

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



**DISEÑO DE UN EQUIPO DIDÁCTICO PARA EL ESTUDIO DEL
FENÓMENO DE GOLPE DE ARIETE EN TUBERÍAS**

PRESENTADO POR:

KEVIN ALEXANDER PÉREZ RAMÍREZ

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERO MECÁNICO

CIUDAD UNIVERSITARIA, SEPTIEMBRE DE 2016

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR INTERINO :

LIC. JOSÉ LUIS ARGUETA ANTILLÓN

SECRETARIA GENERAL :

DRA. ANA LETICIA ZA VALETA DE AMAYA

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

DECANO :

ING. FRANCISCO ANTONIO ALARCÓN SANDOVAL

SECRETARIO :

ING. JULIO ALBERTO PORTILLO

ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

DIRECTOR :

ING. RIGOBERTO VELÁSQUEZ PAZ

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:
INGENIERO MECÁNICO

Título :

**DISEÑO DE UN EQUIPO DIDÁCTICO PARA EL ESTUDIO DEL
FENÓMENO DE GOLPE DE ARIETE EN TUBERÍAS**

Presentado por :

KEVIN ALEXANDER PÉREZ RAMÍREZ

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor :

ING. LUIS JOSÉ SALALÁ SANTOS

San Salvador, septiembre de 2016

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor

:

ING. LUIS JOSÉ SALALÁ SANTOS

CONTENIDO

Introducción.....	1
Objetivos	3
1. Marco teórico	4
1.1 Flujo en tuberías simples	4
1.1.1 Flujos laminares y turbulentos	4
1.1.1.1 Número de Reynolds	5
1.1.1.2 Irreversibilidad en tuberías simples	7
1.1.1.3 Problemas en tuberías simples.....	7
1.1.1.4 Pérdidas menores.....	8
1.2 El aire y el vacío dentro de las tuberías	8
1.2.1 Problemas relacionados al aire en tuberías	9
2. Fenómeno de golpe de ariete en tuberías.....	11
2.1 Antecedentes	11
2.2 Generalidades	12
2.3 Efecto del golpe de ariete.....	15
2.4 Separación de columna de líquido	16
2.5 Aplicaciones del fenómeno de golpe de ariete	16
2.5.1 Ariete hidráulico	17
2.6 Flujo no permanente: descripción del fenómeno de golpe de ariete	18
2.7 Flujo no permanente: ecuaciones diferenciales para el cálculo del golpe de ariete.....	21
2.7.1 Ecuación de movimiento.....	21
2.7.2 Ecuación de continuidad.....	23
2.8 Métodos para reducir el efecto del golpe de ariete	26
2.9 Descripción del fenómeno de golpe de ariete en abastecimientos por gravedad.....	30
2.10 Descripción del fenómeno de golpe de ariete en fenómenos de impulsiones.....	31
2.11 Ecuaciones básicas del golpe de ariete	32
2.11.1 Valor de la celeridad.....	32

2.11.2	Tiempo de cierre de la válvula y tiempo de parada de bombas. cierre lento y cierre rápido.....	33
2.11.3	Cálculo de sobrepresión producida por el golpe de ariete.....	36
3.	Etapa de diseño	38
3.1	Equipo didáctico o banco de pruebas	38
3.2	Diseño mecánico del equipo didáctico	45
3.3	Cálculo de golpe de ariete.....	50
3.4	Cálculo tanque de agua	52
3.5	Selección de bomba.....	53
3.6	Resumen de diseño	57
4.	Instrumentación y equipo de control	58
4.1	Instrumentación del equipo didáctico	63
4.1.1	Transductor de presión.....	63
4.1.1.1	Transductores de presión con salida milivoltios	64
4.1.1.2	Transductores de presión con salida de voltaje	65
4.1.1.3	Transductores de presión con salida de corriente.....	65
4.1.2	Arduino	66
4.1.2.1	Ventajas de arduino.....	68
4.1.2.2	Especificaciones técnicas.....	69
4.1.2.3	Elementos de la placa de arduino.....	70
4.1.2.4	Estructura de un programa en arduino	72
4.2	Funciones básicas del arduino.....	73
4.3	Declaración de variables	75
4.4	Código de arduino para el equipo didáctico	75
4.4.1	Funcionamiento	76
4.4.2	Componentes del circuito de apoyo.....	77
4.1.1	Diagrama de bloques de secuencia.....	78
5.	Descripción del funcionamiento del equipo de control	79
6.	Presupuesto de construcción	80
7.	Manual de operación.....	81
	Conclusiones.....	83

Bibliografía	84
Anexos.....	85

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Problemas de tuberías simples.	8
Tabla 2. Valores de K para diferentes tipos de materiales.	32
Tabla 3. Valores del coeficiente K.	35
Tabla 4 Resumen de aplicación de fórmulas para golpe de ariete.....	37
Tabla 5. Valores de los coeficientes de las entradas y salidas de tubería.	48
Tabla 6. Valores de los coeficientes de los accesorios	49
Tabla 7. Especificaciones técnicas de la bomba.	56
Tabla 8. Resumen etapa de diseño de banco didáctico.....	57
Tabla 9. Especificaciones técnicas de Placa Arduino UNO	69
Tabla 10. Componentes del circuito de apoyo.	77

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Figura 1. Aparato de Reynolds.....	6
Figura 2. Variación teórica de la presión en la válvula, sin considerar pérdidas por fricción. Tomado de Comisión Federal de Electricidad. 1982.....	14
Figura 3. Variación real de la presión en la válvula, considerando pérdidas por fricción. Tomado de Comisión Federal de Electricidad. 1982.....	15
Figura 4. Esquema del funcionamiento del ariete hidráulico.	18
Figura 5. Descripción del cierre súbito de una válvula en el extremo de aguas abajo.	19
Figura 6. Diagrama de cuerpo libre para la deducción de la ecuación de movimiento.	22
Figura 7. Volumen de control para la deducción de la ecuación de continuidad. ...	23
Figura 8. Volante de inercia en una máquina hidráulica.....	26
Figura 9. Chimenea de equilibrio.....	27
Figura 10. Acumulador hidroneumático.....	27
Figura 11. Válvula de alivio rápido.	28
Figura 12. Válvula anticipadora de onda.	28
Figura 13. Válvula ventosa.	29
Figura 14. Válvula de retención.....	29
Figura 15. Valores del coeficiente C.....	34
Figura 16. Valores del coeficiente K según Mendiluce.....	35
Figura 17. Esquema general de las partes que tendrá el equipo didáctico.	39
Figura 18. Tanque de agua plástico.	40
Figura 19. Válvula globo.....	41
Figura 20. Detalle de accesorios y tubería.	42
Figura 21. Válvula de mariposa.....	45
Figura 22. Diferencia de alturas esquema general.....	46
Figura 23. Esquema con los diferentes accesorios.	47
Figura 24. Ilustración de bomba con el equipo didáctico.....	53
Figura 25. Bomba Lepono de 3 HP..	57
Figura 26. Esquema básico de cualquier sistema de instrumentación.....	59
Figura 27. Transductor de presión.	60
Figura 28. Transductor de presión ideal para el banco didáctico.	66
Figura 29. Placa Arduino.	69
Figura 30. Pines de alimentación Placa Arduino.	70
Figura 31. Pines digitales entradas/salidas placa Arduino.	71
Figura 32. Entradas Analógicas Placa Arduino.	72
Figura 33. Conexión de cables para tarjeta SD en placa Arduino.	77
Figura 34. Esquema de conexión en placa Arduino.	78
Figura 35. Secuencia para el funcionamiento con placa Arduino.....	78

NOMENCLATURA DE SÍMBOLOS

a: celeridad.

L: longitud de tubería.

v: velocidad del agua.

K: coeficiente función del módulo de elasticidad del material constitutivo de la tubería

D: diámetro interior de la tubería.

e: espesor de la tubería.

T: tiempo de cierre de la válvula.

g: aceleración de la gravedad

H_m: altura manométrica proporcionada por el grupo de bombeo.

m: pendiente hidráulica.

ΔH: sobrepresión producida por el golpe de ariete .

t: tiempo.

H_f: pérdidas primarias

H_s: pérdidas secundarias.

P: presión.

f: factor de Darcy.

Q: caudal.

K_{acc}: coeficiente K de los accesorios.

A: área.

R: número de Reynolds.

μ: viscosidad dinámica.

γ: peso específico.

ε: rugosidad del material.

INTRODUCCIÓN

El diseño del equipo didáctico para el estudio del fenómeno de golpe de ariete en tuberías se hará de tal manera que en un futuro se construya y se pueda instalar en las afueras del edificio de la Escuela de Ingeniería Mecánica. Para su diseño, se utilizarán recursos para la medición de sus variables, tales como caudal, presión y tiempo de cierre de válvula; también se utilizará programas orientados al diseño del mismo y así poder obtener planos de construcción para una gestión de construcción a futuro.

El golpe de ariete es un fenómeno transitorio y por tanto de régimen variable, en que la tubería ya no es rígida y el líquido es compresible. Este fenómeno se produce en los conductos al cerrar o abrir una válvula y al poner en marcha o parar una maquina hidráulica, o también al disminuir bruscamente el caudal. Un caso importante ocurre en las centrales hidroeléctricas, donde se ha de reducir bruscamente el caudal suministrado a las turbinas hidráulicas acopladas a alternadores, cuando se anula la carga del alternador: en este caso la instalación debe proyectarse de manera que no se produzca un golpe de ariete excesivo.

La velocidad de las ondas de presión es igual a la velocidad del sonido en el fluido. Cualquiera que haya vivido en una casa antigua está familiarizado con la explosión que resuena a través de las tuberías cuando una llave de agua es cerrada repentinamente. Esto es un efecto del golpe de ariete. Una forma menos severa del golpe de ariete es llamada oscilación, que es un movimiento lento en forma de ola de una masa de agua causado por fluctuaciones internas de presión en el sistema.

Esto puede ser visto como una onda de presión que se forma lentamente dentro del sistema. Ambos, golpe de ariete y oscilación, se refieren a presiones transitorias. Si no se controlan, ambas darán los mismos resultados: daños a las tuberías, accesorios y válvulas, causando fugas y disminuyendo la vida útil del sistema. Ni la tubería ni el agua se comprimirán para absorber el choque del agua.

La desaceleración rápida produce un incremento de presión aguas arriba de la obstrucción, así la energía cinética se transforma en energía potencial que lleva a un aumento temporal de presión. Aguas abajo de la obstrucción, el transiente pueden causar una caída de la presión en las tuberías lo suficientemente grande como para invalidar la suposición de homogeneidad y continuidad del fluido al generarse burbujas de gas o vapor en el seno del fluido.

Las propiedades mecánicas del material de la pared y la rigidez de los apoyos de la tubería pueden influir significativamente en la intensidad de las oscilaciones de presión. La amplitud de la primer depresión aguas abajo de la obstrucción es prácticamente tan alta como la amplitud de la sobrepresión aguas arriba de la obstrucción.

Habitualmente se usa el modelo de flujo estacionario para el diseño de tuberías. Los resultados de los dos enfoques tienen en común la producción de series espaciales de las variables dinámicas en puntos sucesivos de tiempo. Los valores en estas series generalmente no son los mismos para los dos tipos de modelos. Los valores transientes son el resultado de cambios en las variables dinámicas causados por los procesos de flujo transitorios del paso temporal previo. Los valores del modelo de estado estacionario no dependen de los valores anteriores, sino solo de las condiciones de contorno.

La calibración y supervisión de sistemas hidráulicos requieren conocimiento detallado de la atenuación, forma y frecuencia del transitorio. El uso de métodos analíticos avanzados permite ajustar los márgenes de seguridad de un diseño mediante información apropiada referida al transiente hidráulico esperado.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

- Elaborar una propuesta de diseño de un banco didáctico para el estudio del fenómeno del golpe de ariete en tuberías.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Proponer un marco referencial sobre el fenómeno de golpe de ariete en tuberías.
- Identificar las variables que intervienen en el fenómeno de golpe de ariete.
- Evaluar alternativas de relación entre variables que intervienen en el fenómeno.
- Diseñar un equipo de laboratorio que permita analizar el fenómeno de golpe de ariete en una tubería.
- Diseñar el sistema de control para medición de variables y control del fenómeno.
- Seleccionar componentes para toma y registro de datos.
- Establecer las especificaciones técnicas de los componentes.
- Elaborar planos y especificaciones técnicas.

1. MARCO TEÓRICO

Diseñar y proteger las instalaciones hidráulicas frente al golpe de ariete es fundamental para garantizar la integridad física de las mismas. Ninguna instalación está exenta de este tipo de fenómenos que aparecen ante maniobras bruscas o inesperadas de sus elementos de regulación o sus bombas. Una instalación sin protección frente a transitorios puede sufrir oscilaciones de presión de magnitud notable y roturas que originen cuantiosas pérdidas.

1.1 FLUJO EN TUBERÍAS SIMPLES

La viscosidad es la propiedad del fluido que causa los esfuerzos cortantes en fluidos en movimiento. La viscosidad también es uno de los medios mediante el cual se desarrollan pérdidas. En flujos turbulentos, los movimientos aleatorios de fluidos superpuestos al promedio, crean esfuerzos cortantes aparentes que son más importantes que aquellos debidos a los esfuerzos cortantes viscosos.

1.1.1 FLUJOS LAMINARES Y TURBULENTOS

El flujo laminar se define como el flujo en el cual el fluido se mueve en capas, o láminas, que se deslizan suavemente sobre otra adyacente, únicamente con intercambio molecular de momentum. Cualquier tendencia a la inestabilidad y turbulencia son atenuadas por las fuerzas cortantes viscosas que resisten el movimiento relativo de capas fluidas adyacentes.

Sin embargo, en el flujo turbulento las partículas fluidas tienen un movimiento muy errático, con un intercambio de momentum transversal violento. La naturaleza del flujo, es decir, si es laminar o turbulento, y su posición relativa en una escala

que muestra la importancia relativa de las tendencias turbulentas a laminares están indicadas por el número de Reynolds.

1.1.1.1 NÚMERO DE REYNOLDS

En el siglo pasado Osborne Reynolds estudió ecuaciones diferenciales parciales no lineales complejas, para las cuales no se ha obtenido la solución general y ha tratado de determinar cuándo dos situaciones diferentes de flujo podrían ser similares.

Se dice que dos casos de flujo son dinámicamente similares cuando:

- 1) Éstos son geoméricamente similares, es decir, que las dimensiones lineales correspondientes tienen una relación constante.
- 2) Los correspondientes polígonos de fuerza son geoméricamente similares, o que las presiones en puntos correspondientes tienen una relación constante.

Al considerar dos situaciones de flujo geoméricamente similares, Reynolds dedujo que éstos serían dinámicamente similares si las ecuaciones diferenciales generales que describían sus flujos fueran idénticas. Al cambiar las unidades de masa, longitud y tiempo en un conjunto de ecuaciones y al determinar la condición que debe ser satisfecha para hacerlas idénticas a las ecuaciones originales, Reynolds encontró que en el grupo adimensional $ul\rho/\mu$ debe ser igual para ambos casos. La cantidad u es la velocidad característica, l es una longitud característica, ρ es la densidad de masa y μ la viscosidad.

Por lo tanto:

$$R = \frac{ul\rho}{\mu} \quad (1.1)$$

Reynolds llevó a cabo sus experimentos sobre un flujo de agua a través de tubos de vidrio. Un tubo de vidrio se montaba horizontalmente con uno de sus extremos en un tanque y una válvula en el extremo opuesto (Figura 1.1). Una entrada suave en forma de campana se colocaba en el extremo de aguas arriba, con un chorro de tinta puesto de tal forma que se pudiera inyectar una pequeña corriente de tinta en cualquier punto al frente de la boca de campana. Reynolds tomó la velocidad promedio como la velocidad característica y el diámetro del tubo como la longitud característica, de tal manera que:

$$R = \frac{VD\rho}{\mu} \quad (1.2)$$

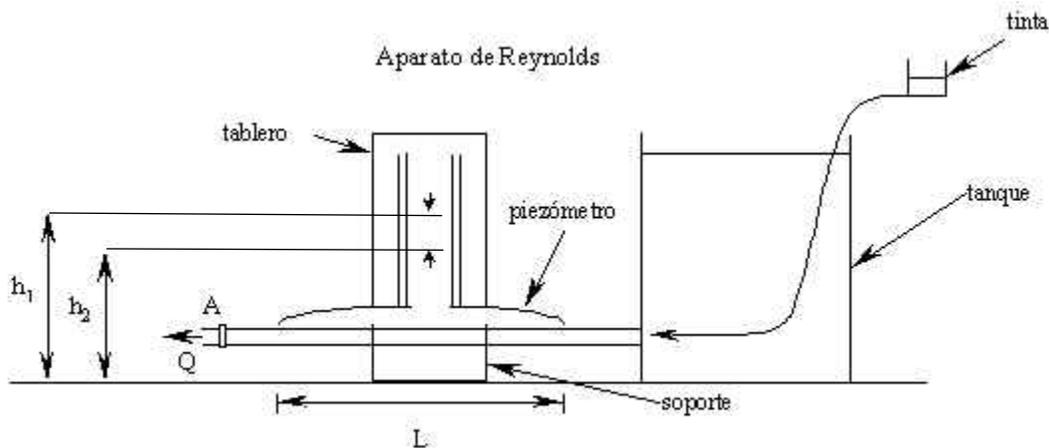


Figura 1. Aparato de Reynolds.

Empezando con flujo turbulento en la tubería de vidrio, Reynolds se encontró que éste siempre se volvía laminar cuando la velocidad se reducía para que R fuera menor que 2000. Éste es el número crítico inferior de Reynolds para flujo en tuberías y es de importancia práctica. En instalaciones usuales de tuberías, el flujo cambiara de laminar a turbulento en el rango de número de Reynolds de 2000 a 4000.

1.1.1.2 IRREVERSIBILIDAD EN TUBERÍAS SIMPLES

En flujo permanente incompresible en una tubería, las irreversibilidades se expresan en términos de la pérdida de cabeza o caída de la línea piezométrica. Las pérdidas, o irreversibilidades, hacen que dicha línea caiga en la dirección del flujo. La ecuación de Darcy-Weisbach generalmente se adopta para el cálculo del flujo en tuberías.

$$h_f = f \frac{L V^2}{D 2g} \quad (1.3)$$

El factor de fricción f es un factor adimensional que se requiere para hacer que la ecuación produzca valores correctos de pérdidas. Midiendo el caudal y el diámetro interno, se puede calcular la velocidad promedio. La pérdida de cabeza h_f se mide utilizando un manómetro diferencial unido a aperturas piezométricas separadas una distancia L .

La experimentación demuestra que lo siguiente es cierto en flujo turbulento:

- 1) La pérdida de cabeza varía directamente con la longitud de la tubería.
- 2) La pérdida de cabeza varías con casi el cuadrado de la velocidad.
- 3) La pérdida de cabeza varías con casi el inverso del diámetro
- 4) La pérdida de cabeza depende de la rugosidad superficial de la pared interior de la tubería.
- 5) La pérdida de cabeza depende de las propiedades del fluido, densidad y viscosidad.
- 6) La pérdida de cabeza es independiente de la presión.

1.1.1.3 PROBLEMAS EN TUBERÍAS SIMPLES

Los problemas de tuberías simples se refieren a tuberías en las cuales la fricción es la única pérdida. Las tuberías pueden formar cualquier ángulo con la

horizontal. Seis variables entran al problema (el fluido es tratado como incompresible): $Q, L, D, h_f, \nu, \epsilon$. En general, L, ν, ϵ , están dados o pueden determinarse. Los problemas de tuberías simples pueden tratarse en tres tipos:

Tabla 1. Problemas de tuberías simples.

TIPO	DADO	INCÓGNITA
I	Q, L, D, ν, ϵ	h_f
II	L, D, h_f, ν, ϵ	Q
III	Q, L, h_f, ν, ϵ	D

1.1.1.4 PÉRDIDAS MENORES

Las pérdidas menores que ocurren en tuberías debidas a curvas, codos, uniones, válvula, etc., se denominan pérdidas locales o menores. Éste es un nombre erróneo debido a que en muchas situaciones éstas son más importantes que las pérdidas debido a la fricción en tuberías.

La ecuación de las pérdidas menores se expresa de la siguiente manera:

$$h_s = K \frac{V_1^2}{2g} = \left[1 - \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^2 \right]^2 \frac{V_1^2}{2g} \quad (1.4)$$

1.2 EL AIRE Y EL VACÍO DENTRO DE LAS TUBERÍAS

Dos de los fenómenos menos considerados en el diseño de sistemas de conducción y distribución de agua es el aire atrapado dentro de la tubería y el vacío.

Muchos problemas de mal funcionamiento de las líneas se deben a estas causas. Las líneas deben ser bien ventiladas para que su funcionamiento sea óptimo.

Cuando una línea de conducción es vaciada accidentalmente por una fuga o para realizar algún mantenimiento, se requiere el ingreso de aire a la tubería con el objeto de evitar el vacío y por consecuencia el colapso o aplastamiento del tubo.

El costo de los accesorios de control de aire representa un mínimo porcentaje respecto al costo total de la conducción. Cuando no tiene accesorios de control en los sistemas de conducción, el aire atrapado, llega a obstruir el flujo de agua reduciéndolo hasta un 10 % o más debido a las bolsas de aire formadas en las partes altas de la tubería.

El origen del aire en las tuberías se debe a lo siguiente:

- 1) Cuando una bomba se pone en marcha, el aire es comprimido desde la bomba hacia la red.
- 2) El bombeo mismo puede causar una acción vortex en puntos de aspiración. Esto dará como resultado una aspiración de aire que se introducirá en el sistema pudiendo alcanzar hasta un 15 % en volumen del agua bombeada.
- 3) Cuando ocurre un salto hidráulico durante la transición de sección con caudal parcialmente lleno a sección totalmente llena, llevará aire de la sección parcialmente llena a la sección totalmente llena.

1.2.1 PROBLEMAS RELACIONADOS AL AIRE EN TUBERÍAS

- a) **Disminución del flujo**: Al tener aire dentro de las tuberías se formaran bolsas de aire en los puntos de variación de la pendiente. Cuando se tienen equipos de bombeo, se requerirá una mayor presión con menor eficiencia de la bomba. En los conductos por gravedad, debido a que no existe presión para empujar el aire, se tendrán mayores problemas teniéndose en ocasiones cese de flujo.

- b) **Cavitación**: Dentro de la tubería, al reducirse la sección, aumenta la velocidad teniéndose una caída local de presión y la formación de burbujas de vapor; las cuales se colapsan cuando las condiciones de flujo vuelven a ser normales, provocando erosión. La acción destructiva de la cavitación puede ser evitada suministrando aire a la tubería.
- c) **Exactitud de medidas y contadores**: La presencia de aire en el agua provoca un error en los medidores de flujo, ya que muchos medidores se basan en la velocidad del flujo. La velocidad del aire, a igualdad de presión y temperatura, es 29 veces superior a la del agua.

2. FENÓMENO DE GOLPE DE ARIETE EN TUBERÍAS

El golpe de ariete es el fenómeno por el cual, la información relativa a los cambios de las condiciones de flujo en cualquier punto del sistema es transmitida a todos los de más puntos del sistema. Este fenómeno es ocasionado por la transformación brusca de energía cinética del fluido en energía de presión o viceversa.

2.1 ANTECEDENTES

El fenómeno del golpe de ariete ha sido estudiado ampliamente desde el siglo XIX. Fue estudiado por primera vez por Menabrea (aunque generalmente se concede esta distinción a Michaud). Michaud examinó el uso de cámaras de aire y válvulas de seguridad para el control de golpe de ariete. Cerca del final del siglo XIX, los investigadores como Weston, Carpenter y Frizell intentaron desarrollar expresiones que relacionaran los cambios de presión y velocidad en una tubería.

Frizell desarrollo con éxito esta labor y discutió los efectos de los ramales y reflexión de ondas sucesivas de regulación de la velocidad de la turbina. Un trabajo similar fue desarrollado por sus contemporáneos Joukowsky y Allievi, sin embargo. Joukowsky produjo la mejor ecuación conocida en la teoría del flujo de transitorios, por lo que a menudo se llama la "ecuación fundamental del golpe de ariete".

También estudió la reflexiones de la onda de un ramal abierto, el uso de cámaras de aire, aumento tanques y válvulas de seguridad tipo resorte. Allievi desarrolló una teoría general que contiene los principales principios del golpe de ariete y mostró que el término convectivo en la ecuación de momento era insignificante.

Él introdujo dos importantes parámetros adimensionales que son ampliamente utilizados para caracterizar tuberías y el comportamiento de la válvula.

Allievi también produjo tablas para el aumento de presión en una válvula de cierre uniforme. Otras mejoras a las ecuaciones de golpe de ariete aparecieron en Jaeger, Wood, Rich, Parmakian, Streeter y Lai, y Streeter and Wylie. Sus esfuerzos combinados han dado lugar a las ecuaciones clásicas de masa e impulso para flujos unidimensionales de golpe de ariete.

2.2 GENERALIDADES

Antes de poder determinar el origen del fenómeno del golpe de ariete, será necesario la definición de dicho fenómeno muy conocido en el campo de la hidráulica y sus aplicaciones.

Se denomina golpe de ariete al choque que se produce sobre las paredes de un conducto forzado cuando el movimiento del líquido es modificado bruscamente. En otras palabras, consiste en la sobrepresión que las tuberías reciben al cerrar o abrirse bruscamente una válvula o al ponerse en marcha o detenerse una maquina hidráulica.

Las sobrepresiones originadas pueden aumentar la presión total interna hasta llegar a superar la presión máxima admisible, lo que puede ocasionar daños mecánicos graves a las tuberías y accesorios. Las ondas negativas pueden disminuir la presión total hasta generar cavitación, separación de la columna de líquido o el colapso de la tubería por efecto de la presión externa.

Se presenta en todas las líneas de conducción de agua cuando se tiene un paro brusco del fluido contenido en la tubería. La energía cinética que contiene el fluido debido a la velocidad de conducción, se transforma en energía potencial, que a su vez, dará origen a un incremento de la carga piezométrica original, llevándose a cabo un trabajo elástico de deformación en las paredes del conducto y el agua.

Cuando la válvula se cierra rápidamente, en virtud del principio de conservación de la energía, al disminuir la energía cinética, ésta se va

transformando en un trabajo de compresión del fluido que llena la tubería y en el trabajo necesario para dilatar esta última, se ha producido un golpe de ariete positivo. Por el contrario, al abrir rápidamente una válvula se puede producir una depresión, o golpe de ariete negativo.

Los siguientes son algunos casos en que se puede presentar golpe de ariete:

- a) **Cambio rápido en la abertura de la válvula, accidental o planeado.** Como lo hemos mencionado las válvulas juegan un papel muy importante en los estudios de golpe de ariete, ya que el tiempo y la velocidad de cierre de las mismas son determinantes en la magnitud de las sobrepresiones generadas. Haciendo los cierres muy lentamente se puede llevar la magnitud de estas sobrepresiones a valores muy pequeños. Pero cierres muy lentos no son siempre favorables para el proceso.

- b) **Arranque o interrupción de bombas.** El golpe de ariete en estaciones de bombeo puede ocurrir como resultado de diversas condiciones de operación, y el caso más crítico ocurre debido a una interrupción instantánea del suministro de potencia.

- c) **Cambios en la demanda de potencia de turbinas.** Crea un cambio rápido en la energía de suministro del flujo, causando un aumento de la presión en el lado de succión y una disminución de presión en el lado de la descarga.

- d) **Vibración de impulsores en bombas, ventiladores o turbinas.** Las variaciones de presión al momento de ser absorbidas por el sistema generan vibraciones en las tuberías y en las estructuras cercanas al tramo afectado, ocasionando debilitamiento en su resistencia, agrietamiento (causa de fugas)

- e) **Vibración de accesorios deformables tales como válvulas.** Cada uno de los componentes del sistema está diseñado para soportar un valor de presión determinado e incluso tienen un cierto margen de tolerancia, pero el aumento de presión que ocurre en un golpe de ariete puede sobrepasar ese límite y

causar desperfectos en los artefactos, teniendo que realizar en esas circunstancias reparaciones o incluso el reemplazo de la pieza dañada.

La física establece que la cantidad de movimiento del líquido tiende a ser nulo en una cantidad de tiempo que será proporcional al cierre que se haga, en el lado de aguas arriba, mientras que en el lado de aguas abajo de la válvula el líquido seguirá su movimiento en este sentido por la presencia de la cantidad de movimiento, siempre y cuando exista una presión estática que obstruya este movimiento y la presión desarrollada tienda a anularse.

El fenómeno se presenta en forma de una onda oscilatoria que viaja a lo largo de la tubería. El primer pico que registra esa onda corresponde a la sobreelevación máxima y tiene la misma magnitud para el golpe de ariete positivo y para el negativo.

La figura 2 representa la variación de la presión en la válvula de cierre rápido sin considerar pérdidas por fricción debido al desplazamiento de la onda de sobrepresión a lo largo del conducto.

El ciclo de las ondas de sobrepresión y subpresión se repetiría indefinidamente pero las pérdidas de energía hacen que vaya atenuándose hasta anularse por completo tal como se ilustra en la figura 3.

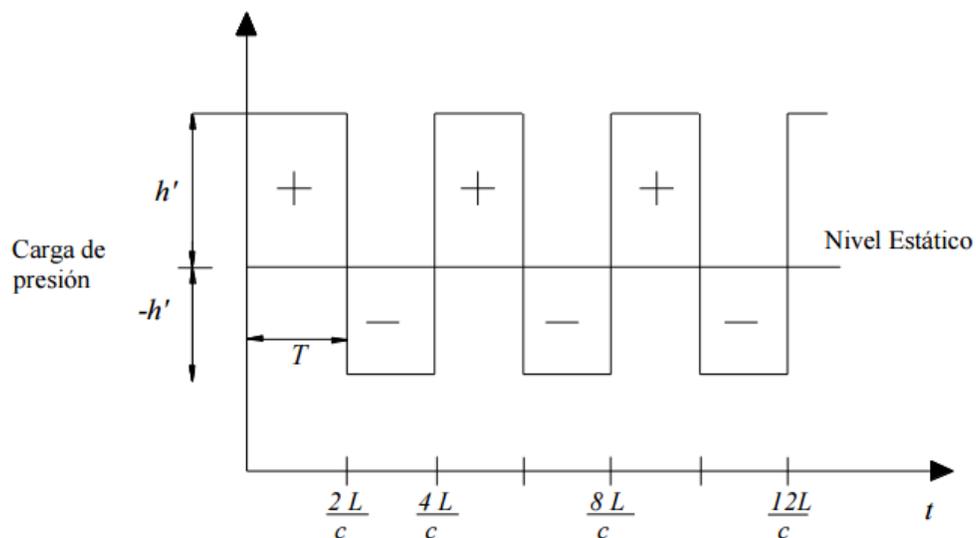


Figura 2. Variación teórica de la presión en la válvula, sin considerar pérdidas por fricción. Tomado de Comisión Federal de Electricidad. 1982.

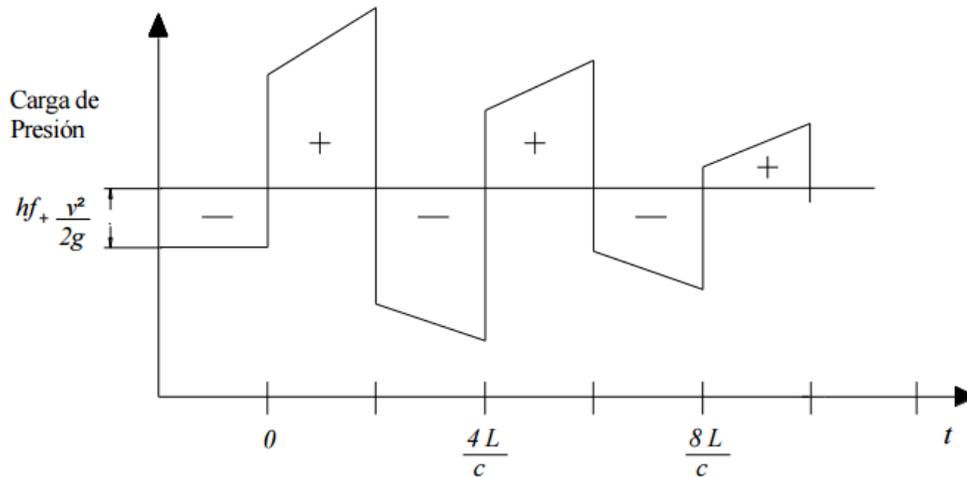


Figura 3. Variación real de la presión en la válvula, considerando pérdidas por fricción. Tomado de Comisión Federal de Electricidad. 1982.

2.3 EFECTO DEL GOLPE DE ARIETE

Las condiciones de operación de un sistema de transporte de agua casi nunca están en un estado estable. Las presiones y los flujos cambian continuamente a medida que la bomba se enciende y se apaga, la demanda fluctúa y los niveles del tanque cambian. Adicionalmente a estos eventos normales existen acontecimientos imprevistos tales como interrupciones de energía y el mal funcionamiento de los equipos, lo que puede cambiar rápidamente las condiciones de operación de un sistema.

Cualquier cambio en el nivel de velocidad del flujo del líquido, sin importar el nivel o magnitud del cambio, requiere que el líquido sea acelerado o desacelerado de su velocidad inicial de flujo. Los cambios rápidos en el nivel del flujo requieren grandes fuerzas que son vistas como presiones altas, las cuales causan golpe de ariete. El aire atrapado o los cambios de temperatura del agua también pueden causar excesiva presión en las líneas de agua. El aire atrapado en la línea se comprimirá y ejercerá una presión extra en el agua.

Los cambios de temperatura causan que el agua se expanda o se contraiga, afectando también la presión. Las presiones máximas experimentadas en un

sistema de tuberías son frecuentemente el resultado de la separación de una columna de vapor, la cual es causada por la formación de paquetes vacíos de vapor cuando la presión cae tan bajo que el líquido ebulle o se vaporiza. Las presiones dañinas pueden ocurrir cuando estas cavidades se colapsan.

2.4 SEPARACIÓN DE COLUMNA DE LÍQUIDO

Aparte de posibles daños en los equipos existentes en el sistema de tubería, el golpe de ariete puede causar que la tubería falla por excesiva presión o que falle por colapso debido a que la presión interna es menor que la presión atmosférica. El fenómeno de separación de columna puede ocurrir en un sistema de tubería cuando las condiciones de borde son tales que la presión en esta se vea disminuida.

Una reducción de presión en el extremo aguas arriba de la tubería con flujo positivo provoca una pulsación negativa la cual se transmite aguas abajo, en consecuencia ocurre una reducción de velocidad; el fluido aguas abajo continua con su velocidad estable hasta que la onda llega.

Esta diferencia de velocidades entre las dos porciones de flujo tiende a poner la columna de líquido en tensión, la cual los fluidos comerciales no pueden soportar. Cuando la presión de vapor es alcanzada, se forma una cavidad de vapor en la tubería. Cuando nos encontramos con un sistema de tubería con varias elevaciones, la separación de columna usualmente se forma cerca de uno de estos puntos altos que conforman el perfil.

2.5 APLICACIONES DEL FENÓMENO DE GOLPE DE ARIETE

Bajo el punto de vista de la ingeniería el golpe de ariete puede ser estudiado como un fenómeno perjudicial o benéfico dentro de las condiciones hidráulicas,

dependiendo de las circunstancias, de la magnitud de sus efectos y del tipo del medio donde se presente.

- **Tanque de oscilación diferencial:** es la separación de aceleración o desaceleración de conducción, resultando una acción hidráulica más rápida, reflejando una disminución más considerable y económica en el diámetro del tanque.
- **El ariete hidráulico:** es una bomba impelente, en la que la energía para su accionamiento se toma del impulso o golpe generado cuando se detiene bruscamente una masa de agua móvil. Es utilizado en suministro de agua.

2.5.1 ARIETE HIDRÁULICO

Una bomba de ariete o ariete hidráulico es una bomba hidráulica cíclica que utiliza la energía cinética de un golpe de ariete sobre un fluido para subir una parte de ese fluido a un nivel superior. No necesita por lo tanto aporte de otra energía exterior. Esto y su sencillez la hacen adecuada para lugares remotos donde no hay acceso a energía eléctrica o motores de otro tipo.

El funcionamiento del dispositivo es bastante simple y de fácil manejo. El agua se acelera a lo largo del conducto hasta alcanzar una determinada velocidad que hace que se cierre la válvula A; entonces se crea una fuerte presión, ejercida por el agua que se encuentra en movimiento y es detenida de golpe; así permite la apertura de la válvula B y pasa agua al depósito, hasta que se equilibran las presiones; Se abre la válvula A y el ciclo se repite una y otra vez.

El agua pasa a golpes de ariete al depósito, pero sale de este con continuidad ya que el ariete funciona de uno a dos ciclos por segundo.

Para que el ariete hidráulico funcione se necesitan dos cosas:

- Agua en cantidad suficiente para impulsarlo
- Suficiente desnivel de trabajo (el mínimo es 20 cm).

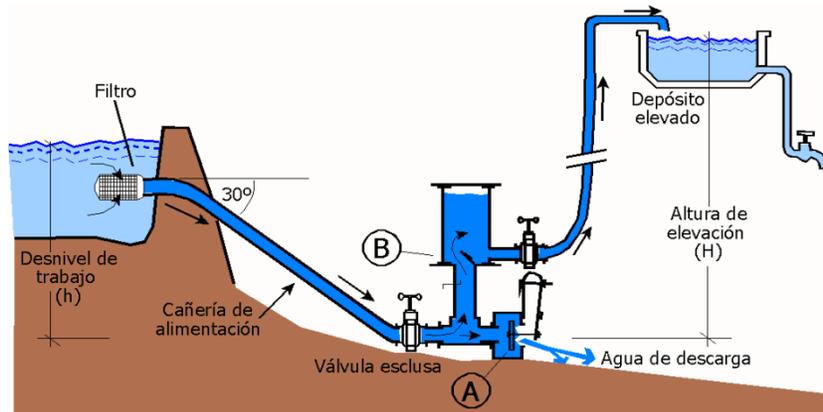


Figura 4. Esquema del funcionamiento del ariete hidráulico.

2.6 FLUJO NO PERMANENTE: DESCRIPCIÓN DEL FENÓMENO DE GOLPE DE ARIETE

El golpe de ariete puede ocurrir en un conducto cerrado que fluye cuando existe una retardación o una aceleración del flujo, como la causada por el cambio en la abertura de una válvula en la línea. Si los cambios son graduales, los cálculos pueden llevarse a cabo utilizando métodos agregados, considerando el líquido como incompresible y el conducto como rígido.

Cuando se cierra rápidamente una válvula en la tubería durante el flujo, éste se reduce a través de la válvula. Esto incrementa la cabeza en el lado de aguas arriba de la válvula y causa un pulso de alta presión que se propaga hacia aguas arriba con la velocidad de onda de sonido. La acción de este pulso de presión es la de disminuir la velocidad del flujo. En el lado de aguas abajo de la válvula se reduce la presión y una de baja presión viaja hacia aguas abajo con una velocidad de onda, la cual también reduce la velocidad.

Si el cierre es lo suficientemente rápido y la presión del flujo permanente, lo suficientemente baja, se puede formar una bolsa de vapor aguas debajo de la válvula. Cuando esto ocurre, eventualmente la cavidad colapsará y producirá una onda de alta presión hacia aguas abajo.

A continuación se presenta una descripción de la secuencia de eventos que siguen el cierre súbito de una válvula en el extremo de aguas debajo de una tubería que parte desde un depósito (Figura 5). En este caso no se tiene en cuenta la fricción.

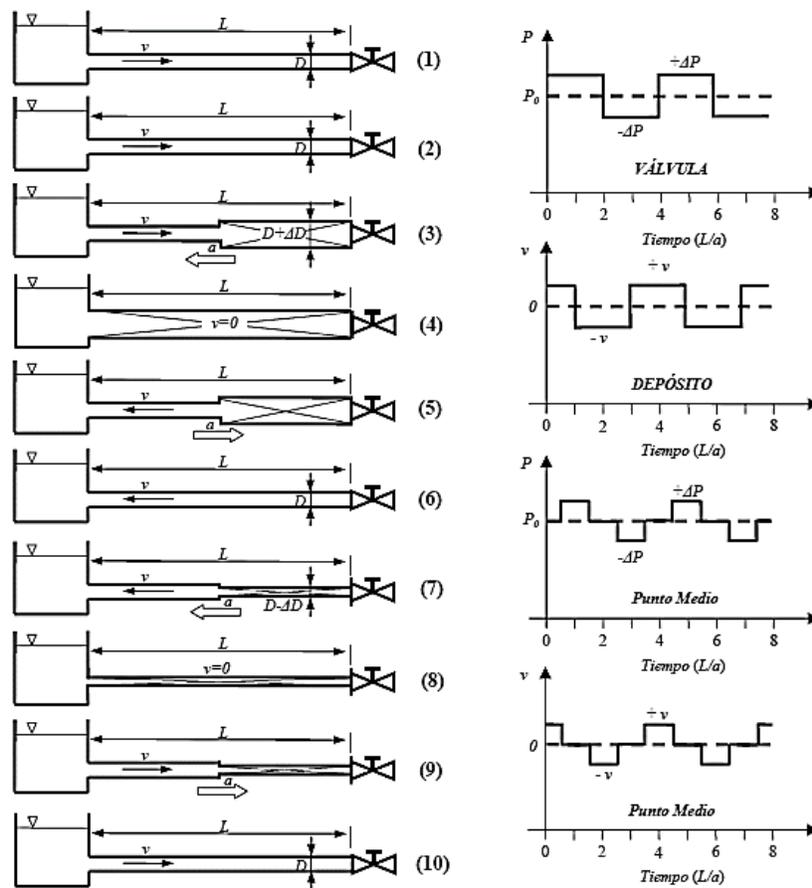


Figura 5. Descripción del cierre súbito de una válvula en el extremo de aguas abajo.

En el instante del cierre de la válvula ($t=0$) el fluido cerca de la válvula se comprime y llega al reposo, y la pared de la tubería se expande. Una vez que la primera capa se comprime, el proceso se repite con la siguiente capa. El fluido

aguas arriba de la válvula continúa moviéndose hacia aguas abajo sin disminuir su velocidad hasta que las capas sucesivas que se van comprimiendo llegan hasta la fuente.

La presión alta se mueve hacia aguas arriba como una onda, llevando el fluido al reposo a medida que pasa, comprimiéndolo y expandiendo la tubería. Cuando la onda alcanza el extremo de aguas arriba de la tubería ($t=L/a$ s), todo el fluido se encuentra bajo una cabeza adicional h , se ha perdido todo el momentum y toda la energía cinética se ha convertido en energía elástica.

En el instante de la llegada de la onda de presión se produce un desbalance en el extremo de aguas arriba (depósito) debido a que la presión en el embalse no cambia. El fluido empieza a moverse en dirección contraria, empezando en el extremo de aguas arriba. Este flujo retorna a la presión normal antes del cierre, la pared de la tubería vuelve a su estado normal y el fluido adquiere una velocidad V_0 en el sentido hacia aguas arriba.

Este proceso de conversión viaja hacia aguas abajo hasta la válvula a la velocidad del sonido en esta tubería. En el instante $2L/a$ la onda llega a la válvula, las presiones nuevamente son normales a lo largo de la tubería y la velocidad en todos los puntos es V_0 en dirección hacia aguas arriba.

Debido a que la válvula está cerrada, no se dispone de fluido para mantener el flujo en la válvula y se desarrolla una baja presión ($-h$) tal que el fluido es llevado al reposo. Esta onda de baja presión viaja hacia aguas arriba con una velocidad haciendo que el fluido alcance el reposo, en todos los puntos se expanda debido a la baja presión y permitiendo que las paredes de la tubería se contraigan.

En el instante en que la onda de presión negativa llega al extremo de aguas arriba de la tubería, $3L/a$ después del cierre, el fluido se encuentra en reposo pero uniformemente con una cabeza ($-h$) menor que antes del cierre. Esto produce un desbalance en el embalse, y el fluido retorna a sus condiciones normales a medida que la onda se mueve hacia aguas abajo con una velocidad. En el instante que esta

onda alcanza la válvula, las condiciones son exactamente iguales que en el instante del cierre, $4L/a$ antes.

Este proceso se repite cada $4L/a$. Los efectos de la fricción en el fluido y la elasticidad imperfecta de éste y la pared de la tubería, despreciados hasta ahora, son los de atenuar la vibración y, eventualmente, hacer que el fluido llegue a un reposo permanentemente. El cierre de una válvula en un tiempo menor que $2L/a$ se conoce como un *cierre rápido*; mientras que el *cierre lento* se refiere a tiempos de cierre mayores que $2L/a$.

2.7 FLUJO NO PERMANENTE: ECUACIONES DIFERENCIALES PARA EL CÁLCULO DEL GOLPE DE ARIETE

Se aplican dos ecuaciones básicas de la mecánica a un segmento corto de fluido en una tubería para obtener las ecuaciones diferenciales del flujo transitorio: la segunda ley del movimiento de Newton y la ecuación de continuidad.

Las variables dependientes son la presión (p) y la velocidad promedio (V) en una sección transversal. Las variables independientes son la distancia (x) a lo largo de la tubería, medida desde el extremo de aguas arriba y el tiempo (t); por consiguiente, $p = p(x, t)$ y $V = V(x, t)$. El efecto de la relación de Poisson no se tiene en cuenta en esta deducción, ya que para tuberías con juntas de expansión no es importante. Se considera que la fricción es proporcional al cuadrado de la velocidad.

2.7.1 ECUACIÓN DE MOVIMIENTO

Considérese un elemento de fluido entre dos planos paralelos apartados δx , perpendicular al eje de la tubería, como cuerpo libre para la aplicación de la segunda ley del movimiento de Newton en la dirección axial. En forma de ecuación:

$$pA - \left[pA + \frac{\partial}{\partial x} (pA) \delta x \right] + p \frac{\partial A}{\partial x} \delta x - \gamma A \delta x \text{sen } \theta - \tau_0 \pi D \delta x = \rho A \delta x \frac{dV}{dt} \quad (2.1)$$

Dividiendo por la masa del elemento $\rho A \delta x$ y simplificando se obtiene:

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - g \text{sen} \theta - \frac{4\tau_0}{D} = \frac{dV}{dt} \quad (2.2)$$

Para flujo turbulento permanente, $\tau_0 = \rho f V^2 / 8$. Se supone que el factor de fricción en flujo no permanente es el mismo que en flujo permanente. Por consiguiente, la ecuación de movimiento se convierte en:

$$\frac{dV}{dt} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + g \text{sen} \theta + \frac{fV|V|}{2D} = 0 \quad (2.3)$$

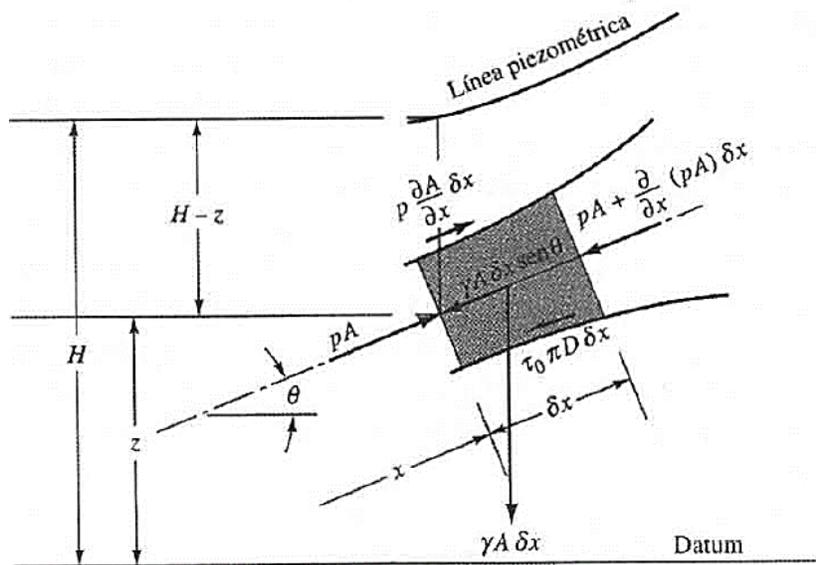


Figura 6. Diagrama de cuerpo libre para la deducción de la ecuación de movimiento.

Debido a que la fricción se opone al movimiento, V^2 se ha escrito como $V|V|$. Expandiendo el término de aceleración,

$$\frac{dV}{dt} = V \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial t} \quad (2.4)$$

En las aplicaciones del golpe de ariete el término, $V\partial V/\partial x$ generalmente es mucho más pequeño que $\partial V/\partial t$; por consiguiente, éste se omitirá, dejando:

$$L_1 = \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + g \operatorname{sen}\theta + \frac{fV|V|}{2D} = 0 \quad (2.5)$$

Esta ecuación está indicada mediante L_1 para distinguirla de la ecuación de continuidad L_2 , la cual se deduce a continuación.

2.7.2 ECUACIÓN DE CONTINUIDAD

Se aplica la ecuación de continuidad para flujo no permanente al volumen de control de la figura 7.

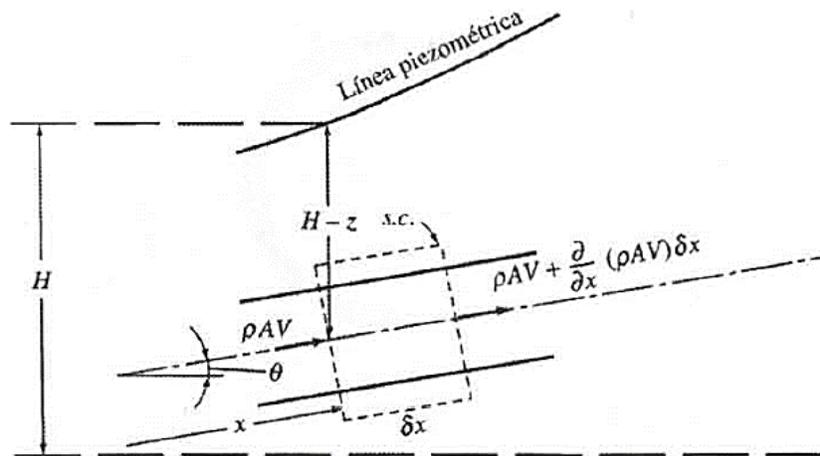


Figura 7. Volumen de control para la deducción de la ecuación de continuidad.

$$-\frac{\partial}{\partial x}(\rho AV)\delta x = \frac{\partial}{\partial t}(\rho A\delta x) \quad (2.6)$$

En donde δx no es función de t . Expandiendo la ecuación y dividiéndola por la masa $\rho A\delta x$ se obtiene:

$$\frac{V}{A} \frac{\partial A}{\partial x} + \frac{1}{A} \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{V}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (2.7)$$

Los dos primeros términos son la derivada total $(1/A) dA/dt$ y los dos siguientes son la derivada total $(1/\rho) d\rho/dt$, quedando:

$$\frac{1}{A} \frac{dA}{dt} + \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dt} + \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (2.8)$$

El primer término está relacionado con la elasticidad de la pared de la tubería y su tasa de deformación con la presión. El segundo término tiene en cuenta la compresibilidad del líquido. Al considerar la elasticidad de la pared, la tasa de cambio de la fuerza de tensión por unidad de longitud es $(D/2) dp/dt$; cuando se divide por el espesor de la pared e , se obtiene la tasa de cambio del esfuerzo unitario $(D/2e) dp/dt$; al dividir por el módulo de elasticidad de Young del material de la pared se obtiene la tasa de incremento de la deformación unitaria $(D/2eE) dp/dt$.

Después de multiplicar por el radio $D/2$, se obtiene la tasa de extensión radial. Finalmente, multiplicando por el perímetro πD se obtiene la tasa de incremento de área:

$$\frac{dA}{dt} = \frac{D}{2eE} \frac{dp}{dt} \frac{D}{2} \pi D \quad (2.9)$$

Y por consiguiente:

$$\frac{1}{A} \frac{dA}{dt} = \frac{D}{eE} \frac{dp}{dt} \quad (2.10)$$

De la definición del módulo de elasticidad volumétrica del fluido:

$$K = \frac{dp}{d\rho/\rho} \quad (2.11)$$

Y la tasa de cambio de la densidad derivada por la densidad devuelve:

$$\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dt} = \frac{1}{K} \frac{dp}{dt} \quad (2.12)$$

Mediante las ecuaciones anteriores, se tiene:

$$\frac{1}{K} \frac{dp}{dt} \left(1 + \frac{KD}{Ee}\right) + \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (2.13)$$

Es conveniente expresar las constantes de esta ecuación en la forma:

$$a^2 = \frac{K/\rho}{1 + (K/E)(D/e)} \quad (2.14)$$

Ahora la ecuación se convierte en:

$$\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dt} + a^2 \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (2.15)$$

Cuando se expande, dp/dt es:

$$\frac{dp}{dt} = V \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial p}{\partial t} \quad (2.16)$$

Nuevamente, para las aplicaciones del golpe de ariete, el término $V\partial p/\partial x$ usualmente es mucho más pequeño que $\partial p/\partial t$ se desprecia, quedando:

$$L_2 = \frac{\partial p}{\partial t} + \rho a^2 \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (2.17)$$

que es la ecuación de continuidad para un líquido compresible en una tubería elástica. L_1 y L_2 son dos ecuaciones diferenciales parciales no lineales que V y p en función de las variables independientes x y t . No se conoce una solución general de estas ecuaciones, pero pueden transformarse utilizando el método de las características para resolverlas convenientemente en forma numérica mediante diferencias finitas.

2.8 MÉTODOS PARA REDUCIR EL EFECTO DEL GOLPE DE ARIETE

- **VOLANTE DE INERCIA**

Consiste en incorporar a la parte rotatoria del grupo de impulsión un volante cuya inercia retarde la pérdida de revoluciones del motor, y en consecuencia, aumente el tiempo de parada de la bomba, con la consiguiente minoración de las sobrepresiones.



Figura 8. Volante de inercia en una máquina hidráulica.

- **CHIMENEAS DE EQUILIBRIO**

Consiste en una tubería de diámetro superior al de la tubería, colocada verticalmente y abierta en su extremo superior a la atmósfera, de tal forma que su altura sea siempre superior a la presión de la tubería en el punto donde se instala en régimen permanente. Este dispositivo facilita la oscilación de la masa de agua, eliminando la sobrepresión de parada, por lo que sería el mejor sistema de protección si no fuera por aspectos constructivos y económicos. Sólo es aplicable en instalaciones de poca altura de elevación.



Figura 9. Chimenea de equilibrio.

- **ACUMULADOR HIDRONEUMÁTICO**

Consiste en un recipiente metálico parcialmente lleno de aire que se encuentra comprimido a la presión manométrica. Existen modelos en donde el aire se encuentra aislado del fluido mediante una vejiga, con lo que se evita su disolución en el agua.

El acumulador hidroneumático amortigua las variaciones de presión debido a la expansión prácticamente adiabática del aire al producirse una depresión en la tubería, y posteriormente a la compresión, al producirse una sobrepresión en el ciclo de parada y puesta en marcha de una bomba. Su colocación se realiza aguas abajo de la válvula de retención de la bomba. Se instala en derivación y con una válvula de cierre para permitir su aislamiento.



Figura 10. Acumulador hidroneumático.

- **VÁLVULAS DE ALIVIO RÁPIDO**

Son válvulas de dispositivos que permiten de forma automática y casi instantánea la salida de la cantidad necesaria de agua para que la presión máxima en el interior de la tubería no exceda un valor límite prefijado. Suelen proteger una longitud máxima de impulsión del orden de 2 km. Los fabricantes suelen suministrar las curvas de funcionamiento de estas válvulas, hecho que facilita su elección en función de las características de la impulsión.



Figura 11. Válvula de alivio rápido.

- **VÁLVULAS ANTICIPADORAS DE ONDA**

Estas válvulas están diseñadas para que se produzca su apertura en el momento de parada de la bomba y cuando se produce la depresión inicial, de tal forma que cuando vuelva a la válvula la onda de sobrepresión, ésta se encuentre totalmente abierta, minimizando al máximo las sobrepresiones que el transitorio puede originar.



Figura 12. Válvula anticipadora de onda.

- **VENTOSAS**

Dependiendo de su función, permiten la eliminación del aire acumulado en el interior de la tubería, admisión de aire cuando la presión en el interior es menor que la atmosférica y la eliminación del aire que circula en suspensión en el flujo bajo presión.



Figura 13. Válvula ventosa.

- **VÁLVULAS DE RETENCIÓN**

Estas válvulas funcionan de manera que sólo permiten el flujo de agua en un sentido, por lo que también se conocen como válvulas anti-retorno.



Figura 14. Válvula de retención.

2.9 DESCRIPCIÓN DEL FENÓMENO DE GOLPE DE ARIETE EN ABASTECIMIENTOS POR GRAVEDAD

Si el agua se mueve por una tubería con una velocidad determinada y mediante una válvula se le corta el paso totalmente, el agua más próxima a la válvula se detendrá bruscamente y será empujada por la que viene detrás.

Como el agua es mínimamente compresible (aunque muy apreciable en este fenómeno en particular), empezará a comprimirse en las proximidades de la válvula, y el resto del líquido comprimirá al que le precede hasta que se anule su velocidad. Esta compresión se va trasladando hacia el origen conforme el agua va comprimiendo al límite la que le precede, de manera que al cabo de un cierto tiempo toda el agua de la tubería está en estas condiciones, concluyendo la primera etapa del golpe de ariete.

En definitiva, se forma una onda de máxima compresión que se inicia en las proximidades de la válvula y se traslada al origen. La energía cinética que lleva el agua se transforma en energía de compresión.

Cuando el agua se detiene, ha agotado su energía cinética y se inicia la descompresión en el origen de la conducción trasladándose hacia la válvula, y por la ley pendular esta descompresión no se detiene en el valor de equilibrio, sino que lo sobrepasa para repetir el ciclo.

Esta descompresión supone una depresión, que retrocede hasta la válvula para volver a transformarse en compresión, repitiendo el ciclo y originando en el conducto unas variaciones ondulatorias de presión que constituyen el golpe de ariete. En definitiva, se producen transformaciones sucesivas de energía cinética en energía de compresión y viceversa, comportándose el agua como un resorte.

2.10 DESCRIPCIÓN DEL FENÓMENO DE GOLPE DE ARIETE EN FENÓMENOS DE IMPULSIONES

En una impulsión, la parada brusca de motores produce el mismo fenómeno, pero al contrario, es decir, se inicia una depresión aguas arriba de la bomba, que se traslada hacia el final para transformarse en compresión que retrocede a la bomba.

En efecto, cuando se produce la parada del grupo de bombeo, el fluido, inicialmente circulando con velocidad v , continuará en movimiento a lo largo de la tubería hasta que la depresión a la salida del grupo ocasionada por la ausencia de líquido (el que avanza no es repuesto, no es “empujado”), provoque su parada. En estas condiciones, viaja una onda depresiva hacia el depósito, que además va deteniendo el fluido, de tal manera que al cabo de un cierto tiempo toda la tubería está bajo los efectos de una depresión y con el líquido en reposo. Ha concluido la primera etapa del golpe de ariete.

Como la presión en el depósito es siempre superior a la de la tubería, que se encuentra bajo los efectos de la depresión, se inicia un retroceso del fluido hacia la válvula de retención con velocidad $-v$. Con el agua a velocidad de régimen, pero en sentido contrario, nuevamente se tiene la presión de partida en la tubería, de manera que al cabo de un cierto tiempo toda ella estará sometida a la presión inicial y con el fluido circulando a velocidad $-v$.

El inicio de la tercera fase es una consecuencia del choque del líquido contra la válvula de retención. El resultado es un brusco aumento de presión y una detención progresiva del fluido, de modo que al cabo de un cierto tiempo todo el líquido de la tubería está en reposo y la conducción sometida a una sobrepresión de la misma magnitud que la depresión inicial. Esta tercera fase del golpe de ariete en una impulsión es semejante a la primera fase en el caso de abastecimientos por gravedad.

En la cuarta fase comienza la descompresión, iniciándose de nuevo el movimiento, por lo que al cabo de un tiempo la situación es idéntica a la que

teníamos al principio. Comienza un nuevo ciclo. Tanto en abastecimientos por gravedad como en impulsiones, la duración de cada una de estas fases es L/a , siendo L la longitud de la tubería y a la celeridad.

2.11 ECUACIONES BÁSICAS DEL GOLPE DE ARIETE

2.11.1 VALOR DE LA CELERIDAD

La celeridad (a) es la velocidad de propagación de la onda de presión a través del agua contenida en la tubería, por lo que su ecuación de dimensiones es $L * T^{-1}$. Su valor se determina a partir de la ecuación de continuidad y depende fundamentalmente de las características geométricas y mecánicas de la conducción, así como de la compresibilidad del agua.

Una expresión práctica propuesta por Allievi, que permite una evaluación rápida del valor de la celeridad cuando el fluido circulante es agua, es la siguiente:

$$a = \frac{9900}{\sqrt{48.3 + K * \frac{D}{e}}} \quad (2.18)$$

$$K = \frac{10^{10}}{\varepsilon} \quad (2.19)$$

Tabla 2. Valores de K para diferentes tipos de materiales.

VALORES DE K PARA LA CELERIDAD		
MATERIAL DE LA TUBERÍA	ε (kg/m^2)	K
Acero laminado	2×10^{10}	0.5
Fundición	10^{10}	1
Hormigón	2×10^9	5
Fibrocemento	1.85×10^9	5.5 (5.6)

MATERIAL DE LA TUBERÍA	ε (kg/m^2)	K
PVC	3×10^8	33.3 (20-50)
PE de baja densidad	2×10^7	500
PE de alta densidad	9×10^7	111.11

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

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

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

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

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

$$T = C + \frac{K * L * v}{g * H_m} \quad (2.20)$$

El coeficiente C (ver figura 15) es función de la pendiente hidráulica (m), siendo $m = H_m/L$. Toma el valor $C = 1$ para pendientes hidráulicas crecientes de hasta el 20%, y se reduce progresivamente a partir de este valor hasta hacerse cero para pendientes del 40%.

Pendientes superiores al 50% implican paradas muy rápidas, aconsejándose considerar el golpe de ariete máximo de Allievi en toda la longitud de la tubería.

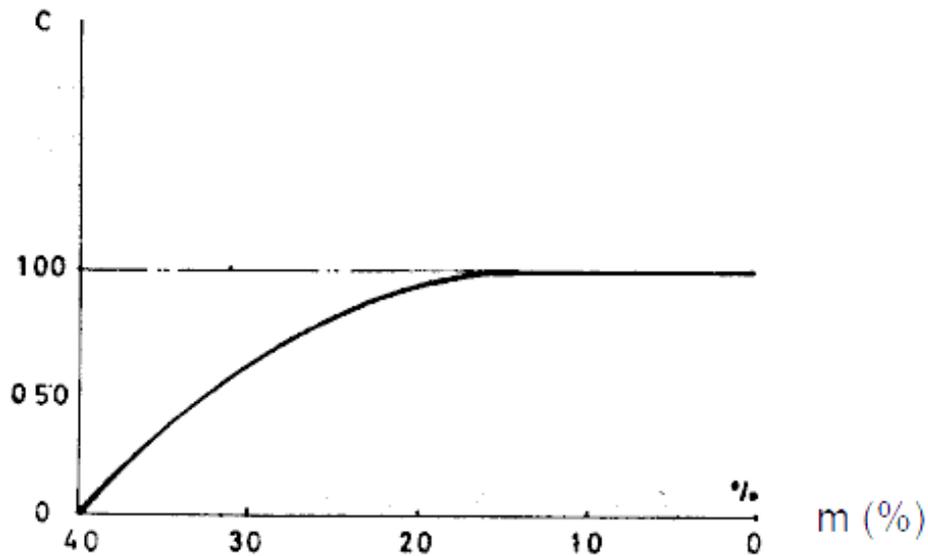


Figura 15. Valores del coeficiente C .

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

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

$$\frac{H_m}{L} \approx 0.30 \rightarrow C = 0.6$$

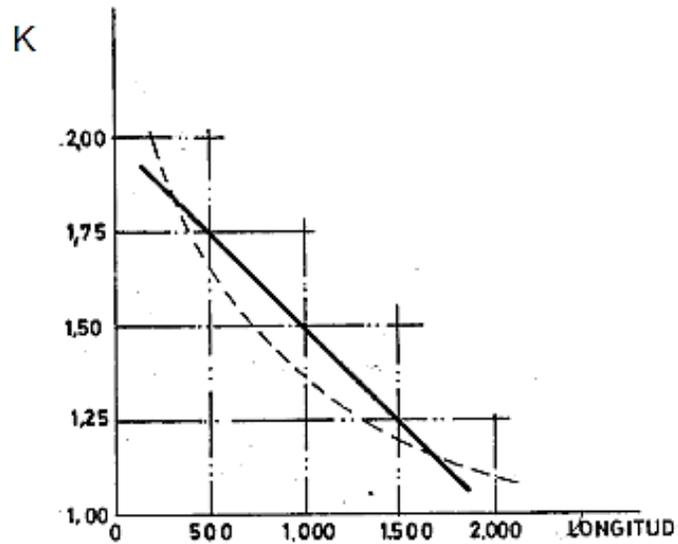


Figura 16. Valores del coeficiente K según Mendiluce.

El coeficiente K (ver figura 16) depende de la longitud de la tubería y puede obtenerse a partir de la gráfica o de la tabla siguientes, propuestas por Mendiluce. Este autor recomienda la utilización de los valores de K redondeados recogidos en la tabla, ya que ha comprobado que las pequeñas diferencias respecto a la gráfica tienen una repercusión despreciable en el golpe de ariete y siempre del lado de la seguridad, y es de más sencillo manejo.

Tabla 3. Valores del coeficiente K.

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

Puesto que L es la longitud de la tubería y la celeridad a es la velocidad de propagación de la onda de presión, $2L/a$ será el tiempo que tarda la onda de presión en dar una oscilación completa.

Por lo tanto, si $T < 2L/a$, la maniobra ya habrá concluido cuando se produzca el retorno de la onda de presión y se tendrá un cierre rápido, alcanzándose la sobrepresión máxima en algún punto de la tubería. Sin embargo, si $T > 2L/a$, estará ante un cierre lento y ningún punto alcanzará la sobrepresión máxima, ya que la primera onda positiva reflejada regresa antes de que se genere la última negativa.

$$T < \frac{2L}{a}: \text{Cierre rápido} \quad (2.21)$$

$$T > \frac{2L}{a}: \text{Cierre lento} \quad (2.22)$$

El caso más desfavorable para la conducción (máximo golpe de ariete) es el cierre instantáneo ($T \approx 0$). En la práctica esto sólo ocurre en impulsiones de gran pendiente hidráulica, no siendo lo habitual. Como a mayor tiempo T menor sobrepresión, si se puede controlar T se limitará en gran medida los problemas en tuberías, siendo éste el caso de los abastecimientos por gravedad.

2.11.3 CÁLCULO DE SOBREPRESIÓN PRODUCIDA POR EL GOLPE DE ARIETE

Una vez conocido el valor del tiempo T y determinado el caso en el que se encuentra (cierre lento o cierre rápido), el cálculo del golpe de ariete se realizará de la forma siguiente:

a) Cierre lento:

A finales del siglo XIX, Michaud propuso la primera fórmula para valorar el golpe de ariete:

$$\Delta H = \frac{2 * L * v}{g * T} \quad (2.23)$$

b) **Cierre rápido.**

Como se comentó anteriormente, al cerrar la válvula, el agua se detiene y comienza a comprimirse en sus proximidades.

$$\Delta H = \frac{a * v}{g} \quad (2.24)$$

Expresión que dedujo Allievi en 1904, con la que se calcula el valor máximo del golpe de ariete que puede producirse en una conducción. Puede observarse cómo el valor de la sobrepresión es independiente de la longitud de la tubería.

Al basarse en el concepto de longitud crítica, se tiene que:

Tabla 4 Resumen de aplicación de fórmulas para golpe de ariete.

IMPULSIÓN CORTA	IMPULSIÓN LARGA	CIERRE LENTO	CIERRE RÁPIDO	MICHAUD	ALLIEVI
$L < L_c$	$L > L_c$	$T < \frac{2L}{a}$	$T > \frac{2L}{a}$	$\Delta H = \frac{2 * L * v}{g * T}$	$\Delta H = \frac{a * v}{g}$

3. ETAPA DE DISEÑO

La propuesta de diseño que se llevará a cabo, se pretende que la instalación del equipo didáctico para el estudio de golpe de ariete en tuberías, obtenga resultados en donde pueda dar lectura a valores con los cuales se hace de manera más veraz y eficiente el estudio del proceso. La ubicación de este equipo estará desde la parte superior del lado sur del edificio de la Escuela de Ingeniería Mecánica, siguiendo su trayectoria hasta llegar al taller de motores de la misma.

Al tomarse en cuenta la longitud que existe en el edificio, el lugar adecuado para instalar dicho banco, se toma como referencia una longitud de 50 metros de tubería para realizar dichas pruebas. De igual manera, para reducir costos, y tomando en cuenta que la ubicación de dicho equipo no cuenta con libertad para seleccionar el diámetro de tubería, será necesario utilizar tubería de PVC con un diámetro de 2 pulgadas.

A continuación, se presenta una descripción general de la etapa de diseño:

- Descripción del banco de pruebas.
- Etapa de diseño mecánico.
- Cálculo de golpe de ariete.
- Selección de bomba
- Resumen de diseño.

3.1 EQUIPO DIDÁCTICO O BANCO DE PRUEBAS

A continuación se presenta (figura 17) el esquema general del banco de pruebas que se desea diseñar para el estudio del fenómeno del golpe de ariete en

tuberías y se muestra cada uno de sus componentes principales con los que contará:

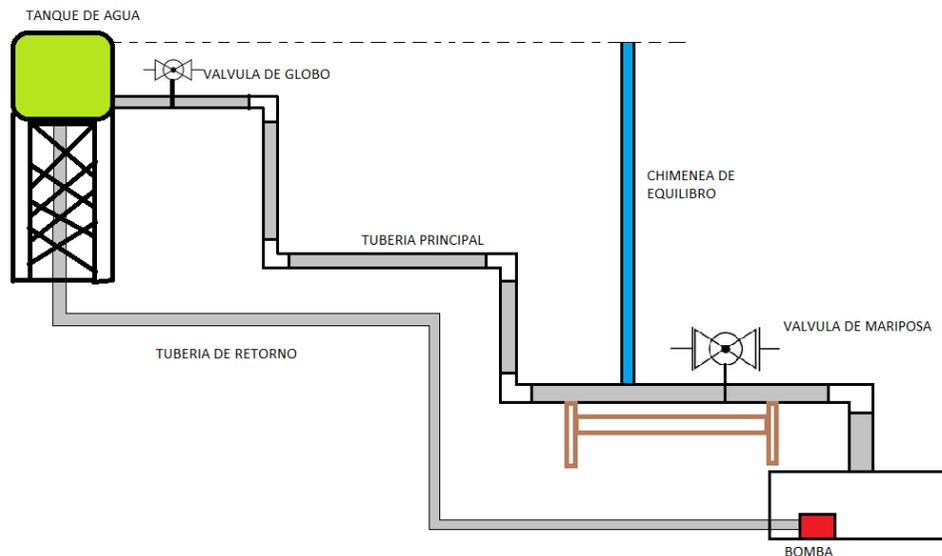


Figura 17. Esquema general de las partes que tendrá el equipo didáctico.

Como se puede observar en la figura anterior se consta de los siguientes elementos:

- **Tanque de agua:** elemento donde se almacena la cantidad de agua necesaria para hacer el estudio del fenómeno de golpe de ariete en tubería.
- **Válvula de globo:** elemento utilizado para regular el caudal que debe viajar a lo largo de la tubería de suministro de agua.
- **Tubería principal:** es la tubería utilizada para que viaje el agua y dirigirse hacia la válvula de mariposa.
- **Válvula de mariposa:** dispositivo para interrumpir o regular el flujo de un fluido en un conducto, aumentando o reduciendo la sección de paso mediante una placa, denominada mariposa, que gira sobre un eje.
- **Chimenea de equilibrio:** estructura complementaria diseñada para la absorción de las presiones y subpresiones causadas por el golpe de ariete.

Tubería de retorno: Su función es establecer un circuito cerrado para el agua, de manera que se reutilice la misma en el proyecto.

a) **TANQUE DE AGUA**

Como mínimo, al tanque le debe ser capaz de almacenar todo el fluido que el sistema requiere y mantener el nivel lo suficientemente alto para evitar el efecto de un remolino en la línea de entrada de la bomba. Si esto ocurre el aire entrará junto con el fluido.

Al equipo industrial se acostumbra proveerlo con un tanque que tenga tres litros de líquido por cada segundo de desplazamiento de la bomba.

Regla general para el tamaño:

$$\textit{Tamaño del tanque} = \textit{litros de la bomba} \times 3 \quad (3.1)$$



Figura 18. Tanque de agua plástico.

b) **VÁLVULA DE GLOBO**

Las válvulas tipo globo a diferencia de las válvulas de compuerta, permiten aplicarlas en regulación de fluidos y realizan un cierre hermético cuando cuenta con

un asiento flexible. En esta clase de válvulas el fluido no corre de manera directa y en una sola dirección como lo hacen en las válvulas de compuerta sino que el fluido entra y sube dentro del cuerpo de la válvula, es estrangulado por el émbolo según qué tan abierta o cerrada se encuentre la válvula, y después baja el fluido hacia la salida de la válvula.

En las válvulas globo, el fluido hace un movimiento de columpio dentro donde choca con el embolo que regula cuánto fluido debe de pasar por la válvula. Las válvulas globo tienen la ventaja de regular, pero tienen la desventaja de que al detener cierta parte del fluido para regularlo, generan una caída de presión dentro de la línea lo que debe de ser considerado en los cálculos técnicos para que esta clase de válvulas y otras circunstancias que hay dentro de la línea no impidan que el fluido deba de llegar hasta donde se requiere.

Las válvulas de globo son más costosas que las compuertas y mucho menos comunes. Pueden ser fabricadas en casi cualquier material como en acero al carbón, acero inoxidable, hierro, PVC, CPVC, bronce, acero forjado y con extremos, roscados, bridados, socket Weld (SW), y Butt Weld.



Figura 19. Válvula globo.

c) **TUBERÍA PRINCIPAL**

La tubería principal está comprendida por tramos de tubería de PVC y accesorios (codos estándar a 90°, válvula de mariposa, válvula de globo, unión en T) con una longitud total de 50 metros (figura 20):

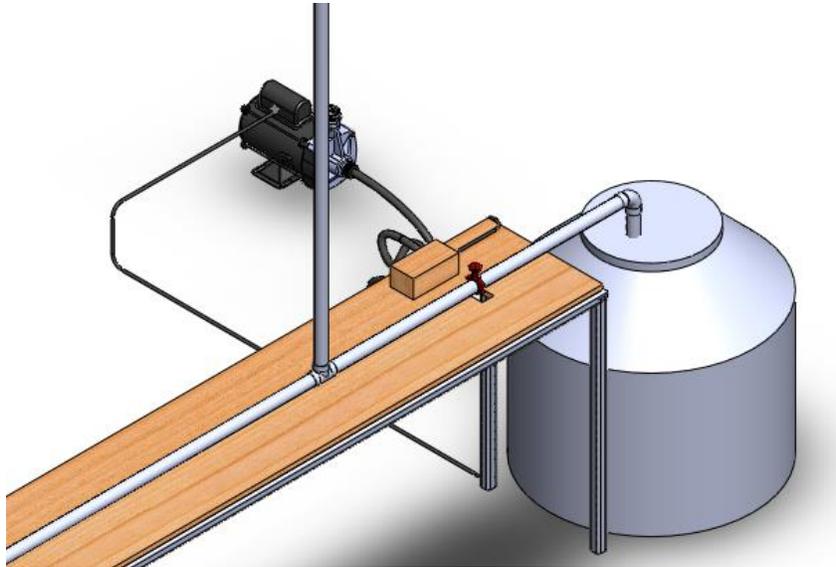


Figura 20. Detalle de accesorios y tubería.

d) **CHIMENEA DE EQUILIBRIO O TORRE PIEZOMÉTRICA**

Debido a las variaciones de carga del alternador o a condiciones imprevistas se utilizan las chimeneas de equilibrio que evitan las sobrepresiones en las tuberías forzadas y álabes de las turbinas.

La chimenea de equilibrio consiste en un pozo vertical situado lo más cerca posible de los puntos donde puede originarse el golpe de ariete. Cuando existe una sobrepresión de agua, ésta encuentra menos resistencia para penetrar al pozo que a la cámara de presión de las turbinas haciendo que suba el nivel de la chimenea de equilibrio. En el caso de depresión ocurrirá lo contrario y el nivel bajará.

Habitualmente se suele diseñar la chimenea con una restricción en la entrada que provoque una mayor pérdida de carga, bien durante la entrada y salida del agua o solamente durante la salida (orificios diferenciales), con el fin de amortiguar más rápidamente las oscilaciones.

Si no existen problemas externos, se puede permitir el desbordamiento del agua por la parte superior, con lo que se puede reducir el diámetro de la chimenea. En este caso actúa en parte como una válvula de descarga. En cualquier caso, la chimenea debe tener las dimensiones adecuadas para evitar la entrada de aire en la tubería durante las depresiones.

Las ventajas de este dispositivo son:

- Simplicidad de funcionamiento
- No requiere mantenimiento mecánico
- Únicamente se debe tener la precaución de dar a la chimenea una suficiente altura de manera tal que no rebose.
- Si se hace una correcta instalación no requiere de dispositivos secundarios adicionales.

Las desventajas son:

- La altura de la chimenea debe ser mayor que la altura que tendría el líquido debida a la presión (línea piezométrica) en el punto a ser instalado.
- Al producirse el paro de la instalación, la chimenea de equilibrio mantiene la altura piezométrica más o menos constante. Por el contrario la altura piezométrica en el punto inmediatamente aguas debajo de la bomba desciende en ocasiones con bastante rapidez. Esta diferencia de presiones origina que el flujo se invierta con mayor rapidez incluso en el caso de no existir la chimenea. Esta fuerte desaceleración e inversión del flujo lleva consigo asociados dos fenómenos.

Por un lado pueden generarse velocidades de giro inversas en la máquina bastante importantes en el caso de no disponer de válvulas de retención. Por otro lado, en el caso de instalarse una válvula de retención para evitar velocidades de giro inversas en la máquina, se generan fuertes sobrepresiones al cerrarse ésta. Estas sobrepresiones pueden ser superiores a las que se generan sin la presencia de la chimenea.

- La unión de la chimenea con la tubería, debe estar ubicada en una cota inferior a la altura piezométrica para caudal nulo, a fin de evitar que se vacíe de agua durante los períodos de tiempo en que la instalación esté parada.

e) **VÁLVULA DE MARIPOSA**

Consisten en un disco interior a la tubería que gira 90° de abierta a cerrada. El eje de giro puede ser central o excéntrico (para que la presión del fluido favorezca el cierre), y los tipos de juntas de estanqueidad son muy variados. En la ilustración 19 puede verse una válvula de mariposa. Su uso se ha extendido mucho por el poco espacio que ocupan, la facilidad de su accionamiento, su funcionamiento satisfactorio y, sobre todo, su bajo coste.

Sus principales inconvenientes son que en el diseño más simple no siempre son completamente estancas (sobre todo con altas presiones), y que la presencia del disco en la tubería puede dar lugar a problemas con fluidos que arrastren sólidos. La pérdida de carga cuando están abiertas es muy pequeña. Son efectivas como válvulas de cierre, y con un accionamiento y asientos adecuados se pueden utilizar para regulación.



Figura 21. Válvula de mariposa.

3.2 DISEÑO MECÁNICO DEL EQUIPO DIDÁCTICO

De acuerdo con la descripción introductoria de la etapa de diseño del equipo didáctico, se mencionan las siguientes variables:

- Longitud de tubería = 50 metros
- Diámetro de tubería = 2 pulgadas

En base a estas variables, y sabiendo que la velocidad crítica recomendada del agua para tubería PCV es de 2 m/s se prosigue a diseñar. Partiendo de la siguiente figura, se continúa con la aplicación de la fórmula de Bernoulli:



Figura 22. Diferencia de alturas esquema general.

- **APLICANDO LA ECUACION DE BERNOULLI**

$$\frac{P_E}{\gamma} + \frac{V_E^2}{2g} + Z_1 = \frac{P_S}{\gamma} + \frac{V_S^2}{2g} + Z_2 + H_f + H_s \quad (3.2)$$

Debido a que los recipientes de agua se encuentran abiertos, se elimina el término de carga de presión en ambos lados de la *ecuación 2.1*:

$$\cancel{\frac{P_E}{\gamma}} + \frac{V_E^2}{2g} + Z_1 = \cancel{\frac{P_S}{\gamma}} + \frac{V_S^2}{2g} + Z_2 + H_f + H_s$$

También se elimina la carga de velocidad ya que la velocidad inicial y final es cero. Entonces la *ecuación 2.1.1* queda:

$$\cancel{\frac{V_E^2}{2g}} + Z_1 = \cancel{\frac{V_S^2}{2g}} + Z_2 + H_f + H_s$$

- Por lo tanto, la expresión queda de la siguiente manera:

$$Z_1 - Z_2 = H_f + H_s \quad (3.3)$$

- Sustituyendo los valores de pérdidas primarias y pérdidas secundarias, se obtiene:

$$Z_1 - Z_2 = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} + \sum K \frac{V^2}{2g} \quad (3.4)$$

$$Z_1 - Z_2 = \frac{V^2}{2g} \left[f \frac{L}{D} + \sum K \right] \quad (3.5)$$

- Sustituyendo el valor de velocidad por términos de caudal:

$$Z_1 - Z_2 = \frac{8Q^2}{\pi^2 g D^4} \left[\frac{fL}{D} + \sum K_{\text{accesorios}} \right] \quad (3.6)$$

Partiendo del siguiente esquema, se podrá obtener los diferentes coeficientes de pérdida K de los diferentes accesorios que lo componen:

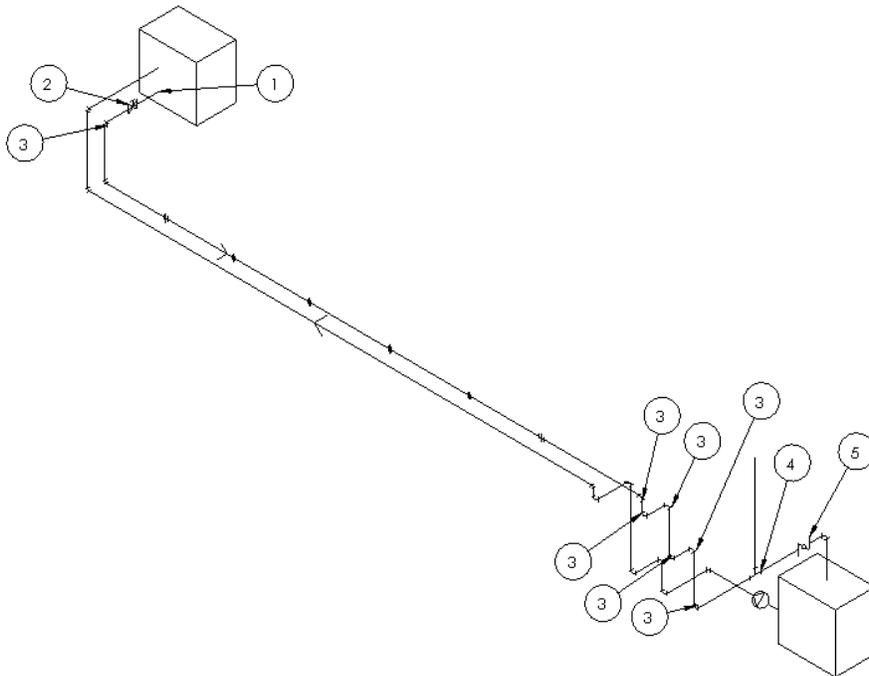


Figura 23. Esquema con los diferentes accesorios.

- K_1 : Salida de la tubería a tanque

- K_2 : Válvula de globo completamente abierta
- K_3 : Codo estándar a 90°
- K_4 : Conexión en T (flujo en línea).
- K_5 : Válvula de mariposa

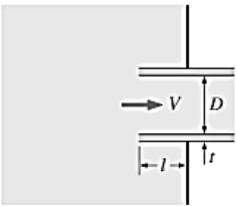
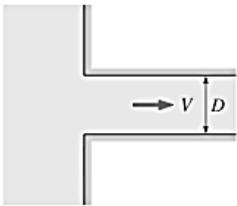
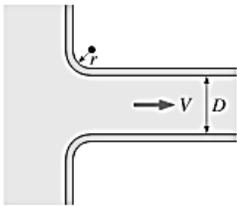
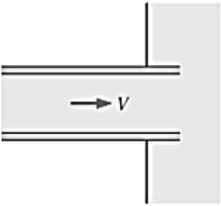
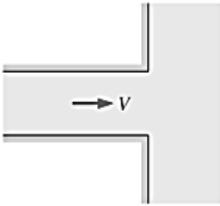
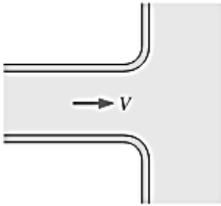
Sustituyendo en ecuación 2.3.2, se tiene:

$$Z_1 - Z_2 = \frac{8Q^2}{\pi^2 g D^4} \left[\frac{fL}{D} + (K_1 + K_2 + 10K_3 + K_4 + K_5 +) \right]$$

Para el valor de K de los accesorios se basa en la siguiente tabla para obtener sus valores:

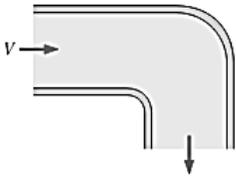
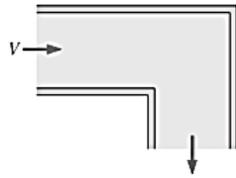
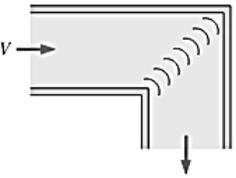
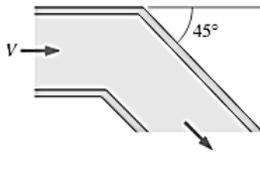
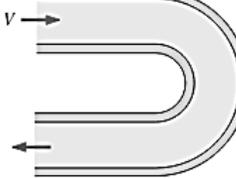
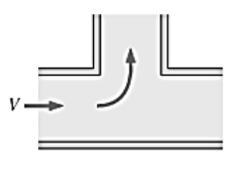
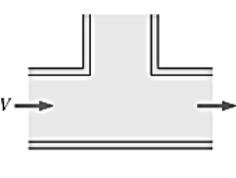
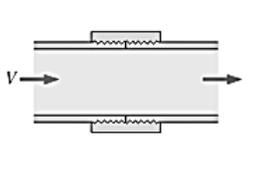
Tabla 5. Valores de los coeficientes de las entradas y salidas de tubería.

Coeficientes de pérdida K_L de varios accesorios de tubería para flujo turbulento (para usar en la relación $h_L = K_L V^2 / (2g)$, donde V es la velocidad promedio en la tubería que contiene el accesorio)*

<p>Entrada de la tubería Reentrante: $K_L = 0.80$ ($t \ll D$ e $l \approx 0.1D$)</p> 	<p>De borde agudo: $K_L = 0.50$</p> 	<p>Redondeada ($r/D > 0.2$): $K_L = 0.03$ Ligeramente redondeada ($r/D = 0.1$): $K_L = 0.12$ (véase figura 8-36)</p> 
<p>Salida de la tubería Reentrante: $K_L = \alpha$</p> 	<p>De borde agudo: $K_L = \alpha$</p> 	<p>Redondeada: $K_L = \alpha$</p> 

Nota: el factor de corrección de energía cinética es $\alpha = 2$ para flujo laminar totalmente desarrollado, y $\alpha \approx 1$ para flujo turbulento totalmente desarrollado.

Tabla 6. Valores de los coeficientes de los accesorios

<p>Codos y ramificaciones</p> <p>Codo suave de 90°: Embridado: $K_L = 0.3$ Roscado: $K_L = 0.9$</p> 	<p>Codo esquinado de 90° (sin álabes directores): $K_L = 1.1$</p> 	<p>Codo esquinado de 90° (con álabes directores): $K_L = 0.2$</p> 	<p>Codo roscado de 45°: $K_L = 0.4$</p> 
<p>Codo de retorno de 180°: Embridado: $K_L = 0.2$ Roscado: $K_L = 1.5$</p> 	<p>Conexión en T (flujo deriv.): Embridado: $K_L = 1.0$ Roscado: $K_L = 2.0$</p> 	<p>Conexión en T (flujo en línea): Embridado: $K_L = 0.2$ Roscado: $K_L = 0.9$</p> 	<p>Unión roscada: $K_L = 0.08$</p> 

Válvulas

Válvula de globo, totalmente abierta: $K_L = 10$
 Válvula de ángulo, totalmente abierta: $K_L = 5$
 Válvula de bola, totalmente abierta: $K_L = 0.05$
 Válvula de charnela: $K_L = 2$

Válvula de compuerta, totalmente abierta: $K_L = 0.2$
 cerrada: $K_L = 0.3$
 cerrada: $K_L = 2.1$
 cerrada: $K_L = 17$

- Obteniendo el valor de caudal, para velocidad crítica, se aplica la ecuación de continuidad:

$$Q = VA = (2) \left(\pi \frac{((0.0508 - 2(0.0039))^2)}{4} \right) = 0.0029 \text{ m}^3/\text{s} \quad (3.7)$$

$$Q \equiv 2.9 \frac{\text{lt}}{\text{s}}$$

- Encontrando el número de Reynolds:

$$R = \frac{4Q}{\mu D \pi} = \frac{4(0.0029)}{(1.003 \times 10^{-6})(0.0469)\pi} \quad (3.8)$$

$$R = 7.85 \times 10^4$$

- Encontrando la rugosidad relativa:

$$\frac{\epsilon}{D} = \frac{0.0015}{46.9} = 3.2 \times 10^{-5} \quad (3.9)$$

- Ahora en tabla, con los valores obtenidos del número de Reynolds y la rugosidad relativa, se encuentra el factor de Darcy:

$$f = 0.0189$$

- Sustituyendo valores y conociendo que la longitud de tubería son 50 metros se tiene:

$$Z_1 - Z_2 = \frac{8(0.0029)^2}{\pi^2(9.8)(0.0469)^4} \left[\frac{0.0189L}{0.0469} + (0.8 + 10 + 10(0.9) + 0.9 + 0.15) \right]$$

$$Z_1 - Z_2 = \frac{0.00006728}{0.000468} [0.403(50) + 20.85]$$

- Sustituyendo en la ecuación se obtiene el siguiente resultado:

$$Z_1 - Z_2 = 5.9 \text{ mtrs}$$

La diferencia de altura obtenida de 5.9 metros, es la altura mínima teórica, donde indica que desde ahí se podrá comenzar a trabajar; no puede ser menor altura, ya que no se podrá llevar a cabo el proceso que se busca para el estudio del golpe de ariete en tuberías.

3.3 CÁLCULO DE GOLPE DE ARIETE

Calculando el tiempo de parada:

$$T = C + \frac{K_2 L V_{agua}}{gH_m}$$

Para los valores de C y K_2 (coeficientes) :

$$T = C + \frac{K_2 L V_{\text{agua}}}{g H_m}$$

$$T = 0.8 + \frac{2(50 \text{ m}) \left(2 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)}{\left(9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) (6 \text{ m})}$$

$$\mathbf{T = 4.2 \text{ segundos}}$$

Cálculo de la celeridad del agua:

$$a = \frac{9900}{\sqrt{48.3 + K_1 \frac{D}{e}}}$$

Calculando el valor de K_1 :

$$K_1 = \frac{10^{10}}{\varepsilon} = \frac{10^{10}}{3 \times 10^8} = 33.33$$

Sustituyendo:

$$a = \frac{9900}{\sqrt{48.3 + 33.33 \frac{46.9}{3.9}}}$$

$$\mathbf{a = 467.15 \frac{m}{s}}$$

Se prosigue a calcular la longitud crítica

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

$$L_c = \frac{(467.15 \frac{\text{m}}{\text{s}})(4.2 \text{ s})}{2}$$

$$\mathbf{L_c = 981.02 \text{ m}}$$

Comparando la longitud crítica con la longitud total de la tubería se concluye que:

$$L < L_c: \text{Impulsión corta}$$

$$T > \frac{2L}{a} = \frac{2(50)}{467.15} = 0.214 \text{ s} : \text{Cierre lento}$$

Por tanto, se rige a utilizar la ecuación de Michaud:

$$\Delta H = \frac{2LV}{gT}$$

$$\Delta H = \frac{2(50 \text{ m}) \left(2 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)}{9.81 \text{ m/s}^2 (4.2 \text{ s})}$$

$$\Delta H = 4.85 \text{ mca} \equiv 6.9 \text{ psi}$$

La sobrepresión generada por el golpe de ariete en la tubería, debido al cierre de la válvula es de 6.9 psi.

3.4 CÁLCULO TANQUE DE AGUA

Regla general para el tamaño:

$$\text{Tamaño del tanque} = \text{caudal (litros/s)} \times (180) \text{ (s)}$$

Por lo tanto:

$$\text{Tamaño del tanque: } 2.9 \frac{\text{ltrs}}{\text{s}} \times 180 \text{ s}$$

$$\text{Tamaño del tanque: } 522 \text{ litros}$$

El tanque de agua plástico apropiado más próximo al valor real es el que tiene la capacidad para 750 litros.

3.5 SELECCIÓN DE BOMBA

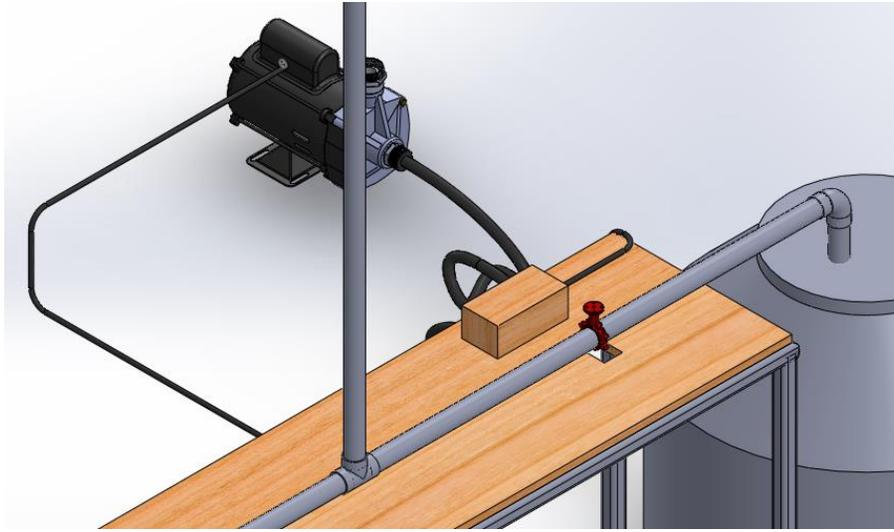


Figura 24. Ilustración de bomba con el equipo didáctico.

Las bombas son dispositivos mecánicos empleados para el transporte de líquidos por las redes de tuberías. En circuitos de recirculación, la energía de bombeo se emplea únicamente para vencer pérdidas hidráulicas. El correcto diseño de los circuitos, así como la selección de la bomba más adecuada, afecta de forma muy importante al consumo energético. Para la selección de bomba, se cuenta con las siguientes variables:

- $L = 50 \text{ m}$
- $V_{\text{agua}} = 2 \frac{\text{m}}{\text{s}}$
- $D = 2 \text{ inch}$: diámetro de la tubería
- $Q = 2.9 \text{ lt/s}$

En el flujo real se producen pérdidas en la instalación, tanto por fricción del fluido como por los tubos y por pérdidas en accesorios. En ese caso, se sigue la formulación de flujo ideal, añadiendo un término de pérdidas.

Haciendo un Bernoulli desde la bomba hasta el tanque de agua (tubería de retorno) se tiene:

$$\frac{P_B}{\gamma} + \frac{V_B^2}{2g} + Z_1 + H_B = \frac{P_T}{\gamma} + \frac{V_T^2}{2g} + Z_2 + H_f + H_s \quad (3.10)$$

Como el tanque de agua y el tanque receptor se encuentran abiertos a la atmósfera, se elimina la carga de presión y la carga de velocidad se elimina debido a que el agua se encuentra en reposo; entonces se reduce de la siguiente manera:

$$\cancel{\frac{P_B}{\gamma}} + \cancel{\frac{V_B^2}{2g}} + Z_1 + H_B = \cancel{\frac{P_T}{\gamma}} + \cancel{\frac{V_T^2}{2g}} + Z_2 + H_f + H_s$$

Por lo tanto, la expresión queda de la siguiente manera:

$$Z_1 + H_B = Z_2 + H_f + H_s$$

Ahora, se continúa con el procedimiento para encontrar la altura de la bomba de la siguiente manera:

$$H_B = (Z_2 - Z_1) + H_f + H_s \quad (3.11)$$

Al conocer la diferencia de altura entre tanques, se prosigue a evaluar las pérdidas ocasionadas por el fluido y por los diferentes accesorios que componen a la tubería de retorno:

$$H_B = (6) + f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} + \sum K \frac{V^2}{2g} \quad (3.12)$$

Encontrando el número de Reynolds:

$$R = \frac{4Q}{\mu D \pi} = \frac{4(0.0029)}{(1.003 \times 10^{-6})(0.0469)\pi}$$

$$R = 7.84 \times 10^4$$

Encontrando la rugosidad relativa:

$$\frac{\epsilon}{D} = \frac{0.0015}{46.9} = 3.19 \times 10^{-5}$$

Ahora en tabla, se encuentra el factor de Darcy:

$$f = 0.0189$$

Sustituyendo valores se tiene:

$$H_B = (11.45) + \frac{V^2}{2g} \left[\frac{fL}{D} + \sum K_{\text{accesorios}} \right]$$
$$H_B = (6) + \frac{(2)^2}{2(9.8)} \left[\frac{0.0189(50)}{0.0469} + (9(0.9) + 1 + 1) \right]$$

Por tanto:

$$H_B = (6) + 0.2041[12.15 + 10.1]$$

$$H_B = (6) + 4.54$$

$$\mathbf{H_B = 10.54 m}$$

Para encontrar la potencia que necesita la bomba para entregársela al fluido para elevar el flujo Q a la altura $Z_2 - Z_1$ requerida, venciendo las resistencias o pérdidas que se dan durante la conducción, se multiplica por Q, obteniendo:

$$N = \gamma Q H_B \quad (3.12)$$

$$N = (9.8)(0.0029)(10.54)$$

$$\mathbf{N = 0.3 KW = 0.40 HP}$$

Obtenido los valores de potencia, caudal y altura manométrica, se prosigue a buscar en catálogos de fabricantes de bombas, que cumplan con los principales requisitos para poder funcionar y no tener ningún percance durante el proceso de conducir el agua por medio de la tubería de retorno.

La bomba LEPONO modelo 2XCM25/160^a de 3HP, cumple con los requisitos adecuados para lo que se necesita en la instalación.

DESCRIPCIÓN:

- Bomba centrífuga para cisterna con potente motor
- Fácil uso e instalación
- Ideal para la succión de agua de tuberías, tanques y pozos
- Entradas de 1.1/2 pulgada y salidas de 1 pulgada de diámetro
- Líquido bombeado de hasta 60° grados celsius
- Para agua limpia con pequeñas impurezas y líquidos no corrosivos
- Temperatura ambiente de hasta 40° grados celsius
- Con protección de sobrecarga térmica
- Carcasa de hierro fundido
- Diseño compacto y peso ligero, no ocupa mucho espacio ni mucho ruido.

Tabla 7. Especificaciones técnicas de la bomba.

POTENCIA	2.2 KILOWATTS (3 CABALLOS DE FUERZA)
ALIMENTACIÓN	220 Y 380 VOLTIOS
AMPERAJE	18.5 AMPERIOS
CAUDAL	200 LITROS POR MINUTO
PRESIÓN	89 PSI



Figura 25. Bomba Lepono de 3 HP..

3.6 RESUMEN DE DISEÑO

En la siguiente tabla, se presenta un resumen de los datos obtenidos en la etapa de diseño:

Tabla 8. Resumen etapa de diseño de banco didáctico.

VARIABLE	RESULTADO
$(Z_1 - Z_2)_{MIN}$	5.9 metros
$(Z_1 - Z_2)_{DISEÑO}$	6 metros
Q_{agua}	2.9 ltr/s
$D_{tuberia}$	2 pulgadas
V_{agua}	2 m/s
$L_{tuberia}$	50 metros
ΔH Golpe de ariete	6.9 psi
H_B	10.54 metros
P_B	1 HP

4. INSTRUMENTACIÓN Y EQUIPO DE CONTROL

Los sistemas de control son aquellos dedicados a obtener la salida deseada de un sistema o proceso. En un sistema general se tienen una serie de entradas que provienen del sistema a controlar, llamado planta, y se diseña un sistema para que, a partir de estas entradas, modifique ciertos parámetros en el sistema planta, con lo que las señales anteriores volverán a su estado normal ante cualquier variación.

Hay varias clasificaciones dentro de los sistemas de control. Atendiendo a su naturaleza son analógicos, digitales o mixtos; atendiendo a su estructura (número de entradas y salidas) puede ser control clásico o control moderno; atendiendo a su diseño pueden ser por lógica difusa, redes neuronales.

La clasificación principal de un sistema de control es de dos grandes grupos, los cuáles son:

✓ **SISTEMA DE LAZO ABIERTO**: Sistema de control en el que la salida no tiene efecto sobre la acción de control.

- Se caracteriza porque la información o la variable que controla el proceso circulan en una sola dirección desde el sistema de control al proceso.
- El sistema de control no recibe la confirmación de que las acciones se han realizado correctamente.

✓ **SISTEMA DE LAZO CERRADO**: Sistema de control en el que la salida ejerce un efecto directo sobre la acción de control.

- Se caracteriza porque existe una relación de realimentación desde el proceso hacia el sistema de control a través de los sensores.
- El sistema de control recibe la confirmación si las acciones ordenadas han sido realizadas correctamente.

La instrumentación trata los sistemas integrados cuya finalidad es medir magnitudes físicas de un sistema externo, elaborar la información asociada a ellas y presentarla a un operador. Las características por las que la tecnología electrónica es la más utilizada por los sistemas de instrumentación, son:

- Las señales eléctricas permiten manejar señales en un rango dinámico de tiempos muy amplio (10^{15}), desde los picosegundos (10^{-12}) hasta horas (10^3).
- Las señales eléctricas pueden ser transmitidas muy fácilmente a través de cables metálicos, sistemas radiados, o fibra óptica.
- Las señales eléctricas pueden ser amplificadas por circuitos electrónicos de forma muy eficientes, y pueden manejarse rangos de señal muy amplios (10^{12}), desde los nanovoltios (10^{-9} V) hasta los kilovoltios (10^3 V).
- El sistema electrónico permite complejas transformaciones funcionales de las señales eléctricas.
- Las señales eléctricas son las más apropiada para ser introducidas en los computadores, los cuales representan el medio más potente de registro, transformación y presentación de la información.
- La tecnología electrónica actual es la que presenta mejor relación prestaciones /costo.

En la siguiente figura se muestra el esquema básico de cualquier sistema de instrumentación.

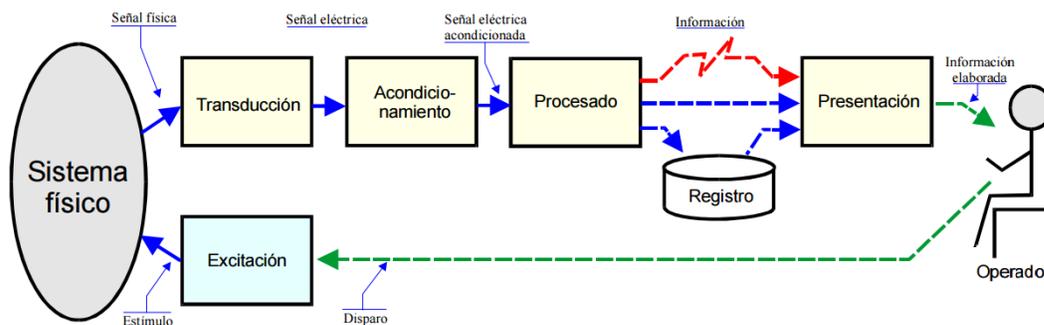


Figura 26. Esquema básico de cualquier sistema de instrumentación.

a) **TRANSDUCTOR.** El transductor es el componente que convierte la magnitud física a medir, en una señal eléctrica. En este componente se puede diferenciar entre el sensor, que es el elemento sensible primario que responde a las variaciones de la magnitud que se mide, y el transductor que es el que lleva acabo la conversión energética entre la magnitud de entrada y de salida.



Figura 27. Transductor de presión.

Los transductores se suelen clasificar en dos grupos:

- **LOS TRANSDUCTORES ACTIVOS** son dispositivos que generan energía eléctrica por conversión de energía procedente del sistema sobre el que mide. Los transductores activos no necesitan fuente de alimentación para poder operar.
- **LOS TRANSDUCTORES PASIVOS** son aquellos en los que no se produce conversión de energía. Algún parámetro del transductor es función de la magnitud que se mide, y las variaciones de este parámetro es utilizado para modular la energía eléctrica procedente de una fuente que en este caso se necesita.

b) ACONDICIONAMIENTO DE LA SEÑAL.

Este bloque incluye todas aquellas transformaciones que deben realizarse sobre señales eléctricas que resultan en la salida del transductor, y que son previas al procesado para extraer la información que se mide o evalúa.

Existen dos razones por las que las señales de salida del transductor deban ser acondicionadas:

1. Cuando el tipo de señal eléctrica que se proporciona el transductor no es una tensión, se utiliza un convertidor desde el tipo de señal de que se trate, a tensión.

Así en transductores resistivos, es normal que se utilice un circuito puente para convertir el valor de resistencia a tensión. Cuando el transductor es de tipo capacitivo o inductivo, se suele montar como parte de un oscilador, y la magnitud de salida es una frecuencia, y debe utilizar un convertidor frecuencia/tensión.

2. La señal debe ser acondicionada para incrementar la relación señal ruido hasta niveles adecuados. Esto tipo de acondicionamiento implica:
 - Amplificar las señales hasta niveles que sean suficientemente superiores al nivel de ruido eléctrico aleatorio.
 - Filtrar las señales para eliminar ruidos introducidos por interferencia eléctrica.
 - Cuando el procesamiento de la señal es digital, el acondicionamiento corresponde a la conversión Analógica/Digital.

c) PROCESAMIENTO DE LA SEÑAL.

Incluye el conjunto de transformaciones a que debe ser sometida la señal eléctrica a fin de extraer de ella, la información que se busca.

El procesamiento de la señal suele contener muy diversas operaciones, ya sean lineales, no lineales, de composición de múltiples señales, o de procesamiento digital de las señales.

d) REGISTRO DE LA SEÑAL

Consiste en el almacenamiento permanente o temporal de las señales para su posterior análisis o supervisión. Esta operación es necesaria si el flujo de información que se adquieren supera la capacidad de procesamiento de que se dispone.

El método tradicional de registro ha sido el basado en cinta magnética, ya sea a través de grabación analógica o utilizando codificación digital. Actualmente los métodos de registro que se utilizan, están basados en un computador, y el soporte en que se almacena la información es cualquiera de los sistemas de memoria masiva de que disponen estos equipos (memoria, discos, diskettes, cinta magnética, etc.).

e) PRESENTACIÓN DE LA INFORMACIÓN

La información resultante del proceso de medida debe ser presentada de forma comprensible al operador, o elaborada e integrada para que pueda ser interpretada por un sistema supervisor automático.

Los sistemas de presentación de información eléctrica analógica tradicionales, han sido: los indicadores de aguja, los registradores gráficos de papel y los tubos de rayos catódicos.

Actualmente, los terminales alfanuméricos y gráficos basados en computadores suelen ser el método más utilizado para presentar todo tipo de información.

4.1 INSTRUMENTACIÓN DEL EQUIPO DIDÁCTICO

La era de las computadoras todavía toma auge en la actualidad, trayendo consigo mismo, un masivo desarrollo y aplicación de nuevos conocimientos y la tecnología. Anteriormente las metodologías de diseño, criterios y estándares, están siendo desafiados y, en algunos casos, obsoletas y revisadas.

El análisis asistido por ordenador y el diseño, es uno de los principales mecanismos para la realización de estos cambios. El análisis por ordenador, modelado por ordenador y simulación por ordenador, son términos intercambiables tanto que, todas las técnicas que describen están destinados a mejorar nuestra comprensión de los fenómenos físicos y nuestra capacidad para predecir y controlar éstos.

Mediante los métodos de la combinación de las leyes físicas, abstracción matemática, procedimientos numéricos, construcciones lógicas, y los datos electrónicos de procesamiento, permiten ahora la solución de los problemas de enorme complejidad y alcance.

La instrumentación que se utilizará para realizar el estudio del fenómeno de golpe de ariete en tuberías, será:

- Transductor de presión
- Placa ARDUINO UNO.

A continuación, se hará la descripción de cada uno de los elementos.

4.1.1 TRANSDUCTOR DE PRESIÓN

Un transductor de presión convierte la presión en una señal eléctrica analógica. Aunque hay varios tipos de transductores de presión, uno de los más comunes es el transductor extensométrico. La conversión de la presión en una señal eléctrica se consigue mediante la deformación física de los extensómetros que

están unidos en el diafragma del transductor de presión y cableados en una configuración de puente de Wheatstone.

La presión aplicada al sensor produce una deflexión del diafragma, que introduce la deformación a los medidores. La deformación producirá un cambio de resistencia eléctrica proporcional a la presión.

El transductor de presión por lo general tiene disponibles tres tipos de salida eléctrica:

- Milivoltios
- Voltios
- 4-20mA.

A continuación se muestra un resumen de las salidas y cuando es mejor utilizarlas.

4.1.1.1 TRANSDUCTORES DE PRESIÓN CON SALIDA MILIVOLTIOS

Los transductores con salida en milivoltios son normalmente los sensores de presión más económicos. Su falta de electrónica en el acondicionamiento de la señal integrada significa que tienden a trabajar a temperaturas más altas que los modelos amplificados. La salida del transductor milivoltios es nominalmente alrededor de 30mV a escala completa. La salida real es directamente proporcional a la entrada del transductor de presión o tensión de excitación. Si la excitación fluctúa, la salida va a cambiar también.

Debido a esta dependencia en el nivel de excitación, se sugieren las fuentes de alimentación reguladas para utilización con los transductores de milivoltios. Debido a que la señal de salida es tan baja, el transductor no debe estar ubicado en un entorno con mucho ruido eléctrico. Las distancias entre el transductor, la pantalla y/o la instrumentación también deben ser relativamente cortas.

4.1.1.2 TRANSDUCTORES DE PRESIÓN CON SALIDA DE VOLTAJE

Los transductores de salida de tensión incluyen un acondicionamiento de señal integral que proporciona una salida mucho más alta que un transductor de milivoltios. La salida normalmente es de 0-5V o 0-10Vcc. Aunque depende del modelo, la salida del transductor normalmente no es una función directa de la excitación.

Esto significa que los suministros de energía no regulados son a menudo suficientes siempre que caiga dentro de un rango de tensión especificado. Debido a que tienen una salida de nivel superior, estos transductores no son tan susceptibles al ruido eléctrico como los sensores milivoltios y por lo tanto pueden ser utilizados en muchos más ambientes industriales.

4.1.1.3 TRANSDUCTORES DE PRESIÓN CON SALIDA DE CORRIENTE

Estos tipos de transmisores son conocidos también como transmisores de presión. Dado que una señal de 4-20mA está menos afectada por el ruido eléctrico y la resistencia en los cables de señal, estos transductores se utilizan mejor cuando la señal debe ser transmitida a largas distancias. No es raro utilizar estos sensores en aplicaciones donde el cable debe ser de 500 metros o más.

La selección del transductor de presión para el equipo didáctico se toma como parámetro la capacidad de presión del golpe de ariete ocasionado por el cierre instantáneo de la válvula y así generar una subpresión, agregado a esta la presión estática del sistema de tuberías.

Se selecciona un transductor de presión de una capacidad de 30 psi, de la marca BENXU de la serie PT-201, con las siguientes características de funcionamiento:

- Bajo coste para funcionamiento de 0-30 psi.
- De alta precisión y calidad perfecta
- Salida 4-20 mA, 0-5 V, 0-10 V.

- Rango de temperatura: -40 a 110 °C
- Precisión: 0.5% de la lectura (escala completa) .
- De alta seguridad compensada.
- Cableado: Rojo: + 5V; Negro: masa; Verde: salida de la señal.



Figura 28. Transductor de presión ideal para el banco didáctico.

4.1.2 ARDUINO

Arduino es una plataforma de creación de prototipos de código abierto basado en hardware y software fácil de usar. Las placas Arduino son capaces de leer las entradas (la luz en un sensor, un dedo sobre un botón o un mensaje de Twitter) y lo convierten en una salida (la activación de un motor, encender un LED, publicar algo en línea).

Se puede decir microcontrolador qué hacer mediante el envío de un conjunto de instrucciones al tablero. Para ello se utiliza el lenguaje de programación de Arduino (basado en el cableado), y el software de Arduino (IDE), sobre la base de procesamiento .

A través de los años Arduino ha sido el cerebro de miles de proyectos, a partir de objetos cotidianos a los instrumentos científicos complejos. Una comunidad mundial de los fabricantes (estudiantes, aficionados, artistas, programadores y profesionales) ha reunido en torno a esta plataforma de código abierto sus contribuciones; han añadido hasta una increíble cantidad de conocimiento accesible que puede ser de gran ayuda para los principiantes como para expertos.

Arduino nació en el Instituto de Diseño de Interacción Ivrea como una herramienta fácil para el prototipado rápido, dirigido a estudiantes sin experiencia en electrónica y programación.

Tan pronto como llegó a una comunidad más amplia, la placa Arduino comenzó a cambiar para adaptarse a las nuevas necesidades y retos, la diferenciación de su oferta desde simples tablas de 8 bits a los productos de la IO aplicaciones, la impresión 3D portátil y sistemas empotrados.

Todas las placas Arduino son completamente de código abierto, permitiendo a los usuarios crear de forma independiente y, finalmente, adaptarlos a sus necesidades particulares. El software también es de código abierto, y está creciendo a través de las contribuciones de los usuarios en todo el mundo.

Gracias a su sencilla y accesible experiencia de usuario, Arduino se ha utilizado en miles de diferentes proyectos y aplicaciones. El software de Arduino es fácil de usar para los principiantes, pero lo suficientemente flexible para los usuarios avanzados. Se ejecuta en Mac, Windows y Linux.

Los maestros y los estudiantes lo utilizan para construir instrumentos científicos de bajo coste, para demostrar los principios de química y física, o para empezar con la programación y la robótica. Los diseñadores y arquitectos construir prototipos interactivos, músicos y artistas lo utilizan para instalaciones y experimentar con nuevos instrumentos musicales.

4.1.2.1 VENTAJAS DE ARDUINO

- **Asequible:** las placas Arduino son relativamente baratos en comparación con otras plataformas de microcontroladores. La versión más barata del módulo Arduino puede ser ensamblado a mano, e incluso los módulos premontados Arduino cuestan menos de \$ 50.
- **Multiplataforma:** El software de Arduino (IDE) se ejecuta en Windows, Macintosh OS X, y Linux. La mayoría de los sistemas de microcontrolador se limitan a Windows.
- **Entorno de programación sencillo:** El software de Arduino (IDE) es fácil de usar para los principiantes, pero lo suficientemente flexible para los usuarios avanzados que aprovechan también. Para los profesores, se basa convenientemente en el entorno de programación Processing, para que los estudiantes aprendan a programar en ese entorno y estarán familiarizados de cómo funciona el IDE de Arduino.
- **El código abierto y el software extensible:** El software de Arduino se publica como herramientas de código abierto, disponible para la extensión por los programadores experimentados. El idioma se puede ampliar a través de bibliotecas de C ++, y la gente que quiere entender los detalles técnicos pueden dar el salto de Arduino para el lenguaje de programación C AVR en la que se basa. Del mismo modo, puede agregar código AVR-C directamente en sus programas de Arduino, si así lo desea.
- **El código abierto y hardware ampliable:** Los planos de las placas Arduino se publican bajo una licencia de Creative Commons, por lo que los diseñadores de circuitos experimentados pueden hacer su propia versión del módulo, ampliándolo y mejorándolo. Incluso los usuarios con poca experiencia pueden construir la versión de tablero del módulo con el fin de entender cómo funciona y ahorrar dinero.

El Arduino puede ser alimentado a través de la conexión USB o con una fuente de alimentación externa. La fuente de alimentación se selecciona automáticamente.



Figura 29. Placa Arduino.

4.1.2.2 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

Tabla 9. Especificaciones técnicas de Placa Arduino UNO

MICROCONTROLADOR	ATmega328
Voltaje de operación	5V
Voltaje de entrada (recomendado)	7-12V
Voltaje de entrada (límite)	6-20V
Digital I/O Pins	14 (de los cuales 6 son salida PWM)
Entradas Analógicas	6
Corriente DC por I/O Pin	40 Ma
Corriente DC por 3.3V pin	50 mA
Memoria Flash	32 KB (ATmega328)
SRAM (Static Random Access Memory ó Memoria de Acceso Rápido de Accesorio Aleatorio)	2 KB (ATmega328)
EEPROM (Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory ó ROM programable y borrrable eléctricamente)	1 KB (ATmega328)
Velocidad de reloj	16 Hz

4.1.2.3 ELEMENTOS DE LA PLACA DE ARDUINO

PINES DE ALIMENTACIÓN



Figura 30. Pines de alimentación Placa Arduino.

El Arduino se alimenta mediante la conexión USB o mediante una fuente externa (recomendada de 7-12V); se tendrán unas salidas de tensión continua debido a unos reguladores de tensión y condensadores de estabilización. Estos pines son:

- VIN: se trata de la fuente tensión de entrada que contendrá la tensión a la que se está alimentando al Arduino mediante la fuente externa.
- 5V: fuente de tensión regulada de 5V, esta tensión puede venir ya sea de pin VIN a través de un regulador interno, o se suministra a través de USB o de otra fuente de 5V regulada.
- 3.3V: fuente de 3.3 voltios generados por el regulador interno con un consumo máximo de corriente de 50mA.
- GND: pines de tierra.

PINES DIGITALES ENTRADAS/SALIDAS



Figura 31. Pines digitales entradas/salidas placa Arduino.

Cada uno de los 14 pines digitales se puede utilizar como una entrada o salida. Cada pin puede proporcionar o recibir un máximo de 40 mA y tiene una resistencia de pull-up (desconectado por defecto) de 20 a 50 kOhm.

Además, algunos pines tienen funciones especializadas como:

- Pin 0 (RX) y 1 (TX). Se utiliza para recibir (RX) y la transmisión (TX) de datos serie TTL (Lógica Transistor a Transistor).
- Pin 2 y 3. Interrupciones externas. Se trata de pines encargados de interrumpir el programa secuencial establecido por el usuario.
- Pin 3, 5, 6, 9, 10 y 11. PWM (modulación por ancho de pulso). Constituyen 8 bits de salida PWM con la función `analogWrite()`.
- Pin 10 (SS), 11 (MOSI), 12 (MISO), 13 (SCK). Estos pines son de apoyo a la comunicación SPI.
- Pin 13. LED. Hay un LED conectado al pin digital 13. Cuando el pin es de alto valor, el LED está encendido, cuando el valor está bajo, es apagado.

ENTRADAS ANALÓGICAS

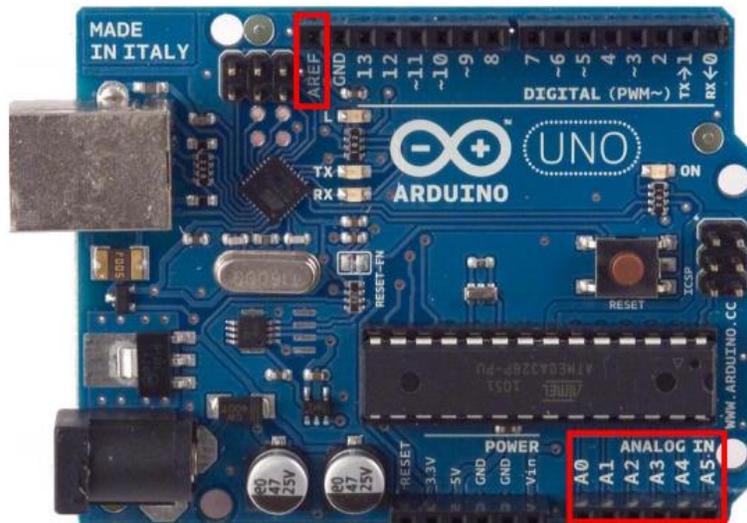


Figura 32. Entradas Analógicas Placa Arduino.

El Arduino posee 6 entradas analógicas, etiquetadas desde la A0 a A5, cada una de las cuales ofrecen 10 bits de resolución (es decir, 1024 estados). Por defecto, se tiene una tensión de 5V, pero se puede cambiar este rango utilizando el pin de AREF y utilizando la función `analogReference()`, donde se le introduce una señal externa de continua que la utilizará como referencia.

4.1.2.4 ESTRUCTURA DE UN PROGRAMA EN ARDUINO

La estructura básica del lenguaje de programación de Arduino es bastante simple y se compone de al menos dos partes. Estas dos partes necesarias, o funciones, encierran bloques que contienen declaraciones, estamentos o instrucciones.

```
void setup()
```

```
{
```

```
estamentos;  
  
    }  
  
void loop()  
  
    {  
  
estamentos;  
  
    }
```

En donde `setup()` es la parte encargada de recoger la configuración y `loop()` es la que contienen el programa que se ejecutará cíclicamente (de ahí el termino loop –bucle-). Ambas funciones son necesarias para que el programa trabaje.

Setup ()

La función `setup()` se invoca una sola vez cuando el programa empieza. Se utiliza para inicializar los modos de trabajo de los pins, o el puerto serie. Debe ser incluido en un programa aunque no haya declaración que ejecutar.

Loop()

Después de llamar a `setup()`, la función `loop()` hace precisamente lo que sugiere su nombre, se ejecuta de forma cíclica, lo que posibilita que el programa este respondiendo continuamente ante los eventos que se produzcan en la tarjeta

4.2 FUNCIONES BÁSICAS DEL ARDUINO

Una función es un bloque de código que tiene un nombre y un conjunto de estamentos que son ejecutados cuando se llama a la función. Son funciones `setup()` y `loop()` de las que ya se ha hablado. Las funciones de usuario pueden ser escritas para realizar tareas repetitivas y para reducir el tamaño de un programa. Las funciones se declaran asociadas a un tipo de valor “type”.

Este valor será el que devolverá la función, por ejemplo 'int' se utilizará cuando la función devuelva un dato numérico de tipo entero. Si la función no

devuelve ningún valor entonces se colocará delante la palabra “void”, que significa “función vacía”. Después de declarar el tipo de dato que devuelve la función se debe escribir el nombre de la función y entre paréntesis se escribirán, si es necesario, los parámetros que se deben pasar a la función para que se ejecute.

E/S Digitales

- **pinMode(pin,modo):** Configura el pin especificado para comportarse como una entrada (INPUT) o una salida (OUTPUT).
- **digitalWrite(pin,valor):** Asigna el valor HIGH (5V) o LOW (0V) a un pin digital.
- **digitalRead(pin):** Lee el valor de un pin digital especificado, HIGH o LOW.

E/S Analógicas

- **analogRead(pin):** Lee el valor de tensión en el pin analógico especificado. La placa Arduino posee 6 canales conectados a un conversor analógico digital de 10 bits. Esto significa que convertirá tensiones entre 0 y 5 voltios a un número entero entre 0 y 1023. Esto proporciona una resolución en la lectura de: 5 voltios / 1024 unidades, es decir, 0.0049 voltios (4.9mV) por unidad. El rango de entrada puede ser cambiado usando la función `analogReference()`.
- **analogWrite(pin,valor):** Escribe un valor analógico (PWM) en un pin. Puede ser usado para controlar la luminosidad de un LED o la velocidad de un motor. Después de llamar a la función `analogWrite()`, el pin generará una onda cuadrada estable con el ciclo de trabajo especificado hasta que se vuelva a llamar a la función `analogWrite()`.

COMUNICACIÓN SERIE

- **Serial.begin(speed):** Establece la velocidad de datos en bits por segundo (baudios) para la transmisión de datos en serie.
- **Serial.read():** Lee los datos entrantes del puerto serie.
- **Serial.print(val,[format]):** Imprime los datos al puerto serie como texto ASCII.
- **Serial.println(val,[format]):** Imprime los datos al puerto serie como texto ASCII seguido de un retorno de carro (ASCII 13, o '\r') y un carácter de avance de línea (ASCII 10, o '\n').
- **Serial.available():** Devuelve el número de bytes (caracteres) disponibles para ser leídos por el puerto serie. Se refiere a datos ya recibidos y disponibles en el buffer de recepción del puerto (que tiene una capacidad de 128 bytes).

4.3 DECLARACIÓN DE VARIABLES

Todas las variables tienen que declararse antes de que puedan ser utilizadas. Para declarar una variable se comienza por definir su tipo como int (entero), long (largo), float (coma flotante), etc, asignándoles siempre un nombre, y, opcionalmente, un valor inicial. Esto sólo debe hacerse una vez en un programa, pero el valor se puede cambiar en cualquier momento usando aritmética y reasignaciones diversas.

4.4 CÓDIGO DE ARDUINO PARA EL EQUIPO DIDÁCTICO

Con el código de Arduino, se pretende controlar la apertura y cierre de la válvula de mariposa, encendido y apagado de la bomba centrífuga y la toma de datos por medio del transductor de presión.

4.4.1 FUNCIONAMIENTO

El circuito está elaborado bajo la plataforma de desarrollo de prototipos Arduino, basado en un microcontrolador ATmega328p. Con el motivo de controlar la válvula, la bomba y el transductor de presión, se ha diseñado un circuito de apoyo electromecánico para el manejo de los componentes anteriores; mediante relevadores se controlarán las altas potencias de la válvula y la bomba.

Arduino es una tecnología que permite controlar de manera fácil componentes externos como el circuito de apoyo; el microcontrolador del Arduino se ha cargado con un programa capaz de verificar la existencia de una tarjeta SD y mostrarlo mediante el encendido de un led verde, si la tarjeta no está el led rojo se encenderá; si la tarjeta esta insertada el programa seguirá su curso: energizará la válvula para abrirla y tomará los datos del transductor de presión, luego desenergizará la válvula y terminará la toma de datos almacenándolos en la tarjeta SD.

La alimentación del circuito tiene que ser de al menos 12 voltios y debe de ser la misma fuente que alimenta el Arduino. Mediante el pin 2 y 3 del Arduino se controla la bomba y la válvula respectivamente, el pin 5 y 6 controlan si el rojo y verde respectivamente, el pin 4 se encarga de controlar la escritura de la tarjeta SD.

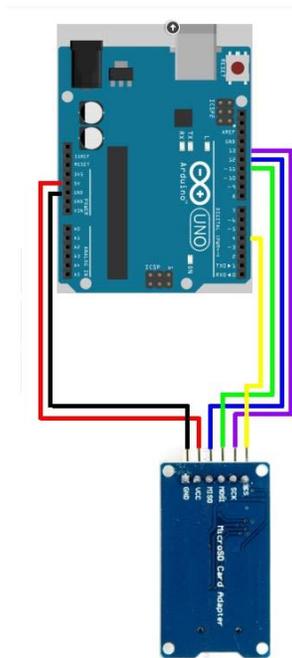


Figura 33. Conexión de cables para tarjeta SD en placa Arduino.

4.4.2 COMPONENTES DEL CIRCUITO DE APOYO

Tabla 10. Componentes del circuito de apoyo.

COMPONENTE	CANTIDAD
Resistencia 1k	2
Relevadores de corriente alterna	2
Led verde	1
Led rojo	1
Transistores npn 2n2222 o 2n2222A	2
Arduino UNO	1
Terminales de bloque	6
Diodos rectificadores de corriente 1n4001	2
Módulo de tarjeta SD para Arduino	1

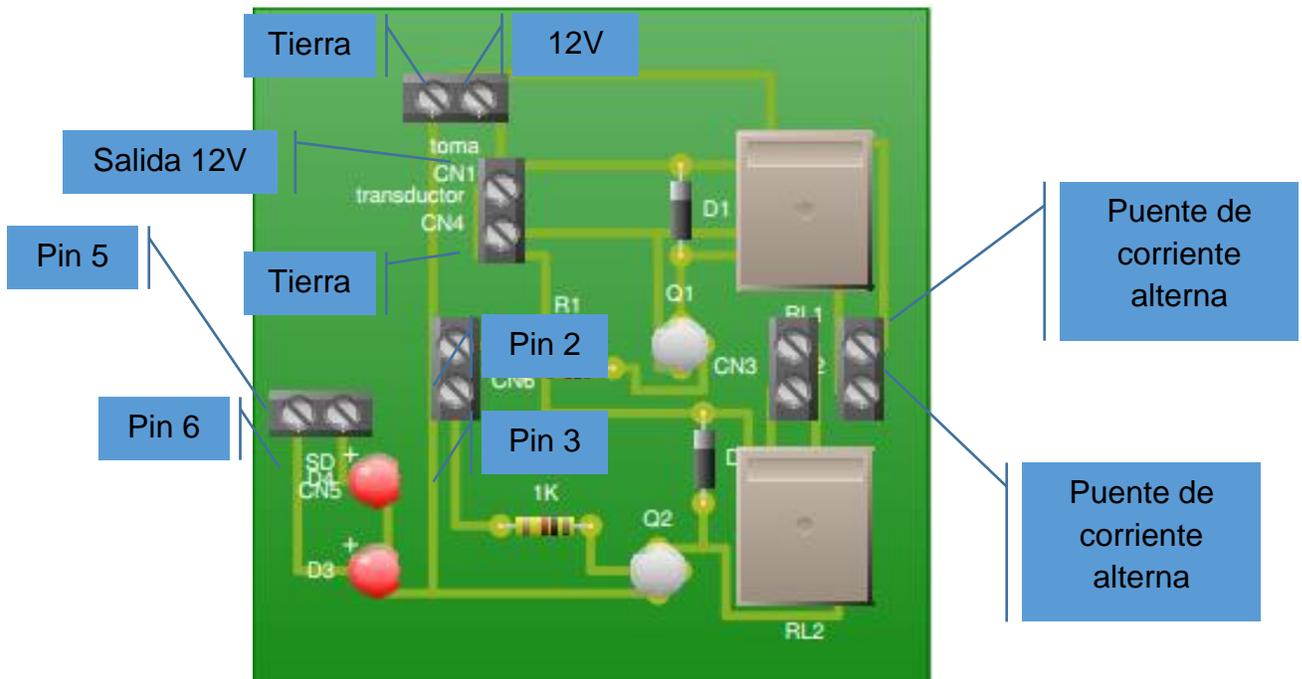


Figura 34. Esquema de conexión en placa Arduino.

4.1.1 DIAGRAMA DE BLOQUES DE SECUENCIA

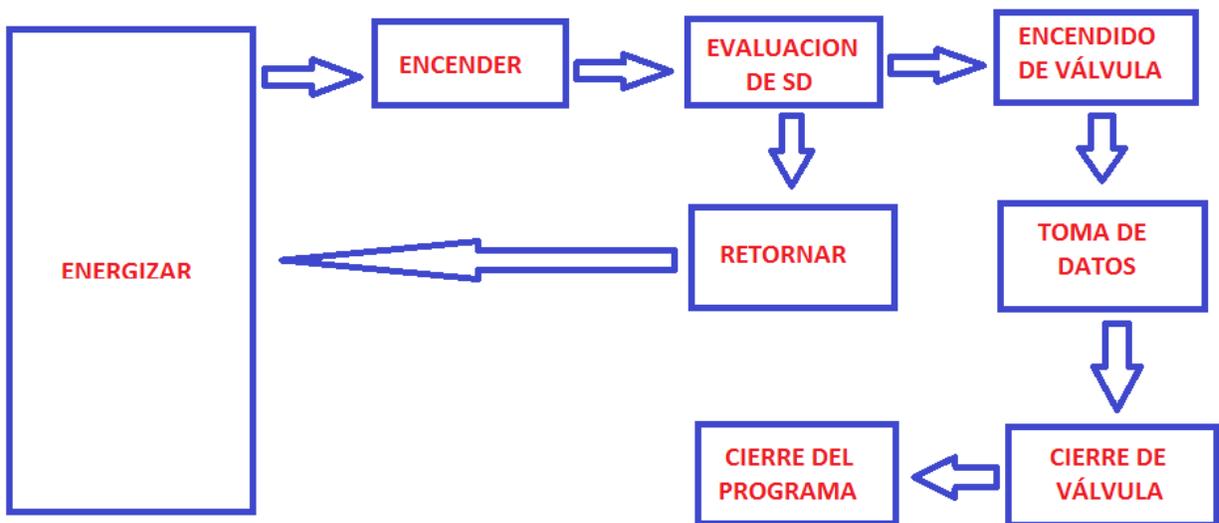


Figura 35. Secuencia para el funcionamiento con placa Arduino.

5. DESCRIPCIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DEL EQUIPO DE CONTROL

El objeto del equipo didáctico es estudiar los fenómenos de flujo transitorio en una instalación hidráulica y en concreto aquellos producidos por una variación brusca de las condiciones de contorno o de funcionamiento de la instalación, los denominados golpes de ariete.

En el banco de ensayo pueden generarse golpes de ariete mediante el cierre rápido de una válvula y medir la evolución temporal de la presión en la sección aguas arriba de la mencionada válvula. Es posible analizar los efectos sobre el golpe de ariete de la velocidad del fluido en la tubería y de la velocidad de cierre de la válvula.

A partir de la evolución temporal de la presión medida se puede obtener las máximas alturas de sobrepresión y subpresión del golpe así como una estimación de la celeridad de la onda. Conocida a partir de los resultados experimentales la celeridad de la onda es posible comparar las alturas máximas experimentales con la proporcionada por la bibliografía.

Para medir la presión generada en el golpe de ariete se ha dispuesto de una apertura piezométrica a la que se ha conectado un sensor de presión capaz de captar la rápida evolución de la presión que se produce en un golpe de ariete. El sensor se halla conectado a un sistema de adquisición de datos compuesto por una placa de Arduino.

6. PRESUPUESTO DE CONSTRUCCIÓN

CANTIDAD	MATERIAL	PRECIO UNITARIO	SUB-TOTAL
2	Tanque de agua de 750 litros	\$120.00	\$240.00
1	Válvula globo 2"	\$80.00	\$80.00
1	Válvula mariposa 2" actuador automático	\$450.00	\$450.00
1	Bomba de 3HP	\$395.00	\$395.00
19	Codos 90° 2"	\$0.95	\$18.05
12	Unión acople 2"	\$0.65	\$7.80
1	Tee 2"	\$2.20	\$2.20
18	Tubos PVC 2"	\$8.90	\$160.2
6	Tubo cuadrado 2" industrial	\$19.50	\$117.00
1	Tubo angular ¼ x 3"	\$41.95	\$41.95
1	Costos extras de materiales a construir	\$80.00	\$80.00
2	Resistencias	\$0.13	\$0.26
2	LED	\$0.25	\$0.50
2	Transistores 2n2222	\$0.11	\$0.22
1	Placa ARDUINO UNO	\$25.00	\$25.00
6	Terminales de bloque	\$0.10	\$0.60
2	Diodos	\$0.10	\$0.20
1	Módulo de tarjeta SD para ARDUINO	\$5.00	\$5.00
TOTAL			\$1173.98

7. MANUAL DE OPERACIÓN

Es muy importante que antes de operar el banco de pruebas se realice una lectura minuciosa del manual de operación. Si se realiza una adecuada instalación, se lleva a cabo el plan de mantenimiento y se opera según los manuales; de esa manera, el banco de pruebas no presentará problema alguno.

1. Siga todas las instrucciones.
2. Limpiar solamente con un paño seco.
3. El operario deberá asegurarse que los elementos que se utilizan para accionar el banco de pruebas, esté en su lugar y limpio.
4. Verificar que en la superficie donde se instala el equipo de control no presente algún líquido para evitar daños en el circuito.
5. Inspeccionar que se cuente con una conexión de corriente eléctrica cerca del banco de pruebas.
6. Abrir válvula globo del tanque de agua (ubicada en la parte superior del edificio de la Escuela de Ingeniería Mecánica).
7. Verificar que el equipo de control se encuentre conectado a la corriente eléctrica.
8. Encender el interruptor de control y esperar un momento (alrededor de 2 minutos) a que todo el sistema se estabilice.
9. Verificar si existe la tarjeta SD en el circuito del Arduino (se encenderá LED verde si está conectada la tarjeta SD o se encenderá LED rojo si no se encuentra conectada).
10. El equipo de control, mediante el transductor de presión, tomará la lectura de datos mientras se encuentre en funcionamiento el banco de pruebas.
11. Por ningún motivo se debe interrumpir el proceso, solamente hasta que termine el ciclo de trabajo del equipo.
12. Oprimir interruptor para el cierre de la válvula (durante el apagado, los datos obtenidos mediante el transductor será grabados en la tarjeta SD).
13. Extraer la tarjeta SD para poder obtener los datos almacenados y trasladarlos a una computadora para posteriormente graficar dichos datos.

14. En caso de emergencia, apagar el interruptor del control principal del banco de pruebas.
15. Una vez terminado el ciclo de trabajo, se desconecta el banco de pruebas y se debe asegurar que el lugar de trabajo quede totalmente limpio.

CONCLUSIONES

El golpe de ariete continuará desafiando a ingenieros, operadores, y directores de sistemas de agua porque está asociado con sistemas que no pueden ser definidos exactamente debido al tamaño y largo del sistema de distribución de agua con un perfil ondulante o por la falta de definición de los componentes del sistema tales como las válvulas o las bombas. Existe una necesidad de un acercamiento más práctico mientras que la investigación continúa proporcionando mejores descripciones de la física del golpe de ariete y mientras que las soluciones computacionales proporcionen herramientas más útiles que incluyan esos principios.

El golpe de ariete a gran escala puede ser muy peligroso, y todos entienden la necesidad de establecer medidas en contra de él. Por otra parte, el golpe de ariete a menor escala generalmente es ignorado. A pesar de que toma mayor tiempo, generalmente conduce a daños. Desde un punto de vista de mantenimiento, es imperativo que de igual manera se tomen medidas en contra de este tipo de golpe de ariete.

El golpe de ariete que se produce por el cierre instantáneo de la válvula origina al interior de la tubería una presión máxima equivalente a la suma algebraica de la altura manométrica y la presión debida al golpe de ariete, y una presión mínima igual a la diferencia entre la altura manométrica y la presión originada por el golpe de ariete.

La selección del diámetro más económico de la línea de impulsión considera principalmente, el punto de equilibrio en los gastos de inversión.

BILIOGRAFÍA

Cengel, Y. A., & Cimbala, J. (2006). *Mecánica de Fluidos Fundamentos y Aplicaciones*. México D.F: Mc Graw Hill Interamericana .

Kroon, J., & Stoner, M. (2001). Water Hammer: Causes and Effects. *Journal of the American Water Works*, 39-45.

Mataix, C. (1986). *Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas*. Madrid: Ediciones del Castillo, S.A.

NAVARRA, U. D. (2007). *TRANSITORIOS EN INSTALACIONES DE GOLPE DE ARIETE*. Madrid: TECNUN.

Real, E. U. (2015). *Tema 10. El golpe de Ariete*. Obtenido de UCLM: https://www.uclm.es/area/ing_rural/Trans_hidr/Tema10.PDF

Slide Share. (s.f.). Obtenido de <http://es.slideshare.net/carlosapuentes/simbologia-tuberias>

Streeter, V. L., & Wylie, E. B. (2000). *Mecánica de Fluidos*. México: Mc Graw Hill Interamericana S.A.

ANEXOS

ANEXO - A

CÓDIGO DE FUNCIONAMIENTO PARA ARDUINO

```
#include <SPI.h>
#include <SD.h>
const int chipSelect = 4;
int bomba = 2;
int valvula = 3;
int failed = 4;
int ok = 5;
int estado = 0;
void setup() {
  // Open serial communications and wait for port to open:
  Serial.begin(9600);
  while (!Serial) {
    ; // wait for serial port to connect. Needed for native USB port only
  }
  Serial.print("Initializing SD card...");
  if (!SD.begin(chipSelect)) {
    Serial.println("Card failed, or not present");
    estado = 0;
    digitalWrite(failed, HIGH);
  }
  if (SD.begin(chipSelect)) {
    Serial.println("Card failed, or not present");
    digitalWrite(ok, HIGH);
    estado = 1;
  }
}

void loop() {
  if (estado == 1) {
    File dataFile = SD.open("datalog.txt", FILE_WRITE);
    String dataString = "";
    digitalWrite(bomba, HIGH);
    digitalWrite(valvula, HIGH);
    delay(60000)
    int i = 0;
    for (i = 0; i < 120; i++) {
      if (dataFile) {
        int sensor = analogRead(0);
        dataString += String(sensor);
        dataFile.println(dataString);
        delay(500)
      }
    }
  }
}
```

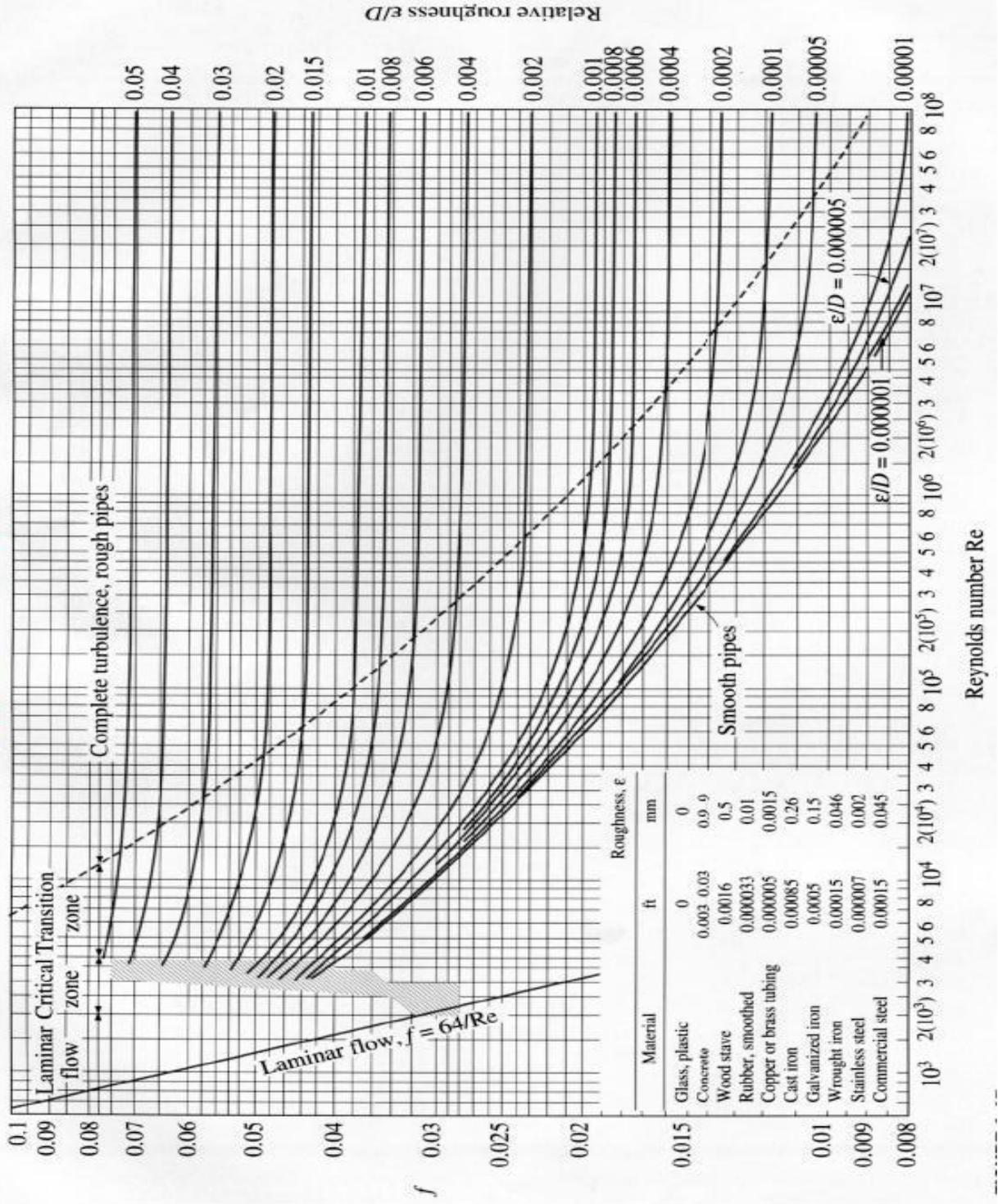
```
    }  
  }  
  digitalWrite(valvula, LOW);  
  for (i = 0; i < 120; i++) {  
    if (dataFile) {  
      int sensor = analogRead(0);  
      dataString += String(sensor);  
      dataFile.println(dataString);  
      delay(500)  
    }  
  }  
  else {  
    Serial.println("error opening datalog.txt");  
  }  
}  
dataFile.close();  
estado=0;  
digitalWrite(ok, HIGH);  
digitalWrite(failed, LOW);  
delay(500);  
}
```

GLOSARIO

- **Aguas abajo:** con relación a una sección de un curso de agua, se dice que un punto está aguas abajo, si se sitúa después de la sección considerada, avanzando en el sentido de la corriente.
- **Aguas arriba:** Con relación a una sección de un curso de agua, se dice que el punto avanza en dirección contraria a la corriente.
- **Altura piezométrica:** es una medida específica de la presión del líquido por encima de un datum geodésico.
- **Datum:** es un conjunto de puntos de referencia en la superficie terrestre con los cuales las medidas de la posición son tomadas y un modelo asociado de la forma de la tierra para definir el sistema de coordenadas geográfico.
- **Diodo:** dispositivo electrónico de dos electrodos por el que circula la corriente en un solo sentido.
- **Flujo transitorio:** un flujo transitorio presenta cambios en sus características a lo largo del tiempo para el cual se analiza el comportamiento del canal.
- **Momentum:** está asociada a la cantidad de masa que tiene un objeto y a la velocidad con que este se mueve; es transferible, es decir, una persona o un objeto pueden transferir momentum a un cuerpo.
- **Pérdidas hidráulicas:** es la pérdida de presión que se produce en un fluido debido a la fricción de las partículas del fluido entre sí y contra las paredes de la tubería que las conduce. Las pérdidas pueden ser continuas, a lo largo de conductos regulares, o accidentales o localizadas, debido a circunstancias particulares, como un estrechamiento, un cambio de dirección, la presencia de una válvula, etc.
- **Relevador de corriente:** es un dispositivo electromagnético. Funciona como un interruptor controlado por un circuito eléctrico en el que, por medio de una bobina y un electroimán, se acciona un juego de uno o varios contactos que permiten abrir o cerrar otros circuitos eléctricos independientes.
- **Transistor:** en electrónica, pequeño dispositivo semiconductor que cierra o abre un circuito o amplifica una señal; se emplea en circuitos integrados para generar bits (ceros y unos).
- **Transiente hidráulico:** un transiente hidráulico puede considerarse como una perturbación de un sistema hidráulico entre dos condiciones de equilibrio.

ANEXO - B

Diagrama de Moody



BUTTERFLY VALVES

VAMEIN Accionamiento automático

SERVOMOTOR ELÉCTRICO TIPO VJ

Un aspecto fundamental de las válvulas de mariposa VAMEIN es que cualquier actuador normalizado —ya sea eléctrico, neumático o hidráulico—, puede montarse directamente sobre la brida superior de la válvula, ya que está diseñada conforme a la norma ISO 5211. Esto brinda igualmente la posibilidad de cualquier intercambio de actuadores manuales por automáticos, sin necesidad de modificaciones o elementos adicionales para el acople del accionamiento seleccionado. Este cambio se puede realizar perfectamente *in situ*, permitiendo así una posterior automatización de las instalaciones, sin necesidad de realizar desmontajes, siempre costosos y problemáticos o, en el peor de los casos, la parada de líneas de proceso.

- ATC - Control térmico de temperatura
- AVS - Multi-voltaje Serie L 12-48V AC/DC, Serie H85 - 240V AC/DC
- ETL - Control electrónico del par (limitación permanente del par motor)
- MO - Mando manual de emergencia

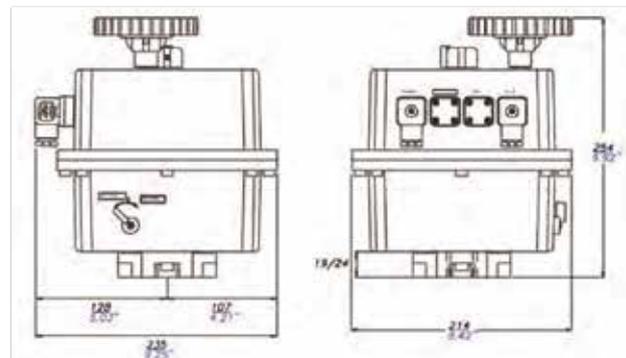
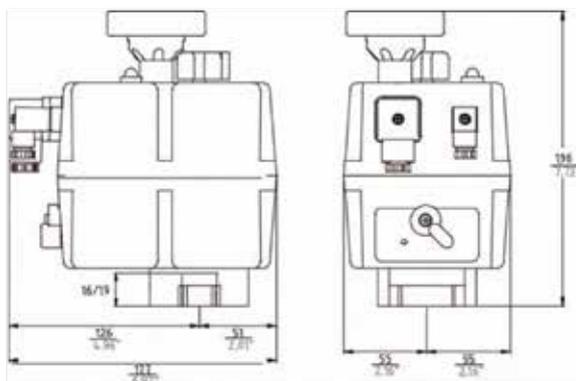
Opciones

- Cuerpo y tapa en Aluminio o Acero inoxidable
- Posicionador electrónico 4-20 mA o 0-10 V
- Bloque de seguridad BSR (mediante baterías recargables).

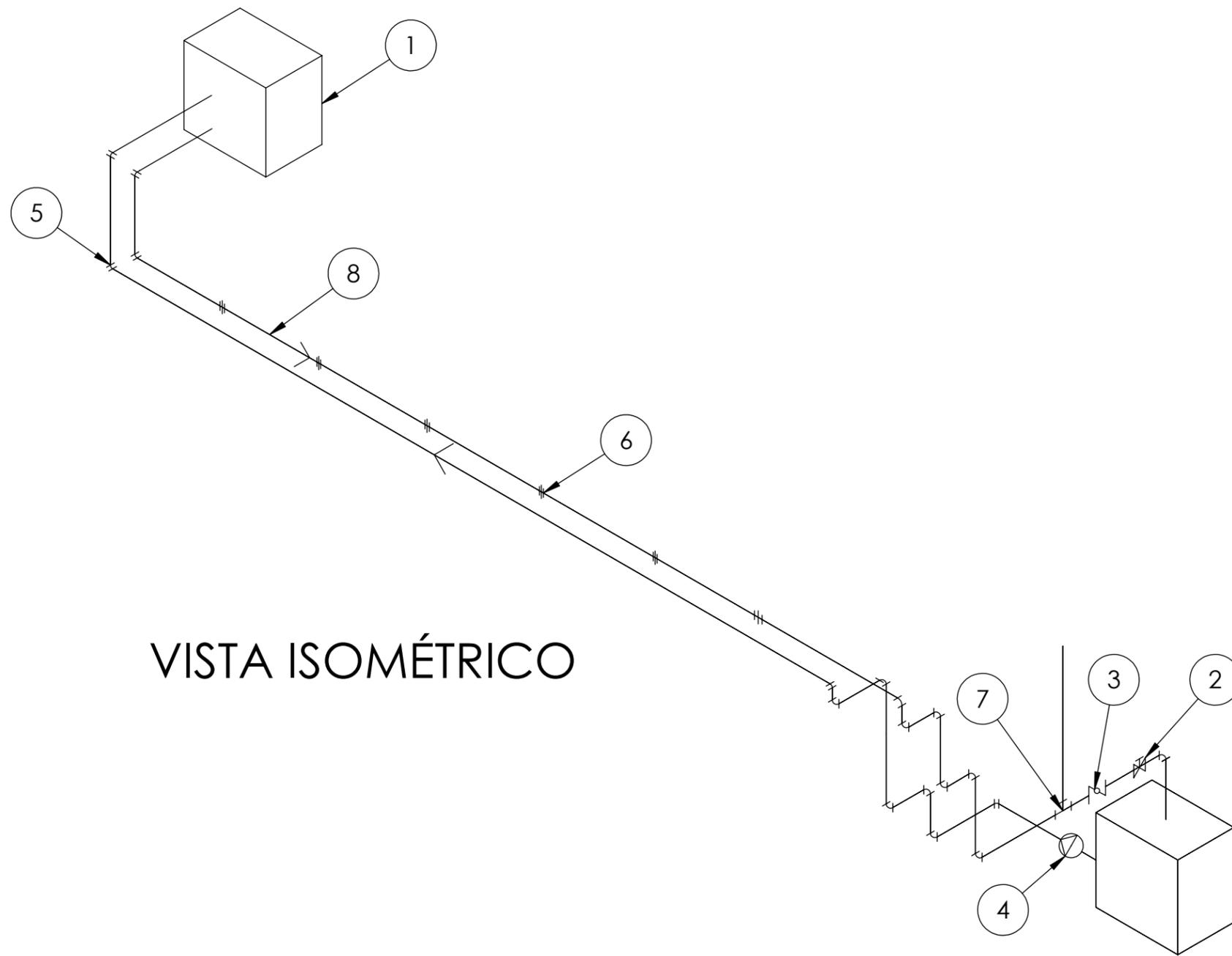


Dimensiones y Pesos

Dimensiones y Pesos						
Ref.	DN válvula	Alto	Ancho	Largo	Tiempo maniobra (s.)	Peso (kg.)
H/L 35	50/80	171	110	177	11/12	1.7
H/L 55	100-125	196	110	177	13/17	2.3
H/L 85	150	196	110	177	32/33	2.8
H/L 140/300	200/250	254	214	235	30-33/60-66	5.2

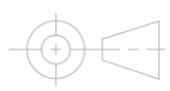


**ANEXO C:
PLANOS
CIVILES Y
MECÁNICOS**

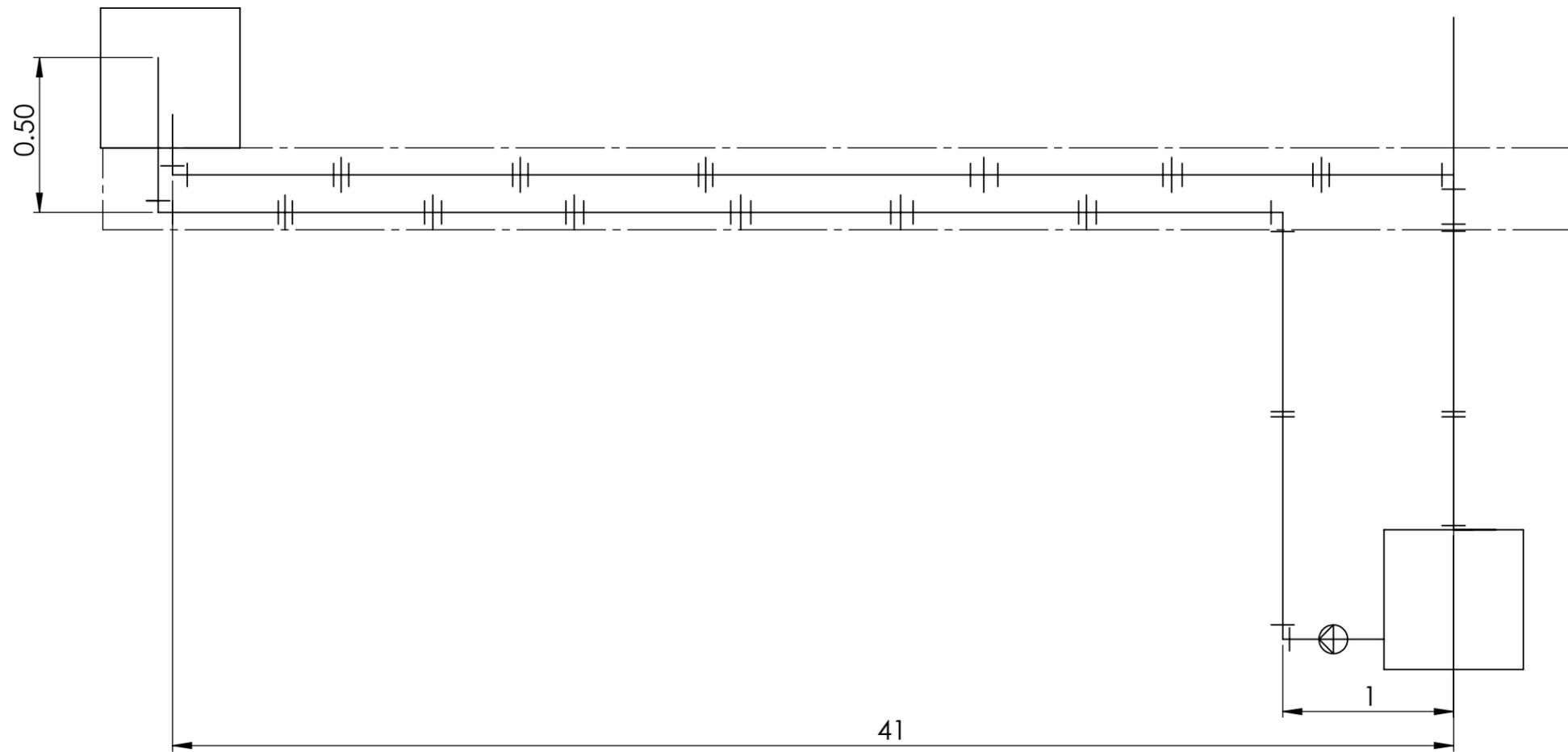


VISTA ISOMÉTRICO

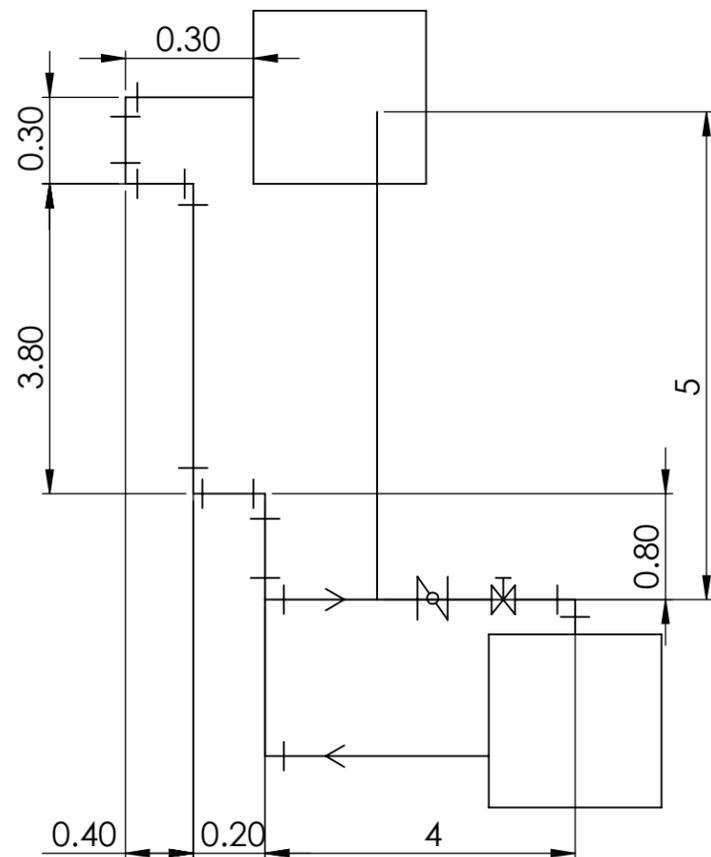
ID	CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	MATERIAL
1	PV-0001	TANQUE DE AGUA 750 LITROS	2	PLÁSTICO
2	PV-0002	VÁLVULA GLOBO 2 in	1	ACERO
3	PV-0003	VÁLVULA MARIPOSA 2 in	1	ACERO
4	PV-0004	BOMBA HIDRÁULICA 2 HP	1	
5	PV-0005	CODO 90°	18	PVC
6	PV-0006	UNIÓN	12	PVC
7	PV-0007	TEE	1	PVC
8	PV-0008	TUBERÍA D=2 in L=6 m	7	PVC



ESCALA	Prohibida la reproducción total o parcial de este documento.			HOJA 1 / 7
1:1	DISEÑO: Kevin Alexander Pérez Ramírez REVISÓ: Ing. Luis José Salalá Santos	FECHA 07/09/2016		UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA Autopista Norte y Final 25 Avenida Norte, Ciudad Universitaria, San Salvador, El Salvador
Cuando no se especifique UNIDADES: mm	NOMBRE PLANO HIDRÁULICO LINEAL		MATERIAL CANTIDAD: 1	A3



VISTA FRONTAL



VISTA LATERAL DERECHA

COTAS EN M

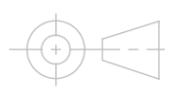
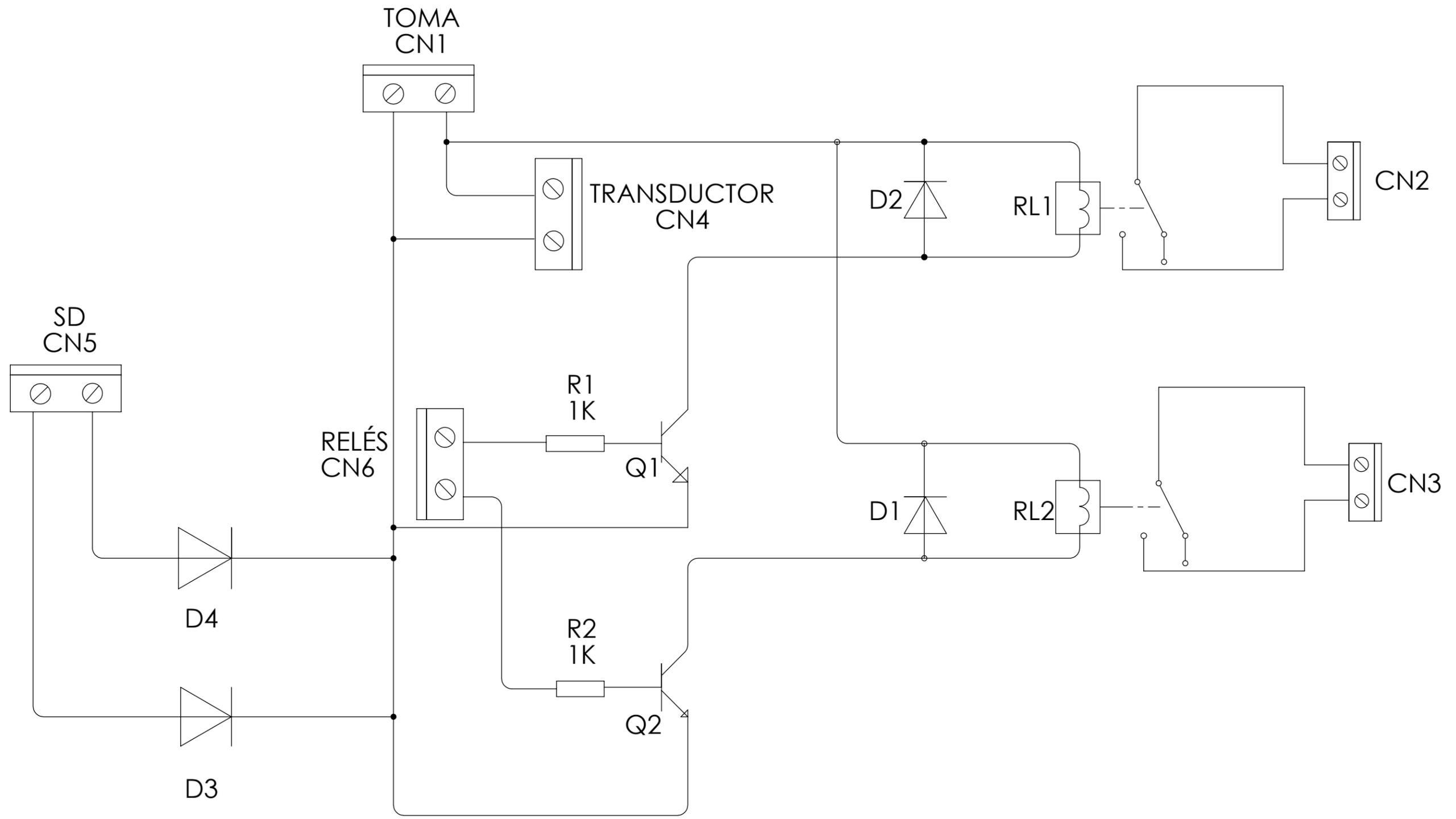


DESCRIPCIÓN	SÍMBOLO
VÁLVULA GLOBO	
CODO 90°	
UNIONES	
VÁLVULA MARIPOSA	
BOMBA HIDRÁULICA	
DIRECCIÓN DE FLUJO	

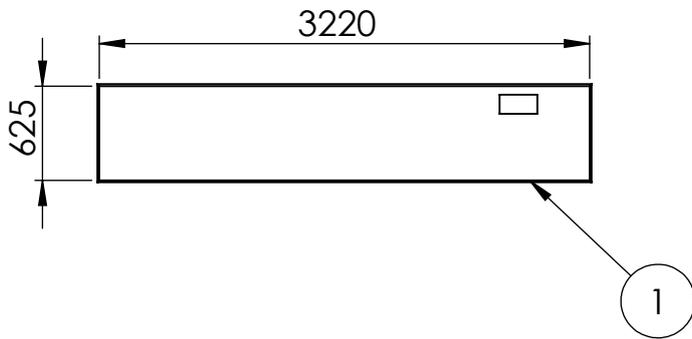
ESCALA	Prohibida la reproducción total o parcial de este documento.	
1:1	DISEÑO: Kevin Alexander Pérez Ramírez	FECHA: 07/09/2016
	REVISÓ: Ing. Luis José Salalá Santos	
UNIDADES: mm	TRABAJO DE GRADUACIÓN Diseño de un banco didáctico para el estudio del fenómeno de golpe de ariete en tuberías	
CUANDO NO SE ESPECIFIQUE	NOMBRE	MATERIAL
	VISTAS PLANO HIDRÁULICO	
		CANTIDAD: 1



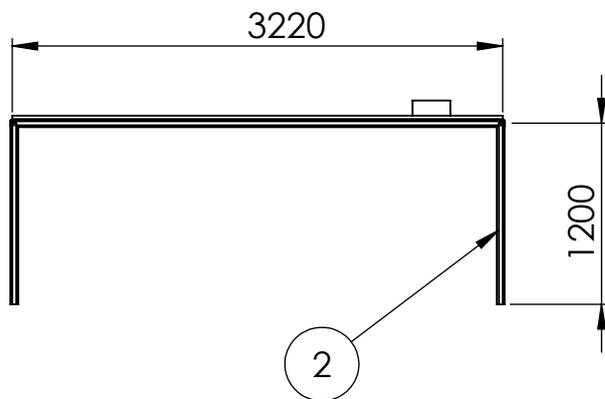
UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
 FACULTAD DE INGENIERIA
 Y ARQUITECTURA
 ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
 Autopista Norte y Final 25 Avenida Norte,
 Ciudad Universitaria, San Salvador, El Salvador



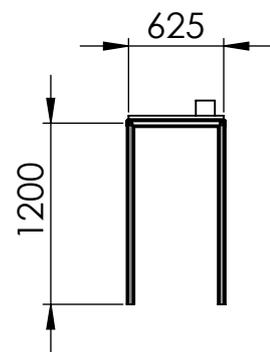
ESCALA	Prohibida la reproducción total o parcial de este documento.			HOJA 3 / 7
1:1	DISEÑO: Kevin Alexander Pérez Ramírez	FECHA: 07/09/2016		CODIGO
Cuando no se especifique UNIDADES: mm	TRABAJO DE GRADUACIÓN Diseño de un banco didáctico para el estudio del fenómeno de golpe de ariete en tuberías		UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA Autopista Norte y Final 25 Avenida Norte, Ciudad Universitaria, San Salvador, El Salvador	TF03
	NOMBRE	MATERIAL		A3
	PLANO ELÉCTRICO		CANTIDAD: 1	



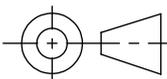
VISTA SUPERIOR



VISTA FRONTAL



VISTA LATERAL DERECHA



ID	CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	MATERIAL
1	PV-0009	BASE DE MADERA e=1 in	1	MADERA
2	PV-0010	TUBO CUADRADO 2x2x0.25 in L=6 m	4	AISI 1020

ESCALA	Prohibida la reproducción total o parcial de este documento.		
1:50	DISEÑO: Kevin Alexander Pérez Ramírez REVISÓ: Ing. Luis José Salalá Santos TRABAJO DE GRADUACION	FECHA	07/09/2016
	Diseño de un banco didáctico para el estudio del fenómeno de golpe de ariete en tuberías		
Cuando no se especifique UNIDADES: mm	NOMBRE	MATERIAL	CANTIDAD: 1
BANCO CON BASE DE MADERA			



UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
 FACULTAD DE INGENIERIA
 Y ARQUITECTURA
 ESCUELA DE INGENIERIA MECÁNICA

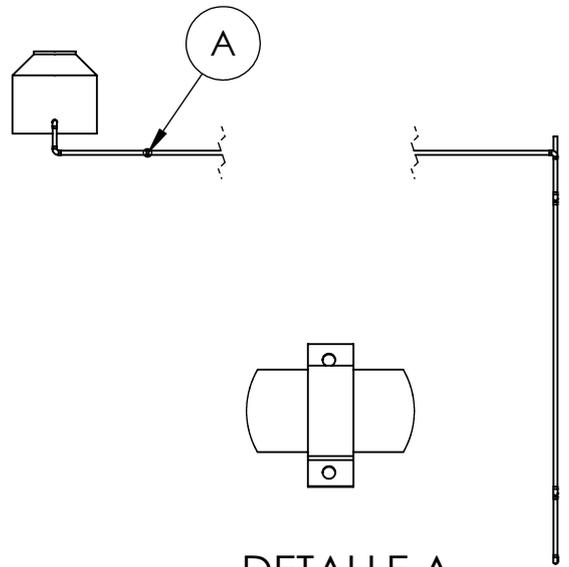
Autopista Norte y Final 25 Avenida Norte,
 Ciudad Universitaria, San Salvador, El Salvador

HOJA 4 / 7

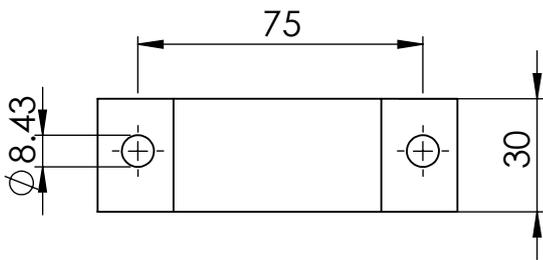
CODIGO

TF04

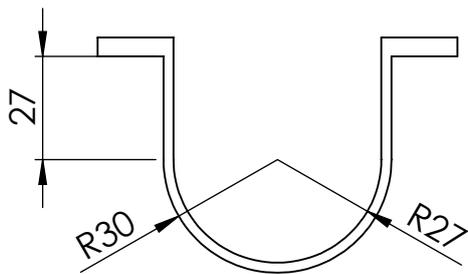
A4



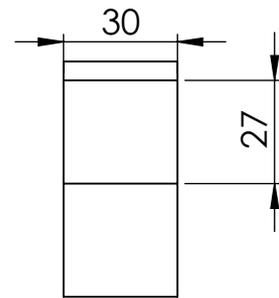
DETALLE A
ESCALA 1 : 5



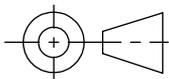
VISTA SUPERIOR



VISTA FRONTAL



VISTA LATERAL
DERECHA



ESCALA	Prohibida la reproducción total o parcial de este documento.		
	DISEÑO: Kevin Alexander Pérez Ramírez REVISÓ: Ing. Luis José Salalá Santos TRABAJO DE GRADUACION	FECHA	07/09/2016
	Diseño de un banco didáctico para el estudio del fenómeno de golpe de ariete en tuberías		
Cuando no se especifique UNIDADES: mm	NOMBRE	MATERIAL	CANTIDAD: 1
	SOPORTE DE TUBERÍA		



UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERIA
Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERIA MECÁNICA

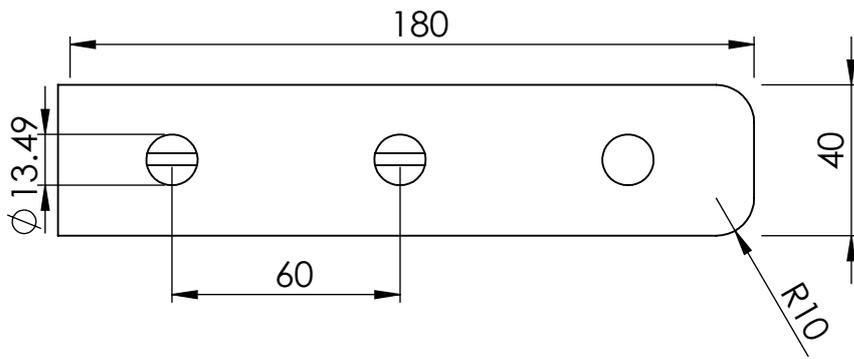
Autopista Norte y Final 25 Avenida Norte,
Ciudad Universitaria, San Salvador, El Salvador

HOJA 5 / 7

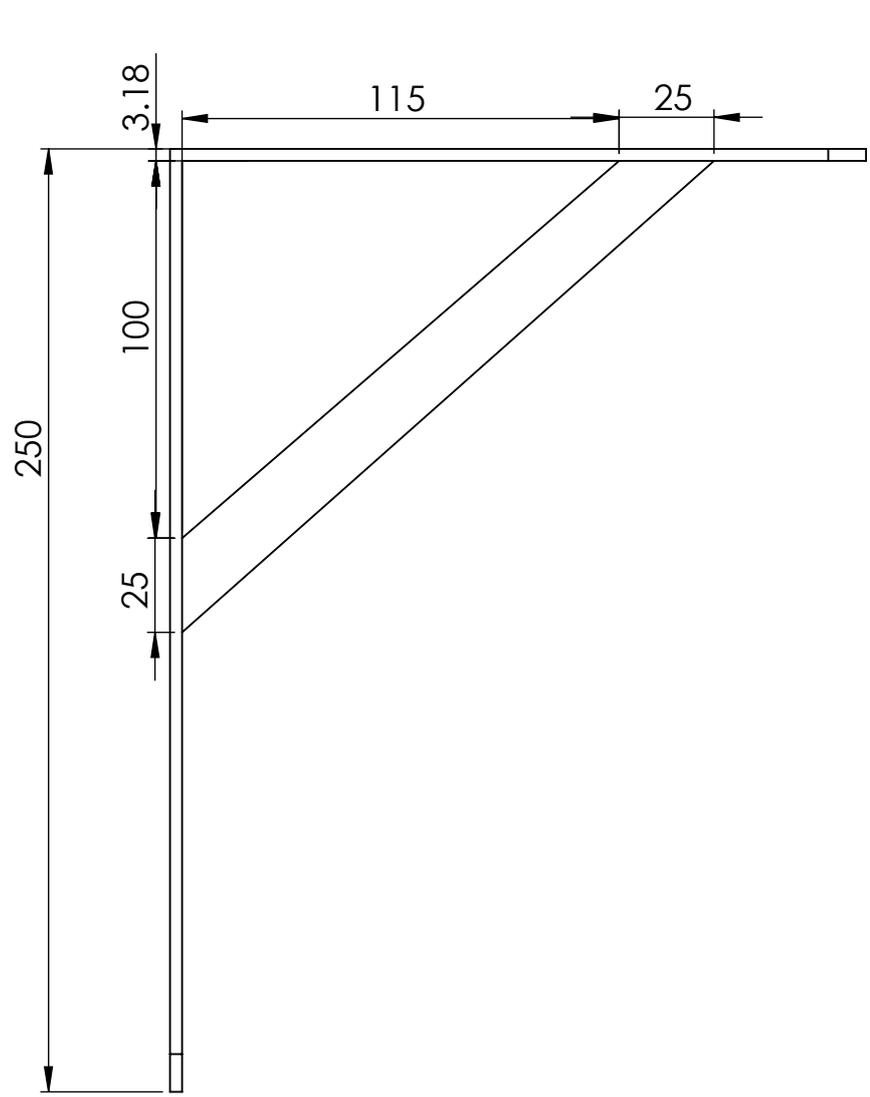
CODIGO

TF05

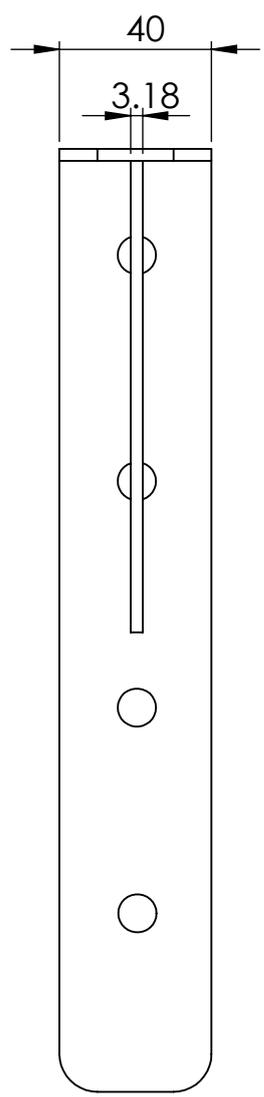
A4



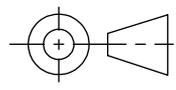
VISTA SUPERIOR



VISTA FRONTAL



VISTA LATERAL DERECHA

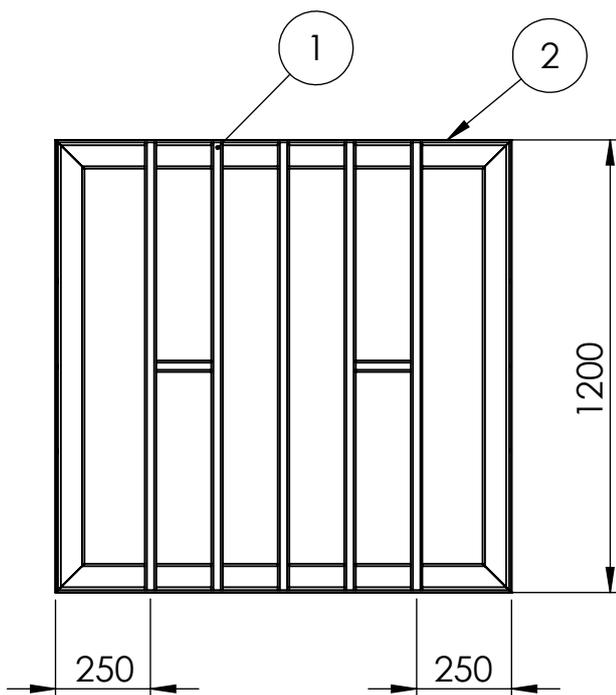


ESCALA	Prohibida la reproducción total o parcial de este documento.		
1:2	DISEÑO: Kevin Alexander Pérez Ramírez	FECHA: 07/09/2016	
	REVISÓ: Ing. Luis José Salalá Santos	TRABAJO DE GRADUACION	
	Diseño de un banco didáctico para el estudio del fenómeno de golpe de ariete en tuberías		
UNIDADES: mm	NOMBRE: ÁNGULO DE SOPORTE	MATERIAL:	CANTIDAD: 4

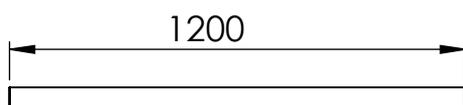


UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
 FACULTAD DE INGENIERIA
 Y ARQUITECTURA
 ESCUELA DE INGENIERIA MECÁNICA
 Autopista Norte y Final 25 Avenida Norte,
 Ciudad Universitaria, San Salvador, El Salvador

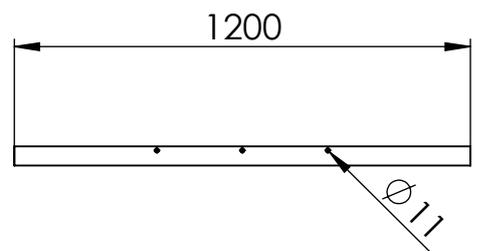
HOJA 6 / 7
CODIGO
TF06
A4



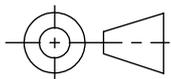
VISTA SUPERIOR



VISTA FRONTAL

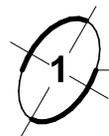
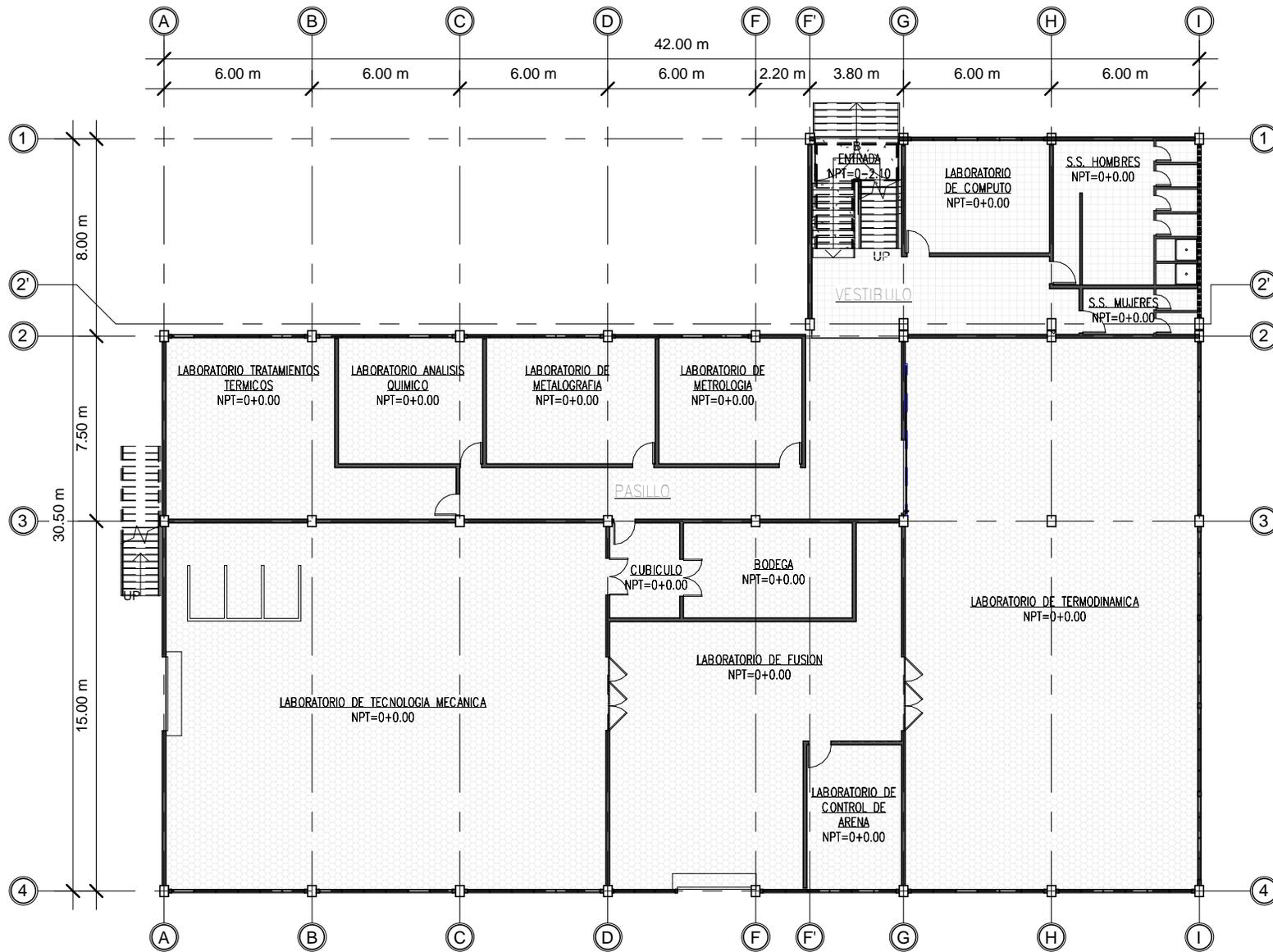


VISTA LATERAL DERECHA



ID	CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	MATERIAL
1	PV-0010	TUBO CUADRADO 2x2x0.25 in L=6 m	2	AISI 1020
2	PV-0013	TUBO ANGULAR 3x2x0.25 in L= 6 m	1	AISI 1020

ESCALA	Prohibida la reproducción total o parcial de este documento.		UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR	HOJA 6 / 7
1:20	DISÑO:	Kevin Alexander Pérez Ramírez	 FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERIA MECÁNICA	CODIGO
	REVISÓ:	Ing. Luis José Salalá Santos		
	TRABAJO DE GRADUACION		Autopista Norte y Final 25 Avenida Norte, Ciudad Universitaria, San Salvador, El Salvador	A4
Cuando no se especifique UNIDADES: mm	NOMBRE	SOPORTE TANQUE DE AGUA		
	MATERIAL			
	CANTIDAD:	1		



01 PRIMER NIVEL

Esc.: 1 : 250

RESUMEN

Ante la necesidad que surge en la actualidad en nuestro país (interactuar con las energías renovables), se busca un espacio dentro de las instalaciones de la Universidad de El Salvador, para realizar prácticas de laboratorio y demostraciones para estudiar lo que es el fenómeno de golpe de ariete en tuberías y las diferentes aplicaciones que pueden haber en El Salvador. El diseño propuesto incluye dispositivos como transductor de presión (para la toma de datos de la presión), válvula globo (regulación de caudal), válvula de mariposa (cierre instantáneo de compuerta), instalación, distribución y estructura de soporte de los dispositivos. Se aborda sobre las posibles causas que genera el golpe de ariete en tuberías. Además se describe el funcionamiento de cada uno de los dispositivos como también las especificaciones técnicas. Se ha diseñado un sistema de control para medición de variables y control del fenómeno. El modelo incluye un estudio numérico para la verificación de los daños que ocasiona al variar datos como velocidad del agua, diámetro de la tubería y el tiempo de cierre de la válvula.

Given the need arises today in our country (interact with renewable energy), a space within the premises of the University of El Salvador seeks to conduct laboratory practice and demonstrations to study what is the phenomenon of coup water hammer in pipes and different applications that can be in El Salvador. The proposed design includes devices such as pressure transducer (for taking pressure data), ballon (flow control) valve, butterfly valve (instantaneous closing gate), installation, distribution and support structure of the devices. It addresses the possible causes generating water hammer in pipes. Besides the operation of each of the devices as described technical specifications. It has designed a control system for measuring and controlling the phenomenon variables. The model includes a numerical study for verification of the damage caused to vary speed data as water, pipe diameter and the closing time of the valve.