

DISEÑO DE UNA HERRAMIENTA PARA EL ANÁLISIS DEL GOLPE DE ARIETE
EN TUBERÍA RECTA EN UN LABORATORIO DE MECÁNICA DE FLUIDOS

ANAMARÍA FONSECA BALLESTEROS
JOHAN SEBASTIÁN FONSECA VANEGAS

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERIAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BOGOTÁ D.C.
2019

DISEÑO DE UNA HERRAMIENTA PARA EL ANÁLISIS DEL GOLPE DE ARIETE
EN TUBERÍA RECTA EN UN LABORATORIO DE MECÁNICA DE FLUIDOS

ANAMARÍA FONSECA BALLESTEROS
JOHAN SEBASTIÁN FONSECA VANEGAS

Proyecto integral de grado para optar el título de
INGENIERO DE PETRÓLEOS
INGENIERO MECÁNICO

Director
JORGE RENÉ SILVA LARROTTA
Ingeniero Mecánico

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERIAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BOGOTÁ D.C.
2019

Nota de aceptación:

Jurado 1
Ing. Jorge Andrés Tovar Moreno

Jurado 2
Ing. Juan Andrés Sandoval Herrera

Bogotá D.C., Agosto de 2019

DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente Institucional y Rector del Claustro

Dr. MARIO POSADA GARCÍA-PEÑA

Vicerrector de Desarrollo y Recursos Humanos

Dr. LUIS JAIME POSADA GARCÍA - PEÑA

Vicerrectora Académica y de Posgrados

Dr. ANA JOSEFA HERRERA VARGAS

Decano Facultad de Ingeniería

Dr. JULIO CÉSAR FUENTES ARISMENDI

Director del Programa de Ingeniería de Petróleos

Ing. JUAN CARLOS RODRIGUEZ ESPARZA

Director del Programa de Ingeniería Mecánica

Ing. CARLOS MAURICIO VELOZA VILLAMIL

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

Agradezco a Dios y a la Virgen María por guiarme y llenarme de mucha sabiduría para poder realizar este proyecto de grado y con ello obtener el título de Ingeniera de Petróleos.

Igualmente, doy gracias a mis padres José Edilberto Fonseca Quevedo y Nancy Ballesteros Corredor, los cuales diariamente me brindan su amor, cariño y comprensión e hicieron posible este sueño; gracias a todos sus sacrificios y esfuerzos.

A mi hermano Hernán Camilo Fonseca Ballesteros le agradezco por darme su comprensión y apoyo.

A mi querida abuela y segunda mamá María Ana Corredor de Ballesteros por apoyarme y brindarme tanta sabiduría, amor y paciencia para afrontar los momentos difíciles de la vida y con ello culminar este proyecto.

A mi tía Nydian Elena Ballesteros Corredor que desde el cielo me guio para poder culminar este proyecto y a nunca desfallecer ante la adversidad.

Finalmente, agradezco a mi compañero y amigo Johan Sebastián Fonseca Vanegas, el cual estuvo durante estos cinco años de carrera universitaria apoyándome, colaborándome y ayudándome en los momentos difíciles; además le agradezco porque con su ayuda, esfuerzo y dedicación hizo posible la realización de este proyecto de grado, el cual nos hace acreedores al título de Ingenieros.

Anamaria Fonseca Ballesteros

Agradezco a Dios por brindarme fortaleza y sabiduría en momentos difíciles, para poder llevar a cabo este proyecto de grado y así alcanzar el título de ingeniero Mecánico.

Agradezco de corazón a mis padres, Cesar Fonseca y Sandra Vanegas, por el gran esfuerzo que conllevo apoyarme en la consecución de este gran logro; por toda su dedicación y sacrificio que fueron mi motor para brindarles un motivo de orgullo. Su constante apoyo y cariño permitieron lograr esta meta.

Agradezco a mis tíos Ramiro Mancera y Mónica Vanegas; los cuales me brindaron su incondicional apoyo de la manera más noble, donde siempre me dieron motivación y apoyo para afrontar dificultades.

Agradezco a mi abuela Gilma Alba que siempre luchó por brindarme tranquilidad y verme convertido en un ingeniero; por lo cual este es mi regalo para ella, la muestra de que fu posible.

Por último, agradezco a mi compañera de proyecto de grado y fiel amiga Anamaría Fonseca, la cual fue una incondicional compañera en el transcurso de mi carrera. Gracias a su apoyo y dedicación fue posible la consecución de este proyecto por lo que me complace y llena de orgullo que ambos alcancemos el título de ingenieros después de mucha dedicación y trabajo.

Johan Sebastián Fonseca Vanegas

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Fundación Universidad de América por brindar todo el apoyo técnico y teórico mediante su cuerpo de orientadores, docentes y cargos administrativos, los cuales, siempre estuvieron al tanto del desarrollo de este proyecto.

Igualmente, agradecemos al ingeniero Jorge Rene Silva Larrotta por su compromiso con la realización de este proyecto.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	27
OBJETIVOS	28
1. BASES TEÓRICAS DEL GOLPE DE ARIETE EN TUBERÍA RECTA	29
1.1 REGÍMENES DE FLUJO	29
1.1.1 Número de Reynolds.	29
1.1.2 Flujo laminar o de Poiseuille.	30
1.1.3 Flujo turbulento o de Venturi.	30
1.1.4 Flujo transitorio.	31
1.2 DEFINICIÓN Y CARACTERÍSTICAS DEL FENÓMENO GOLPE DE ARIETE	31
1.3 FACTORES DE OCURRENCIA DEL FENÓMENO GOLPE DE ARIETE	32
1.4 DESCRIPCIÓN DEL FENÓMENO GOLPE DE ARIETE	33
1.5 CONSECUENCIAS DEL GOLPE DE ARIETE	36
1.5.1 Vibraciones y Ruido.	37
1.5.2 Falla en bombas, válvulas y otros accesorios.	37
1.5.3 Ruptura de tuberías.	37
1.6 CONCEPTOS BÁSICOS Y MODELO MATEMÁTICO	37
1.6.1 Celeridad.	38
1.6.2 Periodo.	39
1.6.3 Tiempo de parada.	39
1.6.4 Longitud crítica.	43
1.6.5 Golpe de ariete en descargas cortas.	43
1.6.6 Golpe de ariete en descargas largas.	44
1.6.7 Sobrepresión.	45
1.7 MÉTODOS DE SOLUCIÓN	45
1.7.1 Volante de inercia.	45
1.7.2 Chimeneas de equilibrio.	46
1.7.3 Recipientes de aire.	46
1.7.4 Válvulas anticipadoras de onda.	46
1.8 GOLPE DE ARIETE EN LA INDUSTRIA PETROLERA	46
1.8.1 Perforación.	47
1.8.1.1 Dámper de pulsación con nitrógeno.	49
1.8.1.2 Dámper de pulsación.	49
1.8.1.3 Dámper en succión.	50
1.8.2 Producción.	51
1.8.2.1 Apertura y cierre de pozos.	51
1.8.2.2 Inyección en aguas profundas.	52
1.8.2.3 Producción de arena.	53
1.8.3 Facilidades de Producción.	54
1.8.3.1 Tubería de transporte de Condensado.	54

1.8.3.2	Sistema de bombeo.	57
1.8.4	Transporte de Fluidos.	59
1.8.5	Análisis y verificación.	60
1.8.5.1	Parámetros de diseño.	60
1.8.5.2	Normatividad.	61
2.	REQUERIMIENTOS Y PARÁMETROS DE DISEÑO	62
2.1	REQUERIMIENTOS FUNCIONALES	62
2.1.1	Sistema de generación y mitigación del golpe de ariete.	62
2.1.1.1	Mecanismo de generación de golpe de ariete.	62
2.1.1.2	Mecanismo de mitigación de golpe de ariete.	62
2.1.2	Sistema de instrumentación y control.	63
2.1.2.1	Manipulación automática de la válvula.	63
2.1.2.2	Transmisor de presión.	63
2.1.3	Sistema estructural.	63
2.1.3.1	Ubicación.	63
2.1.3.2	Fácil mantenimiento.	63
2.2	PARÁMETROS DE DISEÑO	64
2.2.1	Fluido de análisis.	64
2.2.2	Tamaño y dimensiones.	65
2.2.3	Rango de velocidades.	65
2.2.4	Rango de presiones.	66
3.	DISEÑO CONCEPTUAL DE LA HERRAMIENTA	67
3.1	ALTERNATIVAS	70
3.1.1	Alternativa 1.	71
3.1.2	Alternativa 2.	72
3.1.3	Alternativa 3.	72
3.2	CRITERIOS DE VALORACIÓN.	73
3.2.1	Seguridad de la práctica.	73
3.2.2	Mantenimiento.	74
3.2.3	Montaje.	74
3.2.4	Independencia de las fases.	74
3.3	MÉTODO DE PONDERACIÓN LINEAL	74
4.	DISEÑO DETALLADO DE LA HERRAMIENTA	76
4.1	SISTEMA DE ABASTECIMIENTO	76
4.1.1	Depósito.	76
4.1.2	Tanque de cabecera.	78
4.1.2.1	Dimensiones tubería de descarga.	78
4.1.2.2	Propiedades del Flujo.	81
4.1.2.3	Dimensiones tanque de cabecera.	82
4.1.3	Sistema hidráulico.	83
4.1.3.1	Caudal.	83
4.1.3.2	Diámetros y velocidades de las tuberías.	83

4.1.3.3	Longitud de las tuberías.	84
4.1.3.4	Pérdidas y ganancias de energía.	84
4.2	SISTEMA DE GENERACIÓN Y MITIGACIÓN DEL GOLPE DE ARIETE	95
4.2.1	Sistema de generación del golpe de ariete.	96
4.2.1.1	Celeridad.	96
4.2.1.2	Periodo.	96
4.2.1.3	Altura manométrica.	97
4.2.1.4	Pendiente Hidráulica.	97
4.1.2.5	Tiempo de parada.	98
4.1.2.6	Longitud crítica.	98
4.1.2.7	Golpe de ariete.	99
4.1.2.8	Sobrepresión.	99
4.2.2	Sistema de mitigación del golpe de ariete.	100
4.2.2.1	Depresión mínima.	101
4.2.2.2	Volumen mínimo de aire.	101
4.2.2.3	Volumen máximo de aire.	102
4.2.2.4	Factor $ S_{\text{omín}}/hf1 $.	102
4.2.2.5	Depresión mínima durante el flujo transitorio.	103
4.2.2.6	Volumen máximo de aire en el flujo transitorio.	104
4.3	SISTEMA ESTRUCTURAL	106
4.3.1	Cargas sobre la lámina.	106
4.3.2	Viga Crítica.	111
4.3.3	Análisis del elemento tipo columna.	114
4.3.4	Soportes.	118
4.4	INSTRUMENTACIÓN DE LA HERRAMIENTA	120
4.4.1	Válvulas de compuerta.	120
4.4.1.1	Cálculo de Función de Transferencia.	120
4.4.1.2	Instrumentación en MATLAB.	122
4.4.2	Electroválvula.	125
4.4.3	Transductor de presión.	125
4.4.4	Sensor ultrasónico de caudal.	125
4.4.5	Plano P&ID.	126
4.5	HERRAMIENTA DE ANÁLISIS DE GOLPE DE ARIETE	128
5.	SIMULACIÓN DE LA HERRAMIENTA	129
5.1	SIMULACIÓN SOFTWARE ASPEN HYSYS	129
5.2	SIMULACIÓN SOFTWARE ALLIEVI	130
5.2.1	Simulación del diseño detallado de la herramienta.	131
5.2.1.1	Procedimiento.	131
5.2.1.2	Resultados obtenidos de la simulación del golpe de ariete.	138
5.2.1.3	Resultados del golpe de ariete por cálculo teórico.	148
5.2.1.4	Comparación y análisis de resultados.	148
5.2.2	Simulación de la corrida de datos ideal.	152
5.2.2.1	Análisis de resultados de la corrida de datos.	156

6.	GUÍA DE LABORATORIO	157
7.	EVALUACIÓN FINANCIERA	181
7.1	COSTOS	181
7.1.1	Costos de ingeniería.	181
7.1.2	Costos de fabricación.	181
7.1.3	Costos de mantenimiento y operación CMO.	186
7.2	BENEFICIOS	186
7.2.1	Beneficios Negativos (B ⁻).	186
7.2.1	Beneficios Positivos (B ⁺).	187
7.3	FLUJO DE CAJA	189
7.4	TASA DE INTERÉS DE OPORTUNIDAD	190
7.5	INDICADOR RELACIÓN BENEFICIO COSTO (B/C)	190
7.6	INDICADOR VALOR PRESENTE NETO VPN	191
7.7	ANÁLISIS FINANCIERO	192
8.	CONCLUSIONES	194
9.	RECOMENDACIONES	197
	BIBLIOGRAFÍA	198
	ANEXOS	201

LISTA DE CUADROS

	pág.
Cuadro 1. Requerimientos funcionales.	64
Cuadro 2. Propiedades ambientales.	65
Cuadro 3. Condiciones óptimas de operación del agua.	65
Cuadro 4. Criterios de evaluación.	74
Cuadro 5. Método de ponderación lineal.	75
Cuadro 6. Dimensiones tubería de descarga.	80
Cuadro 7. Propiedades del agua a 18°C.	85
Cuadro 8. Valores de diseño de rugosidad en tubos.	86
Cuadro 9. Pérdidas menores por accesorios.	86
Cuadro 10. Máximo caudal del agua.	87
Cuadro 11. Datos para el cálculo del golpe de ariete.	96
Cuadro 12. Datos para el cálculo de la mitigación golpe de ariete.	100
Cuadro 13. Propiedades del acero ASTM A36.	106
Cuadro 14. Cargas sobre la lámina.	107
Cuadro 15. Información carga mayorada del sistema.	116
Cuadro 16. Resistencia de las columnas.	117
Cuadro 17. Características de abarcones.	119
Cuadro 18. Características abrazaderas omega.	119
Cuadro 19. Comparación de datos del diseño detallado.	149
Cuadro 20. Comparación de la corrida de datos.	155
Cuadro 21. Costos de ingeniería.	181
Cuadro 22. Costos de mano de obra.	182
Cuadro 23. Costos de material.	183
Cuadro 24. Costos de mantenimiento y operación CMO.	186

LISTA DE DIAGRAMAS

	pág.
Diagrama 1. Sistemas de la herramienta de golpe de ariete.	62
Diagrama 2. Caja negra de funciones.	67
Diagrama 3. Flujo esquemático de sub-funciones de la herramienta de golpe de ariete.	69

LISTA DE ECUACIONES

	pág.
Ecuación 1. Número de Reynolds.	29
Ecuación 2. Forma general de celeridad.	38
Ecuación 3. Expresión simplificada de celeridad.	38
Ecuación 4. Periodo.	39
Ecuación 5. Balance de energías.	39
Ecuación 6. Expresión analítica del tiempo de parada.	40
Ecuación 7. Expresión simplificada de tiempo de parada.	41
Ecuación 8. Pendiente hidráulica.	41
Ecuación 9. Expresión longitud crítica.	43
Ecuación 10. Golpe de ariete en descargas cortas.	43
Ecuación 11. Golpe de ariete en descargas largas	44
Ecuación 12. Cálculo volumen del depósito.	76
Ecuación 13. Volumen del depósito.	77
Ecuación 14. Altura y diámetro del depósito.	77
Ecuación 15. Velocidad de la tubería de análisis.	78
Ecuación 16. Área de sección trasversal al flujo.	79
Ecuación 17. Ecuación punto de equilibrio.	79
Ecuación 18. Área de sección transversal al flujo según la apertura.	80
Ecuación 19. Velocidad de flujo real.	81
Ecuación 20. Altura del fluido.	81
Ecuación 21. Ancho del fluido.	82
Ecuación 22. Volumen tanque de cabecera.	82
Ecuación 23. Altura tanque de cabecera.	82
Ecuación 24. Ecuación general de energía.	85
Ecuación 25. Cálculo del número de Reynolds.	88
Ecuación 26. Factor de Fricción.	89
Ecuación 27. Pérdidas primarias.	89
Ecuación 28. Pérdidas secundarias.	90
Ecuación 29. Pérdidas secundarias de la salida del tanque.	90
Ecuación 30. Pérdidas secundarias de la válvula de compuerta.	90
Ecuación 31. Total pérdidas secundarias.	90
Ecuación 32. Pérdidas totales de la línea de succión.	91
Ecuación 33. Carga total sobre la bomba.	92
Ecuación 34. Carga de succión neta positiva disponible.	93
Ecuación 35. Cálculo de la carga de succión neta positiva disponible.	94
Ecuación 36. Cálculo de la celeridad.	96
Ecuación 37. Cálculo del periodo.	97
Ecuación 38. Cálculo de la altura manométrica.	97
Ecuación 39. Cálculo de la pendiente hidráulica.	97
Ecuación 40. Cálculo tiempo de parada.	98
Ecuación 41. Cálculo de la longitud crítica.	99

Ecuación 42. Cálculo del golpe de ariete en descargas largas.	99
Ecuación 43. Cálculo de la sobrepresión.	99
Ecuación 44. Depresión mínima.	101
Ecuación 45. Volumen mínimo de aire.	102
Ecuación 46. Volumen máximo de aire.	102
Ecuación 47. Factor $ S'_{omín}/h_{f1} $.	103
Ecuación 48. Depresión mínima durante el flujo transitorio.	103
Ecuación 49. Depresión mínima durante el flujo transitorio.	104
Ecuación 50. Sobrepresión con calderín.	105
Ecuación 51. Momentos totales de la lámina.	108
Ecuación 52. Reacción de B de la lámina.	108
Ecuación 53. Reacción de A de la lámina.	109
Ecuación 54. Esfuerzo flexionante.	110
Ecuación 55. Esfuerzo máximo permisible.	111
Ecuación 56. Cálculo de espesor de una lámina.	111
Ecuación 57. Módulo de sección.	114
Ecuación 58. Factor de seguridad.	114
Ecuación 59. Condición LFRD.	115
Ecuación 60. Factor de característica.	116
Ecuación 61. Esfuerzo crítico.	117
Ecuación 62. Resistencia de diseño.	117
Ecuación 63. Condición de esbeltez.	118
Ecuación 64. Cálculo de carga de sobrepresión.	118
Ecuación 65. Desarrollo del punto de equilibrio.	120
Ecuación 66. Desarrollo función de transferencia válvula 1.	121
Ecuación 67. Función de transferencia para la válvula de entrada.	121
Ecuación 68. Desarrollo función de transferencia para la válvula 2.	122
Ecuación 69. Función de transferencia para la válvula de salida.	122
Ecuación 70. Tasa de interés de oportunidad.	190
Ecuación 71. Relación beneficio costo.	191
Ecuación 72. Cálculo relación beneficio costo.	191
Ecuación 73. Valor presente neto.	192
Ecuación 74. Cálculo valor presente neto.	192

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Fluido en régimen laminar.	30
Figura 2. Fluido en régimen turbulento.	31
Figura 3. Secuencia del golpe de ariete.	32
Figura 4. Gráfica de presión vs tiempo.	33
Figura 5. Golpe de ariete en conducto por gravedad.	34
Figura 6. Cierre abrupto de válvula.	35
Figura 7. Fase de dilatación de tubería de análisis.	35
Figura 8. Fase directa del golpe de ariete.	36
Figura 9. Fase inversa del golpe de ariete.	36
Figura 10. Gráfica del coeficiente C.	42
Figura 11. Gráfica del coeficiente K.	42
Figura 12. Golpe de ariete en descargas cortas.	44
Figura 13. Golpe de ariete en impulsiones largas.	45
Figura 14. Circuito de lodo.	47
Figura 15. Bomba triplex.	48
Figura 16. Dámper de pulsación con nitrógeno.	49
Figura 17. Dámper de pulsación.	50
Figura 18. Dámper en succión.	50
Figura 19. Fluctuación de BHP y zona de arena con golpe de ariete.	54
Figura 20. Golpe de ariete en equipos y tuberías de las facilidades.	55
Figura 21. Caso de estudio experimental en líneas de tubería.	58
Figura 22. Cambio de presión vs tiempo.	58
Figura 23. Descripción de instalación de embarque de petróleo.	60
Figura 24. Alternativa 1.	71
Figura 25. Alternativa 2.	72
Figura 26. Alternativa 3.	73
Figura 27. Tanque bajito Colempaques.	78
Figura 28. Puntos de análisis.	87
Figura 29. Curva característica de bombas centrífugas.	95
Figura 30. Características dimensionales de bombas centrífugas.	95
Figura 31. Diagrama de cuerpo libre.	107
Figura 32. Diagrama de cargas distribuidas para análisis de la lámina.	108
Figura 33. Diagrama de fuerza cortante de la lámina.	109
Figura 34. Diagrama de momento flector de la lámina.	110
Figura 35. Diagrama viga crítica.	112
Figura 36. Diagrama de fuerza cortante de la viga crítica.	113
Figura 37. Diagrama de momento flector de la viga crítica.	113
Figura 38. Listado de cargas mayoradas.	115
Figura 39. Características de abarcones.	119
Figura 40. Características abrazaderas omega.	119
Figura 41. Apertura válvula de entrada 100%.	123

Figura 42. Apertura válvula de entrada 75%.	124
Figura 43. Comportamiento transitorio de nivel del tanque de cabecera.	125
Figura 44. Plano P&ID de la herramienta de análisis de golpe de ariete.	127
Figura 45. Herramienta de análisis de golpe de ariete.	128
Figura 46. Esquema de los equipos del golpe de ariete en Aspen Hysys.	130
Figura 47. Esquema de los equipos de generación del golpe de ariete.	132
Figura 48. Esquema de los equipos de mitigación del golpe de ariete.	132
Figura 49. Altura de los nodos.	133
Figura 50. Datos del tanque de cabecera.	133
Figura 51. Datos de la tubería.	133
Figura 52. Ley de caudal.	134
Figura 53. Datos calderín.	134
Figura 54. Datos electroválvula.	134
Figura 55. Tiempo de cierre de la electroválvula.	135
Figura 56. Asistente de resultados.	136
Figura 57. Previsualización de la gráfica de golpe de ariete.	137
Figura 58. Datos de la gráfica del golpe de ariete.	137
Figura 59. Gráfica del golpe de ariete simulación No. 1.	138
Figura 60. Flujo de caja del proyecto.	189
Figura 61. Flujo de caja para la adquisición del equipo de golpe de ariete.	193

LISTA DE GRÁFICAS

	pág.
Gráfica 1. Comparación de resultados generación del golpe de ariete.	149
Gráfica 2. Comparación de resultados mitigación del golpe de ariete.	150
Gráfica 3. Generación y mitigación teórica del golpe de ariete.	151
Gráfica 4. Generación y mitigación del golpe de ariete en Allievi.	151

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Propiedades del fluido.	82
Tabla 2. Dimensiones del tanque de cabecera.	83
Tabla 3. Características de las secciones de tubería.	84
Tabla 4. Puntos de referencia para ecuación de Bernoulli.	88
Tabla 5. Pérdidas tubería de succión.	91
Tabla 6. Pérdidas tubería de descarga.	91
Tabla 7. Pérdidas tubería de descarga análisis.	92
Tabla 8. Pérdidas de energía del sistema.	92
Tabla 9. Carga total sobre la bomba.	93
Tabla 10. Carga de succión neta positiva disponible.	94
Tabla 11. Resultados de las variables para la generación golpe de ariete.	100
Tabla 12. Resultados de las variables para la mitigación del golpe de ariete.	104
Tabla 13. Características del calderín de 2L.	105
Tabla 14. Reacciones en la viga crítica.	112
Tabla 15. Resultados de esbeltez.	118
Tabla 16. Resultados de la simulación golpe de ariete.	139
Tabla 17. Cálculo teórico de la generación y mitigación del golpe de ariete.	148
Tabla 18. Resultados simulación golpe de ariete corrida de datos.	153
Tabla 19. Cálculo teórico del golpe de ariete de la corrida de datos.	154
Tabla 20. Inversión de la herramienta.	186
Tabla 21. Beneficios negativos.	187
Tabla 22. Beneficios positivos.	188
Tabla 23. Beneficios y costos del proyecto.	189
Tabla 24. Resultados cálculo de indicadores.	192
Tabla 25. Resultados cálculo indicadores adquisición del equipo.	193

LISTA DE ANEXOS

	pág.
ANEXO A. Catálogo Tuvalrep	202
ANEXO B. Tablas y gráficas para el cálculo hidráulico y de golpe de ariete	204
ANEXO C. Gráficas del golpe de ariete de la corrida de datos	207
ANEXO D. Planos de la herramienta de análisis de golpe de ariete	223

ABREVIATURAS

=: igual.

>: mayor que.

<: menor que.

\$: pesos.

%: porcentaje.

”: pulgadas.

adim: adimensional.

ANSI: instituto Nacional Estadounidense de Estándares (American National Standards Institute).

ASTM: sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos (American Society of Mechanical Engineers).

B/C: relación beneficio costo.

BHP: presión de fondo de pozo.

°C: grados centígrados.

GPa: gigapascal.

h: hora.

in: pulgadas.

J: joules.

kg: kilogramo.

kgf: kilogramo fuerza.

kPa: kilopascal.

kN: kilonewton.

kW: kilovatio.

L: litro.

m: metro.

m²: metro cuadrado.

m³: metro cúbico.

mH₂O: metros columna de agua.

mm: milímetros.

mmHg: milímetros de mercurio.

MPa: megapascal.

P.H.C: punto de carga hidrostática.

psi: libra por pulgada cuadrada (Pound per squareinch).

rad: radianes.

s: segundos.

VPN: valor presente neto.

GLOSARIO

ABARCÓN: elemento de sujeción metálico utilizado en aplicaciones que sea necesario dar soporte a tuberías. También, es conocido como abrazadera tipo U y su aplicación se resume a actividades donde se generen grandes presiones y cargas.

CALDERÍN: recipiente o cámara de aire utilizada para amortiguar el efecto del golpe de ariete. Dentro de su diseño, puede o no, tener una membrana con el fin de evitar la mezcla de aire con fluido.

CARGA MAYORADA: máxima combinación de cargas a la que está sometido un elemento de diseño.

DÁMPER: dispositivo de amortiguamiento acoplado a las bombas tríplex del circuito de lodos. Su función es mitigar el efecto del golpe de ariete mediante el uso de nitrógeno presurizado en una membrana.

DATUM: es la profundidad en donde el reservorio se divide en dos partes hidráulicas equivalentes.

EMPOTRAMIENTO: tipo de apoyo de elementos estructurales, el cual, tiene como característica principal impedir el desplazamiento tanto horizontal como vertical, así como el giro en cualquier eje.

ENERGIA DE INERCIA: es la energía que un cuerpo genera al girar en torno a un eje de referencia fijo.

PERMEABILIDAD: capacidad de la roca para transmitir fluidos. Una formación debe tener porosidad interconectada para ser permeable.

POZO: es una perforación del suelo con el fin de contactar un yacimiento de hidrocarburos con la superficie.

POTENCIA: se refiere a la cantidad de trabajo realizado por una bomba por una unidad de tiempo.

RUGOSIDAD: hace referencia a la calidad de la superficie de un material; es decir, a la cantidad de irregularidades que este presenta, las cuales se oponen al movimiento de un fluido.

SCHEDULE: estándar que caracteriza los valores dimensionales de una tubería definiendo sus diámetros y espesores.

TRANSITORIO: hace referencia al fenómeno hidráulico que implica la variación de presión debido a cambios bruscos de velocidad en el transcurso del tiempo.

VIGA HIPERESTÁTICA: es aquella condición en la cual la viga es estáticamente indeterminada. Existen mayor cantidad de incógnitas que ecuaciones estáticas para resolver el sistema.

YACIMIENTO: es una unidad geológica de volumen limitado, poroso y permeable que contiene hidrocarburos en estado líquido y/o gaseoso.

RESUMEN

El presente proyecto de grado expone el desarrollo de ingeniería aplicada al diseño de una herramienta para el análisis del golpe de ariete en tubería recta en un laboratorio de mecánica de fluidos, condensando conocimientos adquiridos tanto en la carrera de ingeniería de petróleos como la ingeniería mecánica.

Inicialmente, se determinaron las bases teóricas de la ocurrencia del fenómeno de golpe de ariete; en donde, se mencionó el modelo matemático y ecuaciones de Allievi y Michaud, así como casos concretos en la industria petrolera en donde se presenta este fenómeno mostrando estudios que se han realizado en esta área para lograr la comprensión y repercusión que tiene el golpe de ariete. Con base en lo anteriormente mencionado, se establecieron requerimientos y parámetros funcionales para así proponer 3 alternativas encaminadas hacia el sistema de mitigación de golpe de ariete. Utilizando el método *scoring*, se eligió un calderín como elemento de amortiguamiento y sobre esta alternativa se desarrolló todo el diseño detallado dividiendo la herramienta en tres sub-sistemas así: generación y mitigación de golpe de ariete, instrumentación y estructural.

Tras desarrollar el diseño detallado de la herramienta, se procedió a realizar la fase de simulación sobre el sistema de generación y mitigación del golpe de ariete con el fin de corroborar los datos obtenidos teóricamente con ayuda de un software, que, en este caso, es el programa Allievi.

Una vez validada la funcionalidad de la herramienta, se desarrollaron guías de laboratorio con el fin de establecer parámetros y lineamientos acerca de la operación de la herramienta y la finalidad que tendría la misma al momento de realizar prácticas.

Finalmente, se evaluó financieramente el proyecto mediante el indicador costo/beneficio con el fin de estimar la viabilidad de la consecución de este proyecto.

Palabras clave: golpe de ariete, Allievi, Michaud, calderín, Software Allievi.

Key words: water hammer, Allievi, Michaud, air chamber, Allievi software.

INTRODUCCIÓN

Dentro de las operaciones y procesos industriales de cualquier índole, se ha buscado aprovechar el uso de fluidos de cualquier tipo ya sea para convertirlo en trabajo mecánico o realizar su distribución para abastecer diversos procesos; pero, es necesario tener en cuenta las implicaciones y consecuencias que trae el realizar indebidas manipulaciones del mismo. Este, es el caso de golpe de ariete, el cual es un fenómeno indeseable que trae consigo consecuencias catastróficas tanto para el proceso como para los operarios.

El golpe de ariete es entendido como un choque de presión el cual se propaga por todo el sistema hidráulico; es decir, tuberías, accesorios y elementos de adición de energía como bombas y turbinas; llegando a producir rupturas de dichos elementos o hasta el colapso del sistema en sí. Por tal motivo, es necesario tener en cuenta la ocurrencia del golpe de ariete a la hora de realizar diseños de sistemas hidráulicos.

Habiendo establecido la importancia de este fenómeno, es necesario contar con una herramienta para analizar esta problemática y así comprender las razones de su origen, así como el modelo matemático que describe su comportamiento. Actualmente, el diseño actual de los equipos de laboratorio de mecánica de fluidos de la Universidad de América, no es adaptable para poder evidenciar el golpe de ariete debido a que los accesorios de instrumentación y control no cumplen con las especificaciones técnicas para la instalación de dicha herramienta de medición. También, se evidencia falta de automatización en los equipos del laboratorio de mecánica de fluidos al observar ausencia de válvulas eléctricas o neumáticas para controlar el paso de fluido. A lo anterior se suma la gran inversión requerida para adquirir un equipo que permita estudiar este fenómeno con compañías especializadas en equipos para ensayo y medición.

A fin de poder estudiar y medir dicho fenómeno existe la necesidad de contar con una herramienta de análisis que permita la compresión y observación de esta problemática; con esta herramienta se podrá ampliar los equipos existentes a nivel del laboratorio de mecánica de fluidos supliendo así la necesidad de abarcar este tema, así como la oportunidad de observar alternativas para mitigar o disminuir este efecto.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Diseñar una herramienta para el análisis del golpe de ariete en tubería recta en un laboratorio de mecánica de fluidos.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Determinar las bases teóricas de la ocurrencia del fenómeno del golpe de ariete en tubería recta, en las operaciones de la industria petrolera.
2. Definir los requerimientos y parámetros funcionales para el diseño de la herramienta para el análisis del golpe de ariete.
3. Realizar el diseño conceptual evaluando las alternativas sobre el sistema de mitigación del golpe de ariete.
4. Desarrollar el diseño detallado de la herramienta de análisis de golpe de ariete.
5. Simular el diseño de la herramienta mediante el software Aspen Hysys.
6. Elaborar una guía de laboratorio de la herramienta de mitigación de golpe de ariete.
7. Realizar el estudio financiero costo/beneficio de la herramienta para un laboratorio de mecánica de fluidos.

1. BASES TEÓRICAS DEL GOLPE DE ARIETE EN TUBERÍA RECTA

El presente capítulo basa su fundamento en la teoría de mecánica de fluidos que incluye los tipos de regímenes existentes y los tipos de pérdidas de presión que ocurren en sistemas hidráulicos, también, se fundamenta en fenómenos de flujo transitorio como el golpe de ariete y las propiedades y características de las ondas presentes en dicho fenómeno. También, se explicará diversos mecanismos que permiten mitigar o disminuir las consecuencias del golpe de ariete que son peligrosas tanto para el proceso como para la seguridad y salud de los operarios. Por último, se analizarán las causas y consecuencias de este fenómeno en operaciones como perforación, producción, transportes de fluidos y facilidades de producción; pero, no se especificarán datos operacionales o cifras de magnitudes y variables que intervienen en el proceso.

1.1 REGÍMENES DE FLUJO

En la mecánica de fluidos es necesario analizar y determinar las pérdidas de energía o presión que se producen en las tuberías y accesorios. Las pérdidas que ocurren en tuberías se denominan primarias y dependen de las condiciones de flujo del fluido conforme este circula a través de redes de tuberías.

1.1.1 Número de Reynolds. Define o caracteriza la naturaleza de flujo del fluido. Este número depende del diámetro de la tubería y de la densidad, velocidad de flujo, viscosidad cinemática y viscosidad dinámica del fluido. La ecuación que permite calcular el número de Reynolds es la siguiente (Mecánica de Fluidos, Robert Mott)¹:

Ecuación 1. Número de Reynolds.

$$Re = \frac{\rho * D * V}{\mu} = \frac{V * D}{\nu}$$

Fuente: MOTT, Robert L. Mecánica De Fluidos. Sexta ed. México: Pearson Educación de México, S.A. de C.V., 2006. p. 230.

Donde:

ρ : densidad del fluido [kg/m^3].

D : diámetro interno de la tubería [m].

V : velocidad del flujo [m/s].

μ : viscosidad dinámica del fluido [Ns/m^2].

ν : viscosidad cinemática del fluido [m^2/s].

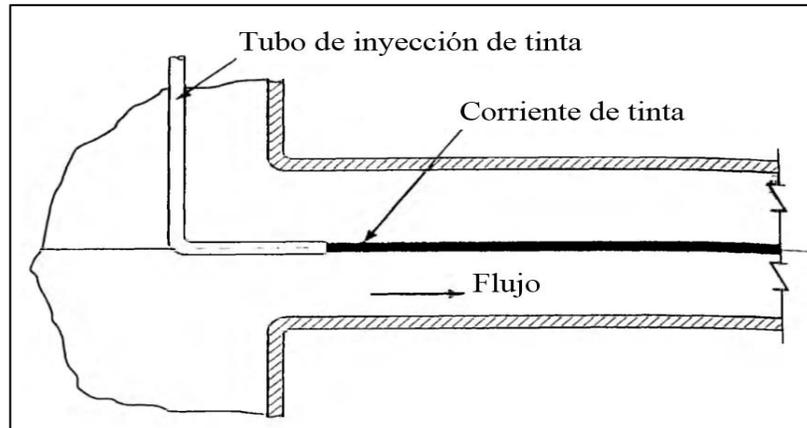
¹ MOTT, Robert L. Mecánica De Fluidos. Sexta ed. México: Pearson Educación de México, S.A. de C.V., 2006. p. 233-240970-26-0805-8. p. 230.

Con este número adimensional es posible determinar el tipo de régimen bajo el cual está fluyendo el fluido en cuestión. Los regímenes existentes son: laminar, transición y turbulento.

1.1.2 Flujo laminar o de Poiseuille. “El régimen laminar se caracteriza por un movimiento ordenado de las partículas de fluido, existiendo unas líneas de corriente y trayectorias bien definidas. El fluido en movimiento tiene las láminas bien definidas, cada una viajando a su velocidad rozando a las de al lado, sin mezclarse unas con otras”.²

En este régimen el flujo parece moverse en láminas continuas donde las capas no se mezclan con las adyacentes a ellas como se observan en la **Figura 1**. Se considera que se está operando en flujo laminar cuando el número de Reynolds es menor a dos mil: $Re < 2000$.

Figura 1. Fluido en régimen laminar.



Fuente: MOTT, Robert L. Mecánica De Fluidos. Sexta ed. México: Pearson Educación de México, S.A. de C.V., 2006. p. 233.

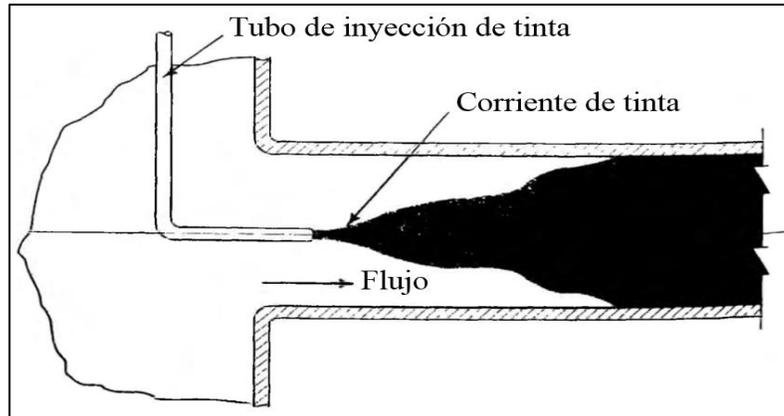
1.1.3 Flujo turbulento o de Venturi. Este régimen se origina cuando el fluido presenta un movimiento desordenado con mezcla intensiva entre las diferentes capas. A medida que la velocidad del flujo aumenta, el régimen laminar se va convirtiendo en turbulento. Cuando el fluido está dentro de este régimen aparecen dos fuerzas de rozamiento debido a la mezcla de las diferentes capas. El número de Reynolds para este caso es mayor a cuatro mil: $Re > 4000$.

En el flujo turbulento las partículas se mueven en trayectorias irregulares, que no son suaves ni fijas como se muestra en la **Figura 2**. El flujo es turbulento si las fuerzas viscosas son débiles en relación con las fuerzas inerciales. La turbulencia

² MARTIN, I.; SALCEDO, R. y FONT, R. MECÁNICA DE FLUIDOS Tema1. Flujo Interno De Fluidos Incompresibles Y Compresibles. 2011. p. 15

según la definición de Taylor y von Karmán, puede producirse por el paso del fluido sobre superficies de frontera, o por el flujo de capas de fluido, a diferentes velocidades que se mueven una encima de la otra.

Figura 2. Fluido en régimen turbulento.



Fuente: MOTT, Robert L. Mecánica De Fluidos. Sexta ed. México: Pearson Educación de México, S.A. de C.V., 2006. p. 234.

1.1.4 Flujo transitorio. Cuando se está trabajando en flujo laminar y se aumenta gradualmente la velocidad se observa que la corriente se hace menos suave y presenta una serie de ondas dando la impresión de un efecto oscilatorio, luego el fluido se estabiliza y pasa a ser un flujo turbulento. La etapa en donde se pasa de régimen laminar a turbulento se conoce como transición.

Dentro de este régimen se genera el golpe de ariete y este puede ser ocasionado por diversos factores. El rango de número de Reynolds que caracteriza este fenómeno se encuentra entre 2000 y 4000.

1.2 DEFINICIÓN Y CARACTERÍSTICAS DEL FENÓMENO GOLPE DE ARIETE

El golpe de ariete o choque hidráulico es un incremento momentáneo de presión que ocurre en un sistema de agua cuando varían condiciones como velocidad o dirección espontáneamente.

También, el golpe de ariete puede definirse como un fenómeno que se produce en tuberías largas cuando se detiene bruscamente una columna de agua.³

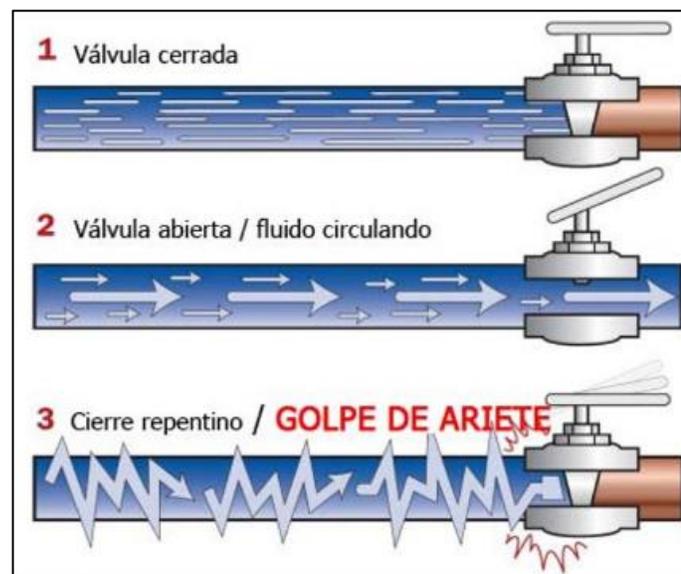
Dicho fenómeno puede originarse con tal magnitud que produce efectos indeseables que afectan tanto los componentes de los sistemas de bombeo como la seguridad de los operarios. Esto debido a que este fenómeno genera una serie de ondas y choques los cuales impactan en las tuberías, accesorios y las bombas

³ Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Agrícola de Ciudad Real. Tema 10. El Golpe De Ariete. [presentación power point]. diapositiva.1.

generando fractura de los componentes, desgaste de los mismos y en ocasiones cavitación.

La ocurrencia del golpe de ariete se puede explicar en la **Figura 3**, con la siguiente secuencia: primero, ocurre un cambio repentino en el flujo y dirección que puede ser ocasionado por el cierre abrupto de una válvula; segundo, la energía cinética del fluido es convertida en energía de presión la cual choca con las paredes de la tubería y con los accesorios; tercero, las ondas que se generan viajan hacia atrás y hacia adelante buscando otro elemento con el cual chocar; por último, las ondas se disipan gracias a las pérdidas primarias o por fricción.⁴

Figura 3. Secuencia del golpe de ariete.



Fuente: TROYANO, Antonio Fernández. Golpe de ariete o Water hammer SMAGUA 2014. [Consultado el Feb 20,2019]. Disponible en: <http://www.empresasconstruccion.es/golpe-de-ariete-water-hammer-smagua-2014/>

1.3 FACTORES DE OCURRENCIA DEL FENÓMENO GOLPE DE ARIETE

Existen múltiples causas que originan el golpe de ariete; pero, a grosso modo se definen cuatro grandes eventos los cuales producen los incrementos de presión anteriormente mencionados:

- Arranque inadecuado de la bomba puede generar colapso de vacío en impulsión.
- Fallo de potencia en la bomba el cual genera un cambio de la energía de suministro.

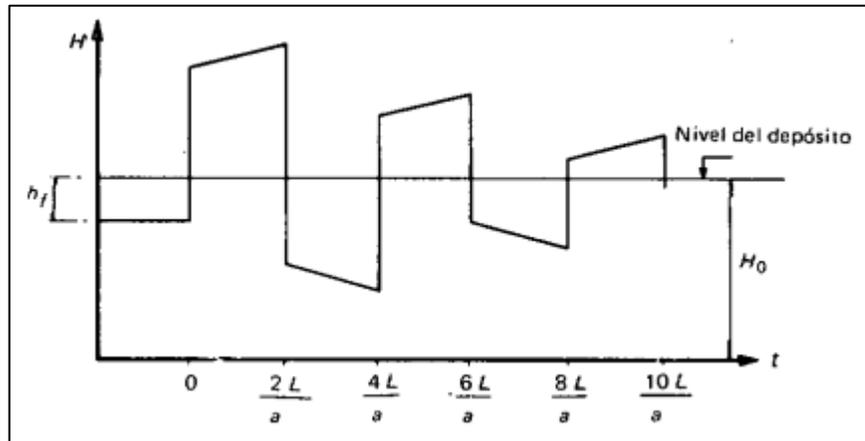
⁴ LAHLOU, Michael. Golpe De Ariete. THE NATIONAL ENVIRONMENTAL SERVICES CENTER, 2015. p. 1-4

- Apertura o cierre instantáneo de las válvulas.
- Sobredimensionamiento de los elementos de protección.

1.4 DESCRIPCIÓN DEL FENÓMENO GOLPE DE ARIETE

El fenómeno del golpe de ariete se representa gráficamente como una onda senoidal, la cual disminuye su amplitud y varía su periodo a través del paso del tiempo: en donde, si no existieran pérdidas por fricción, la oscilación de la onda se repetiría indefinidamente; pero, debido a que las tuberías hidráulicas presentan cierta rugosidad característica del tipo de material, la variación de la presión va disminuyendo a través del tiempo como se muestra en la **Figura 4**.

Figura 4. Gráfica de presión vs tiempo.



Fuente: CASTILLO, U. M. y DELCASTILLO, U. M. Teoría Del Golpe De Ariete Y Sus Aplicaciones En Ingeniería Hidráulica. Limusa, 1987. p. 43

Con el fin de poder entender dicho comportamiento se hace necesario estudiar las diversas etapas o fases que ocurren cuando se origina este fenómeno. Para este proyecto se realizará un análisis del fenómeno en un conducto por gravedad explicando así el comportamiento senoidal antes mencionado.

A continuación, se enuncia la nomenclatura o simbología de los términos utilizados para explicar el modelo físico del golpe de ariete así:

a: celeridad.

H: altura geométrica.

ΔH : golpe de ariete.

L: longitud de la tubería de descarga.

P. H. C: punto de carga hidrostática

t: tiempo.

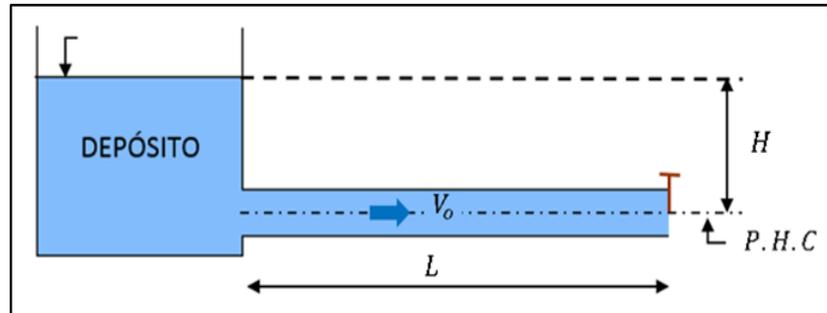
Δt : cambio en el tiempo.

V: velocidad de flujo.

V_0 : velocidad inicial.
 x : eje de referencia horizontal.

Inicialmente, para este modelo se considera un sistema compuesto de una tubería con sección transversal constante y una longitud definida, un tanque de cabecera con un nivel determinado de fluido y una válvula o algún órgano de control ubicado al final de esta tubería en descarga como se muestra en la **Figura 5**.

Figura 5. Golpe de ariete en conducto por gravedad.



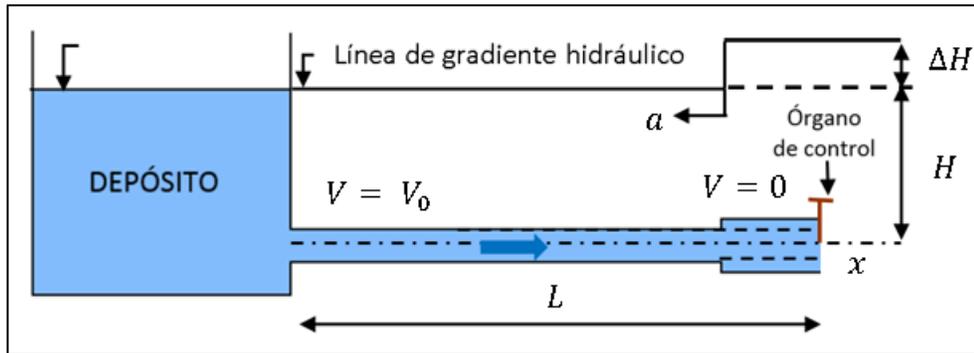
Fuente: CASTILLO, U. M. y DEL CASTILLO, U. M. Teoría Del Golpe De Ariete Y Sus Aplicaciones En Ingeniería Hidráulica. Limusa, 1987. p. 40. Modificado por los autores.

El tanque de cabecera debe poseer un nivel de agua constante con el fin de que permanezca con la misma carga de presión y funcione, así como un punto de referencia que reflejará la variación de la onda.

Con el fin de poder explicar el fenómeno se utilizará como referencia el libro del ingeniero Uriel Mancebo titulado “Teoría del golpe de ariete y sus aplicaciones en ingeniería hidráulica”⁵, estableciendo que como condición inicial se presenta un estado $t = 0$ en el cual se tiene una altura de presión determinada y un flujo constante en régimen permanente. Luego de este estado inicial se procede a realizar el cierre instantáneo o abrupto de la válvula provocando que la energía cinética que llevaba el fluido se convierta en energía potencial causando así un aumento en la presión inicial y originando un trabajo de deformación en la tubería el cual es el que representa la onda senoidal ya mencionada. En este instante de cierre de la válvula denominado $t + \Delta t$, la velocidad del fluido continúa en la misma dirección de la descarga por lo cual chocará con la pared de la válvula como se muestra en la **Figura 6**.

⁵ CASTILLO, U. M. y DELCASTILLO, U. M. Teoría Del Golpe De Ariete Y Sus Aplicaciones En Ingeniería Hidráulica. Limusa, 1987.

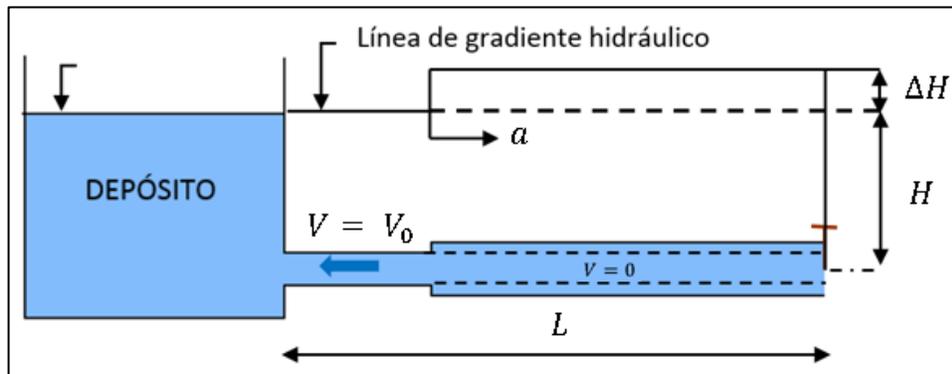
Figura 6. Cierre abrupto de válvula.



Fuente: CASTILLO, U. M. y DELCASTILLO, U. M. Teoría Del Golpe De Ariete Y Sus Aplicaciones En Ingeniería Hidráulica. Limusa, 1987. p. 41. Modificado por los autores.

En la **Figura 7**, se observa que al llegar al instante de tiempo $t = \frac{L}{a}$ la velocidad del fluido es 0, el agua está comprimida por lo cual la presión aumenta y la tubería estará deformada. Seguido a esto la dirección de la onda se traslada al eje negativo en el instante $t = \frac{L}{a} + \Delta t$ en el cual el agua fluye en dirección contraria, es decir, hacia el tanque de cabecera con las condiciones iniciales.

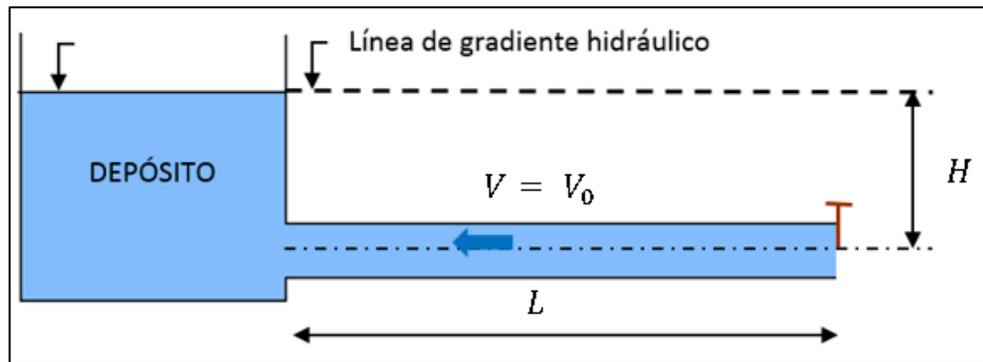
Figura 7. Fase de dilatación de tubería de análisis.



Fuente: CASTILLO, U. M. y DELCASTILLO, U. M. Teoría Del Golpe De Ariete Y Sus Aplicaciones En Ingeniería Hidráulica. Limusa, 1987. p. 41. Modificado por los autores.

En el instante de tiempo $t = \frac{2L}{a}$ que coincide con el periodo de la onda, la tubería ya no se encuentra deformada y se termina la etapa directa del golpe de ariete; como se observa en la **Figura 8**.

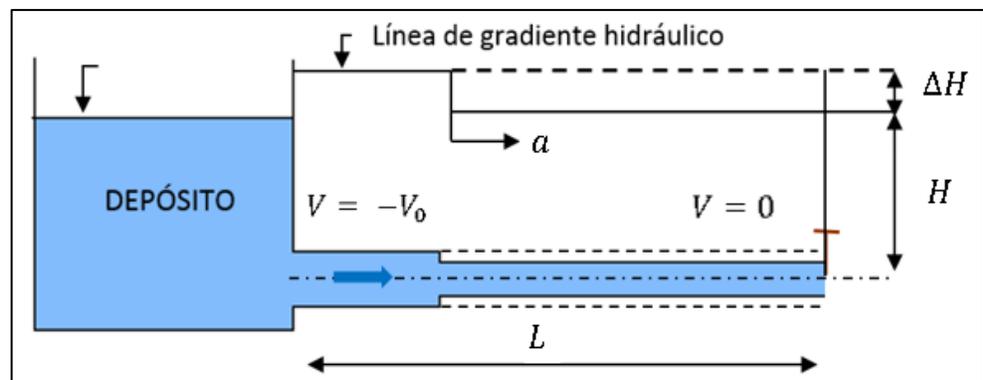
Figura 8. Fase directa del golpe de ariete.



Fuente: CASTILLO, U. M. y DELCASTILLO, U. M. Teoría Del Golpe De Ariete Y Sus Aplicaciones En Ingeniería Hidráulica. Limusa, 1987. p. 41. Modificado por los autores.

La fase inversa del golpe de ariete evidenciada en la **Figura 9**, también tiene una duración de $t = \frac{2L}{a}$ en la cual en el instante de tiempo $t = \frac{3L}{a}$ la tubería se contrae completamente y la velocidad del agua es igual a cero. A partir de este último instante se repite la secuencia de la misma forma que en la fase directa del golpe de ariete.

Figura 9. Fase inversa del golpe de ariete.



Fuente: CASTILLO, U. M. y DELCASTILLO, U. M. Teoría Del Golpe De Ariete Y Sus Aplicaciones En Ingeniería Hidráulica. Limusa, 1987. p. 41. Modificado por los autores.

1.5 CONSECUENCIAS DEL GOLPE DE ARIETE

“Las principales consecuencias de los transitorios hidráulicos son: altas presiones, presiones negativas, separación de la columna de agua llegando inclusive a valores de cavitación, riesgo sanitario asociado a la intrusión de contaminantes como

consecuencia de las presiones negativas, y como consecuencia de lo anterior rotura de la tubería o fatiga de la misma a lo largo del tiempo”⁶.

No obstante; la Universidad de Carabobo, en Venezuela, explica en su “Manual de prácticas de laboratorio”⁷ de mecánica de fluidos II los siguientes eventos que se pueden generar a causa del golpe de ariete, así:

1.5.1 Vibraciones y Ruido. Debido a que se están presentando sobrepresiones en el sistema, se generará vibración sobre los elementos debido que estos absorben dichos cambios de presión. Lo anterior ocasiona daños en la estructura, grietas en elementos del sistema hidráulico y desacople del conjunto de piezas; este factor desencadena consecuencias progresivas debido a que cada vez que se presente el fenómeno se empeorará el estado de los equipos. Seguido a la vibración surge el ruido el cual afecta el confort y bienestar de los asistentes a la práctica.

1.5.2 Falla en bombas, válvulas y otros accesorios. Se debe tener en cuenta que cada equipo o accesorio está diseñado para soportar presiones establecidas; pero, cuando no se contempla el golpe de ariete se puede pasar este valor de presión haciendo que estos componentes trabajen sobre su zona plástica y en ocasiones se presente ruptura. Esto implica aumento en costos de mantenimiento sin contar que se disminuye la disponibilidad del sistema hidráulico.

1.5.3 Ruptura de tuberías. Este es uno de los casos más críticos que se pueden generar a causa del golpe de ariete puesto que colapsa por completo el sistema necesitándose atención inmediata por que se interrumpe por completo el flujo y se pierde fluido en el tramo.

1.6 CONCEPTOS BÁSICOS Y MODELO MATEMÁTICO

El golpe de ariete es un fenómeno que trae consigo gran cantidad de consecuencias negativas y hasta fatales por lo cual es necesario estudiarlo y comprenderlo; por tal motivo, grandes mentes como Joukowski, Allievi, Michaud, Sparre, Mendiluce, entre otros han dedicado grandes esfuerzos en desarrollar cálculos matemáticos y representaciones gráficas de esta problemática. Con el fin de poder calcular las sobrepresiones generadas con este fenómeno es necesario definir algunas características de las ondas generadas y de las condiciones en las que se presenta; además se traerán a colación las fórmulas y síntesis realizadas por el Doctor Mendiluce porque en estas se puede encontrar explicaciones claras de los modelos expuestos por Allievi y Michaud; sin contar que brinda una aplicación adecuada de

⁶ INGENIERIA DE FLUIDOS. Golpe de Ariete. [Consultado el Mar 21,2019]. Disponible en: <https://www.ingenieriadefluidos.com/golpe-de-ariete>

⁷ MARQUÉZ, Adriana y JIMENÉZ, Maryelvi. Manual De Prácticas De Laboratorio. 1 ed. Venezuela: Universidad de Carabobo, 2016. p. 66

las fórmulas propuestas. El libro referencia para este apartado es “El golpe de ariete en impulsiones”.⁸

1.6.1 Celeridad. Se simboliza con la letra a y hace referencia a la velocidad de propagación de la onda de presión del golpe de ariete en el agua que fluye por la tubería. Esta velocidad depende directamente del módulo elástico y la densidad del fluido, y del diámetro, espesor y módulo elástico de la tubería.

La velocidad de la onda de presión está dada por la siguiente ecuación:

Ecuación 2. Forma general de celeridad.

$$a = \sqrt{\frac{1}{\frac{1 \text{ kg/m}^3}{g} \left(\frac{D}{E * e} + \frac{1}{2,07 \times 10^8 \text{ kg/m}^2} \right)}}$$

Fuente: ROSICH, E. M. El Golpe De Ariete En Impulsiones. Servicio de Publicaciones E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, 1974. 9788460064596. p. 12.

Donde:

a : celeridad [m/s].

g : gravedad [m/s²].

D : diámetro interno de la tubería [m].

E : módulo elástico del material de la tubería [kg/m²].

e : espesor de la tubería [m].

La fórmula anterior se puede simplificar en la siguiente expresión:

Ecuación 3. Expresión simplificada de celeridad.

$$a = \frac{9.900}{\sqrt{48,3 + \frac{10^{10}}{E} * \frac{D}{e}}}$$

Fuente: ROSICH, E. M. El Golpe De Ariete En Impulsiones. Servicio de Publicaciones E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, 1974. 9788460064596. p. 12.

Donde:

a : celeridad [m/s].

D : diámetro interno de la tubería [m].

E : módulo elástico del material de la tubería [kg/m²].

e : espesor de la tubería [m].

⁸ ROSICH, E. M. El Golpe De Ariete En Impulsiones. Servicio de Publicaciones E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, 1974.

1.6.2 Periodo. Se define como el intervalo de tiempo requerido para realizar un ciclo de una onda. En el golpe de ariete este depende de la celeridad y de la longitud de la tubería.

El periodo en este trabajo se representará a partir del símbolo T^* con el fin de evitar confusiones con el tiempo de parada representado por la letra T . Dicho esto, el periodo se calcula a partir de la siguiente ecuación:

Ecuación 4. Periodo.

$$T^* = \frac{2L}{a}$$

Fuente: ROSICH, E. M. El Golpe De Ariete En Impulsiones. Servicio de Publicaciones E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, 1974. 9788460064596. p. 8. Modificado por los autores.

Donde:

T^* : periodo [s].

L : longitud de la tubería de descarga [m].

a : celeridad [m/s].

1.6.3 Tiempo de parada. También llamado tiempo de cierre de la válvula, es el intervalo de inicio de apertura, total o parcial de un órgano de control durante el cual se produce el cambio de régimen del fluido. Se denomina con la letra T y depende de la longitud de la tubería de descarga, velocidad de flujo, gravedad, la altura de presión y factores empíricos de Mendiluce. Si este valor es mayor al periodo se establece que es un cierre lento, de lo contrario, se denomina cierre rápido.

El tiempo de parada, surge de un balance de energías en donde están inmersas la energía cinética, de inercia, de rozamiento y de gravedad así:

Ecuación 5. Balance de energías.

$$E_c + E_i = E_g + E_r$$

$$\frac{QLV}{2g} + \frac{P * d^2 \omega^2 r}{16g} = \frac{Q}{2} HT + \frac{QJ}{4} T$$

Fuente: ROSICH, E. M. El Golpe De Ariete En Impulsiones. Servicio de Publicaciones E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, 1974. 9788460064596. p. 16

Donde:

E_c : energía cinética [J].

E_i : energía de inercia [J].
 E_g : energía de gravedad [J].
 E_r : energía de rozamiento [J].
 Q : caudal [m^3/s].
 L : longitud de la tubería de descarga [m].
 V : velocidad de flujo [m/s].
 g : gravedad [m/s^2].
 P : potencia de la bomba [m^3].
 d : diámetro del impeller [m].
 ω : velocidad angular de la bomba [rad/s].
 r : rendimiento de la bomba [%].
 T : tiempo de parada [s].
 H : altura geométrica [m].
 J : Pérdidas carga total [m].

De lo anterior surge el valor del tiempo de parada en segundos así:

Ecuación 6. Expresión analítica del tiempo de parada.

$$T = \frac{LV + \frac{P * d^2 \omega^2 r}{8Q}}{g(H + \frac{J}{2})}$$

Fuente: ROSICH, E. M. El Golpe De Ariete En Impulsiones. Servicio de Publicaciones E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, 1974. 9788460064596. p. 17

Donde:

T : tiempo de parada [s].
 V : velocidad de flujo [m/s].
 P : potencia de la bomba [m^3].
 d : diámetro del impeller [m].
 ω : velocidad angular de la bomba [rad/s].
 r : rendimiento de la bomba [%].
 Q : caudal [m^3/s].
 g : gravedad [m/s^2].
 H : altura geométrica [m].
 J : pérdidas de carga total [m].

El doctor Mendiluce sugiere eliminar la energía de inercia dado que es despreciable; no obstante, para una mayor comprensión se sustituyen términos poco definidos de la ecuación por coeficientes que representan la inercia de la bomba y la pendiente hidráulica así:

Ecuación 7. Expresión simplificada de tiempo de parada.

$$T = C + \frac{KLV}{g H_m}$$

Fuente: ROSICH, E. M. El Golpe De Ariete En Impulsiones. Servicio de Publicaciones E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, 1974. 9788460064596. p. 17

Donde:

C: coeficiente en función de la pendiente hidráulica [adim].

K: coeficiente en relación de la inercia [adim].

L: longitud de la tubería de descarga [m].

V: velocidad de flujo [m/s].

g: gravedad [m/s²].

H_m: altura manométrica [m].

El coeficiente C depende del porcentaje de la pendiente hidráulica la cual está determinada por la siguiente expresión:

Ecuación 8. Pendiente hidráulica.

$$\frac{H_m}{L}$$

Fuente: ROSICH, E. M. El Golpe De Ariete En Impulsiones. Servicio de Publicaciones E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, 1974. 9788460064596. p. 18

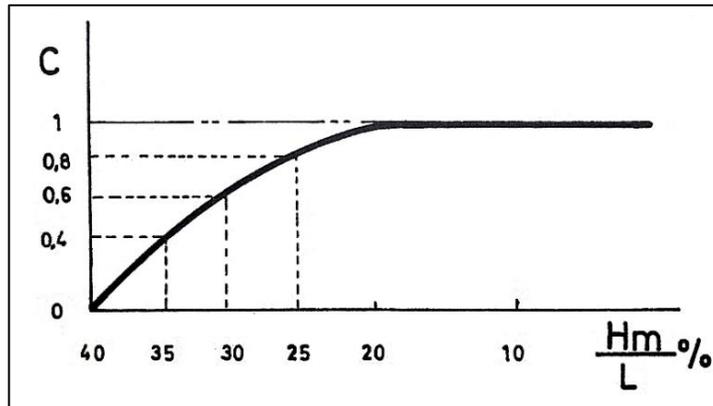
Donde:

L: longitud de la tubería de descarga [m].

H_m: altura manométrica [m].

Una vez obtenido el dato de la pendiente hidráulica en porcentaje, se busca cruzar este valor con la curva característica de la **Figura 10** para proyectarla en la ordenada y así obtener el coeficiente C:

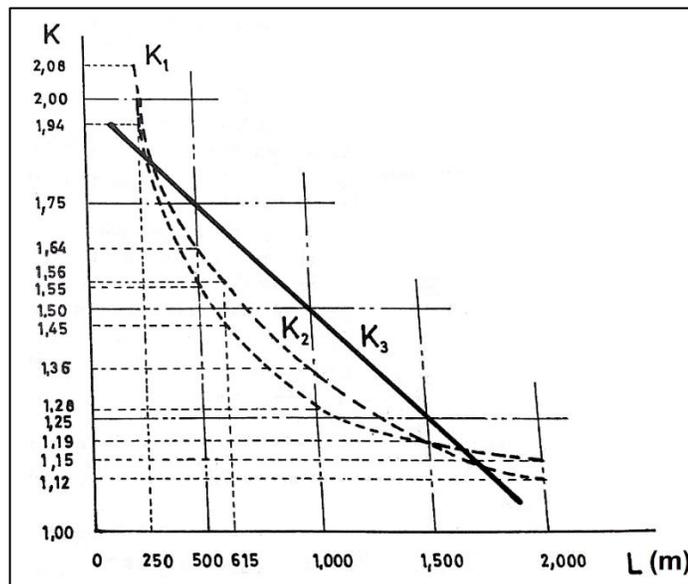
Figura 10. Gráfica del coeficiente C.



Fuente: ROSICH, E. M. El Golpe De Ariete En Impulsiones. Servicio de Publicaciones E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, 1974. p. 19

El coeficiente K como se mencionó anteriormente se relaciona con el efecto de la inercia de la bomba y sus valores dependen de la longitud de la descarga o impulsión. En la **Figura 11** se muestra las curvas características de este coeficiente, donde, obteniendo el valor de la longitud de descarga en metros se debe cruzar con la recta K_3 y proyectar dicho valor en la ordenada obteniendo así el valor del coeficiente K.

Figura 11. Gráfica del coeficiente K.



Fuente: ROSICH, E. M. El Golpe De Ariete En Impulsiones. Servicio de Publicaciones E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, 1974. p. 18

1.6.4 Longitud crítica. Está longitud hace referencia a la distancia que separa el final de la tubería de descarga del punto crítico.

Ecuación 9. Expresión longitud crítica.

$$L_c = \frac{a T}{2}$$

Fuente: ROSICH, E. M. El Golpe De Ariete En Impulsiones. Servicio de Publicaciones E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, 1974. p. 8.

Donde:

L_c : longitud crítica [m].

a : celeridad [m/s].

T : tiempo de parada [s].

1.6.5 Golpe de ariete en descargas cortas. Se dice que una impulsión es corta cuando cumple la condición de que el tiempo de parada es mayor al periodo de la onda así $T > T^*$; lo cual coincide con que la longitud de la tubería de descarga sea menor que la longitud crítica.

Al cumplir esta condición se procede a calcular el golpe de ariete utilizando la ecuación de Michaud que está representada por:

Ecuación 10. Golpe de ariete en descargas cortas.

$$\Delta H = \frac{2 L V}{g T}$$

Fuente: ROSICH, E. M. El Golpe De Ariete En Impulsiones. Servicio de Publicaciones E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, 1974. p. 7.

Donde:

ΔH : golpe de ariete en descargas cortas [m].

L : longitud de la tubería de descarga [m].

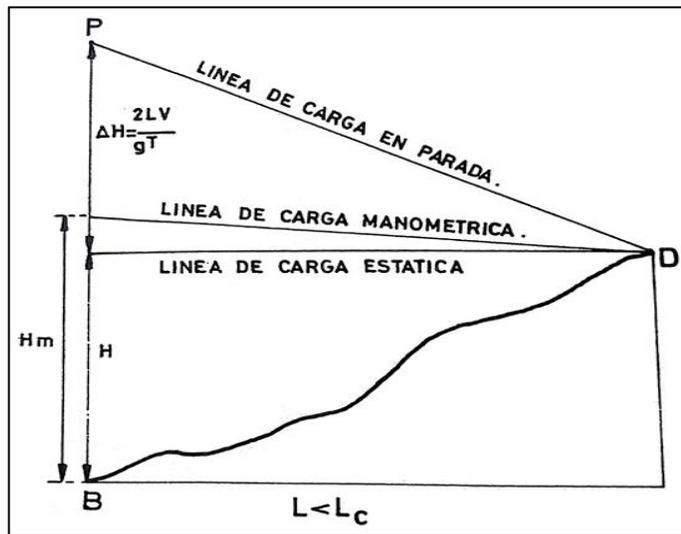
V : velocidad de flujo [m/s].

g : gravedad [m/s^2].

T : tiempo de parada [s].

En la **Figura 12** se esquematiza el golpe de ariete en descargas o impulsiones cortas; en donde, es posible observar que la longitud crítica es mayor que longitud de descarga por lo cual el golpe de ariete se reflejará sobre la totalidad de la tubería.

Figura 12. Golpe de ariete en descargas cortas.



Fuente: ROSICH, E. M. El Golpe De Ariete En Impulsiones. Servicio de Publicaciones E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, 1974. p. 22

1.6.6 Golpe de ariete en descargas largas. Se dice que una descarga es larga cuando el tiempo de parada es menor al periodo de la onda así $T < T^*$, lo cual coincide con que la longitud de la tubería de descarga sea mayor que la longitud crítica.

En esta condición el golpe de ariete se calcula a partir de la ecuación de Allievi así:

Ecuación 11. Golpe de ariete en descargas largas

$$\Delta H = \frac{aV}{g}$$

Fuente: ROSICH, E. M. El Golpe De Ariete En Impulsiones. Servicio de Publicaciones E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, 1974. p. 7

Donde:

ΔH : golpe de ariete en descargas largas [m].

a : celeridad [m/s].

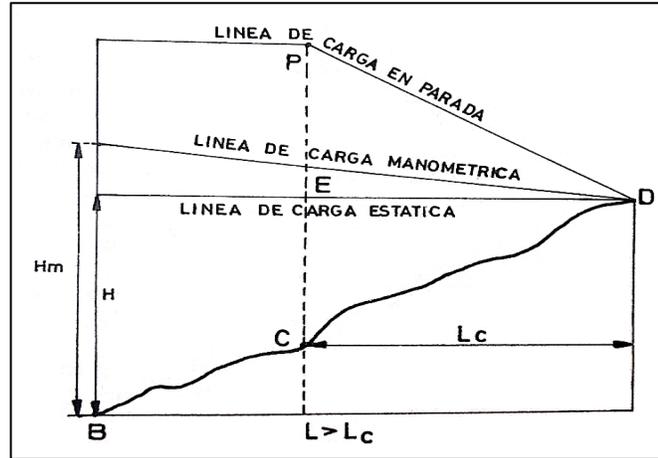
V : velocidad de flujo [m/s].

g : gravedad [m/s²].

El golpe de ariete en impulsiones largas tiene la característica de que la longitud de la tubería de descarga es mayor a la longitud crítica del fenómeno; por lo cual, sus

efectos solo tendrán repercusión en este tramo de tubería que corresponda a la longitud crítica y no en su totalidad, como se muestra en la **Figura 13**.

Figura 13. Golpe de ariete en impulsiones largas.



Fuente: ROSICH, E. M. El Golpe De Ariete En Impulsiones. Servicio de Publicaciones E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, 1974. p. 23.

1.6.7 Sobrepresión. Máximo pico de presión generado por el golpe de ariete debido a que la energía cinética, en vez de convertirse en energía potencial, se convierte en energía de presión. Cuando se opera en cierre lento de la válvula se trabaja con las ecuaciones de Michaud; mientras que si se opera con un cierre rápido se utilizan las ecuaciones de Allievi.

La sobrepresión está dada en metros y viene dada por la siguiente expresión $H + \Delta H$, en la cual se suma el golpe de ariete a la altura geométrica de descarga.

1.7 MÉTODOS DE SOLUCIÓN

Existen diversos métodos de solución para este fenómeno de las cuales se resalta el volante de inercia, el cual se incorpora al motor de la bomba con el fin de retardar las pérdidas de revoluciones; también están las chimeneas de equilibrio, calderines y las ventosas las cuales actúan como un amortiguador de los choques de presión generados y buscan eliminar el aire contenido en la tubería; y por último, existe la alternativa de instalar válvulas de alivio, retención y anticipadoras de ondas con el fin de restringir el flujo gradualmente y así evitar el golpe de ariete.

1.7.1 Volante de inercia. La finalidad del volante de inercia es aumentar el tiempo de parada de la bomba a través de retardar las pérdidas mecánicas en el motor. Este método de solución se encuentra instalado directamente en la bomba por lo cual, su instalación involucra cierto grado de complejidad.

1.7.2 Chimeneas de equilibrio. Según la compañía HIDRA software⁹, este dispositivo promueve la oscilación del agua eliminando así las sobrepresiones generadas en las paradas bruscas de elementos hidráulicos por lo cual este mecanismo se convierte en uno de los mejores sistemas de protección para las tuberías. Este dispositivo es aplicable para instalaciones con poca altura de elevación y también en casos donde el golpe de ariete genere sobrepresiones pequeñas.

1.7.3 Recipientes de aire. Existen sistemas universales de control de disminución del golpe de ariete dentro de los cuales encontramos los calderines. Estos proponen un acoplamiento de una cámara hermética ocupada parcialmente de aire a la tubería¹⁰. Mediante lo anterior se logra que la energía potencial del aire permita que el agua se desplace hacia arriba en los instantes siguientes al cierre brusco de la válvula. También, en el retroceso del agua se encarga de absorber parte de la energía de gravedad con lo cual disminuye el movimiento ondulatorio peligroso.

1.7.4 Válvulas anticipadoras de onda. Su función es realizar apertura cuando ocurre alguna parada de onda o algún cambio abrupto en la dirección de fluido con que minimice las sobrepresiones generadas¹¹.

1.8 GOLPE DE ARIETE EN LA INDUSTRIA PETROLERA

El golpe de ariete (*water hammer*) es un efecto que ocurre en la industria del petróleo y gas, tanto en las áreas de perforación, producción, facilidades de producción y transporte de fluidos; presentándose generalmente en las bombas de lodo, en los pozos inyectoros de agua y gas, en las tuberías de recuperación de condensados y en los oleoductos respectivamente, debido al cierre repentino de una válvula en un extremo de un sistema de tuberías, generando variaciones en la velocidad del fluido transportado o incluso por la propagación de una onda de presión que según la compañía C&F Engineering provocan “fugas y derrames en oleoductos y en sistemas de transporte de hidrocarburos, daños en equipos de impulsión (bombeo), desplazamiento de tuberías fuera de sus soportes, vibraciones del sistema e incluso accidentes con el personal involucrado”¹².

Según el ingeniero Richard Jiménez López¹³, los efectos del golpe de ariete son considerables cuando mayores son los siguientes parámetros:

⁹ HIDRA software. Dispositivos Para La Atenuación Del Golpe De Ariete En Tuberías Incorporados En Ariete. [Consultado el Feb 23,2019]. Disponible en: <https://www.hidrasoftware.com/dispositivos-para-la-atenuacion-del-golpe-de-ariete-en-tuberias-incorporados-en-ariete/>

¹⁰ Ibid., p.1

¹¹ Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Agrícola de Ciudad Real. Op. Cit., p. 16.

¹² FIGUERA, Mariby. WATER HAMMER TOP TEN. [En línea]. Recuperado en: 19 MARZO 2019. Formato archivo (pdf). Disponible en: <http://cyf-eng.com/pdf/boletines/8.pdf>. p. 12

¹³ LÓPEZ, R. G. Frío Industrial: Mantenimiento Y Servicios a La Producción. Marcombo, 2005. 9788426713582. p. 73.

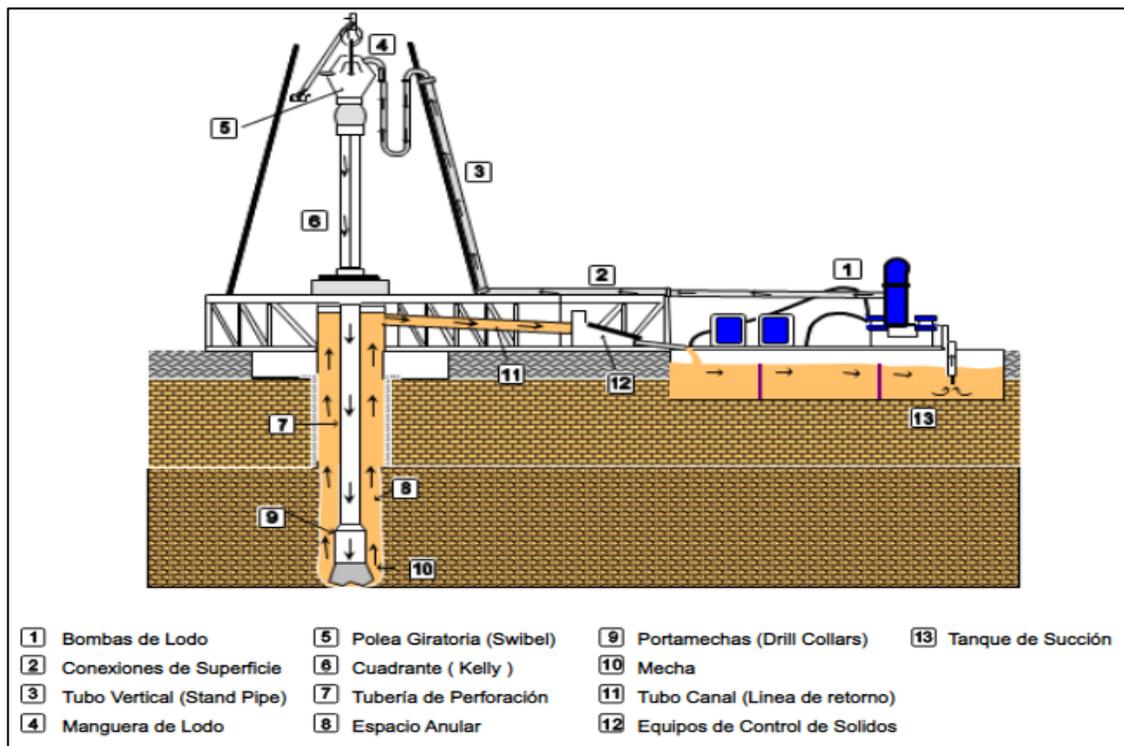
- La longitud del tramo de tubería afectado.
- La velocidad del fluido.
- El módulo de compresibilidad del material.
- La rapidez del cambio.

1.8.1 Perforación. Uno de los casos más críticos que pueden ocurrir en la perforación es el golpe de ariete en el circuito de lodos, puesto que podría causar el daño de la línea de descarga hasta la avería de la bomba afectando así completamente el proceso. Este fenómeno se presenta cuando se está llevando el proceso de succión de lodo y no se completa el llenado de la camisa del pistón generando así un golpe sobre el lodo el cual se propaga hacia la línea de descarga y hacia la bomba.

Este golpe contra el lodo se genera por problemas en el llenado de los pistones, lodo cortado con aire, empaques de la bomba desgastados y línea de succión obstruida.

En la **Figura 14** se observa las partes del circuito de lodo, cuyo ciclo consiste en que las bombas succionen lodo de los tanques para impulsarlos hacia la sarta de perforación.

Figura 14. Circuito de lodo.

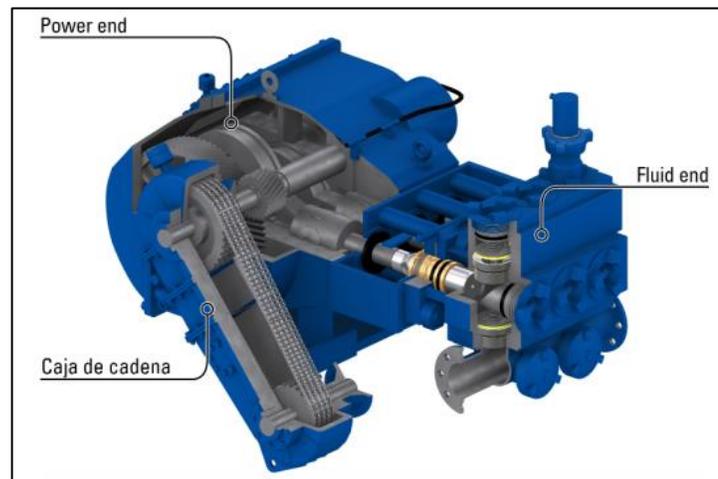


Fuente: POLANCO, Adelita. ASESORIA INMAROCA. El Taladro y sus Componentes. [Consultado el Feb 23,2019]. Disponible en: <https://slideplayer.es/slide/1025782/>. p. 45.

Debido a que el efecto de golpe de ariete se presenta en la mayoría de casos en las bombas de lodo, las cuales se encargan de transformar la energía mecánica suministrada y convertirla en energía hidráulica, es necesario que estas sean lo más ligeras y compactas posible; también que tengan fácil manejo y mantenimiento. Para ello, se emplean generalmente las bombas tríplex, las cuales según los manuales de la compañía Schlumberger¹⁴, presentan un funcionamiento recíproco debido a que poseen tres pistones encargados de realizar el bombeo, cuando los pistones realizan su movimiento de avance llevan a cabo el proceso de descarga y cuando retroceden se cargan de lodo en su camisa. No obstante, en su configuración también presentan tres válvulas de entrada y descarga y un amortiguador.

En la **Figura 15** se muestran los componentes principales de la bomba tríplex que son: la caja de cadena que es un reductor de velocidad que regula la velocidad de rotación de entrada, el *power end* encargado de convertir energía de rotación en energía de movimiento alternativo y el *fluid end*, el cual, recibe la energía del *power end* para transmitir potencia al fluido y descargarlo a alta presión.

Figura 15. Bomba tríplex.



Fuente: SCHLUMBERGER. JET Módulo 2 Bombas Tríplex. En: ACADEMIA. [En línea]. Recuperado en: 30 enero 2019. Formato archivo (pdf). Disponible en: https://www.academia.edu/33319171/Bombas_Triplex. p. 5

Como es evidente, no se puede permitir que ocurra golpe de ariete en el proceso de perforación dado que sería catastrófico tanto para el proceso como para la seguridad de los operarios. Por tal motivo, las bombas tríplex cuentan con un amortiguador llamado Dámper, el cual se encarga de mitigar al máximo este fenómeno. Este efecto puede originarse tanto en la succión como en la descarga

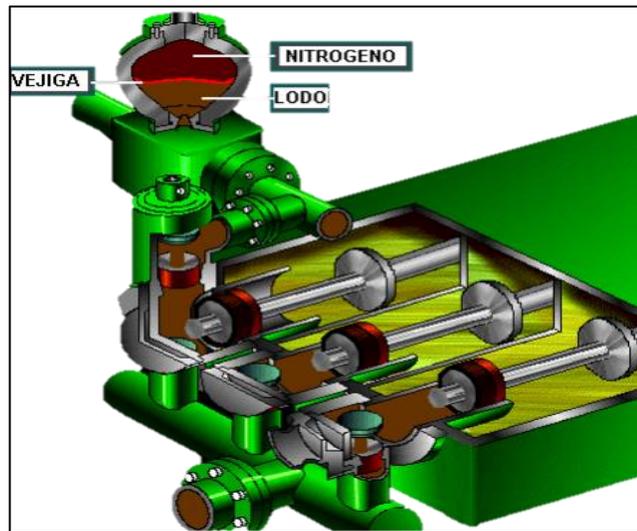
¹⁴ SCHLUMBERGER. JET Módulo 2 Bombas Tríplex. En: ACADEMIA. [En línea]. Recuperado en: 30 enero 2019. Formato archivo (pdf). Disponible en: https://www.academia.edu/33319171/Bombas_Triplex. p. 4.

por lo cual existen diversos tipos de amortiguadores; pero, el fin es el mismo, suavizar el golpe contra el lodo.

El ingeniero Luis Mendoza¹⁵ explica el funcionamiento de los principales dámpers empleados para amortiguar el golpe de ariete en las bombas de lodo, así:

1.8.1.1 Dámper de pulsación con nitrógeno. Como se presenta en la **Figura 16**, es un amortiguador de membrana dentro del cual se alojan nitrógeno presurizado y lodo, que se encuentra ubicado en la línea de descarga. La función de esta membrana es separar ambas sustancias dejando el nitrógeno en la parte superior y el lodo en la inferior, mientras que la del nitrógeno presurizado es crear resistencia y oponerse a las sobrepresiones generadas sobre el lodo evitando así las fluctuaciones que produzcan el golpe de ariete.

Figura 16. Dámper de pulsación con nitrógeno.



Fuente: MENDOZA, Luis. BOMBAS DE LODO. SCRIBD. [sitio web]. Recuperado en: 30 enero 2019. Formato archivo (pdf). Disponible en: <https://es.scribd.com/presentation/152066285/Bombas-de-Lodo-New>. p. 13

1.8.1.2 Dámper de pulsación. No posee membrana y consta de una esfera ubicada a la salida de la descarga, la cual posee cuatro pies de diámetro. Su gran tamaño permite absorber todas las fluctuaciones de presión que puedan llegar a ocasionar el golpe de ariete, como se muestra en la **Figura 17**.

¹⁵ MENDOZA, Luis. BOMBAS DE LODO. SCRIBD. [sitio web]. Recuperado en: 30 enero 2019. Formato archivo (pdf). Disponible en: <https://es.scribd.com/presentation/152066285/Bombas-de-Lodo-New>. p.12.

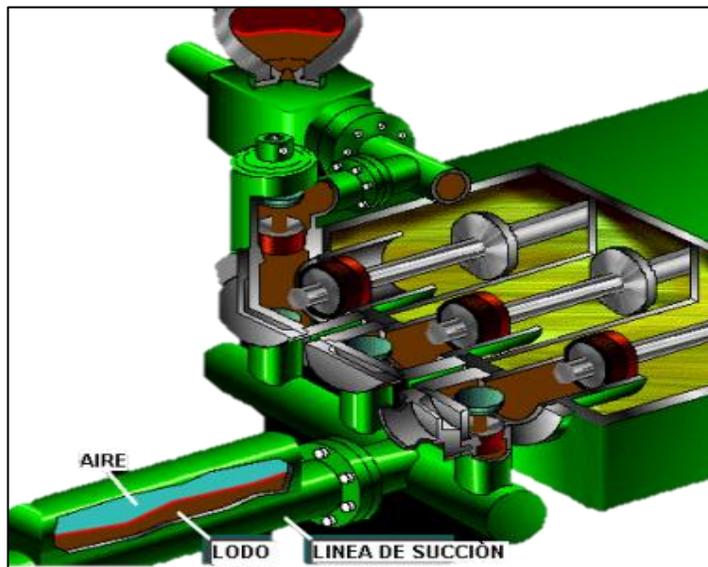
Figura 17. Dámper de pulsación.



Fuente: MENDOZA, Luis. BOMBAS DE LODO. SCRIBD. [sitio web]. Recuperado en: 30 enero 2019. Formato archivo (pdf). Disponible en: <https://es.scribd.com/presentation/152066285/Bombas-de-Lodo-New>. p. 15

1.8.1.3 Dámper en succión. Presentado en la **Figura 18** tiene como función suavizar el ingreso del lodo a la bomba y está constituido por una cámara dentro de la cual hay una vejiga llena de aire la cual funciona como amortiguador ante los rápidos movimientos de los pistones, evitando así el fenómeno de golpe de ariete.

Figura 18. Dámper en succión.



Fuente: MENDOZA, Luis. BOMBAS DE LODO. SCRIBD. [sitio web]. Recuperado en: 30 enero 2019. Formato archivo (pdf). Disponible en: <https://es.scribd.com/presentation/152066285/Bombas-de-Lodo-New>. p. 17

1.8.2 Producción. El golpe de ariete se ve reflejado en los pozos de inyección de agua en donde las tasas de inyección cada vez son más altas, estos golpes de ariete se generan cuando los pozos son cerrados rápidamente en repetidas ocasiones o por paros de emergencia, causando con el paso del tiempo grandes dificultades operativas; por tal motivo el ingeniero Tang¹⁶ menciona algunas como la reducción significativa de la inyectividad, el bloqueo de hidratos en pozos de inyección de agua submarina, cierre de pozos, pérdida de producción, deterioro de la estabilidad de la roca o hasta un reventón subterráneo.

En la industria petrolera, el golpe de ariete no se evidencia de igual forma que en un caso convencional de tuberías; por el contrario, en este caso este fenómeno se presenta con menor amplitud debido que la formación funciona como un amortiguador que absorbe el impacto. Este fenómeno en pozos y líneas de tuberías presenta un post-flujo con reducción de la presión de fondo de pozo (BHP) y de la tasa de flujo, luego se genera un contra-flujo que ocurre cuando la presión del yacimiento se hace mayor que la presión de fondo de pozo; por último, se reanuda el flujo cuando la presión de fondo de pozo empieza a aumentar. Este ciclo se repite, pero en cada etapa se generan pérdidas debido a la fricción existente.

Si el golpe de ariete no se controla a tiempo, puede resultar en un daño sustancial y quizás irreparable al sistema de producción.

Debido a estos acontecimientos se hace necesario tener en consideración el golpe de ariete para la selección y diseño de una terminación de pozos.

Para analizar el comportamiento del golpe de ariete en pozos de inyección de agua se analizaron tres estudios los cuales tratan sobre la apertura y cierre de pozos, la inyección en aguas profundas, y problemas operacionales por producción de arena respectivamente; así:

1.8.2.1 Apertura y cierre de pozos. La compañía Chevron Energy Technology Company estableció en su estudio titulado "A Dynamic Simulation Study of Water Hammer for Offshore Injection Wells To Provide Operation Guidelines"¹⁷ un análisis del golpe de ariete en una operación de inyección, en el cual se analizaron dos escenarios así:

- **Escenario 1.** En este escenario dos pozos están cerrados y el tercer pozo se mantiene abierto; en este la presión cambia debido a que la presión en el fondo del pozo es de 200 psi lo cual es mucho menor que la presión en la cabeza que es de 3400 psi. El tercer pozo que permanece abierto para la inyección experimenta una

¹⁶ TANG, Yula y OUYANG, Liang-Biao. A Dynamic Simulation Study of Water Hammer for Offshore Injection Wells to Provide Operation Guidelines. Beijing, China: Society of Petroleum Engineers, 2010. p. 179781-555632953. p. 520.

¹⁷ Ibid., p. 2.

mayor onda de presión aproximadamente de 450 psi; la duración de la inyección fue de un minuto. De este escenario se concluyen los siguientes aspectos:

- Un pozo de alta capacidad de inyección funciona como amortiguador para absorber el impacto del golpe de ariete.
- Si no existen pérdidas dentro del reservorio, la presión en el fondo del pozo aumentará desde el momento que se cierre este, causando un golpe de ariete convencional en el fondo del pozo.

• **Escenario 2.** En este escenario una bomba ubicada en el lado superior del pozo inyector, es detenida cuando se está realizando la inyección, incrementando la presión hasta 300 psi; A continuación se repite el mismo escenario utilizando a su vez, una válvula de seguridad con la cual se reduce la presión a 200 psi.

Las generalidades establecidas en este escenario se presentan a continuación:

- Si se retrasa el cierre de la válvula se generará un contra flujo que iniciará en el riser y luego esta caída de presión se propagará a los pozos de inyección a través de las líneas de tubería.
- Con la presencia de la válvula de retención ocurren tres etapas luego de detener la bomba así: un contra flujo en vista que el agua continúa fluyendo en el depósito; luego, existe un post-flujo o reflujo hacia la cabeza del pozo y por último el golpe de ariete que ocurre cuando el pozo siente el cierre de la válvula de retención.

1.8.2.2 Inyección en aguas profundas. El efecto del golpe de ariete en el diseño de pozos en operaciones de alta mar y producción no se ha tenido muy en cuenta, debido a que las líneas y tasas de flujo son más largas; sin embargo, un golpe de ariete demasiado alto podría generar daños en la formación.

Es indudable que siempre se deben buscar mecanismos y acciones que eviten al máximo la generación del golpe de ariete y en caso de que sea inevitable su origen es recomendable establecer parámetros y soluciones las cuales permitan mitigar al máximo las consecuencias de este fenómeno. Dentro de esta necesidad se deben establecer parámetros operacionales y de diseño los cuales permitan tener un estándar para estos casos.

Cabe resaltar que las causas y consecuencias del golpe de ariete variarán dependiendo al tipo de pozo y caso que se presente; pero, es posible brindar algunas alternativas y generalizar algunos fundamentos. Como en el caso del estudio realizado por los autores Choi y Huang titulado “Impact of Water Hammer in Deep Sea Water Injection Wells”¹⁸, los cuales determinan que en cuanto más

¹⁸ CHOI, Suk-Kyoon y HUANG, W. S. B. Impact of Water Hammer in Deep Sea Water Injection Wells. Denver, Colorado, USA: Society of Petroleum Engineers, 2011. p. 149781-613991473. p. 13.

profundo se está trabajando con inyección de agua en el mar, más propenso será el pozo a sufrir golpe de ariete; también, el golpe de ariete podría llegar a afectar la formación causando producción de arena y los parámetros para evaluar la producción de esta son el pulso de presión y la duración transitoria principalmente.

El tiempo de cierre de la válvula es la variable que más afecta el comportamiento del golpe de ariete y con el fin de reducirlo, existen parámetros operacionales como la reducción de la tasa de inyección, aumento del tiempo de cierre y aumento de la temperatura de inyección.

En cuanto los parámetros de diseño, se encuentran realizar la perforación de un pozo horizontal en lugar de uno vertical, aumento del diámetro del tubo y de la inyectividad, reducir la sección recta vertical del pozo y colocar la válvula tan profundo como sea posible.

1.8.2.3 Producción de arena. Cuando existen problemas operacionales como la producción de arena por intrusión de agua de inyección en una roca poco consolidada de la formación conductora, se generan obstrucciones en el fondo del pozo y en las líneas de flujo que provocan grandes presiones ocasionando el golpe de ariete. Este fenómeno amenaza la integridad del pozo, puesto que genera la finalización del completamiento, daños en la capa de arena y producción de la misma, lo cual es indeseable debido a que se reduce la permeabilidad y por consiguiente se pierde la capacidad de inyección.

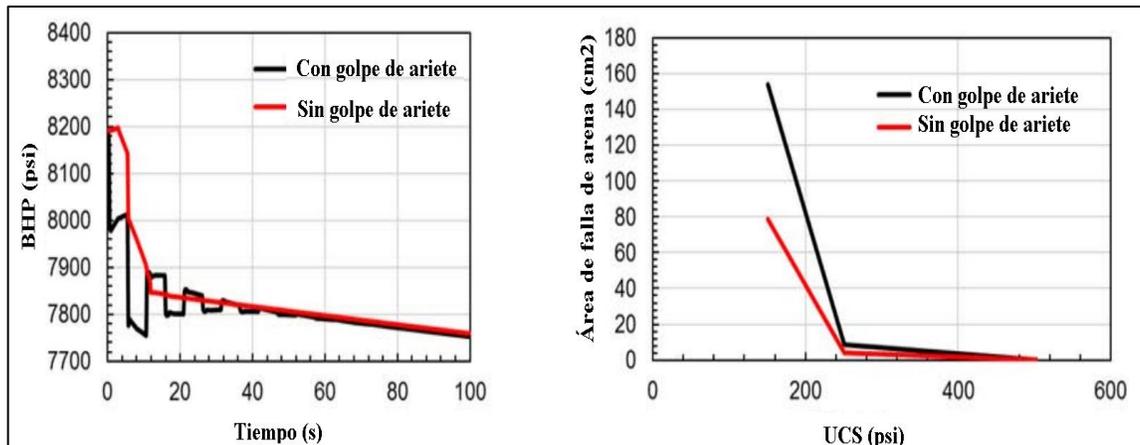
Esta problemática de producción de arena es de bastante interés y relevancia por lo cual, los ingenieros Wang, Hwang y Mukul de la Universidad de Texas en Austin realizan un artículo científico titulado “Sand Production Caused by Water Hammer Events: Implications for Shut-In protocols and Design of Water Injection Wells”¹⁹, en dicho artículo se analizaron los eventos del golpe de ariete que desencadenan en daños en el pozo y producción de arena en los inyectores. Los autores brindan condiciones en donde el golpe de ariete influye en la inyección del agua entre los cuales se destacan:

- El cierre rápido de una válvula de los inyectores de agua origina una fluctuación de sobrepresiones llamadas golpe de ariete.
- Cerca de la zona de falla habrá mayor probabilidad de golpe de ariete si la arena se encuentra no consolidada
- El flujo cruzado producido por el golpe de ariete origina una reducción de permeabilidad la cual causa variación en los gradientes de presión cerca al pozo.
- Rocas con esfuerzos compresivos no confinados o uniaxiales (UCS) son más propensas a sufrir los eventos del golpe de ariete.

¹⁹ WANG, Haotian; HWANG, Jongsoo y MUKUL, M. S. Sand Production Caused by Water Hammer Events: Implications for Shut-in Protocols and Design of Water Injection Wells. Lafayette, Louisiana, USA: Society of Petroleum Engineers, 2018. p. 159781-613995662. p. 14.

En la **Figura 19** se sintetiza cómo varía la presión de fondo de pozo (BHP) con respecto al tiempo y cómo se afecta la zona de arena que presenta falla versus los esfuerzos compresivos no confinados o uniaxiales de la roca (UCS) en acontecimientos donde se presenta el golpe de ariete; mostrando que, el BHP presenta un comportamiento ondulatorio cuando existe presencia del fenómeno del golpe de ariete y luego de aproximadamente 60 segundos este se estabiliza; por otro lado, el área de falla de arena será mayor cuando se presenta el golpe de ariete para un mismo valor de esfuerzo UCS.

Figura 19. Fluctuación de BHP y zona de arena con golpe de ariete.



Fuente: WANG, Haotian; HWANG, Jongsoo y MUKUL, M. S. Sand Production Caused by Water Hammer Events: Implications for Shut-in Protocols and Design of Water Injection Wells. Lafayette, Louisiana, USA: Society of Petroleum Engineers, 2018. p. 14. Modificado por los autores.

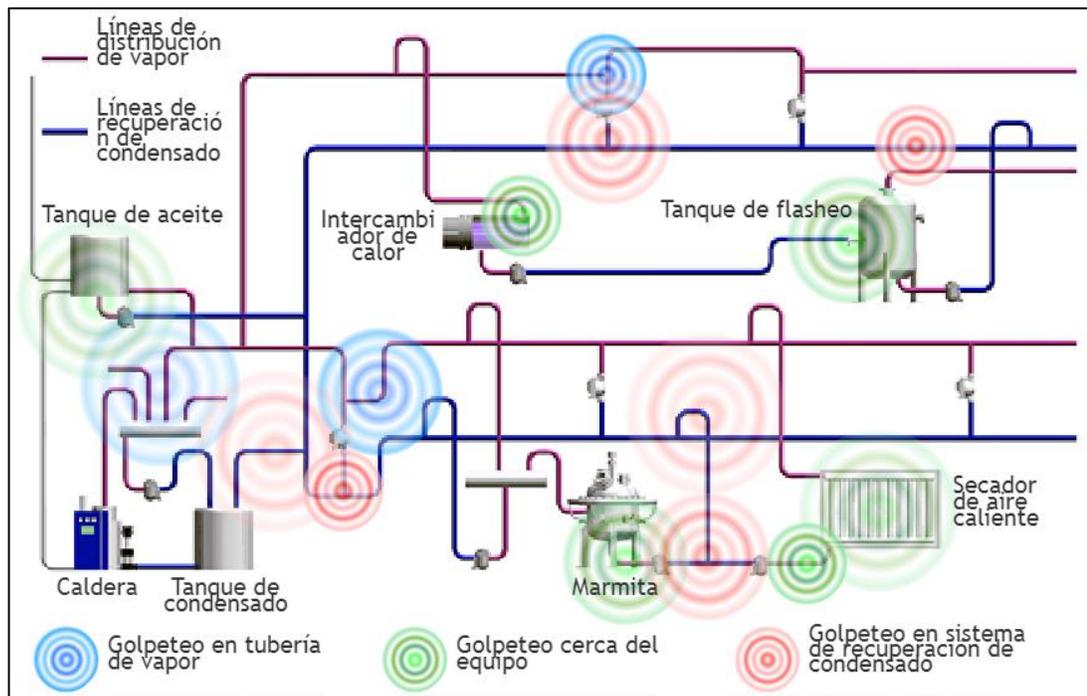
1.8.3 Facilidades de Producción. En esta área el golpe de ariete se observa en las tuberías de transporte de condensado y por el fallo de energía en las bombas del sistema de bombeo respectivamente así:

1.8.3.1 Tubería de transporte de Condensado. La compañía TLV²⁰ expone que el golpe de ariete en los gases o *steam hammer* puede presentarse en las líneas de distribución de vapor y de recuperación de condensado al igual que en los equipos por la interacción dual del condensado de baja temperatura y el vapor flash de alta temperatura.

En la **Figura 20** se presenta las principales tuberías y equipos donde ocurre el golpe de ariete.

²⁰ TLV. Golpe de Ariete en Líneas de Distribución de Vapor. [Consultado el Mar 21,2019]. Disponible en: <https://www.tlv.com/global/LA/steam-theory/waterhammer-steam-distribution-lines.html>

Figura 20. Golpe de ariete en equipos y tuberías de las facilidades.



Fuente: TLV. Qué es el Golpe de Ariete/Ariete Hidráulico? [Consultado el Mar 21,2019]. Disponible en: <https://www.tlv.com/global/LA/steam-theory/what-is-waterhammer.html>

No obstante, la compañía TLV en su documento titulado “Golpe de Ariete en Tubería de Recuperación de Condensado”²¹ afirma que este fenómeno ocurre en las uniones de las líneas de recuperación de condensado que presentan grandes diferenciales de presión o en puntos cercanos en donde estas líneas se unen a un tanque de flasheo; debido a la condensación de repentina del vapor en estas líneas.

También, en dicho documento se afirma que los tres mecanismos más comunes de ocurrencia de golpe de ariete son debido a:

- **Contra flujo.** Inducido por un flujo pulsante de condensado de baja temperatura en la tubería de recuperación, una estrategia para evitar este fenómeno es la instalación correcta de una válvula check.
- **Grandes bolsas de vapor.** En este mecanismo el golpe de ariete se ocasiona cuando el condensado y el vapor fluyen en la misma dirección, formando bolsas de vapor de gran tamaño. Para mitigar este fenómeno se recomienda mantener un tamaño pequeño de las bolsas de vapor, conectar el vapor una línea diferente, evitar

²¹ TLV. Golpe de Ariete en Tubería de Recuperación de Condensado. [Consultado el Mar 21,2019]. Disponible en: <https://www.tlv.com/global/LA/steam-theory/waterhammer-condensate-transport-piping.html>

el contacto de flujo horizontal entre las tuberías de vapor de alta temperatura y las líneas de condensado de baja temperatura.

- **Golpeteo.** Cuando se unen las dos líneas de recuperación y no hay formación de grandes bolsas de vapor, este se condensará rápidamente generando impactos cíclicos a gran velocidad (golpeteos), que desencadenarán en la formación de golpe de ariete.

Para evitar este fenómeno, se sugiere hacer unos agujeros pequeños al final de la tubería para que el vapor forme burbujas al mezclarse, e instalar un silenciador de tubería que contenga el vapor flash, ya que el condensado no puede ser removido.

Es importante destacar que el golpe de ariete provocado en las líneas de recuperación de condensado y de distribución de vapor se clasifica de la siguiente forma:

- **Golpe de Ariete ocasionado por condensado a alta velocidad.** Debido a las pérdidas de calor por radiación se forma condensado dentro de la tubería de transporte de vapor, haciendo que el vapor viaje a altas velocidades y arrastre el condensado formando olas que posteriormente se transforman en proyectiles de condensado que generan el golpe de ariete.²²

- **Golpe de Ariete Ocasionado por la Repentina Condensación del Vapor.** Ocurre con mayor frecuencia, puesto que en el proceso de condensación las olas de condensado sucumben al vacío y chocan unas con otras porque el espacio ocupado por el vapor se convierte momentáneamente en vacío y el condensado dentro de la tubería pierde hacia este vacío.²³

El golpe de ariete dentro de los equipos, según la compañía TLV, ocurre durante la operación por un alto nivel de acumulación del condensado. Como es el caso del intercambiador de calor de carcasa y de tubos que cuando suministra vapor a un área que tiene un alto nivel de condensado y este se condensa instantáneamente origina pequeños impactos de sedimentos por un corto periodo de tiempo, a diferencia de los impactos violentos que se ocurren en las líneas de distribución. Sin embargo, si este golpe de ariete de pequeños sedimentos se permite que continúen por largos periodos de tiempo podría debilitar el equipo haciendo que se fracture repentinamente²⁴.

²² TLV. Golpe de Ariete: El Mecanismo. [Consultado el Mar 21,2019]. Disponible en: <https://www.tlv.com/global/LA/steam-theory/waterhammer-mechanism.html>

²³ Ibid., p.1

²⁴ TLV. Golpe de Ariete en Equipo. [Consultado el Mar 21,2019]. Disponible en: <https://www.tlv.com/global/LA/steam-theory/waterhammer-equipment.html#>

1.8.3.2 Sistema de bombeo. Cuando ocurre un fallo de energía en las bombas que suministran agua a la línea de descarga en el sistema de bombeo se genera una onda de presión negativa la cual puede causar la separación de la columna de agua. El golpe de ariete que ocurre luego de la desconexión de las bombas da origen a sobrepresiones que amenazan el bienestar de la tubería; por tal motivo es necesario contar con mecanismos de control como es el caso de las chimeneas de equilibrio, válvulas de retención y la más eficaz, las cámaras de aire. Estos, se encargan de eliminar las presiones negativas y mantener constante la presión positiva; pero, se debe tener minucioso cuidado a la hora de diseñarlos, puesto que al contener aire este se puede expandir con una fuerza explosiva generando así burbujas en el agua produciendo cavitación.

El sistema de bombeo no puede funcionar en condiciones de estado estable todo el tiempo en vista que existen diversos factores que varían las condiciones de flujo llevándolo a un transitorio. Esto se genera por la puesta en marcha y parada de una bomba individualmente, así como cuando otras se encuentren en funcionamiento, daños de energía o eléctricos en la bomba, cierre espontaneo de una válvula de retención y variaciones del nivel de agua de entrada.

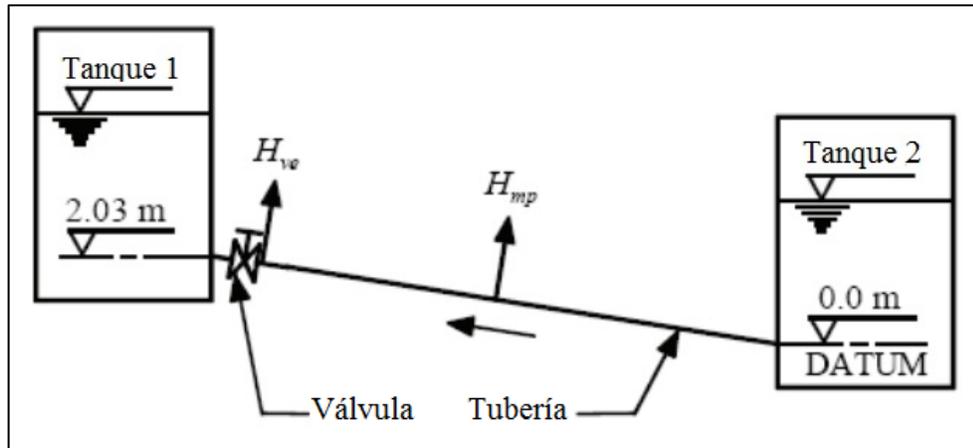
Por tal motivo, los ingenieros Medhi y Ebrahim en su artículo titulado “Study on Mechanism and Control Methods of Water Hammer in Pump Station and Pipe Lines”²⁵ proponen un caso de estudio de golpe de ariete generado en el punto medio de la tubería de un sistema de bombeo por el cierre de una válvula estableciendo los siguientes parámetros:

- Tubería en cobre con longitud de 37,2 m, diámetro interno de 22 mm y espesor de 1,6 mm.
- Velocidad de flujo de 0,2 m/s.
- Cabeza estática en el tanque 2 de 32 m.
- Tiempo de cierre de 0,009 s.
- Celeridad de 1319 m/s.

El experimento se esquematiza en la **Figura 21**:

²⁵ ASADINIAZI, Mehdi y SARBAND, Ebrahim Mokallaf. Study on Mechanism and Control Methods of Water Hammer in Pump Station and Pipe Lines. Beijing, China: International Society of Offshore and Polar Engineers, 2010. p. 6

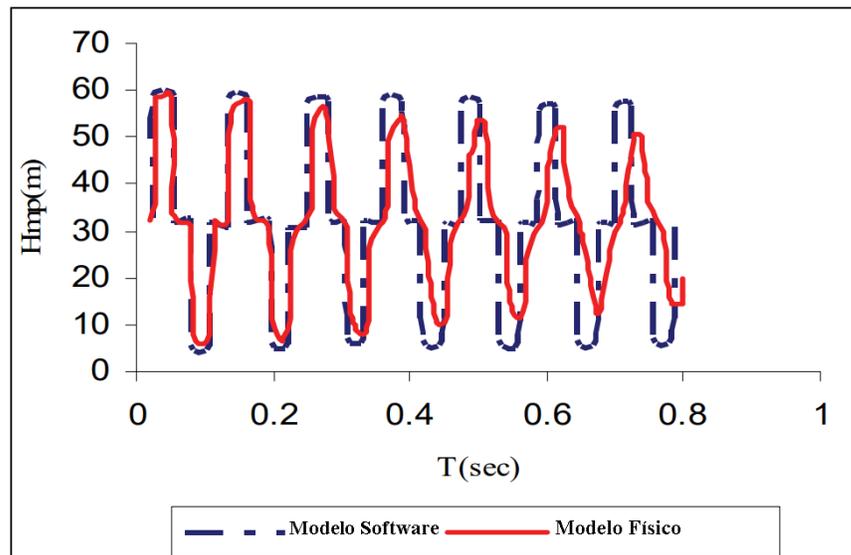
Figura 21. Caso de estudio experimental en líneas de tubería.



Fuente: ASADINIAZI, Mehdi y SARBAND, Ebrahim Mokallaf. Study on Mechanism and Control Methods of Water Hammer in Pump Station and Pipe Lines. Beijing, China: International Society of Offshore and Polar Engineers, 2010. p. 278. Modificado por los autores.

Utilizando el software Hammer V8 Xm se logran validar los resultados obtenidos a partir de la teoría clásica del golpe de ariete de Allievi y Michaud resuelto por el método de las características; obteniendo así en la **Figura 22** la siguiente gráfica en la cual se observa la fluctuación de presión alrededor del punto de referencia que eran 32 metros de presión.

Figura 22. Cambio de presión vs tiempo.



Fuente: ASADINIAZI, Mehdi y SARBAND, Ebrahim Mokallaf. Study on Mechanism and Control Methods of Water Hammer in Pump Station and Pipe Lines. Beijing, China: International Society of Offshore and Polar Engineers, 2010. p. 279. Modificado por los autores.

El estudio permite determinar que el software tiene un porcentaje de validez del 96% el cual es una cifra bastante alta. Este valor servirá de punto de referencia a la hora de realizar simulaciones de golpe de ariete en el software escogido para este proyecto de grado (Aspen Hysys).

1.8.4 Transporte de Fluidos. El golpe de ariete puede ocasionarse en sistemas de transporte de hidrocarburos y derivados tales como: “oleoductos, líneas troncales desde pozos de producción hasta centros de procesamiento, líneas de crudo o derivados desde plantas de proceso hasta patios de almacenamiento o en líneas de carga desde buques a tanques de almacenamiento y viceversa”²⁶.

El fenómeno de golpe de ariete se manifiesta en esta área, cuando el fluido que se mueve por el sistema a una velocidad determinada, presenta un paro abrupto que corta el paso, debido al cierre de una válvula, generando que el fluido más próximo a la válvula se detenga y sea empujado por el fluido que viene detrás; y por efectos de la compresibilidad del fluido, se formará una onda de compresión que inicia en las proximidades de la válvula cerrada y que se trasladará hasta el origen.

Para disminuir la ocurrencia del golpe de ariete en las estaciones de embarque de petróleo, las cuales son sistemas prominentes de tuberías de gran tamaño y longitud, conectadas con varios equipos de bombeo en paralelo; se emplean bombas centrifugas acopladas a motores eléctricos de velocidad variable.

Un ejemplo de esta forma de atenuación del golpe de ariete, es el estudio realizado por los ingenieros Molina, Murga y Ciappina²⁷, los cuales analizaron la forma de disminuir el golpe de ariete a través de las ecuaciones de Allievi, para los equipos de bombeo de la estación de embarque de petróleo ubicada en Caleta Cordova, la cual constaba de cuatro bombas centrifugas donde una funcionaba como respaldo. Para su estudio variaron la cantidad de bombas en funcionamiento para determinar con qué número mínimo se solucionaba el golpe de ariete; para ello, propusieron las siguientes suposiciones:

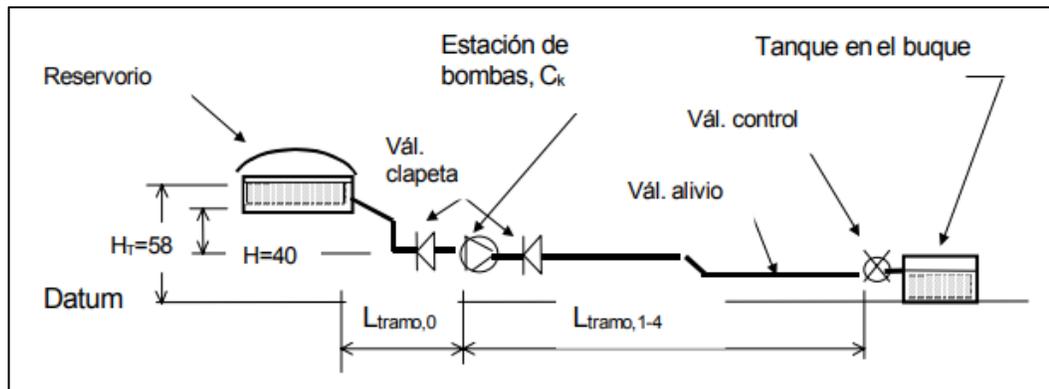
- El coeficiente de rozamiento es constante.
- El reservorio posee nivel constante.
- Se asume que la deformación es elástica en las tuberías.

En la **Figura 23** se observa el arreglo que se utilizó para el estudio del golpe de ariete en estaciones de embarque; en donde se establece la ubicación del reservorio, tanque, bomba, dimensión de tuberías y cantidad de órganos de control.

²⁶ FIGUERA, Mariby. WATER HAMMER TOP TEN, Op. cit., p 9

²⁷ MURGA, Néstor D.; MOLINA, Norberto E. y CIAPPINA, Marcelo. Atenuación Del Golpe De Ariete En Estaciones De Elevación De Petróleo, Mediante El Uso De Bombas De Velocidad Variable. 1999. p. 5.

Figura 23. Descripción de instalación de embarque de petróleo.



Fuente: MURGA, Néstor D.; MOLINA, Norberto E. y CIAPPINA, Marcelo. Atenuación Del Golpe De Ariete En Estaciones De Elevación De Petróleo, Mediante El Uso De Bombas De Velocidad Variable. 1999. p. 5

Luego de realizar el estudio se determinó que una bomba no es suficiente para solucionar el golpe de ariete, para ello deberá funcionar a un caudal menor al requerido; también, se sugirió instalar protección a las bombas por medio de válvulas tipo by-pass con el fin de no generar un giro inverso en estas.

Por último, se evidenció que el cierre rápido de la válvula de control genera un flujo inverso o de retorno, el cual genera un aumento de presión considerable; por lo cual es necesario realizar un óptimo diseño y selección de tuberías y accesorios para que su material tenga la resistencia mecánica dentro de los límites permitidos.

1.8.5 Análisis y verificación. Debido al alcance de la industria petrolera se puede trabajar con fluidos líquidos o gases. El golpe de ariete no solo ocurre en fluidos líquidos, también se evidencia en los gases llamándose en este último *steam hammer* y hace referencia al choque hidráulico de vapor y condensado. Ambos son igual de importantes y requieren de seguimiento y control para evitar daños catastróficos.

Es necesario realizar cálculos cerca del área donde ocurre el golpe de ariete en las líneas y tener en cuenta estos parámetros en el diseño de redes de tuberías como dicta la norma ANSI/ASME B31.

1.8.5.1 Parámetros de diseño. Con base en los parámetros de diseño de redes, la empresa C&F Engineering²⁸ propone 3 tipos de evaluaciones para las variaciones de presión que ocasionan golpe de ariete, las cuales se acomodan a las condiciones dadas en cada caso.

²⁸ FIGUERA, Mariby. Evaluaciones hidrodinámicas en sistemas de tuberías golpe de ariete y steam hammer. [En línea]. Recuperado en: 01 febrero 2019. Formato archivo (pdf). Disponible en: <http://cyf-eng.com/pdf/boletines/CF-BT-TUB-001.pdf>. p. 6.

- **Evaluación hidrodinámica.** Se realiza sobre las condiciones de operación simulando la geometría de los arreglos mecánicos.

- **Evaluación hidráulica.** Consiste en calcular las variaciones de presión respecto al tiempo con el fin de construir un perfil de presiones. Con esto se determina puntos donde se generan sobrepresiones para así poder tomar acciones correctivas. En esta evaluación se estudia el régimen estacionario y el régimen transitorio. En el primero se miden las máximas presiones y caudales a las cuales se está trabajando y en el segundo se varían las condiciones de presión mediante una válvula.

- **Evaluación de esfuerzos.** Es necesario realizar este estudio para poder garantizar la estabilidad mecánica del sistema ante un evento intempestivo del golpe de ariete. El parámetro de análisis de esta evaluación es la celeridad.

1.8.5.2 Normatividad. En la Norma ANSI/ASME B31²⁹ aparecen los parámetros de diseño de redes de tuberías en refinerías, petroquímicas y campos de operación dentro de los artículos siguientes:

- **ANSI/ASME B31.3.** Establece que ciertas tuberías pueden operar en caso de un incremento del 20 a 33% de su esfuerzo admisible.

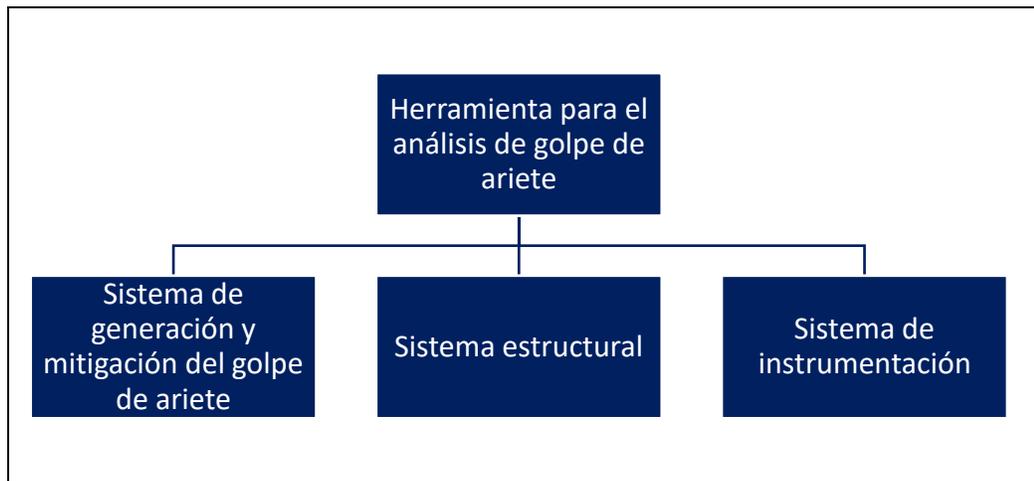
- **ANSI/ASME B31.4.** Indica que deben hacerse cálculos de ondas de presión por cambios de velocidad de flujo debido a detención de unidades de bombeo, cierre de válvulas o bloqueo de fluidos; además, deben proveerse controles y equipo para que la presión interna no superé un 10% en ningún equipo.

²⁹ Engineering ToolBox, (2003). ASME B31 - Pressure Piping. [online]. Recuperado en: 01 febrero 2019. Disponible en: https://www.engineeringtoolbox.com/asme-b31pressure-piping-d_39.html.

2. REQUERIMIENTOS Y PARÁMETROS DE DISEÑO

Una fase indispensable en la metodología del diseño mecánico es la definición de requerimientos y parámetros que son todas aquellas condiciones, factores y limitaciones establecidas por el proceso, que deben ser tenidas en cuenta con el fin de garantizar el óptimo funcionamiento de la máquina, así como la satisfacción del cliente. Teniendo en cuenta lo anteriormente mencionado, se procedió a dividir la herramienta de análisis del golpe de ariete en tres sistemas como se muestra en el **Diagrama 1**.

Diagrama 1. Sistemas de la herramienta de golpe de ariete.



Fuente: elaboración propia.

2.1 REQUERIMIENTOS FUNCIONALES

A continuación, se explican los requerimientos para cada uno de los sistemas que conforman la herramienta:

2.1.1 Sistema de generación y mitigación del golpe de ariete. Este subsistema está enfocado en garantizar el sistema hidráulico para abastecer la herramienta y el conjunto de componentes para crear las fases de generación y mitigación de golpe de ariete.

2.1.1.1 Mecanismo de generación de golpe de ariete. Como primera fase de aplicación de la herramienta, se debe generar un golpe de ariete en condiciones contraladas con el fin de evitar daños en los elementos del conjunto; así como, posibles accidentes durante la práctica de laboratorio.

2.1.1.2 Mecanismo de mitigación de golpe de ariete. Se debe contar con un mecanismo que permita mitigar el golpe de ariete como una segunda fase de

aplicación de la herramienta. Este mecanismo debe estar inactivo durante la primera fase permitiendo así evidenciar el golpe de ariete en primera instancia.

2.1.2 Sistema de instrumentación y control. La finalidad de este subsistema es definir aquellos elementos de medición y control con los que contara la herramienta.

2.1.2.1 Manipulación automática de la válvula. El golpe de ariete es un fenómeno indeseable que trae consigo consecuencias tanto para el proceso como para la seguridad de los operarios. Al ser una herramienta de laboratorio se deben garantizar que las condiciones mínimas de operación y seguridad se cumplan. Con el fin de crear un golpe de ariete “controlado” es necesario que la válvula que se encuentre al final de la tubería de descarga sea neumática; esto, con el fin de tener un tiempo de parada exacta y así evitar tanto errores por manipulación humana, como un posible accidente por la fluctuación de la tubería. Cabe resaltar que el golpe de ariete no será de gran riesgo debido a la escala que se va a realizar; pero, es necesario tomar medidas de prevención.

2.1.2.2 Transmisor de presión. Se hace necesario contar con un elemento de medición de presión el cual permita observar y registrar la fluctuación de presión existente en el instante del cierre abrupto de la válvula. Este sensor deberá estar ubicado en la tubería de descarga la cual es la línea de análisis.

2.1.3 Sistema estructural. Hace referencia al soporte estructural sobre el cual estará ubicada la herramienta para el análisis de golpe de ariete, teniendo en cuenta limitante de ubicación y tamaño para su diseño.

2.1.3.1 Ubicación. Este proyecto está orientado y dirigido para cualquier laboratorio de mecánica de fluidos, el cual desee poseer en su listado de equipos una herramienta para análisis de golpe de ariete. Hay que señalar, que con el fin de poder determinar algunos parámetros se tomará como referencia la Fundación Universidad de América, por lo cual, su ubicación teórica será el laboratorio de mecánica de fluidas de dicha institución.

2.1.3.2 Fácil mantenimiento. Al ser este un equipo para laboratorio debe garantizarse el óptimo funcionamiento de sus piezas; por tal motivo es de vital importancia contar con una estructura que permita el fácil acceso a los componentes de la herramienta. Con esto se busca ahorrar tiempo que se invierte en desmontar la herramienta y aumentar la disponibilidad de la misma.

En el **Cuadro 1**, se encuentran sintetizados, los principales requerimientos funcionales que se deben de tener en cuenta, para cada uno de los sistemas que conforman la herramienta de análisis del golpe de ariete.

Cuadro 1. Requerimientos funcionales.

CONCEPTO	DESCRIPCIÓN
<p style="text-align: center;">SISTEMA DE GENERACIÓN Y MITIGACIÓN DEL GOLPE DE ARIETE</p>	<p>Crear en condiciones controladas el fenómeno de golpe de ariete en tubería recta.</p>
	<p>Evidenciar la disminución del golpe de ariete en tubería recta mediante un dispositivo de mitigación.</p>
	<p>Las dos funciones que realiza la máquina se deben evidenciar de forma independiente para evitar que una etapa afecte la otra.</p>
<p style="text-align: center;">SISTEMA DE INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL</p>	<p>Poseer un dispositivo de medición de presiones que no se vea afectado por el golpe de ariete.</p>
	<p>Contar con una válvula electromagnética ubicada al final de la tubería de descarga que se encargará de generar el golpe de ariete.</p>
	<p>Presentar la gráfica de presión vs tiempo desde el instante que ocurre el golpe de ariete.</p>
<p style="text-align: center;">SISTEMA ESTRUCTURAL</p>	<p>La estructura de la herramienta debe soportar las presiones y vibraciones que se generen con el fin de evitar desajustes en el montaje.</p>

Fuente: elaboración propia.

2.2 PARÁMETROS DE DISEÑO

Con el fin de poder delimitar el rango de operación y alcance de la herramienta se procedió a determinar los parámetros de diseño que caracterizan el funcionamiento de la misma; tal y como se muestra a continuación:

2.2.1 Fluido de análisis. El fluido de análisis que se utilizará en la herramienta es agua; debido a que sus propiedades permiten que el fenómeno se pueda evidenciar; a diferencia de otros fluidos como aceites o glicerinas donde las mismas propiedades como viscosidad y densidad impiden que para fines prácticos la onda de presión de golpe de ariete viaje a través del medio. Resaltando que, un factor determinante a la hora de seleccionar agua como fluido de análisis fue que, dentro del área de producción, la operación donde más se veía implicado el fenómeno de golpe de ariete era la inyección de agua en pozos.

Las propiedades del fluido de análisis corresponden a las condiciones presentes en Bogotá las cuales se enuncian en el **Cuadro 2**.

Cuadro 2. Propiedades ambientales.

Propiedad	Valor
Temperatura ambiente (°C)	18
Presión atmosférica (mmHg)	560
Densidad del agua (kg/m ³)	998,8

Fuente: elaboración propia con base en. Accuweather. Recuperado de: <https://www.accuweather.com/es/co/bogota/107487/current-weather/107487> [citado el 20 de febrero de 2019]

2.2.2 Tamaño y dimensiones. Este requerimiento tomará como referencia las dimensiones disponibles en el laboratorio de mecánica de fluidos de la universidad de América con el fin de establecer el tamaño que puede ocupar la herramienta. Para esto se realizó el correspondiente levantamiento del plano estructural de este laboratorio el cual se encuentra en el **ANEXO D**.

2.2.3 Rango de velocidades. Las condiciones con las cuales se va a operar la herramienta serán definidas bajo el criterio de condiciones óptimas de operación del agua en donde el parámetro a evaluar es la velocidad, la cual no debe superar el valor de 5m/s para tuberías tanto de acero como PVC.³⁰ No obstante, el material de la tubería de análisis será PVC, mientras que las tuberías que están conectadas al tanque de cabecera estarán fabricadas de acero.

Cuadro 3. Condiciones óptimas de operación del agua.

Material de la tubería	Velocidad máxima permisible (m/s)
Concreto simple hasta 0,45 m de diámetro	3,0
Concreto reforzado de 0,60 m de diámetro o mayor	3,5
Fibro-cemento	5,0
Acero Galvanizado	5,0
Acero sin revestimiento	5,0
Acero con revestimiento	5,0
Polietileno de alta densidad	5,0
PVC (policloruro de vinilo)	5,0

Fuente: VALDEZ, Enrique Cesar. Abastecimiento De Agua Potable. 1a ed. UNAM, 1990. p. 138. Modificado por los autores.

³⁰ VALDEZ, Enrique Cesar. Abastecimiento De Agua Potable. 1a ed. UNAM, 1990. p. 138

2.2.4 Rango de presiones. Con el fin de establecer las presiones bajo las cuales operará la herramienta se hará uso de la ecuación de Bernoulli. Esto, se llevará a cabo en el diseño detallado de la herramienta cuando se establezcan las dimensiones de la misma.

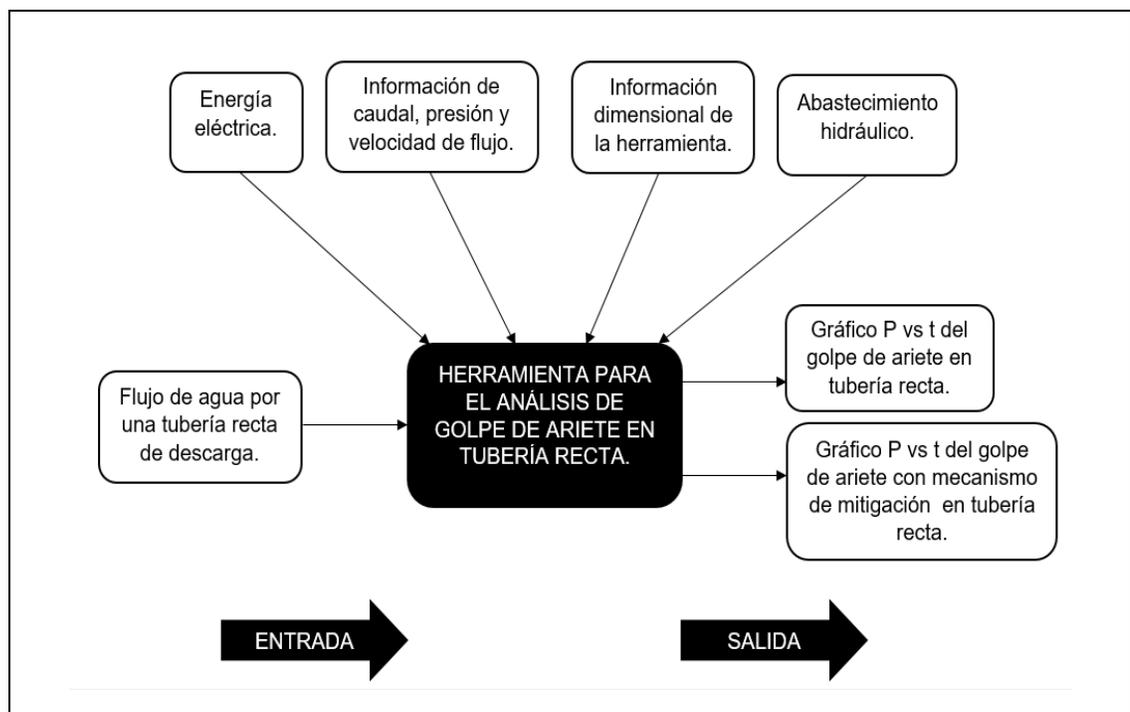
3. DISEÑO CONCEPTUAL DE LA HERRAMIENTA

La fase conceptual del diseño es una etapa imprescindible con la cual se logra sintetizar los requerimientos y parámetros en funciones claras generando así alternativas de solución a la necesidad establecida por el cliente con el fin de escoger la mejor de ellas.

De acuerdo a lo anteriormente mencionado, el doctor Cabrales, siguiendo con la metodología de Pahl y Beitz, afirma sobre la fase conceptual lo siguiente: “consiste en la determinación de las funciones: primero la función global y luego las sub-funciones más importantes que el producto diseñado deberá cumplir. La clasificación y combinación de estas sub-funciones en estructuras funcionales, fomenta una base para la búsqueda de soluciones a la función global”³¹.

Por tal motivo, con el fin de definir la función global de la herramienta, se hará uso de la metodología de la caja negra de funciones, en donde se destacaron los siguientes aspectos evidenciados en el **Diagrama 2**.

Diagrama 2. Caja negra de funciones.

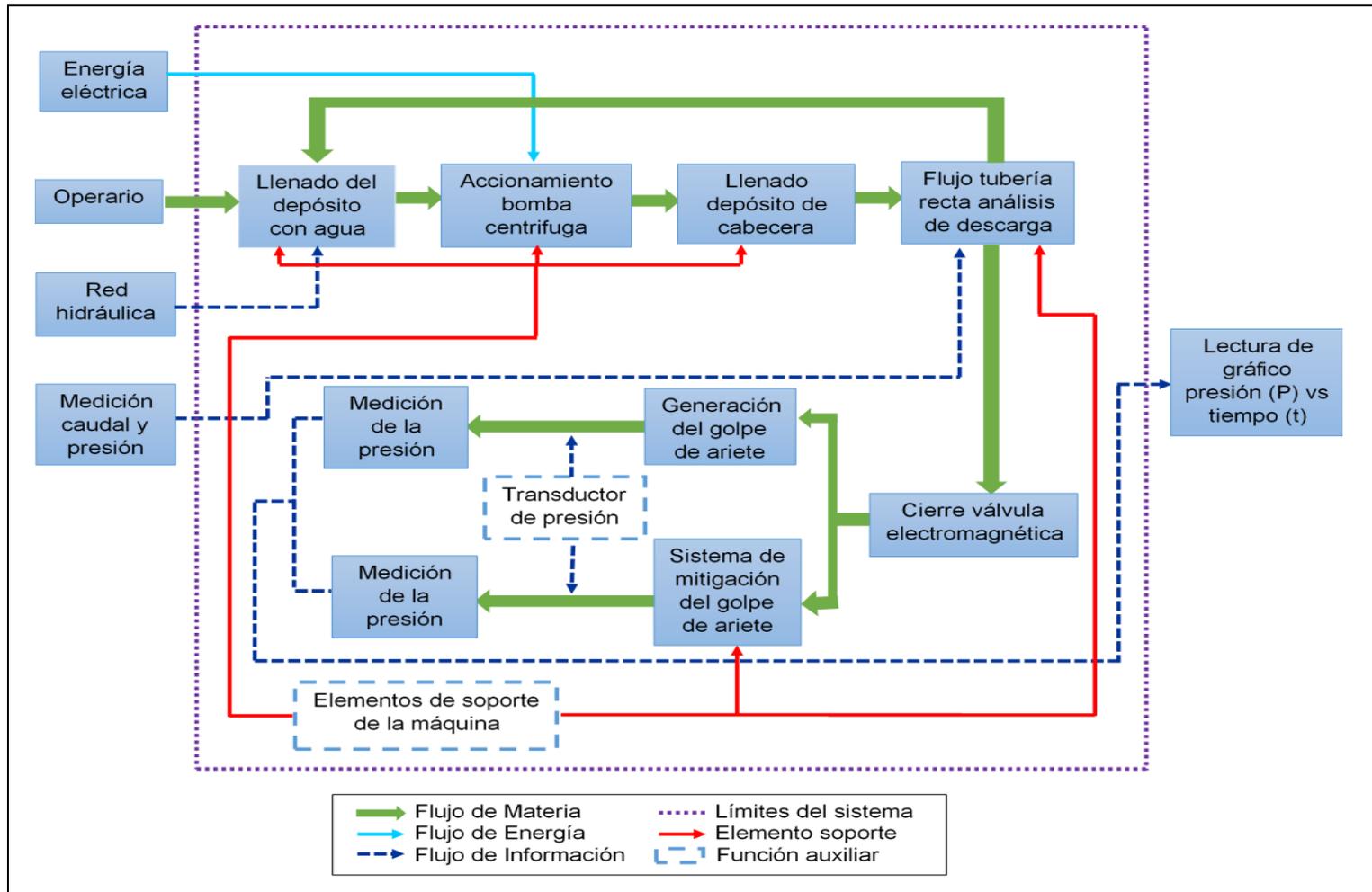


Fuente: elaboración propia.

³¹ ALVAREZ, Alexis. MÉTODO PARA EL DISEÑO CONCEPTUAL MECÁNICO BASADO EN LA TRAZABILIDAD DE LOS REQUERIMIENTOS FUNCIONALES Tesis Presentada En Opción Al Grado Científico De Doctor En Ciencias Técnicas Agropecuarias. 2016.

Ya establecida la función global de la herramienta; se definen las sub-funciones que esta deberá realizar. Estas sub-funciones están representadas en el **Diagrama 3**, así:

Diagrama 3. Flujo esquemático de sub-funciones de la herramienta de golpe de ariete.



Fuente: elaboración propia.

La función principal de la herramienta es analizar el fenómeno del golpe de ariete tanto en su generación como en su mitigación. Para esto, la herramienta cuenta inicialmente con un depósito de agua de donde se realizará la etapa de succión, seguido a esto se encontrará una bomba con la cual se llevará a cabo la impulsión del fluido que es agua. En primera instancia, este fluido llegará a un tanque de cabecera el cual deberá tener un nivel de fluido constante; se hará uso de un tanque de cabecera teniendo en cuenta que, como se mencionó en capítulos anteriores, el modelo de análisis que se utilizó para estudiar el fenómeno de golpe de ariete está dado por sistema de conducción de gravedad, en donde es un requisito que el nivel permanezca constante con el fin de que se tenga un punto de referencia sobre el cual oscilará la onda de presión generada como consecuencia de este fenómeno.

Por tal motivo, para que el nivel de agua permanezca constante antes de que este pase a la tubería de análisis, es necesario contar con un control de nivel que se realizará mediante válvulas de accionamiento manual; con esto, se hallarán volúmenes de control para poder determinar el nivel del tanque para diferentes aperturas de válvula. Luego de garantizar esta condición, el fluido pasará a la tubería recta de análisis la cual desembocará en el depósito teniendo así recirculación de agua con el fin de evitar desperdicios; no obstante, en esta tubería estará ubicada una válvula electromagnética al final de su recorrido la cual es la encargada de generar el golpe de ariete. Esta válvula es de tipo electromagnética con el fin de tener un tiempo de cierre preestablecido evitando así la manipulación humana que puede dar origen a errores en práctica. En esta tubería ocurren dos etapas; la primera etapa consiste en la generación del golpe de ariete con el fin de analizar el comportamiento de este fenómeno observando las sobrepresiones y la onda generada; en la segunda etapa, se observará como este fenómeno se mitiga con la presencia de un mecanismo de amortiguamiento.

Como se estableció en los requerimientos, estas etapas se deben observar por separado. Con el fin de observar los gráficos de presión es necesario contar con un componente de medición; es importante aclarar, que este dispositivo no se debe ver afectado por las consecuencias que trae este fenómeno transitorio sin contar que debe registrar los picos de presión en un periodo de tiempo siguiente al cierre de la válvula; por tal motivo se hará uso de un transductor de presión el cual estará ubicado en la tubería de análisis con lo cual se analizará el fenómeno en ambas etapas.

3.1 ALTERNATIVAS

Teniendo en cuenta el funcionamiento conceptual y los requerimientos anteriormente establecidos de la herramienta se procede a plantear las alternativas de solución para poder analizar el fenómeno de golpe de ariete en tubería recta.

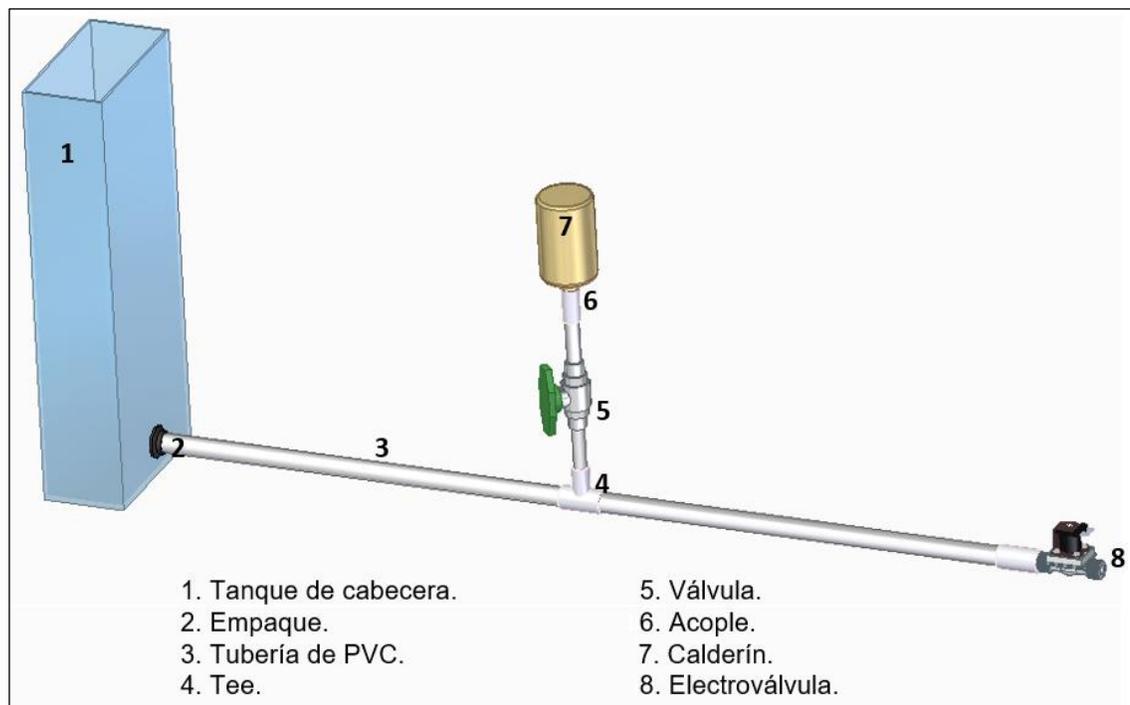
Como tal las alternativas están enfocadas hacia el sistema de análisis y mitigación de golpe de ariete; es decir, que la disposición del depósito, la bomba y la presencia de tanque de cabecera y válvula ubicada al final de la tubería de análisis no cambiará en las tres alternativas que se mencionarán a continuación. Las variaciones se presentarán en las diversas configuraciones que se pueden presentar para realizar las etapas que realizará la herramienta.

3.1.1 Alternativa 1. Seguido al tanque de cabecera se contará con una tubería recta de análisis en descarga sobre la cual se observará tanto la fase de generación de golpe de ariete, cómo la etapa de mitigación del mismo. Para esto, durante la primera etapa, el mecanismo de mitigación contará con una válvula ubicada justo antes de su entrada con el fin de tener la posibilidad de desactivar este sistema de mitigación y así poder observar únicamente la generación de golpe de ariete.

Seguido a esto, en la segunda fase de abrirá la válvula del sistema de mitigación habilitando así este sistema permitiendo observar el comportamiento del fenómeno del golpe de ariete con sistema de amortiguación.

Para realizar la amortiguación del golpe de ariete se utilizará un calderín el cual llevará en su interior aire comprimido. El sistema está representado en la **Figura 24.**

Figura 24. Alternativa 1.

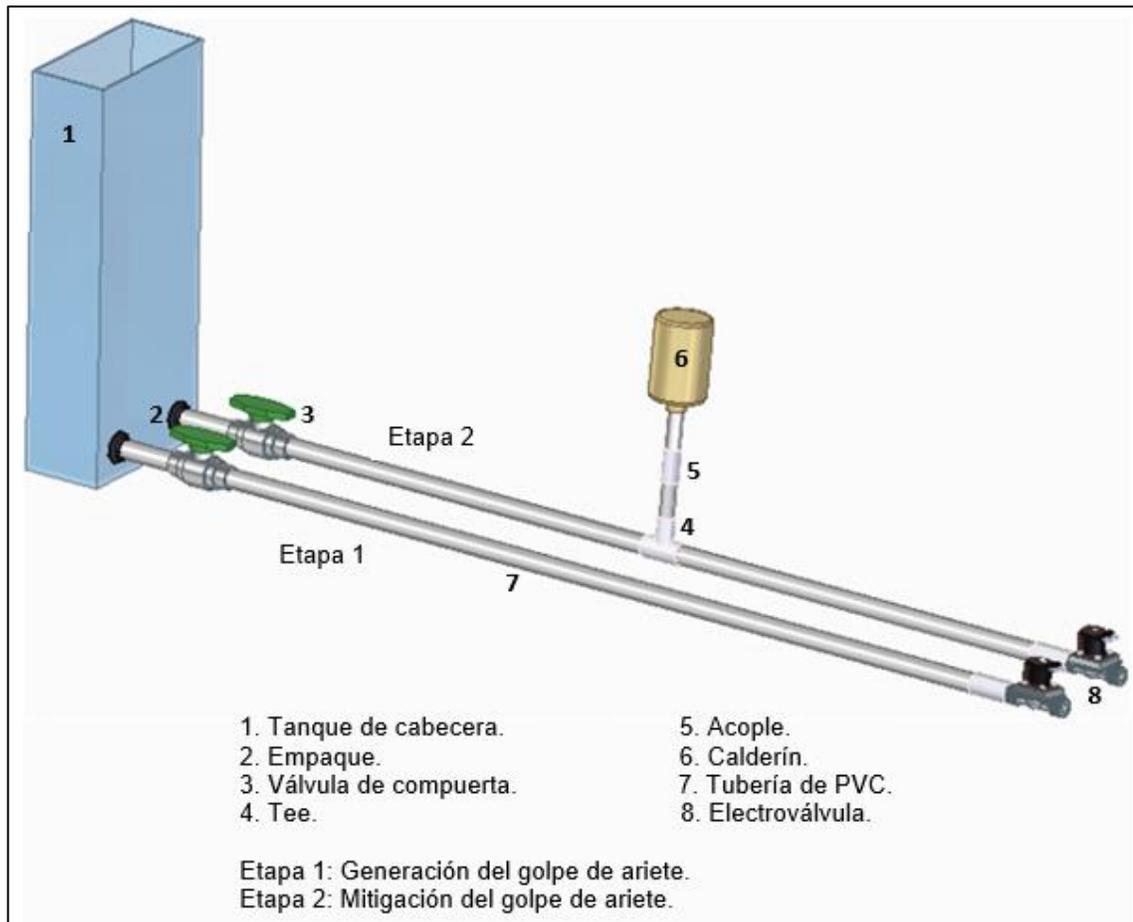


Fuente: elaboración propia.

3.1.2 Alternativa 2. Con el fin de poder observar las fases del golpe de ariete por separado se contará con dos tuberías paralelas de análisis. Una tubería tendrá como único fin la generación del golpe de ariete a través del cierre de la válvula. La segunda tubería contará con el sistema de mitigación de golpe de ariete observando así este efecto. Las dos tuberías son exactamente iguales en cuanto a su material y características dimensionales; también, trabajarán bajo los mismos parámetros, esto con el fin que en ambas etapas se genere el golpe de ariete bajo las mismas condiciones analizando así la generación y mitigación de este fenómeno por aparte sin que ninguna fase intervenga con la otra. El sistema de amortiguación de golpe de ariete que se utilizará en esta fase será un calderín con aire comprimido en su interior; pero, este irá directamente acoplado a la tubería de la etapa dos.

El sistema se encuentra representado en la **Figura 25**.

Figura 25. Alternativa 2.

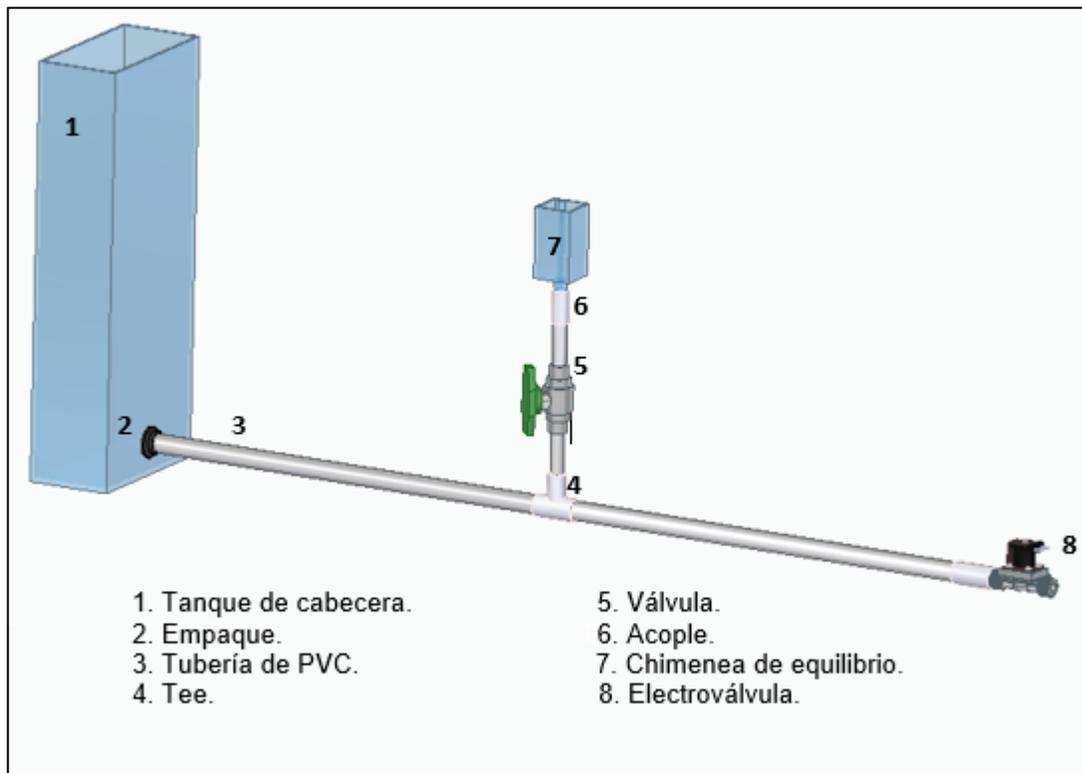


Fuente: elaboración propia.

3.1.3 Alternativa 3. Dentro de esta alternativa se encuentra una sola tubería de análisis en la cual se evidenciará tanto la fase de generación de golpe de ariete

como la fase de mitigación. En cuanto al sistema de mitigación se contará con una chimenea de equilibrio diferencial o de Johnson la cual está abierta al ambiente bajo efectos de la presión atmosférica. Se debe contar con una válvula antes del inicio de la chimenea de equilibrio con el fin de evitar su activación durante la etapa de generación de golpe de ariete. El sistema se esquematiza en la **Figura 26**.

Figura 26. Alternativa 3.



Fuente: elaboración propia.

3.2 CRITERIOS DE VALORACIÓN

Partiendo de la metodología del ingeniero Niebles³², se establece que dentro del diseño mecánico existe una etapa denominada calificación de las alternativas por atributos, en donde se definen un conjunto de factores para evaluar las alternativas de diseño. Dentro de esta metodología, se proponen una serie de criterios para evaluar un equipo didáctico los cuales se tomarán como referencia para definir los criterios de valoración de la herramienta de análisis de golpe de ariete, así:

3.2.1 Seguridad de la práctica. Este criterio evalúa la remota posibilidad de que ocurran accidentes en la práctica de laboratorio afectando tanto el bienestar de los

³² SC ENRIQUE, M., et al. Metodología Para El Diseño Y Construcción De Una Máquina Para Medición Del Desgaste Abrasivo Basado En La Norma astM G-65. 2009. p. 53-58

docentes y estudiantes, así como, el desempeño de la misma. Para evaluar este criterio se tomarán valores de 1 a 5, siendo 1 el valor menos seguro y 5 el valor más alto de seguridad.

3.2.2 Mantenimiento. Hace referencia a la cantidad y complejidad de tareas de inspección y reparación, así como la posibilidad de conseguir repuestos. En la evaluación de este criterio el valor 1 será de difícil mantenimiento y 5 será de fácil mantenimiento.

3.2.3 Montaje. Proceso que define la cantidad y complejidad de operaciones necesarias para la instalación de los equipos. Su calificación está dada en valores de 1 a 5, siendo 1 el de difícil montaje y 5 el de fácil montaje.

3.2.4 Independencia de las fases. Hace referencia al grado de intervención e interacción de las fases entre sí, es decir que los elementos de alguna fase pueden afectar el correcto funcionamiento de una fase. La calificación de este criterio está dada por valores de 1 a 5, donde 1 significa que existe gran interferencia de las fases y 5 existe independencia de las fases.

3.3 MÉTODO DE PONDERACIÓN LINEAL

Una vez establecidos los criterios de evaluación, es necesario que los encargados del diseño asignen un valor a cada uno ellos con base en un detallado análisis de la funcionalidad que se pretende con la herramienta, atendiendo a los requerimientos y parámetros establecidos como se muestra en el **Cuadro 4**.

Cuadro 4. Criterios de evaluación.

Símbolo	Criterio	Valor del Criterio
C1	Seguridad de la práctica	0,20
C2	Mantenimiento	0,15
C3	Montaje	0,30
C4	Independencia de las fases	0,35
Total		1

Fuente: elaboración propia.

A continuación, en el **Cuadro 5** se muestra la Matriz de criterios ponderados para la selección de la mejor alternativa. En esta matriz, se asignó un valor para cada criterio establecido en la sección 3.2 dependiendo de cada una de las alternativas propuestas.

Cuadro 5. Método de ponderación lineal.

Criterio	Valor del Criterio	Alternativa 1		Alternativa 2		Alternativa 3	
		C	A	C	A	C	A
C1	0,2	4	0,8	5	1	3	0,6
C2	0,15	4	0,6	4	0,6	5	0,75
C3	0,3	4	1,2	3	0,9	4	1,2
C4	0,35	3	1,05	4	1,4	3	1,05
TOTAL	1	3,65		3,9		3,6	
		C: Calificación		A: Alternativa (Valor del criterio*100)			

Fuente: elaboración propia.

Tras realizar el método de *Scoring* (ponderación lineal) para evaluar las alternativas establecidas se llega al resultado que la alternativa 2 es la solución más viable y adecuada a desarrollar para lograr el cometido de diseñar una herramienta para el análisis de golpe de ariete en tubería recta. Por tal motivo esta será la alternativa que se desarrollará a fondo en el diseño detallado.

Es preciso destacar, que el dispositivo de mitigación de golpe de ariete seleccionado es un calderín que utiliza como sistema de amortiguamiento el aire contenido en su interior asemejándose al principio de funcionamiento de un dámper de pulsaciones utilizado en la industria petrolera, en dónde, el fluido presurizado se encarga de absorber el choque de presión generado por el golpe de ariete.

4. DISEÑO DETALLADO DE LA HERRAMIENTA

Como se ha mencionado en capítulos anteriores, el lugar de pruebas de referencia para el diseño es el laboratorio de mecánica de fluidos de la Fundación Universidad de América. De este laboratorio se determinaron las limitantes dimensionales y caudales de operación; los cuales, se explicarán en este capítulo, a medida que se realicen cálculos de los diferentes componentes que conforman la herramienta.

4.1 SISTEMA DE ABASTECIMIENTO

Este sistema hace referencia al cálculo de los componentes hidráulicos necesarios para abastecer la herramienta de análisis de golpe de ariete. A continuación, se presentan los diversos cálculos de los elementos que componen la herramienta, así:

4.1.1 Depósito. Teniendo en cuenta que ningún equipo del laboratorio de mecánica de fluidos de la Fundación Universidad de América está conectado a la red hidráulica de la universidad; se hace necesario diseñar un depósito el cual servirá de abastecimiento de fluido para la herramienta.

El parámetro que se tuvo en cuenta para calcular las dimensiones del depósito de la herramienta es el volumen que este puede almacenar. Debido a que la mayoría de equipos cuenta con el módulo básico para ensayos sobre mecánica de fluidos HM 150 de la compañía HAMBURG GUNT; en donde, la capacidad del depósito de reserva es 180 L; se tomará este valor de volumen para realizar los cálculos.

Cabe señalar, que el depósito no puede estar lleno de agua en toda su dimensión por lo cual se define que el 80% del tanque está destinado a almacenar fluido y el 20% restante estará vacío, como se muestra a continuación:

Ecuación 12. Cálculo volumen del depósito.

$$\begin{aligned} \text{Volumen del fluido} &= 180 \text{ L} = 0,18 \text{ m}^3 \\ \text{Volumen del fluido} &= (80\% * \text{Volumen del depósito}) \\ \text{Volumen del depósito} &= \frac{180\text{L} * 100\%}{80\%} = 225 \text{ L} = 0,225 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Fuente: elaboración propia.

Con este volumen se procedió a seleccionar el tanque adecuado, teniendo en cuenta que el volumen comercial más próximo es el de 250 L.

Considerando que existe una gran cantidad de modelos de tanques dependiendo de sus longitudes, como depósitos altos, bajo y superbajo, según la compañía COLEMPAQUES, la cual es una empresa especializada en la producción de

tanques plásticos de abastecimiento hidráulico. Se realizó la selección del depósito, efectuando el cálculo aproximado de dimensiones, con el fin de determinar los valores mínimos que puede tener el tanque y bajo este parámetro seleccionar uno; teniendo en cuenta que el volumen del depósito viene dado por la siguiente expresión:

Ecuación 13. Volumen del depósito.

$$Volumen\ del\ depósito = \frac{\pi}{4} (D)^2 * z$$

Fuente: PALMER, C. I. y BIBB, S. F. Matemáticas Prácticas: Aritmética, Álgebra, Geometría, Trigonometría Y Regla De Cálculo. Reverté, 1979. 9788429151121. p. 387.

Donde:

$D =$ diámetro [m].

$z =$ altura [m].

Se asumió que el depósito tiene una geometría circular en donde $D = 2z$, obteniendo así la altura y diámetro del depósito respectivamente como se muestra a continuación:

Ecuación 14. Altura y diámetro del depósito.

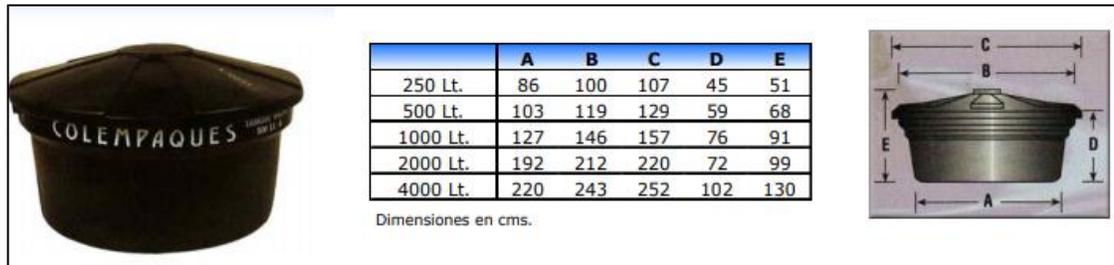
$$z = \sqrt[3]{\frac{Volumen\ del\ depósito}{\pi}} = \sqrt[3]{\frac{0,225\ m^3}{\pi}} = 0,415\ m$$

$$D = 2 * z = 2 * 0,415\ m = 0,831\ m$$

Fuente: elaboración propia.

Teniendo en cuenta que el diámetro del depósito fue de 0,831 m y que la altura fue de 0,415 m, se procedió a escoger un tanque bajo de 250 L para el diseño, el cual, según la compañía Colempaques en la **Figura 27**, presenta las siguientes características:

Figura 27. Tanque bajo Colempaques.



Fuente: COLEMPAQUES. Conservando el Agua | Colombia. [Consultado el Apr 9,2019]. Disponible en: <https://www.colempaques.com>

4.1.2 Tanque de cabecera. En los requerimientos y parámetros funcionales se estableció que el tanque de cabecera debía contar con un nivel constante, debido que este sería el punto de referencia de la gráfica de sobrepresiones. También, se citaron las velocidades máximas de operación del agua para diferentes materiales de tubería encontrando que tanto para acero como para PVC (materiales que se contemplarán para el diseño) se tiene una velocidad máxima permisible de 5 m/s.

4.1.2.1 Dimensiones tubería de descarga. Estableciendo la ecuación de Bernoulli entre un punto en el tanque y un punto en la tubería de análisis se logró determinar que la ecuación de Torricelli es la que rige el comportamiento de la velocidad en este tramo; así:

Ecuación 15. Velocidad de la tubería de análisis.

$$V_2 = \sqrt{2 * g * z_2} = \sqrt{2 * g * H_{fluido}}$$

Fuente: MOTT, Robert L. Mecánica De Fluidos. Sexta ed. México: Pearson Educación de México, S.A. de C.V., 2006. p. 179.

Donde:

V_2 : velocidad de la tubería de análisis [m/s].

g : gravedad [m/s²].

z : altura del fluido [m].

H_{fluido} : altura del fluido [m].

En esta ecuación se relaciona la velocidad con la altura del fluido; por tal motivo para poder definir la altura se utiliza la velocidad real que se convierte en la condición crítica.

Con el fin de determinar la velocidad real del tramo es necesario calcular el área de flujo y el diámetro de la tubería; para esta tubería de análisis se utilizó PVC SCH 40

transparente con el fin de poder evidenciar el cambio de la dirección de flujo cuando ocurre el golpe de ariete. El área de flujo está dada por la siguiente ecuación:

Ecuación 16. Área de sección transversal al flujo.

$$S = \frac{Q}{V}$$

Fuente: MOTT, Robert L. Mecánica De Fluidos. Sexta ed. México: Pearson Educación de México, S.A. de C.V., 2006. p. 164.

Donde:

S: área de la sección transversal al flujo [m^2].

Q: caudal [m^3/s].

V: velocidad de flujo [m/s].

Esta tubería de análisis está conectada a la salida del tanque de cabecera; no obstante, se asumió que el caudal de salida es aproximadamente igual al caudal de entrada; pero teniendo en cuenta el porcentaje de apertura de la válvula como establece el doctor Acedo en su libro titulado “Instrumentación y control avanzado de procesos”³³, tal y como se muestra en la **Ecuación 17**. Es preciso destacar, que esta ecuación es válida para válvulas lineales como es el caso de la válvula de compuerta.

Ecuación 17. Ecuación punto de equilibrio.

$$o_1 S_1 V_1 = o_2 S_2 \sqrt{2gh}$$

Fuente: elaboración propia con base en SÁNCHEZ, J. A. Instrumentación Y Control Avanzado De Procesos. Díaz de Santos, 2006. 9788479787547. p. 247.

Donde:

*o*₁: apertura de la válvula de entrada [%].

*o*₂: apertura de la válvula de salida [%].

*V*₁: velocidad de flujo de entrada [m/s].

*S*₁: área de la sección transversal al flujo de entrada [m^2].

*S*₂: área de la sección transversal al flujo de salida [m^2].

g: gravedad [m/s^2].

h: altura del tanque [m].

Adicionalmente, se realizó el cálculo para la condición crítica; en donde, partiendo de la ecuación del punto de equilibrio establecida en el sistema de control de nivel

³³ SÁNCHEZ, J. A. Instrumentación Y Control Avanzado De Procesos. Díaz de Santos, 2006. 9788479787547. p. 247.

del tanque, se tuvo que la apertura de la válvula de compuerta antes del tanque de cabecera es totalmente abierta y la válvula de compuerta después del tanque de cabecera tiene 0,25 de apertura.

Se reemplazaron los valores de caudal con 0,0025 m³/s que es el valor máximo promedio que entregan los equipos de laboratorio de mecánica de fluidos de la Fundación Universidad de América, una apertura de la válvula 0,25 y velocidad de flujo 5 m/s en la **Ecuación 18** y se procedió hacer el cálculo del área de sección transversal del flujo de salida así:

Ecuación 18. Área de sección transversal al flujo según la apertura.

$$S_2 = \frac{o_1 S_1 V_1}{o_2 \sqrt{2gh}} = \frac{Q}{o_2 V_2}$$

Fuente: elaboración propia con base en SÁNCHEZ, J. A. Instrumentación Y Control Avanzado De Procesos. Díaz de Santos, 2006. 9788479787547. p. 247.

Donde:

o_1 : apertura de la válvula de entrada [%].

o_2 : apertura de la válvula de salida [%]

V_1 : velocidad de flujo de entrada [m/s].

V_2 : velocidad de flujo de salida [m/s].

S_1 : área de la sección transversal al flujo de entrada [m²].

S_2 : área de la sección transversal al flujo de salida [m²].

g : gravedad [m/s²].

h : altura del tanque [m].

Q : caudal [m³/s].

Teniendo en cuenta que el área de sección transversal al flujo fue de 0,002 m², se procedió a buscar un diámetro de tubería óptimo en el catálogo de tubería transparente de la compañía Spears® EverCLEAR™, comercializada en Colombia por la empresa TUVALREP. El catálogo se encuentra en el **ANEXO A**, de éste se determinaron las siguientes características para el diseño que se encuentran relacionadas en el **Cuadro 6** así:

Cuadro 6. Dimensiones tubería de descarga.

Material	Sección	Diámetro (in)	Área de flujo S (m ²)
PVC	Descarga (análisis)	2	2,12321 x 10 ⁻³

Fuente: EverCLEAR™. Pipe & Hangers Technicall information. Special Pipe - Spears® EverCLEAR™ PVC Clear. [En línea]. Recuperado en: 01 febrero 2019. Formato archivo (pdf). Disponible en: <https://tuvalrep.com.co/producto/tuberia-pvc-40-transparente-lasco/>.

4.1.2.2 Propiedades del Flujo. Tras calcular el diámetro de la tubería de la red se procedió a calcular la velocidad real a través de la siguiente ecuación, teniendo en cuenta el área de flujo normalizada para el diámetro seleccionado.

Ecuación 19. Velocidad de flujo real.

$$V_r = \frac{Q}{o_2 S_n} = \frac{0,0025 \text{ m}^3/\text{s}}{0,25 * 2,12321 * 10^{-3} \text{ m}^2} = 4,7098 \text{ m/s}$$

Fuente: elaboración propia con base en MOTT, Robert L. Mecánica De Fluidos. Sexta ed. México: Pearson Educación de México, S.A. de C.V., 2006. p. 165.

Donde:

S_n : área de flujo brindado por catálogo [m^2].

Q : caudal [m^3/s].

o_2 : apertura de la válvula de salida [%]

V_r : velocidad de flujo real [m/s].

Se procedió a calcular la altura del fluido mediante la siguiente ecuación, teniendo en cuenta la velocidad real.

Ecuación 20. Altura del fluido.

$$H_{fluido} = \frac{V_2^2}{2 * g} = \frac{(4,7098 \text{ m/s})^2}{2 * 9,81 \text{ m/s}^2} = 1,13 \text{ m}$$

Fuente: elaboración propia con base en MOTT, Robert L. Mecánica De Fluidos. Sexta ed. México: Pearson Educación de México, S.A. de C.V., 2006. p. 164.

Donde:

H_{fluido} : altura del fluido [m].

V_2 : velocidad de flujo de salida [m/s].

g : gravedad [m/s^2].

Para asumir el volumen se procedió a tomar como referencia el equipo de golpe de ariete C7MkII de la compañía Armfiel donde establecen que el tanque de cabecera tiene 45L de capacidad de volumen.

Por lo tanto, asumiendo que el largo (x) y el ancho (y) del fluido son iguales, y conociendo la altura del fluido (z o H_{fluido}), se determinó el largo del tanque mediante la siguiente expresión:

Ecuación 21. Ancho del fluido.

$$\begin{aligned}
 & \text{Volumen del fluido} = 45 \text{ L} = 0,045 \text{ m}^3 \\
 x = & \sqrt{\frac{\text{Volumen del fluido}}{H_{\text{fluido}}}} = \sqrt{\frac{0,045 \text{ m}^3}{1,13 \text{ m}}} = 0,20 \text{ m}
 \end{aligned}$$

Fuente: elaboración propia.

Después de realizar los respectivos cálculos, los resultados obtenidos de las características del fluido se sintetizan en el **Tabla 1**.

Tabla 1. Propiedades del fluido.

Velocidad de flujo real Vr (m/s)	Volumen del fluido (m ³)	Largo del fluido x (m)	Ancho del fluido y (m)	Altura del fluido z (m)
4,71	0,045	0,20	0,20	1,13

Fuente: elaboración propia.

4.1.2.3 Dimensiones tanque de cabecera. El cálculo del volumen del tanque de cabecera se hace a través de la siguiente expresión:

Ecuación 22. Volumen tanque de cabecera.

$$\begin{aligned}
 & \text{Volumen del fluido} = 45 \text{ L} = 0,045 \text{ m}^3 \\
 & \text{Volumen del fluido} = (80\% * \text{Volumen del tanque de cabecera}) \\
 & \text{Volumen del tanque de cabecera} = \frac{45 \text{ L} * 100\%}{80\%} = 56 \text{ L} = 0,056 \text{ m}^3
 \end{aligned}$$

Fuente: elaboración propia.

Asumiendo que el largo (x) y ancho (y) del tanque de cabecera será el mismo valor que del fluido, se procedió a calcular la altura del tanque (z o H_{tanque}) así:

Ecuación 23. Altura tanque de cabecera.

$$\begin{aligned}
 & \text{Volumen del tanque} = x * y * z = x * y * H_{\text{tanque}} \\
 H_{\text{tanque}} = & \frac{\text{Volumen del tanque}}{x * y} = \frac{0,056 \text{ m}^3}{(0,20 \text{ m})^2} = 1,40 \text{ m}
 \end{aligned}$$

Fuente: elaboración propia.

En el **Tabla 2**, aparecen consignadas las dimensiones que se tendrán en cuenta para el diseño del tanque de cabecera.

Tabla 2. Dimensiones del tanque de cabecera.

Volumen del tanque (m ³)	Largo x (m)	Ancho y (m)	Alto z (m)
0,056	0,20	0,20	1,40

Fuente: elaboración propia.

4.1.3 Sistema hidráulico. Dentro del diseño de sistemas de flujo de tuberías existen seis parámetros básicos involucrados propuestos por Robert Mott, en su libro “Mecánica de fluidos aplicada”³⁴ que son:

- Pérdidas o adición de energía al sistema.
- La velocidad del fluido.
- El diámetro de la tubería.
- La longitud de la tubería.
- La rugosidad de la pared de la tubería.
- Las propiedades del fluido como peso específico, densidad y viscosidad.

Por lo general, se busca determinar uno de los tres primeros parámetros mientras los otros dos se conocen o pueden ser asumidos por el diseñador. Dependiendo del parámetro que se requiera determinar, el autor propone tres diferentes métodos de solución. Para este caso específico se seguirá la metodología del sistema clase I el cual busca determinar la carga total de la bomba.

4.1.3.1 Caudal. Para determinar este parámetro se utilizó el máximo caudal entregado por los equipos del laboratorio de mecánica de fluidos; el cual, posee un valor de 150 L/min (0,0025 m³/s).

4.1.3.2 Diámetros y velocidades de las tuberías. Se utilizará la figura 6.2 titulada “Ayuda para seleccionar el tamaño de las tuberías”³⁵ del libro Mecánica de Fluidos de Robert Mott presentada en el **ANEXO B**. En esta figura se determina el diámetro de las tuberías de succión y descarga utilizando el caudal del sistema. El eje de las abscisas posee el caudal el cual se cruza con dos rectas, una de succión y otra de descarga, y se proyecta hacia el eje de las ordenadas obteniendo así el valor de los diámetros. Es importante aclarar que esto es para tuberías de acero con SCH 40.

³⁴ MOTT, R. L. y PEDRAZA, C. R. C. Mecánica De Fluidos Aplicada. Pearson Educación, 1996. 9789688805428. p. 294-295.

³⁵ MOTT, Robert L. Mecánica De Fluidos, Op. Cit., p. 163.

No obstante, para la tubería de análisis se hará referencia a los cálculos realizados en el tanque de cabecera mencionados en la **Ecuación 15**.

Por último, se procedió a calcular la velocidad real de los tramos de succión y descarga teniendo en cuenta el área de flujo normalizada para el diámetro seleccionado mediante la **Ecuación 16** titulada velocidad de flujo real. Cabe resaltar, que para la sección de descarga de análisis se utilizó la **Ecuación 19**, la cual involucra el porcentaje de apertura de la válvula de compuerta.

Tras realizar el anterior procedimiento, se determinaron las características de las secciones de tubería consignadas en el **Tabla 3**.

Tabla 3. Características de las secciones de tubería.

Sección de Tubería	Diámetro Nominal (in)	Diámetro Interno D (m)	Área de flujo S (m ²)	Velocidad de Flujo V (m/s)	Longitud de la tubería l (m)
Succión	1,5	0,0409	$1,314 \times 10^{-3}$	1,9025	0,2
Descarga	1,25	0,0351	$9,653 \times 10^{-4}$	2,5898	3,76
Descarga (análisis)	2	0,0519938	$2,123 \times 10^{-3}$	4,7098	1,98

Fuente: elaboración propia.

4.1.3.3 Longitud de las tuberías. Se deben tener en cuenta dentro de las limitantes dimensionales la altura del laboratorio, la cual tiene un valor de 2,51 m; se utilizará un 80% de esta altura para definir la altura máxima de la herramienta teniendo un valor de 2 m.

En cuanto al valor x (largo), se procede a determinar las dimensiones disponibles en el laboratorio, donde, es posible reorganizar elementos para generar más espacio. En primera medida, se cambia de lugar el equipo 9 (HM 150.4: Bomba centrífuga) con el equipo 10 (espacio vacío). Con esto se amplía el espacio disponible teniendo un valor máximo de x (largo) de 3,35 m. No obstante, para determinar el valor de y (ancho) se buscó que todos los equipos de laboratorio estuvieran alineados por lo cual su valor es de 1,1 m aproximadamente.

4.1.3.4 Pérdidas y ganancias de energía. Para el diseño de la herramienta se empleará la ecuación general de energía basada en la ecuación de Bernoulli, ya que con base en el libro de Mott, ésta toma en cuenta los cambios en la carga de elevación, carga de presión, carga de velocidad entre dos puntos en un sistema de flujo de fluido y las pérdidas y ganancias de energía, dado que la mayoría de los casos los dispositivos y accesorios que se encuentran en estos sistemas agregan energía al fluido, la retiran de éste, o provocan pérdidas indeseables de ella. A continuación, se describe la ecuación general de energía.

Ecuación 24. Ecuación general de energía.

$$\frac{P_1}{\gamma} + z_1 + \frac{V_1^2}{2g} + h_A + h_L - h_p = \frac{P_2}{\gamma} + z_2 + \frac{V_2^2}{2g}$$
$$\gamma = \rho * g$$

Fuente: MOTT, Robert L. Mecánica De Fluidos. Sexta ed. México: Pearson Educación de México, S.A. de C.V., 2006. p. 321.

Donde:

P: presión [kPa].

V: velocidad del flujo [m/s].

γ: peso específico [kN/m³].

z: altura del fluido [m].

h_A: energía que se agrega al fluido, carga total sobre la bomba [m].

h_L: energía que se remueve del fluido [m].

h_p: pérdidas de energía del sistema [m].

ρ: densidad [kg/m³].

g: gravedad [m/s²].

Para poder realizar la selección de la bomba que se utilizará en el diseño de la herramienta de golpe de ariete, se requirió conocer las principales propiedades del fluido que se empleará y que se muestran en la **Cuadro 7**.

Cuadro 7. Propiedades del agua a 18°C.

Propiedades del agua a 18°C	Símbolo	Valor
Peso específico (kN/m ³)	<i>γ</i>	9,798
Densidad (kg/m ³)	<i>ρ</i>	998,8
Viscosidad dinámica (N*s/m ²)	<i>μ</i>	0,001072
Viscosidad cinemática (m ² /s)	<i>ν</i>	0,000001072

Fuente: MOTT, Robert L. Mecánica De Fluidos. Sexta ed. México: Pearson Educación de México, S.A. de C.V., 2006. p. 589. Modificado por los autores.

También, se debió tener en cuenta las principales características de las tuberías por donde iba a pasar el fluido, como aparecen en el **Tabla 3**.

Adicionalmente, se debió especificar las rugosidades de cada sección de tubería tal y como aparecen en el **Cuadro 8**.

Cuadro 8. Valores de diseño de rugosidad en tubos.

Sección de tubería	Material	Rugosidad R (m)	Rugosidad relativa $Re=D/R$
Succión	Acero comercial	0,000046	-
Descarga	Acero comercial	0,000046	-
Descarga (análisis)	PVC	0,0000003	173312,6667

Fuente: MOTT, Robert L. Mecánica De Fluidos. Sexta ed. México: Pearson Educación de México, S.A. de C.V., 2006. p. 235. Modificado por los autores.

Se debió identificar los accesorios presentes en cada sección de tubería, al igual que la longitud equivalente, factor de fricción y coeficiente de pérdida del accesorio, como se muestra en el **Cuadro 9**, para con ello, poder calcular las pérdidas por accesorio, las cuales generan una disminución de la presión debido a la fricción.

Cuadro 9. Pérdidas menores por accesorios.

Sección de tubería	Accesorio	Codo de 90°	Salida del Tanque	Válvula de Compuerta
Succión	Cantidad	0	1	1
	Le/D	N/A	N/A	8
	f_t	N/A	N/A	0,021
	k	N/A	1	0,168
Descarga	Cantidad	4	0	1
	Le/D	30	N/A	8
	f_t	0,022	N/A	0,022
	k	2,64	N/A	0,176
Descarga (análisis)	Cantidad	0	1	1
	Le/D	N/A	N/A	900
	f_t	N/A	N/A	0,016
	k	N/A	1	14,4
Dónde: Le/D: Longitud equivalente, f_t : factor de fricción del accesorio, k: coeficiente k ($Le/D \cdot f_t$), N/A: No aplica.				

Fuente: elaboración propia.

Para realizar los cálculos fue necesario tener en cuenta el caudal máximo al que trabajan los equipos de laboratorio ya mencionados anteriormente, cuyo valor aparece en el **Cuadro 10**.

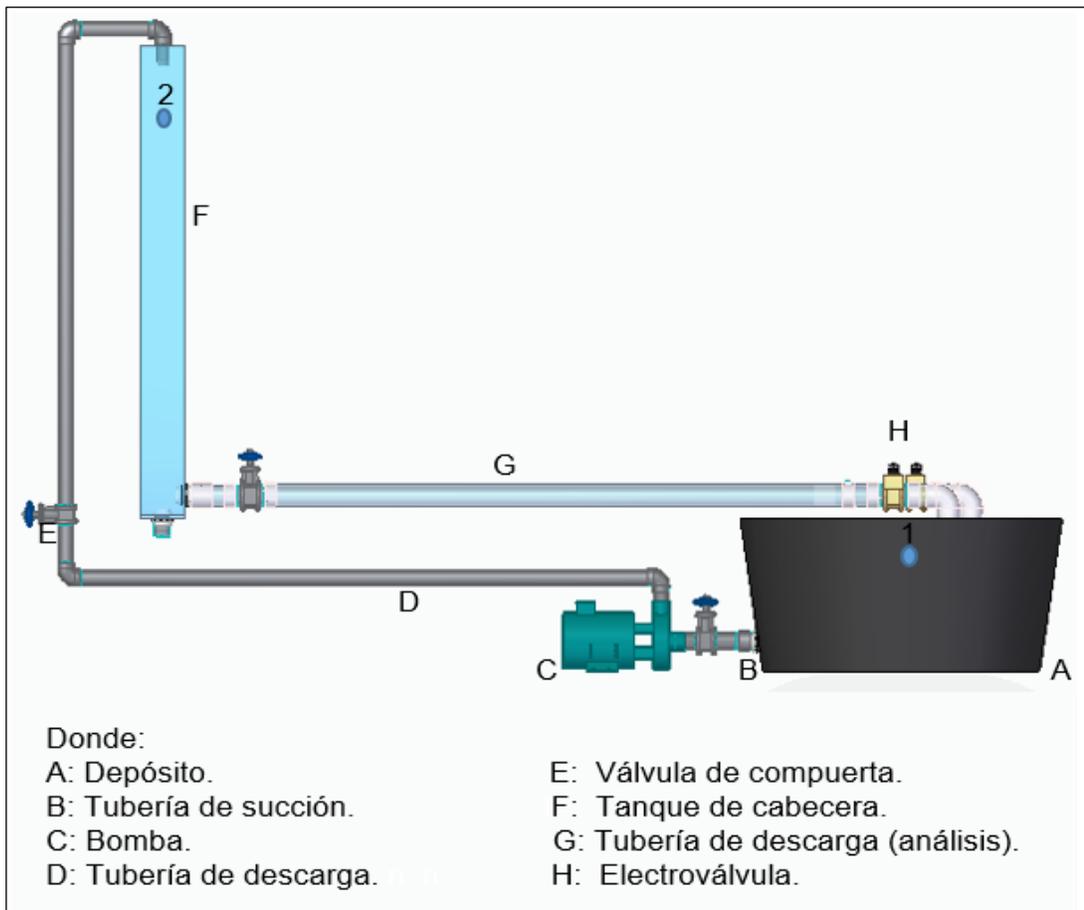
Cuadro 10. Máximo caudal del agua.

Caudal del agua Q	L/min	m ³ /s
	150	0,0025

Fuente: elaboración propia.

Adicionalmente, se eligieron dos puntos para realizar el análisis de energía general dentro del sistema de conducción de fluidos como aparece en la **Figura 28**, mostrando que el punto 1 es el depósito y el punto 2 es la salida de la tubería de descarga.

Figura 28. Puntos de análisis.



Fuente: elaboración propia.

Conocidos los puntos de análisis ubicados a la salida de la tubería de descarga y en el nivel del depósito se procedió a determinar los valores de altura, presión y velocidad para cada uno de ellos, como aparece en el **Tabla 4**, cabe resaltar que el depósito está abierto, es decir que estará expuesto a la atmósfera, por tal motivo la presión es cero al igual que la velocidad.

Tabla 4. Puntos de referencia para ecuación de Bernoulli.

Presión (Pa)		Velocidad (m/s)		Altura (m)	
P ₁	0	V ₁	0	z ₁	0,2644
P ₂	0	V ₂	2,5898	z ₂	1,7935

Fuente: elaboración propia.

Debido a que la herramienta de golpe de ariete está constituida con secciones de tubería de succión, tubería de descarga y tubería de descarga de análisis; se realizó el cálculo detallado de las pérdidas primarias y secundarias para una sola de las secciones de tubería que en este caso es el tramo de succión, puesto que para las otras el procedimiento de cálculo es exactamente el mismo.

Tomando como referencia la **Ecuación 1** titulada Número de Reynolds que aparece en el capítulo de Bases teóricas de la ocurrencia del golpe de ariete del presente trabajo de grado, conociendo las propiedades del agua a 18°C del **Cuadro 7** y el diámetro interno de la tubería de succión del **Cuadro 9**, se procedió a calcular el número de Reynolds así:

Ecuación 25. Cálculo del número de Reynolds.

$$Re = \frac{\rho * D * V}{\mu} = \frac{998,8 \text{ kg/m}^3 * 0,0409 \text{ m} * 1,902587519 \text{ m/s}}{0,001072 \text{ Ns/m}^2} = 72502,2859$$

Fuente: elaboración propia con base en MOTT, Robert L. Mecánica De Fluidos. Sexta ed. México: Pearson Educación de México, S.A. de C.V., 2006. p. 230.

Donde:

ρ : densidad del fluido [kg/m^3].

D : diámetro interno de la tubería [m].

V : velocidad del flujo [m/s].

μ : viscosidad dinámica del fluido [Ns/m^2].

ν : viscosidad cinemática del fluido [m^2/s].

Debido a que el valor obtenido en el número de Reynolds es mayor a 4000, se determinó que el fluido es de tipo turbulento y se procedió hacer el cálculo del factor de fricción λ .

Ecuación 26. Factor de Fricción.

$$\lambda = \frac{0,25}{\left[\log \left(\frac{1}{3,7 * \frac{D}{R}} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) \right]^2}$$
$$\lambda = \frac{0,25}{\left[\log \left(\frac{1}{3,7 * \frac{0,0409 \text{ m}}{0,000046 \text{ m}}} + \frac{5,74}{(72502,28594)^{0,9}} \right) \right]^2}$$
$$\lambda = 0,023487846$$

Fuente: elaboración propia con base en MOTT, Robert L. Mecánica De Fluidos. Sexta ed. México: Pearson Educación de México, S.A. de C.V., 2006. p. 242.

Donde:

λ : *factor de fricción [adim]*.

D : *diámetro interno de la tubería [m]*.

R : *rugosidad [m]*.

A continuación, se procedió hacer el respectivo cálculo de las pérdidas primarias a través de la siguiente ecuación:

Ecuación 27. Pérdidas primarias.

$$h_{pp} = \lambda * \frac{l}{D} * \frac{V^2}{2g} = 0,023487846 * \frac{0,2 \text{ m}}{0,0409 \text{ m}} * \frac{(1,902587519 \text{ m/s})^2}{2(9,81 \text{ m/s}^2)} = 0,0211 \text{ m}$$

Fuente: elaboración propia con base en MOTT, Robert L. Mecánica De Fluidos. Sexta ed. México: Pearson Educación de México, S.A. de C.V., 2006. p. 241.

Donde:

h_{pp} : *pérdidas primarias [m]*.

λ : *factor de fricción [adim]*.

l : *longitud de la tubería [m]*.

D : *diámetro interno de la tubería [m]*.

V : *velocidad del flujo [m/s]*.

g : *gravedad [m/s²]*.

Posteriormente se realizó el cálculo de las pérdidas secundarias de la tubería de succión, tomando en cuenta los accesorios presentes tales como las salidas de tanque, codos y válvulas que aparecen en el **Cuadro 9**.

Ecuación 28. Pérdidas secundarias.

$$h_{ps} = \sum \left[\text{Cantidad del accesorio} * \left(k \frac{V^2}{2g} \right) \right]$$
$$k = \left(\frac{Le}{D} \right) * f_t$$

Fuente: MOTT, Robert L. Mecánica De Fluidos. Sexta ed. México: Pearson Educación de México, S.A. de C.V., 2006. p. 179.

Donde:

h_{ps} : pérdidas secundarias [m].

V : velocidad del flujo [m/s].

g : gravedad [m/s^2].

k : coeficiente de pérdida del accesorio [m].

f_t : factor de fricción del accesorio [m].

Le/D : longitud equivalente [adim].

- Salida del tanque

Ecuación 29. Pérdidas secundarias de la salida del tanque.

$$h_{ps_{s.tanque}} = 1 * \left(1 * \frac{(1,9025 \text{ m/s})^2}{2(9,81 \text{ m/s}^2)} \right) = 0,1844 \text{ m}$$

Fuente: elaboración propia.

- Válvula de compuerta

Ecuación 30. Pérdidas secundarias de la válvula de compuerta.

$$k = 8 * 0,021 \text{ m} = 0,168 \text{ m}$$
$$h_{ps_{v.compuerta}} = 1 * \left(0,17 \text{ m} * \frac{(1,9025 \text{ m/s})^2}{2(9,81 \text{ m/s}^2)} \right) = 0,0309 \text{ m}$$

Fuente: elaboración propia.

El valor total de pérdidas secundarias en tubería de succión se observa a continuación:

Ecuación 31. Total pérdidas secundarias.

$$h_{ps} = h_{ps_{s.tanque}} + h_{ps_{v.compuerta}} = 0,1844 \text{ m} + 0,0309 \text{ m}$$
$$h_{ps} = 0,2154 \text{ m}$$

Fuente: elaboración propia.

Donde:

h_{ps} : pérdidas secundarias [m].

Finalmente, el valor total de pérdidas presentes en la tubería de succión fue:

Ecuación 32. Pérdidas totales de la línea de succión.

$$\begin{aligned} h_p &= h_{pp} + h_{ps} = 0,0211 \text{ m} + 0,2154 \text{ m} \\ h_p &= 0,2366 \text{ m} \end{aligned}$$

Fuente: elaboración propia.

Donde:

h_p : pérdidas [m].

Los resultados de los cálculos de las pérdidas para las secciones de tubería de succión, descarga y descarga análisis aparecen condensados respectivamente en las **Tablas 5, 6, 7**.

Tabla 5. Pérdidas tubería de succión.

Tubería de Succión	
Re	72502,2859
Tipo de Régimen	Turbulento
λ	0,0234
h_{pp} (m)	0,0211
h_{ps} .salidatanque (m)	0,1844
h_{ps} .válvulacompuerta (m)	0,0309
h_{ps} (m)	0,2154
h_p (m)	0,2366

Fuente: elaboración propia.

Tabla 6. Pérdidas tubería de descarga.

Tubería de descarga	
Re	84697,1052
Tipo de Régimen	Turbulento
λ	0,0236
h_{pp} (m)	0,8678
h_{ps} .codo90°(m)	0,9025
h_{ps} .válvulacompuerta (m)	0,0601
h_{ps} (m)	0,9626
h_p (m)	1,8305

Fuente: elaboración propia.

Tabla 7. Pérdidas tubería de descarga análisis.

Tubería de descarga (análisis)	
Re	228161,4707
Tipo de Régimen	Turbulento
λ	0,0152
h_{pp} (m)	0,6544
$h_{ps.salidatanque}$ (m)	1,1306
$h_{ps.válvulacompuerta}$ (m)	16,2808
h_{ps} (m)	17,4115
h_p (m)	18,0658

Fuente: elaboración propia.

Posteriormente, se procedió a calcular la pérdida total del sistema mediante la sumatoria de las pérdidas de las dos secciones de tubería inmersas en el sistema de conducción que debe suplir la bomba (succión y descarga). Obteniendo los siguientes resultados que se muestran en la **Tabla 8**:

Tabla 8. Pérdidas de energía del sistema.

	m	kPa	psi
h_p	2,0672	20,2548	2,9412

Fuente: elaboración propia.

Para el cálculo de energía que se agrega al fluido o carga total sobre la bomba h_A , se despejó h_A de la **Ecuación 24** llamada ecuación general de energía y se reemplazaron los valores obtenidos en la **Tabla 4**.

Ecuación 33. Carga total sobre la bomba.

$$\frac{P_1}{\gamma} + z_1 + \frac{V_1^2}{2g} + h_A + h_L - h_p = \frac{P_2}{\gamma} + z_2 + \frac{V_2^2}{2g}$$

$$z_1 + h_A - h_p = z_2 + \frac{V_2^2}{2g}$$

$$h_A = z_2 - z_1 + h_p + \frac{V_2^2}{2g}$$

$$h_A = 1,7935 \text{ m} - 0,2644 \text{ m} + 2,0672 \text{ m} + 0,3418$$

$$h_A = 3,9382 \text{ m}$$

Fuente: elaboración propia.

Donde:

P : presión [kPa].

V : velocidad del flujo [m/s].

γ : peso específico [kN/m³].

z : altura del fluido [m].

h_A : energía que se agrega al fluido, carga total sobre la bomba [m].

h_L : energía que se remueve del fluido [m].

h_p : pérdidas de energía del sistema [m].

ρ : densidad [kg/m³].

g : gravedad [m/s²].

En la **Tabla 9** aparecen las pérdidas de carga total de la bomba en unidades de presión, para hacer la posterior elección de la bomba.

Tabla 9. Carga total sobre la bomba.

	m	kPa	psi
h_A	3,9382	38,5866	5,6032

Fuente: elaboración propia.

Posteriormente se procedió a calcular la carga de succión neta positiva disponible $NPSH_A$, mediante la siguiente ecuación con el propósito de determinar si la bomba cavita o no y si cumple con los requerimientos que propone el fabricante, es decir que $NPSH_A < NPSH_R$.

Ecuación 34. Carga de succión neta positiva disponible.

$$NPSH_A = h_{sp} \pm h_s - h_p - h_{vp}$$
$$h_{sp} = \frac{P_{sp}}{\gamma}$$
$$h_{vp} = \frac{P_{vp}}{\gamma}$$

Fuente: MOTT, Robert L. Mecánica De Fluidos. Sexta ed. México: Pearson Educación de México, S.A. de C.V., 2006. p. 414.

Donde:

$NPSH_A$: Carga de succión neta positiva disponible [m].

h_{sp} : carga estática (absoluta) sobre el fluido [m].

h_s : diferencia de elevación [m].

h_p : pérdidas primarias y secundarias de succión [m].

h_{vp} : carga de presión de vapor del líquido a latemperatura de bombeo [m].

P_{sp} : presión estática (absoluta) sobre el fluido [kPa].

P_{vp} : presión de vapor del líquido a la temperatura de bombeo [kPa].
 γ : peso específico [kN/m³].

Para realizar el cálculo se tomó en cuenta que la diferencia de elevación h_s es la misma altura z_1 tomada del **Tabla 4**, que la presión estática (absoluta) sobre el fluido P_{sp} es la presión atmosférica de Bogotá es decir 560 mmHg o 74,6605 kPa y que la presión de vapor del líquido a la temperatura de bombeo a 18°C es 2,116 kPa tomada de la tabla presión de vapor y carga de presión de vapor del libro de Mecánica de Fluidos de Robert Mott que aparece en el **ANEXO B**.

Ecuación 35. Cálculo de la carga de succión neta positiva disponible.

$$h_{sp} = \frac{P_{sp}}{\gamma} = \frac{74,6605 \text{ kPa}}{9,798 \text{ kN/m}^3} = 7,6199 \text{ m}$$

$$h_{vp} = \frac{P_{vp}}{\gamma} = \frac{2,116 \text{ kPa}}{9,798 \text{ kN/m}^3} = 0,216 \text{ m}$$

$$NPSH_A = h_{sp} \pm h_s - h_p - h_{vp}$$

$$NPSH_A = 7,6199 \text{ m} + 0,2644 \text{ m} - 0,2366 \text{ m} - 0,216 \text{ m}$$

$$NPSH_A = 7,4317 \text{ m}$$

Fuente: MOTT, Robert L. Mecánica De Fluidos. Sexta ed. México: Pearson Educación de México, S.A. de C.V., 2006. p. 414.

En la **Tabla 10** aparecen los valores obtenidos para la carga de succión neta positiva disponible.

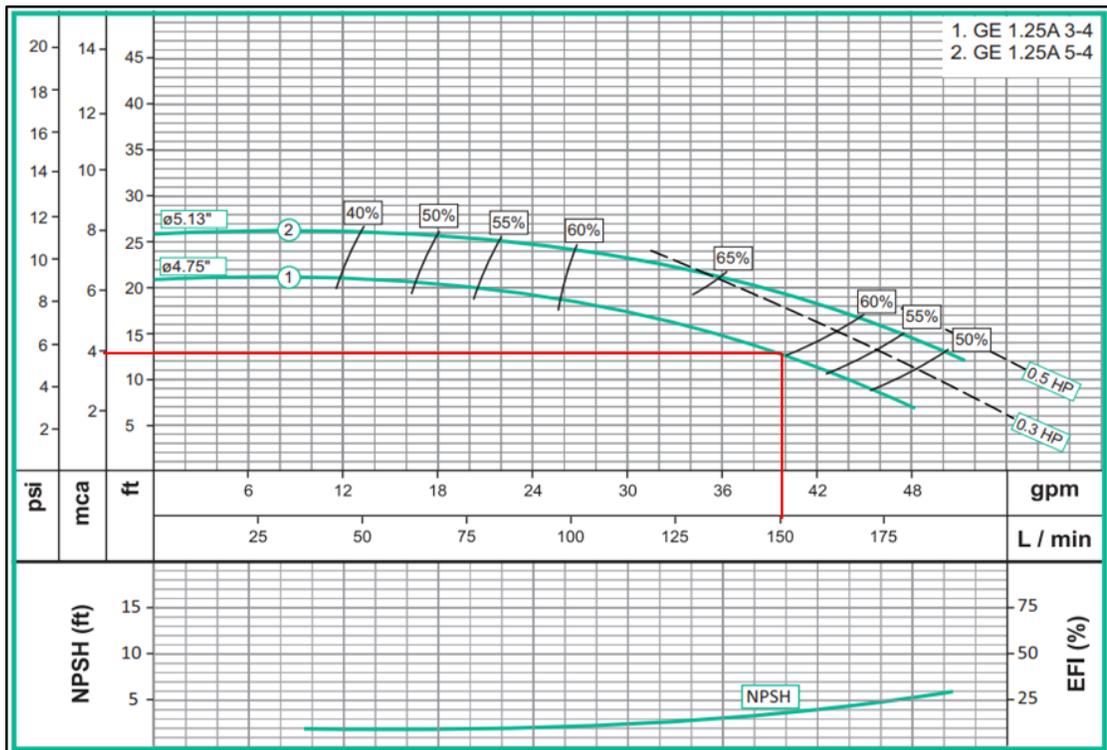
Tabla 10. Carga de succión neta positiva disponible.

	m	ft
NPSH _A	7,4317	24,3823

Fuente: elaboración propia.

Finalmente, basados en los resultados alcanzados tras los cálculos de carga total sobre la bomba y de carga de succión neta positiva disponible, se realizó la selección de la bomba mediante las curvas de bomba de caracol del fabricante Barnes de Colombia S.A que aparecen en la **Figura 29**. Se decidió utilizar este fabricante debido a la gran variedad de bombas que posee en su catálogo encontrando variación en las alturas máximas que estas puedan brindar; por lo cual, se pudo encontrar una bomba acorde a las necesidades del sistema; no obstante, la marca cuenta con reconocimiento a nivel nacional, como una empresa líder en este sector por lo cual su respaldo es amplio.

Figura 29. Curva característica de bombas centrífugas.



Fuente: BARNES de Colombia S.A. Bombas GS en hierro fundido con motor eléctrico. [En línea]. Recuperado en: 10 abril 2019. Formato archivo (pdf). Disponible en: http://barnes.com.co/fichas_tecnicas/GS/1800/Ficha%20GE%201.25A%201800.pdf. p. 1.

Se determinó que la bomba que cumple con las mejores características de trabajo es la bomba número dos, modelo GE 1,25 A 5-4 cuyas dimensiones, que se tomarán en cuenta para el respectivo diseño aparecen en la **Figura 30**.

Figura 30. Características dimensionales de bombas centrífugas.

MODELO	SUCxDESC	C	A	E	D	I	F	J	X	Y	Z
GE 1,25A 3-4	1-1/2" x 1-1/4"	483	252	117	114	144	92	125	89	64	78
GE 1,25A 5-4	1-1/2" x 1-1/4"	483	252	117	114	144	92	125	89	64	78

Fuente: BARNES de Colombia S.A. Bombas GS en hierro fundido con motor eléctrico. [En línea]. Recuperado: 10 abril 2019. Formato archivo (pdf). Disponible en: http://barnes.com.co/fichas_tecnicas/GS/1800/Ficha%20GE%201.25A%201800.pdf. p. 1.

4.2 SISTEMA DE GENERACIÓN Y MITIGACIÓN DEL GOLPE DE ARIETE

Tras realizar los respectivos cálculos del diseño detallado de la herramienta se procedió a determinar los cálculos del sistema de generación mitigación del golpe

de ariete para el caso crítico, el cual corresponde al escenario donde la altura en el tanque de cabecera es máxima; es decir, 1,13 m.

4.2.1 Sistema de generación del golpe de ariete. Basado en el modelo matemático propuesto en el capítulo uno, se procedió a calcular todas las variables que se ven involucradas, para obtener el valor del golpe de ariete, a partir de los datos que aparecen en el **Cuadro 11**.

Cuadro 11. Datos para el cálculo del golpe de ariete.

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidades
Diámetro interno	D	0,0519938	m
Longitud tubería descarga análisis	L	1,98	m
Caudal	Q	0,0025	m ³ /s
Velocidad del flujo	V	4,7098	m/s
Pérdidas de carga (Pérdidas de descarga análisis)	J	18,0658	m
Módulo elástico de la tubería	E	3×10^8	kg/m ²
Espesor de la tubería	e	0,0039	m
Altura geométrica	H	1,1306	m
Gravedad	g	9,81	m/s ²

Fuente: elaboración propia.

4.2.1.1 Celeridad. Con base en la **Ecuación 3**, titulada ecuación simplificada de celeridad, se procedió a calcular la celeridad así:

Ecuación 36. Cálculo de la celeridad.

$$a = \frac{9.900}{\sqrt{48,3 + \frac{10^{10}}{E} * \frac{D}{e}}} = \frac{9.900}{\sqrt{48,3 + \frac{10^{10}}{3 * 10^8 \text{ kg/m}^2} * \frac{0,0519 \text{ m}}{0,0039 \text{ m}}}} = 446,6108 \frac{m}{s}$$

Fuente: elaboración propia con base en ROSICH, E. M. El Golpe De Ariete En Impulsiones. Servicio de Publicaciones E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, 1974. 9788460064596. p. 12.

Donde:

a : celeridad [m/s].

g : gravedad [m/s²].

D : diámetro interno de la tubería [m].

E : módulo elástico del material de la tubería [kg/m²].

e : espesor de la tubería [m].

4.2.1.2 Periodo. Aplicando la **Ecuación 4**, se procedió a realizar el cálculo del periodo como se muestra a continuación:

Ecuación 37. Cálculo del periodo.

$$T^* = \frac{2L}{a} = \frac{2 (1,98 \text{ m})}{446,6108 \text{ m/s}} = 0,008866 \text{ s}$$

Fuente: elaboración propia con base en ROSICH, E. M. El Golpe De Ariete En Impulsiones. Servicio de Publicaciones E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, 1974. 9788460064596. p. 8.

Donde:

T^* : periodo [s].

L : longitud de la tubería de descarga [m].

a : celeridad [m/s].

4.2.1.3 Altura manométrica. Fue necesario calcular este valor de presión con el fin de poder determinar el valor de golpe de ariete. Está dada por la altura geométrica del sistema y las pérdidas del mismo así:

Ecuación 38. Cálculo de la altura manométrica.

$$\begin{aligned} H_m &= J + H = 18,0658 \text{ m} + 1,13 \text{ m} \\ H_m &= 18,0658 \text{ m} + 1,13 \text{ m} \\ H_m &= 19,1958 \text{ m} \end{aligned}$$

Fuente: elaboración propia con base en ROSICH, E. M. El Golpe De Ariete En Impulsiones. Servicio de Publicaciones E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, 1974. 9788460064596. p. 18.

Donde:

H_m : altura manométrica [m].

J : pérdidas de carga [m].

H : altura geométrica [m].

4.2.1.4 Pendiente Hidráulica. Con base en la **Ecuación 8** se procedió a realizar el cálculo de la pendiente hidráulica, con la cual, se determinó si el golpe de ariete correspondía a una impulsión larga o corta aplicando la siguiente ecuación:

Ecuación 39. Cálculo de la pendiente hidráulica.

$$\frac{H_m}{L} = \frac{19,1958 \text{ m}}{1,98 \text{ m}} * 100\% = 969,48\%$$

Fuente: elaboración propia con base en ROSICH, E. M. El Golpe De Ariete En Impulsiones. Servicio de Publicaciones E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, 1974. 9788460064596. p. 18.

Donde:

H_m : altura manométrica [m].

L : longitud de la tubería de descarga [m].

4.1.2.5 Tiempo de parada. Este es uno de los parámetros decisivos del proyecto dado que con este valor se caracteriza el fenómeno del golpe de ariete. Teniendo en cuenta que el diseño mecánico propone su desarrollo bajo la condición crítica se escogió el escenario donde se debe tener el mayor tiempo de parada para reproducir el golpe de ariete; dicho escenario corresponde cuando se tiene el mayor grado de apertura de la válvula (100%) operando con menor velocidad (1,1774 m/s), por lo cual es necesario tener un choque brusco para generar la sobrepresión. Se calculó mediante la ecuación simplificada del tiempo de parada **Ecuación 7**, tomando como referencia los resultados obtenidos en las gráficas de las constantes C y K de las **Figuras 11 y 12**.

Cabe resaltar, que para el cálculo de la constante C es necesario remitirse al resultado de la **Ecuación 39** donde se observa que se presenta una pendiente hidráulica bastante alta teniendo un valor de 969,48%; en este caso el Doctor Mendiluce afirma que “El coeficiente C va reduciéndose progresivamente hasta cero para pendientes entre el 20 y 40 por cien”³⁶ ; por tal motivo, para pendientes mayores al 40% este coeficiente se desprecia teniendo valor nulo para la ecuación puesto que la parada del órgano de control es demasiado rápida.

Ecuación 40. Cálculo tiempo de parada.

$$T = C + \frac{KLV}{g H_m} = \frac{2 * 1,98 \text{ m} * 1,1774 \text{ m/s}}{9,81 \text{ m/s}^2 * 19,1958 \text{ m}} = 0,0247 \text{ s}$$

Fuente: elaboración propia con base en ROSICH, E. M. El Golpe De Ariete En Impulsiones. Servicio de Publicaciones E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, 1974. 9788460064596. p. 17

Donde:

C: coeficiente en función de la pendiente hidráulica [adim].

K: coeficiente en relación de la inercia [adim].

L: longitud de la tubería de descarga [m].

V: velocidad de flujo [m/s].

g: gravedad [m/s²].

H_m: altura manométrica [m].

Cabe señalar que este cálculo se realizó con el fin de determinar el tiempo de parada propio del sistema con el fin de observar el valor mínimo que debe tener este parámetro. Por tal motivo se escoge una electroválvula que dentro de sus parámetros funcionales tiene un tiempo de cierre de 0,03 s el cual cumple satisfactoriamente con generar el golpe de ariete en todos los casos de estudio.

4.1.2.6 Longitud crítica. Con base a la **Ecuación 9**, se calculó la longitud crítica como se muestra a continuación:

³⁶ ROSICH, E. M. El Golpe De Ariete En Impulsiones. Op. Cit., p. 18.

Ecuación 41. Cálculo de la longitud crítica.

$$L_c = \frac{a T}{2} = \frac{446,6108 \text{ m/s} * 0,03 \text{ s}}{2} = 6,6991 \text{ m}$$

Fuente: elaboración propia con base en ROSICH, E. M. El Golpe De Ariete En Impulsiones. Servicio de Publicaciones E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, 1974. p. 8.

Donde:

L_c : longitud crítica [m].

a : celeridad [m/s].

T : tiempo de parada [s].

4.1.2.7 Golpe de ariete. Con base en los resultados obtenido al calcular el periodo y el tiempo de parada, se determinó que el tiempo de parada es mayor al periodo, es decir $T > T^*$; sin embargo, el autor Rosich propone que “cuando la pendiente hidráulica supera un 50% es recomendable la aplicación exclusiva de la fórmula de Allievi, ya que en estos casos la parada es muy rápida”³⁷; por tal motivo, el golpe de ariete se calculó para descargas cortas mediante la **Ecuación 11**.

Ecuación 42. Cálculo del golpe de ariete en descargas largas.

$$\Delta H = \frac{a V}{g} = \frac{446,6108 \text{ m/s} * 4,71031559 \text{ m/s}}{9,81 \text{ m/s}^2} = 214,4209 \text{ m}$$

Fuente: elaboración propia con base en ROSICH, E. M. El Golpe De Ariete En Impulsiones. Servicio de Publicaciones E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, 1974. p. 7

Donde:

ΔH : golpe de ariete en descargas largas [m].

a : celeridad [m/s].

V : velocidad de flujo [m/s].

g : gravedad [m/s^2].

4.1.2.8 Sobrepresión. Se calculó a través de la siguiente expresión:

Ecuación 43. Cálculo de la sobrepresión.

$$H + \Delta H = 1,13 \text{ m} + 214,4209 \text{ m} = 215,5515 \text{ m}$$

Fuente: ROSICH, E. M. El Golpe De Ariete En Impulsiones. Servicio de Publicaciones E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, 1974. p. 7

Donde:

ΔH : golpe de ariete en descargas largas [m].

H : altura geométrica [m].

³⁷ ROSICH, E. M. El Golpe De Ariete En Impulsiones, Op. Cit., p. 19.

En la **Tabla 11** aparecen consolidados los resultados obtenidos para cada variable del cálculo de generación de golpe de ariete.

Tabla 11. Resultados de las variables para la generación golpe de ariete.

Variable	Símbolo	Valor	Unidades
Celeridad	a	446,6108	m/s
Periodo	T^*	0,0089	s
Coeficiente K	K	2	-
Altura manométrica	H_m	19,1958	m
Pendiente hidráulica	H_m/L	969,48	%
Coeficiente C	C	0	-
Tiempo de parada	T	0,03	s
Longitud crítica	L_c	6,6991	m
Golpe de ariete en descarga corta	ΔH	214,4209	m
		215,5515	m
Sobrepresión	$H + \Delta H$	2111,9745	kPa
		306,6819	psi

Fuente: elaboración propia.

4.2.2 Sistema de mitigación del golpe de ariete. Para el cálculo de la mitigación del golpe de ariete se emplearon los siguientes datos de la sección de tubería de descarga (análisis) que aparecen consolidados en el **Cuadro 12**.

Cuadro 12. Datos para el cálculo de la mitigación golpe de ariete.

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidades
Golpe de ariete en descarga corta	ΔH	214,4209	m
Longitud tubería descarga análisis	L	1,98	m
Sobrepresión	$H + \Delta H$	215,5515	m
Longitud a la cual se pondrá el calderín	L_B	1,8	m
Área de flujo	S	$2,1232 \times 10^{-3}$	m ²
Caudal	Q	0,01	m ³ /s
Pérdidas en la sección	h	18,06585	m
Valor admisible de sobrepresión	r	10	%
Relación pérdidas en la sección y en el calderín	r_f	10	-
Pérdidas causadas por el calderín	$h_{pscalderin}$	180,6585	m

Fuente: elaboración propia.

Para determinar las dimensiones aproximadas del calderín se propuso el siguiente procedimiento:

4.2.2.1 Depresión mínima. Se determinó a partir de la **Ecuación 44**, como se observa a continuación:

Ecuación 44. Depresión mínima.

$$|S_{mín}| = \left(\frac{L}{L - L_B} \right) (r * (H + \Delta H)) - h_{ps_{calderín}}$$
$$|S_{mín}| = \left(\frac{1,98 \text{ m}}{1,98 \text{ m} - 1,8 \text{ m}} \right) (0,1 * (215,5515 \text{ m}) - 180,6585 \text{ m})$$
$$|S_{mín}| = 56,4481 \text{ m}$$

Fuente: CASTILLO, U. M. y DELCASTILLO, U. M. Teoría Del Golpe De Ariete Y Sus Aplicaciones En Ingeniería Hidráulica. Limusa, 1987. p. 209

Donde:

$|S_{mín}|$: *depresión mínima [m].*

L : *longitud de la tubería de descarga [m].*

L_B : *longitud a la cual se pondrá el calderín [m].*

r : *valor admisible de sobrepresión [adim].*

$H + \Delta H$: *sobrepresión [m].*

$h_{ps_{calderín}}$: *pérdidas causadas por el calderín [m].*

4.2.2.2 Volumen mínimo de aire. Para calcular este valor se determinó inicialmente la depresión mínima con relación a las pérdidas totales de la sección de tubería descarga análisis $|S_{mín}/h|$ obteniendo un valor de 3,1245 m, y junto con el valor de r_f 10 se ingresó a las cartas para tanques de oscilación y cámaras de aire de la figura 6,17 del **ANEXO B**, para obtener el valor del factor $(S_{o_{mín}}/h)$ que hace parte de la ecuación del volumen mínimo de aire que se presenta a continuación:

Ecuación 45. Volumen mínimo de aire.

$$C_{o_{\min}} = \frac{((H + \Delta H) * L)}{g * S \left(\frac{h_{pp}}{1,10 * Q} \right)^2 \left(\frac{S_{o_{\min}}}{h_{f1}} \right)^2}$$
$$C_{o_{\min}} = \frac{(215,5515 \text{ m} * 1,98 \text{ m})}{9,81 \text{ m/s}^2 * (2,123 * 10^{-3} \text{ m}^2) \left(\frac{18,0437 \text{ m}}{1,10 * 0,01 \text{ m}^3/\text{s}} \right)^2 (6,75)^2}$$
$$C_{o_{\min}} = 1,6675 * 10^{-4} \text{ m}^3$$

Fuente: CASTILLO, U. M. y DELCASTILLO, U. M. Teoría Del Golpe De Ariete Y Sus Aplicaciones En Ingeniería Hidráulica. Limusa, 1987. p. 209

Donde:

$C_{o_{\min}}$: volumen mínimo de aire [m^3].

$H + \Delta H$: sobrepresión [m].

L : longitud de la tubería de descarga [m].

g : gravedad [m/s^2].

S : área de flujo [m^2].

Q : caudal [m^3/s].

h_{pp} : pérdidas primarias [m].

4.2.2.3 Volumen máximo de aire. Su valor se determinó a partir de la siguiente ecuación:

Ecuación 46. Volumen máximo de aire.

$$C_{o_{\max}} = 1,10 * C_{o_{\min}}$$
$$C_{o_{\max}} = 1,10 * (1,6675 * 10^{-4} \text{ m}^3) = 1,8342 * 10^{-4} \text{ m}^3$$

Fuente: CASTILLO, U. M. y DELCASTILLO, U. M. Teoría Del Golpe De Ariete Y Sus Aplicaciones En Ingeniería Hidráulica. Limusa, 1987. p. 211.

Donde:

$C_{o_{\min}}$: volumen mínimo de aire [m^3].

$C_{o_{\max}}$: volumen máximo de aire [m^3].

4.2.2.4 Factor $|S'_{o_{\min}}/h_{f1}|$. Este factor se determinó a través de la siguiente ecuación y se utilizó para calcular la depresión mínima en el calderín:

Ecuación 47. Factor $|S'_{o\min}/h_{f1}|$.

$$\left| \frac{S'_{o\min}}{h_{f1}} \right| = \frac{1,10 Q}{h} \sqrt{\frac{(L * (H + \Delta H))}{g * S * C_{o\max}}}$$

$$\left| \frac{S'_{o\min}}{h_{f1}} \right| = \frac{1,10 (0,01 \text{ m}^3/\text{s})}{18,06585 \text{ m}} \sqrt{\frac{(1,98 \text{ m} * 215,5515 \text{ m})}{9,81 \text{ m}/\text{s}^2 (2,1232 * 10^{-3} \text{ m}^2) (1,8342 * 10^{-4} \text{ m}^3)}}$$

$$\left| \frac{S'_{o\min}}{h_{f1}} \right| = 6,4359$$

Fuente: CASTILLO, U. M. y DELCASTILLO, U. M. Teoría Del Golpe De Ariete Y Sus Aplicaciones En Ingeniería Hidráulica. Limusa, 1987. p. 211

Donde:

Q : caudal [m^3/s].

h_{pp} : pérdidas primarias [m].

L : longitud de la tubería de descarga [m].

$H + \Delta H$: sobrepresión [m].

g : gravedad [m/s^2].

S : área de flujo [m^2].

$C_{o\max}$: volumen máximo de aire [m^3].

4.2.2.5 Depresión mínima durante el flujo transitorio. Este valor se obtuvo mediante la siguiente ecuación en donde $|S'_{\min}/h|$ es la depresión mínima con relación a las pérdidas primarias de la sección de tubería descarga análisis durante el flujo transitorio que es calculado mediante la figura 6,17 del **ANEXO B**, obteniendo un valor de 3.

Ecuación 48. Depresión mínima durante el flujo transitorio.

$$|S'_{\min}| = h * \left| \frac{S'_{\min}}{h_{pp}} \right| = 18,0658 \text{ m} * (3)$$

$$|S'_{\min}| = 54,1975 \text{ m}$$

Fuente: CASTILLO, U. M. y DELCASTILLO, U. M. Teoría Del Golpe De Ariete Y Sus Aplicaciones En Ingeniería Hidráulica. Limusa, 1987. p. 211

Donde:

$|S'_{\min}|$: depresión mínima durante el flujo transitorio [m].

h_{pp} : pérdidas primarias [m].

4.2.2.6 Volumen máximo de aire en el flujo transitorio. Se obtuvo mediante la siguiente ecuación; en donde se consideró un comportamiento politrópico dentro del calderín:

Ecuación 49. Depresión mínima durante el flujo transitorio.

$$C_{m\acute{a}x} = C_{o_{m\acute{a}x}} \left[\frac{(H + \Delta H) + h}{(H + \Delta H) - |S'_{m\acute{i}n}|} \right]^{0,83}$$

$$C_{m\acute{a}x} = 1,8388 * 10^{-4} m^3 \left[\frac{215,5515 m + 18,0658 m}{215,5515 m - 54,1975 m} \right]^{0,83}$$

$$C_{m\acute{a}x} = 2,4937 * 10^{-4} m^3$$

Fuente: CASTILLO, U. M. y DELCASTILLO, U. M. Teoría Del Golpe De Ariete Y Sus Aplicaciones En Ingeniería Hidráulica. Limusa, 1987. p. 211

Donde:

$C_{m\acute{a}x}$: volumen máximo de aire en el flujo transitorio [m^3].

$C_{o_{m\acute{a}x}}$: volumen máximo de aire [m^3].

$H + \Delta H$: sobrepresión [m].

h_{pp} : pérdidas primarias [m].

$|S'_{m\acute{i}n}|$: depresión mínima durante el flujo transitorio [m].

En la **Tabla 12** se sintetiza la información requerida para el dimensionamiento del calderín.

Tabla 12. Resultados de las variables para la mitigación del golpe de ariete.

Variable	Símbolo	Valor	Unidades
Depresión mínima	$ S_{m\acute{i}n} $	56,4481	m
Factor $ S_{m\acute{i}n}/h_{pp} $	$ S_{m\acute{i}n}/h_{pp} $	3,1245	-
Factor $ S_{o_{m\acute{i}n}}/h_{f1} $	$ S_{o_{m\acute{i}n}}/h_{f1} $	6,75	-
Volumen mínimo de aire	$C_{o_{m\acute{i}n}}$	$1,6675 \times 10^{-4}$	m^3
Volumen máximo de aire	$C_{o_{m\acute{a}x}}$	$1,8342 \times 10^{-4}$	m^3
Factor $ S'_{o_{m\acute{i}n}}/h_{f1} $	$ S'_{o_{m\acute{i}n}}/h_{f1} $	6,4359	-
Factor $ S'_{o_{m\acute{i}n}}/h_{pp} $	$ S'_{m\acute{i}n}/h_{pp} $	3	-
Depresión mínima durante el flujo transitorio	$S'_{m\acute{i}n}$	54,1975	m
Volumen máximo de aire en el flujo transitorio	$C_{m\acute{a}x}$	0,00025	m^3
Volumen de la cámara de aire	C_c	0,002	m^3

Fuente: elaboración propia.

Una vez obtenido el valor del volumen máximo de aire dentro del calderín se procedió a seleccionar dicho componente. Utilizando el catálogo de calderines AMF IBAIONDO se observa que el calderín de menor capacidad es de 2 L el cual fue el seleccionado. Se escogió este fabricante debido a que es una empresa especializada en la fabricación de calderines y dispositivos de aire para controlar el golpe de ariete; también, es una de las pocas empresas que dentro de su catálogo tiene dispositivos de baja capacidad, lo cual permite que estos sean adaptables para aplicaciones experimentales.

Para el diseño del calderín se tomaron en cuenta sus características tales como volumen, altura, diámetro, presión de precarga tal y como se muestra en la **Tabla 13**.

Tabla 13. Características del calderín de 2L.

Variable	Valor
Volumen del calderín (m ³)	0,002
Volumen aire (m ³)	0,00025
Volumen agua (m ³)	0,00175
Diámetro (m)	0,11
Altura (m)	0,245
Altura del líquido (m)	0,1841
Presión de precarga (bar)	0,6

Fuente: elaboración propia.

Cabe resaltar, que para poder calcular teóricamente la sobrepresión generada con el calderín instalado se trae a colación la teoría del ingeniero del Castillo evidenciada en la **Ecuación 50**. Adicionalmente, para el desarrollo de la ecuación se tomó como referencia el caso crítico que presentaba el mayor golpe de ariete teniendo un valor de 214,4209 m con una cabeza estática de 1,1306 m

Ecuación 50. Sobrepresión con calderín.

$$S_C = H - H_{LC} + (r * \Delta H)$$

$$S_C = 1,1306 \text{ m} - 0,1841 \text{ m} + (0,1 * 214,4209 \text{ m})$$

$$S_C = 22,3885 \text{ m}$$

Fuente: CASTILLO, U. M. y DELCASTILLO, U. M. Teoría Del Golpe De Ariete Y Sus Aplicaciones En Ingeniería Hidráulica. Limusa, 1987. p. 221. Modificado por los autores.

Donde:

H : altura geométrica [m].

H_{LC} : altura del líquido en el calderín [m].

r : valor admisible de sobrepresión [adim].

ΔH : golpe de ariete [m].

S_C : sobrepresión con calderín [m].

4.3 SISTEMA ESTRUCTURAL

En este apartado se calculó el sistema estructural; el cual, es el encargado de brindar soporte y rigidez a la herramienta de análisis del golpe de ariete. Para tal cálculo se tomó como referencia el concepto de uniformidad; en donde, se busca mantener constante tanto el material como el tipo de perfil de las vigas y columnas seleccionadas. Basado en lo anteriormente mencionado; se procedió a realizar el cálculo para los elementos críticos y así poder determinar si el elemento es satisfactorio para soportar las cargas de la herramienta.

Cabe resaltar que las dimensiones de la estructura se ajustaron al espacio disponible del laboratorio de mecánica de fluidos para su ubicación. Toda la estructura está fabricada de acero ASTM A36, en vista que según sus propiedades mecánicas que aparecen consolidados en el **Cuadro 13**, es un acero con alta resistencia, adecuado para la fabricación de vigas soldadas, estructuras remachadas, y atornilladas.

Cuadro 13. Propiedades del acero ASTM A36.

Esfuerzo de Fluencia σ_y		Módulo de elasticidad E	
MPa	kgf/mm ²	GPa	kgf/mm ²
250	25,3	200	20.400

Fuente: elaboración propia con base en SUMITEC. ACERO ESTRUCTURAL: acero ASTM A36. [En línea]. Recuperado en: 30 abril 2019. Formato archivo (pdf). Disponible en: <http://www.sumiteccr.com/acero/estructural/AE01.pdf>. p. 1.

4.3.1 Cargas sobre la lámina. Es de suma importancia determinar el espesor mínimo que debe tener las láminas que soportaran el peso tanto del tanque de cabecera como el peso de la bomba y el depósito. Para esto se hizo el análisis de la placa que soportaba más peso, la cual hace referencia a la encargada de soportar la bomba y el depósito. En el **Cuadro 14** se recopiló la información que se utilizó para realizar dicho cálculo.

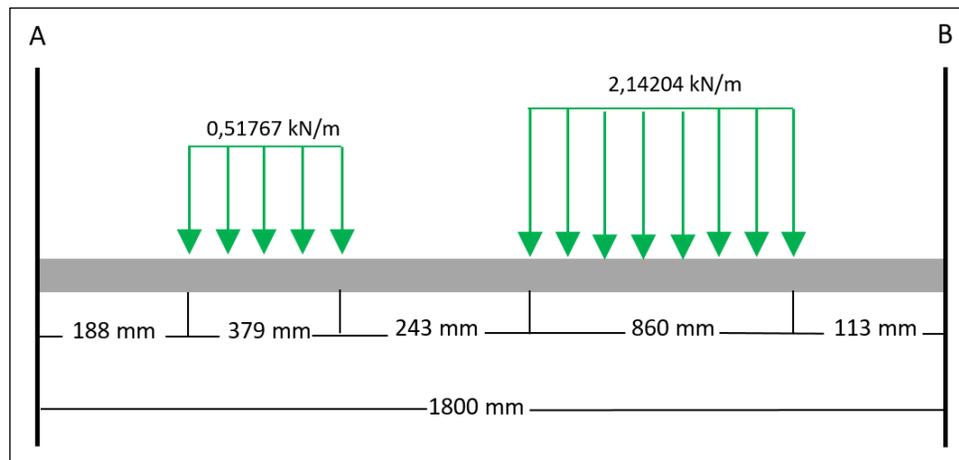
Cuadro 14. Cargas sobre la lámina.

Componente	Peso (kN)	Ancho (m)	Carga distribuida (kN/m)
Bomba	0,1962	0,379	0,5176781
Depósito	1,842161	0,86	2,1420477

Fuente: elaboración propia.

Se procedió a establecer en la **Figura 31** el diagrama de cuerpo libre con el fin de determinar las reacciones en los apoyos, es decir, los momentos y las fuerzas sobre el eje Y; así:

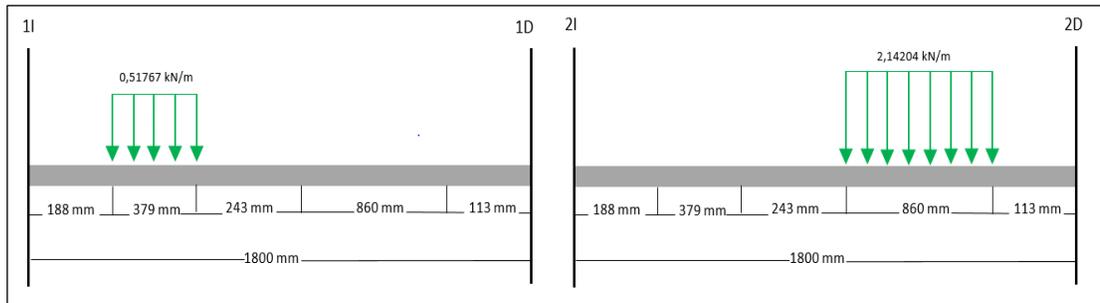
Figura 31. Diagrama de cuerpo libre.



Fuente: elaboración propia.

Teniendo en cuenta que el diagrama de cuerpo libre es un análisis de viga hiperestática, porque se encuentra empotrado en ambos extremos se procedió a realizar el análisis mediante las constantes de momento de empotramiento; no obstante, al ser una viga con dos cargas distribuidas se debe realizar el análisis con cada carga por separado como se muestra en la **Figura 32**.

Figura 32. Diagrama de cargas distribuidas para análisis de la lámina.



Fuente: elaboración propia.

Una vez calculado estos momentos de empotramiento se tiene que los momentos totales se rigen bajo la siguiente ecuación:

Ecuación 51. Momentos totales de la lámina.

$$M_A = M_{1I} + M_{2I}$$

$$M_B = M_{1D} + M_{2D}$$

$$M_A = 0,044468 \text{ kN} \cdot m + 0,2253 \text{ kN} \cdot m = 0,269769 \text{ kN} \cdot m$$

$$M_B = -0,012759 \text{ kN} \cdot m - 0,42228 \text{ kN} \cdot m = -0,43504 \text{ kN} \cdot m$$

Fuente: elaboración propia.

Donde:

M_A : momento en A [$kN \cdot m$].

M_B : momento en B [$kN \cdot m$].

Con base en estos datos se procedió a calcular las reacciones en los apoyos, en donde únicamente resultó de interés conocer las reacciones en el eje Y. Para ello, se realizó la sumatoria de momentos respecto a un punto con el fin de conocer la magnitud de una reacción.

Ecuación 52. Reacción de B de la lámina.

$$\Sigma M_A = 0$$

$$M_A - M_B - (0,1962 \text{ kN} \cdot 0,3775 \text{ m}) - (1,8421 \text{ kN} \cdot 1,24 \text{ m}) + (R_{BY} \cdot 1,8 \text{ m}) = 0$$

$$R_{BY} = 1,402 \text{ kN}$$

Fuente: elaboración propia.

Donde:

ΣM_A : sumatoria de momentos en A [$kN \cdot m$].

M_B : momento en B [$kN \cdot m$].

R_{By} : reacción de B en el eje Y [kN].

Luego se llevó a cabo la sumatoria de fuerzas en Y para finalizar el proceso de caculo de reacciones.

Ecuación 53. Reacción de A de la lámina.

$$\begin{aligned} \Sigma F_Y &= 0 \\ R_{Ay} - F_{Bom} - F_{Dep} + R_{By} &= 0 \\ R_{Ay} &= 0,1962kN + 1,8421kN - 1,402kN = 0,63635kN \end{aligned}$$

Fuente: elaboración propia.

Donde:

R_{Ay} : reacción de A en el eje Y [kN].

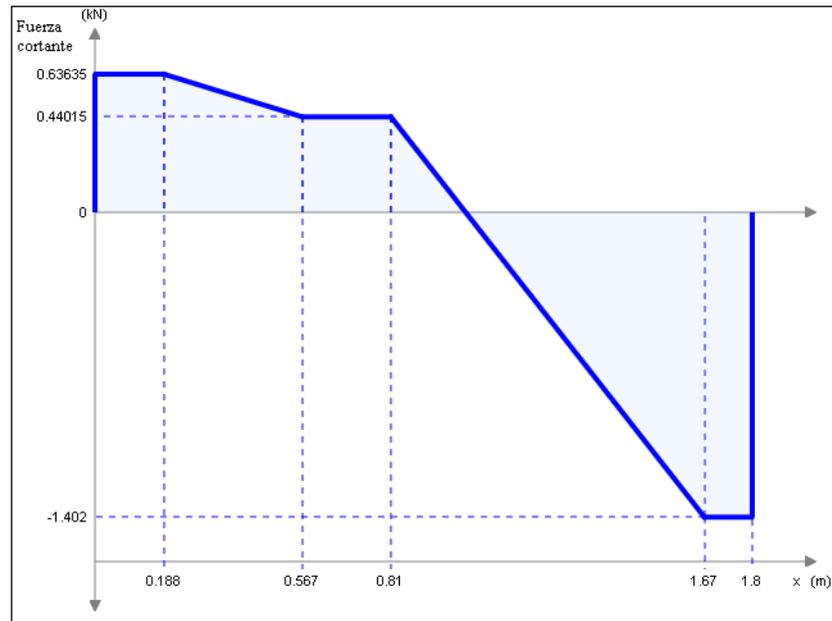
R_{By} : reacción de B en el eje Y [kN].

F_{Bom} : fuerza sobre la bomba [kN].

F_{Dep} : fuerza sobre el depósito [kN].

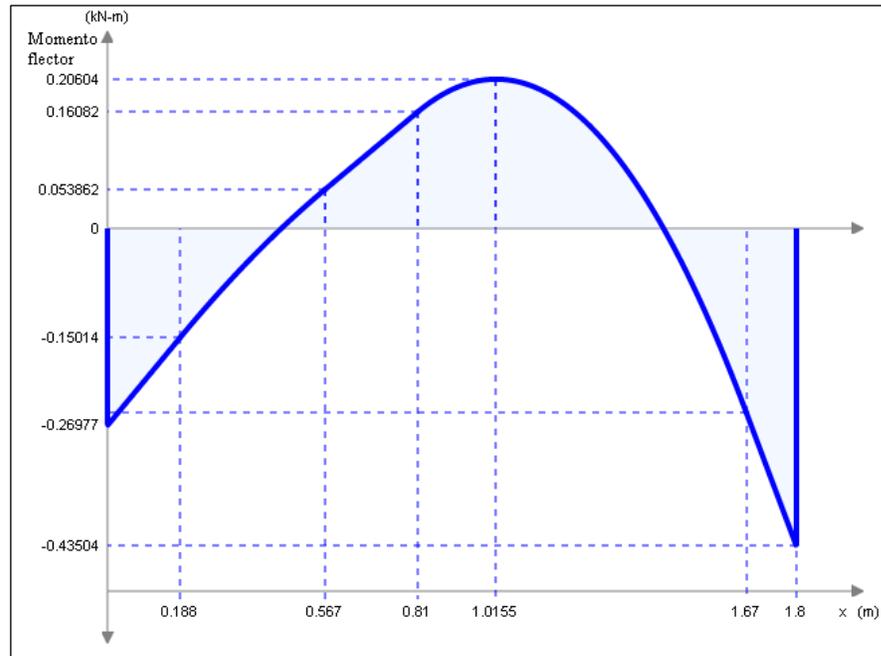
Una vez calculada las reacciones se procedió a determinar los diagramas de fuerza cortante y momento flector como se muestra respectivamente en las **Figuras 33 y 34**. De estos diagramas se extrajo el momento flector máximo al que está sometido el elemento en cuestión; con este dato se realizaron los cálculos pertinentes para determinar el espesor de la lámina.

Figura 33. Diagrama de fuerza cortante de la lámina.



Fuente: elaboración propia.

Figura 34. Diagrama de momento flector de la lámina.



Fuente: elaboración propia.

Para determinar el espesor de la lámina se hizo uso de la ecuación de esfuerzo flexionante que se presenta a continuación:

Ecuación 54. Esfuerzo flexionante.

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{M}{S}$$

$$S = 1/6 b * d^2$$

Fuente: BUDYNAS, R. G. y NISBETT, J. K. Diseño En Ingeniería Mecánica De Shigley (9a. Ed.). 2012. 9781456245238. p. 86.

Donde:

$\sigma_{m\acute{a}x}$: Esfuerzo flexionante máximo [MPa].

M : Momento flector máximo [kN * m].

S : módulo de sección [m³].

b : ancho [m].

d : espesor [m].

No obstante; fue necesario indicar un factor de seguridad con el fin de brindar certeza ante imprevisto e incertidumbres. Para ello, el ingeniero Davim³⁸ afirma que

³⁸ DAVIM, J. P. Introduction to Mechanical Engineering. Springer International Publishing, 2018. 9783319784885. p. 20.

para uso con materiales confiables donde la carga y las condiciones ambientales no son severas es recomendable un valor de 1,5.

Ecuación 55. Esfuerzo máximo permisible.

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{\sigma_y}{FS} = \frac{250MPa}{1,5} = 166,67 MPa$$

Fuente: BUDYNAS, R. G. y NISBETT, J. K. Diseño En Ingeniería Mecánica De Shigley (9a. Ed.). 2012. 9781456245238. p. 86.

Donde:

$\sigma_{m\acute{a}x}$: Esfuerzo flexionante máximo [MPa].

σ_y : esfuerzo de fluencia del material [MPa].

FS: factor de seguridad [adim].

Despejando la **Ecuación 54** en la **Ecuación 55** se obtuvo que el espesor está dado por la siguiente ecuación:

Ecuación 56. Cálculo de espesor de una lámina.

$$d = \sqrt{\frac{6 * M}{b * \sigma_{m\acute{a}x}}} = \sqrt{\frac{6 * 0,435046 kN * m}{1,1m * 166,67MPa}} = 3,77 * 10^{-3}m = 3,77mm$$

Fuente: elaboración propia con base en BUDYNAS, R. G. y NISBETT, J. K. Diseño En Ingeniería Mecánica De Shigley (9a. Ed.). 2012. 9781456245238. p. 86.

Donde:

d : espesor [m].

M : momento flector máximo [kN * m].

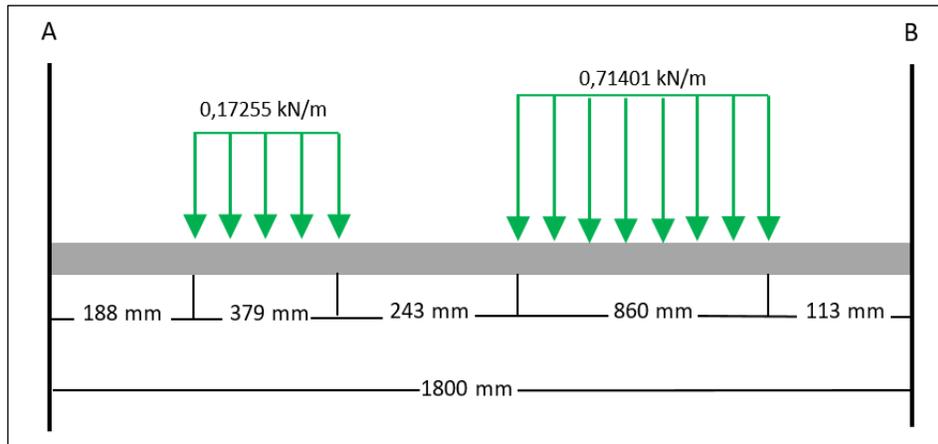
b : ancho [m].

$\sigma_{m\acute{a}x}$: esfuerzo flexionante máximo [MPa].

El espesor mínimo que debe tener la lámina para que soporte la carga y no presente deflexiones es 3,77 mm; por tal motivo, se escogió el espesor comercial mayor más cercano a este dato; teniendo un resultado de una lámina de acero A36 de 6,4 mm de espesor.

4.3.2 Viga Crítica. En cuanto al cálculo de la viga crítica; está se repartió para 3 vigas paralelas por lo cual las cargas se dividirán en 3 como se muestra en la **Figura 35**.

Figura 35. Diagrama viga crítica.



Fuente: elaboración propia.

Realizando el mismo procedimiento que se llevó a cabo con la lámina se obtuvo los siguientes datos de momentos y reacciones de la viga crítica, consolidados en la **Tabla 14**.

Tabla 14. Reacciones en la viga crítica.

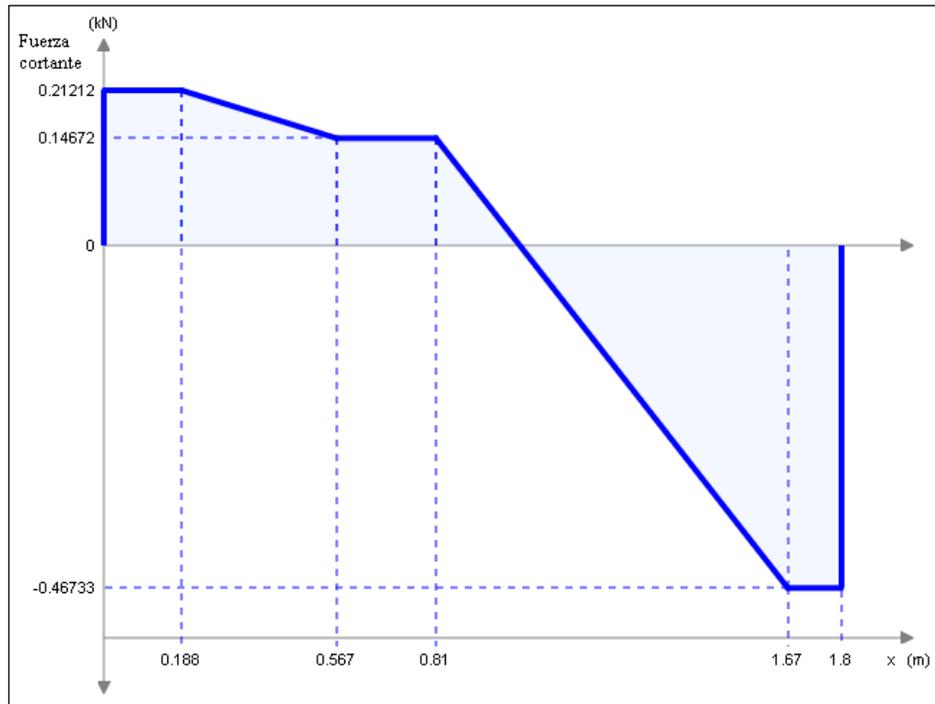
Momentos		Reacciones	
M_A (kN*m)	M_B (kN*m)	R_{By} (kN)	R_{Ay} (kN)
0,08992303	0,14501547	0,2121618	0,4673375

Fuente: elaboración propia.

A continuación, se observan las **Figuras 36 y 37** que corresponden a los diagramas de fuerza cortante y momento flector. Fue necesario realizar estos diagramas con el fin de determinar el módulo de sección de la viga y así poder efectuar su respectiva selección.

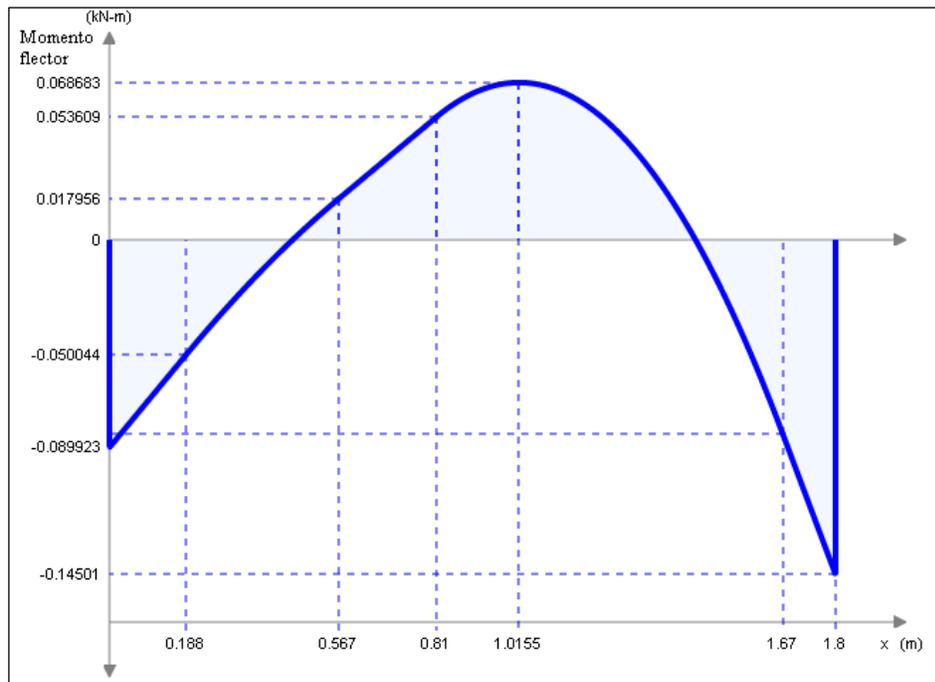
Es necesario resaltar; que para este caso las cargas son menores con respecto a las soportadas por la lámina, por lo cual, presentará las mismas trayectorias, pero con diferentes valores.

Figura 36. Diagrama de fuerza cortante de la viga crítica.



Fuente: elaboración propia.

Figura 37. Diagrama de momento flector de la viga crítica.



Fuente: elaboración propia.

Despejando de la **Ecuación 54** el módulo de sección se obtiene la siguiente expresión:

Ecuación 57. Módulo de sección.

$$S = \frac{M}{\sigma_{m\acute{a}x}} = \frac{0,14501 \text{ kN} * \text{m}}{166,67 \text{ MPa}} = 8,7 * 10^{-7} \text{ m}^3$$

Fuente: elaboración propia con base en BUDYNAS, R. G. y NISBETT, J. K. Diseño En Ingeniería Mecánica De Shigley (9a. Ed.). 2012. 9781456245238. p. 86.

Donde:

S : módulo de sección [m^3].

M : momento flector máximo [$\text{kN} * \text{m}$].

$\sigma_{m\acute{a}x}$: esfuerzo flexionante máximo [MPa].

Teniendo este valor de espesor fue posible seleccionar un perfil cuadrado de 20x20 cm; el cual, tiene un módulo de sección de $9,1155 * 10^{-7} \text{ m}^3$; por lo cual el factor de seguridad recalculado estaría dado por la ecuación:

Ecuación 58. Factor de seguridad.

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{M}{S} = \frac{0,14501 \text{ kN} * \text{m}}{9,1155 * 10^{-7} \text{ m}^3} = 159,08 \text{ MPa}$$
$$FS = \frac{\sigma_y}{\sigma_{m\acute{a}x}} = \frac{250 \text{ MPa}}{159,08 \text{ MPa}} = 1,57$$

Fuente: elaboración propia con base en BUDYNAS, R. G. y NISBETT, J. K. Diseño En Ingeniería Mecánica De Shigley (9a. Ed.). 2012. 9781456245238. p. 86.

Donde:

$\sigma_{m\acute{a}x}$: esfuerzo flexionante máximo [MPa].

S : módulo de sección [m^3].

M : momento flector máximo [$\text{kN} * \text{m}$].

σ_y : esfuerzo de fluencia del material [MPa].

FS : factor de seguridad [adim].

4.3.3 Análisis del elemento tipo columna. Inicialmente, se procedió a calcular el elemento tipo columna; para esto, fue necesario calcular la carga mayorada del sistema, con la cual se comparó la resistencia del elemento.

Utilizando el principio de uniformidad mencionado anteriormente se seleccionó un perfil cuadrado de 20x20 cm para realizar el análisis de los elementos tipo columna. Para el caso de la columna crítica, se escogió la sección en donde está apoyado el tanque de cabecera y la sección donde se encuentra soportada la bomba y el

depósito. En dichos casos las columnas tienen una longitud de 495 mm y 50 mm respectivamente.

Para realizar el análisis de los elementos tipo columna se utilizó el método del diseño por factores de carga y resistencia (LFRD) en donde se debe cumplir con la siguiente desigualdad:

Ecuación 59. Condición LFRD.

$$Pu \leq R_d$$

Fuente: MC CORMAC, J. Diseño De Estructuras De Acero - 5a Ed. Alfaomega Grupo Editor, 2012. 9786077079279. p. 53.

Donde

Pu: carga mayorada [kgf].

R_d: resistencia de diseño [kgf].

Con el fin de calcular la carga mayorada se utilizó la Norma NSR 10; específicamente el numeral B.2.4 COMBINACIÓN DE CARGAS MAYORADAS UTILIZANDO EL MÉTODO DE RESISTENCIA³⁹; donde se utilizaron las siguientes ecuaciones con el fin de elegir aquella que brinde el mayor valor de carga mayorada teniendo en cuenta que E es fuerza sísmica, D es carga muerta, F es carga debida a fluidos, G es fuerza por granizo, H es carga debida al empuje del suelo, L es carga viva, T es fuerza por temperatura y W es fuerza del viento, tal y como aparece en la **Figura 38**.

Figura 38. Listado de cargas mayoradas.

$$\begin{aligned}
 &1.4(D + F) \\
 &1.2(D + F + T) + 1.6(L + H) + 0.5(L_r \text{ ó } G \text{ ó } L_e) \\
 &1.2D + 1.6(L_r \text{ ó } G \text{ ó } L_e) + (L \text{ ó } 0.8W) \\
 &1.2D + 1.6W + 1.0L + 0.5(L_r \text{ ó } G \text{ ó } L_e) \\
 &1.2D + 1.0E + 1.0L \\
 &0.9D + 1.6W + 1.6H \\
 &0.9D + 1.0E + 1.6H
 \end{aligned}$$

Fuente: PALMAR, J. R. Reglamento De Construcciones Sismorresistentes Nsr-10 Tomo Uno. RAM Ediciones, 2019. 9789589703359. p. 12.

³⁹ PALMAR, J. R. Reglamento De Construcciones Sismorresistentes Nsr-10 Tomo Uno. RAM Ediciones, 2019. 9789589703359

A continuación, se presenta recopilada la información de la combinación de cargas mayoradas del sistema en el **Cuadro 15**.

Cuadro 15. Información carga mayorada del sistema.

Columna	Tipo de carga	Elemento	Fuerza (Kgf)	Carga mayorada (Kgf)		
				Pu ₁	Pu ₂	Pu ₃ = Pu ₄
1 (495mm)	D	Tanque de cabecera	13,69928	82,1033	198,3743	96,4391
	L	Operario	80			
	F	Fluido del tanque de cabecera	44,946			
2 (50mm)	D	Bomba	20	290,8976	377,3408	113,6
		Depósito	8			
	L	Operario	80			
	F	Fluido del depósito	179,784			

Fuente: elaboración propia.

Teniendo calculada la carga mayorada se procedió a determinar la resistencia de diseño; para esto, inicialmente se calculó el factor de característica λ :

Ecuación 60. Factor de característica.

$$\lambda = \frac{kL}{\pi r} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}}$$

Fuente: MC CORMAC, J. Diseño De Estructuras De Acero - 5a Ed. Alfaomega Grupo Editor, 2012. 9786077079279. p. 149.

Donde:

λ : factor de característica [adim].

k : factor de longitud específica (0,5 para columnas empotradas) [adim].

L : longitud de la columna [mm].

r : radio de giro mínimo [mm].

σ_y : esfuerzo de fluencia del material [kgf/mm²].

E : módulo de elasticidad del material [kgf/mm²].

Dependiendo del valor del factor de característica λ se procedió a calcular el esfuerzo crítico mediante la siguiente ecuación:

Ecuación 61. Esfuerzo crítico.

$$\sigma_{cr} = (0,658\lambda^2) * \sigma_y ; \text{sí } \lambda \leq 1,5 \text{ (Columna corta o mediana)}$$

$$\sigma_{cr} = \left(\frac{0,877}{\lambda^2}\right) * \sigma_y ; \text{sí } \lambda > 1,5 \text{ (Columna larga)}$$

Fuente: MC CORMAC, J. Diseño De Estructuras De Acero - 5a Ed. Alfaomega Grupo Editor, 2012. 9786077079279. p. 149.

Donde:

σ_{cr} : *esfuerzo crítico [kgf/mm²].*

σ_y : *esfuerzo de fluencia del material [kgf/mm²].*

λ : *factor de caracterísitca [adim].*

Por último, se calculó la resistencia de diseño mediante la siguiente ecuación:

Ecuación 62. Resistencia de diseño.

$$Rd = \phi * Ag * \sigma_{cr}$$

Fuente: MC CORMAC, J. Diseño De Estructuras De Acero - 5a Ed. Alfaomega Grupo Editor, 2012. 9786077079279. p. 149.

Donde:

Rd : *resistencia de diseño [kgf].*

Φ : *factor de resistencia (0,85) [adim].*

Ag : *área gross de la sección [mm²].*

σ_{cr} : *esfuerzo crítico [kgf/mm²].*

Los datos obtenidos tras resolver las anteriores ecuaciones están condensados en **Cuadro 16**; adicionalmente, se compararon estos valores con la carga mayorada para verificar su resistencia ante las cargas que deben soportar:

Cuadro 16. Resistencia de las columnas.

L mm	σ_y kgf/mm ²	E kgf/mm ²	k	Ag mm ²	r mm	λ	σ_{cr} kgf/mm ²	Rd kgf	Pu ₂ kgf	Criterio
495	25,3	20400	0,5	172	7,1	0,3907	23,733	3469,859	198,374	Soporta
50						0,0394	25,283	3696,448	377,340	Soporta

Dónde: L: factor de longitud específica, σ_y : esfuerzo de fluencia del material, E: módulo de elasticidad del material, k: factor de longitud específica, Ag: área gross de la sección, r: radio de giro mínimo, λ : factor de característica, σ_{cr} : esfuerzo crítico, Rd: resistencia de diseño, Pu₂: carga mayorada.

Fuente: elaboración propia.

Habiendo calculado la resistencia de diseño se procedió a determinar si la columna presenta algún tipo de falla como puede ser pandeo local, por lo cual se realizó un chequeo por esbeltez el cual propone la siguiente desigualdad:

Ecuación 63. Condición de esbeltez.

$$\frac{kL}{r} \leq 200$$

Fuente: MC CORMAC, J. Diseño De Estructuras De Acero - 5a Ed. Alfaomega Grupo Editor, 2012. 9786077079279. p. 149.

Donde:

k: factor de longitud específica (0,5 para columnas empotradas) [adim].

L: longitud de la columna [mm].

r: radio de giro mínimo [mm].

En la **Tabla 15** se encuentran sintetizados los resultados de esbeltez para cada una de las columnas que conforman la estructura de la herramienta de análisis de golpe de ariete.

Tabla 15. Resultados de esbeltez.

L mm	k	r mm	Esbeltez	Criterio
495	0,5	7,1	34,85	Satisfactoria
50			3,52	Satisfactoria

Fuente: elaboración propia.

4.3.4 Soportes. Ya habiendo calculado la estructura se procedió a seleccionar los elementos de sujeción de la tubería; el caso crítico ocurre en la sección de tubería de PVC transparente de análisis donde se realiza la etapa de generación de golpe de ariete. Por tal motivo se debe seleccionar un accesorio que sea capaz de soportar la sobrepresión generada calculada en la **Ecuación 43** evitando así que se originen desajustes de la herramienta.

Inicialmente, se calculó la fuerza que produce tal sobrepresión así:

Ecuación 64. Cálculo de carga de sobrepresión.

$$F = P * A = 2111,97 \text{ kPa} * 0,002123 \text{ m}^2 = 4,4841 \text{ kN}$$

$$m = \frac{F}{g} = \frac{4,4841 \text{ kN}}{9,81 \text{ m/s}^2} = 457,09 \text{ kgf}$$

Fuente: BUDYNAS, R. G. y NISBETT, J. K. Diseño En Ingeniería Mecánica De Shigley (9a. Ed.). 2012. 9781456245238. p. 85.

Donde:

F : fuerza [kN].

P : presión [kPa].

A : área [m^2].

g : gravedad [m/s^2].

Habiendo calculado la fuerza que se generan en las paredes del tubo y que será transmitida tanto a la estructura como al elemento de sujeción se procedió a seleccionar el elemento; teniendo en cuenta que la fuerza es relativamente alta se utilizaron abarcones los cuales están diseñados para este tipo de aplicaciones; el abarcón de 2 pulgadas soporta una carga de 533 kgf por lo cual fue el seleccionado para sujetar los tramos de tubería de PVC, tal y como se observa en el **Cuadro 17**.

Cuadro 17. Características de abarcones.

Diámetro nominal de tubería		Carga máxima recomendada*				Dimensiones Pulgadas				
Pulg.	A Pulg.	343°C Kg	650 °F lb	399°C Kg	750 °F lb	B	C	D	E	F
1/2	1/4	220	485	197	435	15/16	1 3/16	2 3/4	2 1/8	2 5/16
3/4	1/4	220	485	197	435	1 1/8	1 3/8	2 3/4	2 1/8	2 7/32
1	1/4	220	485	197	435	1 3/8	1 5/8	2 3/4	2 1/8	2 3/32
1 1/4	3/8	533	1220	494	1090	1 11/16	2 1/16	2 7/8	2 1/8	2 1/32
1 1/2	3/8	533	1220	494	1090	2	2 3/8	3	2 1/2	2 1/16
2	3/8	533	1220	494	1090	2 7/16	2 13/16	3 1/4	2 1/2	2 1/16
2 1/2	1/2	1025	2260	916	2020	2 15/16	3 7/16	3 3/4	3	2 5/16
3	1/2	1025	2260	916	2020	3 9/16	4 1/16	4	3	2 1/4
3 1/2	1/2	1025	2260	916	2020	4 1/16	4 9/16	4 1/4	3	2 1/4
4	1/2	1025	2260	916	2020	4 9/16	5 1/16	4 1/2	3	2 1/4
5	1/2	1025	22600	916	2020	5 5/8	6 1/8	5	3	2 7/32

Fuente: Construidea. Catálogo de soportería. [En línea]. Recuperado en: 01 febrero 2019. Formato archivo (pdf). Disponible en: http://www.construidea.com/sites/default/files/Catalogo_Soporteria.pdf. p. 13.

Para las secciones de tubería de acero se utilizó abrazaderas omega forjadas para su sujeción, cuyas características dimensionales se encuentran en el **Cuadro 18**.

Cuadro 18. Características abrazaderas omega.

Diámetro nominal del tubo	Dimensiones Pulgadas						Carga máxima recomendada*		Tamaño tornillo
	A	B	C	D	E	F	Kg	lb	
Pulg.									
1/2	3 15/16	1 1/4	2 11/16	1/2	1 1/8	1/8	136.0	300	2 tornillos d 1/4" de diámetro
3/4	4 1/4	1 1/4	3	11/16	1 7/16	1/8	136.0	300	
1	4 1/2	1 1/4	3 1/4	3/4	1 5/8	1/8	136.0	300	
1 1/4	4 15/16	1 1/4	3 11/16	1 11/16	2 1/8	1/8	136.0	300	2 tornillos d 1/4" de diámetro
1 1/2	5 7/16	1 1/4	4 3/16	1 1/4	2 7/16	1/8	136.0	300	
2	6	1 1/4	4 3/4	1 3/8	2 13/16	1/8	136.0	300	

Fuente: Construidea. Catálogo de soportería. [En línea]. Recuperado en: 01 febrero 2019. Formato archivo (pdf). Disponible en: http://www.construidea.com/sites/default/files/Catalogo_Soporteria.pdf. p. 21.

4.4 INSTRUMENTACIÓN DE LA HERRAMIENTA

Para un correcto funcionamiento de la herramienta es necesario indicar los elementos de medición de las variables requeridas para comprender el fenómeno de golpe de ariete. A continuación, se enuncian los instrumentos seleccionados:

4.4.1 Válvulas de compuerta. Con base en los parámetros y requerimientos de diseño establecidos en el capítulo 2, se determinó que el nivel del fluido del tanque de cabecera de la herramienta debía ser constante.

Para ello se usaron dos válvulas de compuerta que mediante la variación de la apertura de las mismas mantuvieran el nivel constante, es decir, que se debía obtener un modelo dinámico del nivel en el tanque expresado como el cambio de variable física nivel en función del tiempo, a partir de leyes físicas básicas, las funciones de transferencia para las válvulas, para finalmente hacer su comprobación mediante la instrumentación del sistema en el software Matlab.

4.4.1.1 Cálculo de Función de Transferencia. Para el desarrollo del modelo matemático de la función de transferencia para las válvulas de entrada y salida del tanque de cabecera se estableció la siguiente simbología:

Q_e: caudal de entrada.

Q_s: caudal de salida.

o₁: apertura de la válvula de entrada

o₂: apertura de la válvula de salida

S₁: área de la sección transversal de flujo 1.

S₂: área de la sección transversal de flujo 2.

g: gravedad.

h: altura del tanque.

Partiendo inicialmente del comportamiento transitorio del nivel del tanque se determinó que el punto de equilibrio del caudal de entrada y el caudal de salida viene dado por la siguiente expresión:

Ecuación 65. Desarrollo del punto de equilibrio.

$$A \frac{dh}{dt} = Q_e - Q_s = o_1 S_1 V_1 - o_2 S_2 \sqrt{2gh}$$

$$o_1 S_1 V_1 = o_2 S_2 \sqrt{2gh}$$

$$h = \left(\frac{o_1 S_1 V_1}{o_2 S_2 \sqrt{2g}} \right)^2$$

Fuente: elaboración propia.

- **Función de transferencia para la válvula de entrada.** Teniendo el punto de equilibrio se realizó el siguiente desarrollo matemático, linealizando mediante Taylor y considerando la apertura de la válvula de salida o_2 constante:

Ecuación 66. Desarrollo función de transferencia válvula 1.

$$f(o_1, h) = f(\bar{o}_1, \bar{h}) + \left. \frac{\partial f}{\partial o_1} \Delta o_1 \right|_{(\bar{o}_1, \bar{h})} + \left. \frac{\partial f}{\partial h} \Delta h \right|_{(\bar{o}_1, \bar{h})}$$

Sabiendo que:
 $\Delta o_1 = o_1 - \bar{o}_1$
 $\Delta h = h - \bar{h}$

Se procedió a reemplazar y simplificar

$$f(o_1, h) = S_1 V_1 \bar{o}_1 - S_2 o_2 \sqrt{2g\bar{h}} + S_1 \Delta o_1 - \frac{S_2 o_2 \sqrt{2g}}{2\sqrt{\bar{h}}} \Delta h$$

$$f(o_1, h) = A \left. \frac{dh}{dt} \right|_{(\bar{o}_1, \bar{h})} + S_1 V_1 \Delta o_1 - \frac{S_2 o_2 \sqrt{2g}}{2\sqrt{\bar{h}}} \Delta h$$

$$A \frac{d\Delta h}{dt} = S_1 V_1 \Delta o_1 - \frac{S_2 o_2 \sqrt{2g}}{2\sqrt{\bar{h}}} \Delta h$$

Realizando la transformada de Lplace se obtuvo:

$$A s h(s) = S_1 V_1 o_1(s) - \frac{S_2 o_2 \sqrt{2g}}{2\sqrt{\bar{h}}} h(s)$$

Fuente: elaboración propia.

Reordenando los términos se estableció la ecuación de transferencia para la apertura de la válvula de entrada o_1 .

Ecuación 67. Función de transferencia para la válvula de entrada.

$$\frac{h(s)}{o_1(s)} = \frac{S_1 V_1}{A s + \frac{o_1 S_1 \sqrt{2g}}{2\sqrt{\bar{h}}}}$$

Fuente: elaboración propia.

- **Función de transferencia para la válvula de salida.** Teniendo el punto de equilibrio se realizó el siguiente desarrollo matemático, linealizando mediante Taylor y considerando la apertura de la válvula de entrada o_1 constante:

Ecuación 68. Desarrollo función de transferencia para la válvula 2.

$$f(o_2, h) = f(\bar{o}_2, \bar{h}) + \left. \frac{\partial f}{\partial o_2} \Delta o_2 \right|_{(\bar{o}_2, \bar{h})} + \left. \frac{\partial f}{\partial h} \Delta h \right|_{(\bar{o}_2, \bar{h})}$$

Se procedió a reemplazar y simplificar

$$f(o_2, h) = S_1 V_1 \bar{o}_1 - S_2 o_2 \sqrt{2g\bar{h}} + -S_2 \sqrt{2g\bar{h}} \Delta o_2 - \frac{S_2 \bar{o}_2 \sqrt{2g}}{2\sqrt{\bar{h}}} \Delta h$$

$$f(o_2, h) = A \left. \frac{dh}{dt} \right|_{(\bar{o}_2, \bar{h})} - S_2 \sqrt{2g\bar{h}} \Delta o_2 - \frac{S_2 \bar{o}_2 \sqrt{2g}}{2\sqrt{\bar{h}}} \Delta h$$

$$A \frac{d\Delta h}{dt} = -S_2 \sqrt{2g\bar{h}} \Delta o_2 - \frac{K_2 o_2 \sqrt{2g}}{2\sqrt{\bar{h}}} \Delta h$$

Realizando la transformada de Lplace se obtiene:

$$A s h(s) = -S_2 \sqrt{2g\bar{h}} o_2(s) - \frac{S_2 \bar{o}_2 \sqrt{2g}}{2\sqrt{\bar{h}}} h(s)$$

Fuente: elaboración propia.

Reordenando los términos se estableció la ecuación de transferencia para la apertura de la válvula de salida o_2 .

Ecuación 69. Función de transferencia para la válvula de salida.

$$\frac{h(s)}{o_2(s)} = \frac{-S_2 \sqrt{2g\bar{h}}}{A s + \frac{o_2 S_2 \sqrt{2g}}{2\sqrt{\bar{h}}}}$$

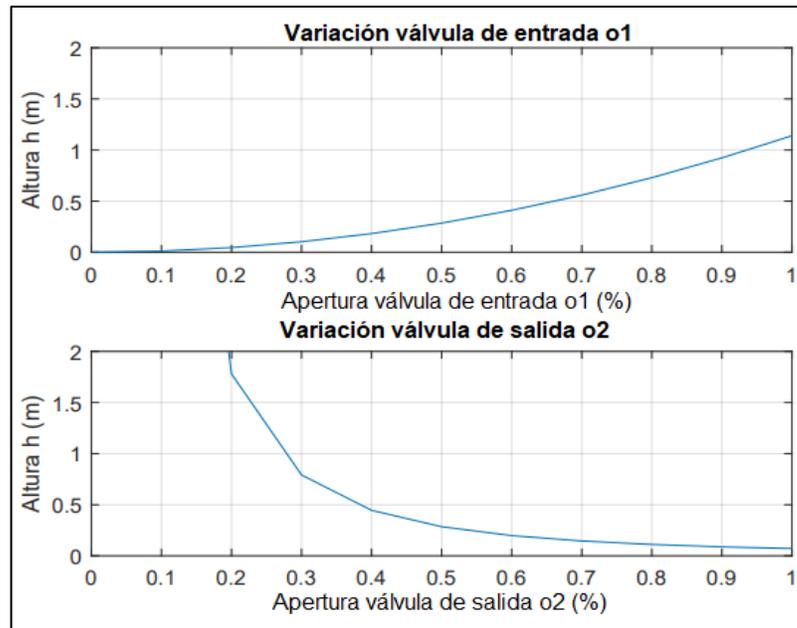
Fuente: elaboración propia.

4.4.1.2 Instrumentación en MATLAB. Con base en las funciones de transferencia de las válvulas de entrada y salida de flujo del tanque de cabecera obtenidas, se empleó el software Matlab para modelar a través de graficas el comportamiento de apertura de las válvulas en función del nivel del tanque.

En la **Figura 39** se muestra el comportamiento del nivel del tanque de cabecera cuando hay una apertura constante del 100% (totalmente abierta) de la válvula de entrada, mientras que la válvula de salida tiene una variación de apertura gradual del 25%, 50%, 75% y 100%. Se observa que cuando se varía el porcentaje de apertura de la válvula de salida se obtienen diferentes niveles del tanque; en donde

para un 25% de apertura, el nivel se mantendrá constante en 1,13 m, para un 50% de apertura el nivel será de 0,28 m, cuando es de 75% el nivel será de 0,13 m, cuando es de 100% el nivel será de 0,09 m.

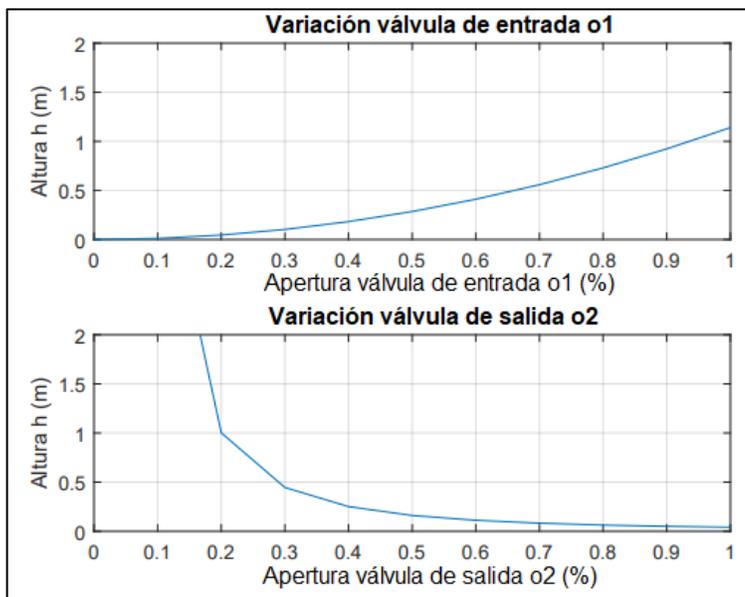
Figura 39. Apertura válvula de entrada 100%.



Fuente: elaboración propia.

En la **Figura 40**, se observa que al mantener constante el valor de apertura de la válvula de entrada en un 75% y variando la apertura de la válvula de salida en 25% y 50% se obtienen niveles constantes en el tanque de 0,64 m y 0,16 m, respectivamente.

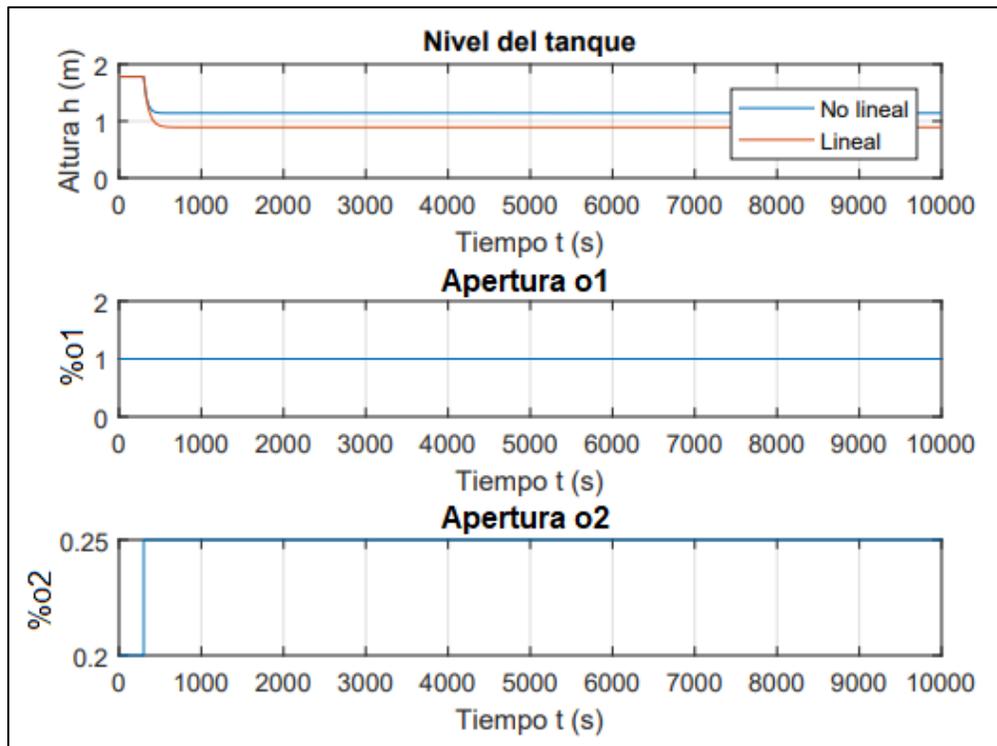
Figura 40. Apertura válvula de entrada 75%.



Fuente: elaboración propia.

No obstante, en la **Figura 41**, se evidencia cómo varía el nivel del tanque respecto a los porcentajes de apertura de las válvulas. Observándose que el nivel tarda en estabilizarse aproximadamente 300 segundos que equivalen a 5 minutos. En cada fase, el nivel del tanque tardará ese tiempo en estabilizarse dado que los intervalos de apertura se están variando cada 25%; por tal motivo, solo se mostrará una figura de referencia entendiéndose que las gráficas para cada apertura mostrarán el mismo tiempo de estabilización.

Figura 41. Comportamiento transitorio de nivel del tanque de cabecera.



Fuente: elaboración propia.

4.4.2 Electroválvula. Este dispositivo es el encargado de generar el golpe de ariete a través de un cierre abrupto. Inicialmente, fue necesario calcular el tiempo de parada mínimo que necesitaba el sistema para generar el fenómeno y con base en este valor, se seleccionó la electroválvula de la marca UNi-D la cual tiene un diámetro nominal de 2 pulgadas y un tiempo de cierre de 0,003 s.

4.4.3 Transductor de presión. Teniendo en cuenta que la máxima sobrepresión que alcanza el sistema tiene un valor de 306,1185 psi se escogió el transductor de presión Danfoss MBS 3000 el cual tiene un rango de medición de presión de 0 a 367,5 psi.

4.4.4 Sensor ultrasónico de caudal. La selección de este tipo de medidor de caudal se argumenta en el hecho que se debe medir esta variable en tres tramos de tuberías distintos: sección de descarga y las dos secciones de descarga de análisis. Por tal motivo, se seleccionó un medidor ultrasónico de caudal, el cual, es un equipo portátil que permite realizar medición en múltiples puntos, sin contar que presenta una exactitud de $\pm 1\%$. Adicionalmente, presenta bajos consumos de energía y un costo asequible comparándolo con instrumentos como medidores magnéticos de caudal.

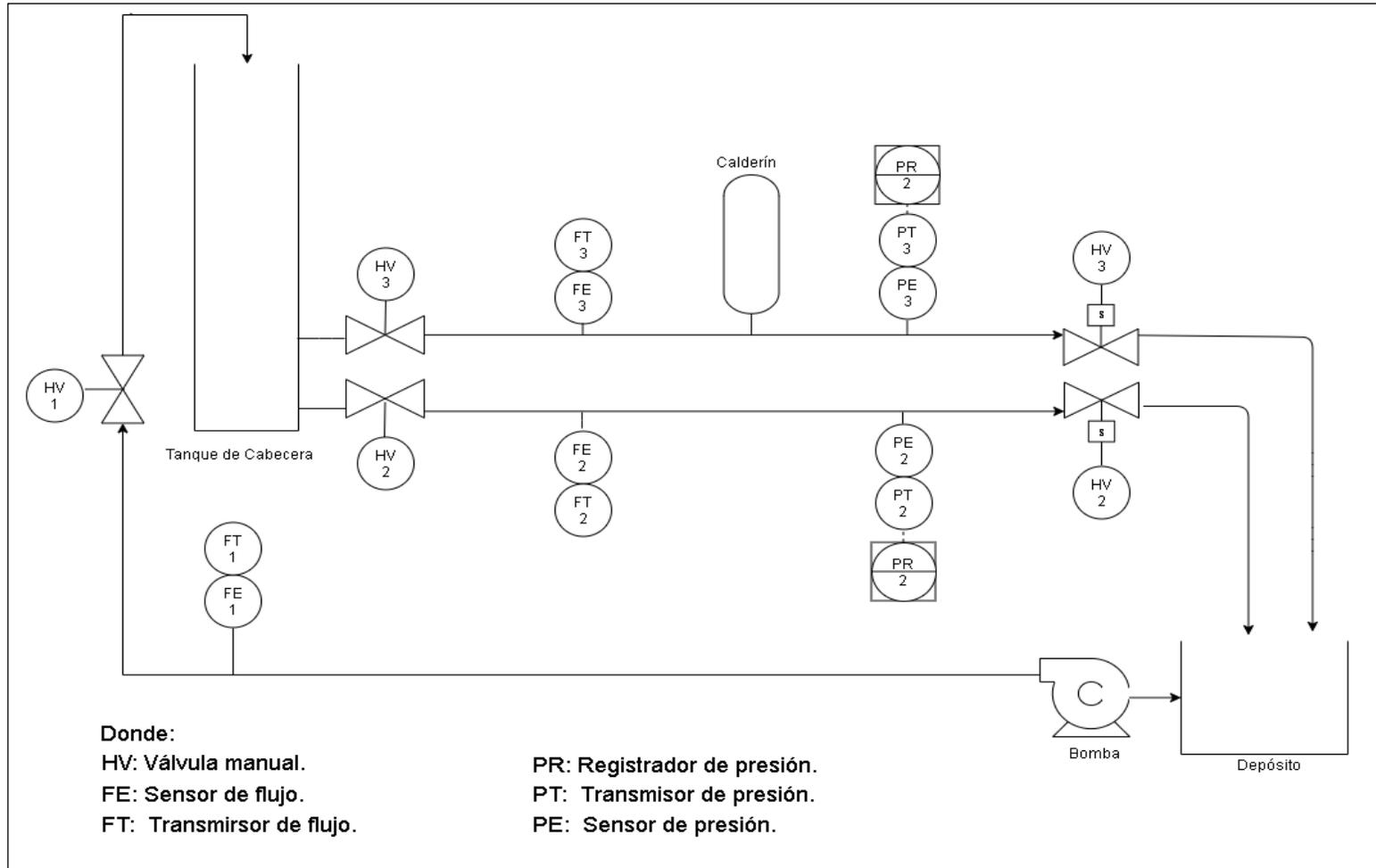
4.4.5 Plano P&ID. En la **Figura 42** se observa el plano P&ID de la herramienta de análisis del fenómeno de golpe de ariete, el cual, según la compañía Pirobloc es “un diagrama de tuberías e instrumentación (DTI), también conocido del idioma inglés como piping and instrumentation diagram/drawing (P&ID) que muestra el flujo del proceso en las tuberías, así como los equipos instalados y el instrumental”⁴⁰.

Este diagrama está compuesto por una serie de símbolos que permiten identificar todos los componentes de la herramienta, como tuberías, número de líneas de tubería, válvulas, controles, alarmas, equipos y bombas, basados en la “Norma ISA S5.1. Sistemas de Instrumentación y Automatización de la sociedad”⁴¹.

⁴⁰ PIROBLOC S.A Better Heating. ¿Qué es un P&ID? [Consultado el May 05,2019]. Disponible en: <https://www.pirobloc.com/blog-es/que-es-un-piping-and-instrumentation-diagram/>

⁴¹ Instrument Society of America. ISA Directory of Instrumentation. Instrument Society of America, 1998.

Figura 42. Plano P&ID de la herramienta de análisis de golpe de ariete.

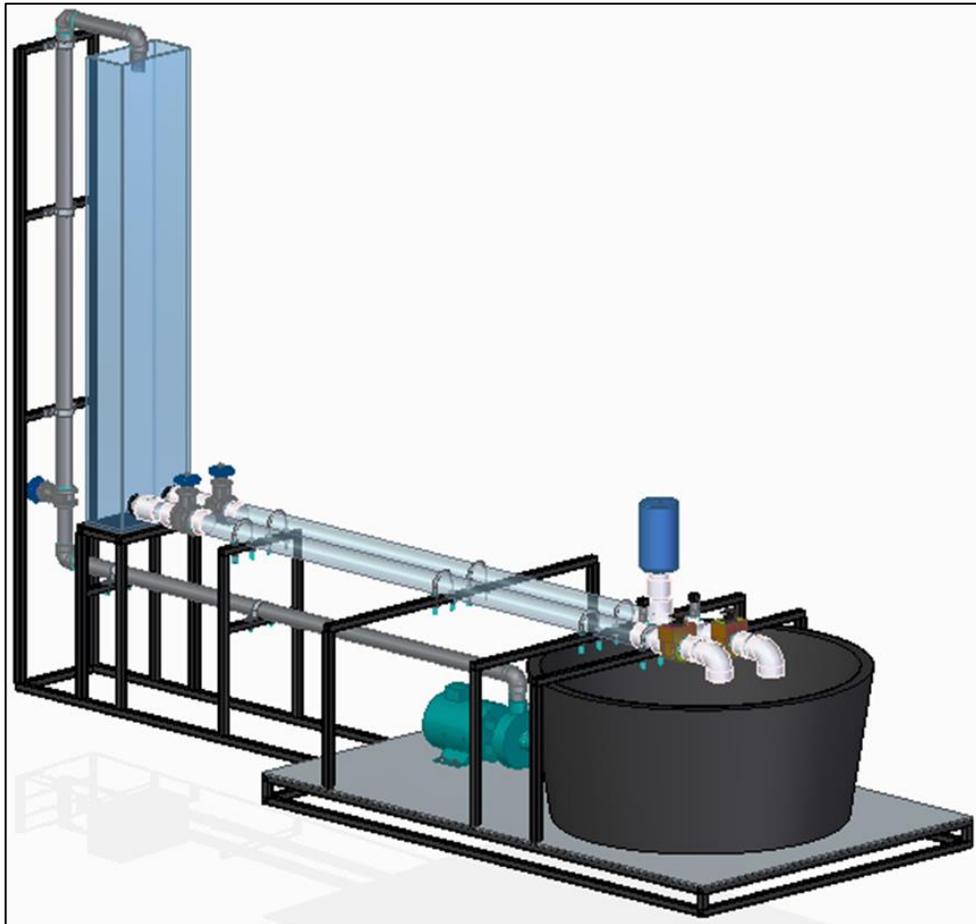


Fuente: elaboración propia.

4.5 HERRAMIENTA DE ANÁLISIS DE GOLPE DE ARIETE

Habiendo realizado los respectivos cálculos del sistema de abastecimiento, de generación y mitigación, estructural y de instrumentación para el respectivo diseño del tanque de cabecera, depósito, tuberías, bomba, calderín, estructura que soporta la herramienta y de las electroválvulas, sensores y demás accesorios que conforman a la herramienta; finalmente el diseño final de la herramienta de análisis de golpe de ariete es el que se muestra en la **Figura 43**. Cabe destacar que el explosionado de la herramienta en donde aparecen los nombres de las partes que conforman a la herramienta, al igual que las dimensiones de la herramienta se encuentran en los planos del **ANEXO D**.

Figura 43. Herramienta de análisis de golpe de ariete.



Fuente: elaboración propia.

5. SIMULACIÓN DE LA HERRAMIENTA

En el siguiente capítulo se presentarán las simulaciones realizadas acerca de las fases de generación y mitigación de golpe de ariete. En primera instancia se utilizó el software Aspen Hysys, en donde no fue posible llevar a cabo las simulaciones del fenómeno de golpe de ariete, debido a que su interfaz no posee herramientas para reproducir el cierre abrupto de una válvula; sin contar que, dentro de la base de datos del mismo no existen amortiguadores de presión como es el caso del calderín. Por tal motivo; se decidió utilizar el software Allievi, el cual es un programa especializado para calcular y analizar fenómenos transitorios dentro de los cuales se encuentra el golpe de ariete. Dicho programa está diseñado para simular el fenómeno de golpe de ariete con dos fluidos: agua y petróleo. Dentro de su alcance, se encuentra la posibilidad de ingresar dispositivos de mitigación y control de este fenómeno; así como, introducir datos para generar el cierre instantáneo de un órgano de control.

5.1 SIMULACIÓN SOFTWARE ASPEN HYSYS

La Universidad de Santiago de Chile⁴² afirma que Aspen Hysys es un software que pertenece a la familia Aspen Tech utilizado para la simulación de procesos químicos, balance de materia y energía, equilibrios líquido vapor, tanto en estado estacionario como transitorio, dando soluciones para el diseño y la optimización de procesos industriales, debido a su facilidad para trabajar con operaciones unitarias y a su amplia gama de equipos y de compuestos.

Este simulador tiene una gran aplicación en la industria del petróleo, del gas y en circuitos de vapor, porque ofrece una base termodinámica completa para el cálculo preciso de las propiedades físicas, propiedades de transporte y el comportamiento de las fases durante la refinación.

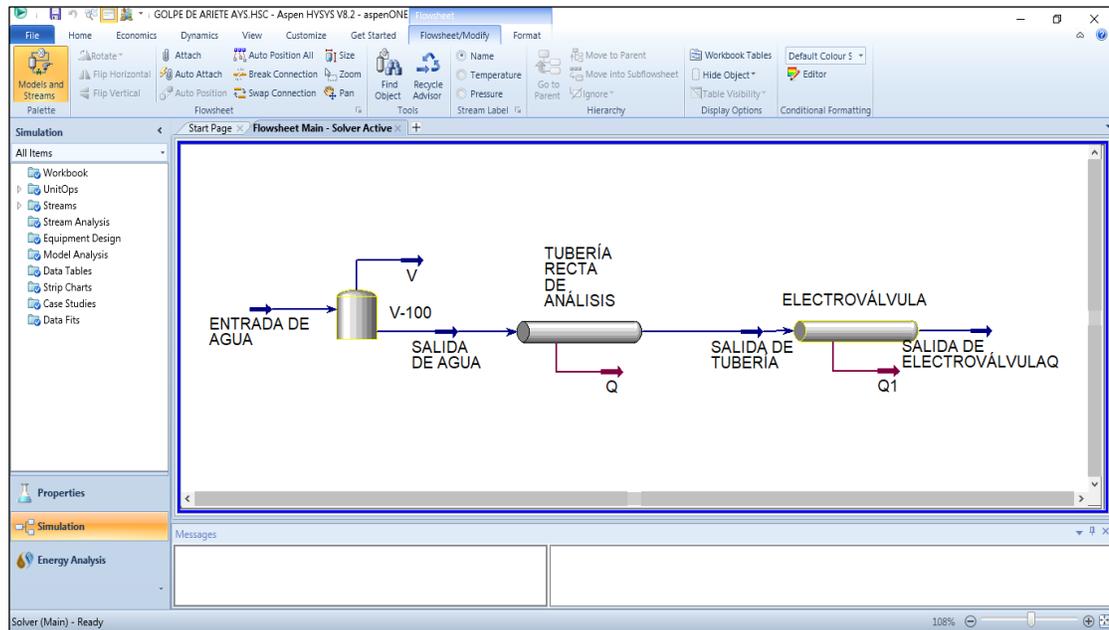
No obstante, la compañía Aspen Tech menciona a través de su página web que “a pesar de ser un software muy completo, Aspen Hysys no es recomendable para calcular golpe de ariete”⁴³; esto debido a que su directorio cuenta con pocos tipos de válvulas; también, los depósitos existentes no coinciden con los seleccionados en el diseño detallado; adicionalmente, no permite diseñar equipos que amortigüen el golpe de ariete, como es el caso del calderín; por lo tanto no es posible obtener las gráficas de sobrepresión que determinan el comportamiento de la presión a través del tiempo cuando ocurre este fenómeno.

⁴² UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE. Curso: Uso del paquete informático ASPEN-HYSYS, simulador de procesos químicos. [Consultado el May 6,2019]. Disponible en: <https://www.calidaddelaire.usach.cl/curso-uso-del-paquete-inform%C3%A1tico-aspen-hysys-simulador-de-procesos-qu%C3%ADmicos>

⁴³ aspentech Optimize Pipeline Hydraulics with Multiphase Flow Modeling. [En línea]. Recuperado en: 04 mayo 2019. Formato archivo (pdf). Disponible en: https://www.aspentech.com/email/email_archive/optimize-qa.pdf. p. 1.

Por tal motivo, en este software solo se pudo diseñar a grandes rasgos el esquema que se tendría en cuenta para simular el golpe de ariete, en el cual se presentaba la ausencia del tanque cuadrado que indicaba que el nivel era constante, adicionalmente, no se contaba con la presencia de la electroválvula para generar el cierre abrupto que ocasionará el fenómeno de golpe de ariete, tal y como se muestra en la **Figura 44**.

Figura 44. Esquema de los equipos del golpe de ariete en Aspen Hysys.



Fuente: elaboración propia.

5.2 SIMULACIÓN SOFTWARE ALLIEVI

La Universidad Politécnica de Valencia desarrollo el software Allievi; donde, en su página web mencionan que “es uno de los pocos paquetes de software a nivel mundial que permite el cálculo y simulación de transitorios hidráulicos en sistemas a presión y en lámina libre de manera fiable, basado en un algoritmo propietario que viene utilizándose con éxito durante décadas en trabajos de consultoría y asesoría técnica”⁴⁴.

En este software se realizaron 8 simulaciones, las cuales están divididas en 4 simulaciones de generación del fenómeno de golpe de ariete y 4 simulaciones de mitigación de golpe de ariete tras colocar un calderín como amortiguador de este fenómeno. Además, se realizaron 16 simulaciones (8 simulaciones sobre generación de golpe de ariete y 8 simulaciones sobre mitigación del mismo)

⁴⁴ UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA. Allievi. Software de transitorios en sistemas hidráulicos a presión. Golpe de ariete. ITA. Presentación. [Consultado el May 6,2019]. Disponible en: <https://www.allievi.net/allievi-es.php>

basadas en corridas de datos ideales variando la velocidad desde 1,5 m/s hasta 5 m/s; cabe resaltar, que se consideran ideales debido a que para lograr dichas velocidades era necesario contar con porcentajes de apertura de la válvula muy específicos los cuales son imposibles lograr con válvulas de accionamiento manual.

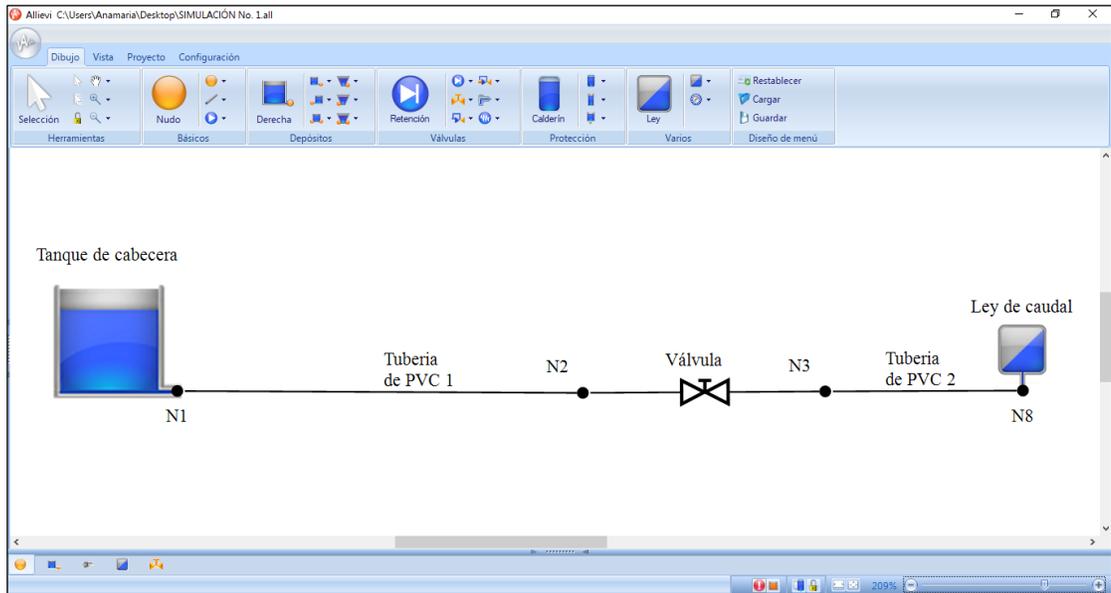
La finalidad de realizar simulaciones de la generación y mitigación del golpe de ariete radica en el hecho de poder contrastar los datos obtenidos teóricamente mediante cálculos matemáticos con datos brindados por un software especializado que reproduzcan este fenómeno validando así los resultados obtenidos.

5.2.1 Simulación del diseño detallado de la herramienta. Para la simulación en Allievi se tomaron los datos del diseño detallado y se ingresaron en el software con el fin de obtener las gráficas de presión en función del tiempo que muestren el comportamiento del golpe de ariete.

5.2.1.1 Procedimiento. A continuación, se muestra el proceso que se llevó a cabo para lograr obtener resultados en el software Allievi a partir de datos iniciales.

Para observar la generación del fenómeno de golpe de ariete se ingresaron los equipos que se iban a simular, como fueron el tanque de cabecera encargado de almacenar el fluido, la tubería de PVC por donde pasa el fluido y la electroválvula encargada de realizar el cierre abrupto; adicionalmente, el programa requería una condición de contorno para indicar que el caudal es constante, por tal motivo, se insertó una ley que reproducía esta condición durante toda la simulación; también, para realizar la conexión de dicha ley se insertó una tubería de PVC adicional que va conectada a la electroválvula, tal y como se muestra en la **Figura 45**. La válvula de compuerta con la cual se regulaba el nivel del tanque de cabecera no se tomó en cuenta, puesto que el programa asume un tanque con nivel constante a lo largo del tiempo.

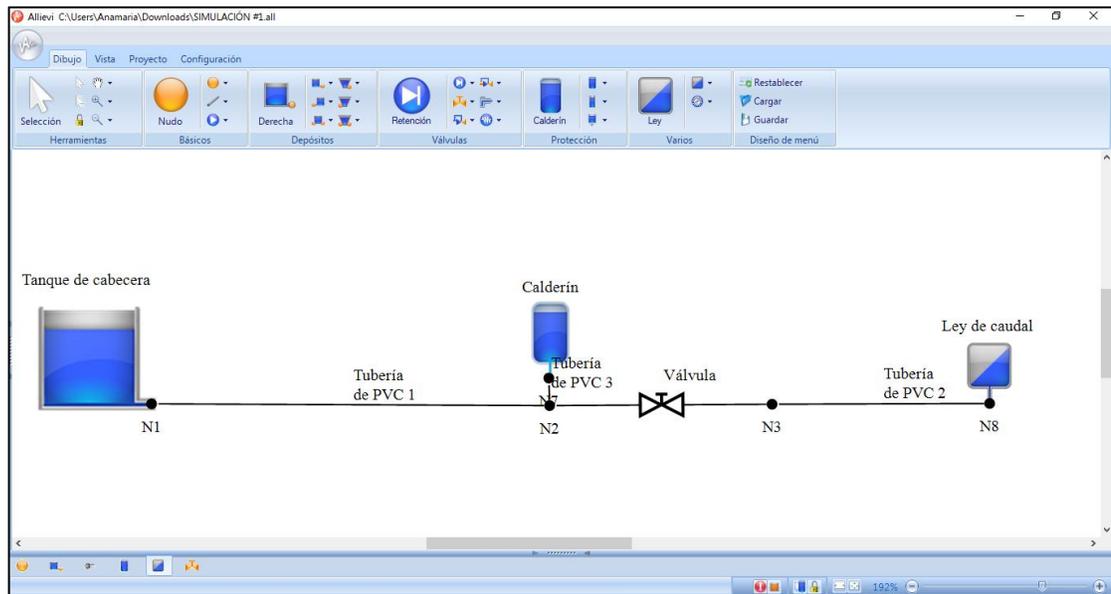
Figura 45. Esquema de los equipos de generación del golpe de ariete.



Fuente: elaboración propia.

Para observar la mitigación del golpe de ariete, se realizó el esquema de equipos el cual incluía el tanque de cabecera, la tubería de PVC, la electroválvula, la ley de caudal y un calderín como se muestra en la **Figura 46**.

Figura 46. Esquema de los equipos de mitigación del golpe de ariete.



Fuente: elaboración propia.

Habiendo realizado el esquema de los equipos, se ingresó la información de la altura a la cual se encuentra cada nodo o punto de intersección de los equipos, en este caso al estar a la misma altura la cota es cero, tal y como se observa en la **Figura 47**.

Figura 47. Altura de los nodos.

Nodos		
	Nombre	Cota (m)
	N1	0
	N2	0
	N3	0
	N8	0

Fuente: elaboración propia.

Luego se ingresó la información del tanque de cabecera como fue el nombre, el tipo depósito en este caso de grandes dimensiones o de nivel constante (GD) y finalmente se ingresó la altura del nivel del tanque que para este caso fue de 1,13 m, como se observa en la **Figura 48**.

Figura 48. Datos del tanque de cabecera.

Depósitos - Datos básicos							
Nombre	Ni	Nf	Zs (m)	Tipo	S (m ²)	Z0 (m)	Zvar
Tanque de	---	N1	0	GD ▾		1,1306156	▾

Fuente: elaboración propia.

Posteriormente, se diligenció la información de la tubería como fue el nombre, diámetro, longitud, espesor, celeridad, rugosidad y el coeficiente global de pérdidas primarias y secundarias (k) de la tubería de análisis PVC 1 y de la tubería PVC 2 que se utilizó para unir la electroválvula con la ley, como se muestra en la **Figura 49**.

Figura 49. Datos de la tubería.

Tuberías - Datos básicos											Pérdidas	
Nombre	Ni	Zi (m)	Nf	Zf (m)	Dint (mm)	L (m)	e (mm)	a (m/s)	Perfil	Rug (mm)	k	
Tubería de	N1	0	N2	0	51,9938	1,98	3,9116	446,610869	Calc.	----	0,0003	15,9592524
Tubería de	N3	0	N8	0	51,9938	1,8	3,9116	446,610869	Calc.	----	0	0

Fuente: elaboración propia.

A continuación, se ingresó información de la ley mencionada anteriormente, la cual impone una salida de caudal constante por el nodo N8. Dentro del programa existe la posibilidad de ingresar el valor de caudal al cual va a operar el sistema, a través

de la opción “Imp Q” que es una imposición de caudal por tabla en donde se asigna directamente el valor de caudal como se muestra en la **Figura 50**.

Figura 50. Ley de caudal.

Ley - Datos básicos						
Nombre	Nudo	Z (m)	Tipo	Imp Q	Q imp (l/s)	Factor
Ley de	N8	0	Q	Por tabla		1

Fuente: elaboración propia.

Cabe destacar que los datos del calderín únicamente se tuvieron en cuenta para el sistema de mitigación del golpe de ariete, en donde se ingresó el diámetro, longitud o altura y posición del calderín tal y como se muestra en la **Figura 51**.

Figura 51. Datos calderín.

Calderines - Datos básicos						Características físicas del calderín							
Nombre	Nudo	Zu (m)	Num	Calc K	Act	D (m)	L (m)	V (m ³)	Pred	Rug (mm)	Zb (m)	Posición	Vejiga
Calderín	N7	0	1	...	<input checked="" type="checkbox"/>	0,11	0,245	0	...	0	0	Vertical	Si

Fuente: elaboración propia.

Posteriormente, se ingresó la información de la electroválvula, que es una válvula de tipo diafragma, cuya misión es generar el golpe de ariete tras el cierre abrupto de la misma, para ello se ingresó el nombre, diámetro nominal, tipo de válvula y la maniobra que indica el tiempo de cierre de la válvula durante el transitorio, como se muestra en la **Figura 52**.

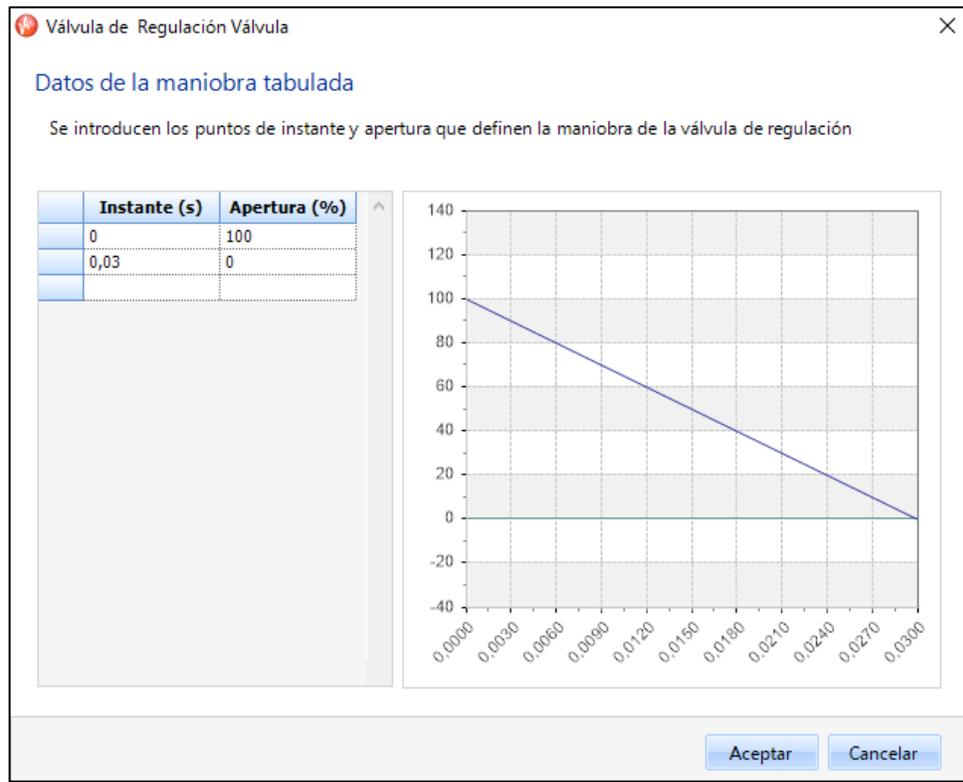
Figura 52. Datos electroválvula.

Válvula Regulación - Datos básicos								Maniobra	Tabulada
Nombre	Ni	Nf	Z (m)	DN (mm)	k Ramal	Tipo	Modelo	Tipo	Tabla
Válvula	N2	N3	0	51,9938	0	De diafragma		Tabulada	

Fuente: elaboración propia.

Después de establecer la maniobra por tabla, se ingresó el tiempo de cierre preestablecido de la electroválvula de 0,03 s, para evitar así la manipulación humana que puede dar origen a errores en la práctica, tal y como se observa en la **Figura 53**.

Figura 53. Tiempo de cierre de la electroválvula.



Fuente: elaboración propia.

Después de ingresar toda la información requerida para cada uno de los equipos que están involucrados en la generación del golpe de ariete, se procedió a calcular el estado permanente y transitorio del sistema; el estado permanente hace referencia a aquellas variables que no varían con el tiempo y estos datos son tomados como condiciones iniciales para poder calcular el estado transitorio en donde el tiempo influye en las variables tenidas en cuenta y dentro de este ocurre el fenómeno de golpe de ariete.

A continuación, se seleccionó la opción asistente de resultados que permite configurar cada una de las gráficas de resultados disponibles en el software Allievi, tal y como se observa en la **Figura 54**. En el primer paso del asistente se seleccionó el elemento que se deseaba analizar, en este caso el Nodo 2, donde ocurre el fenómeno de golpe de ariete. En el segundo paso se seleccionó el tipo de gráfico, en este caso se seleccionó la gráfica en función del tiempo. En el tercer paso se seleccionó la serie presión en función del tiempo y en el cuarto paso se seleccionó el o los escenarios que se deseaban representar.

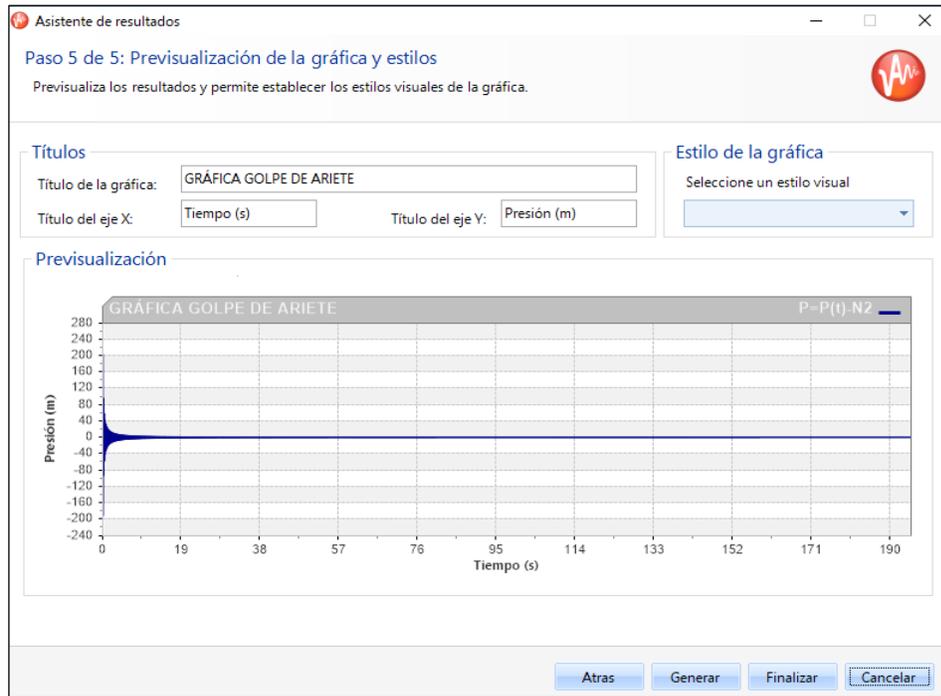
Figura 54. Asistente de resultados.



Fuente: elaboración propia.

Finalmente, en el quinto paso del asistente de resultados se previsualiza la gráfica de golpe de ariete, tal y como se observa en la **Figura 55**.

Figura 55. Previsualización de la gráfica de golpe de ariete.



Fuente: elaboración propia.

Para determinar numéricamente cuánto fue la sobrepresión generada por el fenómeno de golpe de ariete, se seleccionó la opción datos de la serie, obteniéndose una sobrepresión de 203,9956 m a los 0,032 s, como se observa en la **Figura 56**.

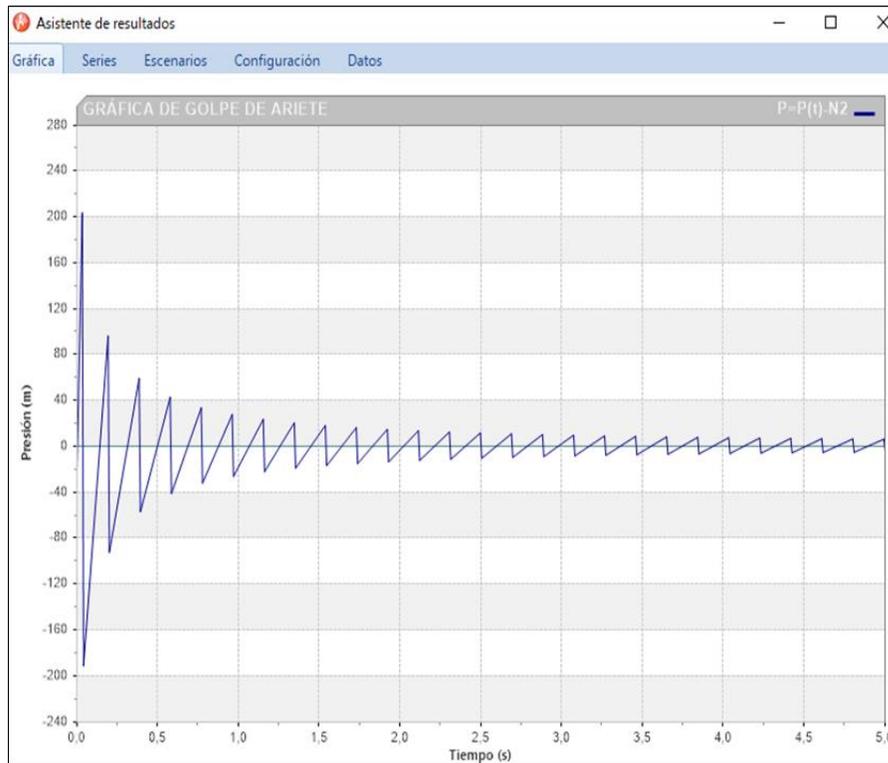
Figura 56. Datos de la gráfica del golpe de ariete.

	P=P(t)-N2 X	P=P(t)-N2 Y
▶ 0		-17,5440635681152
0,0320000015199184		203,99560546875
0,0400000018998981		-190,881851196289
0,192000009119511		96,6834182739258
0,20000000949949		-91,9684143066406
0,384000018239021		59,6735916137695
0,392000018619001		-56,4825553894043
0,576000027358532		43,3217887878418
0,584000027738512		-40,5748023986816
0,768000036478043		34,098217010498
0,776000036858022		-31,5391101837158
0,960000045597553		28,1747932434082
0,968000045977533		-25,71240234375
1,15200005471706		24,0490550994873
1,16000005509704		-21,6429233551025

Fuente: elaboración propia.

Finalmente, al modificar el intervalo de los ejes de presión y tiempo, se obtuvo la gráfica de comportamiento senoidal del golpe de ariete como aparece en la **Figura 57**.

Figura 57. Gráfica del golpe de ariete simulación No. 1.



Fuente: elaboración propia.

5.2.1.2 Resultados obtenidos de la simulación del golpe de ariete. En la **Tabla 16**, se encuentra consolidada la información que requería el software Allievi, para llevar a cabo las cuatro simulaciones que reflejan el comportamiento de la presión a través del tiempo cuando ocurre el fenómeno de golpe de ariete, según el procedimiento anterior. Adicionalmente, se ven reflejados los resultados obtenidos tras la simulación.

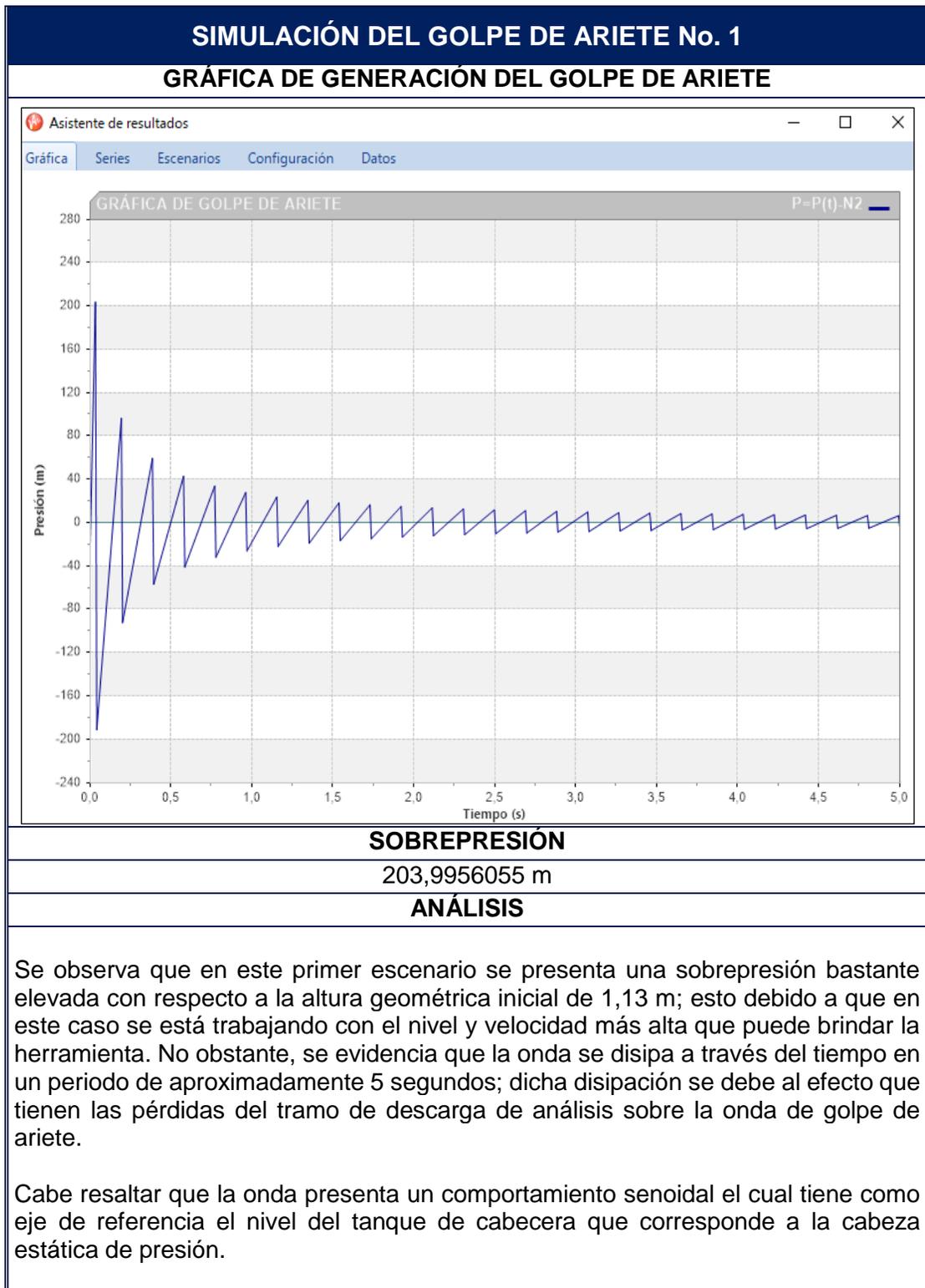
Tabla 16. Resultados de la simulación golpe de ariete.

Variable	Símbolo	Und.	Simulación No.1	Simulación No.2	Simulación No.3	Simulación No.4
Altura geométrica	H	m	1,1306	0,2826	0,1256	0,0706
Diámetro Interno	D	m	0,0519	0,0519	0,0519	0,0519
Longitud tubería descarga análisis	L	m	1,98	1,98	1,98	1,98
Espesor de la tubería	e	m	0,0039	0,0039	0,0039	0,0039
Celeridad	a	m/s	446,61089	446,61089	446,61089	446,61089
Rugosidad	R	m	0,0000003	0,0000003	0,0000003	0,0000003
Tubería de PVC						
Diámetro del calderín	D_C	m	0,11	0,11	0,11	0,11
Altura del calderín	H_C	m	0,245	0,245	0,245	0,245
Longitud del calderín a la tubería	L_{CT}	m	1,8	1,8	1,8	1,8
Caudal de entrada	$Q_{entrada}$	m ³ /s	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025
Porcentaje de apertura	%o	%	0,25	0,5	0,75	1
Velocidad de flujo	V	m/s	4,7098	2,3549	1,5699	1,1774
Pérdidas de carga	J	m	18,0658	1,1937	0,2866	0,1340
Coeficiente global de pérdida	k_{total}	m	15,9787	4,2233	2,2820	1,8966
Sobrepresión	$H + \Delta H$	m	203,9956	109,1834	73,9366	55,8372
		kPa	1998,7489	1069,7796	724,4311	547,0937
		psi	290,2403	155,3437	105,1953	79,444
Sobrepresión con el calderín	$H + \Delta H$	m	21,9798	13,4237	8,9471	6,6310
		kPa	215,3589	131,5255	87,664	64,9711
		psi	31,2724	19,0989	12,7297	9,4345

Fuente: elaboración propia.

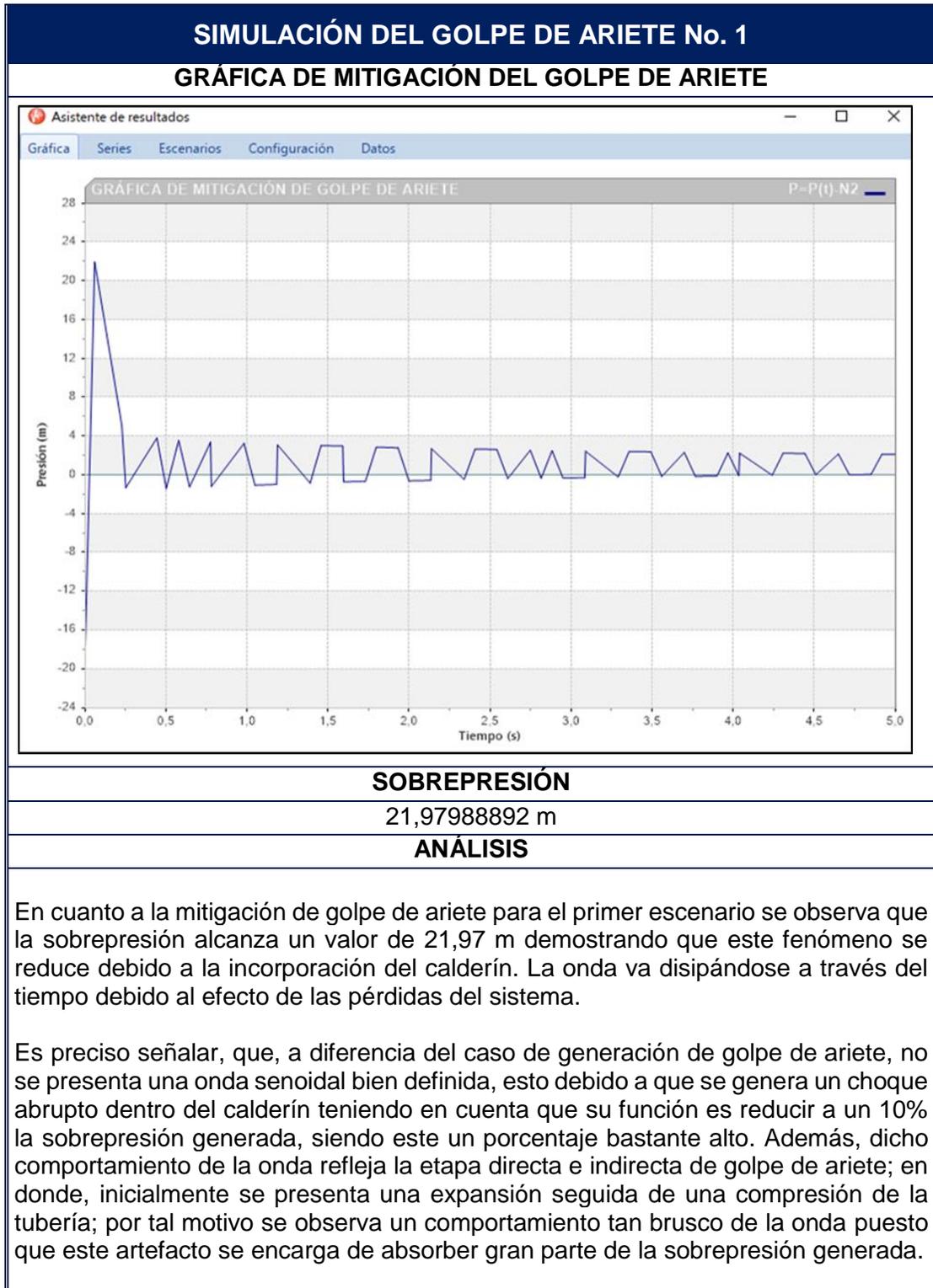
A continuación, en las **Figuras 58, 59, 60 y 61** se observan las gráficas obtenidas tras la simulación y un breve análisis de los resultados.

Figura 58. Simulación del golpe de ariete No. 1



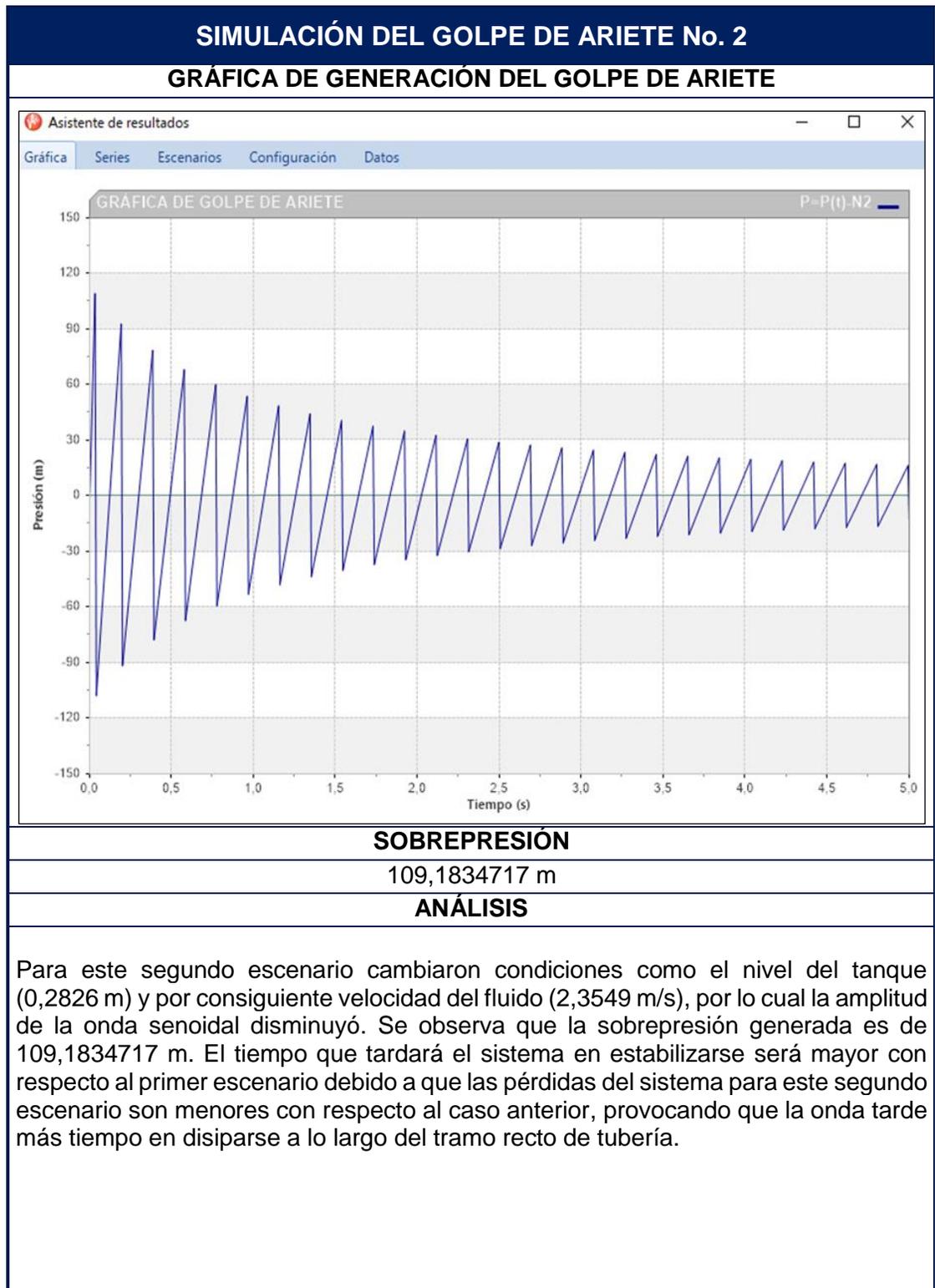
Fuente: elaboración propia.

Figura 58. (Continuación)



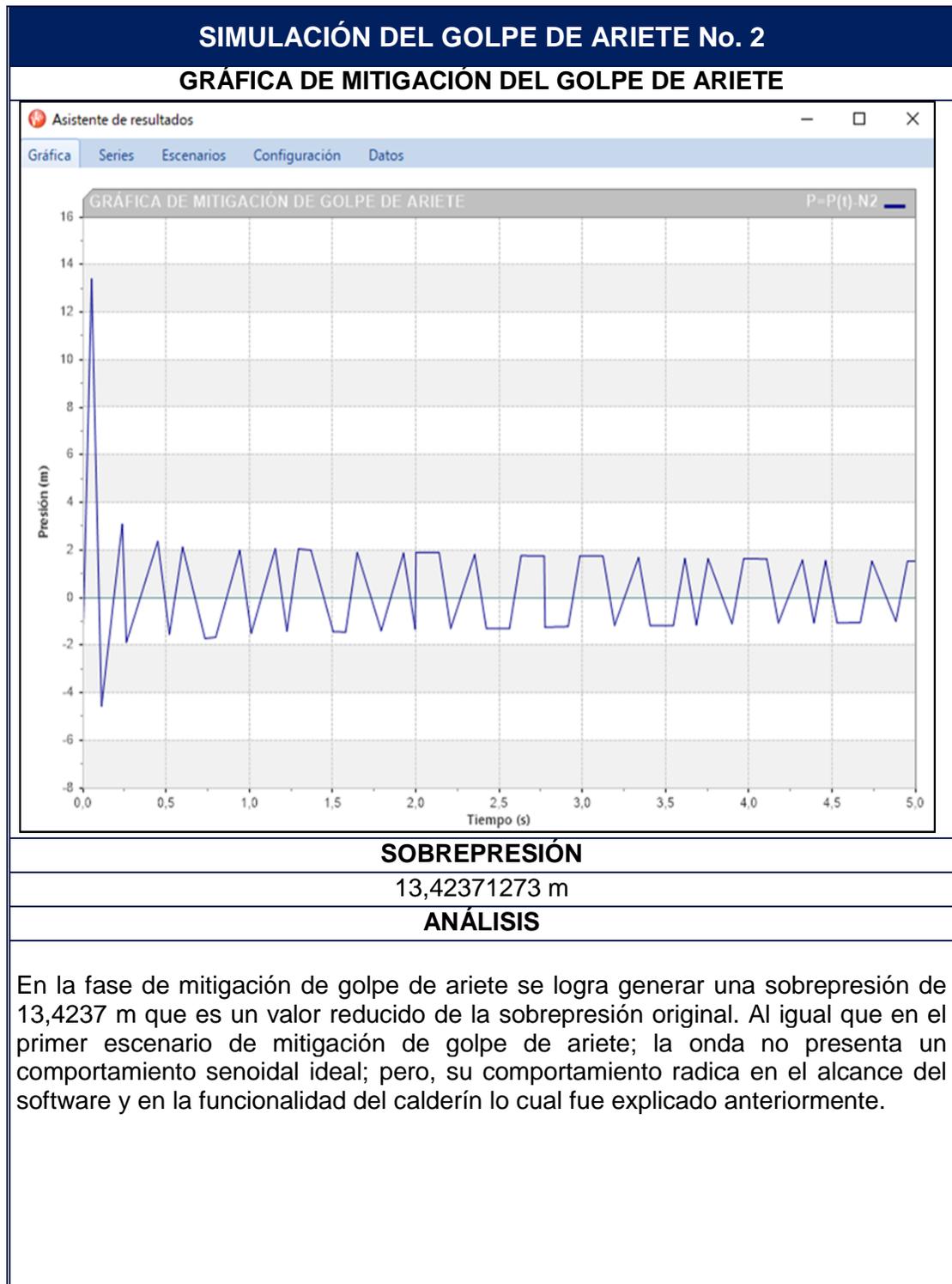
Fuente: elaboración propia.

Figura 59. Simulación del golpe de ariete No. 2



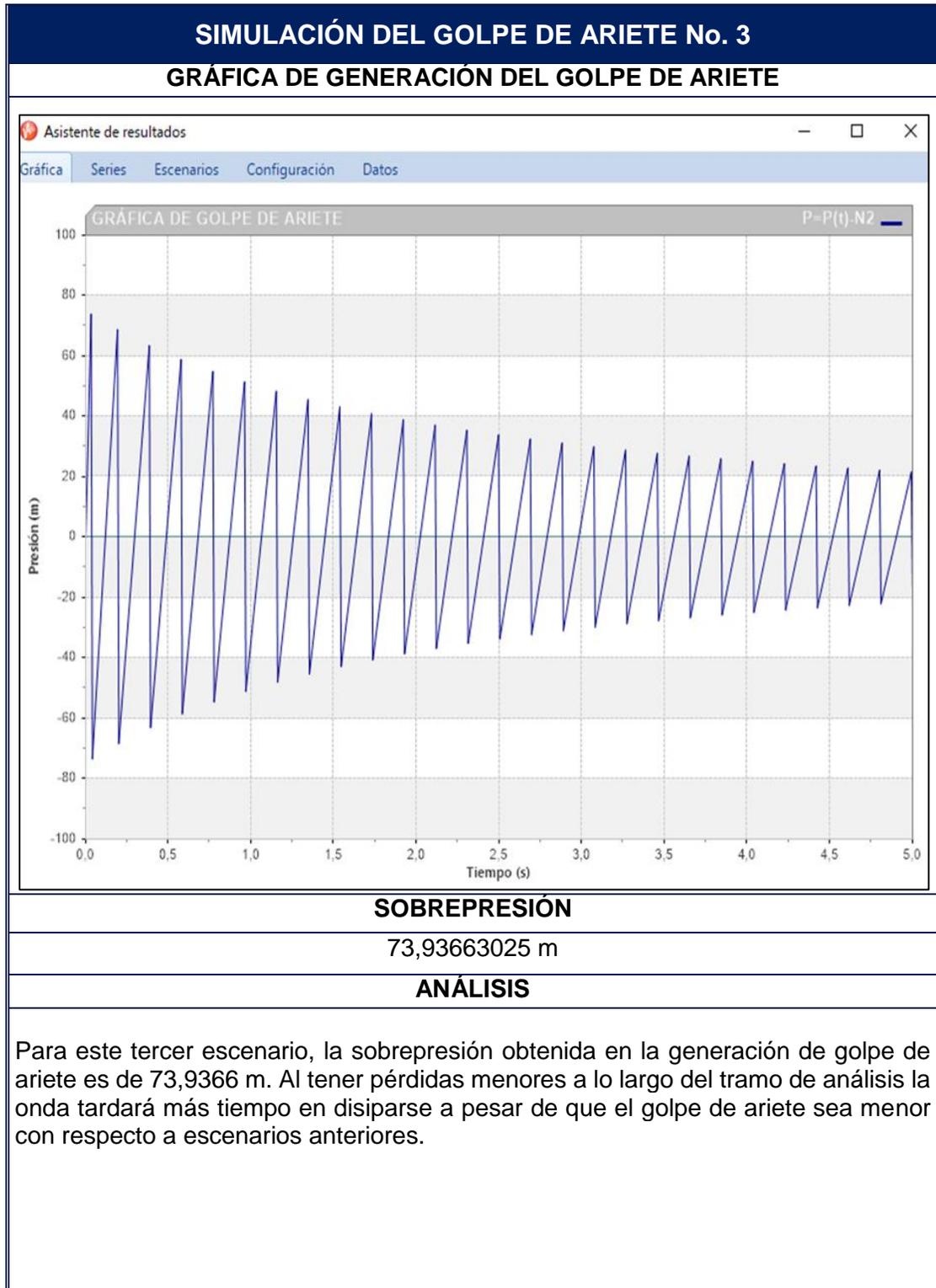
Fuente: elaboración propia.

Figura 59. (Continuación)



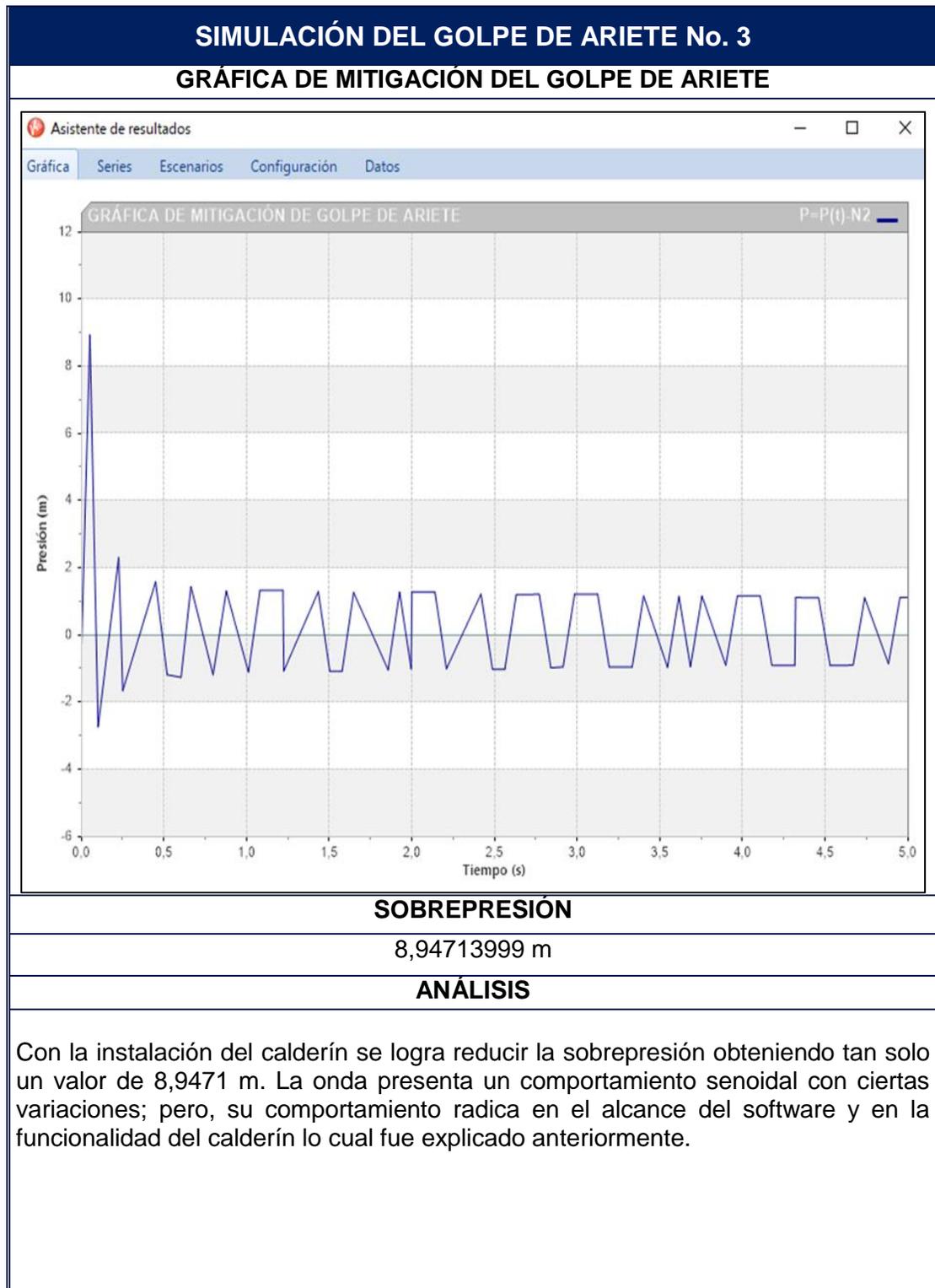
Fuente: elaboración propia.

Figura 60. Simulación del golpe de ariete No. 3



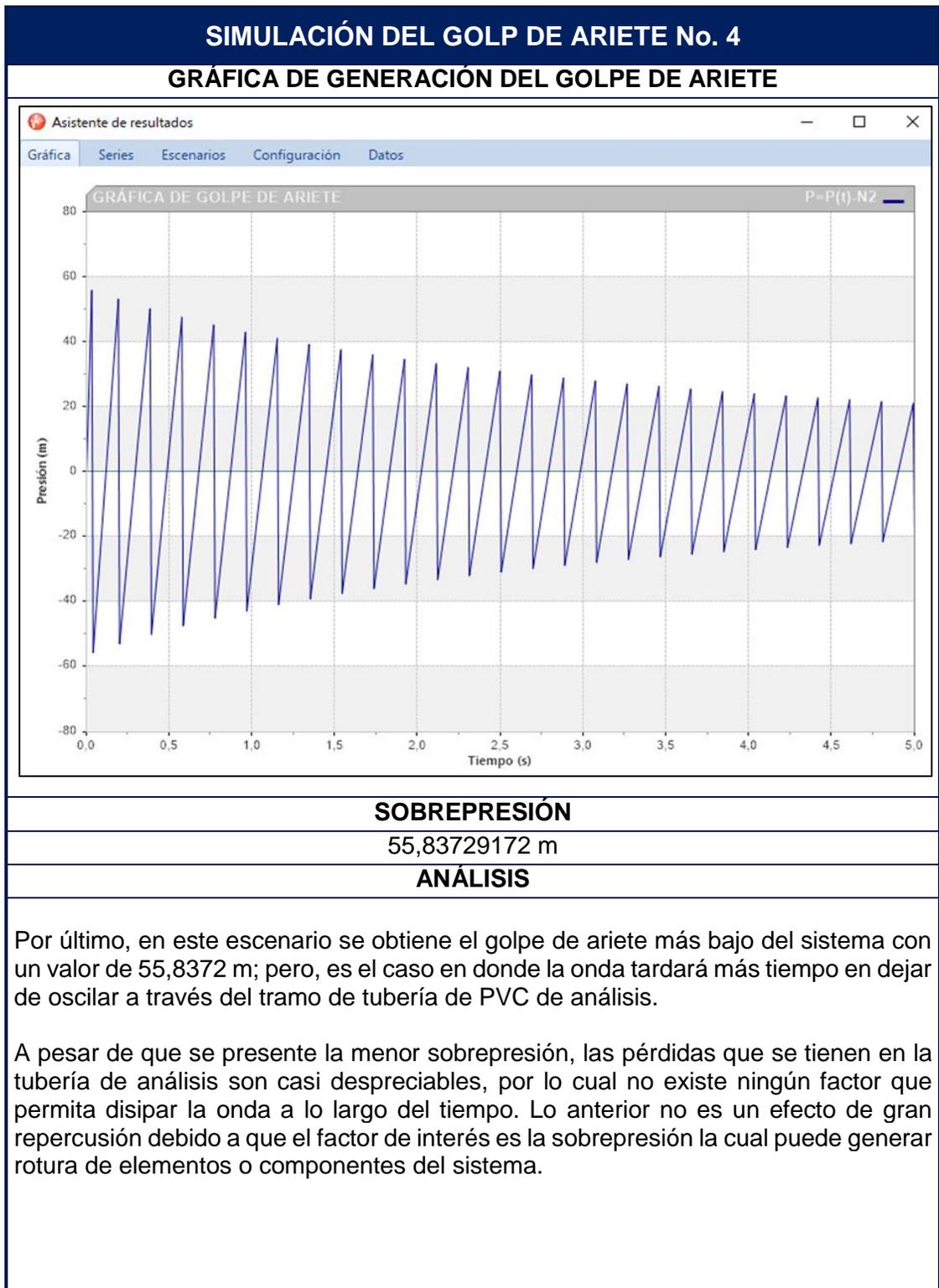
Fuente: elaboración propia.

Figura 60. (Continuación).



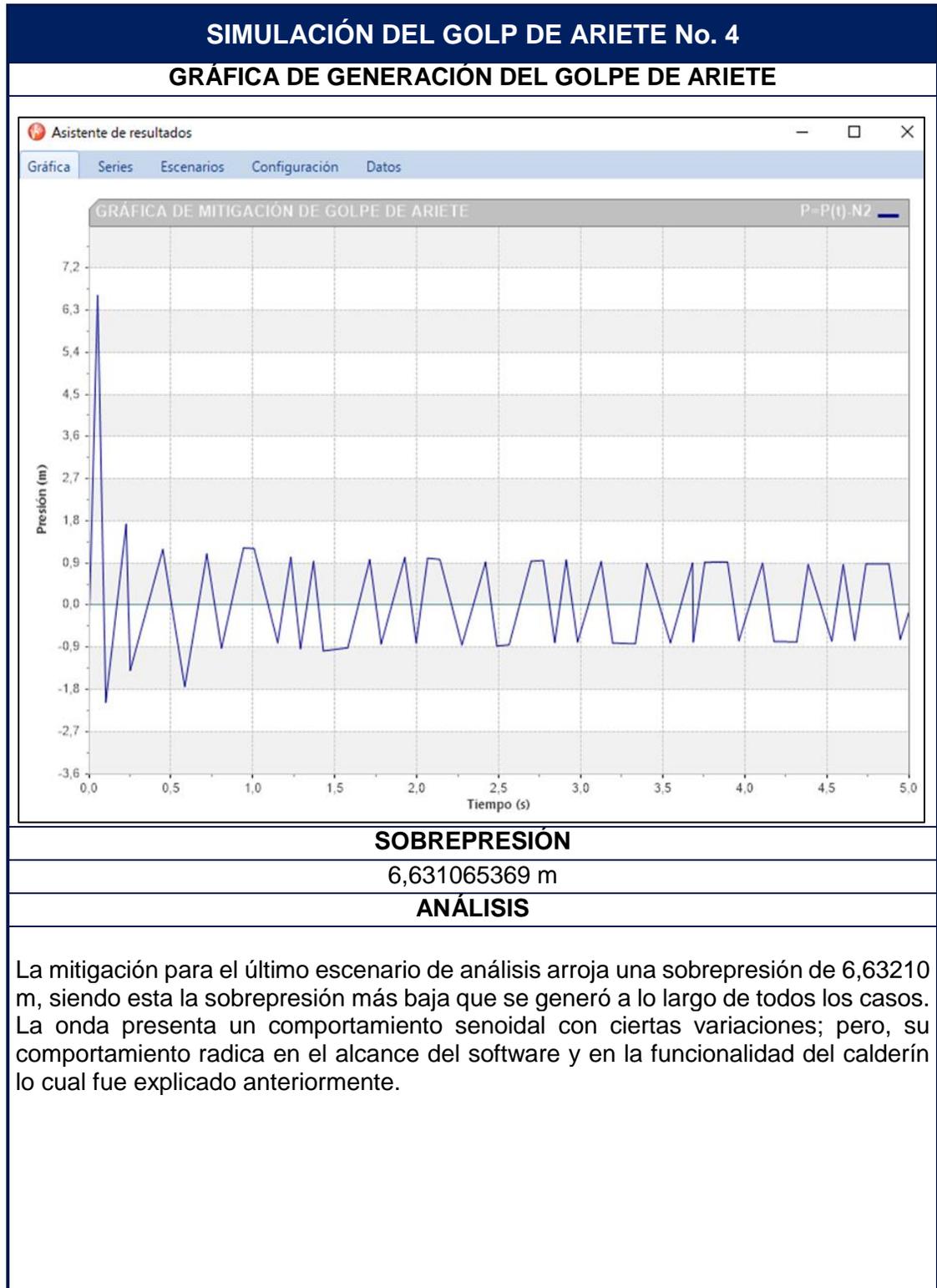
Fuente: elaboración propia.

Figura 61. Simulación del golpe de ariete No. 4



Fuente: elaboración propia.

Figura 61. (Continuación)



Fuente: elaboración propia.

5.2.1.3 Resultados del golpe de ariete por cálculo teórico. En la **Tabla 17**, se encuentra consolidada la información requerida para el cálculo teórico de la sobrepresión generada tras el fenómeno de golpe de ariete y con calderín mediante la aplicación de la **Ecuación 42** y la **Ecuación 50** respectivamente.

Tabla 17. Cálculo teórico de la generación y mitigación del golpe de ariete.

Variable	Símbolo	Und.	Simulación No.1	Simulación No.2	Simulación No.3	Simulación No.4
Caudal de entrada	$Q_{entrada}$	m ³ /s	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025
Porcentaje de apertura	%o	%	0,25	0,5	0,75	1
Diámetro Interno	D	m	0,0519	0,0519	0,0519	0,0519
Área de la sección transversal	S	m ²	0,0021	0,0021	0,0021	0,0021
Altura geométrica	H	m	1,1306	0,2826	0,1256	0,0706
Velocidad de flujo	V	m/s	4,7098	2,3549	1,5699	1,1774
Celeridad	a	m/s	446,6108	446,6108	446,6108	446,6108
Altura del líquido en el calderín	H_{LC}	m	0,1841	0,1841	0,1841	0,1841
Golpe de ariete	ΔH	m	214,4209	107,2104	71,4736	53,6052
		m	215,5515	107,4931	71,5992	53,6759
Sobrepresión	$H + \Delta H$	kPa	2111,9745	1053,2178	701,5297	525,9165
		psi	306,6819	152,9388	101,8698	76,3688
		m	22,3885	10,8195	7,0888	5,2470
Sobrepresión con el calderín	$H + \Delta H$	kPa	219,3631	106,01	69,4564	51,4105
		psi	31,8539	15,3938	10,0858	7,4653

Fuente: elaboración propia.

5.2.1.4 Comparación y análisis de resultados. Después de obtener los resultados de sobrepresión mediante la simulación del fenómeno de golpe de ariete y mediante cálculos teóricos, se realizó una comparación de los resultados para determinar el porcentaje de error del simulador Allievi, tal y como aparece en el **Cuadro 19**.

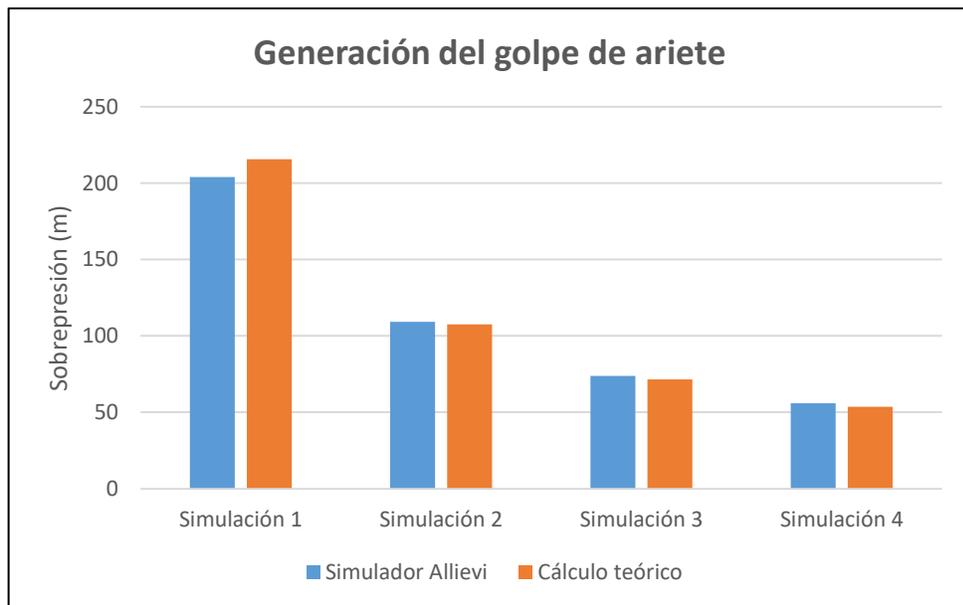
Cuadro 19. Comparación de datos del diseño detallado.

Sistema	Sobrepresión (m)	Simulación No.1	Simulación No.2	Simulación No.3	Simulación No.4
Generación del golpe de ariete	Simulador Allievi	203,9956	109,1834	73,9366	55,8372
	Cálculo Teórico	215,5515	107,4931	71,5992	53,6759
	Porcentaje de error (%)	5,3611	1,5724	3,2644	4,0267
Mitigación del golpe de ariete	Simulador Allievi	21,9798	13,4237	8,9471	6,6310
	Cálculo Teórico	22,3885	10,8195	7,0888	5,2470
	Porcentaje de error (%)	1,8253	24,0689	26,2143	26,3772

Fuente: elaboración propia.

En la **Gráfica 1**, se observa la comparación para las sobrepresiones obtenidas en la fase de generación de golpe de ariete por medio del software Allievi y por cálculos teóricos. Es evidente que los datos obtenidos por ambos métodos son bastante cercanos. Esto último se corrobora observando el **Cuadro 19**, en donde los porcentajes de error oscilan desde 1,57% hasta 5,36%.

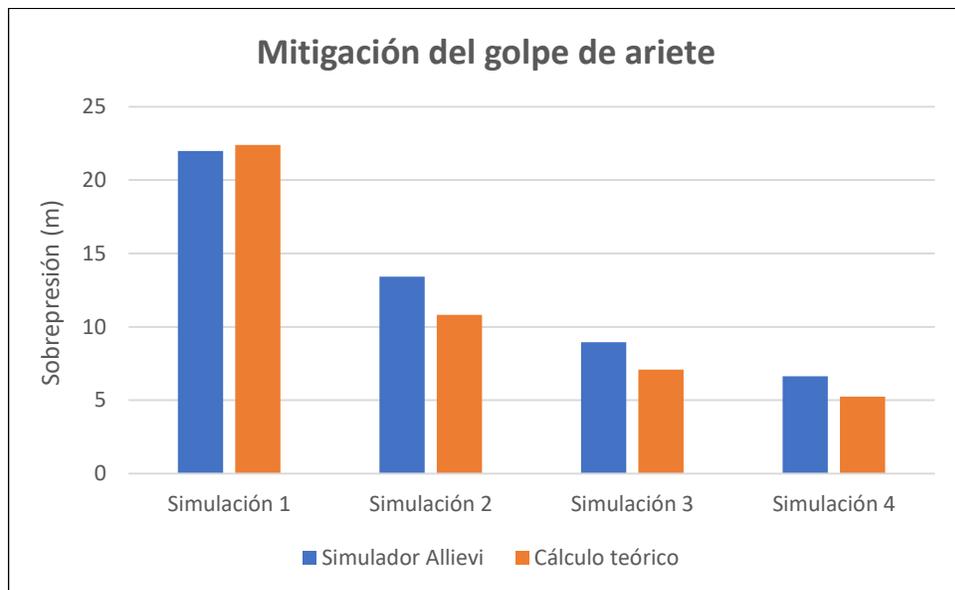
Gráfica 1. Comparación de resultados generación del golpe de ariete.



Fuente: elaboración propia.

En cuanto a la simulación de la mitigación del golpe de ariete representada en la **Gráfica 2**, se observa que a medida que avanzan las simulaciones los datos teóricos se alejan de los resultados obtenidos con el simulador. Lo anterior se debe a que el amortiguador está diseñado para el caso crítico de sobrepresión del sistema; es decir, el primer escenario en donde la sobrepresión alcanza un valor de 215,51 m aproximadamente. Para este caso se determinó que el sistema no debe presentar más de un 10% de la sobrepresión máxima generada. A pesar de esto, el calderín tiene funcionalidad para todos los demás casos; pero, no presentará un porcentaje de reducción exacto del 90 % de la sobrepresión generada. Esto se evidencia en el **Cuadro 28**, donde se observa el porcentaje de error entre el software y cálculos teóricos del sistema de mitigación.

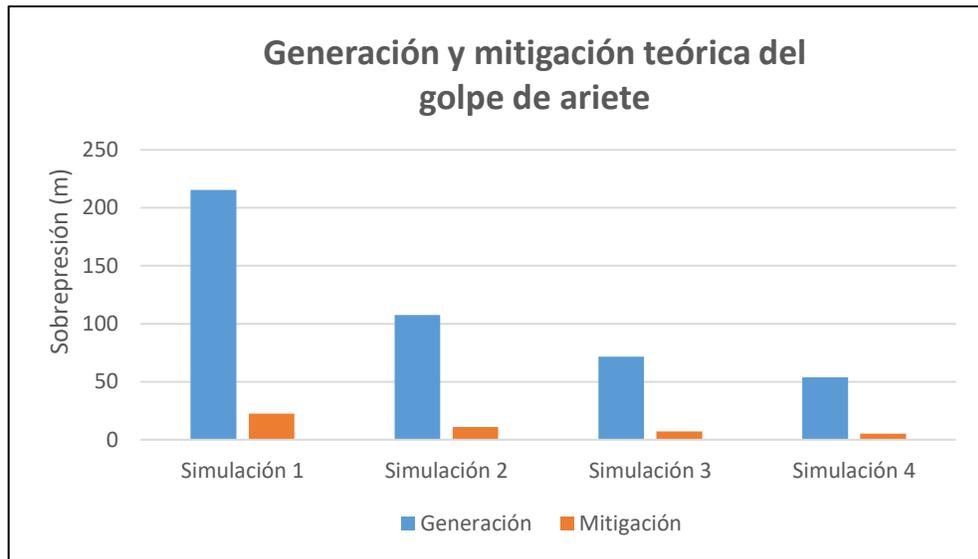
Gráfica 2. Comparación de resultados mitigación del golpe de ariete.



Fuente: elaboración propia.

En la **Gráfico 3** se observa las sobrepresiones obtenidas en las fases de generación y mitigación de golpe de ariete por medio de cálculos teóricos. Es notorio como la sobrepresión se reduce en gran medida mediante la incorporación de un amortiguador, en este caso un calderín; lo cual permite afirmar que la utilización de estos dispositivos permite mitigar el fenómeno de golpe de ariete siendo una solución práctica y viable. Cabe resaltar, que se limitan los picos de presión que puede generar el paro abrupto de una válvula evitando así falla o ruptura de los componentes del sistema.

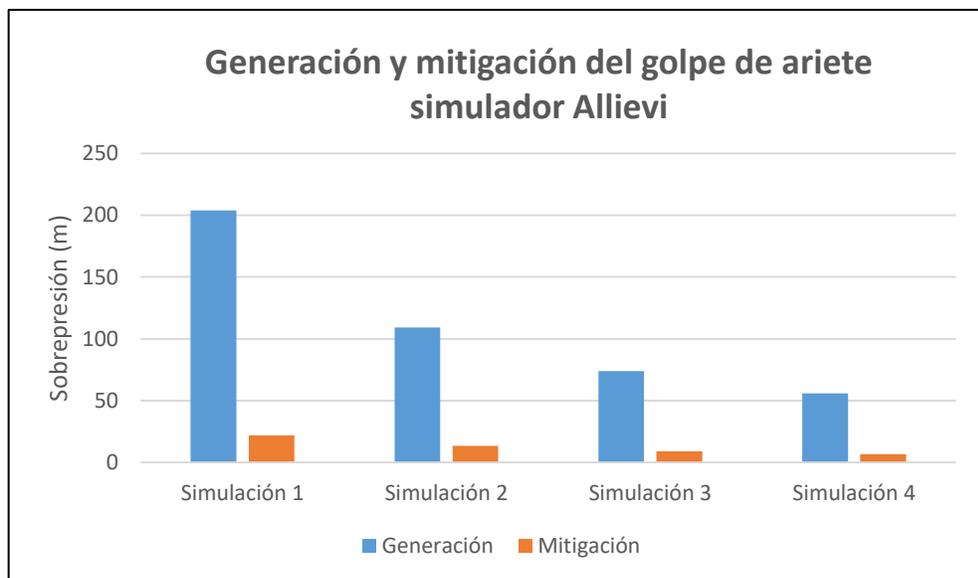
Gráfica 3. Generación y mitigación teórica del golpe de ariete.



Fuente: elaboración propia.

Como se observa en la **Gráfica 4**, la cual, condensa los datos obtenidos mediante las simulaciones en Allievi; se hace necesario incorporar un dispositivo anti ariete; debido que, se logra un gran porcentaje de reducción de sobrepresiones logrando que en ocasiones hasta sea despreciable los efectos que trae el golpe de ariete. En cambio, se hace notorio que al presentar golpe de ariete sin ningún mecanismo de control se presenta una sobrepresión bastante alta que en casos donde se opere a altas presión un hecho como este traería consecuencias catastróficas.

Gráfica 4. Generación y mitigación del golpe de ariete en Allievi.



Fuente: elaboración propia.

5.2.2 Simulación de la corrida de datos ideal. Se realizó una corrida ideal de datos en el software Allievi, en donde se tuvo en cuenta la variación de la velocidad del fluido desde 1,5 m/s hasta 5 m/s. Cabe destacar que las gráficas de estas corridas se encuentran en el **ANEXO C**.

En las **Tablas 18 y 19** se encuentran consolidados los resultados obtenidos de la sobrepresión, tras simular y calcular teóricamente el fenómeno de golpe de ariete, adicionalmente en el **Cuadro 20** se encuentra un comparativo de los estos resultados para con ello determinar qué tan fiable es el uso del simulador Allievi.

Tabla 18. Resultados simulación golpe de ariete corrida de datos.

Variable	Símbolo	Und.	Simulación No.1	Simulación No.2	Simulación No.3	Simulación No.4	Simulación No.5	Simulación No.6	Simulación No.7	Simulación No.8
Altura geométrica	H	m	1,2742	1,0321	0,8154	0,6243	0,4587	0,3185	0,2038	0,1146
Diámetro Interno	D	m	0,0519	0,0519	0,0519	0,0519	0,0519	0,0519	0,0519	0,0519
Longitud tubería descarga análisis	L	m	1,98	1,98	1,98	1,98	1,98	1,98	1,98	1,98
Espeso de la tubería	e	m	0,0039	0,0039	0,0039	0,0039	0,0039	0,0039	0,0039	0,0039
Celeridad	a	m/s	446,6108	446,6108	446,6108	446,6108	446,6108	446,6108	446,6108	446,6108
Rugosidad Tubería de PVC	R	m	0,0000003	0,0000003	0,0000003	0,0000003	0,0000003	0,0000003	0,0000003	0,0000003
Diámetro del calderín	D_C	m	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11
Altura del calderín	H_C	m	0,245	0,245	0,245	0,245	0,245	0,245	0,245	0,245
Longitud del calderín a la tubería	L_{CT}	m	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8
Caudal de entrada	$Q_{entrada}$	m ³ /s	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025
Porcentaje de apertura	%o	%	0,2354	0,2616	0,2943	0,3364	0,3924	0,4709	0,5887	0,7849
Velocidad de flujo	V	m/s	5	4,5	4	3,5	3	2,5	2	1,5
Pérdidas de carga	J	m	20,7009	14,4828	9,5668	5,8634	3,2548	1,5876	0,6650	0,2486
Coeficiente global de pérdida	k_{total}	m	16,2461	14,0322	11,7314	9,3910	7,0955	4,9839	3,2619	2,1686
Sobrepresión	$H + \Delta H$	kPa	215,1636	196,7157	177,5208	157,5769	136,8906	115,4841	93,4045	70,7307
		psi	2108,1737	1927,4207	1739,3496	1543,9394	1341,2547	1131,5139	915,1773	693,0202
		m	306,13	279,8826	252,5727	224,1969	194,7649	164,3082	132,8938	100,6341
Sobrepresión por el calderín	$H + \Delta H$	kPa	22,0785	20,9949	20,7085	19,5277	17,4013	14,1493	11,4386	8,5339
		psi	216,326	205,7083	202,9028	191,3327	170,4983	138,6356	112,0761	83,6155
			31,4129	29,8711	29,4637	27,7836	24,7582	20,1314	16,2746	12,1418

Fuente: elaboración propia.

Tabla 19. Cálculo teórico del golpe de ariete de la corrida de datos.

Variable	Símbolo	Und.	Simulación No.1	Simulación No.2	Simulación No.3	Simulación No.4	Simulación No.5	Simulación No.6	Simulación No.7	Simulación No.8
Velocidad de flujo	V	m/s	5	4,5	4	3,5	3	2,5	2	1,5
Altura geométrica	H	m	1,2742	1,0321	0,8154	0,6243	0,4587	0,3185	0,2038	0,1146
Diámetro Interno	D	m	0,0519	0,0519	0,0519	0,0519	0,0519	0,0519	0,0519	0,0519
Área de la sección transversal	S	m ²	0,0021	0,0021	0,0021	0,0021	0,0021	0,0021	0,0021	0,0021
Caudal de entrada	$Q_{entrada}$	m ³ /s	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025
Porcentaje de apertura	%o	%	0,2354	0,2616	0,2943	0,3364	0,3924	0,4709	0,5887	0,7849
Celeridad	a	m/s	446,6108	446,6108	446,6108	446,6108	446,6108	446,6108	446,6108	446,6108
Altura del líquido en el calderín	H_C	m	0,1841	0,1841	0,1841	0,1841	0,1841	0,1841	0,1841	0,1841
Golpe de ariete	ΔH	m	227,6304	204,8673	182,1043	159,3412	136,5782	113,8152	91,0521	68,2891
		m	228,9046	205,8994	182,9198	159,9656	137,0369	114,1337	91,2560	68,4038
Sobrepresión	$H + \Delta H$	kPa	2242,8074	2017,4031	1792,2484	1567,3434	1342,6881	1118,2825	894,1266	670,2204
		psi	325,6803	292,9491	260,2541	227,5955	194,973	162,3869	129,837	97,3233
		m	23,8531	21,3347	18,8417	16,3743	13,9323	11,5159	9,1249	6,7594
Sobrepresión por el calderín	$H + \Delta H$	kPa	233,7127	209,0374	184,6117	160,4358	136,5095	112,833	89,4062	66,229
		psi	33,9376	30,3545	26,8076	23,297	19,8226	16,3846	12,9827	9,6171

Fuente: elaboración propia.

Cuadro 20. Comparación de la corrida de datos.

Sistema	Sobrepresión (m)	Simulación No.1	Simulación No.2	Simulación No.3	Simulación No.4	Simulación No.5	Simulación No.6	Simulación No.7	Simulación No.8
Generación del golpe de ariete	Simulador Allievi	215,1636	196,7157	177,5208	157,5769	136,8906	115,4841	93,4045	70,7307
	Cálculo Teórico	228,9046	205,8994	182,9198	159,9656	137,0369	114,1337	91,2560	68,4038
	Porcentaje de error (%)	6,0029	4,4603	2,9515	1,4932	0,1067	1,1831	2,3543	3,4018
Mitigación del golpe de ariete	Simulador Allievi	22,0785	20,9949	20,7085	19,5277	17,4013	14,1493	11,4386	8,5339
	Cálculo Teórico	23,8531	21,3347	18,8417	16,3743	13,9323	11,5159	9,1249	6,7594
	Porcentaje de error (%)	7,4393	1,5925	9,9078	19,2580	24,8984	22,8679	25,3560	26,2520

Fuente: elaboración propia.

5.2.2.1 Análisis de resultados de la corrida de datos. En el **Cuadro 20** se sintetiza los datos obtenidos de las corridas de datos ideales en donde se buscó contrastar la información teórica con la obtenida mediante el software. Se observa que dentro de la fase de generación de golpe de ariete los datos calculados son bastantes cercanos a los generados por el programa teniendo como porcentaje de error máximo un 6% aproximadamente lo cual es bastante bajo. No obstante; ocurre el caso contrario con la fase de mitigación de golpe de ariete en donde los porcentajes de error aumentan considerablemente; pero, a pesar de esto los datos calculados son cercanos a los obtenidos mediante software. Lo anterior se explica mediante el hecho que el calderín fue diseñado para la condición crítica que corresponde a la simulación No. 1, por lo cual estos eran los datos de referencia; este dispositivo tendrá funcionalidad para los demás casos puesto que cubre el rango de sobrepresiones, pero presentará un rango de error más alto. Por tal motivo las primeras simulaciones presentan errores relativamente pequeños como se observa hasta la simulación No. 3 y desde la simulación No. 4 en adelante los porcentajes de error aumentan.

6. GUÍA DE LABORATORIO

En este capítulo se presenta el procedimiento metodológico para llevar a cabo prácticas de laboratorio con la herramienta de análisis de golpe de ariete en tubería recta.

A groso modo, dicho documento es una guía de laboratorio la cual consta de 3 partes: bases teóricas sobre el golpe de ariete, procedimiento para llevar a cabo la práctica especificando variables o datos que se deben tomar y cálculos que se deben realizar para comprender este fenómeno.

Adicionalmente, se presentan tanto los manuales de operación como de mantenimiento con el fin de estipular la correcta manipulación de la herramienta y el mantenimiento de la misma para que su disponibilidad y vida útil sean altas.

 Fundación Universidad de América	FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA	Código:
	FACULTAD DE INGENIERÍAS	Versión 0
	GUÍA DE PRÁCTICAS DE LABORATORIO	Julio 2019

PROGRAMA: Ingeniería de petróleos, mecánica y química	DEPARTAMENTO: Ingeniería aplicada
NOMBRE ASIGNATURA: Mecánica de fluidos	CÓDIGO: 3455
PRÁCTICA No. 01	NOMBRE DE LA PRÁCTICA: GOLPE DE ARIETE

1 INTRODUCCIÓN Y MARCO TEÓRICO

El alcance de esta práctica es permitir que el estudiante pueda conocer los principios de ocurrencia del golpe de ariete en sistemas hidráulicos y los mecanismos existentes para mitigar este efecto. Con esto, el estudiante entenderá la magnitud del efecto del golpe de ariete y la importancia de tener en consideración su cálculo para evitar posibles accidentes.

a) Definición y características:

El golpe de ariete o choque hidráulico es un incremento momentáneo de presión que ocurre en un sistema de agua cuando varían condiciones como velocidad o dirección espontáneamente. La ocurrencia del golpe de ariete se puede explicar en la Figura 1, con la siguiente secuencia: primero, ocurre un cambio repentino en el flujo y dirección que puede ser ocasionado por el cierre abrupto de una válvula, segundo, la energía cinética del fluido es convertida en energía de presión la cual choca con las paredes de la tubería y con los accesorios, tercero, las ondas que se generan viajan hacia atrás y hacia adelante buscando otro elemento con el cual chocar, por último, las ondas se disipan gracias a las pérdidas primarias o por fricción.¹

Figura 1. Secuencia del golpe de ariete.



Fuente: TROYANO, Antonio Fernández. Golpe de ariete o Water hammer SMAGUA 2014. [Consultado el Feb 20,2019]. Disponible en: <http://www.empresasconstruccion.es/golpe-de-ariete-water-hammer-smagua-2014/>

¹ LAHLOU, Michael. Golpe De Ariete. THE NATIONAL ENVIRONMENTAL SERVICES CENTER, 2015. p. 1-4

 Fundación Universidad de América	FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA	Código:
	FACULTAD DE INGENIERÍAS	Versión 0
	GUÍA DE PRÁCTICAS DE LABORATORIO	Julio 2019

b) Conceptos básicos y modelo matemático:

Celeridad. Se simboliza con la letra a y hace referencia a la velocidad de propagación de la onda de presión del golpe de ariete en el agua que fluye por la tubería. Esta velocidad depende directamente del módulo elástico y la densidad del fluido, y del diámetro, espesor y módulo elástico de la tubería.

Ecuación 1. Celeridad.

$$a = \frac{9.900}{\sqrt{48,3 + \frac{10^{10}}{E} * \frac{D}{e}}}$$

Fuente: ROSICH, E. M. El Golpe De Ariete En Impulsiones. Servicio de Publicaciones E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, 1974. 9788460064596. p. 12.

Donde:

a : celeridad [m/s].

D : diámetro interno de la tubería [m].

E : módulo elástico del material de la tubería [kg/m²].

e : espesor de la tubería [m].

Periodo. Se representa con el símbolo T^* y se define como el intervalo de tiempo requerido para realizar un ciclo de una onda.

Ecuación 2. Periodo.

$$T^* = \frac{2L}{a}$$

Fuente: ROSICH, E. M. El Golpe De Ariete En Impulsiones. Servicio de Publicaciones E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, 1974. 9788460064596. p. 8. Modificado por los autores.

Donde:

T^* : periodo [s].

L : longitud de la tubería de descarga [m].

a : celeridad [m/s].

Tiempo de parada. También llamado tiempo de cierre de la válvula, es el intervalo de inicio de apertura, total o parcial de un órgano de control durante el cual se produce el

 Fundación Universidad de América	FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA	Código:
	FACULTAD DE INGENIERÍAS	Versión 0
	GUÍA DE PRÁCTICAS DE LABORATORIO	Julio 2019

cambio de régimen del fluido. Se denomina con la letra T y si este valor es mayor al periodo se establece que es un cierre lento, de lo contrario, se denomina cierre rápido.

Ecuación 3. Tiempo de parada.

$$T = C + \frac{KLV}{g H_m}$$

Fuente: ROSICH, E. M. El Golpe De Ariete En Impulsiones. Servicio de Publicaciones E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, 1974. 9788460064596. p. 17

Donde:

C: coeficiente en función de la pendiente hidráulica [adim].

K: coeficiente en relación de la inercia [adim].

L: longitud de la tubería de descarga [m].

V: velocidad de flujo [m/s].

g: gravedad [m/s²].

H_m: altura manométrica [m].

El coeficiente C depende del porcentaje de la pendiente hidráulica la cual está determinada por la siguiente expresión:

Ecuación 4. Pendiente hidráulica.

$$\frac{H_m}{L}$$

Fuente: ROSICH, E. M. El Golpe De Ariete En Impulsiones. Servicio de Publicaciones E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, 1974. 9788460064596. p. 18

Donde:

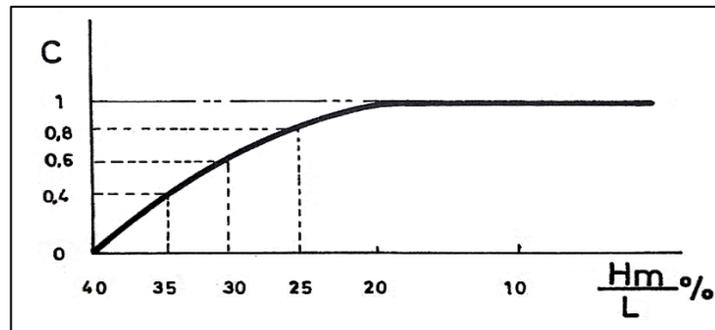
L: longitud de la tubería de descarga [m].

H_m: altura manométrica [m].

*Una vez obtenido el dato de la pendiente hidráulica en porcentaje, se busca cruzar este valor con la curva característica de la **Figura 2** para proyectarla en la ordenada y así obtener el coeficiente C:*

 Fundación Universidad de América	FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA	Código:
	FACULTAD DE INGENIERÍAS	Versión 0
	GUÍA DE PRÁCTICAS DE LABORATORIO	Julio 2019

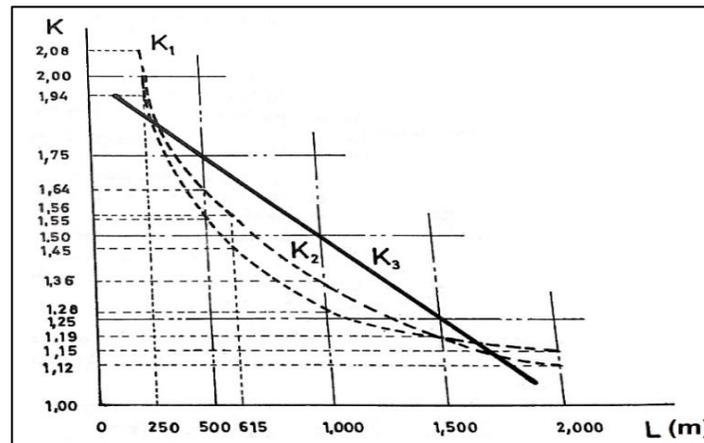
Figura 2. Gráfica del coeficiente C.



Fuente: ROSICH, E. M. El Golpe De Ariete En Impulsiones. Servicio de Publicaciones E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, 1974. p. 19

En la **Figura 3** se muestra las curvas características de este coeficiente, donde, obteniendo el valor de la longitud de descarga en metros se debe cruzar con la recta K_3 y proyectar dicho valor en la ordenada obteniendo así el valor del coeficiente K.

Figura 3. Gráfica del coeficiente K.



Fuente: ROSICH, E. M. El Golpe De Ariete En Impulsiones. Servicio de Publicaciones E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, 1974. p. 18

Longitud crítica. Está longitud hace referencia a la distancia que separa el final de la tubería de descarga del punto crítico.

 Fundación Universidad de América	FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA	Código:
	FACULTAD DE INGENIERÍAS	Versión 0
	GUÍA DE PRÁCTICAS DE LABORATORIO	Julio 2019

Ecuación 5. Expresión longitud crítica.

$$L_c = \frac{a T}{2}$$

Fuente: ROSICH, E. M. El Golpe De Ariete En Impulsiones. Servicio de Publicaciones E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, 1974. p. 8.

Donde:

a: celeridad [m/s].

T: tiempo de parada [s].

Golpe de ariete en descargas cortas. Se dice que una impulsión es corta cuando cumple la condición de que el tiempo de parada es mayor al periodo de la onda así $T > T^*$; lo cual coincide con que la longitud de la tubería de descarga sea menor que la longitud crítica.

Al cumplir esta condición se procede a calcular el golpe de ariete utilizando la ecuación de Michaud que está representada por:

Ecuación 6. Golpe de ariete en descargas cortas.

$$\Delta H = \frac{2 L V}{g T}$$

Fuente: ROSICH, E. M. El Golpe De Ariete En Impulsiones. Servicio de Publicaciones E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, 1974. p. 7.

Donde:

ΔH : golpe de ariete en descargas cortas [m].

L: longitud de la tubería de descarga [m].

V: velocidad de flujo [m/s].

g: gravedad [m/s^2].

T: tiempo de parada [s].

Golpe de ariete en descargas largas. Se dice que una descarga es larga cuando el tiempo de parada es menor al periodo de la onda así $T < T^*$, lo cual coincide con que la longitud de la tubería de descarga sea mayor que la longitud crítica.

 Fundación Universidad de América	FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA	Código:
	FACULTAD DE INGENIERÍAS	Versión 0
	GUÍA DE PRÁCTICAS DE LABORATORIO	Julio 2019

En esta condición el golpe de ariete se calcula a partir de la ecuación de Allievi así:

Ecuación 7. Golpe de ariete en descargas largas.

$$\Delta H = \frac{a V}{g}$$

Fuente: ROSICH, E. M. El Golpe De Ariete En Impulsiones. Servicio de Publicaciones E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, 1974. p. 7

Donde:

ΔH : golpe de ariete en descargas largas [m].

a : celeridad [m/s].

V : velocidad de flujo [m/s].

g : gravedad [m/s²].

Sobrepresión. La sobrepresión está dada en metros y viene dada por la siguiente expresión $H + \Delta H$, en la cual se suma el golpe de ariete a la altura geométrica de descarga.

c) Consecuencias:

Las principales consecuencias de los transitorios hidráulicos son: altas presiones, presiones negativas, separación de la columna de agua llegando inclusive a valores de cavitación, riesgo sanitario asociado a la intrusión de contaminantes como consecuencia de las presiones negativas, y como consecuencia de lo anterior rotura de la tubería o fatiga de la misma a lo largo del tiempo.²

No obstante; también se generan efectos como vibraciones y ruido, falla en bombas, válvulas y otros accesorios y ruptura de tuberías.³

² INGENIERIA DE FLUIDOS. Golpe de Ariete. [Consultado el Mar 21,2019]. Disponible en: <https://www.ingenieriadefluidos.com/golpe-de-ariete>

³ MARQUÉZ, Adriana y JIMENÉZ, Maryelvi. Manual De Prácticas De Laboratorio. 1 ed. Venezuela: Universidad de Carabobo, 2016. p. 66

 Fundación Universidad de América	FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA	Código:
	FACULTAD DE INGENIERÍAS	Versión 0
	GUÍA DE PRÁCTICAS DE LABORATORIO	Julio 2019

Figura 4. Rotura de accesorio por golpe de ariete.



Fuente: Golpe de ariete, un efecto colateral a no desdeñar.

d) Métodos de solución:

Existen diversos métodos de solución para este fenómeno de las cuales cabe resaltar el volante de inercia el cual se incorpora al motor de la bomba con el fin de retardar las pérdidas de revoluciones; también están las chimeneas de equilibrio, calderines y las ventosas las cuales actúan como un amortiguador de los choques de presión generados y buscan eliminar el aire contenido en la tubería; y por último, existe la alternativa de instalar válvulas de alivio, retención y anticipadoras de ondas con el fin de restringir el flujo gradualmente y así evitar el golpe de ariete. Existen sistemas universales de control disminución del golpe de ariete dentro de los cuales encontramos los calderines. Estos proponen un acoplamiento de una cámara hermética ocupada parcialmente de aire a la tubería. Mediante lo anterior se logra que la energía potencial del aire permita que el agua se desplace hacia arriba en los instantes siguientes al cierre brusco de la válvula. También, en el retroceso del agua se encarga de absorber parte de la energía de gravedad con lo cual disminuye el movimiento ondulatorio peligroso.

2 | OBJETIVO(S)

GENERAL

- Comprender el fenómeno de golpe de ariete.

ESPECÍFICOS

- Generar en condiciones controladas el fenómeno de golpe de ariete mediante una válvula electromagnética.
- Evidenciar la mitigación del fenómeno de golpe de ariete mediante el uso de un calderín.
- Realizar mediciones de presión a través de un transductor de presión.

 Fundación Universidad de América	FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA	Código:
	FACULTAD DE INGENIERÍAS	Versión 0
	GUÍA DE PRÁCTICAS DE LABORATORIO	Julio 2019

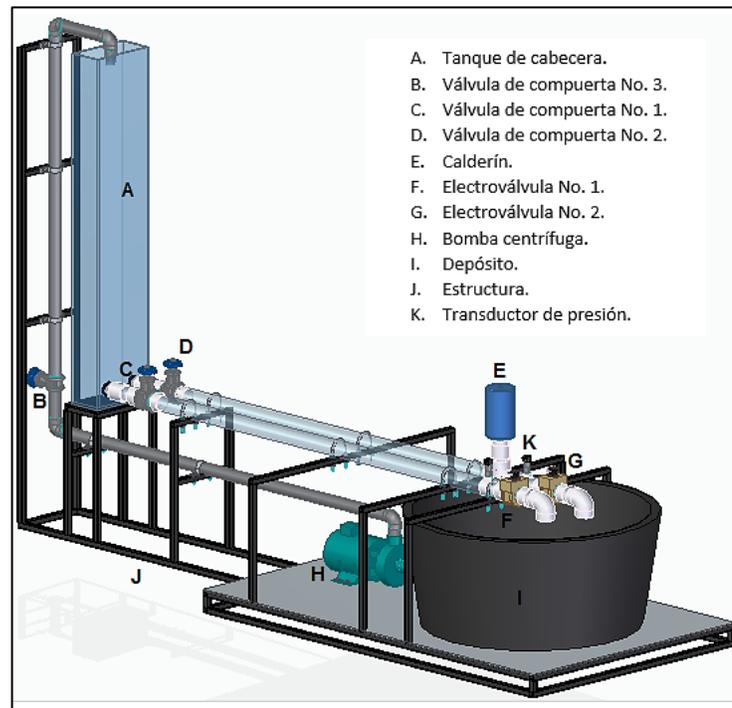
3 EQUIPOS, INSTRUMENTOS Y/O MATERIALES

- *Equipo/herramienta para análisis de golpe de ariete en tubería recta.*
- *Data Logger “Daq PRO 5300”.*
- *Ordenador portátil.*
- *Bata de laboratorio.*
- *Gafas de seguridad.*

Precauciones.

Previamente se debe realizar el llenado de los tanques para poder realizar la práctica. Cabe resaltar, que al trabajar con energía eléctrica y fluidos a presión se deben atender todas las recomendaciones puntuales que brinden el docente y laboratorista con el fin de evitar accidentes durante la práctica.

Figura 5. Herramienta de análisis de golpe de ariete.



Fuente: elaboración propia.

 Fundación Universidad de América	FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA	Código:
	FACULTAD DE INGENIERÍAS	Versión 0
	GUÍA DE PRÁCTICAS DE LABORATORIO	Julio 2019

4 MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS
<p><i>Previamente se debe realizar el llenado de los tanques para realizar la práctica. No obstante, la práctica está dividida en dos fases, la primera corresponde a la generación de golpe de ariete; mientras que, la segunda hace referencia a la mitigación de este fenómeno.</i></p> <p><i>FASE I: generación de golpe de ariete.</i></p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Con el fin de habilitar la primera fase de la práctica es necesario que las válvulas de compuerta 1 y 3 se encuentren totalmente abiertas; mientras que la válvula 2 debe estar totalmente cerrada. 2. Activar el interruptor I1 y dejar en estado de reposo el interruptor I2. 3. Accionar el motor de la bomba para que inicie el proceso de succión-descarga del fluido a 1359,7 rpm que brindan 150 l/min. 4. Variar el grado de apertura (desde 25% hasta 100% en intervalos del 25%) de la válvula 2 con el fin de variar el nivel del tanque cabecera. 5. Una vez se estabilice el nivel del tanque de cabecera en cada apertura de la válvula 1 se procede a accionar el interruptor I1 que acciona la válvula electromagnética de la fase de generación produciendo así un choque abrupto. 6. Observar la sobrepresión máxima generada y la onda de presión brindadas por el transductor de presión en el Data Logger "Daq PRO 5300". 7. Transferir los datos del Data Logger al ordenador portátil requerido. 8. Realizar este procedimiento para cada apertura de válvula. <p><i>FASE II: mitigación de golpe de ariete.</i></p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Con el fin de habilitar la segunda fase de la práctica es necesario que las válvulas de compuerta 2 y 3 se encuentren totalmente abiertas; mientras que la válvula 1 debe estar totalmente cerrada. 2. Activar el interruptor I2 y dejar en estado de reposo el interruptor I1 3. Accionar el motor de la bomba para que inicie el proceso de succión-descarga del fluido a 1359,7 rpm que brindan 150 l/min. 4. Variar el grado de apertura (desde 25% hasta 100% en intervalos del 25%) de la válvula 3 con el fin de variar el nivel del tanque cabecera. 5. Una vez se estabilice el nivel del tanque de cabecera en cada apertura de la válvula 2 se procede a accionar el interruptor 2 que acciona la válvula electromagnética de la fase de mitigación produciendo así un choque abrupto. 6. Observar la sobrepresión máxima generada y la onda de presión brindadas por el transductor de presión en el Data Logger "Daq PRO 5300". 7. Transferir los datos del Data Logger al ordenador portátil requerido.

 Fundación Universidad de América	FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA	Código:
	FACULTAD DE INGENIERÍAS	Versión 0
	GUÍA DE PRÁCTICAS DE LABORATORIO	Julio 2019

8. Realizar esté procedimiento para cada apertura de válvula.

5 CÁLCULOS Y RESULTADOS

1. Inicialmente, es necesario medir el valor de caudal con el fin de realizar los diversos cálculos que permiten describir el golpe de ariete.
2. Cabe recordar; que la tubería de succión y descarga son de acero comercial SCH 40 de 1 ½" y 1 ¼" respectivamente. No obstante, la tubería recta de análisis es de PVC transparente SCH 40.
3. Para calcular la velocidad de cada tramo se debe usar la siguiente ecuación:

Ecuación 8. Velocidad de flujo.

$$V = \frac{Q}{S}$$

Fuente: MOTT, Robert L. Mecánica De Fluidos. Sexta ed. México: Pearson Educación de México, S.A. de C.V., 2006. p. 164.

Donde:

S: área de la seccion transversal al flujo [m²].

Q: caudal [m³/s].

V: velocidad de flujo [m/s].

Para calcular la velocidad de la tubería de análisis se tiene en cuenta que, al ser un conducto por gravedad, su ecuación se rige bajo la teoría de Torricelli; así:

Ecuación 9. Velocidad de la tubería de análisis.

$$V = \sqrt{2gH}$$

Fuente: MOTT, Robert L. Mecánica De Fluidos. Sexta ed. México: Pearson Educación de México, S.A. de C.V., 2006. p. 179.

Donde:

V; velocidad de la tubería de análisis [m/s].

g: gravedad [m/s²].

H: altura del fluido [m].

 Fundación Universidad de América	FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA	Código:
	FACULTAD DE INGENIERÍAS	Versión 0
	GUÍA DE PRÁCTICAS DE LABORATORIO	Julio 2019

4. *EL tiempo de cierre es constante y está determinado por las características propias de la válvula electromagnética. Este tiene un valor de 1/3 segundos.*
5. *Complete la siguiente tabla para cada fase; cabe señalar que los títulos en negrilla son cálculos que debe realizar y los títulos sin negrilla son datos que debe medir:*

Tabla 1. Información para cada fase.

No. Medición	Caudal (m ³ /s)	%apertura v1	%apertura v2	Nivel del tanque	Velocidad (m/s)	Celeridad (m/s)	Tiempo de cierre (s)	Periodo (s)	Golpe de ariete (m)	Sobrepresión (m)	Sobrepresión (m)	Error absoluto (%)
1												
2												
3												
4												

 Fundación Universidad de América	FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA	Código:
	FACULTAD DE INGENIERÍAS	Versión 0
	GUÍA DE PRÁCTICAS DE LABORATORIO	Julio 2019

Tabla 1. (Continuación).

No. Medición	Caudal (m ³ /s)	%apertura v1	%apertura v2	Nivel del tanque	Velocidad (m/s)	Celeridad (m/s)	Tiempo de cierre	Periodo (s)	Golpe de ariete (m)	Sobrepresión (m)	Sobrepresión (m)	Error absoluto (%)
5												
6												
7												
8												

Fuente: elaboración propia.

6 CUESTIONARIO

1. Consulte acerca del funcionamiento de los sistemas de mitigación de golpe de ariete.
2. Investigue dentro de la literatura de la industria petrolera en el área de perforación acerca de las bombas tríplex y de los Dámper presentes en estas. Describa que son y su funcionamiento.
3. ¿Qué precauciones deben tenerse para evitar la generación de golpe de ariete?

 Fundación Universidad de América	FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA	Código:
	FACULTAD DE INGENIERÍAS	Versión 0
	GUÍA DE PRÁCTICAS DE LABORATORIO	Julio 2019

7	ANEXOS
<ol style="list-style-type: none"> 1. <i>Manual de operación de la herramienta de análisis de golpe de ariete.</i> 2. <i>Manual de mantenimiento de la herramienta de análisis de golpe de ariete.</i> 	

8	BIBLIOGRAFÍA
<ul style="list-style-type: none"> • <i>Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Agrícola de Ciudad Real. Tema 10. El Golpe De Ariete. p. 1.</i> • <i>FIGUERA, Mariby. WATER HAMMER TOP TEN. [En línea]. Recuperado en: 19 MARZO 2019. Formato archivo (pdf). Disponible en: http://cyf-eng.com/pdf/boletines/8.pdf . p. 12</i> • <i>INGENIERIA DE FLUIDOS. Golpe de Ariete. [Consultado el Mar 21,2019]. Disponible en: https://www.ingenieriadefluidos.com/golpe-de-ariete</i> • <i>LAHLOU, Michael. Golpe De Ariete. THE NATIONAL ENVIRONMENTAL SERVICES CENTER, 2015. p. 1-4</i> • <i>MARQUÉZ, Adriana y JIMENÉZ, Maryelvi. Manual De Prácticas De Laboratorio. 1 ed. Venezuela: Universidad de Carabobo, 2016. p. 66</i> 	

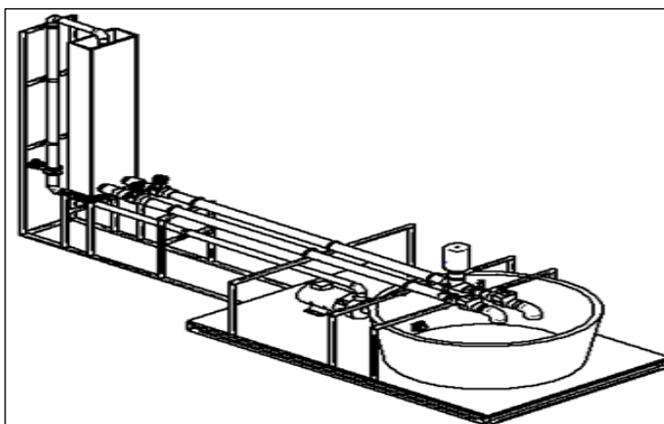
Fuente: elaboración propia con base en formato Guía de laboratorio de la Fundación Universidad de América.

 Fundación Universidad de América	FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA	Código:
	FACULTAD DE INGENIERÍAS	Versión 0
	MANUAL DE OPERACIÓN	Julio 2019

En el siguiente manual se presentan todos los pasos que se deben tener en cuenta para la correcta operación de la herramienta con la cual se generan y visualizan golpes de ariete en tubería recta y se demuestra el funcionamiento de un calderín.

La herramienta está provista de un tanque de cabecera, un depósito, dos secciones de tubería paralelas en PVC, una sección de tubería en acero, tres válvulas de compuerta, dos electroválvulas, un sensor magnético de caudal, un transductor de presión, un calderín, una bomba caracol, una estructura, una manguera y demás accesorios como acoples, adaptadores, codos, collar de derivación, reductores, y tes.

Figura 1. Herramienta de análisis de golpe de ariete.



Fuente: elaboración propia.

Cabe destacar que el equipo no se puede manipular sin una previa inducción por parte del docente o monitor a cargo, con el propósito de que los estudiantes estén informados de cómo operar el equipo.

Adicionalmente, se deben conocer las normas de seguridad en el laboratorio las cuales incluyen:

- *Portar elementos de protección personal como bata, guantes, gafas de seguridad.*
- *No fumar ni consumir alimentos dentro del recinto.*
- *No portar bufandas, manillas u otros accesorios que no hagan parte de los elementos de protección personal.*
- *Mantener el cabello recogido.*

No obstante, la herramienta está diseñada con las mejores condiciones de seguridad y

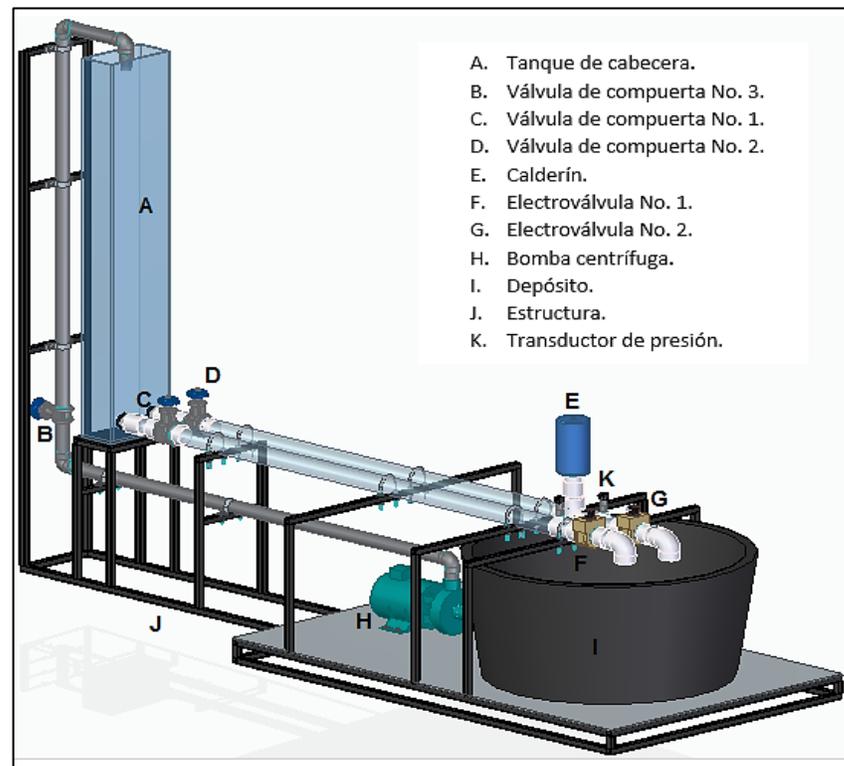
 Fundación Universidad de América	FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA	Código:
	FACULTAD DE INGENIERÍAS	Versión 0
	MANUAL DE OPERACIÓN	Julio 2019

ergonomía para la fácil manipulación. Cumpliendo así los siguientes requerimientos:

- *La herramienta debe estar totalmente separado de cualquier otro elemento que no ayude a su funcionamiento.*
- *La herramienta debe tener cerca una toma corriente para poder conectar la bomba de caracol.*
- *Las ruedas deben estar giradas todas hacia el mismo sentido y frenadas para que no haya movimiento de la herramienta durante la práctica de laboratorio.*
- *Debe haber una delimitación pintada de amarillo en el piso alrededor de la herramienta que indique que los estudiantes que no estén operando el banco deben estar detrás de la línea.*

En la siguiente figura se observan los componentes principales de la herramienta y sobre estos se desarrolló la explicación del manual de operación de la misma.

Figura 2. Componentes de la herramienta.



Fuente: elaboración propia

 Fundación Universidad de América	FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA	Código:
	FACULTAD DE INGENIERÍAS	Versión 0
	MANUAL DE OPERACIÓN	Julio 2019

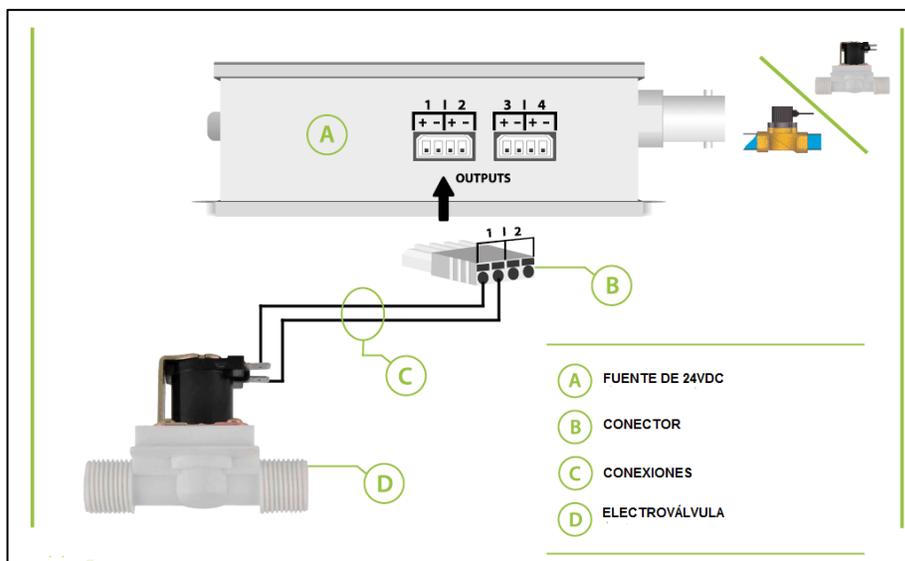
Pasos previos.

A continuación, se enuncian los pasos necesarios que se deben cumplir antes de iniciar la operación de la herramienta.

1. Verificar el llenado de tanque de cabecera (A) y del depósito (I).
2. Verificar que las conexiones eléctricas de la bomba (H) se encuentren en buen estado.
3. Verificar que las válvulas estén abiertas o cerradas según el caso.
4. Revisar la conexión de la manguera ubicada en la parte inferior del tanque de cabecera.
5. Realizar una inspección visual general de toda la herramienta, para asegurar que todas las piezas se encuentren en buen estado.

En cuanto a las conexiones eléctricas de las electroválvulas es necesario recordar que el laboratorio de mecánica de fluidos provee una fuente de alimentación de 110v; pero, las electroválvulas operan a 24v por lo que es necesario contar con una fuente de alimentación (transformador) que opere al voltaje anteriormente mencionado tal y como se muestra en la **Figura 3**.

Figura 3. Herramienta de análisis de golpe de ariete.

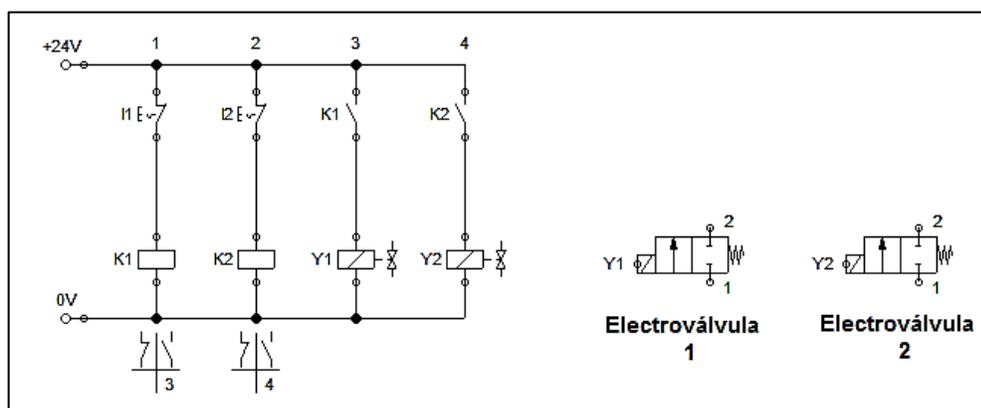


Fuente: OPENGROW. Válvula Solenoide. En: opengrow. [En línea]. Recuperado en: 20 mayo 2019. Disponible en: <https://opengrow.pt/shop/es/perifericos-extras/21-solenoid-valve>.

 Fundación Universidad de América	FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA	Código:
	FACULTAD DE INGENIERÍAS	Versión 0
	GUÍA DE PRÁCTICAS DE LABORATORIO	Julio 2019

Adicionalmente, se establecen las conexiones eléctricas que deben tener las electroválvulas recordando que estas son normalmente cerradas, por lo que serán operadas por interruptores normalmente cerrados para permitir el paso de fluido en condición de reposo y generar el golpe de ariete en su activación. Dicho esquema se muestra en la **Figura 4**.

Figura 4. Esquema de conexiones eléctricas de electroválvulas.



Fuente: elaboración propia.

Pasos para la generación del golpe de ariete.

1. Verificar que las válvulas de compuerta 1 y 3 se encuentren totalmente abiertas y que la válvula 2 esté totalmente cerrada. (remitirse a la **Figura 2**).
2. Activar el interruptor I1 y dejar en estado de reposo el interruptor I2 (**Figura 4**).
3. Accionar el motor de la bomba mediante el tablero que trae la misma para que dé inicio al proceso de succión-descarga del fluido variando las rpm con un valor de 1359,7 rpm, las cuales brindan 150 l/min. (**Figura 5**).
4. Variar el grado de apertura (desde 25% hasta 100% en intervalos del 25%) de la válvula 1 con el fin de variar el nivel del tanque cabecera.
5. Una vez se establezca el nivel del tanque de cabecera en cada apertura de la válvula 1 se procede a accionar el interruptor I1 que acciona la válvula electromagnética de la fase de generación produciendo así un choque abrupto.
6. Observar la sobrepresión máxima generada y la onda de presión brindadas por el transductor de presión en el Data Logger "Daq PRO 5300" (**Figura 6**).
7. Transferir los datos del Data Logger al ordenador portátil requerido.
8. Realizar este procedimiento para cada apertura de válvula.

 Fundación Universidad de América	FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA	Código:
	FACULTAD DE INGENIERÍAS	Versión 0
	GUÍA DE PRÁCTICAS DE LABORATORIO	Julio 2019

Figura 5. Tablero de mando bomba Barnes.



Fuente: BARNES de Colombia S.A. Tableros multifunción. [En línea]. Recuperado: 10 abril 2019. Disponible en: <http://www.barnes.com.co/tableros/>

Figura 6. Data Logger “Daq PRO 5300”.



Fuente: Vía industrial. Registrador de dator. [En línea]. Recuperado: 10 abril 2019. Disponible en: <https://www.viaindustrial.com/pp/Registrador-de-datos-manual-portatill-OM-DAQPRO-5300-UNIV-omega-P165381>.

 Fundación Universidad de América	FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA	Código:
	FACULTAD DE INGENIERÍAS	Versión 0
	GUÍA DE PRÁCTICAS DE LABORATORIO	Julio 2019

Pasos para la mitigación del golpe de ariete.

1. Verificar que las válvulas de compuerta 2 y 3 se encuentren totalmente abiertas y que la válvula 1 esté totalmente cerrada. (remitirse a la **Figura 2**).
2. Activar el interruptor I2 y dejar en estado de reposo el interruptor I1 (**Figura 4**).
3. Accionar el motor de la bomba mediante el tablero que trae la misma para que dé inicio al proceso de succión-descarga del fluido variando las rpm con un valor de 1359,7 rpm, las cuales brindan 150 l/min. (**Figura 5**).
4. Variar el grado de apertura (desde 25% hasta 100% en intervalos del 25%) de la válvula 1 con el fin de variar el nivel del tanque cabecera.
5. Una vez se estabilice el nivel del tanque de cabecera en cada apertura de la válvula 1 se procede a accionar el interruptor I1 que acciona la válvula electromagnética de la fase de generación produciendo así un choque abrupto.
6. Observar la sobrepresión máxima generada y la onda de presión brindadas por el transductor de presión en el Data Logger "Daq PRO 5300" (**Figura 6**).
7. Transferir los datos del Data Logger al ordenador portátil requerido.
8. Realizar este procedimiento para cada apertura de válvula.

Fuente: elaboración propia con base en formato Guía de laboratorio de la Fundación Universidad de América.

 Fundación Universidad de América	FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA	Código:
	FACULTAD DE INGENIERÍAS	Versión 0
	MANUAL DE MANTENIMIENTO	Julio 2019

Con el fin de aumentar la disponibilidad y vida útil de la herramienta para el análisis de golpe de ariete en tubería recta es necesario realizar una serie de rutinas e inspecciones a cada uno de los elementos que la componen. Las rutinas que se han establecido buscan atender componentes claves de la herramienta con el fin de evitar la ocurrencia de fallas.

Dentro de la herramienta de golpe de ariete se encuentra un componente vital para el proceso que es la bomba centrífuga (motor eléctrico-bomba hidráulica). A continuación, se presenta un listado de fallas que se pueden generar durante la operación de la herramienta:

COMPONENTE	FALLA	CAUSA
BOMBA CENTRÍFUGA.	<i>La bomba no suministra el caudal necesario.</i>	<i>Escapes en las tuberías.</i>
		<i>Aire en las tuberías.</i>
		<i>Nivel bajo en el depósito.</i>
		<i>Falla en el motor</i>
		<i>Falla en el Impeller.</i>
	<i>Ruido excesivo en el sistema.</i>	<i>Cavitación en la bomba.</i>
		<i>Agua con residuos sólidos.</i>
		<i>Deterioro de los componentes mecánicos del motor (sellos, Impeller, acoples).</i>
	<i>El motor está accionado; pero, la bomba no.</i>	<i>Avería en el acople del motor-bomba.</i>
	<i>El motor eléctrico no acciona.</i>	<i>Cable de poder desconectado.</i>
		<i>Voltaje incorrecto de operación.</i>
		<i>Sistema eléctrico averiado (cables, condensadores, bornera del motor, etc.)</i>
<i>Interruptor de la caja de mando averiado.</i>		

 Fundación Universidad de América	FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA	Código:
	FACULTAD DE INGENIERÍAS	Versión 0
	MANUAL DE MANTENIMIENTO	Julio 2019

RUTINAS DE INSPECCIÓN

Habiendo mencionado las fallas funcionales que puede presentar la herramienta en su componente vital que es la bomba centrífuga, se procede a establecer las rutinas de inspecciones que deben realizarse a cada uno de los componentes del equipo. Destacando que las rutinas se encuentran en función de la periodicidad de las mismas; en donde, con estas se busca establecer una guía clara para brindar al equipo el máximo grado de confiabilidad y bienestar del mismo.

Las rutinas de inspección están encaminadas a verificar los aspectos estructurales, eléctricos, hidráulicos y de almacenamiento de la herramienta. Dentro del aspecto estructural se encuentra como tal la estructura propia de la herramienta; en cuanto al aspecto eléctrico se encuentra todas las conexiones eléctricas de la herramienta como las del transductor, electroválvula y el motor de la bomba. En cuanto al aspecto hidráulico se encuentra las tuberías, accesorios y la bomba centrífuga. Por último, dentro del almacenamiento se encuentra el depósito y el tanque de cabecera.

MENSUALES

- *Se debe realizar inspección visual de todos los componentes de la herramienta (estructura, tuberías, accesorios, bomba, tanques y elementos de medición).*
- *Inspección auditiva con el fin de verificar que no se encuentren ruidos extraños.*
- *Observar que los parámetros de funcionamiento de la herramienta con caudal y nivel se encuentren dentro de los rangos establecidos.*
- *Revisar que el sistema no presente fugas ni goteos porque afectaría el desempeño de la práctica.*
- *Desocupar el calderín y volverlo a cargar de 0,5 lts de aire presurizado.*

Cabe resaltar, que es necesario realizar limpieza de las tuberías de la herramienta (succión, descarga y descarga de análisis). Esto se debe realizar 1 vez al mes con el fin de evitar presencia de fouling en las tuberías de acero y opacidad en la tubería de PVC transparente.

Para esto, se debe realizar el siguiente procedimiento:

1. *Cerchiórese que el equipo se encuentre apagado.*
2. *Cierre la válvula de compuerta de la sección de descarga ubicada antes del tanque de cabecera.*
3. *Abra paso a la válvula que permite el desagüe del tanque de cabecera y espere a que este se desocupe.*

 Fundación Universidad de América	FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA	Código:
	FACULTAD DE INGENIERÍAS	Versión 0
	MANUAL DE MANTENIMIENTO	Julio 2019

4. Una vez vacío el tanque de cabecera, cierre la válvula de compuerta ubicada en la sección de succión.
5. Ya teniendo desocupada la mayor cantidad de agua posible se procede a desocupar el depósito de almacenamiento.
6. Proceda a desacoplar cada una de las tuberías de la herramienta, desconecte las válvulas electromagnéticas, los collarines que sujetan los transductores de presión, el calderín y demás elementos; dejando únicamente el tanque de cabecera, depósito y bomba.
7. Lave cada uno de los elementos incluyendo los tanques.
8. Vuelva a acoplar todos los elementos volviendo a adicionar teflón a las uniones roscadas para asegurar un buen sello.
9. Realice el llenado de los tanques previos nuevamente.
10. Abra todas las válvulas presentes en la herramienta y accione la bomba para realizar la purga del sistema.

SEMESTRALES

- Inspección visual de las tuberías con el fin de buscar posibles fisuras.
- Inspección visual en las conexiones con el fin de encontrar posibles fugas o charcos de fluido.
- Revisar el ajuste de las abrazaderas de las tuberías de descarga de análisis, dado que estas se encuentran sometidas constantemente a sobrepresiones.
- Revisar que los parámetros de caudal y nivel se encuentren dentro de los rangos establecidos.
- Inspeccionar el estado de los cables eléctricos y de transmisión de datos buscando peladuras u olores que permitan determinar su avería.
- Revisar que la sujeción de la bomba se encuentre ajustada a la estructura.

ANUAL

- Inspección visual detallada de todos los elementos de la herramienta.
- Inspección auditiva detallada con el fin de encontrar ruidos que no sean usuales durante la operación de la herramienta.
- Desmontaje completo de la herramienta para lavar tuberías, accesorios y tanque.
- Revisión de la estructura de la herramienta buscando deformación, roturas y grietas de la misma.
- Revisar las abrazaderas de las tuberías observando su ajuste y estado.
- Realizar un mantenimiento preventivo a la bomba con el fin de garantizar su disponibilidad.

 Fundación Universidad de América	FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA	Código:
	FACULTAD DE INGENIERÍAS	Versión 0
	MANUAL DE MANTENIMIENTO	Julio 2019

- *Calibrar los transductores de presión con fin de garantizar la correcta medida de presión de la práctica.*
- *Revisar el estado de los solenoides de las válvulas con el fin de verificar su correcto funcionamiento.*
- *Realizar desmontaje del calderín con el fin de observar que la membrana se encuentre sin fugas.*

Fuente: elaboración propia con base en formato Guía de laboratorio de la Fundación Universidad de América.

7. EVALUACIÓN FINANCIERA

La evaluación financiera se realizará a través de los indicadores económicos beneficio costo (B/C) y valor presente neto (VPN), los cuales permiten evaluar la viabilidad del proyecto, teniendo en cuenta los costos y gastos asociados al diseño, construcción, operación y mantenimiento de la herramienta de análisis de golpe de ariete en tubería recta para un laboratorio de mecánica de fluidos, tomando como referencia un horizonte de planeación de 5 años y el valor de la moneda en pesos colombianos.

Es importante aclarar que, aunque este proyecto de grado solo contará con la fase de diseño el estudio financiero tendrá en cuenta la fase de construcción con el fin de saber si los beneficios económicos o los ingresos monetarios del proyecto cubren los costos y con ello determinar si el proyecto es rentable o no.

7.1 COSTOS

Debido a que la herramienta de análisis de golpe de ariete se utilizará para llevar a cabo una práctica de laboratorio, los costos del proyecto están asociados con la prestación de un servicio, en donde se tiene en cuenta varias funciones operativas como administrativas.

7.1.1 Costos de ingeniería. En el **Cuadro 21** se presentan los costos de ingeniería, los cuales representan los costos de talento humano, relacionados con las horas de trabajo de los proponentes y fungibles requeridos para la elaboración del proyecto.

Cuadro 21. Costos de ingeniería.

Talento Humano	No. personas	Horas/hombre	Precio/Hora	Valor Total
Proponentes	2	240	15.000	7.200.000
Total Talento Humano				7.200.000
Fungibles	Unidad	Cantidad	Valor Unitario	Valor Total
Libros	Unidad	3	120.000	360.000
Papel	Resma	4	12.000	48.000
Tinta	Tóner	4	40.000	160.000
Total gastos de fungibles				568.000
Costos de Ingeniería				\$ 7.768.000

Fuente: elaboración propia.

7.1.2 Costos de fabricación. Incluye todos aquellos costos de materiales y gastos generados en la mano de obra, como soldadura, cortadura de tubos y mecanizado

de algunas piezas que se observan en el **Cuadro 22**, para la fabricación de la herramienta.

Cuadro 22. Costos de mano de obra.

Concepto	Unidad	Cantidad	Valor Unitario	Valor Total
Corte de tubos	Hora	1	18.000	18.000
Roscado de tubos	Hora	1	18.000	18.000
Soldadura	Hora	4	30.000	120.000
Ensamblaje	Hora	18	10.000	180.000
Costos de Mano de Obra				\$ 336.000

Fuente: elaboración propia.

A continuación, se presenta en el **Cuadro 23** los costos de los materiales para la fabricación de la herramienta a la fecha, basados en los requerimientos proporcionados en la fase de diseño. Se debe tener en cuenta que estos costos financieramente tienen una variabilidad en el tiempo y pasados los años no serán los mismos.

Cuadro 23. Costos de material.

Artículo	Und.	Costo Unitario	Costo Total	Disponible en
Abarcón 2"	8	17.000	136.000	http://www.interelectricas.com.co/product.php?idcategoria=5&idsubcategoria=110&idprodu=345&pronom=Abrazadera%20en%20U%20tipo%20CODENSA.%20ET-
Abrazadera metálica 1 1/4" x25 Und.	1	16.100	16.100	https://www.mundialdetornillos.com/Abrazaderas-Catalogo
Acople 1 1/2" Hembra	1	4.344	4.344	https://coval.com.co/pdfs/listasprecios/ult_galvanizado_accesorios.pdf
Acople hembra 2" PVC	2	6.918	13.836	https://tuvalrep.com.co/
Adaptador macho 2" PVC	8	4.136	33.088	https://tuvalrep.com.co/
Adaptador tanque de agua 1 1/2"	4	27.900	111.600	https://www.homecenter.com.co/homecenter-co/product/343622/Flanche-1-1-2-pulg/343622
Bomba caracol Barnes EE 1,5 15 1	1	513.000	513.000	http://www.barnes.com.co/wp-content/uploads/2018/10/EE-1.5-10-1.pdf
Calderín 2 L	1	90.000	90.000	https://autosolar.es/calderines-con-patas/calderin-50-litros-amf-p-ibaiondo-con-patas
Cinta teflón ptfe basic 3/4"x 10 m	1	7.900	7.900	https://www.homecenter.com.co/homecenter-co/product/135322/cinta-teflon-ptfe-basic-3-4-pulgada-x-10-metros
Codo estándar 1 1/4" de 90° de acero comercial	2	4.939	9.878	https://coval.com.co/pdfs/listasprecios/ult_galvanizado_accesorios.pdf
Codo estándar 2" de 90° de PVC	2	8.280	16.560	https://tuvalrep.com.co/
Collar de Derivación con Inserto Metálico 2 x 1/2	1	12.900	12.900	https://www.homecenter.com.co/homecenter-co/product/293077/collar-de-derivacion-con-inserto-metalico-2-x-1-2

Cuadro 23. (Continuación).

Artículo	Und.	Costo Unitario	Costo Total	Disponible en
Electroválvula de 2" Ref. 250619	2	1.641.000	3.282.000	https://www.viaindustrial.com/producto.asp?codigo=250619
Lámina acero A36 1/4"	1	36.069	36.069	http://www.colombia.generadordeprecios.info/obra_nueva/Cubiertas/Inclinadas/Chapas_de_acero/Cubierta_inclinada_de_lamina_de_acero.html
Lámina acrílica transparente de 120x180 calibre 10 mm	1	511.700	511.700	http://www.cristacryl.com/Catalogos_PDF/Laminas%20Acricas.pdf
Limpiador removedor para PVC (1/32 Gal)	8	6.002	6.002	https://tuvalrep.com.co/
Manguera 1 1/2" de 6 m	1	116.900	116.900	https://www.homecenter.com.co/homecenter-co/product/337772/Manguera-Acoplada-Corrugada-de-Succion-de-1-1-2-pulgadas-x-6-metros/337772
Pegante acrílico Cristacryl de 250 cm ³	1	16.200	16.200	http://www.cristacryl.com/index.html
Reductor H-H 1/2" - 1/4"	1	1.990	1.990	https://coval.com.co/pdfs/listasprecios/ult_galvanizado_accesorios.pdf
Reductor H-H 1 1/2" - 1 1/4"	1	3.927	3.927	https://coval.com.co/pdfs/listasprecios/ult_galvanizado_accesorios.pdf
Reductor H-H PVC 2"-1"	1	5.691	5.691	https://coval.com.co/pdfs/listasprecios/ult_galvanizado_accesorios.pdf
Sensor ultrasónico de caudal (172851)	1	5.850.292	5.850.292	https://www.viaindustrial.com/producto.asp?codigo=172851
Soldadura líquida PVC 1/32 Gal	1	13.589	13.589	https://coval.com.co/pdfs/listasprecios/ult_galvanizado_accesorios.pdf

Cuadro 23. (Continuación).

Artículo	Und.	Costo Unitario	Costo Total	Disponible en
Tanque bajito 250 L	1	175.900	175.900	https://www.homecenter.com.co/homecenter-co/product/87181/tanque-bajito-250-litros
Tee	2	10.579	21.158	https://tuvalrep.com.co/
Transductores de presión (157616)	2	1.145.760	2.291.520	https://www.viaindustrial.com/producto.asp?codigo=157616
Tubería acero comercial 1 1/4" de 6 m	1	100.312	100.312	https://www.coval.com.co/pdfs/listasprecios/ult_galvanizado_tuberias.pdf
Tubería acero comercial 1 1/2" de 6m	1	123.018	123.018	https://www.coval.com.co/pdfs/listasprecios/ult_galvanizado_tuberias.pdf
Tubería PVC transparente 2" de 3m	2	396.900	793.800	https://tuvalrep.com.co/
Válvula de compuerta estándar de 1 1/4"	1	39.900	39.900	https://www.homecenter.com.co/homecenter-co/product/360742/Valvula-de-Compuerta-Estandar-1.1-4-pulg/360742
Válvula de compuerta estándar de 1 1/2"	2	55.900	111.800	https://www.homecenter.com.co/homecenter-co/product/360741/Valvula-de-Compuerta-Estandar-1.1-2-pulg/360741
Válvula de compuerta estándar de 2"	2	89.900	179.800	https://www.homecenter.com.co/homecenter-co/product/360744/Valvula-de-Compuerta-Estandar-2-pulg/360744
Costos de Material			\$15.045.452	

Fuente: elaboración propia.

Finalmente, la inversión total de la herramienta se obtiene al sumar el costo total de fabricación y de ingeniería, tal y como se muestra en la siguiente **Tabla 20**:

Tabla 20. Inversión de la herramienta.

Costo	Valor
Costos de ingeniería	7.768.000
Costos de fabricación	15.381.452
Inversión total	\$ 23.149.452

Fuente: elaboración propia.

7.1.3 Costos de mantenimiento y operación CMO. Los cuales aparecen en el **Cuadro 24**, incluyen los salarios del docente y del laboratorista durante las dos horas que dura la práctica de laboratorio para los onces grupos que ven la asignatura de mecánica de fluidos. Cabe destacar que estos costos empiezan a figurar en el análisis a partir del primer año de operación de la herramienta, donde se asume que ya es necesario realizar una acción preventiva.

Cuadro 24. Costos de mantenimiento y operación CMO.

Concepto	Und.	Cantidad	Valor Unitario	Valor Total por semestre	Valor Total por año
Docente	Hora	22	40.000	880.000	1.760.000
Laboratorista	Hora	22	15.000	330.000	660.000
Costos de operación					2.420.000
Mantenimiento	Hora	12	15.000	180.000	360.000
Costos de mantenimiento					360.000
Costos de mantenimiento y operación					\$ 2.780.000

Fuente: elaboración propia.

7.2 BENEFICIOS

Para determinar todas las ventajas experimentadas o beneficios netos tras el diseño de la herramienta de análisis golpe de ariete, se debe tener en cuenta tanto los beneficios positivos como los negativos, como se muestra a continuación:

7.2.1 Beneficios Negativos (B⁻). A continuación, en la **Tabla 21**, se presentan los beneficios negativos que son los que se producen durante el tiempo de funcionamiento de la herramienta durante la práctica de laboratorio, e incluye: el consumo de corriente eléctrica y el consumo de agua, los cuales empiezan a figurar para el análisis financiero a partir del primer año.

Para determinar el consumo de corriente eléctrica se tuvo en cuenta que la bomba que hace parte de la herramienta tiene un consumo energético por potencia de 0,37 kW (kilovatios), la cual estará en funcionamiento durante las dos horas que dura la práctica de laboratorio para los onces grupos que ven la asignatura de mecánica de fluidos, por tal motivo el total de horas de consumo de corriente eléctrica por semestre de la bomba es 8,20 kW-h.

Sabiendo que la cantidad de agua que se emplea por práctica de laboratorio para llenar el tanque de cabecera y el depósito son 0,23 m³, se determinó que el consumo total de agua para los once grupos que ven la práctica son 2,475 m³.

Tabla 21. Beneficios negativos.

Concepto	Und.	Cantidad	Valor Unitario	Valor Total por semestre	Valor Total por año
Corriente eléctrica	\$/kW-h	8,20	478,34	3.924	7.848
Consumo de agua	\$/m ³	2,475	3.996,47	9.891	19.782
Beneficios negativos					\$ 27.630

Fuente: elaboración propia.

7.2.1 Beneficios Positivos (B⁺). Debido a que el proyecto no brinda beneficios directos que se requieren para estimar su viabilidad, se realizará una estimación aproximada de cuánto le cuesta a cada estudiante de la Fundación Universidad de América, la realización de una práctica de laboratorio de mecánica de fluidos con duración de dos horas, como se muestra en la **Tabla 22**.

Tabla 22. Beneficios positivos.

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	276.718,00	3	830.154,00	48	17.294,88	34.589,75	11	25	275	9.512.181,25	19.024.362,50
2	298.855,44	3	896.566,32	48	18.678,47	37.356,93	11	25	275	10.273.155,75	20.546.311,50
3	322.763,88	3	968.291,63	48	20.172,74	40.345,48	11	25	275	11.095.008,21	22.190.016,42
4	348.584,99	3	1.045.754,96	48	21.786,56	43.573,12	11	25	275	11.982.608,87	23.965.217,73
5	376.471,78	3	1.129.415,35	48	23.529,49	47.058,97	11	25	275	12.941.217,58	25.882.435,15

Donde:

A: Periodo.

B: Valor crédito académico.

C: Número de Créditos por asignatura.

D: Costo total asignatura por semestre.

E: Horas presenciales por semestre.

F: Costo asignatura por hora.

G: Costo práctica de laboratorio por estudiante.

H: Número de grupos de la asignatura por semestre.

I: Número de estudiantes por grupo.

J: Número de estudiantes por semestre.

K: Inversión práctica por semestre

L: Inversión práctica por año.

Fuente: elaboración propia.

En la **Tabla 23**, aparecen consolidados los beneficios y costos del proyecto para el horizonte de planeación de 5 años.

Tabla 23. Beneficios y costos del proyecto.

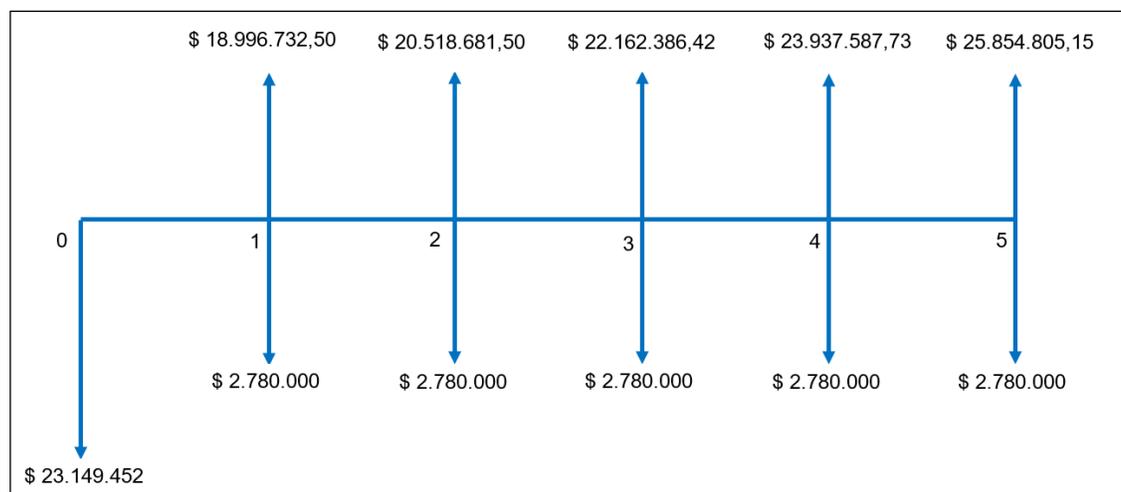
Periodo	Inversión I	Beneficios positivos B ⁺	Beneficios negativos B ⁻	Beneficios Netos B	Costos de mantenimiento y operación CMO
0	23.149.452	-	-	-	-
1	-	19.024.362,50	27.630	18.996.732,50	2.780.000
2	-	20.546.311,50	27.630	20.518.681,50	2.780.000
3	-	22.190.016,42	27.630	22.162.386,42	2.780.000
4	-	23.965.217,73	27.630	23.937.587,73	2.780.000
5	-	25.882.435,15	27.630	25.854.805,15	2.780.000

Fuente: elaboración propia.

7.3 FLUJO DE CAJA

En la **Figura 62** se observa el flujo de caja del proyecto, el cual, según el ingeniero Baca “es una representación gráfica que ayuda a la comprensión de diferentes problemas financieros, mediante la realización de una línea horizontal la cual contiene los periodos de evaluación del proyecto, flechas hacia arriba que indican los ingresos (beneficios) de cada periodo y flechas hacia abajo que representan los egresos (inversión y costos de mantenimiento y operación CMO)”⁴⁵.

Figura 62. Flujo de caja del proyecto.



Fuente: elaboración propia.

⁴⁵ CURREA, G. B. Ingeniería Económica. Editorial Educativa, 1992. 9789589188071. p. 4.

7.4 TASA DE INTERÉS DE OPORTUNIDAD

En el libro Ingeniería Económica se establece que para determinar la viabilidad del proyecto mediante el análisis de los indicadores relación beneficio costo y valor presente neto, se debe conocer la tasa interna de oportunidad TIO, que es la tasa de interés más alta que el inversionista sacrifica con el objetivo de realizar el proyecto ⁴⁶. Para calcular el TIO se aplica la **Ecuación 70** y se toma como referencia la tasa de captación o de depósito a término fijo DTF promedio mensual, suministrada por el Banco de la República que está en un valor de 4,55%.

Ecuación 70. Tasa de interés de oportunidad.

$$TIO = \left[(1 + DTF_{promedio})(1 + 2\%) \right] - 1$$

Fuente: CURREA, G. B. Ingeniería Económica. Editorial Educativa, 1992. 9789589188071. p. 197.

Donde:

TIO: tasa de interés de oportunidad [%].

DTF_{promedio}: depósito a término fijo [%].

2%: interés financiero establecido [%].

Habiendo aplicado la ecuación se obtiene que la tasa de interés de oportunidad TIO es de 6,641%.

7.5 INDICADOR RELACIÓN BENEFICIO COSTO (B/C)

El diseño y posterior construcción de la herramienta para análisis de golpe de ariete se evalúa mediante el indicador de relación costo beneficio que se observa en la **Ecuación 71**, que consiste según Guillermo Barco Currea en su libro Ingeniería Económica en “poner en valor presente los beneficios netos y dividirlos por el valor presente de todos los costos del proyecto, teniendo en cuenta que la tasa que se utiliza para poner en valor presente, tantos los beneficios como los costos, depende del inversionista”⁴⁷.

Cabe señalar que si después de realizar los cálculos el B/C >1, el proyecto se convierte en una inversión aconsejable dado que el valor presente de los ingresos es mayor al de los egresos, si B/C <1, el proyecto no es aconsejable porque los ingresos son menores que los costos y si B/C =1, significa que es indiferente realizar el proyecto o no, porque los ingresos son iguales a los egresos y en este caso lo único que se alcanza a ganar es la tasa del inversionista.

⁴⁶ Ibid., p. 197

⁴⁷ Ibid., p. 26

Ecuación 71. Relación beneficio costo.

$$\frac{B}{C} = \frac{\text{Valor presente de los ingresos}}{\text{Valor presente de los costos}} = \frac{B^+ - B^-}{I + CMO}$$

Fuente: CURREA, G. B. Ingeniería Económica. Editorial Educativa, 1992. 9789589188071. p. 26.

Donde:

B/C: relación beneficio costo.

B⁺: beneficios positivos.

B⁻: beneficios negativos .

I: inversión.

CMO: costos de mantenimiento y operación.

Tomando como referencia la ecuación anterior y el esquema de flujo de caja mostrado en la **Figura 62** se calcula el indicador relación beneficio costo, como se muestra a continuación:

Ecuación 72. Cálculo relación beneficio costo.

$$\frac{B}{C} = \frac{\frac{\$ 18.996.732,50}{(1 + 0,06641)^1} + \frac{\$ 20.518.681,50}{(1 + 0,06641)^2} + \frac{\$ 22.162.386,42}{(1 + 0,06641)^3} + \frac{\$ 23.937.587,50}{(1 + 0,06641)^4} + \frac{\$ 25.854.805,15}{(1 + 0,06641)^5}}{\$23.146.452 + \frac{\$ 2.780.000}{(1 + 0,06641)^1} + \frac{\$ 2.780.000}{(1 + 0,06641)^2} + \frac{\$ 2.780.000}{(1 + 0,06641)^3} + \frac{\$ 2.780.000}{(1 + 0,06641)^4} + \frac{\$ 2.780.000}{(1 + 0,06641)^5}}$$
$$\frac{B}{C} = 2,6367$$
$$\frac{B}{C} = (2,6367 - 1) * 100 = 163,67\%$$

Fuente: elaboración propia.

7.6 INDICADOR VALOR PRESENTE NETO VPN

En la **Ecuación 73** se observa el indicador financiero de proyectos VPN, que también se utilizó como herramienta para evaluar la viabilidad del proyecto, el cual se calcula llevando al presente los ingresos futuros como egresos futuros, lo que permite, según el ingeniero Baca “tomar una decisión de realizar o no un proyecto desde el punto de vista financiero, teniendo en cuenta que si el $VPN > 0$, el proyecto es viable, ya que se convierte en una inversión atractiva para el inversionista porque los ingresos son mayores a los egresos, si el $VPN < 0$ el proyecto no es rentable, puesto que no cumple con las expectativas del inversionista porque los ingresos son menores a los egresos y si el $VPN = 0$, El proyecto es indiferente financieramente para el inversionista”⁴⁸.

⁴⁸ Ibid., p. 197

Ecuación 73. Valor presente neto.

$$VPN = -I + \frac{F_1}{(1+i)^1} + \frac{F_2}{(1+i)^2} + \dots + \frac{F_n}{(1+i)^n}$$

Fuente: BACA, Guillermo. Ingeniería Económica - Valor presente neto. Capítulo 9. 8 ed. Bogotá: FondoEducativo Panamericano, 2011. p. 197

Donde:

VPN: Valor presente neto.

I: inversión.

F: Ingresos.

i: Tasa de interés de oportunidad TIO [%].

n: número de periodo a evaluar.

Con la ecuación anterior y con base en el esquema de flujo de caja mostrado en la **Figura 62** se calculó el Valor Presente Neto VPN, de la siguiente manera:

Ecuación 74. Cálculo valor presente neto.

$$VPN = -\$23.149.452 + \frac{\$16.216.732,50}{(1+0,06641)^1} + \frac{\$17.738.681,50}{(1+0,06641)^2} + \frac{\$19.382.386,42}{(1+0,06641)^3} + \frac{\$21.157.587,73}{(1+0,06641)^4} + \frac{\$23.074.805,15}{(1+0,06641i)^5}$$

$$VPN = \$56.727.950,59$$

Fuente: elaboración propia.

7.7 ANÁLISIS FINANCIERO

Mediante la interpretación de los resultados de los indicadores que aparecen en la **Tabla 24**, se evalúa la viabilidad financiera del diseño, construcción, mantenimiento y operación de la herramienta de análisis de golpe de ariete para el laboratorio de mecánica de fluidos, para un horizonte de planeación del proyecto de 5 años; obteniendo así el comportamiento económico y diagnóstico de la situación actual del proyecto.

Tabla 24. Resultados cálculo de indicadores.

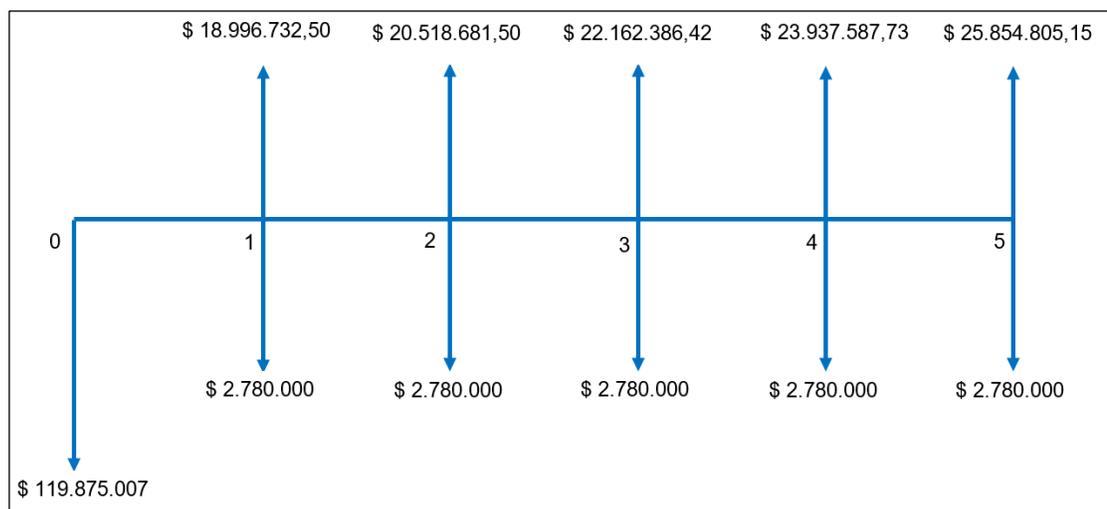
Indicador	Valor	Simbología	Interpretación
Beneficio costo (B/C)	2,6367	B/C >1	Viable
Valor presente neto (VPN)	\$56.727.950,59	VPN >0	Viable

Fuente: elaboración propia.

Desde el punto de vista financiero, es factible realizar el proyecto, porque mediante el indicador beneficio costo se determinó que los ingresos son mayores que los egresos porque arroja un resultado de 2,6367 mayor a uno, además se obtienen ganancias para el quinto año de un 163,67%, adicionalmente se corroboró la factibilidad del proyecto mediante el indicador valor presente neto obteniendo un VPN de \$ 56.727.950,59.

A modo de contraste, se realizó el análisis financiero en donde se cambió el valor de la inversión del proyecto por el valor de la adquisición de la herramienta con la compañía Hamburg Gunt como se muestra en la **Figura 63**:

Figura 63. Flujo de caja para la adquisición del equipo de golpe de ariete.



Fuente: elaboración propia.

Obteniendo los siguientes resultados consolidados en la **Tabla 25**.

Tabla 25. Resultados cálculo indicadores adquisición del equipo.

Indicador	Valor	Simbología	Interpretación
Beneficio costo (B/C)	0,6975	B/C <1	No rentable
Valor presente neto (VPN)	-\$39.997.604,41	VPN <0	No rentable

Fuente: elaboración propia.

Concluyendo, es más rentable diseñar y construir la herramienta que comprar una nueva a una empresa especializada en equipos de laboratorio, como es el caso de la Compañía Hamburg Gunt, donde la inversión inicial por adquisición de la herramienta es \$119.875.007; es decir 6 veces más que el valor de la inversión que se requiere para su fabricación.

8. CONCLUSIONES

- Las bases teóricas que permitieron caracterizar y explicar el fenómeno de golpe de ariete están fundamentadas en la literatura del Doctor Mendiluce, dado que en estas se encuentran explicaciones claras de los modelos expuestos por Allievi y Michaud; sin contar que brindan una aplicación adecuada de las fórmulas propuestas. También, se logró determinar las áreas de la industria petrolera en donde ocurre golpe de ariete dentro de las cuales se encuentra el área de perforación, producción, transporte y facilidades; resaltando que, dentro del área de perforación, más específicamente en el circuito de lodos, esta problemática ha sido solucionada mediante la incorporación de Dámpers en las bombas tríples de lodo.
- Teniendo en cuenta que, dentro del área de producción, durante el proceso de inyección de agua ocurre este fenómeno; se decidió utilizar agua como fluido de análisis donde se evidenció que sus propiedades físicas permiten reproducir el fenómeno de golpe de ariete a nivel experimental.
- Fue satisfactorio dividir la herramienta en tres sistemas que son: generación y mitigación de golpe de ariete, instrumentación y estructural, lo que permitió cumplir satisfactoriamente con los requerimientos y parámetros funcionales para realizar el respectivo diseño de la herramienta de análisis de golpe de ariete.
- Basado en las tres alternativas de solución enfocadas en el sistema de mitigación; se logró seleccionar la alternativa 2 mediante el método de ponderación lineal *scoring* teniendo una calificación de 3,9. Esta alternativa contemplaba el uso de un calderín como sistema de amortiguación, el cual brinda mayores tasas de reducción de golpe de ariete con respecto a otros dispositivos como chimeneas de equilibrio y válvulas, sin contar que optimiza espacio el cual era una de las mayores limitantes que poseía la herramienta.
- Dentro del diseño detallado, el modelo que se acopló para realizar el sistema de generación y mitigación de golpe de ariete en condiciones controladas corresponde a un conducto por gravedad, por lo cual fue necesario realizar el respectivo cálculo de un sistema de abastecimiento hidráulico.
- El elemento que tiene relación directa con la caracterización del golpe de ariete es la electroválvula por lo cual su selección, además de depender del diámetro nominal de la tubería, está ligado al valor del tiempo de parada que esta posee de fábrica. Por tal motivo, se calculó el tiempo de parada mínimo para que se originara el golpe de ariete (0,0247 s) y con base en este valor se seleccionó la electroválvula que tuviera un valor mayor o igual, que para este caso particular es 0,03 s.

- Todos los cálculos del sistema de mitigación y generación de golpe de ariete estuvieron enfocados hacia la condición crítica del sistema; es decir, cuando el nivel del agua y la velocidad eran máximas. Se observó que, dentro de la generación de golpe de ariete, con una altura de fluido de tan solo 1,13 m (carga estática) se lograba un golpe de ariete de 215,55 m; es decir, que la presión aumenta 190 veces su carga estática lo cual es un valor bastante alto. Lo anterior justifica la relevancia de entender y calcular este fenómeno a la hora de diseñar sistemas hidráulicos con el fin de evitar colapsos y averías de tuberías y accesorios del sistema.
- Después de evidenciar que el software Aspen Hysys no presenta funcionalidad a la hora de simular el efecto de golpe de ariete en tubería recta; puesto que, en su interfaz no se cuenta con una válvula que permita reproducir un cierre abrupto; sin contar que, no existen sistemas de mitigación como calderines o chimeneas de equilibrio dentro de su directorio de equipos se utilizó el simulador Allievi el cual presenta gran exactitud dentro de la fase de generación de golpe de ariete, dado que posee un porcentaje de error del 3,55% con respecto a los datos teóricos, siendo este un valor aceptable. No obstante, para la mitigación del golpe de ariete la exactitud del simulador presenta cierto grado de incertidumbre observando un error del 19,62%; lo anterior se explica entendiendo que calderín se diseñó para el caso crítico; es decir, cuando se presentaba mayor altura (1,13 m) y velocidad (4,7098 m/s), por lo cual el porcentaje de mitigación de golpe de ariete iba a variar en los otros casos. Cabe resaltar, que a pesar de presentar un porcentaje de error relativamente alto en la fase de mitigación, los datos se encuentran dentro del rango permisible de sobrepresión que debe ser menor al 10% de la carga estática.
- Mediante las simulaciones en Allievi se determinó que se hace necesario incorporar un dispositivo anti-ariete; puesto que, se logra un porcentaje de reducción de hasta 90% de las sobrepresiones originales logrando que en ocasiones hasta sea despreciable los efectos que trae el golpe de ariete. En cambio, se hace notorio que al presentar golpe de ariete sin ningún mecanismo de control se origina una sobrepresión bastante alta que sería catastrófica en escenarios donde se opere a condiciones extremas como altas presiones y velocidades.
- Dentro de la guía de laboratorio se estableció un documento que cuenta con tres partes básicas tales como: las bases teóricas sobre el golpe de ariete; el procedimiento para llevar a cabo la práctica especificando variables o datos que se deben tomar y los cálculos que se deben realizar para comprender este fenómeno. Este documento es fundamental para que aquellos que realicen una práctica de laboratorio con la herramienta logren comprender la funcionalidad de la misma entendiendo el fenómeno de golpe de ariete y su impacto.

- El indicador costo/beneficio con el cual se evaluó la herramienta de análisis de golpe de ariete establece que el proyecto presenta viabilidad para su ejecución; ya que, desde el punto de vista financiero, es factible realizar el proyecto, observando que mediante el indicador beneficio costo se determina que los ingresos son mayores que los egresos porque arroja un resultado de 2,6367 mayor a uno, además se obtiene un VPN de \$56.727.950 en un horizonte de planeación de 5 años.

9. RECOMENDACIONES

- Se sugiere realizar las fases de construcción e implementación de la herramienta para el análisis de golpe de ariete en tubería recta contemplando los 3 subsistemas que se definieron dentro de este trabajo de grado como son: generación y mitigación de golpe de ariete, instrumentación y estructural. Esto con el fin de obtener el módulo para realizar las correspondientes experimentaciones y así beneficiar a la comunidad académica brindado material para comprender a profundidad el fenómeno de golpe de ariete.
- No obstante; dentro del documento, específicamente en el área de costos, se brindó un listado de los componentes de la herramienta con los proveedores sugeridos por los proponentes. Dichos proveedores se escogieron teniendo en cuenta calidad de materiales y respaldo de marca. Por tal motivo se sugiere utilizar dichos proveedores sin condicionar a que sean las únicas opciones disponibles. En tal caso de cambiarlos se debe tener en cuenta que tales elementos cumplan con los requerimientos funcionales de la herramienta para su óptimo desempeño.
- Se recomienda implementar el software Allievi en los computadores de la Fundación Universidad de América, con el fin de ampliar los conocimientos acerca del golpe de ariete en la cátedra de mecánica de fluidos.

BIBLIOGRAFÍA

ALVAREZ, Alexis. MÉTODO PARA EL DISEÑO CONCEPTUAL MECÁNICO BASADO EN LA TRAZABILIDAD DE LOS REQUERIMIENTOS FUNCIONALES Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas Agropecuarias. 2016.

ASADINIAZI, Mehdi y SARBAND, Ebrahim Mokallaf. Study On Mechanism And Control Methods of Water Hammer In Pump Station And Pipe Lines. Beijing, China: International Society of Offshore and Polar Engineers, 2010. 6

BARNES de Colombia S.A. Bombas GS en hierro fundido con motor eléctrico. [En línea]. Recuperado en: 10 abril 2019. Formato archivo (pdf). Disponible en: http://barnes.com.co/fichas_tecnicas/GS/1800/Ficha%20GE%201.25A%201800.pdf f. p. 1.

BUDYNAS, R. G. y NISBETT, J. K. Diseño En Ingeniería Mecánica De Shigley (9a. Ed.). 2012.

CASTILLO, U. M. y DEL CASTILLO, U. M. Teoría del golpe de ariete y sus aplicaciones en ingeniería hidráulica. Limusa, 1987.

CHOI, Suk-Kyoon y HUANG, W. S. B. Impact of Water Hammer in Deep Sea Water Injection Wells. Denver, Colorado, USA: Society of Petroleum Engineers, 2011.

COLEMPAQUES. Conservando el Agua | Colombia. [Consultado el Apr 9,2019]. Disponible en: <https://www.colempaques.com>

CURREA, G. B. Ingeniería económica. Editorial Educativa, 1992.

DAVIM, J. P. Introduction to Mechanical Engineering. Springer International Publishing, 2018.

Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Agrícola de Ciudad Real. Tema 10. El Golpe De Ariete. [presentación power point].

EverCLEAR TM. Pipe & Hangers Technical information. Special Pipe - Spears® EverCLEAR™ PVC Clear. [En línea]. Recuperado en: 01 febrero 2019. Formato archivo (pdf). Disponible en: <https://tuvalrep.com.co/producto/tuberia-pvc-40-transparente-lasco/>

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Compendio de normas para trabajos escritos. NTC-1486-6166. Bogotá D.C.: El instituto, 2018. 153 p.

INGENIERIA DE FLUIDOS. Golpe de Ariete. [Consultado el Mar 21,2019]. Disponible en: <https://www.ingenieriadefluidos.com/golpe-de-ariete>

Instrument Society of America. ISA Directory of Instrumentation. Instrument Society of America, 1998. ISBN 0272-8141

LAHLOU, Michael. GOLPE DE ARIETE. THE NATIONAL ENVIRONMENTAL SERVICES CENTER, 2015.

LÓPEZ, R. G. Frío industrial: Mantenimiento y servicios a la producción. Marcombo, 2005.

MARQUÉZ, Adriana y JIMENÉZ, Maryelvi. MANUAL DE PRÁCTICAS DE LABORATORIO. 1st ed. Venezuela: Universidad de Carabobo, 2016.

MARTIN, I.; SALCEDO, R. y FONT, R. MECÁNICA DE FLUIDOS Tema1. Flujo interno de fluidos incompresibles y compresibles. 2011.

MCCORMAC, J. Diseño De Estructuras De Acero - 5a Ed. Alfaomega Grupo Editor. 2013.

MOTT, R. L. y PEDRAZA, C. R. C. Mecánica de fluidos aplicada. Pearson Educación, 1996.

MOTT, Robert L. MECÁNICA DE FLUIDOS. Sexta ed. México: Pearson Educación de México, S.A. de C.V., 2006. 233-240 p. ISBN 970-26-0805-8

MURGA, Néstor D.; MOLINA, Norberto E. y CIAPPINA, Marcelo. ATENUACIÓN DEL GOLPE DE ARIETE EN ESTACIONES DE ELEVACIÓN DE PETRÓLEO, MEDIANTE EL USO DE BOMBAS DE VELOCIDAD VARIABLE. 1999.

PALMAR, J. R. Reglamento de Construcciones Sismorresistentes Nsr-10Tomo Uno. RAM Ediciones, 2019.

PALMER, C. I. y BIBB, S. F. Matemáticas Prácticas: Aritmética, Álgebra, Geometría, Trigonometría Y Regla De Cálculo. Reverté, 1979.

PIROBLOC S.A Better Heating. ¿Qué es un P&ID? [Consultado el May 05,2019]. Disponible en: <https://www.pirobloc.com/blog-es/que-es-un-piping-and-instrumentation-diagram/>

ROSICH, E. M. El golpe de ariete en impulsiones. Servicio de Publicaciones E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, 1974.

SÁNCHEZ, J. A. Instrumentación y control avanzado de procesos. Díaz de Santos, 2006.

SC ENRIQUE, M., *et al.* Metodología para el diseño y construcción de una máquina para medición del desgaste abrasivo basado en la norma astM g-65. 2009. 53-58 p.

TANG, Yula y OUYANG, Liang-Biao. A Dynamic Simulation Study of Water Hammer for Offshore Injection Wells to Provide Operation Guidelines. Beijing, China: Society of Petroleum Engineers, 2010. 17

TLV. Golpe de Ariete en Equipo. [Consultado el Mar 21,2019]. Disponible en: <https://www.tlv.com/global/LA/steam-theory/waterhammer-equipment.html#>

TLV. Golpe de Ariete en Líneas de Distribución de Vapor. [Consultado el Mar 21,2019]. Disponible en: <https://www.tlv.com/global/LA/steam-theory/waterhammer-steam-distribution-lines.html>

TLV. Golpe de Ariete en Tubería de Recuperación de Condensado. [Consultado el Mar 21,2019]. Disponible en: <https://www.tlv.com/global/LA/steam-theory/waterhammer-condensate-transport-piping.html>

TLV. Golpe de Ariete: El Mecanismo. [Consultado el Mar 21,2019]. Disponible en: <https://www.tlv.com/global/LA/steam-theory/waterhammer-mechanism.html>

UNIVERSIDAD DE AMÉRICA. GUÍA METODOLÓGICA PARA LA ELABORACIÓN DE TRABAJOS DE GRADO Y PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN EN PREGRADO. 2011.

UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE. Curso: Uso del paquete informático ASPEN-HYSYS, simulador de procesos químicos. -03-13. [Consultado el May 6,2019]. Disponible en: <https://www.calidadelaire.usach.cl/curso-uso-del-paquete-inform%C3%A1tico-aspen-hysys-simulador-de-procesos-qu%C3%ADMICOS>

UNIVERSITAT POLITECNICA DE VALENCIA. Allievi. Software de transitorios en sistemas hidráulicos a presión. Golpe de ariete. ITA. Presentación. Jun 15. [Consultado el May 6,2019]. Disponible en: <https://www.allievi.net/allievi-es.php>

VALDEZ, Enrique Cesar. ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE. 1a ed. UNAM, 1990.

WANG, Haotian; HWANG, Jongsoo y MUKUL, M. S. Sand Production Caused by Water Hammer Events: Implications for Shut-In Protocols and Design of Water Injection Wells. Lafayette, Louisiana, USA: Society of Petroleum Engineers, 2018. 15

ANEXOS

ANEXO A. CATÁLOGO TIVALREP

Imagen 1. Catálogo de tubos transparentes Tuvalrep.



Pipe & Hangers Technical Information

Special Pipe - Spears® EverCLEAR™ PVC Clear

Spears® PVC EverCLEAR™ schedule 40 or Schedule 80 piping provides optimum clarity for critical visual monitoring of processes fluids. Joined using standard solvent cement welding with clear cement, clear systems provide the many benefits of regular PVC, such as excellent corrosion resistance, smooth interior walls, non-contaminating, non-conductive, light weight, good pressure handling capacity, superior impact strength and does not support bacterial growth.

A supplemental line of 1/4" through 12" Spears® PVC EverCLEAR™ fittings are available. Socket-style fittings are manufactured in strict dimensional compliance with ASTM D 2466 to Schedule 40 requirements. Spears® Special Reinforced Plastic Thread (SR) female threaded transition fittings, incorporating a stainless steel retaining ring, reduce problems associated with over tightening and provide a strong, leak-tight seal for plastic-to-metal transitions. Specialty transition fittings are manufactured to Schedule 80 dimensions per the applicable requirements of ASTM D 2467. See Spears® Schedule 40 or Schedule 80 fitting weight and dimension publications for available sizes and configurations. Spears® PVC EverCLEAR™ can be easily installed with systems of regular PVC pipe, fittings and valves. In addition, an endless selection of fully compatible PVC components and accessories are readily available.

Material

Spears® PVC EverCLEAR™ piping is produced from a rigid, lead-free virgin Polyvinyl Chloride (PVC) compound with superior impact resistance and a maximum service temperature of 140°F when appropriate temperature/pressure de-rating factors are applied. Spears® PVC EverCLEAR™ materials are certified by the NSF International for use with potable water under ANSI/NSF® Standard 61 and acceptable for food contact under the provisions of Title 21 of the United States FDA Code of Federal Regulations. Spears® PVC EverCLEAR™ piping also exhibits excellent flammability characteristics and will not sustain combustion when flame source is removed.

Spears® PVC EverCLEAR™ provides the excellent chemical resistance properties of PVC piping. It is resistant to most acids, bases, salts and oxidants. PVC chemical resistance data should be referenced for proper application. Although this material maintains its physical properties when exposed to many substances, exposure to certain chemicals can affect the clarity of the product over time. Certain nitrogen containing organics, bleaches, oxidative agents and acids may result in discoloration. Testing under actual use conditions is recommended. Exposure to sunlight (Ultra Violet Radiation) will also affect clarity. EverCLEAR™ products do not contain UV stabilizers and are not recommended for outdoor use unless adequate protection is applied.

EverCLEAR™ PVC Pipe Physical Properties		
GENERAL	Value	Test Method
Cell Classification	12454	ASTM D 1784
Maximum Service Temp.	140°F	
Color	Transparent	
Specific Gravity, (g/cu.cm @ 73°F)	1.33	ASTM D 792
Hardness, Shore D	84	ASTM D 2240
Hazen-Williams Factor	C = 150	
MECHANICAL		
Tensile Strength, psi @ 73°F	7,260	ASTM D 638
Tensile Modulus of Elasticity, psi @ 73°F	392,000	ASTM D 638
Flexural Strength, psi @ 75°F	12,000	ASTM D 790
Flexural Modulus, psi @ 75°F	389,000	ASTM D 790
Compressive Strength, psi @ 75°F	8,300	ASTM D 695
Compressive Modulus, psi @ 75°F	307,000	ASTM D 695
Notched Izod Impact - 125° Injection Molded	23 ft-lbs./in.	ASTM D 256
Notched Izod Impact - 125° With Flow-Comp. Molded	8.0 ft-lbs./in.	ASTM D 256
Notched Izod Impact - 125° Cross Flow-Comp. Molded	2.0 ft-lbs./in.	ASTM D 256
THERMAL		
Coefficient of Linear Expansion (in/in/°F)	4.1 x 10 ⁻⁵	ASTM D 696
Heat Distortion Temp., 264 psi, 125 in. Bars	154°F	ASTM D 648
Glass Transition Temp.	176°F	
FIRE PERFORMANCE		
Flammability Rating	V-0	UL-94



Page 757

Suitable for Oil-Free air handling to 25 psi, not for distribution of compressed air or gas
Due to Material Cost Variations, Prices Subject to Change. Check On-line Catalog @ www.spearsmfg.com

Spears® Manufacturing Company

Imagen 1. (Continuación).

Pipe & Hangers Technical Information
Special Pipe - Spears® EverCLEAR™ PVC Clear



Schedule 40 Dimensions

Nom. Pipe Size (in.)	O.D.	Average I.D.	Min. Wall	Nom. Wt./Ft.	Max. W.P. PSI
1/4	0.540	0.344	0.088	0.086	390
3/8	0.675	0.473	0.091	0.115	310
1/2	0.840	0.602	0.109	0.170	300
3/4	1.050	0.804	0.113	0.226	240
1	1.315	1.029	0.133	0.333	220
1-1/4	1.660	1.360	0.140	0.450	180
1-1/2	1.900	1.590	0.145	0.537	170
2	2.375	2.047	0.154	0.720	140
2-1/2	2.875	2.445	0.203	1.136	150
3	3.500	3.042	0.216	1.488	130
3-1/2	4.000	3.521	0.226	1.789	120
4	4.500	3.998	0.237	2.118	110
6	6.625	6.031	0.280	3.73	90
6-1/2	6.625	6.335	0.110	1.64	45
8	8.625	7.942	0.322	5.619	80
10	10.750	9.976	0.365	7.966	70
12	12.750	11.889	0.406	10.534	70

Schedule 80 Dimensions

Nom. Pipe Size (in.)	O.D.	Average I.D.	Min. Wall	Nom. Wt./Ft.	Max. W.P. PSI
1/4	0.540	0.282	0.119	0.105	570
3/8	0.675	0.403	0.126	0.146	460
1/2	0.840	0.526	0.147	0.213	420
3/4	1.050	0.722	0.154	0.289	340
1	1.315	0.936	0.179	0.424	320
1-1/4	1.660	1.255	0.191	0.586	260
1-1/2	1.900	1.476	0.200	0.711	240
2	2.375	1.913	0.218	0.984	200
3	3.500	2.864	0.300	2.010	190
4	4.500	3.786	0.337	2.938	160
6	6.625	5.709	0.432	5.610	140

De-Rating Factor

Operating Temp (°F)	De-Rating Factor
73	1.00
80	0.88
90	0.75
100	0.62
110	0.51
120	0.40
130	0.31
140	0.22

EX: 4" PVC SCHEDULE 40 CLEAR @ 120°F = ?
110 psi x 0.40 = 44 psi max. @ 120°F

Critical Collapse Pressure PSI @ 73°F

Pipe Size (in.)	SCH 40	SCH 80
1/4	7,504	22,172
3/8	3,714	11,869
1/2	3,255	9,370
3/4	1,722	4,985
1	1,399	3,841
1-1/4	767	2,158
1-1/2	554	1,599
2	327	1,014
2-1/2	431	1,176
3	279	809
3-1/2	211	632
4	169	521
6	84	333
8	57	-
10	43	-
12	35	-

THE MAXIMUM SERVICE TEMPERATURE FOR PVC EverCLEAR™ IS 140°F.

Threading of Schedule 40 PVC EverCLEAR™ pipe is not a recommended practice due to insufficient wall thickness.

Joining Methods

Spears® PVC EverCLEAR™ pipe is easily joined by standard solvent cementing process, threaded connections and flanges. To maintain system clarity, Spears® recommends the use of a clear, medium-bodied, fast-setting cement in conjunction with a clear primer for optimum joint integrity. See Installation section for industrial pressure pipe for guidelines.

Thermal Expansion and Contraction

Standard calculations for thermal expansion and contraction may be applied to Spears® PVC EverCLEAR™. The coefficient of linear expansion for Spears® EverCLEAR™ pipe is 4.1×10^{-5} in./in./°F. The rate of expansion or contraction can be calculated as follows:

$\Delta L = 12 yL (\Delta T)$

Where:

ΔL = expansion or contraction in inches
 $y = 4.1 \times 10^{-5}$ (coefficient of linear expansion)
 L = length of piping run in feet
 T = temperature change °F (T max. - T @ installation)

Hangers and Supports

Spears® PVC EverCLEAR™ piping should be mounted and supported in the same manner as PVC industrial piping. Support location and spacing are based on the pipe diameter, operating temperature of the system, and the location of any concentrated stress loads (i.e., valves, flanges, and any other heavy system components). As with regular PVC piping, hangers used must have an adequate load-bearing surface free of any rough or sharp edges that could damage the piping during use. They must also not restrict linear movement of the system due to the effects of expansion and contraction; over tightening must be avoided. See Hangers and Supports section for industrial pressure pipe for additional information.

Made in the U.S.A. Suitable for Oil-Free air handling to 25 psi, not for distribution of compressed air or gas
 Due to Material Cost Variations, Prices Subject to Change. Check On-line Catalog @ www.spearsmfg.com

Page 758

Fuente: EverCLEAR™. Pipe & Hangers Technical information. Special Pipe - Spears® EverCLEAR™ PVC Clear. [En línea]. Recuperado en: 01 febrero 2019. Formato archivo (pdf). Disponible en: <https://tuvalrep.com.co/producto/tuberia-pvc-40-transparente-lasco/>

ANEXO B. TABLAS Y GRÁFICAS PARA EL CÁLCULO HIDRÁULICO Y DE GOLPE DE ARIETE

Imagen 2. Ayuda para seleccionar el tamaño de tuberías.

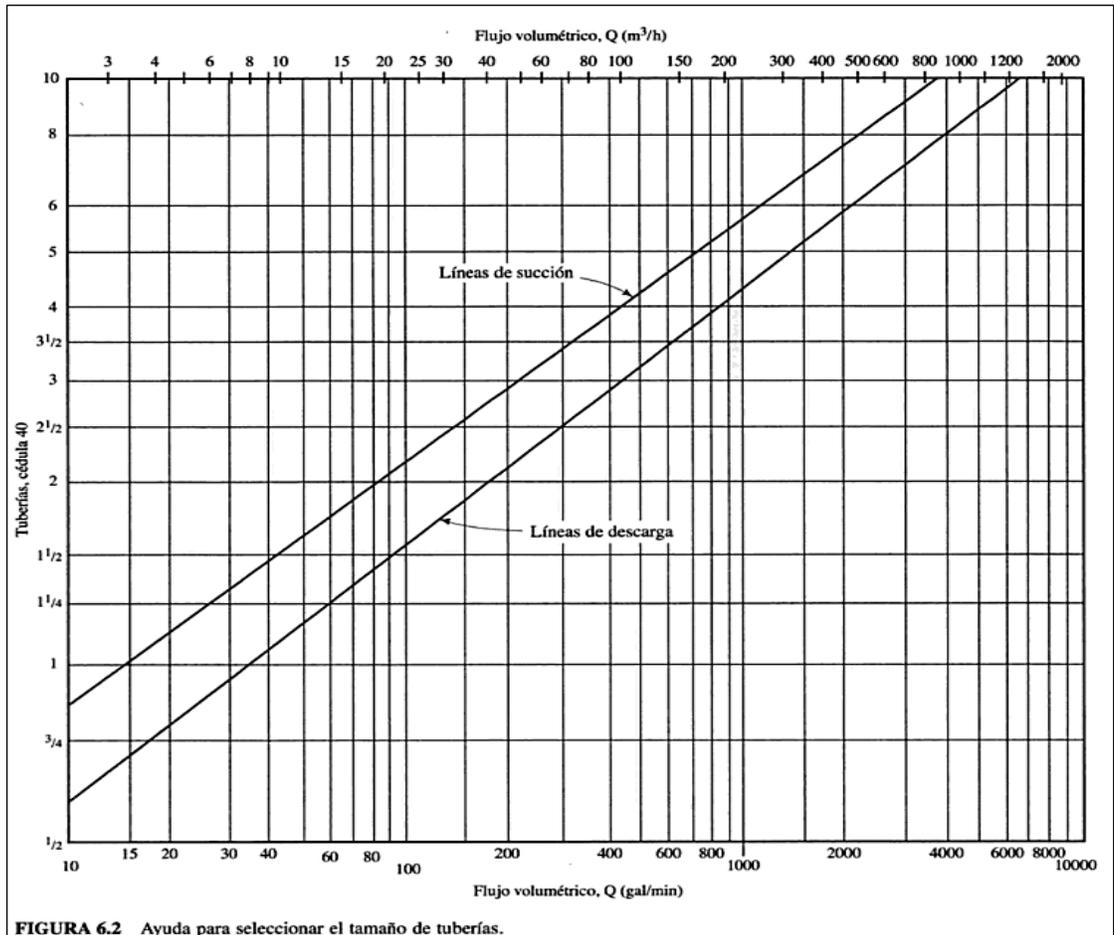


FIGURA 6.2 Ayuda para seleccionar el tamaño de tuberías.

Fuente: MOTT, Robert L. Mecánica De Fluidos. Sexta ed. México: Pearson Educación de México, S.A. de C.V., 2006. p. 163.

Imagen 3. Presión de vapor y carga de presión de vapor del agua.

TABLA 13.2. Presión de vapor y carga de presión de vapor del agua.

Temperatura °C	Presión de vapor kPa (abs)	Peso especifico (kN/m ³)	Carga de presión de vapor (m)	Temperatura °F	Presión de vapor (psia)	Peso especifico (lb/pie ³)	Carga de presión de vapor (pie)
0	0.6105	9.807	0.06226	32	0.08854	62.42	0.2043
5	0.8722	9.806	0.08894	40	0.1217	62.43	0.2807
10	1.228	9.804	0.1253	50	0.1781	62.41	0.4109
20	2.338	9.789	0.2388	60	0.2563	62.37	0.5917
30	4.243	9.765	0.4345	70	0.3631	62.30	0.8393
40	7.376	9.731	0.7580	80	0.5069	62.22	1.173
50	12.33	9.690	1.272	90	0.6979	62.11	1.618
60	19.92	9.642	2.066	100	0.9493	62.00	2.205
70	31.16	9.589	3.250	120	1.692	61.71	3.948
80	47.34	9.530	4.967	140	2.888	61.38	6.775
90	70.10	9.467	7.405	160	4.736	61.00	11.18
100	101.3	9.399	10.78	180	7.507	61.58	17.55
				200	11.52	60.12	27.59
				212	14.69	59.83	35.36

Fuente: MOTT, Robert L. Mecánica De Fluidos. Sexta ed. México: Pearson Educación de México, S.A. de C.V., 2006. p. 413.

Imagen 4. Cartas de depresión mínima durante el flujo transitorio

Figura 6.17 Cartas para tanques de oscilación y cámaras de aire cuando se presenta un para instantáneo de los equipos de una planra de bombeo o un cierre total instantáneo del órgano de control en una estación hidroeléctrica.

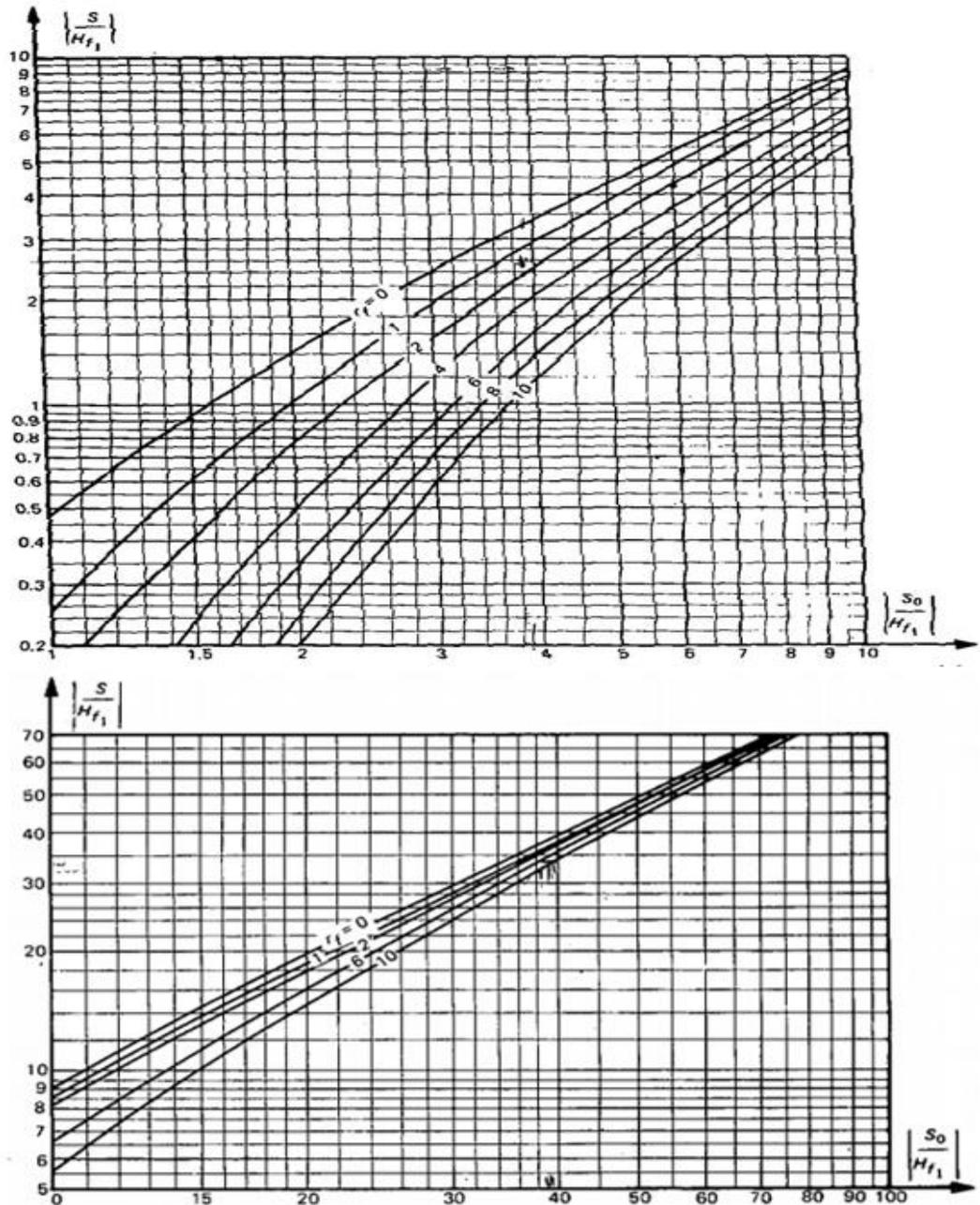
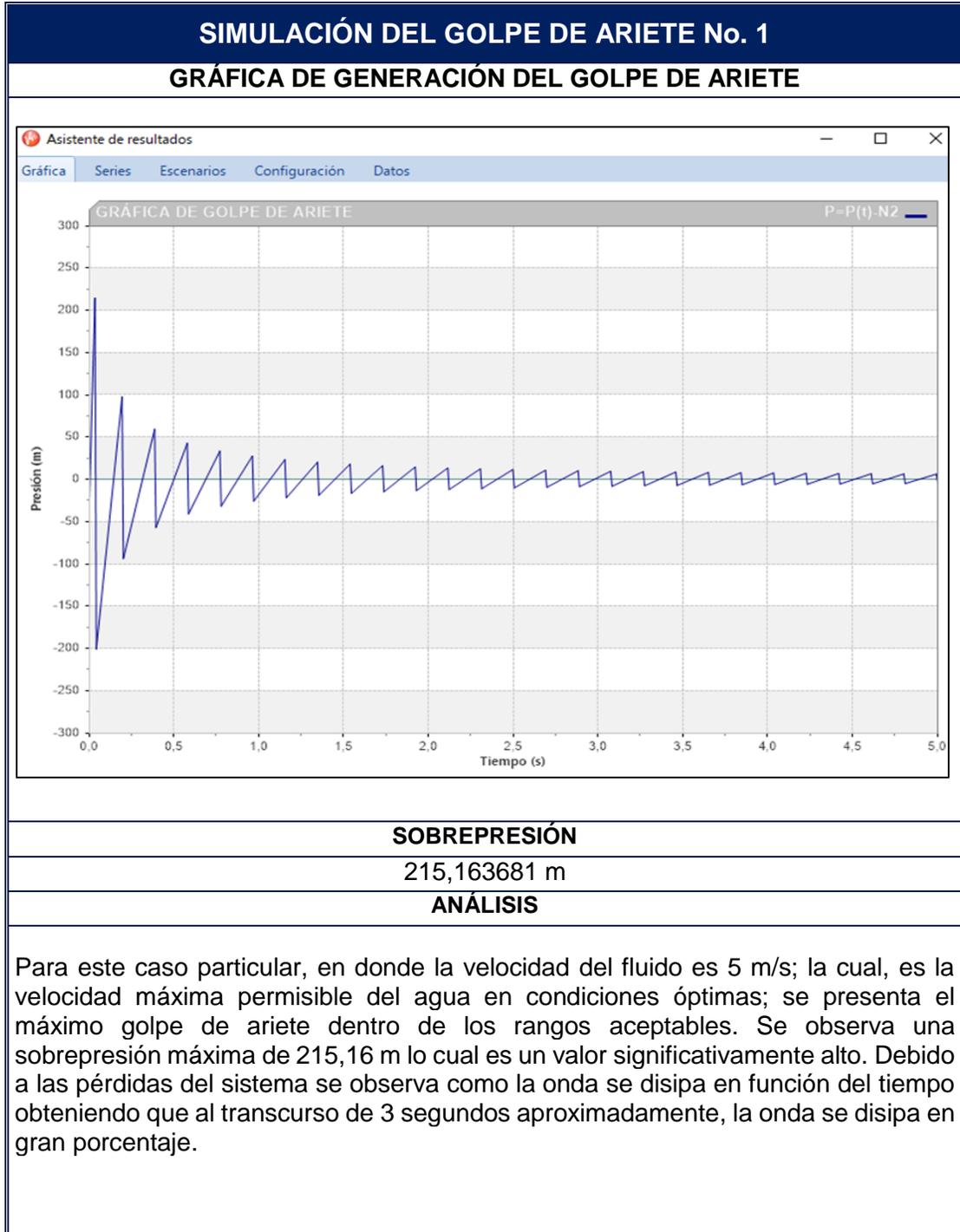


Figura 6.17 (continuación)

Fuente: CASTILLO, U. M. y DELCASTILLO, U. M. Teoría Del Golpe De Ariete Y Sus Aplicaciones En Ingeniería Hidráulica. Limusa, 1987. p. 210.

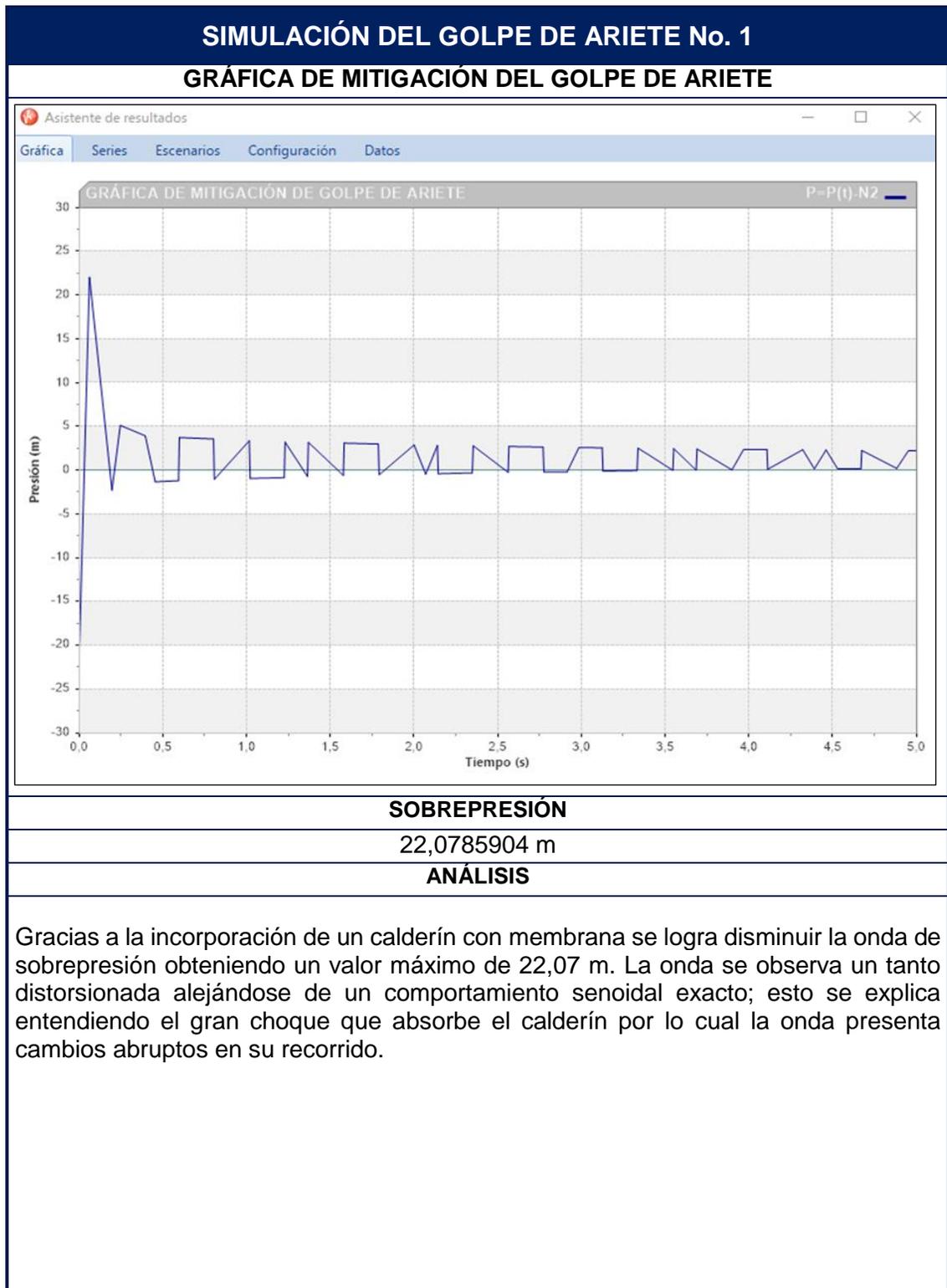
ANEXO C. GRÁFICAS DEL GOLPE DE ARIETE DE LA CORRIDA DE DATOS

Figura 64. Simulación del golpe de ariete de la corrida de datos No. 1



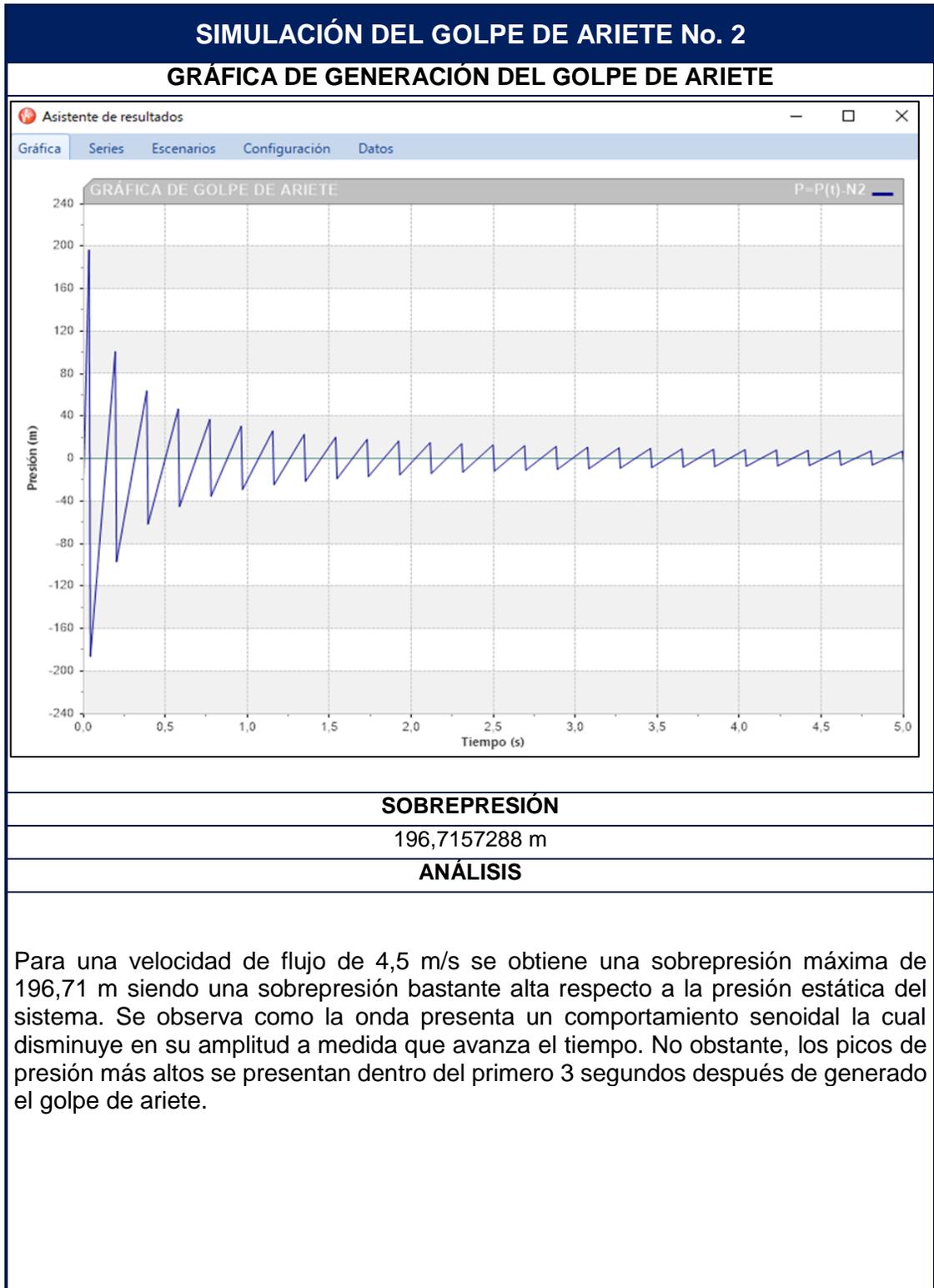
Fuente: elaboración propia.

Cuadro 64. (Continuación).



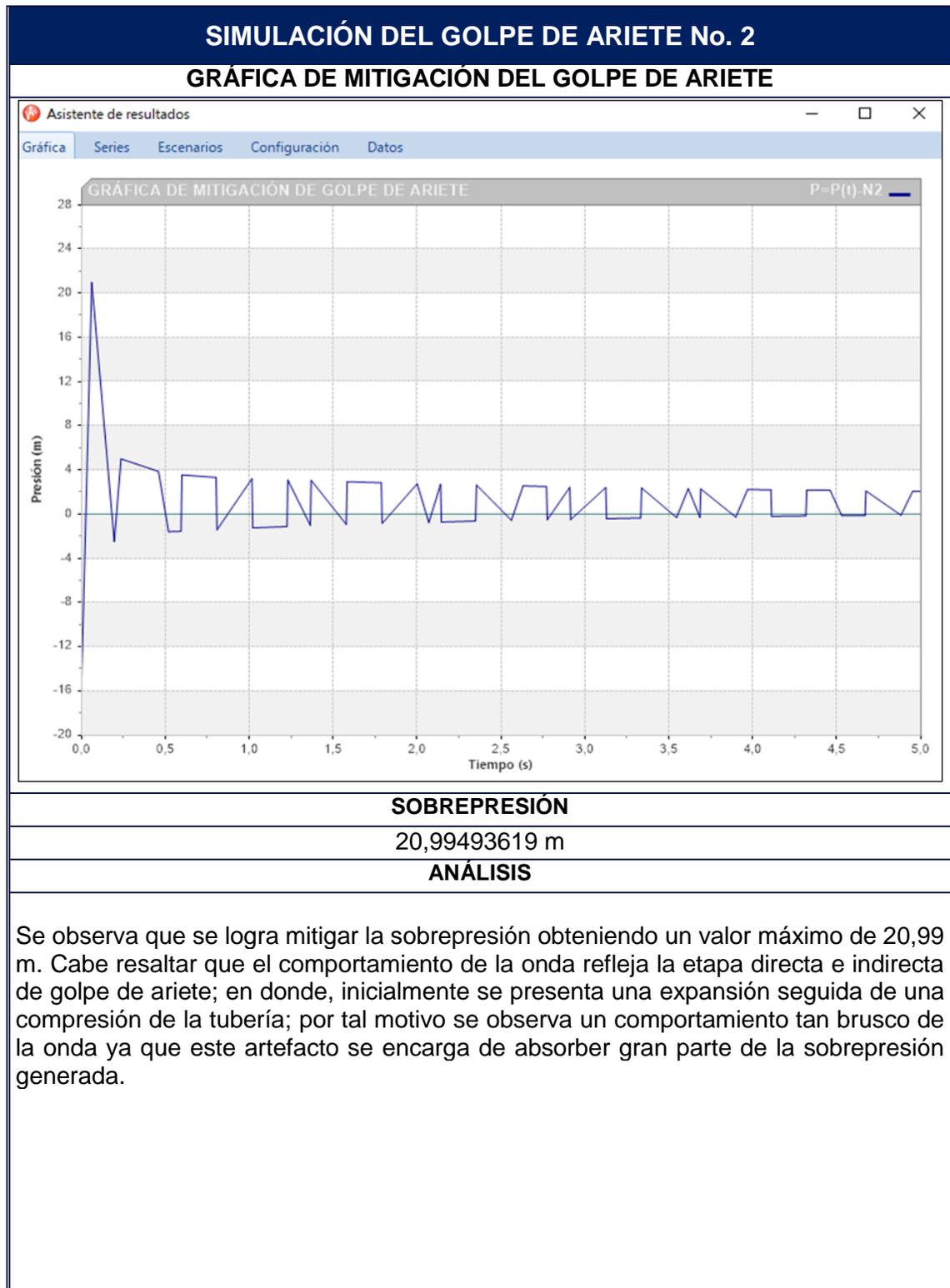
Fuente: elaboración propia.

Figura 65. Simulación del golpe de ariete de la corrida de datos No. 2



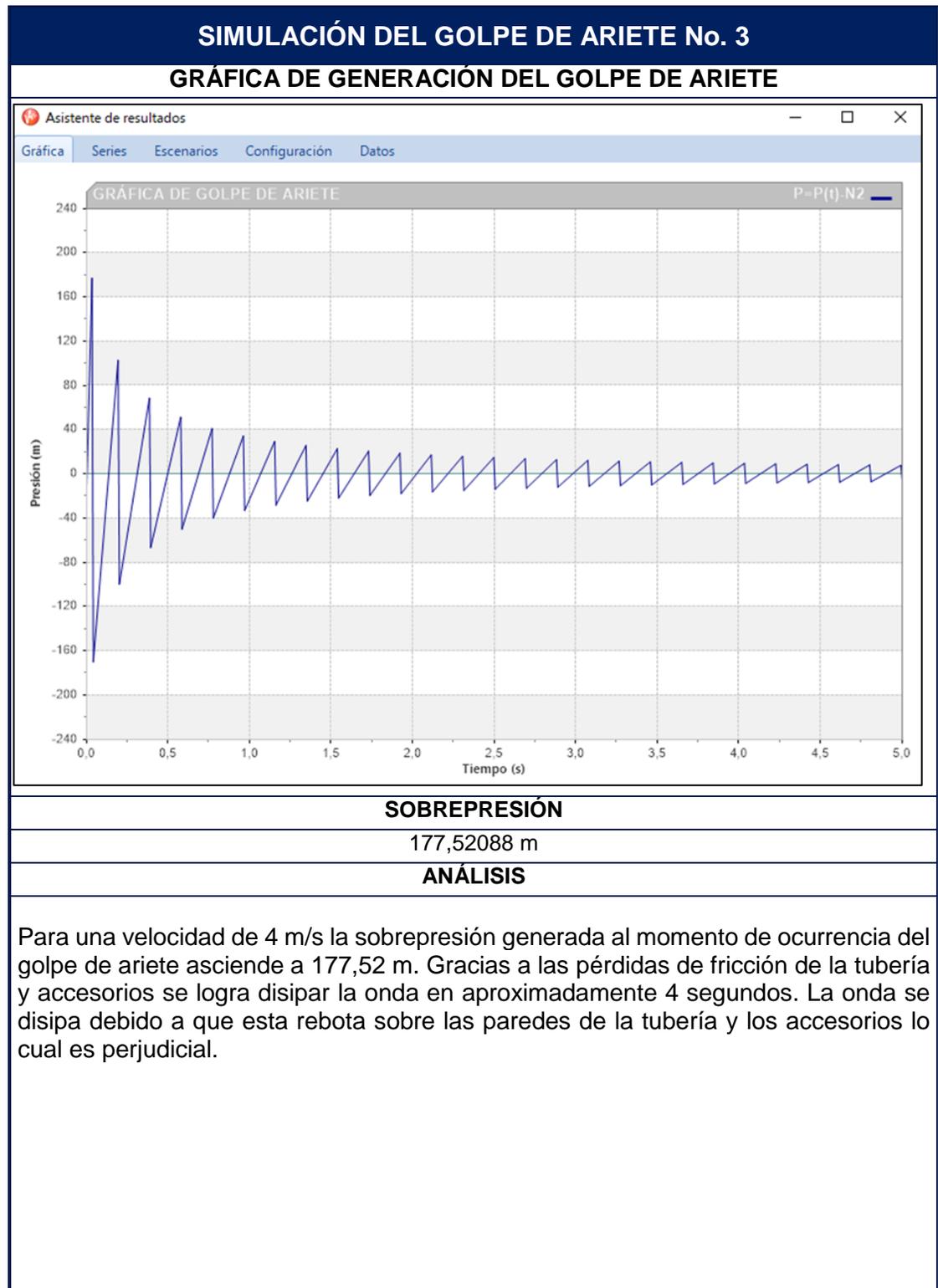
Fuente: elaboración propia.

Figura 65. (Continuación).



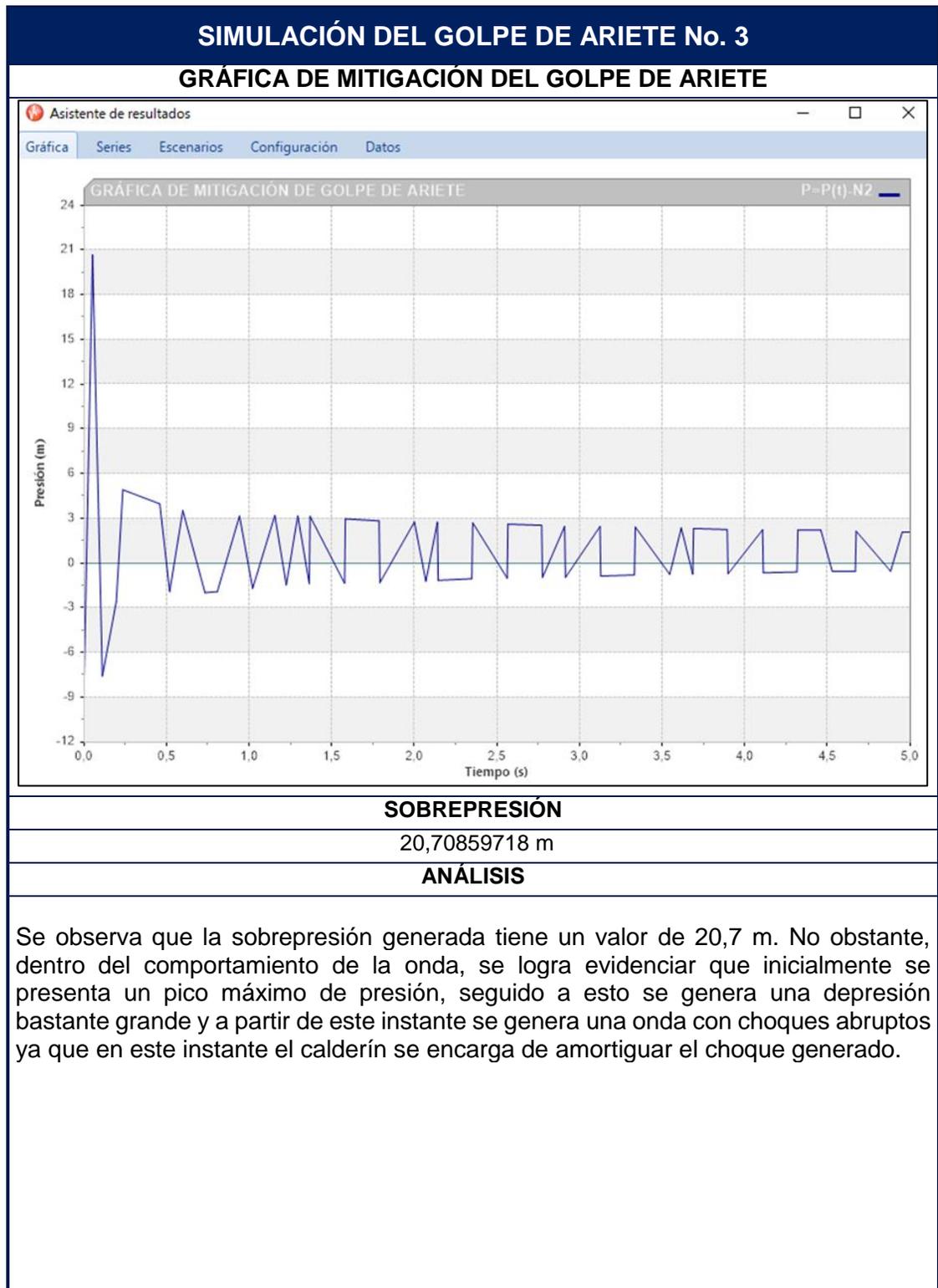
Fuente: elaboración propia.

Figura 66. Simulación del golpe de ariete de la corrida de datos No. 3



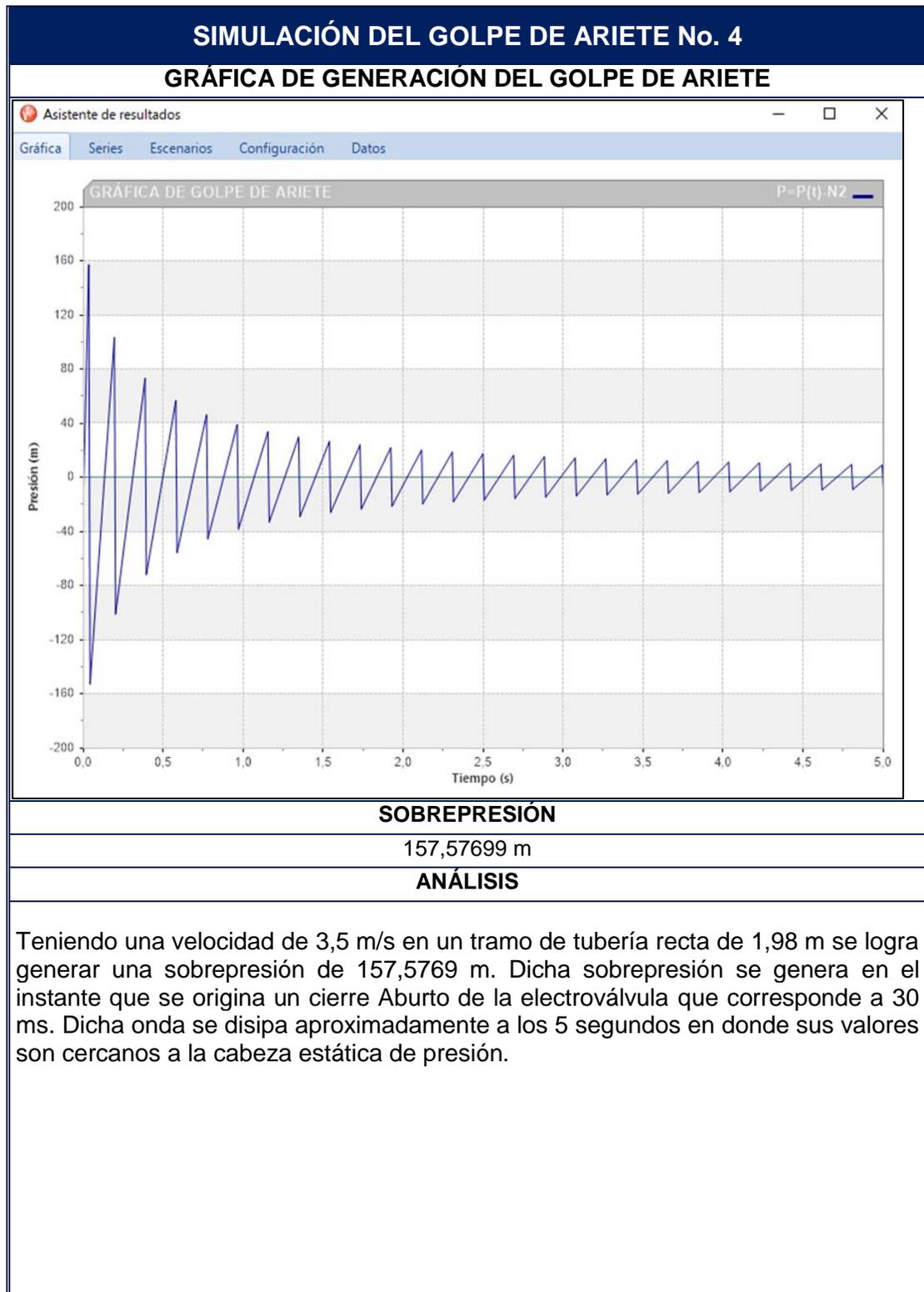
Fuente: elaboración propia.

Figura 66. (Continuación).



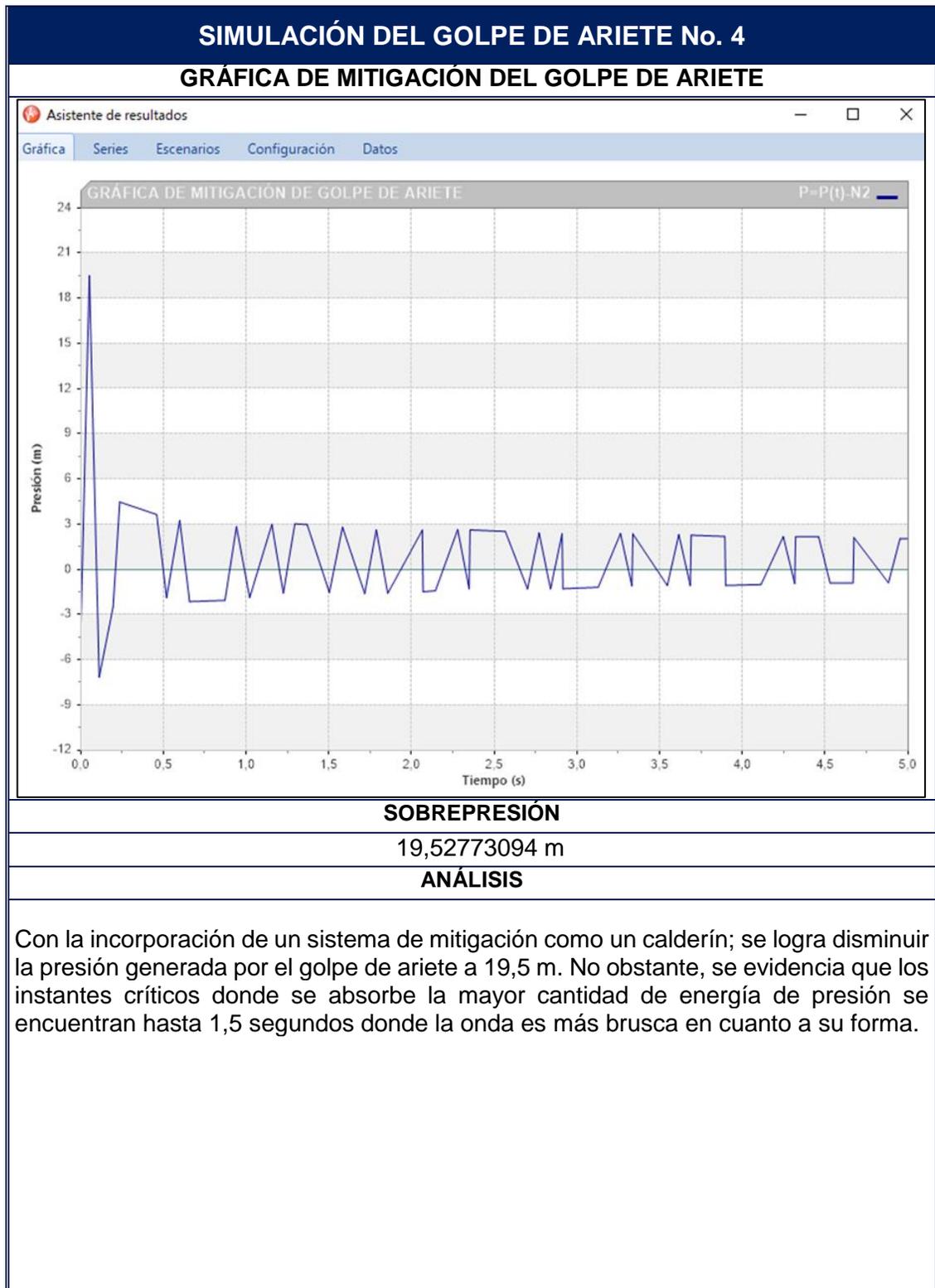
Fuente: elaboración propia.

Figura 67. Simulación del golpe de ariete de la corrida de datos No. 4



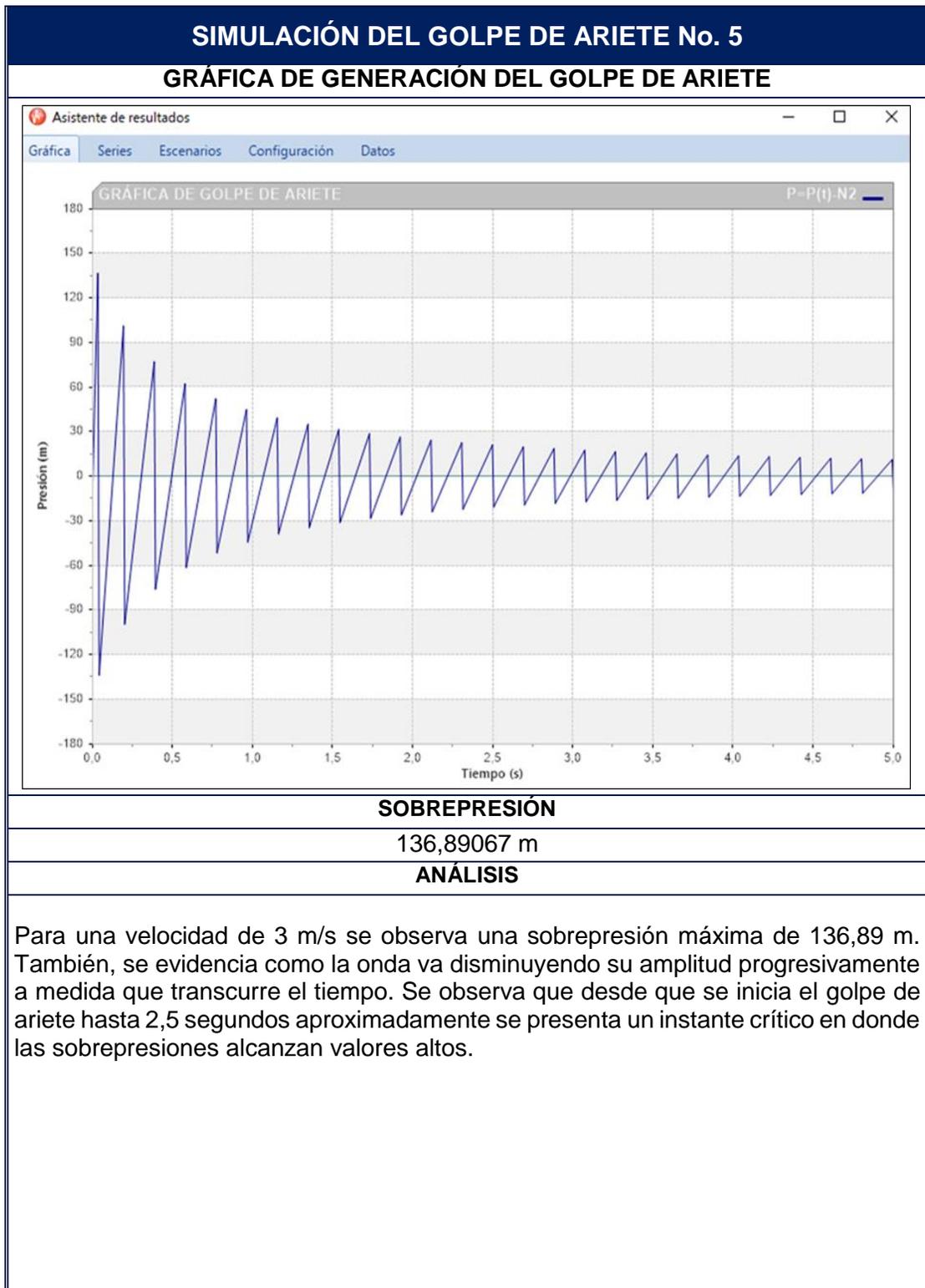
Fuente: elaboración propia.

Figura 67. (Continuación).



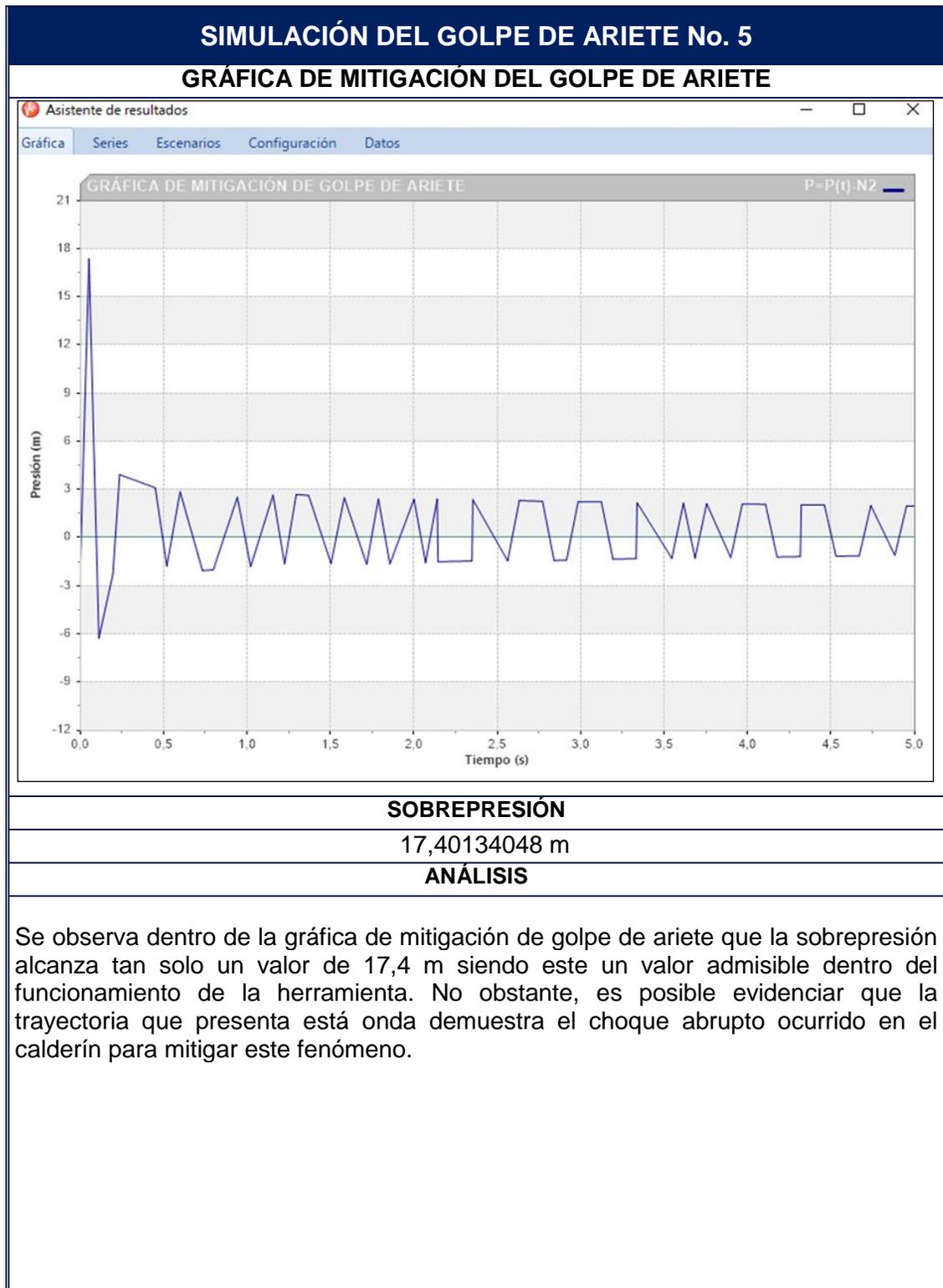
Fuente: elaboración propia.

Figura 68. Simulación del golpe de ariete de la corrida de datos No. 5



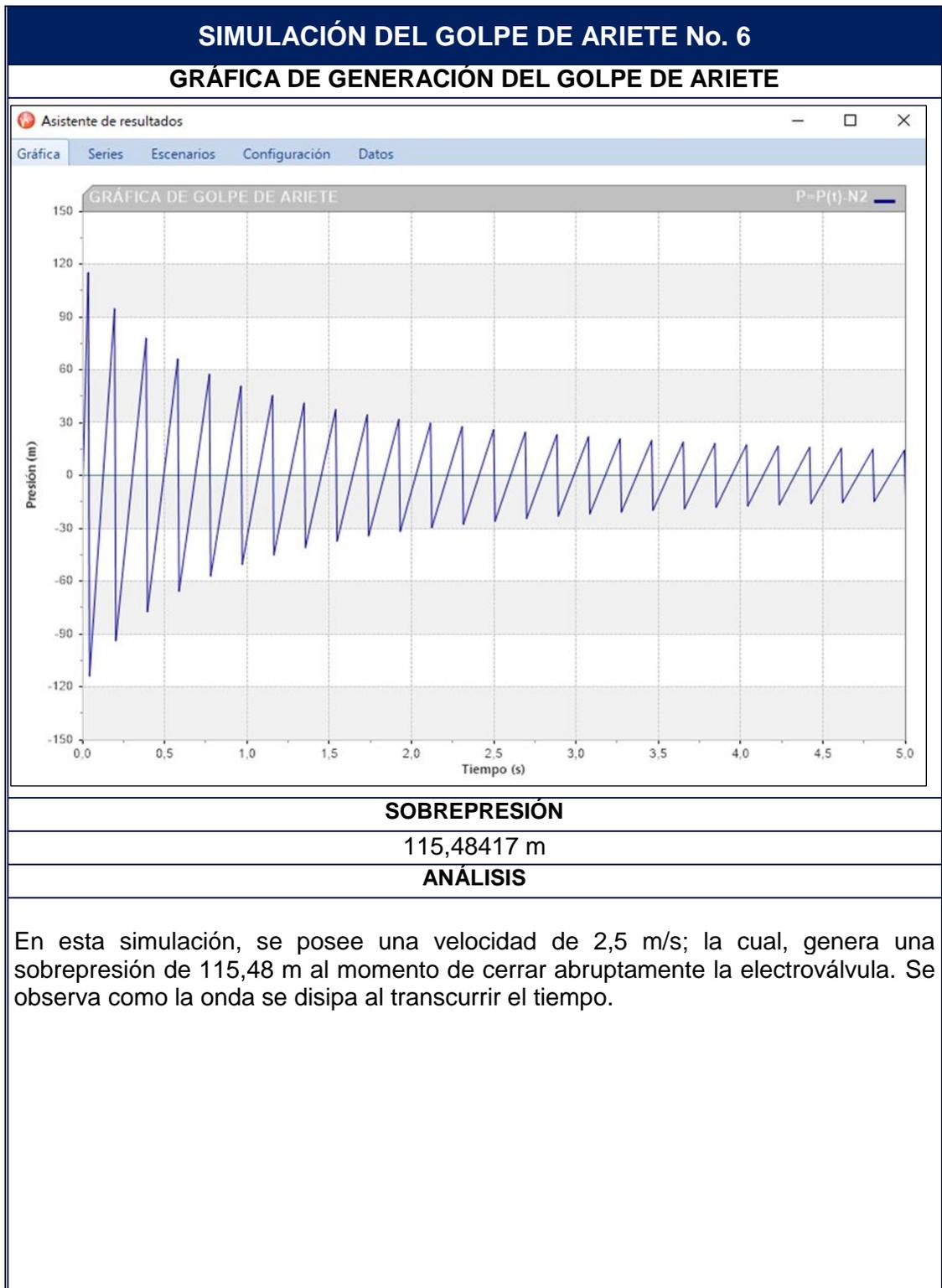
Fuente: elaboración propia.

Figura 68. (Continuación).



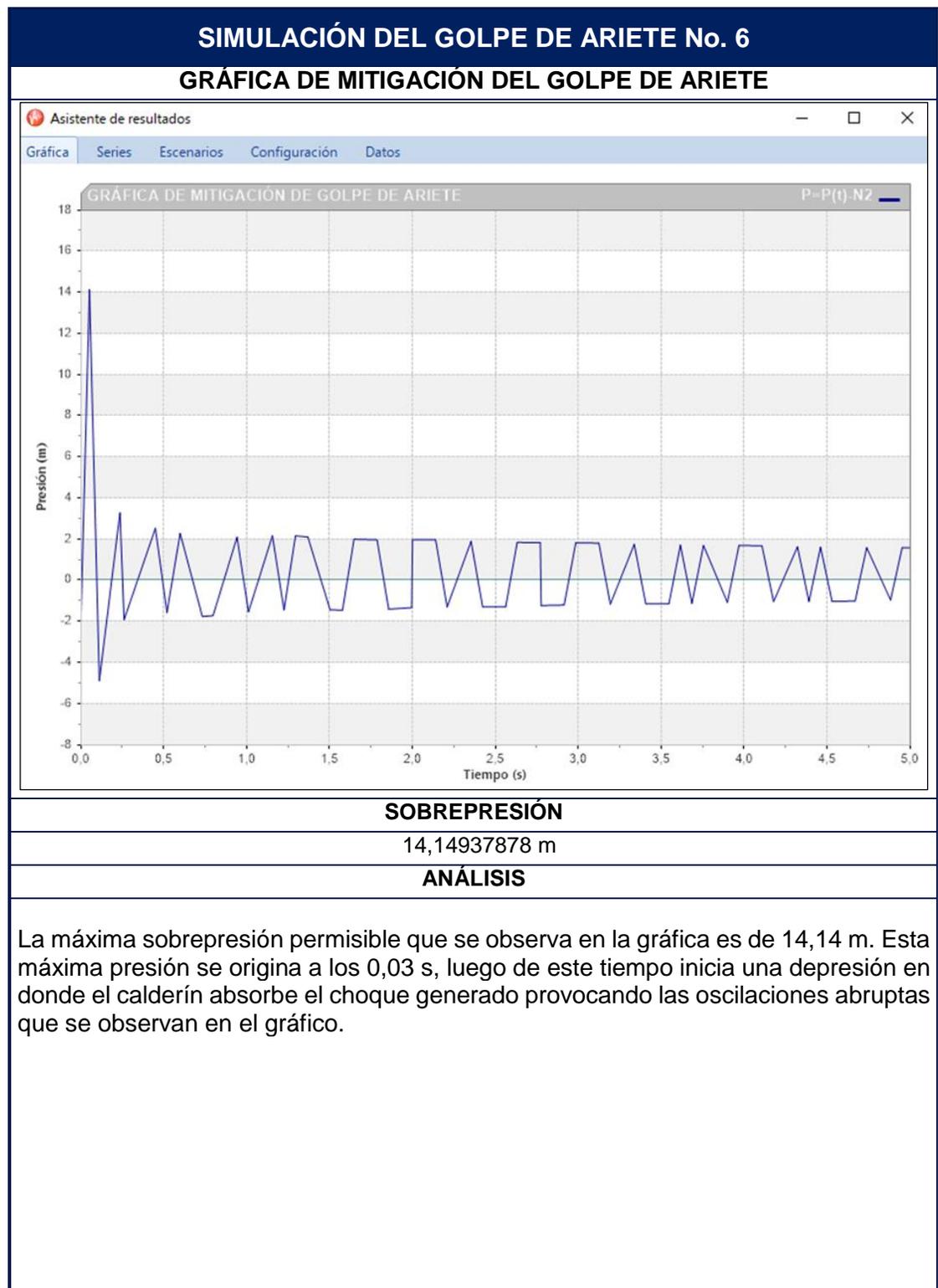
Fuente: elaboración propia.

Figura 69. Simulación del golpe de ariete de la corrida de datos No. 6



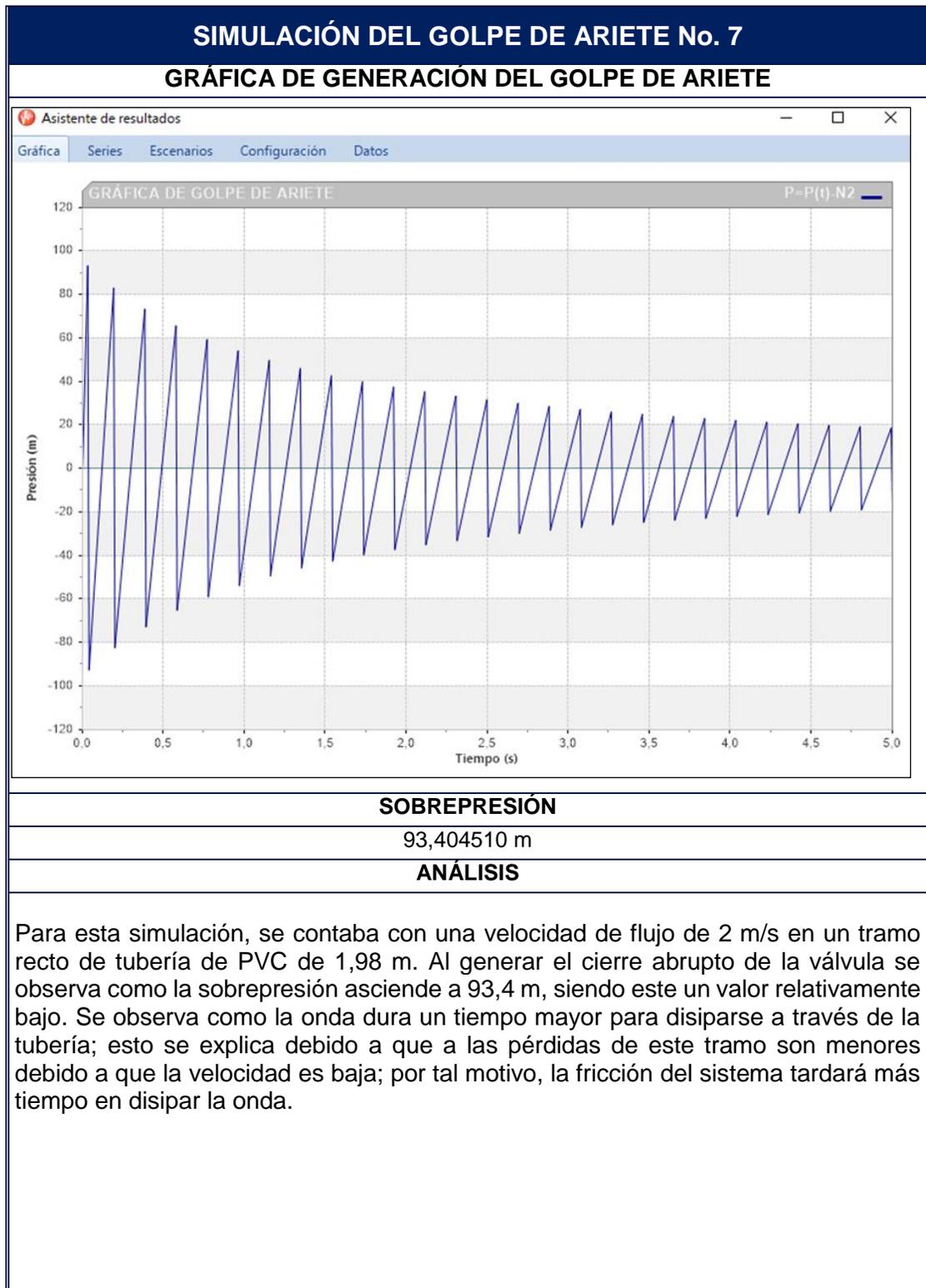
Fuente: elaboración propia.

Figura 69. (Continuación).



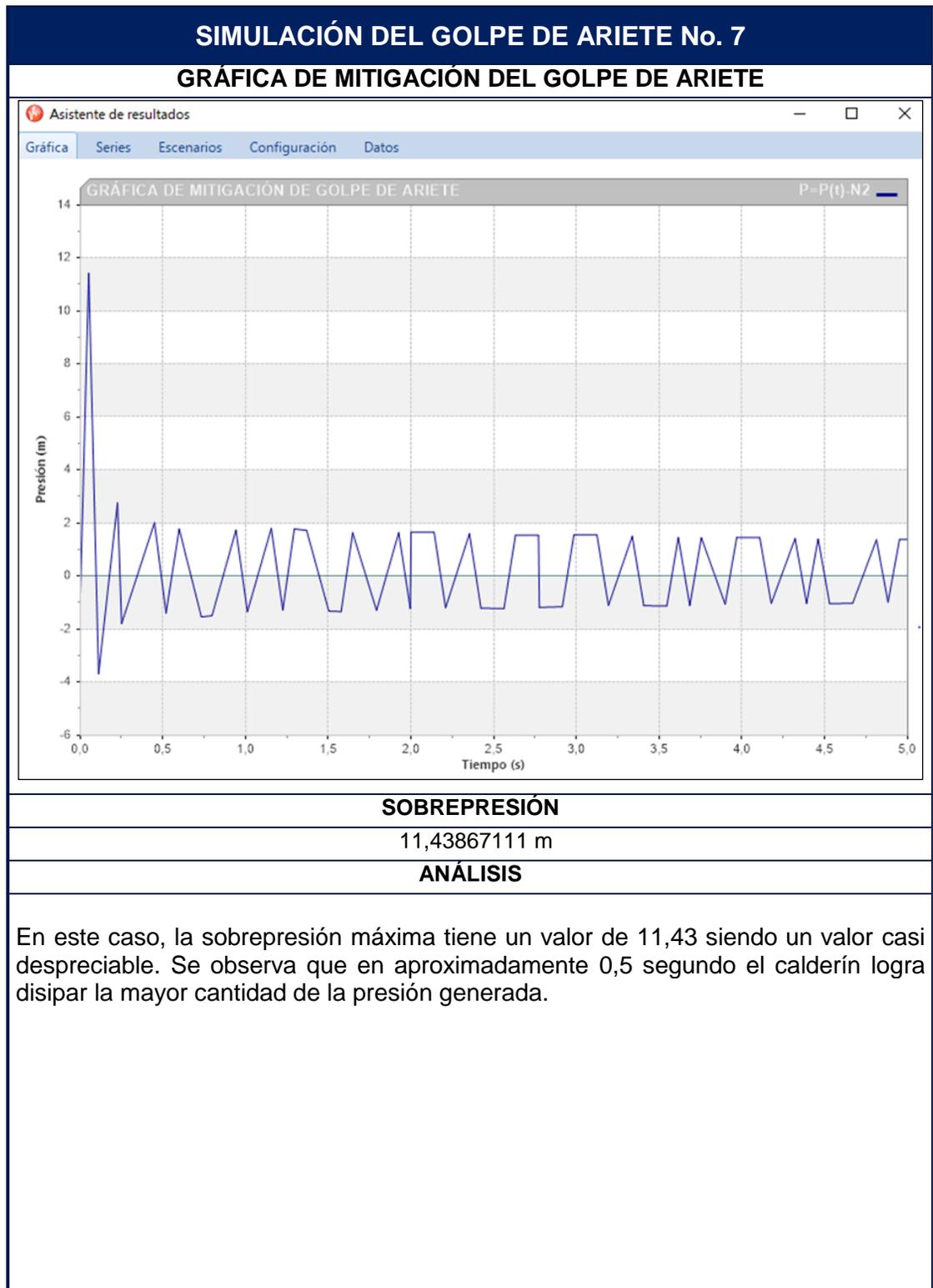
Fuente: elaboración propia.

Figura 70. Simulación del golpe de ariete de la corrida de datos No. 7



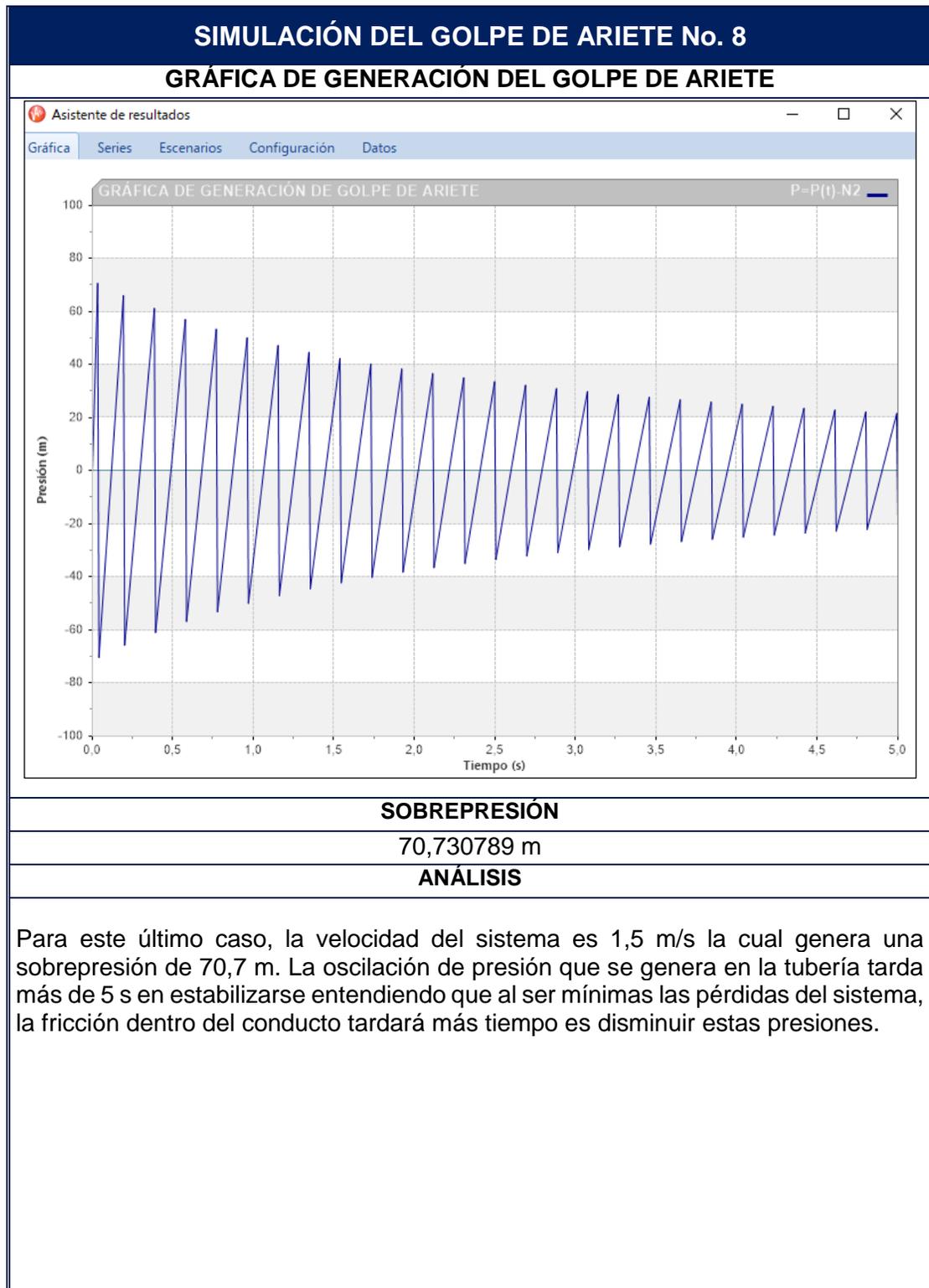
Fuente: elaboración propia.

Figura 70. (Continuación).



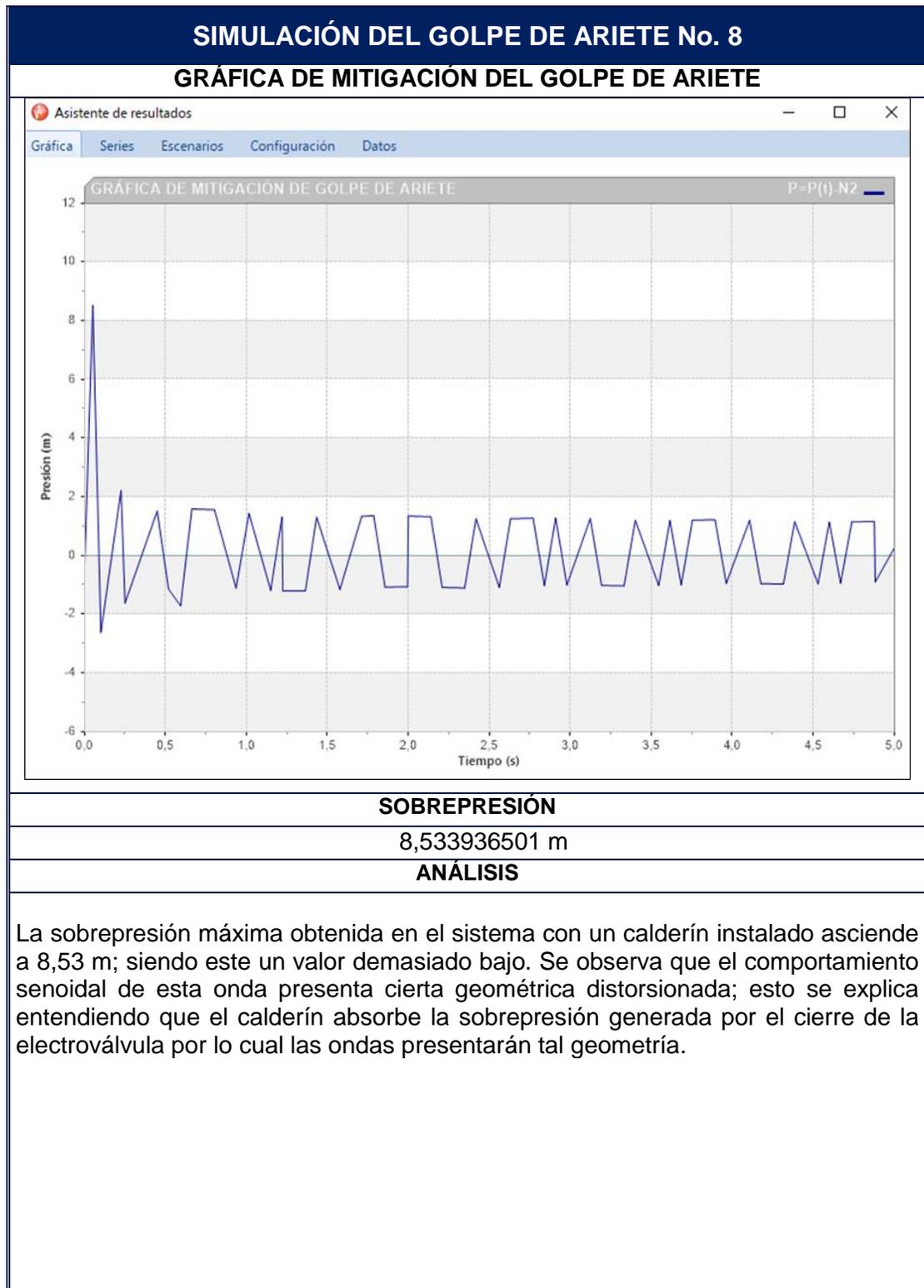
Fuente: elaboración propia.

Figura 71. Simulación del golpe de ariete de la corrida de datos No. 8



Fuente: elaboración propia.

Figura 71. (Continuación).



Fuente: elaboración propia.

ANEXO D.
PLANOS DE LA HERRAMIENTA DE ANÁLISIS DE GOLPE DE ARIETE

Remitirse al CD.