}$	6,52
K_1	191,74	$Q_{al.7}$	19,542	$Q_{desc.7}$	2,350	$Q_{desp.7}$	17,192	E_7	18,04	$\eta_{v.7}$	12,03
K_2	461,25	$Q_{al.8}$	21,277	$Q_{desc.8}$	3,500	$Q_{desp.8}$	17,777	E_8	24,67	$\eta_{v.8}$	16,45
K_3	1767,1	$Q_{al.9}$	10,700	$Q_{desc.9}$	0,600	$Q_{desp.9}$	10,100	E_9	8,41	$\eta_{v.9}$	5,61

Tabla 19. Eficiencia y rendimiento volumétrico de la Tabla 15.

Eficiencia y rendimiento volumétrico para el volumen del acumulador constante, altura de alimentación de 1,00 m y altura de descarga de 1,50 m											
Constante elástica del resorte (N/m)	Caudal de alimentación promedio (L/min)		Caudal de descarga promedio (L/min)		Caudal desperdiciado promedio (L/min)		Eficiencia (%)		Rendimiento volumétrico (%)		
	K	Q_{al}	Q_{desc}	Q_{desc}	Q_{desp}	Q_{desp}	E	E	η_v	η_v	
K_1	191,74	$Q_{al.10}$	21,004	$Q_{desc.10}$	2,350	$Q_{desp.10}$	18,654	E_{10}	16,78	$\eta_{v.10}$	11,19
K_2	461,25	$Q_{al.11}$	18,830	$Q_{desc.11}$	3,100	$Q_{desp.11}$	15,730	E_{11}	24,69	$\eta_{v.11}$	16,46
K_3	1767,1	$Q_{al.12}$	14,600	$Q_{desc.12}$	1,100	$Q_{desp.12}$	13,500	E_{12}	11,30	$\eta_{v.12}$	7,53
K_1	191,74	$Q_{al.13}$	23,050	$Q_{desc.13}$	2,100	$Q_{desp.13}$	20,950	E_{13}	13,67	$\eta_{v.13}$	9,11
K_2	461,25	$Q_{al.14}$	18,495	$Q_{desc.14}$	3,600	$Q_{desp.14}$	14,895	E_{14}	29,20	$\eta_{v.14}$	19,46
K_3	1767,1	$Q_{al.15}$	13,131	$Q_{desc.15}$	0,950	$Q_{desp.15}$	12,181	E_{15}	10,85	$\eta_{v.15}$	7,23
K_1	191,74	$Q_{al.16}$	23,866	$Q_{desc.16}$	2,080	$Q_{desp.16}$	21,786	E_{16}	13,07	$\eta_{v.16}$	8,72
K_2	461,25	$Q_{al.17}$	14,278	$Q_{desc.17}$	3,350	$Q_{desp.17}$	10,928	E_{17}	35,19	$\eta_{v.17}$	23,46
K_3	1767,1	$Q_{al.18}$	13,281	$Q_{desc.18}$	1,100	$Q_{desp.18}$	12,181	E_{18}	12,42	$\eta_{v.18}$	8,28

Tabla 20. Eficiencia y rendimiento volumétrico de la Tabla 16.

4.5. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

Para la discusión de los resultados obtenidos, se va a abordar la Tabla 17, Tabla 18, Tabla 19 y Tabla 20, donde se presentan los caudales estudiados, la constante elástica y también se va a considerar las dimensiones del acumulador, aunque no sea tan influyente para el caudal de descarga. Se procederá a dar un breve análisis respectivo y a mostrar la configuración más preferible y la menos eficiente.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

En la Tabla 17 se mantuvo la altura del acumulador constante. Se pudo ver que la eficiencia y el rendimiento volumétrico poseen las mismas magnitudes, debido a que las medidas fueron realizadas a igual altura. El comportamiento de ambos valores porcentuales aumenta a medida que aumenta la constante elástica del resorte, por lo que el mayor valor de esta representa un mejor comportamiento del caudal de descarga y un menor desperdicio de agua por la válvula de impulso. Por otro lado, la constante elástica K_1 y K_2 muestra una tendencia cercana, pero aun así son muy inferiores a K_3 .

La mejor configuración obtenida fue: la constante elástica K_3 equivalente a 1767,1 N/m; el acumulador dimensionado con un diámetro interno $\varnothing_{ac. 1}$ de 54,58 mm, a una altura $h_{ac.}$ de 300 mm y a un volumen $V_{ac. 1}$ de 0,702 litros; caudales de alimentación $Q_{al. 3}$ de 20,978 l/min, descarga $Q_{desc. 3}$ de 6,500 l/min y desperdicio $Q_{desp. 3}$ de 14,478 l/min; una eficiencia E_3 del 30,98%; con un rendimiento volumétrico $\eta_{v 3}$ del 30,98%.

La configuración menos eficiente fue: la constante elástica K_1 equivalente a 191,74 N/m; el acumulador dimensionado con un diámetro interno $\varnothing_{ac. 3}$ de 79,00 mm, a una altura $h_{ac.}$ de 300 mm y a un volumen $V_{ac. 3}$ de 1,471 litros; caudales de alimentación $Q_{al. 4}$ de 33,443 l/min, descarga $Q_{desc. 4}$ de 4,500 l/min y desperdicio $Q_{desp. 4}$ de 28,943 l/min; una eficiencia E_4 del 13,46%; con un rendimiento volumétrico $\eta_{v 4}$ del 13,46%.

En la Tabla 18 se mantuvo el volumen del acumulador constante. Se puede observar un comportamiento prácticamente igual a la Tabla 17, debido a que no hay influencia mayor del acumulador en el comportamiento del ariete hidráulico.

La mejor configuración obtenida fue: la constante elástica K_3 equivalente a 1767,1 N/m; el acumulador dimensionado con un diámetro interno $\varnothing_{ac. 6}$ de 107,70 mm, a una altura $h_{ac. 6}$ de 220 mm y a un volumen $V_{ac.}$ de 2,000 litros; caudales de alimentación $Q_{al. 18}$ de 20,564 l/min, descarga $Q_{desc. 18}$ de 6,400 l/min y desperdicio $Q_{desp. 18}$ de 14,164 l/min; una eficiencia E_{18} del 31,12%; con un rendimiento volumétrico $\eta_{v 18}$ del 31,12%.

La configuración menos eficiente fue: la constante elástica K_1 equivalente a 191,74 N/m; el acumulador dimensionado con un diámetro interno $\varnothing_{ac. 6}$ de 107,70 mm, a una altura $h_{ac. 6}$ de 220 mm y a un volumen $V_{ac.}$ de 2,000 litros; caudales de alimentación

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

$Q_{al. 16}$ de 33,294 l/min, descarga $Q_{desc. 16}$ de 4,200 l/min y desperdicio $Q_{desp. 16}$ de 29,094 l/min; una eficiencia E_{16} del 12,61%; con un rendimiento volumétrico $\eta_{v 16}$ del 12,61%.

En la Tabla 19 se mantuvo la altura del acumulador constante. Se muestra una tendencia parcialmente decreciente con respecto al caudal de alimentación y en el caudal desperdiciado a medida que el valor de la constante elástica aumentaba. Por parte del caudal de descarga y los cálculos porcentuales se notó un comportamiento que iba en aumento en el orden de K_1 , K_3 y K_2 para los primeros 3 datos, y de K_3 , K_1 y K_2 para los datos restantes, respectivamente. Por último, el comportamiento con respecto a las variables porcentuales fue de menor magnitud con respecto a la Tabla 17 y Tabla 18, debido al diferencial de altura que estuvo presente.

La mejor configuración obtenida fue: la constante elástica K_2 equivalente a 461,25 N/m; el acumulador dimensionado con un diámetro interno $\phi_{ac. 5}$ de 107,70 mm, a una altura $h_{ac.}$ de 300 mm y a un volumen $V_{ac. 5}$ de 2,733 litros; caudales de alimentación $Q_{al. 8}$ de 21,277 l/min, descarga $Q_{desc. 8}$ de 3,500 l/min y desperdicio $Q_{desp. 8}$ de 17,777 l/min; una eficiencia E_8 del 24,67%; con un rendimiento volumétrico $\eta_{v 8}$ del 16,45%.

La configuración menos eficiente: la constante elástica K_3 equivalente a 1767,1 N/m; el acumulador dimensionado con un diámetro interno $\phi_{ac. 5}$ de 107,70 mm, a una altura $h_{ac.}$ de 300 mm y a un volumen $V_{ac. 5}$ de 2,733 litros; caudales de alimentación $Q_{al. 9}$ de 10,700 l/min, descarga $Q_{desc. 9}$ de 0,600 l/min y desperdicio $Q_{desp. 9}$ de 10,100 l/min; una eficiencia E_9 del 8,41%; con un rendimiento volumétrico $\eta_{v 9}$ del 5,61%.

En la Tabla 20 se mantuvo el volumen del acumulador constante. Se aprecia un comportamiento similar, aunque la tendencia del caudal de descarga y los cálculos porcentuales fue del orden de K_3 , K_1 y K_2 .

La mejor configuración obtenida fue: la constante elástica K_2 equivalente a 461,25 N/m; el acumulador dimensionado con un diámetro interno $\phi_{ac. 6}$ de 107,70 mm, a una altura $h_{ac. 6}$ de 220 mm y a un volumen $V_{ac.}$ de 2,00 litros; caudales de alimentación $Q_{al. 17}$ de 14,278 l/min, descarga $Q_{desc. 17}$ de 3,350 l/min y desperdicio $Q_{desp. 17}$ de 10,928 l/min; una eficiencia E_{17} del 35,19%; con un rendimiento volumétrico $\eta_{v 17}$ del 23,46%.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

La configuración menos eficiente fue: la constante elástica K_3 equivalente a 1767,1 N/m; el acumulador dimensionado con un diámetro interno $\varnothing_{ac. 4}$ de 79,00 mm, a una altura $h_{ac.4}$ de 408 mm y a un volumen $V_{ac.}$ de 2,00 litros; caudales de alimentación $Q_{al. 15}$ de 13,131 l/min, descarga $Q_{desc. 15}$ de 0,950 l/min y desperdicio $Q_{desp. 15}$ de 12,181 l/min; una eficiencia E_{15} del 10,85%; con un rendimiento volumétrico $\eta_{v 15}$ del 7,23%.

4.6. COMPARACIÓN CON OTROS AUTORES

En este punto se expondrán los resultados obtenidos de diferentes autores para comparar si la eficiencia del prototipo fue aceptable o, por el contrario, se obtuvo una eficiencia y rendimiento volumétrico inferior.

Con respecto a los autores Quiroga et al. (2013), hubo mayor coherencia con los resultados. Estos, en los datos obtenidos encontraron que, para una diferencia de altura (alimentación y descarga), a medida que la constante elástica aumenta la eficiencia del ariete disminuye; comparando con los resultados obtenidos en la Tabla 19 y Tabla 20 se puede ver que se cumple lo anterior. Por otra parte, se corroboró la hipótesis planteada por estos autores, donde el dimensionamiento del acumulador fue insignificante para el caudal de descarga. Lo anterior también se cumple para el presente prototipo, aunque se descubrió que la cámara de aire tiene cierta influencia con el caudal desperdiciado.

Para el caso de Inthachot et al. (2015), estos concluyen que la cámara de aire no tiene un impacto significativo con respecto a la eficiencia al tener diferentes alturas de alimentación y descarga, donde esto tiene sentido si se observa la Tabla 19 y Tabla 20.

Por otro lado, Acitores (2012) realizó la variación del ángulo de inclinación de la tubería de alimentación y encontró que al tener la tubería de admisión completamente recta, el ariete presenta un mayor rendimiento volumétrico que si tiene cualquier otro tipo de inclinación. Por lo tanto, el prototipo construido para este proyecto no presentó falencias por la inclinación de la tubería de entrada al ariete, debido a que no hubo inclinación para

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

esta, aunque las alturas de alimentación y descarga no coinciden con la las mismas que la experimentada por el autor anteriormente citado. Cabe destacar que este aspecto no fue tomado en cuenta, pero es importante para futuros diseños.

También, Hussin et al. (2017) realizaron pruebas en un prototipo de ariete hidráulico a una altura de alimentación de 1,8 m y descarga de 3 m, aunque no dejan en claro el valor de la constante elástica del resorte que utilizaron. La eficiencia obtenida por ellos es inferior a la hallada en este experimento, pero solo para el caso de las dos constantes elásticas de menor magnitud. Además, encontraron que, a menor diámetro de la cámara de aire, mayor es la presión generada por esta. Pese a que este aspecto no fue tomado en cuenta en este proyecto, se puede pensar en evaluar el comportamiento de los acumuladores descritos en este proyecto con respecto a la presión experimental que manifiestan al variar la constante elástica del resorte.

La configuración realizada por Rengifo & Gallego (2016) presentó un mejor rendimiento volumétrico al variar el caudal de entrada al ariete. Se pudo observar que, con una diferencia de altura de 0,5 m, al disminuirse el caudal de alimentación hay un mejor comportamiento del rendimiento volumétrico. Cabe señalar que Rengifo no varió el volumen del acumulador ni las pesas de la válvula de impulso. En el análisis realizado, se puede pensar que, al tener un menor caudal de admisión a la bomba, hay un mejor rendimiento del volumen del fluido.

Finalmente, Bustamante & Quezada (2009), en las gráficas obtenidas de su experimento, se puede apreciar que hay un mayor rendimiento volumétrico al utilizar tres válvula de impulso con 9 mm de carrera y un peso de 500 gramos para cada válvula, esto en comparación con una sola. Cabe agregar que variaron la carrera de la válvula de impulso y el peso de esta y no modificaron el dimensionamiento del acumulador ni utilizaron resortes. En lo que respecta, hay una mayor eficiencia con esta configuración que con el experimento llevado a cabo. Con lo anterior, es posible pesar en ver el comportamiento del ariete hidráulico con tres válvulas de impulso en serie y variar la constante elástica del

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

resorte para determinar si la eficiencia y el rendimiento volumétrico es superior o inferior al propuesto por estos autores.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

5. CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

5.1. CONCLUSIONES

En cuanto a lo abordado con anterioridad, no se logra encontrar una relación directa entre la constante elástica del resorte y el dimensionamiento de la cámara de aire, por lo que el diseño de un ariete hidráulico eficiente depende exclusivamente del resorte y no del acumulador.

Dentro del análisis expuesto se comprueba que la variación de la constante elástica del resorte tiene una gran influencia en el comportamiento del ariete hidráulico. A la misma altura de alimentación y descarga se afirma que un valor mayor de esta permite que el ariete sea más eficiente, mientras que a diferente altura se aprecia un mejor desempeño de una constante de menor magnitud.

Con respecto al dimensionamiento del acumulador se puede ver que este no tuvo efecto en el caudal de descarga. No obstante, al tener una diferencia de altura con respecto a la alimentación y elevación del fluido, se comprueba que una menor altura de la cámara de aire genera un comportamiento más eficiente en el ariete hidráulico.

Dentro del análisis realizado con relación a otros autores, se detalla que, para un prototipo similar, el ariete hidráulico llevado a cabo posee una eficiencia y rendimiento volumétrico parecido; mientras que, con prototipos diferentes, es inferior en los aspectos anteriormente nombrados.

Se logra una profunda investigación en la literatura, donde se obtienen los experimentos realizados por los demás autores, sus fortalezas y falencias con respecto al trabajo implementado en la bomba de ariete.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Por último, se resalta que el ariete hidráulico es una bomba hidráulica fácil de construir y su costo de adquisición no es tan elevado relacionado con otros equipos de bombeo que hay en el mercado.

5.2. RECOMENDACIONES

En el trabajo realizado se encontraron diferentes puntos que se deberían mejorar para una próxima evaluación del dispositivo.

Inicialmente, se recomienda utilizar una base para el soporte de la bomba ariete de un material diferente a la madera, con el fin de que haya una mejor rigidez y una mayor vida útil. Esto se realizó con dicho elemento, debido al presupuesto que se tenía para ese entonces.

Se recomienda diseñar un recipiente ubicado entre el adaptador macho y el acumulador, para que sea posible drenar el agua que la cámara de aire expulsa al retirarse de la bomba. Pese a que la cantidad de agua que se desperdiciaba no alteró los resultados obtenidos, se debía secar constantemente el área de la ubicación del equipo de bombeo dentro del laboratorio donde se tomaron las medidas.

Si se desea probar otros resortes diferentes a los analizados en este documento, se aconseja realizar una modificación en la válvula de impulsos para que sea posible adaptarle cualquier resorte.

Se sugiere utilizar recipientes que tengan una mayor capacidad para tomar medidas volumétricas más exactas, debido a que en el laboratorio donde se realizaron las pruebas no se contaba con instrumentos de medición a pequeña escala para volúmenes superiores a 10 litros.

Si se desea realizar pruebas a una misma altura de alimentación y descarga, se debe evitar al máximo llevar la tubería de descarga a un nivel inferior de altura o el tanque utilizado, debido a que se puede producir el efecto sifón y, en consecuencia, las medidas no serán reales (véase la Figura 54).

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Finalmente, para medir la constante elástica del resorte es ideal diseñar un banco de pruebas donde sea fácil la visualización del desplazamiento de este a medida que se le añaden pesas, puesto que el equipo construido tenía una forma compleja de determinar la diferencia en la distancia a medida que el resorte se iba comprimiendo, por lo que fue necesario crear una tabla en Excel especializada para ello (véase la Tabla 4).

5.3. LÍNEAS DE ACCIÓN PARA FUTUROS PROYECTOS

Variar la constante elástica con respecto al dimensionamiento del acumulador, abrió las puertas a nuevas ideas para llevar a cabo más investigaciones y así determinar otros posibles comportamientos del ariete hidráulico, todo esto considerando lo encontrado por los diferentes autores citados en este documento. A continuación, se proponen nuevas ideas para futuros proyectos con respecto a los resultados obtenidos y la literatura consultada.

Evaluar el comportamiento de la presión cuando se tiene un acumulador con un diámetro interno menor y una altura considerable, mientras se varía la constante elástica del resorte.

Construir un prototipo de ariete hidráulico con tres válvulas de impulso en serie y variar la constante elástica para comparar si es más apropiado utilizar resortes en vez de pesas; relacionando los resultados con respecto a la eficiencia y el rendimiento volumétrico.

Comparar las variaciones realizadas en este proyecto con respecto a la eficiencia y el rendimiento volumétrico, con una válvula de impulso dispuesta horizontalmente.

Realizar la variación del resorte para una mayor elevación del caudal de descarga manteniendo los demás factores constantes, con el fin de obtener una expresión que relacione la altura de descarga con la constante elástica.

Determinar cuál es la válvula de impulso más eficiente de las presentadas en la sección 2.5.3.2 del presente documento, manteniendo los demás factores constantes.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Determinar cuál es la válvula de descarga más eficiente de las presentadas en la sección 2.5.3.3 del presente documento, manteniendo los demás factores constantes.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

REFERENCIAS

- Acitores, F. J. (2012). *Estudio teórico y experimental de la bomba de ariete*. Universidad Carlos III de Madrid. Retrieved from <http://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/14685>
- Alba, A. (2017). LISTA DE PRECIOS 2017. Retrieved October 15, 2018, from <http://arietesalba.es/descargar-pdf/index.html>
- Arapa, J. B. (2016). EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DEL ARIETE HIDRÁULICO BAH- 1.1/2 VARIANDO LA LONGITUD DE LA TUBERÍA DE ALIMENTACIÓN Y CONDICIONES DE OPERACIÓN DE LA VÁLVULA DE IMPULSO, 77(2). <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.21704/ac.v77i2.485>
- Arenas, L. (2014). *Diseño y construcción de un equipo de pruebas para el estudio del golpe de ariete en tuberías rectas*. Universidad tecnológica de Pereira. Retrieved from <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/handle/11059/4970>
- Ayarzagüena Porras, B., Barroso Pellico, J. Á., Illescas, Á. de la C., Losada Doval, T., & Yagüe Anguís, C. (n.d.). Presión atmosférica. Retrieved from <http://meteolab.fis.ucm.es/meteorologia/presion-atmosferica--2>
- Bustamante, A., & Quezada, M. E. (2009). *ESTUDIO DE LOS PARÁMETROS DE FUNCIONAMIENTO DE LA BOMBA DE ARIETE HIDRÁULICO MULTIMPULSOR A&M 1.0*. Universidad politécnica SALESIANA. Retrieved from <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/822>
- Campaña, C. N., & Guamán, D. A. (2011). *Diseño y construcción de una bomba de ariete de ariete hidráulico*. Escuela politécnica nacional. Retrieved from <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/4020>
- Campoverde, E. V., & Pizarro, D. G. (2011). *Emplazamiento, Implementación, pruebas de funcionamiento y propuestas de mejora de los sistemas de bombeo mediante Rueda hidráulica y Ariete multipulsor para el abastecimiento de agua para irrigación en la localidad del Campus Juan Lunardi – Yumacay – Pau*. Universidad politécnica Salesiana. Retrieved from <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/1336>
- Castillo Bermúdez, L. H., Alzate Sierra, J. E., & Holguín, J. M. (2000). Ariete hidráulico de doble cámara, como alternativa para suministro de agua en zonas de ladera. Medellín: Institución universitaria Pascual bravo.
- Chi, M. (2002). *Hydraulic Ram Handbook*. University of Technology and Dipl. Eng. Peter Diemer of

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

BORDA, Zhejiang. Retrieved from <https://es.slideshare.net/Fatin62c/hydraulic-ram-handbook-a-guide-for-policy-makers-technicians-and-users-based-on-experiences-made-in-the-pr-of-china>

Hernández Murillo, O. (2015). ARIETE HIDRAULICO UNIVERSAL. Retrieved from https://www.youtube.com/watch?v=Lx3e1yeo_A4

Hussin, N. S. M., Gamil, S. A., Amin, N. A. M., Safar, M. J. A., Majid, M. S. A., Kazim, M. N. F. M., & Nasir, N. F. M. (2017). Design and analysis of hydraulic ram water pumping system. *Journal of Physics: Conference Series*, 908. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/908/1/012052>

Inthachot, M., Saehaeng, S., Max, J. F. J., Müller, J., & Spreer, W. (2015). Hydraulic Ram Pumps for Irrigation in Northern Thailand. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 5. <https://doi.org/10.1016/j.aaspro.2015.08.015>

Jara, N., Campoverde, E., & Pizarro, D. (2011). Emplazamiento, implementación, pruebas de funcionamiento y propuestas de mejora de los sistemas de bombeo mediante rueda hidráulica y ariete multipulsor para el abastecimiento de agua para irrigación en la localidad del campus Juan Lunardi – Yumacay – Pau. *Ingenius: Revista de Ciencia y Tecnología*. Retrieved from <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5972814>

Jiménez, J. M. (n.d.). Taller de investigación alternativa. Retrieved October 15, 2018, from http://www.terra.org/data/ariete_super.pdf

Jiménez, V. F. (2011). *CÁLCULO, DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE ARIETE HIDRÁULICO*. UNIVERSIDAD VERACRUZANA. Retrieved from https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/36343506/tesis_jarocho.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAIWOWYYGZ2Y53UL3A&Expires=1539763458&Signature=L7v%2FQp4kwaplOeO27G8B9TGVbdw%3D&response-content-disposition=inline%3Bfilename%3DUNIVERSIDAD_VERACRUZANA_FACULTAD

Montecinos Larrosa, A., & Gallardo Quiñones, L. (2004). Los secretos del ariete hidráulico. Retrieved from <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/energia/Energia25/HTML/articulo05.htm>

Mott, R. L. (2006). *Mecanica de Fluidos. Mecánica de Fluidos. Sexta edición* (6 ed.). México: PEARSON EDUCACIÓN. <https://doi.org/10.1109/CDC.2011.6160241>.

Orozco, R. C., Lopez, L. A., & Ramírez, V. J. (2003). *GOLPE DE ARIETE EN PLANATAS DE BOMBEO Y ALIVIADORES DE PRESION*. Corporación universitaria tecnológica de Bolívar. Retrieved from

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

<http://190.242.114.6/vufind/Search/Results?lookfor=ariete+&type=AllFields&limit=20&sort=relevance>

PAVCO. (2014a). Manual técnico turbosistemas presión PVC. Retrieved from

https://pavco.com.co/tuberia-pvc-presion-agua-fria?gclid=Cj0KCQjwxvbdBRCOARIsAKmec9aakf0euo32GuadwITOrtGzi8SPI6ZzBfhsXOCbPjvoeOszxW6WxgcaAulGEALw_wcB

PAVCO. (2014b). Manual técnico turbosistemas sanitaria. Retrieved from

<https://pavco.com.co/tuberia-sanitaria-ventilacion-y-lluvia>

Pinto, M. C. (2015). *Diseño y construcción de un ariete multipulsor con válvulas en disposición circular para el laboratorio de hidráulica de la carrera de ingeniería en electromecánica de la universidad de Loja*. Universidad de Loja. <https://doi.org/10.1017/S0010417500000463>

Quiroga, J. E., Sierra, C. A., & Biancha, G. E. (2013). Análisis del ariete hidráulico para diferentes configuraciones. *Revista UIS ingenierías, N. 2, 12*. Retrieved from

<http://web.a.ebscohost.com/itm.elogim.com/ehost/detail/detail?vid=0&sid=4b9ca2d4-9dbc-45f8-8706-af5a01304d23%40sessionmgr4008&bdata=Jmxhbmc9ZXMmc2l0ZT1laG9zdC1saXZl#AN=97885652&db=fua>

Rengifo, S., & Gallego, J. D. (2016). *DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN SISTEMA DE ARIETE*

HIDRAULICO PARA EL APROVECHAMIENTO DE AGUAS LLUVIAS. Universidad Tecnológica de Pereira. Retrieved from

<http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/handle/11059/6717/62125R412.pdf?sequence=1>

Watt, S. (1975). *A manual on the hydraulic ram for pumping water. A manual on the hydraulic ram for pumping water*. London. Retrieved from

<https://archive.org/details/AManualOnTheHydraulicRamForPumpingWaterS.B.Watt/page/n0>

Zárate, V., & Monroy, J. (2016). Golpe de ariete. Consecuencias y prevenciones. Retrieved from

<https://www.0grados.com/golpe-de-ariete-consecuencias-y-prevenciones/>

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

APÉNDICE

Apéndice A. Variables del proceso.

Variables del proceso					
#	Variables del ariete hidráulico	Símbolo matemático	Símbolo unidad de medida en el sistema internacional	Nombre de la unidad de medida	Característica dentro del proyecto
01	Diámetro de la tubería de alimentación	$\Phi_{al.}$	m	Metro	Constante
02	Altura de alimentación	$h_{al.}$	m	Metro	Constante
03	Longitud de la tubería de alimentación	$L_{al.}$	m	Metro	Constante
04	Ángulo de inclinación de la tubería de alimentación	$\theta_{al.}$	$^{\circ}$	Grado	Constante
05	Caudal de alimentación	$Q_{al.}$	m^3/s	Metro cúbico por segundo	Calculado
06	Diámetro de la tubería del ariete	Φ_{ariete}	m	Metro	Constante
07	Diámetro de la válvula de aire	Φ_{aire}	m	Metro	Constante
08	Área de la válvula de impulso	$A_{imp.}$	m^2	Metro cuadrado	Constante
09	Carrera de la válvula de impulso	$C_{imp.}$	m	Metro	Constante
10	Pesos añadidos a la válvula de impulso	$W_{imp.}$	Kg	Kilogramo	Constante
11	Constante elástica del resorte de la válvula de impulso	K	N/m	Newton por metro	Variable
12	Ángulo de inclinación de la válvula de impulso	$\theta_{imp.}$	$^{\circ}$	Grado	Constante
13	Caudal desperdiciado	$Q_{desp.}$	m^3/s	Metro cúbico por segundo	Medido
14	Frecuencia de golpes de la válvula de impulso	f_{golpes}	$golpes/ minuto$	Golpes por minuto	Medido
15	Área de la válvula de descarga	$A_{desc.}$	m^2	Metro cuadrado	Constante
16	Carrera de la válvula de descarga	$C_{desc.}$	m	Metro	Constante
17	Altura del acumulador	$h_{ac.}$	m	Metro	Variable
18	Diámetro del acumulador	$\Phi_{ac.}$	m	Metro	Variable
19	Volumen del acumulador	$V_{ac.}$	m^3	Metro cúbico	Variable
20	Diámetro de la tubería de descarga	$\Phi_{desc.}$	m	Metro	Constante
21	Altura de la tubería de descarga	$h_{desc.}$	m	Metro	Constante

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

22	Longitud de la tubería de descarga	$L_{desc.}$	m	Metro	Constante
23	Caudal de descarga	$Q_{desc.}$	m^3/s	Metro cúbico por segundo	Medido

Fuente: propia

Apéndice B. Dimensionamiento de los resortes.

Dimensión de los resortes		
Resorte	Descripción	Medida (mm)
Resorte 1	Diámetro externo	13,65
	Diámetro interno	11,65
	Calibre (espesor)	0,90
	Longitud natural	47,00
	Número de espiras	10 espiras
Resorte 2	Diámetro externo	15,20
	Diámetro interno	13,45
	Calibre (espesor)	0,95
	Longitud natural	60,66
	Número de espiras	10 espiras
Resorte 3	Diámetro externo	18,60
	Diámetro interno	16,00
	Calibre (espesor)	1,15
	Longitud natural	44,42
	Número de espiras	7 espiras
Resorte 4	Diámetro externo	15,20
	Diámetro interno	13,30
	Calibre (espesor)	0,90
	Longitud natural	58,48
	Número de espiras	10 espiras
Resorte 5	Diámetro externo	23,10
	Diámetro interno	21,10
	Calibre (espesor)	1,05
	Longitud natural	51,60
	Número de espiras	5 espiras

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Resorte 6	Diámetro externo	13,35
	Diámetro interno	11,00
	Calibre (espesor)	1,15
	Longitud natural	61,80
	Número de espiras	14 espiras
Resorte 7	Diámetro externo	12,50
	Diámetro interno	10,90
	Calibre (espesor)	0,80
	Longitud natural	68,10
	Número de espiras	10 espiras
Resorte 8	Diámetro externo	19,80
	Diámetro interno	16,55
	Calibre (espesor)	1,55
	Longitud natural	49,10
	Número de espiras	6 espiras

Fuente: propia

Apéndice C. Tabla de datos obtenidos para el resorte 2.

Determinación de la constante elástica del resorte												
Resorte		Masa y peso			Longitud del resorte							
Número del resorte	Número de Prueba	Masa añadida (g)	Masa total (Kg)	Peso (N)	Longitud del tubo (mm)	Longitud del embolo (mm)	Cantidad de tuercas	Longitud de las tuercas (mm)	Longitud total del resorte (mm)	Longitud total del resorte (m)	Deformación del resorte (mm)	Deformación del resorte (m)
2	1	0	0,000	0,000	75,40	14,74	0,00	0,0000	60,66	0,0607	0,00	0,0000
	2	46	0,046	0,449	75,40	20,94	0,00	0,0000	54,46	0,0545	6,20	0,0062
	3	127	0,127	1,240	75,40	22,70	0,00	0,0000	52,70	0,0527	7,96	0,0080
	4	177	0,177	1,728	75,40	26,14	0,00	0,0000	49,26	0,0493	11,40	0,0114
	5	227	0,227	2,216	75,40	27,94	0,00	0,0000	47,46	0,0475	13,20	0,0132
	6	277	0,277	2,704	75,40	30,46	0,00	0,0000	44,94	0,0449	15,72	0,0157
	7	326	0,326	3,182	75,40	32,50	0,00	0,0000	42,90	0,0429	17,76	0,0178
	8	376	0,376	3,670	75,40	33,30	0,45	1,3860	40,71	0,0407	19,95	0,0199
	9	426	0,426	4,158	75,40	33,30	0,90	2,7720	39,33	0,0393	21,33	0,0213
	10	443	0,443	4,324	75,40	33,30	1,50	4,6200	37,48	0,0375	23,18	0,0232
	11	493	0,493	4,812	75,40	33,30	2,00	6,1600	35,94	0,0359	24,72	0,0247
	12	543	0,543	5,300	75,40	33,30	2,75	8,4700	33,63	0,0336	27,03	0,0270
	13	593	0,593	5,788	75,40	33,30	3,15	9,7020	32,40	0,0324	28,26	0,0283
	14	642	0,642	6,266	75,40	33,30	4,00	12,3200	29,78	0,0298	30,88	0,0309
	15	692	0,692	6,754	75,40	33,30	4,70	14,4760	27,62	0,0276	33,04	0,0330
	16	742	0,742	7,242	75,40	33,30	5,05	15,5540	26,55	0,0265	34,11	0,0341
	17	792	0,792	7,730	75,40	33,30	5,80	17,8640	24,24	0,0242	36,42	0,0364
	18	843	0,843	8,228	75,40	33,30	6,20	19,0960	23,00	0,0230	37,66	0,0377
	19	893	0,893	8,716	75,40	33,30	7,00	21,5600	20,54	0,0205	40,12	0,0401
	20	944	0,944	9,213	75,40	33,30	7,80	24,0240	18,08	0,0181	42,58	0,0426
	21	994	0,994	9,701	75,40	33,30	8,10	24,9480	17,15	0,0172	43,51	0,0435
	22	1044	1,044	10,189	75,40	33,30	8,90	27,4120	14,69	0,0147	45,97	0,0460
	23	1094	1,094	10,677	75,40	33,30	9,40	28,9520	13,15	0,0131	47,51	0,0475
	24	1143	1,143	11,156	75,40	33,30	9,80	30,1840	11,92	0,0119	48,74	0,0487
	25	1192	1,192	11,634	75,40	33,30	10,00	30,8000	11,30	0,0113	49,36	0,0494
	26	1242	1,242	12,122	75,40	33,30	10,60	32,6480	9,45	0,0095	51,21	0,0512
	27	1292	1,292	12,610	75,40	33,30	10,70	32,9560	9,14	0,0091	51,52	0,0515

Fuente: propia

Apéndice D. Gráfica para la obtención de la constante elástica del resorte 2.



Fuente: propia

Apéndice E. Tabla de datos obtenidos para el resorte 3.

Determinación de la constante elástica del resorte												
Resorte		Masa y peso			Longitud del resorte							
Número del resorte	Número de Prueba	Masa añadida (g)	Masa total (Kg)	Peso (N)	Longitud del tubo (mm)	Longitud del embolo (mm)	Cantidad de tuercas	Longitud de las tuercas (mm)	Longitud total del resorte (mm)	Longitud total del resorte (m)	Deformación del resorte (mm)	Deformación del resorte (m)
3	1	0	0,000	0,000	61,30	16,88	0,00	0,0000	44,42	0,0444	0,00	0,0000
	2	49	0,049	0,478	61,30	16,98	0,00	0,0000	44,32	0,0443	0,10	0,0001
	3	128	0,128	1,249	61,30	17,40	0,00	0,0000	43,90	0,0439	0,52	0,0005
	4	228	0,228	2,225	61,30	20,00	0,00	0,0000	41,30	0,0413	3,12	0,0031
	5	328	0,328	3,201	61,30	22,06	0,00	0,0000	39,24	0,0392	5,18	0,0052
	6	428	0,428	4,177	61,30	24,00	0,00	0,0000	37,30	0,0373	7,12	0,0071
	7	445	0,445	4,343	61,30	26,18	0,00	0,0000	35,12	0,0351	9,30	0,0093
	8	545	0,545	5,319	61,30	27,10	0,00	0,0000	34,20	0,0342	10,22	0,0102
	9	645	0,645	6,295	61,30	30,08	0,00	0,0000	31,22	0,0312	13,20	0,0132
	10	745	0,745	7,271	61,30	32,12	0,00	0,0000	29,18	0,0292	15,24	0,0152
	11	845	0,845	8,247	61,30	33,40	0,20	0,6160	27,28	0,0273	17,14	0,0171
	12	945	0,945	9,223	61,30	33,40	1,00	3,0800	24,82	0,0248	19,60	0,0196
	13	1045	1,045	10,199	61,30	33,40	1,60	4,9280	22,97	0,0230	21,45	0,0214
	14	1145	1,145	11,175	61,30	33,40	2,40	7,3920	20,51	0,0205	23,91	0,0239
	15	1245	1,245	12,151	61,30	33,40	3,00	9,2400	18,66	0,0187	25,76	0,0258
	16	1345	1,345	13,127	61,30	33,40	3,80	11,7040	16,20	0,0162	28,22	0,0282
	17	1445	1,445	14,103	61,30	33,40	4,10	12,6280	15,27	0,0153	29,15	0,0291
	18	1545	1,545	15,079	61,30	33,40	4,90	15,0920	12,81	0,0128	31,61	0,0316
	19	1645	1,645	16,055	61,30	33,40	5,60	17,2480	10,65	0,0107	33,77	0,0338
	20	1745	1,745	17,031	61,30	33,40	6,20	19,0960	8,80	0,0088	35,62	0,0356
	21	1845	1,845	18,007	61,30	33,40	6,50	20,0200	7,88	0,0079	36,54	0,0365

Fuente: propia

Apéndice F. Gráfica para la obtención de la constante elástica del resorte 3.



Fuente: propia

Apéndice G. Tabla de datos obtenidos para el resorte 4.

Determinación de la constante elástica del resorte												
Resorte		Masa y peso			Longitud del resorte							
Número del resorte	Número de Prueba	Masa añadida (g)	Masa total (Kg)	Peso (N)	Longitud del tubo (mm)	Longitud del embolo (mm)	Cantidad de tuercas	Longitud de las tuercas (mm)	Longitud total del resorte (mm)	Longitud total del resorte (m)	Deformación del resorte (mm)	Deformación del resorte (m)
4	1	0	0,000	0,000	75,40	16,92	0,00	0,0000	58,48	0,0585	0,00	0,0000
	2	46	0,046	0,449	75,40	19,52	0,00	0,0000	55,88	0,0559	2,60	0,0026
	3	127	0,127	1,240	75,40	22,78	0,00	0,0000	52,62	0,0526	5,86	0,0059
	4	177	0,177	1,728	75,40	25,00	0,00	0,0000	50,40	0,0504	8,08	0,0081
	5	227	0,227	2,216	75,40	26,90	0,00	0,0000	48,50	0,0485	9,98	0,0100
	6	277	0,277	2,704	75,40	28,50	0,00	0,0000	46,90	0,0469	11,58	0,0116
	7	327	0,327	3,192	75,40	31,04	0,00	0,0000	44,36	0,0444	14,12	0,0141
	8	377	0,377	3,680	75,40	33,20	0,00	0,0000	42,20	0,0422	16,28	0,0163
	9	426	0,426	4,158	75,40	33,30	0,70	2,1560	39,94	0,0399	18,54	0,0185
	10	443	0,443	4,324	75,40	33,30	0,95	2,9260	39,17	0,0392	19,31	0,0193
	11	493	0,493	4,812	75,40	33,30	1,50	4,6200	37,48	0,0375	21,00	0,0210
	12	543	0,543	5,300	75,40	33,30	2,00	6,1600	35,94	0,0359	22,54	0,0225
	13	593	0,593	5,788	75,40	33,30	2,60	8,0080	34,09	0,0341	24,39	0,0244
	14	643	0,643	6,276	75,40	33,30	3,20	9,8560	32,24	0,0322	26,24	0,0262
	15	693	0,693	6,764	75,40	33,30	3,85	11,8580	30,24	0,0302	28,24	0,0282
	16	743	0,743	7,252	75,40	33,30	4,05	12,4740	29,63	0,0296	28,85	0,0289
	17	793	0,793	7,740	75,40	33,30	5,00	15,4000	26,70	0,0267	31,78	0,0318
	18	843	0,843	8,228	75,40	33,30	5,75	17,7100	24,39	0,0244	34,09	0,0341
	19	893	0,893	8,716	75,40	33,30	6,05	18,6340	23,47	0,0235	35,01	0,0350
	20	943	0,943	9,204	75,40	33,30	6,75	20,7900	21,31	0,0213	37,17	0,0372
	21	992	0,992	9,682	75,40	33,30	7,50	23,1000	19,00	0,0190	39,48	0,0395
	22	1042	1,042	10,170	75,40	33,30	8,00	24,6400	17,46	0,0175	41,02	0,0410
	23	1092	1,092	10,658	75,40	33,30	9,00	27,7200	14,38	0,0144	44,10	0,0441
	24	1142	1,142	11,146	75,40	33,30	9,60	29,5680	12,53	0,0125	45,95	0,0459
	25	1192	1,192	11,634	75,40	33,30	10,00	30,8000	11,30	0,0113	47,18	0,0472

Fuente: propia

Apéndice H. Gráfica para la obtención de la constante elástica del resorte 4.



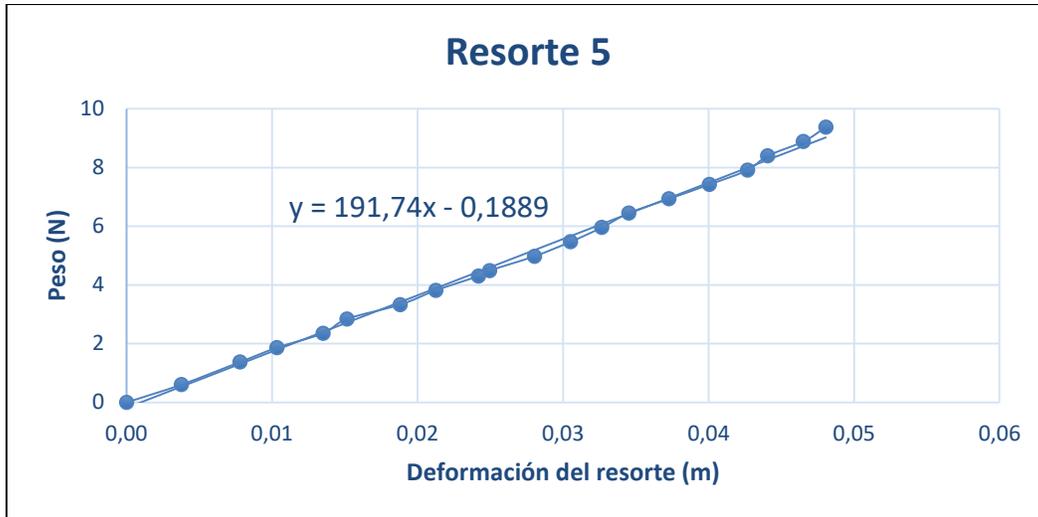
Fuente: propia

Apéndice I. Tabla de datos obtenidos para el resorte 5.

Determinación de la constante elástica del resorte												
Resorte		Masa y peso			Longitud del resorte							
Número del resorte	Número de Prueba	Masa añadida (g)	Masa total (Kg)	Peso (N)	Longitud del tubo (mm)	Longitud del embolo (mm)	Cantidad de tuercas	Longitud de las tuercas (mm)	Longitud total del resorte (mm)	Longitud total del resorte (m)	Deformación del resorte (mm)	Deformación del resorte (m)
5	1	0	0,000	0,000	71,50	19,90	0,00	0,0000	51,60	0,0516	0,00	0,0000
	2	62	0,062	0,605	71,50	23,66	0,00	0,0000	47,84	0,0478	3,76	0,0038
	3	141	0,141	1,376	71,50	27,70	0,00	0,0000	43,80	0,0438	7,80	0,0078
	4	191	0,191	1,864	71,50	30,24	0,00	0,0000	41,26	0,0413	10,34	0,0103
	5	241	0,241	2,352	71,50	33,40	0,00	0,0000	38,10	0,0381	13,50	0,0135
	6	291	0,291	2,840	71,50	35,04	0,00	0,0000	36,46	0,0365	15,14	0,0151
	7	341	0,341	3,328	71,50	38,70	0,00	0,0000	32,80	0,0328	18,80	0,0188
	8	391	0,391	3,816	71,50	38,70	0,80	2,4640	30,34	0,0303	21,26	0,0213
	9	441	0,441	4,304	71,50	38,70	1,75	5,3900	27,41	0,0274	24,19	0,0242
	10	460	0,460	4,490	71,50	38,70	2,00	6,1600	26,64	0,0266	24,96	0,0250
	11	510	0,510	4,978	71,50	38,70	3,00	9,2400	23,56	0,0236	28,04	0,0280
	12	560	0,560	5,466	71,50	38,70	3,80	11,7040	21,10	0,0211	30,50	0,0305
	13	610	0,610	5,954	71,50	38,70	4,50	13,8600	18,94	0,0189	32,66	0,0327
	14	660	0,660	6,442	71,50	38,70	5,10	15,7080	17,09	0,0171	34,51	0,0345
	15	710	0,710	6,930	71,50	38,70	6,00	18,4800	14,32	0,0143	37,28	0,0373
	16	760	0,760	7,418	71,50	38,70	6,90	21,2520	11,55	0,0115	40,05	0,0401
	17	810	0,810	7,906	71,50	38,70	7,75	23,8700	8,93	0,0089	42,67	0,0427
	18	860	0,860	8,394	71,50	38,70	8,20	25,2560	7,54	0,0075	44,06	0,0441
	19	910	0,910	8,882	71,50	38,70	9,00	27,7200	5,08	0,0051	46,52	0,0465
	20	960	0,960	9,370	71,50	38,70	9,50	29,2600	3,54	0,0035	48,06	0,0481

Fuente: propia

Apéndice J. Gráfica para la obtención de la constante elástica del resorte 5.



Fuente: propia

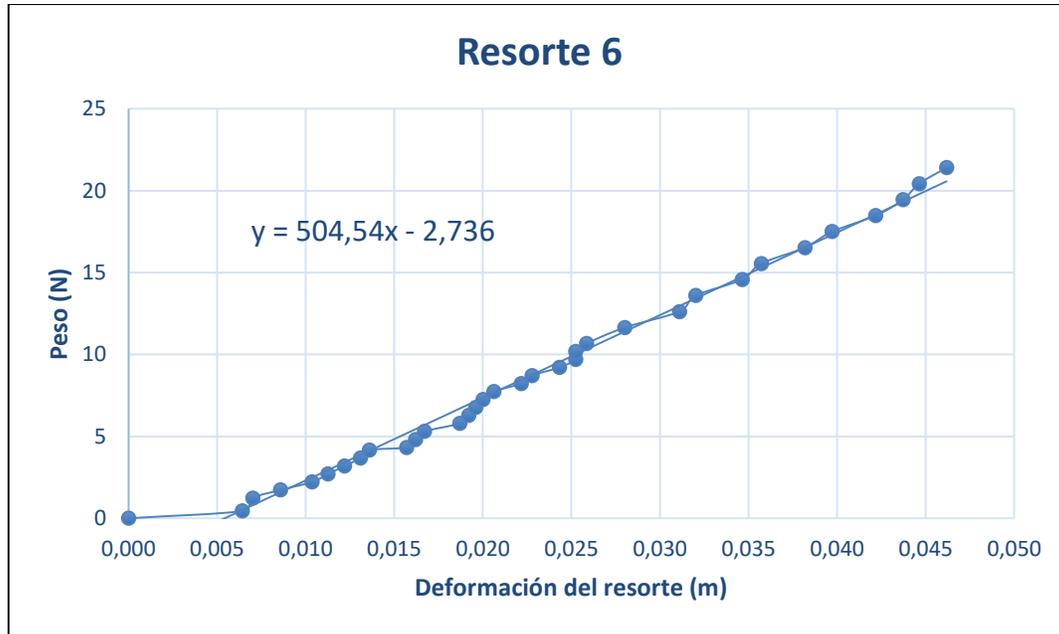
 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Apéndice K. Tabla de datos obtenidos para el resorte 6.

Determinación de la constante elástica del resorte												
Resorte		Masa y peso			Longitud del resorte							
Número del resorte	Número de Prueba	Masa añadida (g)	Masa total (Kg)	Peso (N)	Longitud del tubo (mm)	Longitud del embolo (mm)	Cantidad de tuercas	Longitud de las tuercas (mm)	Longitud total del resorte (mm)	Longitud total del resorte (m)	Deformación del resorte (mm)	Deformación del resorte (m)
6	1	0	0,000	0,000	75,40	13,60	0,00	0,0000	61,80	0,0618	0,00	0,0000
	2	46	0,046	0,449	75,40	20,02	0,00	0,0000	55,38	0,0554	6,42	0,0064
	3	127	0,127	1,240	75,40	20,62	0,00	0,0000	54,78	0,0548	7,02	0,0070
	4	177	0,177	1,728	75,40	22,18	0,00	0,0000	53,22	0,0532	8,58	0,0086
	5	227	0,227	2,216	75,40	23,96	0,00	0,0000	51,44	0,0514	10,36	0,0104
	6	277	0,277	2,704	75,40	24,86	0,00	0,0000	50,54	0,0505	11,26	0,0113
	7	327	0,327	3,192	75,40	25,80	0,00	0,0000	49,60	0,0496	12,20	0,0122
	8	377	0,377	3,680	75,40	26,70	0,00	0,0000	48,70	0,0487	13,10	0,0131
	9	427	0,427	4,168	75,40	27,20	0,00	0,0000	48,20	0,0482	13,60	0,0136
	10	443	0,443	4,324	75,40	29,30	0,00	0,0000	46,10	0,0461	15,70	0,0157
	11	493	0,493	4,812	75,40	29,80	0,00	0,0000	45,60	0,0456	16,20	0,0162
	12	543	0,543	5,300	75,40	30,30	0,00	0,0000	45,10	0,0451	16,70	0,0167
	13	593	0,593	5,788	75,40	32,30	0,00	0,0000	43,10	0,0431	18,70	0,0187
	14	643	0,643	6,276	75,40	32,80	0,00	0,0000	42,60	0,0426	19,20	0,0192
	15	693	0,693	6,764	75,40	33,20	0,00	0,0000	42,20	0,0422	19,60	0,0196
	16	743	0,743	7,252	75,40	33,30	0,10	0,3080	41,79	0,0418	20,01	0,0200
	17	793	0,793	7,740	75,40	33,30	0,30	0,9240	41,18	0,0412	20,62	0,0206
	18	843	0,843	8,228	75,40	33,30	0,80	2,4640	39,64	0,0396	22,16	0,0222
	19	893	0,893	8,716	75,40	33,30	1,00	3,0800	39,02	0,0390	22,78	0,0228
	20	943	0,943	9,204	75,40	33,30	1,50	4,6200	37,48	0,0375	24,32	0,0243
	21	993	0,993	9,692	75,40	33,30	1,80	5,5440	36,56	0,0366	25,24	0,0252
	22	1043	1,043	10,180	75,40	33,30	1,80	5,5440	36,56	0,0366	25,24	0,0252
	23	1093	1,093	10,668	75,40	33,30	2,00	6,1600	35,94	0,0359	25,86	0,0259
	24	1193	1,193	11,644	75,40	33,30	2,70	8,3160	33,78	0,0338	28,02	0,0280
	25	1293	1,293	12,620	75,40	33,30	3,70	11,3960	30,70	0,0307	31,10	0,0311
	26	1393	1,393	13,596	75,40	33,30	4,00	12,3200	29,78	0,0298	32,02	0,0320
	27	1493	1,493	14,572	75,40	33,30	4,85	14,9380	27,16	0,0272	34,64	0,0346
	28	1593	1,593	15,548	75,40	33,30	5,20	16,0160	26,08	0,0261	35,72	0,0357
	29	1693	1,693	16,524	75,40	33,30	6,00	18,4800	23,62	0,0236	38,18	0,0382
	30	1793	1,793	17,500	75,40	33,30	6,50	20,0200	22,08	0,0221	39,72	0,0397
	31	1893	1,893	18,476	75,40	33,30	7,30	22,4840	19,62	0,0196	42,18	0,0422
	32	1993	1,993	19,452	75,40	33,30	7,80	24,0240	18,08	0,0181	43,72	0,0437
	33	2093	2,093	20,428	75,40	33,30	8,10	24,9480	17,15	0,0172	44,65	0,0446
	34	2193	2,193	21,404	75,40	33,30	8,60	26,4880	15,61	0,0156	46,19	0,0462

Fuente: propia

Apéndice L. Gráfica para la obtención de la constante elástica del resorte 6.



Fuente: propia

Apéndice M. Tabla de datos obtenidos para el resorte 7.

Determinación de la constante elástica del resorte												
Resorte		Masa y peso			Longitud del resorte							
Número del resorte	Número de Prueba	Masa añadida (g)	Masa total (Kg)	Peso (N)	Longitud del tubo (mm)	Longitud del embolo (mm)	Cantidad de tuercas	Longitud de las tuercas (mm)	Longitud total del resorte (mm)	Longitud total del resorte (m)	Deformación del resorte (mm)	Deformación del resorte (m)
7	1	0	0,000	0,000	75,40	7,30	0,00	0,0000	68,10	0,0681	0,00	0,0000
	2	46	0,046	0,449	75,40	27,50	0,00	0,0000	47,90	0,0479	20,20	0,0202
	3	127	0,127	1,240	75,40	33,20	0,00	0,0000	42,20	0,0422	25,90	0,0259
	4	177	0,177	1,728	75,40	33,30	0,50	1,5400	40,56	0,0406	27,54	0,0275
	5	227	0,227	2,216	75,40	33,30	1,05	3,2340	38,87	0,0389	29,23	0,0292
	6	277	0,277	2,704	75,40	33,30	1,80	5,5440	36,56	0,0366	31,54	0,0315
	7	327	0,327	3,192	75,40	33,30	2,60	8,0080	34,09	0,0341	34,01	0,0340
	8	377	0,377	3,680	75,40	33,30	3,40	10,4720	31,63	0,0316	36,47	0,0365
	9	427	0,427	4,168	75,40	33,30	4,00	12,3200	29,78	0,0298	38,32	0,0383
	10	443	0,443	4,324	75,40	33,30	4,60	14,1680	27,93	0,0279	40,17	0,0402
	11	493	0,493	4,812	75,40	33,30	5,20	16,0160	26,08	0,0261	42,02	0,0420
	12	543	0,543	5,300	75,40	33,30	6,50	20,0200	22,08	0,0221	46,02	0,0460
	13	593	0,593	5,788	75,40	33,30	7,00	21,5600	20,54	0,0205	47,56	0,0476
	14	643	0,643	6,276	75,40	33,30	7,70	23,7160	18,38	0,0184	49,72	0,0497
	15	693	0,693	6,764	75,40	33,30	8,00	24,6400	17,46	0,0175	50,64	0,0506
	16	743	0,743	7,252	75,40	33,30	9,00	27,7200	14,38	0,0144	53,72	0,0537
	17	793	0,793	7,740	75,40	33,30	10,00	30,8000	11,30	0,0113	56,80	0,0568
	18	843	0,843	8,228	75,40	33,30	10,50	32,3400	9,76	0,0098	58,34	0,0583

Fuente: propia

Apéndice N. Gráfica para la obtención de la constante elástica del resorte 7.



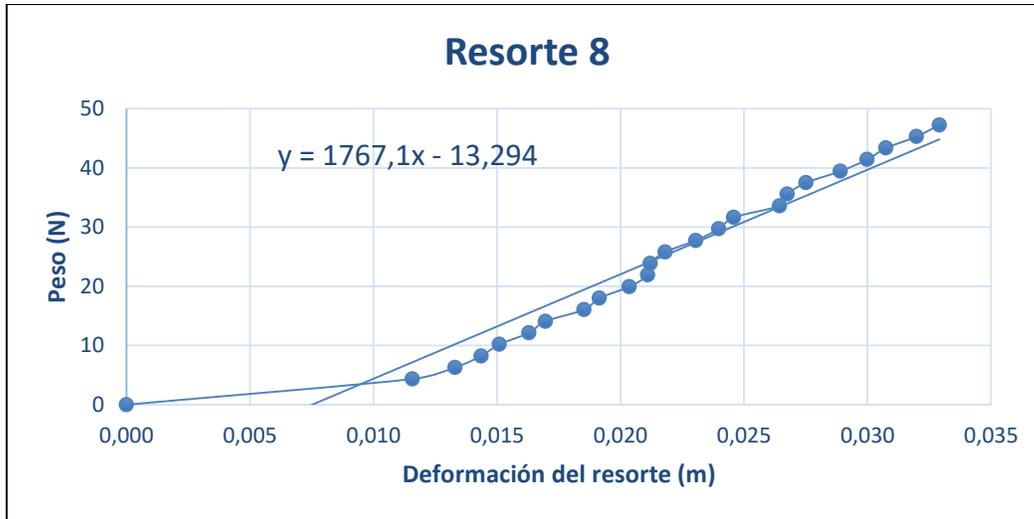
Fuente: propia

Apéndice O. Tabla de datos obtenidos para el resorte 8.

Determinación de la constante elástica del resorte												
Resorte		Masa y peso			Longitud del resorte							
Número del resorte	Número de Prueba	Masa añadida (g)	Masa total (Kg)	Peso (N)	Longitud del tubo (mm)	Longitud del embolo (mm)	Cantidad de tuercas	Longitud de las tuercas (mm)	Longitud total del resorte (mm)	Longitud total del resorte (m)	Deformación del resorte (mm)	Deformación del resorte (m)
8	1	0	0,000	0,000	61,30	12,20	0,00	0,0000	49,10	0,0491	0,00	0,0000
	2	445	0,445	4,343	61,30	23,78	0,00	0,0000	37,52	0,0375	11,58	0,0116
	3	645	0,645	6,295	61,30	25,50	0,00	0,0000	35,80	0,0358	13,30	0,0133
	4	845	0,845	8,247	61,30	26,56	0,00	0,0000	34,74	0,0347	14,36	0,0144
	5	1045	1,045	10,199	61,30	27,30	0,00	0,0000	34,00	0,0340	15,10	0,0151
	6	1245	1,245	12,151	61,30	28,50	0,00	0,0000	32,80	0,0328	16,30	0,0163
	7	1445	1,445	14,103	61,30	29,16	0,00	0,0000	32,14	0,0321	16,96	0,0170
	8	1645	1,645	16,055	61,30	30,72	0,00	0,0000	30,58	0,0306	18,52	0,0185
	9	1845	1,845	18,007	61,30	31,34	0,00	0,0000	29,96	0,0300	19,14	0,0191
	10	2045	2,045	19,959	61,30	32,56	0,00	0,0000	28,74	0,0287	20,36	0,0204
	11	2245	2,245	21,911	61,30	33,30	0,00	0,0000	28,00	0,0280	21,10	0,0211
	12	2445	2,445	23,863	61,30	33,40	0,00	0,0000	27,90	0,0279	21,20	0,0212
	13	2645	2,645	25,815	61,30	33,40	0,20	0,6160	27,28	0,0273	21,82	0,0218
	14	2845	2,845	27,767	61,30	33,40	0,60	1,8480	26,05	0,0261	23,05	0,0230
	15	3045	3,045	29,719	61,30	33,40	0,90	2,7720	25,13	0,0251	23,97	0,0240
	16	3245	3,245	31,671	61,30	33,40	1,10	3,3880	24,51	0,0245	24,59	0,0246
	17	3445	3,445	33,623	61,30	33,40	1,70	5,2360	22,66	0,0227	26,44	0,0264
	18	3645	3,645	35,575	61,30	33,40	1,80	5,5440	22,36	0,0224	26,74	0,0267
	19	3845	3,845	37,527	61,30	33,40	2,05	6,3140	21,59	0,0216	27,51	0,0275
	20	4045	4,045	39,479	61,30	33,40	2,50	7,7000	20,20	0,0202	28,90	0,0289
	21	4245	4,245	41,431	61,30	33,40	2,85	8,7780	19,12	0,0191	29,98	0,0300
	22	4445	4,445	43,383	61,30	33,40	3,10	9,5480	18,35	0,0184	30,75	0,0307
	23	4645	4,645	45,335	61,30	33,40	3,50	10,7800	17,12	0,0171	31,98	0,0320
	24	4845	4,845	47,287	61,30	33,40	3,80	11,7040	16,20	0,0162	32,90	0,0329

Fuente: propia

Apéndice P. Gráfica para la obtención de la constante elástica del resorte 8.



Fuente: propia

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Apéndice Q. Costo de los materiales utilizados.

Materiales comprados						
Componente	Dimensión	Material	Cantidad	Costo individual	Costo total	Nota
Abrazadera sin fin	3/4"	Acero zincado	3	\$ 1.100	\$ 3.300	
Acople PG	1/2"x1/2"	Plástico	1	\$ 6.350	\$ 6.350	
Adaptador hembra	1/2"	PVC	3	\$ 300	\$ 900	Tubería de presión
	1"	PVC	2	\$ 1.200	\$ 2.400	
Adaptador hembra por hembra	1/2"	PVC	1	\$ 1.500	\$ 1.500	
Adaptador macho	1"	PVC	7	\$ 1.200	\$ 8.400	Tubería de presión
	1/2"	PVC	1	\$ 450	\$ 450	
Adaptador macho por macho	1/2"	PVC	2	\$ 1.000	\$ 2.000	
Arandela	Diámetro interno: 7 mm Diámetro externo: 20 mm	Hierro	5	\$ 50	\$ 250	
	Diámetro interno: 7 mm Diámetro externo: 21.80 mm	Hierro	50	\$ 89	\$ 4.450	
Base para la instalación del ariete	65.5 cm x 44.7 cm	Madera	2	\$ 2.000	\$ 4.000	
Botón	Diámetro: 18.0 mm Espesor: 1.80 mm	Silicona	12	\$ 50	\$ 600	
Carreta de teflón	3/4"x15 m		1	\$ 1.950	\$ 1.950	
Cinta de enmascarar	12 mm x 20 m		1	\$ 1.800	\$ 1.800	
Codo	1" de 90°	PVC	4	\$ 1.500	\$ 6.000	Tubería de presión
	1 1/2" de 90°	PVC	1	\$ 1.800	\$ 1.800	Tubería de ventilación
Esfera	Diámetro: 75.00 mm	Plástico	18	\$ 500	\$ 9.000	
Grapa	1 1/2"	Aluminio	5	\$ 1.740	\$ 8.700	Doble orificio
Neumático de motocicleta	1.50 m	Caucho	1	\$ 1.000	\$ 1.000	
Pegante	125-150 gotas		2	\$ 1.000	\$ 2.000	Super pega infinita
Pimpón	Diámetro: 36 mm	Plástico	100	\$ 65	\$ 6.500	
Recipiente para almacenar agua	Volumen: 8 litros Diámetro: 25 mm	Plástico	1	\$ 10.000	\$ 10.000	
	Volumen: 20 litros	Plástico	3	\$ 1.500	\$ 4.500	
Reducción	1" x 1/2"	PVC	1	\$ 1.200	\$ 1.200	También se conoce como buje soldado a presión
Salida tanque	1"	PVC	6	\$ 4.750	\$ 28.500	

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO			Código	FDE 089
				Versión	03
				Fecha	2015-01-22

Set 10 piezas de bandas abrasivas eje mototool	8x13 mm	Carburo	1	\$ 5.900	\$ 5.900	
Set 20 discos abrasivos mototool	24 mm	Carburo	1	\$ 7.900	\$ 7.900	
Soldadura PVC	1/64 galón		1	\$ 7.100	\$ 7.100	
Tapón de prueba	2"	PVC	4	\$ 1.000	\$ 4.000	
	3"	PVC	4	\$ 1.200	\$ 4.800	
	4"	PVC	4	\$ 2.000	\$ 8.000	
Tapón soldado	1/2"	PVC	1	\$ 700	\$ 700	
	3/4"	PVC	1	\$ 1.600	\$ 1.600	
	1"	PVC	1	\$ 1.800	\$ 1.800	
Tornillo sin fin	Diámetro externo: 3/16" Longitud: 91 mm, 78.4 mm y 78 mm	Hierro	3	\$ 700	\$ 2.100	
Tubo	1/2" x 5 m	PE	1	\$ 3.295	\$ 3.295	
	1/2" x 0.3 m	PVC	1	\$ 1.000	\$ 1.000	Tubería de presión
	3/4" x 0.3 m	PVC	1	\$ 2.100	\$ 2.100	Tubería de presión
	1" x 1m	PVC	2,5	\$ 3.500	\$ 8.750	Tubería de presión
	1 1/2" x 1m	PVC	1	\$ 3.000	\$ 3.000	Tubería de ventilación
	2" x 1 m	PVC	2	\$ 15.900	\$ 31.800	Tubería de presión
	3" x 1m	PVC	1	\$ 5.500	\$ 5.500	Tubería de ventilación
	4" x 1m	PVC	1	\$ 15.900	\$ 15.900	Tubería sanitaria
Tubo en te	1/2"	PE	1	\$ 2.000	\$ 2.000	
	1" (presión)	PVC	2	\$ 1.700	\$ 3.400	Tubería de presión
Tuerca hexagonal	Diámetro interno: 4 mm Longitud de los lados: 9.00 mm	Hierro	5	\$ 50	\$ 250	
	Diámetro interno: 4,76 mm Longitud de los lados: 11.00 mm	Acero	150	\$ 89	\$ 13.350	Para la varilla roscada de diámetro externo de 1/4"
Unión universal	1"	PVC	2	\$ 6.900	\$ 13.800	Válvula de presión, lisa por ambas entradas
Válvula check vertical	1"	Bronce	1	\$ 19.900	\$ 19.900	Posee resorte incorporado
Válvula de bola	1"	PVC	1	\$ 9.900	\$ 9.900	Resiste una presión máxima de 235 PSI
Válvula pie	1"	PVC	1	\$ 28.900	\$ 28.900	
Varilla roscada	Diámetro externo: 3/16" Longitud: 1 m	Hierro galvanizado	1	\$ 1.300	\$ 1.300	
	Diámetro externo: 1/4" Longitud: 1 m	Acero	2	\$ 3.200	\$ 6.400	
Costo total					\$ 331.995	

Fuente: propia

Apéndice R. Diámetros nominales para tuberías de presión.

Tuberías Presión PAVCO									
Diámetro Nominal		Referencia	Peso	Diámetro Exterior Promedio		Espesor de Pared Mínimo		Diámetro Interior Promedio	
				mm	pulg.	mm	pulg.		mm
RDE 9 PVC Presión de Trabajo a 23°C: 500 PSI									
21	1/2	2900266	218	21.34	0.84	2.37	0.09	16.60	
RDE 11 PVC Presión de Trabajo a 23°C: 400 PSI									
26	3/4	2900210	304	26.67	1.05	2.43	0.09	21.81	
RDE 13.5 PVC Presión de Trabajo a 23°C: 315 PSI									
21	1/2	2902449	157	21.34	0.84	1.58	0.06	18.18	
33	1	2900213	364	33.40	1.31	2.46	0.09	28.48	
RDE 21 PVC Presión de Trabajo a 23°C: 200 PSI									
26	3/4	2900237	189	26.7	1.05	1.52	0.06	23.63	
33	1	2900220	252	33.4	1.31	1.60	0.06	30.20	
42	1.1/4	2900225	395	42.2	1.66	2.01	0.08	38.14	
48	1.1/2	2902450	514	48.3	1.90	2.29	0.09	43.68	
60	2	2902453	811	60.3	2.37	2.87	0.11	54.58	
73	2.1/2	2900230	1185	73.0	2.87	3.48	0.14	66.07	
88	3	2900233	1761	88.9	3.50	4.24	0.17	80.42	
114	4	2900240	2904	114.3	4.50	5.44	0.21	103.42	
168	6	2904616	5835	168.3	6.62	8.03	0.32	152.22	
RDE 26 PVC Presión de Trabajo a 23°C: 160 PSI									
60	2	2900246	655	60.3	2.37	2.31	0.09	55.70	
73	2.1/2	2900248	964	73.0	2.87	2.79	0.11	67.45	
88	3	2900251	1438	88.9	3.50	3.43	0.13	82.04	
114	4	2900254	2376	114.3	4.50	4.39	0.17	105.52	
168	6	2904617	4759	168.3	6.62	6.48	0.25	155.32	
RDE 32.5 PVC Presión de Trabajo a 23°C: 125 PSI									
88	3	2900256	1157	88.9	3.50	2.74	0.11	83.42	
114	4	2900258	1904	114.3	4.50	3.51	0.14	107.28	
RDE 41 PVC Presión de Trabajo a 23°C: 100 PSI									
114	4	2900261	1535	114.3	4.50	2.79	0.11	108.72	

Para Tuberías de 8", 10", 12", 14", 16", 18" y 20" de diámetro véase nuestro Manual Técnico Unión Platino. La longitud normal de los tramos es de 6m. La Tubería no debe roscarse.

Fuente: (PAVCO, 2014a, p. 7)

Apéndice S. Diámetros nominales para tuberías de ventilación y sanitaria.

Portafolio de Productos

Tuberías Sanitarias PAVCO

	Diámetro Nominal	Referencia	Diámetro Exterior Promedio		Diámetro Interior Promedio		Espesor de Pared Mínimo		Peso
			mm	pulg.	mm	mm	pulg.	kg/m	
Tuberías Sanitarias y Aguas Lluvias Presión de Prueba: 0.35 MPa - 50 PSI  NTC 1087	1.1/2	2900319	48.26	1.90	42.68	2.79	0.11	0.64	
	2	2902515	60.32	2.37	54.48	2.92	0.11	0.84	
	3	2902517	82.56	3.25	76.20	3.18	0.12	1.27	
	4	2900331	114.30	4.50	107.70	3.30	0.13	1.84	
	6	2900336	168.28	6.62	160.04	4.12	0.16	3.41	
Tuberías Ventilación  NTC 1087	1.1/2	2900338	48.26	1.90	45.22	1.52	0.06	0.36	
	2	2900341	60.32	2.37	56.76	1.78	0.07	0.53	
	3	2900344	82.56	3.25	79.00	1.78	0.07	0.73	
	4	2900347	114.30	4.50	110.08	2.11	0.08	1.20	
Tuberías Sanitarias Novatec La longitud normal de los tubos es de 6 mt.	2	2900323	60.32	2.37	54.48	2.92	0.11	0.84	
	3	2900326	82.56	3.25	76.20	3.18	0.12	1.27	
	4	2900330	114.30	4.50	107.70	3.30	0.13	1.84	
	6	2900335	168.28	6.62	160.04	4.12	0.16	3.41	

Fuente: (PAVCO, 2014b, p. 7)

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Apéndice T. Materiales utilizados en el proyecto.

Materiales utilizados			
Componente	Dimensión	Material	Cantidad
Abrazadera sin fin	3/4"	Acero zincado	3 unidades
Acople PG	1/2"x1/2"	Plástico	1 unidad
Adaptador hembra	1/2"	PVC	3 unidades
	1"	PVC	2 unidades
Adaptador hembra por hembra	1/2"	PVC	1 unidad
Adaptador macho	1"	PVC	7 unidades
	1/2"	PVC	1 unidad
Adaptador macho por macho	1/2"	PVC	1 unidad
Arandela	Diámetro interno: 7 mm Diámetro externo: 20 mm	Hierro	10 unidades
	Diámetro interno: 7 mm Diámetro externo: 21.80 mm	Hierro	54 unidades
Base para la instalación del ariete	65.5 cm x 44.7 cm con espesor de 1.8 mm	Madera	2 unidades
Botón	Diámetro: 1.27 mm Espesor: 1.7 mm	Silicona	6 unidades
Carreta de teflón	3/4"x15 m		4 metros
Cinta de enmascarar	12 mm x 20 m		1 metro
Codo a 90°	1"	PVC	4 unidades
	1 1/2"	PVC	1 unidad
Esfera	Diámetro: 75.00 mm	Plástico	12 unidades
Grapa	1 1/2" de doble orificio	Aluminio	5 unidades
Neumático de motocicleta	1.50 m	Caucho	1.50 metros
Pegante	125-140 gotas		140 gotas
Pimpón	Diámetro: 36 mm	Plástico	20 unidades
Recipiente para almacenar agua	Volumen: 8 litros Diámetro: 25 mm	Plástico	1 unidad
	Volumen: 20 litros	Plástico	3 unidades
Reducción	1"-1/2"	PVC	1 unidad
Resorte 1	Calibre: 1,15 mm Diámetro interno: 16,00 mm Diámetro externo: 18,60 mm Números de espiras: 7 Longitud natural: 44,42 mm Constante elástica: 191,74 N/m	Acero 1070	1 unidad

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Resorte 2	Calibre: 1,05 mm Diámetro interno: 21,10 mm Diámetro externo: 23,10 mm Números de espiras: 5 Longitud natural: 51,60 mm Constante elástica: 461,25 N/m	Acero 1070	1 unidad
Resorte 3	Calibre: 1,55 mm Diámetro interno: 16,55 mm Diámetro externo: 19,80 mm Números de espiras: 6 Longitud natural: 49,10 mm Constante elástica: 1767,1 N/m	Acero 1070	1 unidad
Salida Tanque	1"	PVC	6 unidades
Set 10 piezas de bandas abrasivas eje mototool	8x13 mm	Carburo	3 unidades
Set 20 discos abrasivos mototool	24 mm	Carburo	2 unidades
Soldadura PVC	1/64 galón		1/64 galón
Tanque	Volumen: 500 litros Diámetro: 0,80 m	Plástico	1 unidad
Tapón de prueba	2"	PVC	4 unidades
	3"	PVC	4 unidades
	4"	PVC	4 unidades
Tornillo sin fin	Diámetro externo: 4,8 mm (3/16") Longitud: 91 mm, 78.4 mm y 78 mm	Hierro	3 unidades
Tornillo para la base de madera y soporte del ariete hidráulico	Diámetro externo: 1/4"	Acero	42 unidades
Tubo	1/2" x 5 m	PE	3.2 metros
	1/2" x 0.30 m	PVC	0.30 metros
	1" (presión)	PVC	1.84 metros
	1 1/2"	PVC	1 metro
	2" x (presión)	PVC	1.16 metros
	3" x (de ventilación)	PVC	0.71 metros
	4" x (sanitario)	PVC	0.52 metros
Tubo en te	1/2"	PE	1 unidad
	1"	PVC	2 unidades
Tuerca hexagonal	Diámetro interno: 4 mm Longitud de los lados: 9.00 mm	Hierro	8 unidades
	Diámetro interno: 4.76 mm Longitud de los lados: 11.00 mm	Acero	42 unidades
Unión universal	1"	PVC	2 unidades
Válvula check vertical	1"	Bronce	1 unidad
Válvula de bola	1"	PVC	1 unidad
Válvula pie	1"	PVC	1 unidad

Fuente: propia

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22


 FIRMA ESTUDIANTES _____


 FIRMA ASESOR _____
 primera entrega informe final
 19/10/2018

FECHA ENTREGA: 19 / 10 / 2018

FIRMA COMITÉ TRABAJO DE GRADO DE LA FACULTAD _____

RECHAZADO___ ACEPTADO___ ACEPTADO CON MODIFICACIONES___

ACTA NO. _____

FECHA ENTREGA: _____

FIRMA CONSEJO DE FACULTAD _____

ACTA NO. _____

FECHA ENTREGA: _____