

CONSTRUCCIÓN E INSTALACIÓN DE UNA BOMBA DE ARIETE HIDRÁULICO
PARA ALIMENTAR EL SISTEMA DE RIEGO EN UN ÁREA DEFINIDA PARA UNA
FINCA AGRÍCOLA.

BRAYAN SEBASTIAN RAMÍREZ ROJAS
JOHAN MANUEL GONZÁLEZ OVIEDO

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS
FACULTAD TECNOLÓGICA
TECNOLOGÍA EN MECÁNICA
BOGOTÁ D.C

2019

CONSTRUCCIÓN E INSTALACIÓN DE UNA BOMBA DE ARIETE HIDRÁULICO
PARA ALIMENTAR EL SISTEMA DE RIEGO EN UN ÁREA DEFINIDA PARA UNA
FINCA AGRÍCOLA

BRAYAN SEBASTIAN RAMÍREZ ROJAS
JOHAN MANUEL GONZÁLEZ OVIEDO

Proyecto de grado para optar al título de tecnólogo mecánico

Director

Ing. Hernando Vélez Sánchez

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS
FACULTAD TECNOLÓGICA
TECNOLOGÍA EN MECÁNICA
BOGOTÁ D.C

2019

Nota de aceptación:

Firma del Tutor

Firma del jurado

Bogotá D.C, 2019

DEDICATORIA

Sebastián Ramírez Rojas

Dedico este proyecto a mi familia, especialmente a mi madre, tío y abuela por su apoyo incondicional y consejos, porque gracias a ellos he podido culminar este ciclo en mi vida académica, siendo un reflejo de mis actos los valores inculcados por cada uno, además a mi compañero porque conformamos este equipo de trabajo con el fin de desarrollar esta idea y no se dio por vencido hasta lograrlo.

Johan González Oviedo

Dedico este proyecto a mis padres Olga Oviedo y José González que han estado presentes en todo el proceso de crecimiento intelectual brindándome su apoyo incondicional, sin ellos el poder estudiar esta carrera en vez de ser un privilegio hubiese sido una carga.

Dedico este proyecto también a mi compañero, que fuera de este proyecto ha mostrado ser un amigo valioso que me ha brindado su apoyo sin vacilar en más de una ocasión.

Por último, dedico este proyecto de grado a cada uno de mis docentes presentes durante el proceso de aprendizaje.

AGRADECIMIENTOS

Primeramente, queremos agradecer a Dios por hacer posible el desarrollo de esta idea. Por otra parte, dar las gracias a nuestras familias por su apoyo incondicional desde el inicio hasta el fin del ciclo tecnológico en nuestra carrera, así mismo, a nuestro tutor el Ingeniero Hernando Vélez, profesor de la universidad, por disponer de su tiempo para la revisión y aprobación de este proyecto. Además, al señor Luis Murcia y su esposa Gloria Bolívar por la confianza depositada al prestar su propiedad, y finalmente un agradecimiento a nuestra Alma Mater la Universidad Distrital Francisco José de Caldas por ser nuestro segundo hogar durante estos años de desempeño académico, haciendo que portemos con orgullo la etiqueta de ser pertenecientes de esta institución.

TABLA DE CONTENIDO

	pág.
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	12
1.1 ESTADO DEL ARTE.....	13
1.1.1 Historia.....	14
1.1.2 Diseño y construcción de un sistema de ariete hidráulico para el aprovechamiento de aguas lluvias	17
1.1.3 El ariete hidráulico. Diseño e instalación en Ntongui (Angola).....	17
1.2 JUSTIFICACIÓN.....	18
2. OBJETIVOS	19
2.1 GENERAL.....	19
2.2 ESPECÍFICOS.....	19
3. MARCO TEÓRICO.....	20
3.1 GOLPE DE ARIETE.....	20
3.2 ECUACIONES DISEÑO VÁLVULA DE IMPULSO	22
3.2.1 Coeficiente de pérdida.....	22
3.2.2 Coeficiente de arrastre.....	22
3.2.3 Coeficiente de resistencia al cierre.....	22
3.2.4 Fuerza de arrastre.....	22
3.3 MODELO DE KROL.....	23
3.3.1 Periodo 1.....	23
3.3.2 Periodo 2.....	25
3.3.3 Periodo 3.....	26
3.3.4 Periodo 4.....	27
3.3.5 Periodo 5.....	28
3.3.6 Periodo 6.....	29
3.3.7 Periodo 7.....	31
3.4 DIMENSIONAMIENTO PULMÓN.....	32

3.4.1	Celeridad.....	33
3.4.2	Tiempo crítico.....	35
3.4.3	Método de Allievi.....	35
3.5	ECUACIONES BÁSICAS DE LA MECÁNICA DE FLUIDOS.....	37
3.5.1	Factor de fricción.....	37
3.5.2	Ecuación de Bernoulli.....	37
3.5.3	Aplicación ecuación de la energía en el sistema.....	38
3.5.4	Ecuación de Torricelli.....	39
3.5.5	Numero de Reynolds.....	40
3.5.6	Potencia hidráulica.....	41
4.	FASE DE DISEÑO.....	43
4.1	CONDICIONES DE CAMPO.....	43
4.1.1	Área de riego.....	46
4.1.2	Limitaciones hídricas.....	47
4.1.3	Dimensionamiento del ariete hidráulico.....	51
4.2	DISEÑO DETALLADO.....	52
4.2.1	Cálculo de perdidas en accesorios.....	52
4.2.2	Calculo velocidad del flujo en la bomba.....	53
4.2.3	Válvula de impulsión.....	59
4.2.4	Selección del resorte.....	60
4.2.5	Peso del pulsador.....	62
4.2.6	Celeridad.....	62
4.2.7	Sobrepresión.....	64
4.2.8	Periodos del ciclo de Krol.....	65
4.2.9	Diseño del tanque pulmón.....	74
4.2.10	Cálculo de perdidas por fricción tubería de descarga de la bomba.....	77
4.3	MODELADO Y VALIDACIÓN DEL DISEÑO.....	78
4.3.1	Sistema de bombeo.....	78
4.3.2	Modelado en NX 12.....	81

4.4	CONSTRUCCIÓN Y PRUEBAS DEL ARIETE.....	81
4.4.1	Fabricación pulmón de alivio.....	81
4.4.2	Modificación válvula de Pie.....	82
4.4.3	Ensamble piezas normalizadas bomba.....	85
4.4.4	Alistamiento canecas de almacenamiento.....	85
4.4.5	Banco de pruebas hidráulicas.....	86
4.4.6	Alistamiento del terreno e instalación.....	90
5.	DATOS DE FUNCIONAMIENTO Y CARACTERIZACIÓN.....	95
5.1	PRUEBA 0.....	95
5.2	PRUEBAS DE CAMPO.....	97
6.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	99
6.1	DE LA PRUEBA 0.....	99
6.2	PRUEBAS DE CAMPO.....	101
7.	CONCLUSIONES.....	104
8.	PRESUPUESTO.....	105
9.	CRONOGRAMA.....	108
10.	REFERENCIAS.....	109

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Primer diseño de ariete hidráulico.	14
Figura 2. Diseño patentado de la bomba hidráulica.	15
Figura 3. Grafica Cabeza vs Caudal	17
Figura 4. Variación real de la presión en la válvula, a) sin considerar pérdidas, b) considerando las pérdidas por fricción.	21
Figura 5. Esquema bomba de ariete, periodo 1	24
Figura 6. Cierre de válvulas en el ariete, periodo 3.	26
Figura 7. Esquema ariete, periodo 4.	27
Figura 8. Esquema válvula de salida abierta en la bomba, periodo 5.	28
Figura 9. Esquema ariete, periodo 6.	30
Figura 10. Esquema ariete, retroceso válvula de impulso, periodo 7.	31
Figura 11. Módulo de elasticidad y relación de Poisson para materiales de tuberías.	34
Figura 12. Método de Aleleví, ejemplo clásico.	35
Figura 13. Esquema puntos de aplicación ecuación de Bernoulli	38
Figura 14. Flujo de salida de un tanque	40
Figura 15. Diagrama de Moody.	42
Figura 16. Trayecto Bosa-Bituima.	43
Figura 17. Medición longitudes terreno de instalación	44
Figura 18. Esquema lugar de instalación.	44
Figura 20. Plano general terreno finca	45
Figura 21. Pozo de agua bajo arroyo.	47
Figura 22. Toma experimental caudal entregado por el pozo	48
Figura 23. Tabla de selección dimensiones.	51
Figura 24. Esquema aproximación factor de fricción	54
Figura 25. Esquema iteraciones caudal.	57
Figura 26. Resortes seleccionados para iteraciones	61
Figura 27. Esquema montaje hidráulico.	78
Figura 28. Modelado en NX ariete	81
Figura 29. Fabricación del tanque de alivio	82
Figura 30. Válvula de pie sin modificaciones	83
Figura 31. Modificación pulsador	83
Figura 32. Cuerpo válvula de pie	84
Figura 33. Válvula de pie modificada	84
Figura 34. Componentes ensamble bomba de ariete	85
Figura 35. Sistema de unión valdes de recolección.	86

Figura 36.Tubo de abastecimiento, banco de pruebas	87
Figura 37.Ensamble sistema de pruebas.....	87
Figura 38.Prueba de fugas tanque de alivio	88
Figura 39.Inspección de fugas ariete	89
Figura 40.Fundición placas de concreto	91
Figura 41.Maya de filtro pozo.....	92
Figura 42.Instalación sistema de recolección y abastecimiento.....	92
Figura 43.Prueba de fugas general.....	93
Figura 44.Anclaje ariete a placa de concreto fabricada	94
Figura 45. Prueba 0	95
Figura 46. Grafica Caudal vs Cabeza	101
Figura 47. eficiencia vs cabeza.....	102

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Longitudes terreno luego de la salida de la bomba.....	45
Tabla 2. Definición de áreas del terreno	46
Tabla 3. Extrapolación eficiencia	49
Tabla 4. Datos registrados de consumo por planta de forma empírica.....	50
Tabla 5. Coeficientes de fricción accesorios del ariete	53
Tabla 6. Resultados interpolación para obtener h_f	56
Tabla 7 Iteración final caudal.	57
Tabla 8. Interpolación con datos catalogo Pavco	58
Tabla 9. Datos resortes seleccionados	61
Tabla 10. Características resorte seleccionado.	62
Tabla 11. Características para cálculo de celeridad	63
Tabla 12. Datos Ciclo del ariete	71
Tabla 13. Resumen de ciclo para segunda superficie	72
Tabla 14. Estados tanque de alivio	76
Tabla 15. capacidad de pulmón necesaria para la cabeza de 16m	76
Tabla 16. especificaciones tanque de alivio.....	77
Tabla 17. Componentes sistema de bombeo	78
Tabla 18. Resultados de prueba 0	96
Tabla 19. Observaciones de la prueba 0 con diferentes resortes	96
Tabla 20. resultados pruebas de campo	97
Tabla 21. datos obtenidos a partir de resultados de las pruebas de campo	98
Tabla 22. Presupuesto proyecto	105
Tabla 23. Diagrama de Gantt.....	108

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La globalización ha provocado grandes cambios en las costumbres de las poblaciones rurales y urbanas, así como la implementación de nuevos modelos económicos y el avance creciente de tecnologías que han optimizado tiempos de trabajo, beneficiando empresas y trabajadores. La invención de tecnologías en el campo agrícola es una necesidad de los agricultores de diferentes lugares del mundo y por supuesto de Colombia.

Colombia a diferencia de otros países cuenta con una gran variedad de pisos térmicos que albergan cantidades de fauna y flora únicas, gracias a sus fuentes hídricas que permiten la preservación de estas a pesar de los diferentes fenómenos de contaminación ambiental que se han vivido en las últimas tres décadas. Además, el cambio climático que es una de las consecuencias del uso de maquinaria agrícola en el país, emisión de gases por automóviles y mal uso de los recursos por parte del ser humano, han generado cambios abruptos en los modelos climatológicos que lograban predecir las épocas de verano e invierno que se tienen en cuenta por los agricultores para sembrar algún tipo de plantas en diferentes municipios de departamentos como Cundinamarca, Tolima, Santander, Risaralda, etc.

El agua que es el recurso natural para lograr germinar los cultivos en cualquier tipo de clima, pero que es indispensable en climas cálidos, especialmente en épocas de verano es difícil de obtener en pequeños pueblos, debido a que cuando esta es tratada para el consumo humano se raciona por parte del acueducto de la zona, con el fin de cuidar el recurso y lograr mantener reservas suficientes para la población hasta el fin de la época de sequía.

Esta es una problemática que la aplicación de la ingeniería puede ayudar a solucionar mediante la invención de energías sostenibles como las de tipo eólico, solar o aquellas que aprovechan la energía de los fluidos como el principio del golpe de ariete por el cual funciona la bomba del ariete hidráulico, que no necesita de una fuente eléctrica para su funcionamiento.

El problema que se identifica en la finca del señor Luis Murcia, ubicada el municipio de Bituima (Cundinamarca) es que en la época de verano los cultivos no pueden ser regados adecuadamente, ya que se realizan cortes de agua del acueducto, además de que el área de riego es de aproximadamente de 1000m² en una pendiente ascendente de aproximadamente 40° donde se encuentran árboles frutales de limón, mandarina, guanábana y otras como plátano, maíz y frijol; la forma

de riego de los cultivos es de forma manual mediante una manguera que utiliza el agua del sistema de acueducto.

Se plantea entonces que para aprovechar el agua que corre por un arroyo que se ubica a un costado de la finca en la parte más baja, puede utilizarse para bombear esta hacia una superficie plana, con el fin de recolectarla a futuro, mediante la elaboración de una bomba de ariete hidráulico. Así el agua puede ser distribuida por un sistema de riego instalado por el propietario, y de este modo hidratar con facilidad y rapidez las plantas de un área definida del total del terreno, así la utilización del agua potable del acueducto disminuirá, debido a que no se utilizará un porcentaje de esta para el riego.

En este proyecto se busca, además, ahorrar costos, utilizando en la construcción de algunos componentes de la bomba materiales reciclables, ya que este tipo de bombas se comercializan en el mercado con precios que oscilan entre \$700.000 y \$1'500.000, por otro lado, se suman insumos de la mano de obra y el estudio en campo para su instalación.

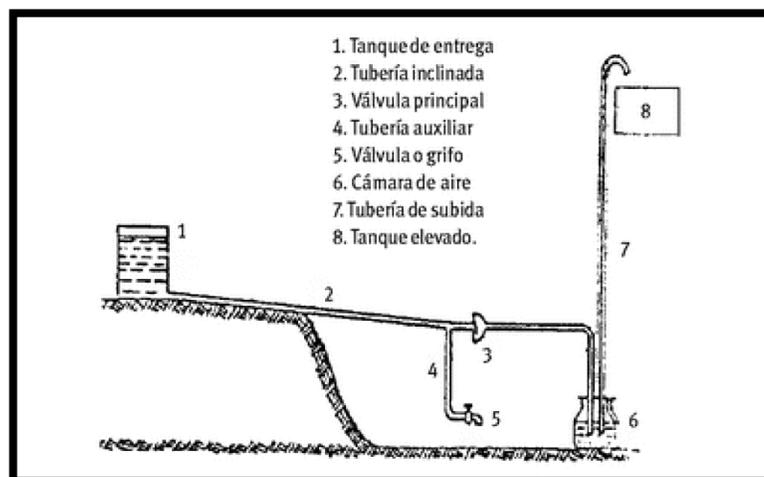
1.1 ESTADO DEL ARTE

Para el desarrollo de este lineamiento, se lleva a cabo una búsqueda en la web en el gestor bibliográfico Mendeley para encontrar proyectos desarrollados en diferentes países del mundo, así mismo, en la base datos ofrecida por la biblioteca de la universidad disponible su página web BDIGITAL, buscando como palabra clave 'bomba de ariete', consultando los proyectos presentados hasta el año 2017 por estudiantes para optar por el título de ingeniería o tecnología, además, se tuvieron en cuenta los resultados encontrados por el gestor Google académico que muestra todo tipo de documentos estudiantiles en la web. Por otro lado, se realizó la búsqueda de manuales técnicos de instalación y catálogos en Colombia. Las fuentes consultadas tienen fechas de publicación entre los años 2005 y 2017 en las ciudades de Pereira, Bogotá, Quito y Madrid.

1.1.1 Historia. Como se expone en el documento Diseño y montaje de un sistema de bombeo mediante ariete hidráulico (Rubiano Suarez & Cuervo Contreras, 2017), la bomba de ariete ayudó a desarrollar el eje agrícola de Europa en la segunda mitad del siglo XVIII, su invención facilitó el transporte de agua a zonas alejadas y puso a disposición de los granjeros la posibilidad de utilizar sistemas de riego, usando un depósito de agua ubicado por encima del nivel del cultivo.

En 1772, el ingeniero John Whitehurst, nacido en Cheshire(Inglaterra) fue quien diseño el primer ariete hidráulico con función de bombeo, le llamo “pulser pump”; se dio cuenta que al cerrar una válvula de golpe se generaba una onda energética que forzaba al fluido a moverse en dirección contraria, el modelo de Whitehurst carecía de una válvula automática, ver *Figura 1*.

Figura 1. Primer diseño de ariete hidráulico.



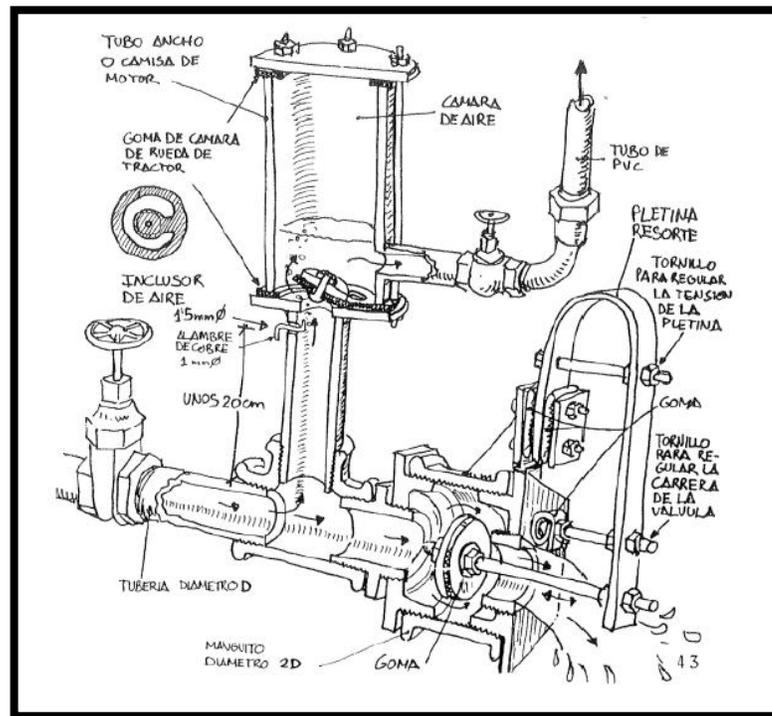
Fuente: Diseño y montaje de un sistema de bombeo mediante ariete hidráulico.

En 1776, Joseph Montgolfier hizo un diseño más complejo con el objetivo de automatizar el ariete hidráulico, y lo llamo “beiler hydraulque “, esto implicaba un muelle que mediante el flujo de agua oscilaba y golpeaba de manera cíclica la salida del flujo asimilando un mecanismo de movimiento perpetuo, el diseño se perfecciono y patento en 1796, *figura 2*.

Luego este diseño llego Estados Unidos y quienes lo patentaron allí fueron los ingenieros S.S. Hallett y J. Cerneau en 1809, a partir de ahí el uso del ariete

hidráulico comenzó a expandirse por toda América, esto sucedió cerca de 23 años después de la patente estadounidense. Lo que también hizo famosa esta bomba fue el uso en el Taj Mahal y en Ameer en Afganistán. La ventaja comparativa de la bomba de ariete radica en que no necesita medios externos de energía para su aplicación, es decir que es casi aplicable a cualquier entorno donde se pueda obtener una entrada de presión de accionamiento para el pulsador y así multiplicar hasta 10 veces el cabezal energético, sacrificando un porcentaje del caudal.

Figura 2. Diseño patentado de la bomba hidráulica.



Fuente: Diseño y montaje de un sistema de bombeo mediante ariete hidráulico

Hasta 1840 los diseños y las bombas eran importadas desde Europa, pero en 1843 el ingeniero H.H. Strawbridge decidió diseñar el primer modelo americano para eliminar la dependencia europea, este diseño fue construido con madera, pero fue un desastre porque debido a las altas presiones, explotó; entonces optó por construirlo con pernos y remaches de hierro para aumentar la resistencia. Las platinas de fierros y tuberías fueron agregadas poco después.

El “Benson’s Patent Water Ram” tenía la capacidad de soportar fuertes corrientes de agua para llevar el fluido a colinas. En 1842 la revistas Farmer’s Cabinet y American Farmer empezaron a dispersar el conocimiento del diseño. Luego comenzaron a aparecer grandes cantidades de patentes, algunas podían dar un cabezal de hasta 80 *metros* y suministrar 20.000 galones de agua por día, pero los costos de estos eran muy altos. Con la aparición de los motores de combustión interna y la comercialización de las primeras bombas eléctricas. Los precios de las bombas de ariete comenzaron a quedar en el olvido hasta hoy que luego de más de 130 años de estar a la deriva, este tipo de bomba toma de nuevo relevancia por la progresiva escasez de recursos y la necesidad de sistemas de transporte de agua de manera sostenible.

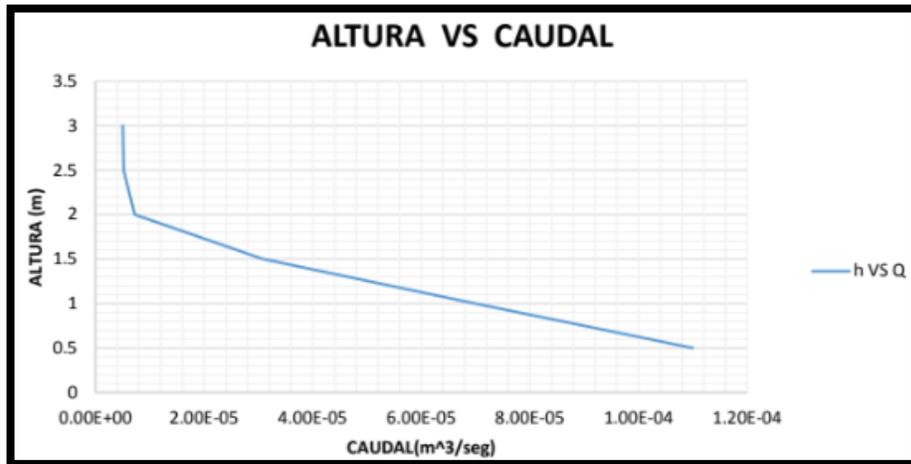
Del mismo modo los autores para el desarrollo del proyecto realizaron el diseño y construcción de un ariete hidráulico para ser instalado en el municipio de Tena (Cundinamarca) en una finca agrícola, con el fin de recolectar agua en un tanque de 1.000 *litros* ubicado a una altura de cabeza de 50 *metros* en la finca del propietario desde una quebrada, el problema que se solucionó con la implementación, fue la recolección de agua mediante el ariete sin afectar a otros vecinos que también recolectaban del mismo lugar y se veían obligados a desplazarse hasta este para abastecerse.

Por otro lado, se muestran planos, cálculos y fabricación de la cámara de aire y el vástago de impulsión en los talleres de la universidad, seguido de la instalación del ariete captando el agua directamente de la quebrada para posteriormente realizar su instalación.

En las conclusiones del proyecto se describen recomendaciones como la correcta adecuación del sitio de instalación y los lugares por los que pasaran las tuberías de carga y descargar, así mismo, se listan los problemas obtenidos mediante pruebas por el uso de la válvula de impulsión de pesos y la corrección de estos mediante la adecuación de una válvula tipo resorte.

1.1.2 Diseño y construcción de un sistema de ariete hidráulico para el aprovechamiento de aguas lluvias (Rengifo & Gallego, 2016). Se muestran la memoria de cálculos correspondiente y las ecuaciones utilizadas, planos en el programa SolidWorks, lo que se destaca es que se muestran graficas de rendimiento, cabeza vs caudal, entre otras elaboradas a partir de datos experimentales, en el proyecto no se muestran simulaciones en programas CAE. La grafica de H vs Q para el tipo de bomba diseñada se muestra en la figura 3.

Figura 3. Grafica Cabeza vs Caudal



Fuente: diseño y construcción de un sistema de ariete hidráulico para el aprovechamiento de aguas lluvias, p.64.

1.1.3 El ariete hidráulico. Diseño e instalación en Ntongui (Angola). Este proyecto fue desarrollado por dos ingenieros de la Universidad Politécnica de Madrid (Romero Guerrero & Lorenzo Gutiérrez, 2014) con el fin de abastecer con agua potable la población de Ntongui, un pequeño pueblo ubicado en la Angola (África). A diferencia de otros proyectos encontrados, la bomba no fue fabricada por los autores del proyecto, sino que fue adquirida con la condición de suministrar 42.000 litros de agua por día, las tuberías de alimentación al ariete, transporte y entrega fueron de 6 a 3 pulgadas de diámetro. Al igual que en otros proyectos se muestran las ecuaciones de diseño, pero se aprecia un especial estudio en el fenómeno del golpe de ariete como los tiempos de apertura y cierre del vástago de impulsión.

1.2 JUSTIFICACIÓN

La necesidad de la bomba de ariete tiene como eje principal el aumento en la escases de recursos naturales, de este modo se vuelve indispensable empezar a buscar ventajas energéticas de bajo impacto ambiental; aquí es donde se puede ver hacia este dispositivo que utiliza energía mecánica mediante un movimiento alternativo y un impacto que logra usar el mismo fluido a bombear como fuente de movimiento, de este modo, sacrificando algo de potencial energético de una caída de un arroyo, se puede aumentar la cobertura del servicio de agua. El impacto social que puede tener esto es ayudar en zonas de sequías, donde usualmente se vuelven costosas las modalidades temporales de servicio de agua y así ofrecer la llegada de este fluido de manera óptima y económica.

Como se indica en los antecedentes, este no es un modo nuevo de transporte de agua, por el contrario, ya lleva varias décadas desde su desarrollado. La dificultad para la implementación de esta tecnología está en el hecho que no todos los lugares tienen el mismo potencial para su invención; existen lugares que por la cantidad de contaminantes en las fuentes de agua no se podrá usar, así mismo se dispone de otros con grandes caídas que pueden otorgar mayor facilidad para el diseño. Según la revista Portafolio (Nieto, 2018), el problema radica en que Colombia es propensa a ser azotada por sequías acompañadas por “el fenómeno del niño”, es decir, que se dependerá del impacto de las sequías en el sitio donde se va a hacer el trabajo de campo para el desarrollo de la estación de bombeo. Por otro lado, la aparición de sequías no es del todo contraproducente, debido a que se vuelve más oportuno el uso de este tipo de bomba, recordando que el agua usada como medio energético no es desperdiciada, ya que esta no se recolecta en su totalidad, sino que retorna al caudal del río, quebrada o arroyo.

Otro aspecto importante es el hecho de que el desarrollo del ariete hidráulico tiene en si varios elementos y conocimientos interrelacionados de nivel tecnológico como proceso formativo de los desarrolladores como criterios de diseño, el uso de programas CAD para las simulaciones, uso de softwares de hojas de cálculos, conceptos de mecánica de fluidos y maquinas hidráulicas, entre otros aspectos inherentes del área de la tecnología mecánica.

2. OBJETIVOS

2.1 GENERAL

- Diseñar y desarrollar una bomba de ariete útil para un área de riego de una finca en Bituima, Cundinamarca.

2.2 ESPECÍFICOS

- Establecer lugar de riego, altura, área y forma; junto con limitaciones hídricas del sitio.
- Realizar diseño hidráulico y conceptual de la bomba.
- Establecer y validar el diseño de detalle de los componentes de fabricación y componentes a adquirir. Esto con ayuda de NX para el modelado de las piezas.
- Construir bomba de ariete optimizando costos de elaboración, para luego realizar una prueba previa a la instalación.
- Instalar ariete hidráulico en la finca y mostrar resultados obtenidos.

3. MARCO TEÓRICO

La bomba de ariete es una máquina hidráulica que utiliza el fenómeno de golpe de ariete para impulsar un fluido con el fin de transportarlo de un punto a otro gracias a que logra vencer la fuerza de la gravedad y otras pérdidas de energía. Es de resaltar que esta máquina utiliza únicamente energía mecánica, es decir, que su dependencia de una fuente de energía como la de tipo eléctrico para lograr el funcionamiento es nula.

Este proyecto se enfocará en la construcción e instalación de la bomba, además de otros accesorios que esta necesita como tanques de recolección y tuberías de transporte para su óptimo funcionamiento. La teoría que se utiliza en el desarrollo del proyecto se muestra a continuación:

3.1 GOLPE DE ARIETE

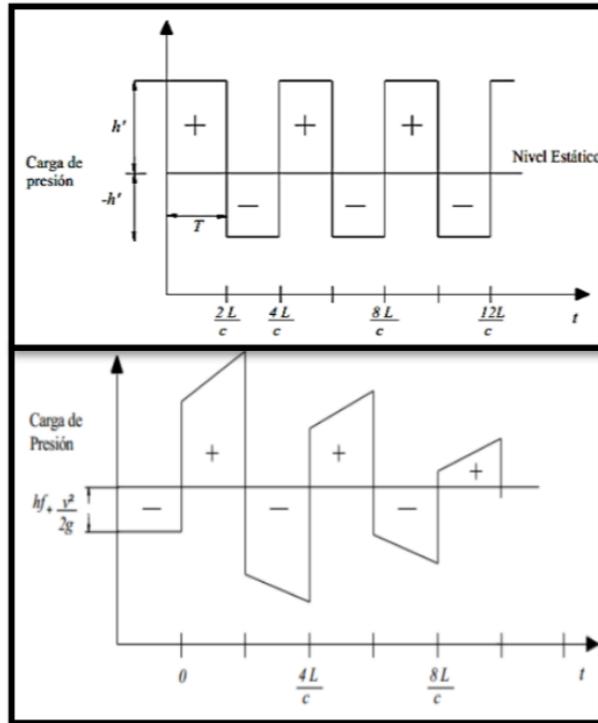
Para entender este fenómeno ocurrido en fluidos en fase líquida hay que replantear los conceptos fluido incompresible y régimen permanente. El golpe de ariete es un fenómeno transitorio, es decir, es de régimen permanente y variable, en que la tubería ya no es *rígida* y el líquido *comprensible*, este análisis se detalla en Mecánica de Fluidos y Maquinas Hidráulicas (Mataix, 1982), además para profundizar la teoría se utilizan los estudios teóricos expuestos en ESTUDIOS DE TRANSITORIOS: GOLPE DE ARIETE (Pérez Farrás & Guitelman, 2005).

Este fenómeno es generado al cerrar el paso del fluido de manera inmediata, lo que genera una onda de sobrepresión; la manera en la que se puede analizar esto es que el agua lleva consigo una velocidad, y por ende una cantidad de movimiento; el cierre repentino obliga a que esa energía cinética que lleva el fluido se transforme “de golpe” en energía potencial, el agua se comprime y esa sobrepresión que acumula se libera en las fronteras del sistema. Generalmente se ve esto como algo muy peligroso porque puede hacer daño a las redes de tuberías, pero en el objetivo de este proyecto se asimila que puede ser de utilidad, teniendo en cuenta los antecedentes.

En la *figura 4* se describe el proceso de sobrepresión en la tubería al momento de cerrar una válvula de golpe. En el tiempo 0 la presión aumenta súbitamente, y debido a las pérdidas su aumento por un lapso es progresivo mientras que la onda de propagación se va liberando a los límites de la tubería, al ser liberada esa presión, la carga cae de manera inmediata, lo que provoca una presión de vacío; el

fluido trata de acomodarse dirigiéndose de nuevo hacia la válvula, golpea con esta haciendo que haya de nuevo un aumento de presión. Si el flujo no se libera el ciclo de presiones seguirá hasta que el fluido se acomode por completo en su conducto, se puede asimilar que lo que hace que el ciclo no sea infinito son las pérdidas de presión.

Figura 4. Variación real de la presión en la válvula,
a) sin considerar pérdidas, b) considerando las pérdidas por fricción



Fuente: diseño y construcción de un sistema de ariete hidráulico para el aprovechamiento de aguas lluvias

c = Velocidad de propagación de la onda de sobrepresión (m/s).

L = Longitud de la tubería (m).

h' = Sobrepresión en la chimenea de equilibrio (m).

$-h'$ = Subpresión en la chimenea de equilibrio (m).

hf = pérdidas por fricción en la tubería (m).

v = Velocidad de la tubería (m/s).

g = aceleración debida a la gravedad (m/s^2).

3.2 ECUACIONES DISEÑO VÁLVULA DE IMPULSO

Los métodos teóricos para obtener las siguientes ecuaciones son mostrados por Calero y Guaman (2011, pp.43-70), Galarza Chacón (2013, pp.26-34) y Gonzales Alayza (2015, pp.73-98), así, organizando y comparando se obtienen las expresiones que describen el comportamiento de la válvula de impulso y el modelo de Krol.

3.2.1 Coeficiente de perdida. El pulsador, encargado de generar el golpe de ariete, tiene una resistencia sobre el agua en el instante en el que el fluido llena por completo la bomba y no se ha producido el golpe. Este coeficiente se tiene en cuenta para sumarlo a la perdida de energía por accesorios.

$$R_s = \frac{2,43 - 1,06 * S + 10^{(0,95-13,3*S)}}{S} \quad (1)$$

3.2.2 Coeficiente de arrastre. La válvula genera una resistencia a la fuerza de arrastre del agua, por esta razón es necesario definir un nuevo coeficiente para corregir los cálculos, reemplazando el valor de la carrera en pulgadas.

$$\varphi_s = \frac{0,345 - 0,275(S) + 10^{(0,52-6,85(S))}}{S} \quad (2)$$

3.2.3 Coeficiente de resistencia al cierre. Este coeficiente relaciona el peso del pulsador y el área con la que tiene contacto que se opone al generar el cierre por la fuerza de arrastre del fluido.

$$K_0 = \frac{W_p}{A * \rho * V_2'} \quad (3)$$

3.2.4 Fuerza de arrastre. La fuerza de arrastre que el agua ejerce sobre un objeto se define por:

$$F_{\text{arrastre}} = \frac{\varphi_s * (V_{\text{corregida}})^2 * A * \gamma}{g} \quad (4)$$

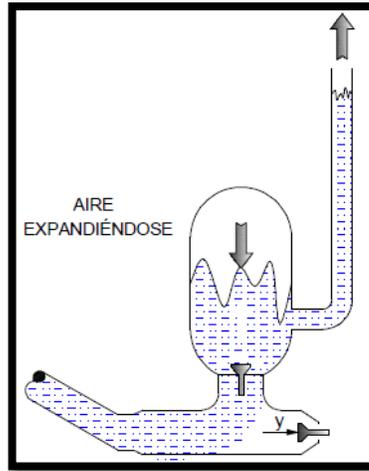
3.3 MODELO DE KROL. Para describir el comportamiento existen modelos matemáticos de diferentes autores que describen el del ariete hidráulico, expuestos en proyectos de grado consultados, el modelo que mejor describe el funcionamiento del ariete y coincide con las pruebas experimentales es el de Krol; este explica el ciclo de funcionamiento en siete periodos se compararon principalmente los proyectos elaborados por Calero y Guaman (2011), y Gonzales Alayza (2015).

3.3.1 Periodo 1.

Para este periodo se desprecian las pérdidas por fricción en el interior del ariete y el fluido se considera incompresible (la densidad del flujo permanece constante). El agua pasa a través de la tubería de alimentación, entrando a la bomba, en consecuencia, el agua incrementa su velocidad a medida que transcurre el tiempo. Este periodo inicia al concluir el último (periodo 7) donde ocurre un retroceso en el fluido una distancia "y", medida desde la válvula de impulsión hasta el tanque de alimentación, generando una presión negativa en el fluido debido a que la válvula de impulsión se encuentra abierta.

La válvula de entrega permanece cerrada, ya que en ella reposa la carga generada por el aire expandiéndose. Por otro lado, se genera un paso de aire por el desperdicio de agua cerca de la válvula de impulso. Cuando el fluido entra en contacto con la válvula de impulso de nuevo, el periodo finaliza.

Figura 5. Esquema bomba de ariete, periodo 1



Fuente: Diseño y construcción de una bomba de ariete hidráulico, p. 50

Las ecuaciones para encontrar la distancia de retroceso, el tiempo y la velocidad del fluido son:

$$y = \frac{(H + h_r)^2 L g}{2 h a^2} \quad (5)$$

$$t_1 = \sqrt{\frac{2 L y}{g h}} \quad [s] \quad (6)$$

$$V_1 = \sqrt{\frac{2 g h y}{L}} \quad [m/s] \quad (7)$$

Donde:

H = altura de descarga [m]
 h = altura disponible de suministro [m]
 y = distancia de retroceso del agua [m]
 g = aceleración de la gravedad [m/s^2]
 L = Longitud tubería de entrada [m]

3.3.2 Periodo 2. En este periodo las perdidas no se desprecian, la válvula de impulso permanece abierta, la velocidad del agua (V_2) sigue a aumentando hasta que se genera una fuerza de arrastre capaz de cerrar la válvula de impulsión.

$$V_2 = \sqrt{\frac{W_p}{\varphi * A_p * \rho}} \quad (8)$$

Donde:

W_p = peso válvula de impulso [N]

φ = coeficiente de arrastre (válvula de impulso)

A_p = área de la válvula de impulso [m²]

ρ = densidad del fluido [Kg/m³]

$$M = \frac{2gh}{v_2^2} \quad (9)$$

$$Z = M - 1 \quad (10)$$

$$V_2' = 0,5 \sqrt{\frac{2gh}{Z}} \quad (11)$$

$$K_0 = \frac{W_p}{A_g * \rho * (V_2')^2}$$

$$t_2 = \frac{L}{\sqrt{2ghZ}} * \ln \left(\frac{\left(1 + \sqrt{\frac{W_p Z}{2A_p h \gamma k_0}} \right) \left(1 - \sqrt{\frac{yZ}{L}} \right)}{\left(1 - \sqrt{\frac{W_p Z}{2A_p h \gamma k_0}} \right) \left(1 + \sqrt{\frac{yZ}{L}} \right)} \right) \quad (12)$$

Donde:

M = coeficiente agrupado de perdidas

g = aceleracion de la gravedad $[m/s^2]$

γ = peso especifico del fluido $[N/m^3]$

Z = coeficiente agrupado de pérdidas totales

V_2' = velocidad mínima que puede llevar el fluido $[\frac{m}{s}]$

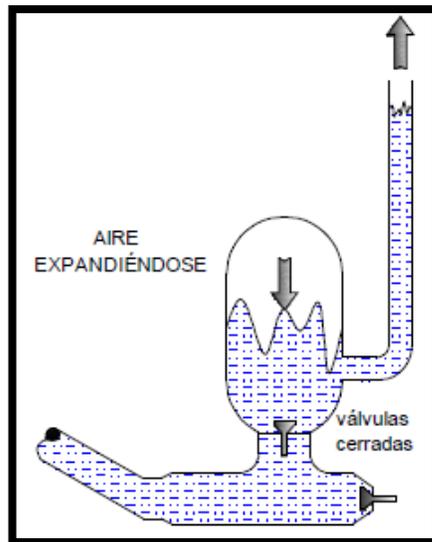
K_0 = coeficiente de resistencia al cierre (válvula de impulso)

A_g = área niple acero galvanizado $[m^2]$

L = Longitud tubería de entrada $[m]$

3.3.3 Periodo 3. La válvula de impulso comienza a cerrarse y al finalizar este periodo se cierra por completo. La velocidad se considera la misma que en el anterior, ya que el periodo es muy corto. El tiempo que dura el periodo se calcula como sigue:

Figura 6. Cierre de válvulas en el ariete, periodo 3



Fuente: Diseño y construcción de una bomba de ariete hidráulico, p. 54

$$V_3 = V_2$$

$$Z_1 = \sqrt{2\phi A_p h \gamma} \quad (13)$$

$$t_3 = \sqrt[3]{\frac{3 L S V_2}{2g^2 h \left(1 - \frac{W_p * Z}{Z_1^2}\right)}} \quad (14)$$

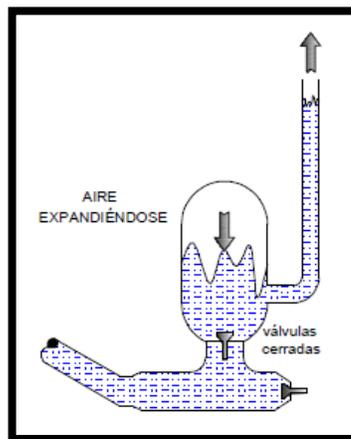
Donde:

Z = *coeficiente agrupado de pérdidas totales*

Z_1 = *coeficiente de arrastre corregido*

3.3.4 Periodo 4. La válvula de impulso se encuentra completamente cerrada, se genera una desaceleración en el fluido, causando el golpe de ariete debido a la sobrepresión. El momento dinámico se traslada de la válvula de impulso a la de entrega para proceder a la apertura de esta última. Por otro lado, el aire acumulado durante el primer periodo bajo la válvula de entrega se comprime gracias a la presión generada por el golpe.

Figura 7. Esquema ariete, periodo 4



Fuente: *Diseño y construcción de una bomba de ariete hidráulico, p. 54*

El tiempo que tarda este periodo y la velocidad en este periodo se pueden calcular mediante las siguientes expresiones:

$$t_4 = \frac{2L}{a} \quad (15)$$

$$V_4 = V_3 - \frac{(H + h_r)g}{a_m} \quad (16)$$

$$h_r = h_m \left(\frac{1 - H}{a} \right) \quad (17)$$

Donde:

$a =$ celeridad de la onda de presión $\left[\frac{m}{s} \right]$

$H =$ altura de descarga medida desde el nivel de suministro $[m]$

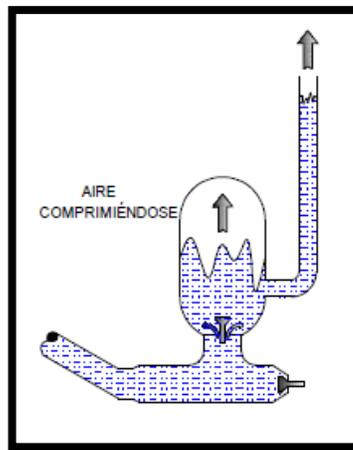
$h_r =$ pérdida de retardo $[m]$

$h_m =$ pérdidas totales $[m]$

$g =$ aceleración de la gravedad $\left[\frac{m}{s^2} \right]$

3.3.5 Periodo 5. La válvula de descarga está abierta por completo, dando paso al fluido a la cámara de aire con una velocidad V_4 . La energía cinética del agua en movimiento se convierte en energía hidráulica, así el agua que cumple con las condiciones de presión es bombeada, al igual que el aire acumulado en el periodo 1 bajo la válvula de entrega.

Figura 8. Esquema válvula de salida abierta en la bomba, periodo 5



Fuente: Diseño y construcción de una bomba de ariete hidráulico, p. 60

Se aplica la ley de conservación de energía, donde la energía hidráulica necesaria para bombear fluido a una $(h + h_r)$ debe ser igual a la energía cinética que llevaba el fluido antes de ser detenida en el periodo 3, menos la energía cinética perdida en el periodo 4.

$$E_h = q'(h + h_r)$$

$$E_h = E_{cin} - E_{cinper}$$

Mediante el teorema de impulso y cantidad de movimiento, luego de hacer cuentas se obtiene la siguiente expresión para calcular el tiempo del periodo cinco.

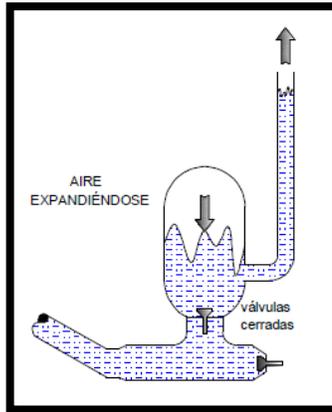
$$t_5 = \frac{L}{(H + h_r) g} \left[\sqrt{\frac{W g}{A_p K_0 \gamma}} - \frac{(H + h_r) g}{a} \right] \quad (18)$$

En la ecuación anterior se observa que el tiempo de descarga disminuye a medida que se aumenta la altura de descarga. Al abrirse la válvula de entrega la sobrepresión empieza a disminuir, debido a que la cabeza de servicio es mayor que la carga de entrega; así mismo el agua que se encuentra en el pulmón de la bomba tiende a regresar al cuerpo del ariete como consecuencia de que la presión en la cámara de aire es mayor que en el cuerpo. Por lo anterior el fluido permanece con velocidad cero.

$$V_5 = 0 \left[\frac{m}{s} \right]$$

3.3.6 Periodo 6. En este periodo se comprende el tiempo desde el cierre total de la válvula de entrega hasta la apertura de la válvula de impulsión, fenómenos causados por la inercia de estas. Cuando la válvula de descarga está cerrada por completo la presión en el pulmón del ariete es mayor que la del cuerpo, como resultado de esto se produce un flujo de retroceso desde la válvula de impulso hacia el tanque de alimentación y de este modo disminuye a una presión menor a la atmosféricas.

Figura 9. Esquema ariete, periodo 6.



Fuente: *Diseño y construcción de una bomba de ariete hidráulico*, p. 62

Por otro lado, el retroceso del agua genera una velocidad negativa que se calcula aplicando el principio de conservación de energía con la energía de deformación del agua y la energía cinética en la tubería de impulso.

$$\frac{\gamma A L (H + h_r)^2 g}{2 a^2} = \frac{\gamma A L}{2 g} V_6^2$$

Simplificando y despejando la velocidad del periodo 6, se obtiene:

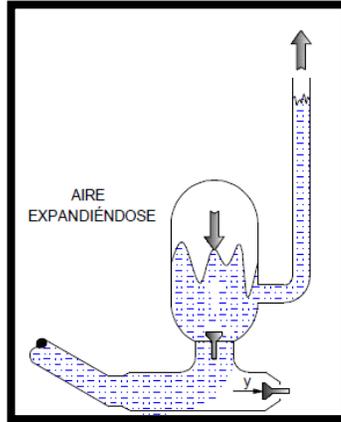
$$V_6 = -\frac{(H + h_r)g}{a} \quad (19)$$

Como el tiempo en el que ocurre esto es muy corto, se considera como si fuera el necesario para la reflexión completa de una onda de presión.

$$t_6 = \frac{2L}{a} \quad (20)$$

3.3.7 Período 7. Este periodo inicia cuando la válvula de impulsión se abre por completo gracias a la acción de su propio peso, la presión atmosférica en la cara exterior del plato y una diferencia de presión debida al retroceso del agua.

Figura 10. Esquema ariete, retroceso válvula de impulsión, periodo 7



Fuente: Diseño y construcción de una bomba de ariete hidráulico, p.63

Al abrirse la válvula de impulsión, el vacío en el ariete comienza a desaparecer, ya que la presión trata de igualarse con la atmosférica. Para lograr detener el flujo de agua que va devuelta al tanque de alimentación, la carga de suministro y la fricción en el tubo se imponen. Así, al finalizar este periodo se obtienen las condiciones iniciales del periodo 1.

$$V_7 = 0 \left[\frac{m}{s} \right]$$

La expresión para el cálculo del tiempo es la siguiente:

$$t_7 = \frac{L (H + h_r)}{h a} \quad (21)$$

La distancia de retroceso se obtiene de igualar las velocidades del periodo 1 y 7:

$$\sqrt{\frac{2ghy}{L}} = \frac{(H + h_r)g}{c}$$

$$y = \frac{(H + h_r)^2 L g}{2 h a^2} \quad (22)$$

3.4 DIMENSIONAMIENTO PULMÓN

En este apartado se reemplazan los datos de la ecuación termodinámica (Méndez, 1995), teniendo tres estados termodinámicos:

$$P_1 v_1^{1,2} = P_2 v_2^{1,2} = P_3 v_3^{1,2} \quad (23)$$

De la ecuación anterior se despeja el volumen del estado 2:

$$v_2 = \sqrt[1,2]{\frac{P_3 (v_3)^{1,2}}{P_2}} = \sqrt[1,2]{\frac{P_3}{P_2}} * v_3 \quad (24)$$

$$v_{2-3} = v_2 - v_3$$

Reemplazando v_2 y factorizando:

$$v_{2-3} = \sqrt[1,2]{\frac{P_3 (v_3)^{1,2}}{P_2}} - v_3$$

$$v_{2-3} = v_3 \left(\sqrt[1,2]{\frac{P_3}{P_2}} - 1 \right)$$

Despejando v_3 :

$$v_3 = \frac{v_{2-3}}{\left(\sqrt[1,2]{\frac{P_3}{P_2}} - 1 \right)}$$

Expresando de forma general:

$$v_k = \frac{v_{(k-1) \rightarrow k}}{\left(\sqrt[1,2]{\frac{P_n}{P_{(n-1)}}} - 1 \right)} \quad (25)$$

Donde:

$k = \text{contador de 1 a 3}$

$n = \text{contador referente al estado de análisis}$

3.4.1 Celeridad. La celeridad es la velocidad con la que se propaga la onda de sobrepresión, en algunos textos teóricos se expresa esta como c y esta regida por la ecuación de Joukowsky, para este caso se usara una variación que se aprecia en el texto tuberías a presión (Méndez, 1995) que relaciona una constante "C" dependiente de la relación de Poisson (μ) de cada material (relación entre deformación longitudinal y axial). La manera de determinar la celeridad (a) responde a la siguiente ecuación:

$$a = \sqrt{\frac{E/\rho}{1 + \frac{ED}{eE_c} C}} \quad (26)$$

$C = 1 - \mu^2$ [adimensional].

$E = \text{Modulo elástico del fluido [N/m}^2\text{]}.$

D = Sobrepresión en la chimenea de equilibrio [N/m^2].

ρ = Densidad del fluido [kg/m^3]

E_c = Modulo elástico del material de la tubería [N/m^2].

e = Grosor de la pared de la tubería [m].

a = Celeridad [m/s].

Para calcular la celeridad de un fluido cuando se tienen dos materiales o más se ilustra el procedimiento en Impulsión de Aguas Residuales: Golpe de Ariete en Tuberías de Impulsión. Sección 2: cálculo del golpe de ariete (Anónimo, s.f.), definiendo una ecuación para la velocidad (27) y la celeridad media (28). Donde "i" es un contador de 1 hasta "n".

$$V_m = \frac{\sum L_i * V_i}{L_{total}} \quad (27)$$

$$a_m = \frac{L_{total}}{\sum \frac{L_i}{a_c}} \quad (28)$$

Del texto publicado por Méndez (1995) se obtiene una tabla de los materiales más comunes para tuberías y sus relaciones de Poisson, *Figura 11*.

Figura 11. Módulo de elasticidad y relación de Poisson para materiales de tuberías.

Material	E_c (kgf/cm ²)	μ
Acero	$2,10 \cdot 10^6$	0,30
Hierro fundido dúctil	$0,98 \cdot 10^6$	0,25
Concreto	$0,21 \cdot 10^6$	0,10 - 0,15
Asbesto - cemento	$0,24 \cdot 10^6$	—
Polietileno	$8,15 \cdot 10^3$	0,46

Fuente: *Tuberías a presión. Caracas. 221-229.*

También se determina la *ecuación 29* para la presión máxima en la tubería:

$$\Delta P = k * \frac{Lv}{g t_c} \quad (29)$$

k = Es una constante entre 1 y 2, 1 es para una tubería rígida.

L = Longitud de propagación de la onda a un punto x [m].

v = Velocidad del fluido [m/s]

g = Aceleración de la gravedad [m/s²]

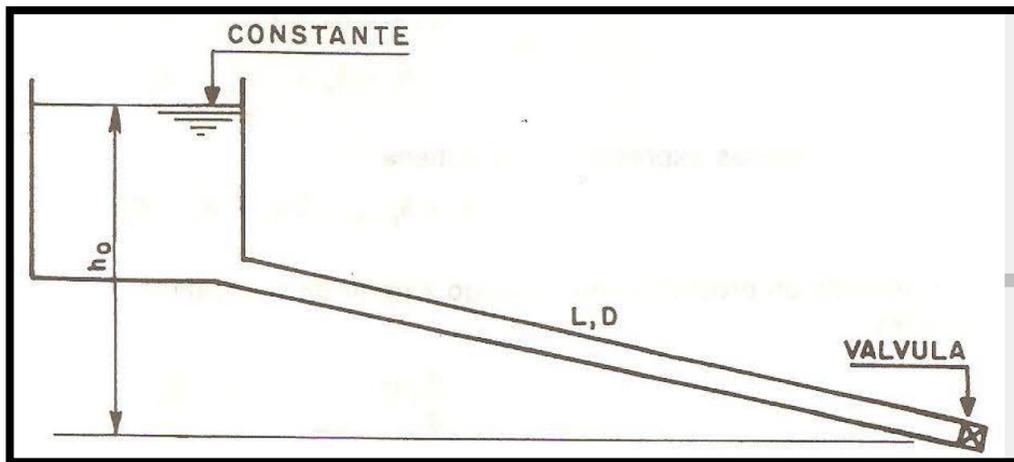
t_c = tiempo de llegada de la onda hasta el punto x [s].

3.4.2 Tiempo crítico. Se describe como el tiempo que tarda la onda de presión en ir y volver, para lograr una sobrepresión adecuada este tiempo debe ser mayor al tiempo de cierre de la válvula de impulso.

$$t_{critico} = \frac{2 L_{total}}{a_m} \quad (30)$$

3.4.3 Método de Allievi.

Figura 12. Método de Allievi, ejemplo clásico.



Fuente: Tuberías a presión. Caracas., p. 221-229.

Cuando se cierra la válvula de golpe se entra en la suposición de que la fuerza que ejerce el agua sobre la válvula genera una reacción que sigue los parámetros de la tercera ley de Newton, en este instante se da que la fuerza de repulsión es igual a la que se estaba ejerciendo sobre la válvula; esta deducción es tomada de Tuberías a presión y no es de interés para el problema actual así que no se va a detallar, pero las ecuaciones a utilizar en este trabajo son las siguientes:

$$h_i + h_{i-1} - 2h_0 = \frac{a}{g}(v_{i-1} - v_i) \quad (31)$$

Relación entre velocidades y cabezales de energía por etapas de cierre de una válvula.

$$K = \frac{\Delta h}{v^2/2g} \rightarrow v = \sqrt{\frac{2g}{K} * \Delta h} \rightarrow v = K' * \sqrt{\Delta h} \quad (32)$$

Donde K es un coeficiente que relaciona la diferencia de alturas con la energía cinética del fluido, este es de ayuda para válvulas ya estandarizadas y es dependiente del porcentaje de cierre de la válvula, si es posible calcular un K para el pulsador, facilitaría mucho el cálculo de la velocidad de repulsión del agua al momento de cerrar la válvula a una velocidad determinada. Por último, se establece la *ecuación 33* como relación de velocidades y cabezas para un cierre en un tiempo menor al tiempo crítico.

$$h_1 - h_0 = \frac{av_0}{g} \quad (33)$$

Siendo $v_0[m/s]$ la velocidad en régimen permanente.

3.5 ECUACIONES BÁSICAS DE LA MECÁNICA DE FLUIDOS

3.5.1 Factor de fricción. En lo expuesto en Cálculo numérico y analítico de las ecuaciones de Karman-Prandtl para la estimación del coeficiente de fricción (Escobar, 2014) se muestra cómo se puede calcular el factor de fricción para tuberías consideradas rugosas, tomando así la siguiente ecuación:

$$f = \left(\frac{1}{2 \log \left(\frac{D}{2\varepsilon} \right) + 1,74} \right)^2 \quad (34)$$

3.5.2 Ecuación de Bernoulli. La ecuación general de la energía (35), tomada de Mecánica de Fluidos (Mott, 2006) será utilizada para el diseño conceptual y definir los parámetros de entrada para el diseño de detalle

$$\frac{P_1}{\gamma} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} + h_A - h_R - h_L = \frac{P_2}{\gamma} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g} \quad (35)$$

h_L = pérdida de energía debido a la fricción.

h_r = Perdida en accesorios.

h_A = Energía entregada por la bomba al fluido.

Z = Altura del punto de medición.

P = Presión en el punto respectivo.

Unidades en metros [m].

$$h_L = f \frac{Lv^2}{D2g} \quad (36)$$

h_L = pérdida de energía debido a la fricción [m].

L = longitud de la corriente del flujo [m].

D = diámetro de la tubería [m].

v = velocidad promedio del flujo [m/s].

f = factor de fricción [adimensional].

$$h_r = K \frac{v^2}{2g} \quad (37)$$

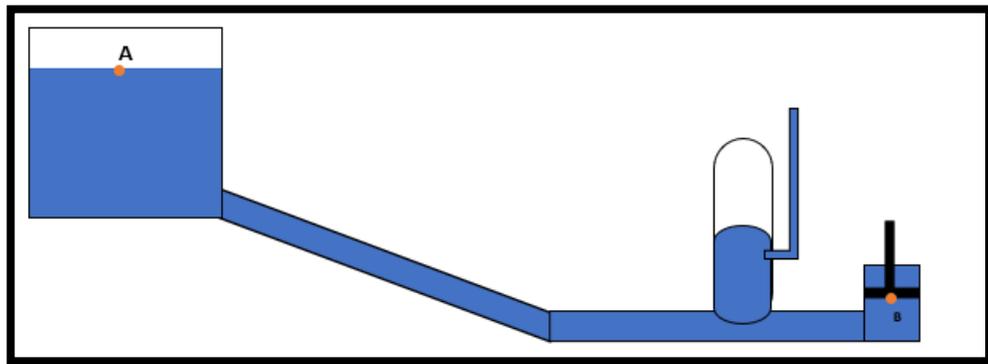
h_L =Perdidas menores [m].

K =Coeficiente de resistencia [m].

v =Velocidad promedio de flujo [m].

3.5.3 Aplicación ecuación de la energía en el sistema. Se calculan las velocidades que lleva el fluido al llegar a la válvula de impulso, para esto se aplica la ecuación de Bernoulli entre el punto superior del tanque de suministro y el asiento del pulsador (*Figura 13*).

Figura 13. Esquema puntos de aplicación ecuación de Bernoulli



Fuente: elaboración propia

Donde:

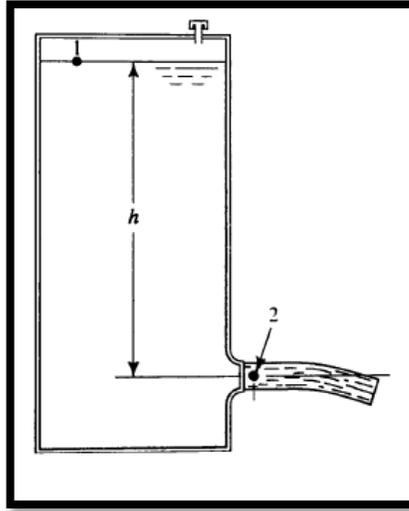
- $P_1 = 0$, debido a que es la atmosférica, medida de forma manométrica.
- $V_1 = 0$, porque se supone el fluido desciende a una velocidad tan baja por el tanque que se puede ignorar.
- $P_2 = 0$, porque en el asiento de la válvula, cuando está abierta, tiene la presión atmosférica.
- h_f , son las pérdidas por fricción $h_f = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g}$
- h_s , son las pérdidas por accesorios $h_s = \sum k * \frac{V^2}{2g}$
- h_m , es la pérdida total de energía, se compone por las pérdidas por fricción y accesorios.

$$V_{max.min} = \sqrt{\frac{2g[(Z_1 - Z_2)]}{1 + \sum k + f \frac{L}{D}}} \quad (38)$$

3.5.4 Ecuación de Torricelli. Esta ecuación es útil para encontrar la velocidad de flujo a la salida de un tanque expuesto a la atmósfera en su parte superior, para emplearla se reemplaza el valor de la gravedad (g) y la profundidad del fluido (h) como se muestra en la *figura 14*.

$$v = \sqrt{2gh} \quad (39)$$

Figura 14. Flujo de salida de un tanque



Fuente: Mecánica de Fluidos. 6ed.p. 179.

3.5.5 Numero de Reynolds. El número de Reynolds es una ayuda para determinar factores de pérdida f para así calcular pérdidas principales, junto con el Diagrama de Moody (Figura 15), para este también se va a necesitar la rugosidad relativa (ϵ) reciproca de la rugosidad absoluta del material de la tubería (ϵ_0), (Mott, 2006):

$$\epsilon = \frac{D}{\epsilon_0} \quad (40)$$

El número de Reynolds se calcula en su manera más estándar, útil para flujo laminar o turbulento, así:

$$N_R = \frac{D * v}{V_c} = \frac{D * v * \rho}{\eta} \quad (41)$$

N_R =Número de Reynolds [adimensional]

D =Diámetro ducto [m]

v =Velocidad promedio de flujo [m/s]

V_c =viscosidad cinemática del fluido [m^2/s]

η =Viscosidad dinámica de fluido [$Pa * s$]

ρ =Densidad [kg/m^3]

Por otra parte, para al encontrar el número de Reynolds se puede calcular el factor de fricción cuando el flujo es laminar como:

$$f = \frac{64}{NR}$$

3.5.6 Potencia hidráulica. Es utilizada para determinar la necesidad de potencia de la bomba respecto al cabezal de entrega, escrita como:

$$P_h = \gamma \cdot Q \cdot h \quad (42)$$

P_h =Potencia hidráulica [*Watts*].

γ =Peso específico [*N/m³*].

Q =Caudal [*m³/s*].

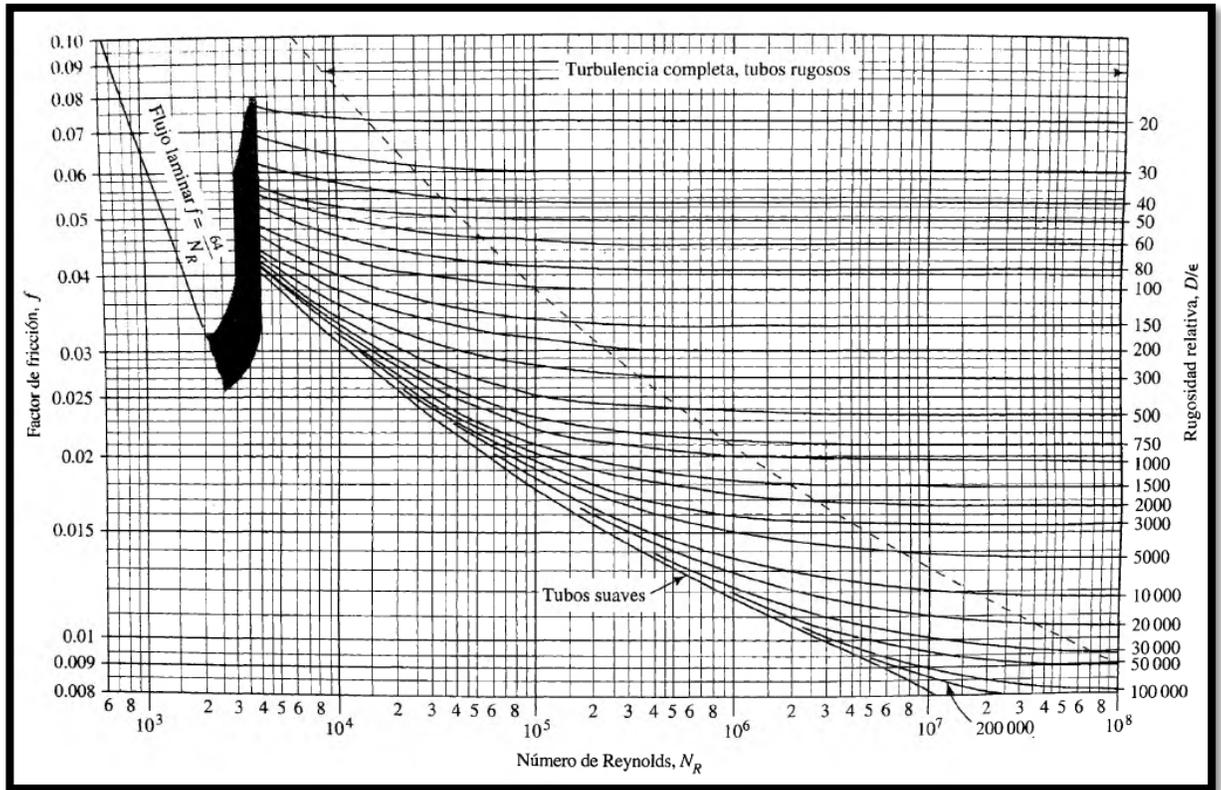
h =Altura [*m*]

Adicionalmente, como una ecuación secundaria, se puede calcular la eficiencia de la siguiente manera.

$$\eta_{total} = \frac{P_{out}}{P_{in}}$$

Siendo P_{out} la potencia a la salida del sistema y P_{in} la potencia a la entrada, por ley de la conservación de la energía este valor nunca será superior a 1.

Figura 15. Diagrama de Moody.



Fuente: Mott(2006, p.626.)

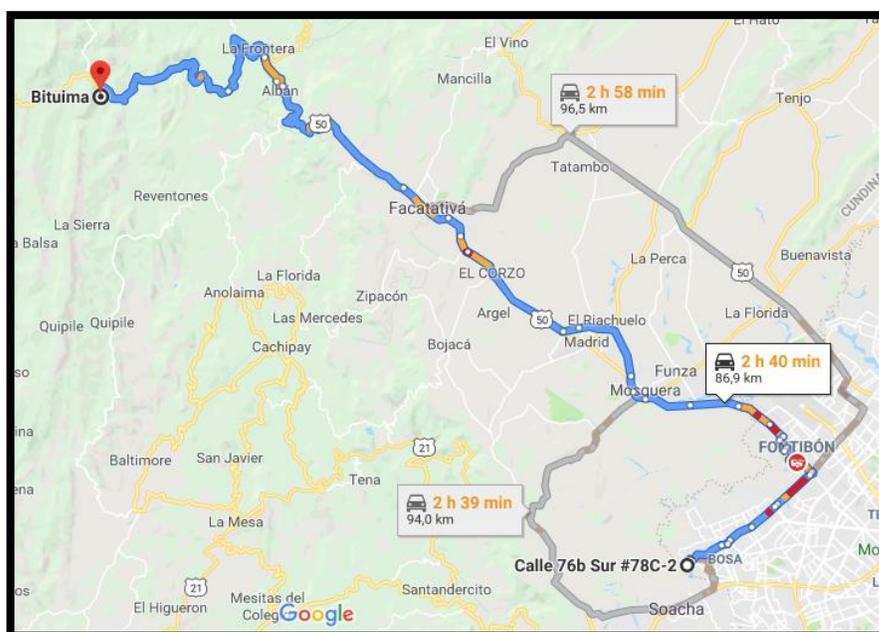
En la parte derecha se muestra que el factor de pérdidas tiene a ser constante entre mayor sea el Numero de Reynolds, esto también tiene que ver con la rugosidad relativa de la tubería, además de la velocidad del fluido. Hay que tener en cuenta que para entrar a hacer este análisis es necesario saber la velocidad del fluido, diámetro de tubería y demás condiciones.

4. FASE DE DISEÑO

4.1 CONDICIONES DE CAMPO

El lugar de instalación de la bomba será en la finca del señor Luis Murcia, ubicada en el municipio de Bituima (Cundinamarca), el trayecto desde la localidad de Bosa, saliendo de la ciudad por la calle 13 en dirección occidente es calculado por Google Maps y se muestra como sigue:

Figura 16. Trayecto Bosa-Bituima



Fuente: Google Maps.

Se realiza una visita de inspección a la finca, con el fin de reconocer el campo de instalación; se decide llevar un rollo de cuerda de 80 metros (figura 17) para medir la altura del terreno en el sitio donde se instalará la bomba y el punto de entrega, además, se utiliza la aplicación *Medidor de ángulo* (Smart, 2018) para smartphones con el fin de aproximar la pendiente del lugar montañoso.

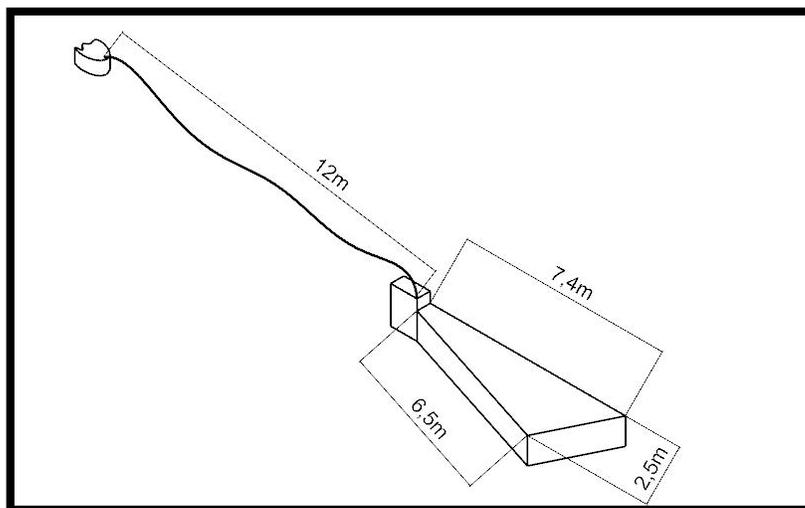
Figura 17. Medición longitudes terreno de instalación



Fuente: elaboración propia

En la figura 18 se muestra un esquema del terreno desde el pozo y el recorrido de la manguera hasta la zona donde se instalarán las canecacas de almacenamiento y la bomba.

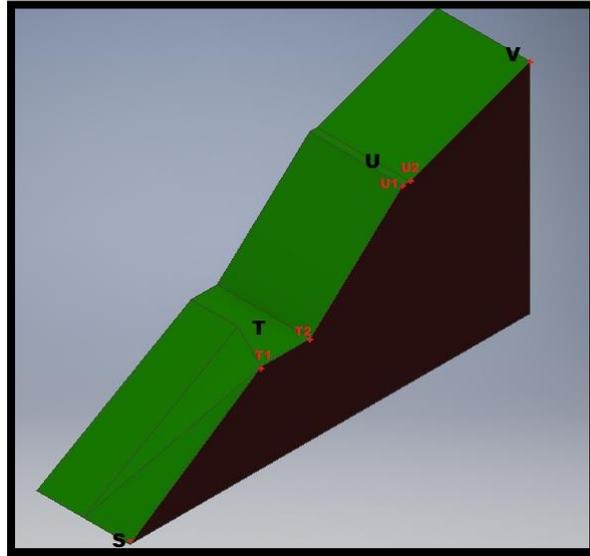
Figura 18. Esquema lugar de instalación.



Fuente: elaboración propia

En la siguiente figura se ilustra un esquema del terreno montañoso denotando como punto “S” la salida de la bomba, además en la *Tabla 1* se muestran las medidas obtenidas, denotando con la letra “A” el depósito de agua y “E” la entrada de la bomba.

Figura 19.Plano general terreno finca



Fuente: elaboración propia

Tabla 1.Longitudes terreno luego de la salida de la bomba.

Sección	Longitud [m]	L acumulada [m]	Ángulo	H [m]	H acumulada [m]
A-E	6,0	6,0	17,5	1,8	1,8
E-S	0,3	6,3	0,0	0,0	0,0
S-T1	37,0	43,3	25,6	16,0	16,0
T1-T2	9,3	52,6	0,0	0,0	16,0
T2-U1	30,0	82,6	19,5	10,0	26,0
U1-U2	2,0	84,6	0,0	0,0	26,0

Sección	Longitud [m]	L acumulada [m]	Ángulo	H [m]	H acumulada [m]
U2-V1	19,0	103,6	18,4	6,0	32,0
Total [m]	103,6			33,8	

Fuente: elaboración propia

4.1.1 Área de riego. Teniendo en cuenta el ancho del terreno que tiende a ser constante según los datos obtenidos (**25m**), las áreas del terreno se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 2. Definición de áreas del terreno

Sección	Áreas [m ²]	Área acumulada [m ²]
S-T1	943,500	943,500
T1-T2	222,648	1166,148
T2-U1	765,000	1931,148
U2-V1	484,500	2415,648
Total [m ²]	2415,648	
Hectáreas	0,242	

Fuente: elaboración propia

El agua bombeada llegara hasta la sección “u” descrita en la *Tabla 1*, debido a que la superficie está dispuesta para instalar a futuro un tanque de almacenamiento dispuesto por el propietario.

4.1.2 Limitaciones hídricas. Para conocer el caudal entregado por el arroyo, se genera el llenado de un valde por medio de un tramo de manguera en un pequeño pozo natural (*figura 20*). La altura de la salida de un tramo de manguera se ubicó aproximadamente a **0,20 metros** bajo el nivel del pozo, puesto que el nivel del pozo se estabiliza en este diferencial de altura (*figura 21*). Se resaltar que el arroyo tiene un pequeño desvío en su caída, por lo cual el agua que se capta en el pozo sólo es una fracción del arroyo.

Figura 20. Pozo de agua bajo arroyo



Fuente: elaboración propia

Por otra parte, la toma de datos se generó el día de la visita, puesto que la empresa de alcantarillado del municipio generó un corte de agua, en consecuencia, a la época de verano, ideal para registrar los datos de diseño.

Figura 21. Toma experimental caudal entregado por el pozo



Fuente: elaboración propia

Para calcular el caudal entregado por el arroyo se conocen los siguientes datos:

- Diámetro real de la manguera $0,0159m$.
- Área de la manguera $1,97 \times 10^{-4} m^2$.
- Diferencia de altura arroyo y salida de manguera $0,20m$.

Aplicando la ecuación 39:

$$v = \sqrt{2gh} = \sqrt{2 \cdot 9,81 \left[\frac{m}{s^2} \right] \cdot 0,20[m]} = 1,9806 \left[\frac{m}{s} \right]$$

El caudal obtenido es de $3,9202 \times 10^{-4} \frac{m^3}{s}$ o **23,52 LPM**.

Con el caudal anterior y la cabeza de entrada se encuentra la potencia que puede suministrar el arroyo, además, utilizando la eficiencia y la cabeza (H) se puede encontrar el caudal de salida y así definir un área específica de riego. Mediante la ecuación 42 la potencia de entrada es:

$$P_{in} = Q\gamma h = 3,9202 \times 10^{-4} \frac{m^3}{s} \cdot 9.810 \frac{N}{m^3} \cdot 1,8m = 6,9223W$$

Se utiliza la siguiente *Tabla 3* (Isla, 2017).

Tabla 3. Extrapolación eficiencia

H/h	2	3	4	6	8	10	12
Rendimiento	0,85	0,81	0,76	0,67	0,57	0,43	0,23

Fuente: *Ariete hidráulico para riego*

Extrapolando se obtiene una eficiencia estimada de 0,1414, con una relación de alturas de 14,4. Posterior a esto, a partir de la *ecuación 42* se llega a:

$$Q_{out} = \frac{P_{in}}{\gamma H} \cdot \eta = \frac{6,9223W}{9,810 \frac{N}{m^3} \cdot 26m} \cdot 0,1414 = 3,8376 \times 10^{-6} \left[\frac{m^3}{s} \right] = 0,2303 [LPM].$$

A partir de datos empíricos entregados por el dueño de la finca y sabiendo que junto al sitio donde va a llegar el agua transportada hay tres plantas (maíz, plátano y frijol) se pudo obtener que el maíz consume por metro cuadrado $2,7083 \times 10^{-3} LPM$, el plátano $2,0833 \times 10^{-3} LPM$ y para el frijol no se tenía el valor real de consumo, así que usando un volumen conocido a partir de un envase de 3.74L se pudo regar un área de $6m^2$ y con estos dos datos se obtuvo el consumo mostrado en la *tabla 4*.

A continuación, se calcula el área de alcance para cada planta descrita anteriormente para el caudal calculado y así conocer que terreno puede ser regado a partir de las limitaciones hídricas:

$$A_{alcance} [m^2] = \frac{Q_{out} \left[\frac{m^3}{s} \right]}{Q_{consumo} \left[\frac{m^3}{s \cdot m^2} \right]}$$

Siendo $Q_{consumo}$ el caudal que consume cada metro cuadrado de una planta en específico.

Tabla 4. Datos registrados de consumo por planta de forma empírica

Consumo	Plátano	Maíz	Frijol
<i>Hectarea</i> <i>L/dia</i>	39000	30000	6233
$m^2(\frac{L}{dia})$	3,9	3,0	0,62
$m^2 (LPM)$	$2,71 \times 10^{-3}$	$2,08 \times 10^{-3}$	$4,33 \times 10^{-4}$
$m^2 (m^3 /s)$	$4,51 \times 10^{-8}$	$3,47 \times 10^{-8}$	$7,21 \times 10^{-9}$
Área de alcance (m^2)	85,02	110,52	531,92

Fuente: Ariete hidráulico para riego

En la sección T2 – U1 (véase p. 45, Figura 19. Plano general terreno finca) hay un cultivo de frijol de aproximadamente $300m^2$ de área...véase la sección 4.1.1... **Tabla 2**; se determina que el área del cultivo de frijol puede ser cubierta por el caudal obtenido a la salida de la bomba, así que será esta área donde el dueño de la finca podrá hacer un sistema de riego con el agua obtenida en el proceso de bombeo.

De lo anterior sabemos que el área de $300m^2$ consume un caudal de $2,3808 \times 10^{-6} [\frac{m^3}{s}]$, pero en medida que no se conocen las pérdidas a la salida de la bomba es preferible usar un **factor de llenado** 1,1 para así asumir un caudal mayor al necesario y evitar errores, de este modo el caudal necesario es $2,6189 \times 10^{-6} [\frac{m^3}{s}]$ (**0,143LPM**), siendo este el caudal que debe entregar la bomba con el cual se podrá entrar a la fase de diseño.

4.1.3 Dimensionamiento del ariete hidráulico. Para entrar en la fase del diseño hidráulico es necesario dimensionar la bomba, estos diámetros se selecciona según el caudal que entregado por el arroyo a la bomba (23,52 LPM), empleando la tabla mostrada en la *figura 22*.

Figura 22. Tabla de selección dimensiones.

tamaño	Nº	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Diámetro	pulgadas	3/4	1	1 ^{1/4}	1 ^{1/2}	2	2 ^{1/2}	3	4	5	6
	mm	20	25	32	40	50	65	80	100	125	150
Caudal	Litros/min	3-6	6-16	12-30	18-45	30-65	50-110	80-180	120-250	180-400	280-700
Diámetro conducto de elevación	pulgadas	3/8	1/2	3/4	1	1	1 ^{1/2}	2	2	2	2 ^{1/2}

Fuente: RUBIANO SUÁREZ, Sergio Alejandro y CUERVO CONTRERAS, John Sebastian. Diseño y montaje de un sistema de bombeo mediante ariete hidráulico. Proyecto de grado de Tecnología Mecánica. Bogotá D.C.

La tabla muestra entonces que se debe construir un ariete de 1^{1/4} in, pero los resultados analizados en la consulta bibliográfica muestran que las perdidas afectan el caudal entregado por el ariete, entonces se eligen los diámetros de 1 in para las construcciones de la bomba y de 1/2 in para la tubería de salida.

En resumen, para iniciar los cálculos se tienen en cuenta los siguientes parámetros con los que debe cumplir el sistema de bombeo:

- La altura de cabeza (*H*) es de 26 metros
- La extensión de la tubería de salida es de 85,57 metros.
- Los accesorios para la construcción del cuerpo de la bomba, así como la tubería que se encarga de abastecerla deben ser de 1 in.
- El área que se desea regar es de 300m² con un caudal de entrega de 2,6189x10⁻⁶ [$\frac{m^3}{s}$].

4.2 DISEÑO DETALLADO

4.2.1 Cálculo de pérdidas en accesorios. En este apartado se realiza una tabla de los accesorios normalizados que componen el ariete, con el fin de calcular las pérdidas en cada uno y sumar estos valores.

4.2.1.1 Coeficiente de pérdida válvula de impulso. Se consulta en los proyectos nombrados en el estado de arte las carreras de las válvulas de impulso utilizadas, además, se realizan iteraciones en *Excel* (ver anexo A, hoja "iteración carrera"), usando la ecuación 4 (fuerza de arrastre) junto con la diferencia entre esta y la fuerza ejercida por el resorte, aplicando en la ecuación un listado amplio de carreras para predecir las consecuencias que tiene el cambio de esta variable, así se llega a la conclusión que se debe ajustar una carrera mínima teórica (S) de **5.2mm o 0.21in** aproximadamente.

$$R_s = \frac{2,43 - 1,06 * S + 10^{(0,95-13,3*S)}}{S} = \frac{2,43 - 1,06 * 0,21in + 10^{(0,95-13,3(0,21in))}}{0,21in}$$

$$R_s = 10,87$$

Para el cálculo es necesario restar 1 debido a que se espera que con el resorte la válvula tenga menos pérdidas. Así el valor de R_s será 9,868 solo para el cálculo de pérdidas en accesorios.

Los valores del coeficiente de fricción para los demás accesorios que conforman el ariete son obtenidos experimentalmente y se encuentran en tablas o graficas de diferentes autores, para esto se utilizan las tablas publicadas por (NUCLEAR, 2013) (mostrada en el anexo B.), además son comparadas con la información de (Mott, 2006), se muestra el resumen de los coeficientes de fricción:

Tabla 5. Coeficientes de fricción accesorios del ariete

Accesorio	Cantidad	K
Codo 90° PVC	1	0,316
Codo 90° Galvanizado	1	0,945
Te	1	0,630
Válvula de bola	1	0,094
Pulsador	1	9,868
		$\sum K = 11,85$

Fuente: elaboración propia

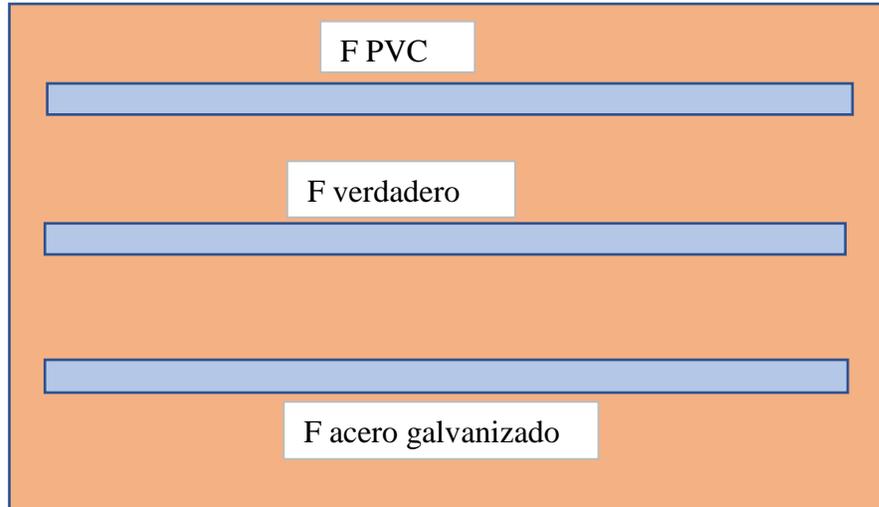
4.2.1.2 Perdidas en los niples. Para los niples que conforman el ariete no se determinan las pérdidas por fricción, porque estos tienen longitudes entre 5 y 10 centímetros que no afectan de manera drástica los cálculos, por lo anterior estos se pueden ignorar.

4.2.2 Cálculo velocidad del flujo en la bomba. Primeramente, se debe calcular la velocidad del flujo en la bomba, conociendo la longitud y el diámetro interior del tubo de PVC a la entrada que en este caso son de **6m** y **0,0302m**, respectivamente.

Para realizar una aproximación del factor de fricción del ducto de entrada hasta el pulsador compuesto por dos materiales, se llevan a cabo iteraciones entre dos factores de fricción calculados, el primero es tomando los datos para un tubo con accesorios en PVC (este se calcula para suponer un factor para el codo de PVC que se dispondrá después del depósito del agua, se resalta que este factor de fricción debe ser mayor al real) y el segundo se calcula, suponiendo que toda la tubería está construida de acero galvanizado incluyendo los accesorios. Por lo

anterior se sabe que el verdadero factor de fricción está entre estos dos valores, se muestra un esquema en la *figura 23*.

Figura 23. Esquema aproximación factor de fricción



Fuente: elaboración propia

El procedimiento inicia determinando un factor de fricción de la tubería de PVC, tomando el diámetro interior del catálogo del fabricante (Mexichem soluciones integrales, PAVCO, 2014) para el tubo RDE 21 PVC de 1in y su rugosidad de la tabla mostrada por Rubiano Suarez & Cuervo Contreras (2017). Este factor de fricción se calcula mediante la *ecuación 32*.

$$f = \left(\frac{1}{2 \log \left(\frac{D}{2\varepsilon} \right) + 1,74} \right)^2 = \left(\frac{1}{2 \log \left(\frac{30,2mm}{2 * 0,0015mm} \right) + 1,74} \right)^2$$

$$f = 0,01052$$

Ahora se calcula el factor de fricción, suponiendo que la tubería es de acero galvanizado. Se realiza entonces la medición del diámetro interior de un niple adquirido y se encuentra que este valor coincide con el mostrado en la tabla para acero cedula 40 de 1in expuesta en Mott (2006, p.601), se procede entonces a

tomar estos datos para los cálculos, la rugosidad expuesta en Mott (2006, p. 235) para el acero galvanizado.

$$f = \left(\frac{1}{2 \log \left(\frac{D}{2\varepsilon} \right) + 1,74} \right)^2 = \left(\frac{1}{2 \log \left(\frac{26,6mm}{2 * 0,15mm} \right) + 1,74} \right)^2$$

$$f = 0,0315$$

Aplicando la *ecuación 36* y reemplazando los valores de la longitud de la tubería de entrada y el diámetro interior según corresponda al PVC o acero galvanizado. Se resalta que para la velocidad máxima no se tiene en cuenta el coeficiente de perdidas principales.

$$V_{max} = \sqrt{\frac{2g[(Z_1 - Z_2)]}{1 + \sum k + f \frac{L}{D}}}$$

$$V_{max} = \sqrt{\frac{2 \cdot 9,81 \left[\frac{m}{s^2} \right] \cdot 1,8 [m]}{1 + 11,85}} = 1,6573 \frac{m}{s}$$

$$V_{min} = \sqrt{\frac{2 \cdot 9,81 \left[\frac{m}{s^2} \right] [(1,8m)]}{1 + 12,48 + 7,1023}} = 1,3096 \frac{m}{s}$$

Los caudales obtenidos en litros por segundo, reemplazando el valor del área de la válvula son:

$$Q_{max} = 0,5865 \text{ l/s}$$

$$Q_{min} = 0,4635 \text{ l/s}$$

El caudal medio entre estos dos valores es:

$$Q_{medio} = 0,5250 \frac{l}{s}$$

Luego se interpola, tomando los valores de la tabla del catálogo del fabricante (Mexichem soluciones integrales, PAVCO, 2014, p.19) para los factores de perdidas (Anexo C), este proceso se resume en la *tabla 6*.

Tabla 6. Resultados interpolación para obtener h_f

h_f catalogo PAVCO	
$Q[l/s]$	$\mu[m/m]$
0,5	0,0201
0,5250	0,0221
0,6	0,0281

Fuente: elaboración propia

Se multiplica el factor obtenido por interpolación del catálogo por la longitud de la tubería de entrada (6m), con el fin de encontrar un valor aproximado para la pérdida de fricción en la tubería que tenga un mayor argumento para su selección teórica, debido a que son factores que maneja el fabricante; este resultado es $h_f = 0,1321 [m]$, ahora se calcula un valor de caudal medio que entrará en la bomba:

$$Q_{corregido} = A * \sqrt{\frac{2 g ((Z_1 - Z_2) - h_f)}{1 + \sum k}}$$

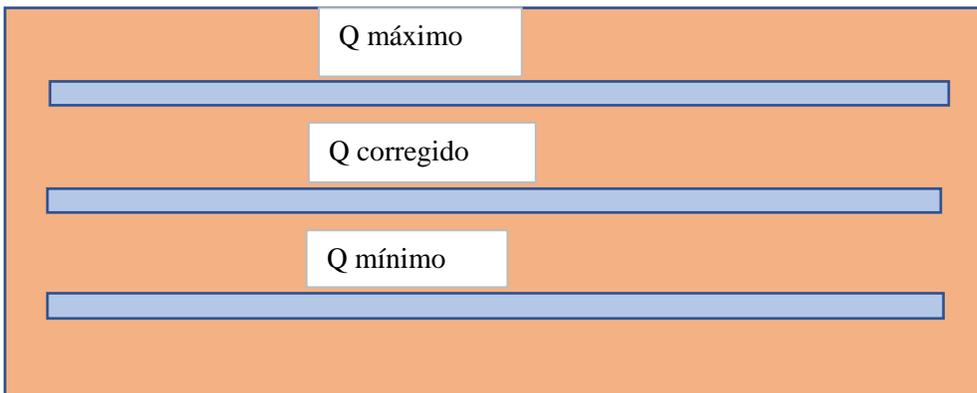
$$Q_{corregido} = 3,54 \times 10^{-4} [m^2] * \sqrt{\frac{2 * 9,81 \left[\frac{m}{s^2} \right] (1,8[m] - 0,1321[m])}{1 + 11,85}} * 1000$$

$$Q_{corregido} = 0,5631 \frac{l}{s}$$

Con el resultado anterior, se busca relacionar este valor con los caudales máximo ($Q_{max} = 0,5865 \text{ l/s}$) y mínimo ($Q_{min} = 0,4635 \text{ l/s}$).

Así mismo, se tiene en cuenta que existen dos rangos entre el caudal medio y alguno de los dos extremos (mínimo o máximo). Por lo anterior, se quiere encontrar el rango más cercano al valor del caudal medio. A este rango, se busca aplicar de nuevo el procedimiento descrito anteriormente con nuevos caudales máximo, mínimo y corregido. Se itera las veces que se crean necesarias hasta que el error porcentual sea admisible.

Figura 24. Esquema iteraciones caudal



Fuente: elaboración propia

Finalmente se define el caudal real que entra a la bomba. En este caso se realizaron 6 iteraciones (véase Anexo D. iteraciones para el caudal real de entrada), obteniendo los datos mostrados de la última como sigue:

Tabla 7 Iteración final caudal.

	m^3/s	l/s	LPM	$v \left[\frac{m}{s} \right]$
$Q_{sup\ max}$	$5,635 \times 10^{-4}$	0,56350	33,8101	1,5921
$Q_{perdidas}$	$5,616 \times 10^{-4}$	0,56158	33,6947	1,5867
$Q_{sup\ min}$	$5,597 \times 10^{-4}$	0,55966	33,5794	1,5813
Q_{real}	$5,6158, \times 10^{-4}$	0,5616	33,6946	error(%)
				0,0003

Fuente: elaboración propia

En la *tabla 8* se muestra que el error porcentual es de 0,0003% por lo que se considera que este dato se debe tomar como el caudal teórico corregido que entrará a la bomba.

Entrando con el caudal real en las tablas del fabricante (Mexichem soluciones integrales, PAVCO, 2014, p. 19) , para un tubo RDE 21 de 1in de diámetro nominal; al realizar la interpolación (*Tabla 8*) se encuentra que la perdida es de $0,0250 \left[\frac{m}{m} \right]$, multiplicando por la longitud del ducto, el valor de perdida principal en la tubería de entrada es de $h_{freal} = 0,1501 [m]$.

Tabla 8. Interpolación con datos catalogo Pavco

$Q[l/s]$	$h_f[m/m]$
0,5	0,0201
0,5616	0,0250
0,6	0,0281

Fuente: elaboración propia

Se encuentra entonces que la velocidad corregida que lleva el fluido al llegar a la válvula de impulsión corresponde a:

$$V_{real} = \sqrt{\frac{2 g ((Z_1 - Z_2) - h_{freal})}{1 + \sum k}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 9,81 \left[\frac{m}{s^2} \right] ((1,8[m]) - 0,1501[m])}{1 + 11,85}}$$

$$V_{real} = 1,5867 \frac{m}{s}$$

El siguiente paso es encontrar el número de Reynolds, el valor de la viscosidad cinemática del agua ($\nu = 1.02 \times 10^{-6} \left[\frac{m^2}{s} \right]$) se toma de realizar la interpolación en la tabla mostrada en el *Anexo E Mott (2006, p.589)*, entrando con el valor de 20°C que

es la temperatura ambiente aproximada del sitio de instalación, cuando la bomba será puesta en funcionamiento.

$$NR = \frac{1,587 \frac{m}{s} \cdot 0,0266m}{1,02 \times 10^{-6} \frac{m^2}{s}} = 4,13 \times 10^4$$

El comportamiento del flujo en la entrada de la bomba es de tipo turbulento, puesto que $NR > 4000$, se tiene entonces que la ecuación aplicada para encontrar el factor de fricción es correcta.

4.2.3 Válvula de impulsión. Esta válvula es la encargada de generar el golpe de ariete, por lo tanto, su fabricación y selección debe ser cuidadosa. Para dimensionar esta válvula se debe tener en cuenta el diámetro del que está construido el ariete. Este componente está situado sobre el niple que se encuentra arriba del codo a 90° . La posición de la válvula es normalmente abierta, es decir que su cierre se realiza gracias a la velocidad del agua que entra en la bomba, su apertura se genera por acción de su propio peso y un resorte.

Por otra parte, se debe conocer el peso total de la válvula, se toma este dato de la medida de una balanza, obteniendo:

$$W_{valvula} = 0,3432 [N]$$

Se calcula el coeficiente de arrastre de la válvula, reemplazando el valor de la carrera ya definida anteriormente en pulgadas ($S = 0,21in$).

$$\varphi_s = \frac{0,345 - 0,275(S) + 10^{(0,52 - 6,85(S))}}{S} = 2,04$$

El siguiente paso es calcular la fuerza hidráulica o de arrastre que el fluido impone sobre la válvula, teniendo en cuenta el área con la que hace contacto, es decir, el área del plato de la válvula de pie, así reemplazando en la *ecuación 4*, se obtiene:

$$F_{arraastre} = \frac{\varphi_s * (V_{corregida})^2 * A * \gamma}{g}$$

$$F_{arraastre} = \frac{2,04 \cdot \left(1,5867 \left[\frac{m}{s}\right]\right)^2 \cdot 6,41x^{-4}[m^2] \cdot 9,81x10^3 \left[\frac{N}{m^3}\right]}{9,81 \left[\frac{m}{s^2}\right]}$$

$$F_{arraastre} = 3,2972N$$

Este dato representa el peso máximo que debe tener la válvula de impulsión para que el fluido logre generar su apertura.

4.2.4 Selección del resorte. La válvula de impulso se debe cerrar lo más rápido posible para generar el golpe, por esta razón se decide modificar el resorte de compresión que viene de fabrica en la válvula de pie. Primeramente, se realizan consultas en manuales de fabricantes para tener en cuenta posibles opciones de compra, seguido de esto se visita la fábrica de resortes ResorteKnia ubicada en la localidad de Bosa, donde se procede a una búsqueda en saldos de fabricación, porque la empresa no cuenta con manuales técnicos con gran información técnica debido a que sus pedidos son por encargo, así se escogen ocho posibles candidatos útiles, realizando entonces la respectiva toma de datos; entre los cuales se encuentran: longitud inicial, longitud final al aplicar una carga, diámetro del alambre, diámetro del orificio interior y constante; estos datos son obtenidos mediante el empleo de un calibrador pie de rey y un dinamómetro. En la *figura 25* se muestran 6 de los 8 muelles utilizados y en la *tabla 9* los datos obtenidos.

Figura 25. Resortes seleccionados para iteraciones



Fuente: elaboración propia

Tabla 9. Datos resortes seleccionados

N°	$Long_i$ [mm]	S_1 [mm]	m_1 [Kg]	k_1 [Kg/mm]	S_2 [mm]	m [Kg]	k_2 [Kg/mm]	k [Kg/mm]	k [N/mm]	k [N/m]
1	17,0	6,0	0,33	0,054	3,0	0,17	0,057	0,05	0,54	543,452
2	15,0	3,5	0,33	0,09	8,0	1,10	0,13	0,11	1,13	1129,51
3	19,5	3,0	1,10	0,36	3,0	1,10	0,36	0,36	3,59	3595,77
4	13,6	5,0	0,33	0,06	3,5	0,17	0,04	0,05	0,55	556,87
5	16,5	5,0	0,33	0,06	10,5	1,27	0,12	0,09	0,91	911,78
6	19,0	3,5	0,33	0,09	12,0	1,27	0,10	0,09	0,97	974,24
7	14,0	6,0	0,33	0,05	3,0	0,17	0,05	0,05	0,54	543,45
8	19,0	6,0	1,10	0,18	6,0	1,10	0,18	0,18	1,79	1797,88

Fuente: elaboración propia

Llegados a este punto, desarrollando iteraciones en Excel con el peso de la válvula para encontrar un resorte adecuado, se toma la decisión de mandar fabricar dos prototipos con una constante específica o que por lo menos se aproximen a esta, tomando los datos mostrados en el manual Lee Spring (s.f, p.107) ya que para

obtener una constante exacta se necesita realizar por lo menos dos o más ejemplares para así añadir o quitar espiras, según la información dada por el operario encargado de la manufactura de estos elementos.

El muelle escogido finalmente es el resultante de la fabricación, ya que es el que mejor se ajusta a los datos de la carrera mínima y las variaciones que esta pueda tener, teniendo en cuenta que los datos dados para la manufactura no fueron iguales a los obtenidos luego de realizar la prueba correspondiente para la captura de sus características finales en el dinamómetro, pero que sin embargo fueron aproximados. La información se muestra en la *Tabla 10*.

Tabla 10. Características resorte seleccionado.

N°	$Long_i[mm]$	$Long_f[mm]$	$S[mm]$	$W[N]$	$K[N/m]$	$F [N]$
1	17	10	7	3,8	542,8571	2,8283

Fuente: elaboración propia

4.2.5 Peso del pulsador. El peso total del pulsador se obtiene de sumar los pesos de la válvula y el muelle:

$$W_{válvula} + W_{resorte} = 0,3432[N] + 2,8283[N] = 3,1715[N]$$

Como es de esperarse el peso total del pulsador está por debajo de la fuerza de arrastre calculada anteriormente, es decir al peso máximo que debe tener para ser elevado por el agua, por lo anterior, su dimensionamiento es correcto.

4.2.6 Celeridad. Para el cálculo de la velocidad de propagación de la onda de presión se deben tener en cuenta que la onda se propaga por dos materiales; el primero, es acero galvanizado, material con el que será construida la bomba y tiene una longitud aproximada de **0,30m**; y el segundo es el PVC, material de la tubería de entrada con una longitud de **6m**.

Se toma como ejemplo el procedimiento mostrado en Impulsión de Aguas Residuales (Anónimo, s.f, pp.12-14) para calcular la celeridad. Por otro lado, se aclara que se conoce el caudal corregido presente en el sistema y es el mismo entre la entrada de la tubería y el punto final de la bomba.

Dicho lo anterior, el primer paso es calcular una velocidad media con las velocidades del fluido en cada sección de tubería, conociendo el caudal y los diámetros interiores de cada tramo, en la siguiente tabla se muestra los cálculos obtenidos:

Tabla 11. Características para cálculo de celeridad

	Diámetro interior[m]	Área [m ²]	Caudal [$\frac{m^3}{s}$]	Velocidad [$\frac{m}{s}$]
Tubería PVC	0,0302	7,16x10 ⁻⁴	5,6158x10 ⁻⁴	0,7840
Tubería acero galvanizado	0,0266	5,56x10 ⁻⁴	5,6158x10 ⁻⁴	1,0105

Fuente: elaboración propia

La velocidad media luego de remplaza los valores conocidos es:

$$V_m = \frac{\sum L_i * V_i}{L_{total}} = \frac{(6[m] * 0,7840) + (0,3[m] * 1,0105)}{6,3m} = 0,7947 \left[\frac{m}{s} \right]$$

El segundo paso es calcular la celeridad para cada material teniendo en cuenta; la densidad del agua $\rho = 1000 \text{ Kg}/m^3$, además de los siguientes datos, tomados de las tablas mostradas por Mexichem soluciones integrales, PAVCO, (2014, p.7) y Mott (2006, p.601)

- El módulo de elasticidad del agua $E = 2,02 \times 10^9 [N/m^2]$.
- Los diámetros interiores de cada tramo que son $D = 30,2mm$ y $D = 26,6mm$ para el PVC y el acero, respectivamente.
- Los módulos de elasticidad del PVC y el acero galvanizado que son $E_c = 2,76 \times 10^9 N/m^2$ y $E_c = 207 \times 10^9 N/m^2$, respectivamente, tomando el primero

del catálogo de Pavco y el segundo de Shigley (Budynas & Nishbett, 2008,p.987).

- Los espesores para el tubo de PVC RDE 21 de 1[in] y el el acero galvanizado que corresponden a $e = 1,6mm$ y $e = 3,38mm$,respectivamente.
- Según Méndez (1995), l factor $C = 1$, ya que las tuberías son de PVC y acero, y sus juntas son roscadas o soldadas (p.222).

$$a_{PVC} = \sqrt{\frac{E/\rho}{1 + \frac{ED}{eE_c} C}} = \sqrt{\frac{2,02 \times 10^9 \text{ N/m}^2 / 1000 \text{ Kg/m}^3}{1 + \frac{2,02 \times 10^9 \text{ N/m}^2 * 0,0302 \text{ m}}{0,0016 \text{ m} * 2,76 \times 10^9 \text{ N/m}^2}}} = 369 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$$

$$a_{acero} = \sqrt{\frac{2,02 \times 10^9 \text{ [N/m}^2\text{]} / 1000 \text{ [Kg/m}^3\text{]}}{1 + \frac{2,02 \times 10^9 \text{ [N/m}^2\text{]} * 0,0266 \text{ [m]}}{0,00338 \text{ [m]} * 207 \times 10^9 \text{ [N/m}^2\text{]}}} = 1370 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$$

Por último, se calcula la celeridad media:

$$a_m = \frac{L_{total}}{\sum \frac{L_i}{a_c}} = \frac{6,30 \text{ [m]}}{\frac{6 \text{ [m]}}{369 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]} + \frac{0,3 \text{ [m]}}{1370 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]}} = 382,2919 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$$

4.2.7 Sobrepresión. La sobrepresión depende del tiempo de cierre de la válvula de impulsión y la relación que este tiene con el tiempo crítico. Por lo anterior se inicia calculando el tiempo crítico mediante la *ecuación 29*.

$$t_{critico} = \frac{2 L_{total}}{a_m} = \frac{2 * 8,5 \text{ [m]}}{382,2919 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]} = 0,0444 \text{ [s]}$$

Para determinar el tiempo de cierre se realiza el análisis de la válvula con los conceptos del **movimiento armónico simple**, debido a que el resorte está sometido a un movimiento oscilatorio.

$$t_{cierre} = 0,0126[s]$$

Se calcula la sobrepresión mediante la *ecuación 31*, ya que el $t_{cierre} < t_{critico}$:

$$\Delta h = \frac{a_m V_m}{g} = \frac{382,2919 \left[\frac{m}{s} \right] * 0,7947 \left[\frac{m}{s} \right]}{9,81 \left[\frac{m}{s^2} \right]} = 30,98[m]$$

4.2.8 Periodos del ciclo de Krol. Los siete periodos que conforman el ciclo de Krol ignoran el pulmón que amortigua las pulsaciones del golpe, se debe tener en cuenta las perdidas por fricción y por accesorios, así mismo la pérdida total de carga, teniendo en cuenta la velocidad corregida. Los datos nombrados ya se conocen y se muestran como sigue:

- h_f , son las perdidas por fricción:

$$h_{freal} = 0,1501 [m]$$

- h_s , son las perdidas por accesorios:

$$h_{sreal} = \sum k * \frac{(V_{real})^2}{2g} = 11,85 * \frac{(1,5867[m/s])^2}{2 * 9,81 \left[\frac{m}{s^2} \right]} = 1,5214[m]$$

- h_m , es la pérdida total de energía, se compone por las pérdidas por fricción y accesorios:

$$h_m = 0,1501 [m] + 1,5214[m] = 1,6716[m]$$

4.2.8.1 Periodo 1. Previo al cálculo de los periodos que se debe primero encontrar el valor de la distancia de retroceso del agua "y":

$$y = \frac{(H + h_r)^2 L g}{2 h a^2} = \frac{(26[m] + 0,2688[m])^2 \cdot 6,3[m] \cdot 9,81 \left[\frac{m}{s^2}\right]}{2 \cdot 1,8[m] \cdot (382,2919 \left[\frac{m}{s}\right])^2} = 0,0810[m]$$

Con el dato anterior, se calculan la velocidad y el tiempo 1, reemplazando en las ecuaciones 6 y 7, respectivamente.

$$t_1 = \sqrt{\frac{2 * 6,3 * 0,0810}{9,81 * 1,8}} = 0,24[s]$$

$$V_1 = \sqrt{\frac{2 * 9,81 * 1,8 * 0,0810}{6,3}} = 0,6738 \left[\frac{m}{s}\right]$$

4.2.8.2 Periodo 2. La velocidad 2 se obtiene reemplazando en la ecuación 8, teniendo en cuenta que la fuerza de arrastre es igual al peso máximo del pulsador calculado anteriormente:

$$V_2 = \sqrt{\frac{W_p}{\varphi * A_p * \rho}} = \sqrt{\frac{3,1715[N]}{2,04 * 6,41 \times 10^{-4} [m^2] * 1000 \left[\frac{kg}{m^3}\right]}} = 1,5562 \left[\frac{m}{s}\right]$$

Se encuentra el valor del coeficiente agrupado de pérdidas “M” y luego el coeficiente agrupado de pérdidas totales “Z” como se muestra:

$$M = \frac{2gh}{v_{real}^2} = \frac{2 * 9,81 \left[\frac{m}{s^2} \right] * 1,8[m]}{\left(1,5867 \left[\frac{m}{s} \right] \right)^2} = 14,02$$

Haciendo uso de la *ecuación 10*:

$$Z = M - 1 = 14,02 - 1 = 13,02$$

La velocidad mínima que puede llevar el fluido se calcula mediante la *ecuación 11*, esta velocidad se utiliza para encontrar el coeficiente de resistencia al cierre del pulsador:

$$V_2' = 0,5 \sqrt{\frac{2gh}{Z}} = 0,5 \sqrt{\frac{2 * 9,81 \left[\frac{m}{s^2} \right] * 1,8[m]}{13,02}} = 0,82 \left[\frac{m}{s} \right]$$

Se calcula el coeficiente de resistencia al cierre de la válvula de impulso, teniendo en cuenta que el área de contacto es la del niple de acero galvanizado:

$$K_0 = \frac{W_p}{A_{galvanizado} * \rho * (V_2')^2} = \frac{3,1715[N]}{5,56x10^{-4}[m^2] * 1000 \left[\frac{kg}{m^3} \right] * 0,82 \left[\frac{m}{s} \right]^2} = 8,42$$

Ahora se encuentran los valores que conforman la *ecuación 12*, reemplazando el área del pulsador:

$$\sqrt{\frac{W_p Z}{2A_p h \gamma k_0}} = \frac{3,1715[N] * 13,02}{2 * 6,41 \times 10^{-4}[m^2] * 1,8[m] * 9.810[N] * 8,42} = 0,47$$

$$\sqrt{\frac{yZ}{L}} = \sqrt{\frac{0,0810[m] * 13,02}{6,3[m]}} = 0,41$$

$$\sqrt{2ghZ} = \sqrt{2 * 9,81 \left[\frac{m}{s^2}\right] * 1,8[m] * 13,02} = 21,4$$

Finalmente, reemplazando se obtiene:

$$t_2 = \frac{6,3}{21,44} * \ln\left(\frac{(1 + 0,47)(1 - 0,41)}{(1 - 0,47)(1 + ,041)}\right) = 0,0408[s]$$

4.2.8.3 Periodo 3. La velocidad en este periodo se mantiene igual a la del periodo dos, en este punto la válvula se cierra debido a que la fuerza de arrastre del agua. En este punto se utiliza un nuevo coeficiente (Z_1) que corrige el coeficiente de arrastre calculado anteriormente. Reemplazando en las ecuaciones 13 y 14 se obtiene:

$$V_3 = V_2 = 1,5562 \left[\frac{m}{s}\right]$$

$$Z_1 = \sqrt{2\phi A_p h \gamma} = \sqrt{2 * 2,04 * 6,41 \times 10^{-4} * 1,8 * 9.810} = 6,80$$

$$t_3 = \sqrt[3]{\frac{3 * 6,3[m] * 0,005210[m] * 1,5562 \left[\frac{m}{s}\right]}{2 \left(9,81 \left[\frac{m}{s^2}\right]\right)^2 * 1,8[m] \left(1 - \frac{3,1715[N] * 13,02}{6,8^2}\right)}}$$

$$t_3 = 0,1579[s]$$

4.2.8.4 Periodo 4. La velocidad y el tiempo en este periodo se calculan mediante las ecuaciones 15 y 16, respectivamente.

$$t_4 = \frac{2L}{a_m} = \frac{2 * 6,3[m]}{382,2919 \left[\frac{m}{s} \right]} = 0,0314[s]$$

$$V_4 = V_3 - \frac{(h + h_r)g}{a_m} = 1,49 \frac{m}{s} - \frac{(26[m] + 0,2688[m]) * 9,81 \left[\frac{m}{s^2} \right]}{382,2919 \left[\frac{m}{s} \right]} = 0,8823 \left[\frac{m}{s} \right]$$

4.2.8.5 Periodo 5. La velocidad en este periodo es cero, debido a que se genera el bombeo del fluido, es decir la válvula se abre completamente y por un instante está en reposo al intentar regresar al cuerpo del ariete desde el pulmón, el cálculo del tiempo que dura este periodo se muestra como sigue:

$$V_5 = 0 \left[\frac{m}{s} \right]$$

$$t_5 = \frac{L}{(H + h_r) g} \left[\sqrt{\frac{W_p g}{A_p K_0 \gamma}} - \frac{(H + h_r) g}{a_m} \right]$$

$$t_5 = \frac{6,3}{(26 + 0,2688) 9,81} \left[\sqrt{\frac{3,1715(9,81)}{6,41 \times 10^{-4} \cdot 8,42 \cdot 9,810}} - \frac{(26 + 0,2688) 9,81}{382,2919} \right] = 0,0152[s]$$

4.2.8.6 Periodo 6. La velocidad en este periodo se calcula a partir de la *ecuación 19*, el signo indica la velocidad con la que retrocede el fluido desde el pulsador:

$$V_6 = -\frac{(h + h_r)g}{a} = -\frac{(26[m] + 0,2688[m])9,81 \left[\frac{m}{s^2}\right]}{382,2919 \left[\frac{m}{s}\right]} = -0,6739 \left[\frac{m}{s}\right]$$

El tiempo de duración en esta parte del ciclo se estima como el tiempo en que tarda en ir y volver la onda de presión, aplicando la *ecuación 20* se obtiene:

$$t_6 = \frac{2 * 6,3[m]}{382,2919 \left[\frac{m}{s}\right]} = 0,0445[s]$$

4.2.8.7 Periodo 7. La velocidad y el tiempo al final del ciclo son:

$$V_7 = 0 \left[\frac{m}{s}\right]$$

$$t_7 = \frac{L (H + h_r)}{h a} = \frac{8,5[m] (26[m] + 0,26884[m])}{1,8[m] \cdot 382,2919 \left[\frac{m}{s}\right]} = 0,2290[s]$$

Los datos obtenidos para el ciclo se muestran en la *tabla 12*:

Tabla 12. Datos Ciclo del ariete

Periodo	$t[s]$	$v \left[\frac{m}{s} \right]$	$V \text{ desperdicio } m^3$	$Q \left[\frac{m^3}{s} \right]$
0	0	0	0	0
1	0,24	0,67	$5,74 \times 10^{-5}$	$2,38 \times 10^{-4}$
2	0,0408	1,5562	$2,25 \times 10^{-5}$	$5,51 \times 10^{-4}$
3	0,1579	1,5562	$8,70 \times 10^{-5}$	$5,51 \times 10^{-4}$
4	0,0314	0,8823	$9,80 \times 10^{-6}$	$3,12 \times 10^{-4}$
5	0,0152	0	0	0
6	0,0445	-0,6739	$-1,06 \times 10^{-5}$	$-2,38 \times 10^{-4}$
7	0,2290	0	0	0
Total	0,7022		$1,77, x10^{-4}$	$2,33 x10^{-4}$
Volumen salida ciclo (m^3)	$4,7873 \times 10^{-6}$			

Fuente: elaboración propia

El caudal desperdiciado solo es una estimación puesto que al calcularlo se utiliza una velocidad constante en cada periodo, pero la velocidad en realidad no es contante en cada uno de los tiempos del ciclo, pero esta estimación es de ayuda para los siguientes cálculos.

Sabiendo el caudal desperdiciado y la cabeza entregada por la bomba, se puede calcular la potencia y eficiencia de la bomba, haciendo uso de la *ecuación 42*:

$$P_{in} = \gamma \cdot Q \cdot h = 9810 \left[\frac{N}{m^3} \right] \cdot 2,3257 \times 10^{-4} \left[\frac{m^3}{s} \right] \cdot 1,8[m] = 4,1067 W$$

Así que la potencia de salida es:

$$P_{out} = 9810 \left[\frac{N}{m^3} \right] \cdot 2,3808 \times 10^{-6} \left[\frac{m^3}{s} \right] \cdot 26[m] = 0,6680 W$$

Con estos dos últimos cálculos se puede obtener la eficiencia teórica total del sistema de la siguiente manera

$$\eta_{teo} = \frac{0,6680 W}{4,1067 W} = 0,1627 = 16,27\%$$

Esta eficiencia está muy cerca de la calculada inicialmente de 14,14%. Luego de hacer la primera serie de cálculos, se pensó en hacerlos para una segunda superficie (T), que está a 16 metros de altura, respecto a la ubicación de la bomba, los datos necesarios de entrada son: $hr = 0,7936m$; $y = 0,0331m$. Aquí hay cultivos de plátano y maíz, donde cada uno abarca un área de $92m^2$ y $78m^2$ respectivamente, apoyándose de la *tabla 4* se determina que esta área consume $6,8174 \times 10^{-6} \left[\frac{m^3}{s} \right]$ o lo que es $0,409LPM$. No se hace detalle del cálculo para no extender innecesariamente el texto, sabiendo que este cálculo es un punto de comparación, mas no viene dentro de los objetivos del proyecto.

La tabla resumen de los cálculos para la segunda superficie serían, *Tabla 13*:

Tabla 13. Resumen de ciclo para segunda superficie

Periodo	$t[s]$	$v \left[\frac{m}{s} \right]$	$V \text{ desperdicio } m^3$	$Q \left[\frac{m^3}{s} \right]$
0	0	0	0	0
1	0,15	0,4308	$2,34 \times 10^{-5}$	$1,52 \times 10^{-4}$
2	0,1198	1,5550	$6,66 \times 10^{-5}$	$5,50 \times 10^{-4}$

3	0,1817	1,5550	$1,01 \times 10^{-5}$	$5,50 \times 10^{-4}$
4	0,0314	1,1242	$1,27 \times 10^{-5}$	$3,98 \times 10^{-4}$
5	0,0247	0	0	0
6	0,0445	-0,4308	$-6,78 \times 10^{-6}$	$-1,52 \times 10^{-4}$
7	0,1464	0	0	0
Total	0,7593		$2,02 \times 10^{-4}$	$2,87 \times 10^{-4}$
Volumen por ciclo (m^3)	$1,9886 \times 10^{-6}$			

Fuente: elaboración propia

Repitiendo el procedimiento para obtener la eficiencia se calcula lo siguiente:

$$P_{in} = \gamma \cdot Q \cdot h = 9810 \left[\frac{N}{m^3} \right] \cdot 2,8743 \times 10^{-4} \left[\frac{m^3}{s} \right] \cdot 1,8[m] = 5,0755 W$$

Para la salida:

$$P_{out} = 9810 \left[\frac{N}{m^3} \right] \cdot 6,8174 \times 10^{-6} \left[\frac{m^3}{s} \right] \cdot 16[m] = 1,7388 W$$

Una eficiencia estimada para la segunda superficie sería:

$$\eta_{teo} = \frac{1,7388 W}{5,0755 W} = 0,3426 = 34,26\%$$

La relación de alturas para el segundo punto es de 9, mirando la tabla 3 la eficiencia debería ser del 50%, en el cálculo está por debajo de eso, lo que hace pensar que la bomba en esas condiciones debería entregar más caudal, al igual esta condición de salida está dada por la capacidad del pulmón como se explica en la sección siguiente.

4.2.9 Diseño del tanque pulmón. La capacidad que debe tener el pulmón, encargado de amortiguar el golpe de ariete y generar un caudal de entrega constante, se calcula mediante estados termodinámicos.

El caudal que consume el área de riego (véase sección 4.1.2,p.44), $2,6189 \times 10^{-6} \left[\frac{m^3}{s} \right]$ se multiplica por el tiempo del periodo siete expuesto en el teorema de Krol para encontrar el volumen por ciclo de agua que es expulsado por el sistema; este dato representa el volumen que debe estar presente en el tanque para salir a causa de la descompresión del aire, se obtiene:

$$v_{ciclo} = Q_{salida} * t_7 = v_{ciclo} = 2,6189 \times 10^{-6} \left[\frac{m^3}{s} \right] * 0,7593[s] = 1,9886 \times 10^{-6} [m^3]$$

Se definen las presiones absolutas por las que pasa el pulmón de la bomba; la primera, es la presión atmosférica; la segunda, es la presión que hay en el ducto de salida, es decir, la calculada al realizar el producto entre la altura de entrega y el peso específico del agua; la tercera hace referencia a la sobrepresión generada por el golpe, a continuación, se muestra el procedimiento para realizar estos cálculos:

$$P_1 = 101,60[kPa]$$

$$P_2 = P_1 + \left(26[m] * 9.810 \left[\frac{N}{m^3} \right] \right) = 356,5729[kPa]$$

$$P_3 = P_1 + \left(26,2688[m] * 9.810 \left[\frac{N}{m^3} \right] \right) = 359,2972[kPa]$$

Seguido de esto, se reemplaza el valor de P_1 y P_2 para encontrar el siguiente término, empleando la ecuación 23 y despejando para los estados uno y dos, respectivamente.

$$\sqrt[1,2]{\frac{P_2}{P_1}} = \sqrt[1,2]{\frac{356,5729}{101,60}} = 2,8469$$

$$\sqrt[1,2]{\frac{P_3}{P_2}} = \sqrt[1,2]{\frac{359,2972}{356,5729}} = 1,0064$$

Luego de esto, se calcula el volumen en el estado tres, teniendo en cuenta el volumen por ciclo encontrado anteriormente.

$$v_3 = \frac{v_{ciclo}}{\left(\sqrt[1,2]{\frac{P_3}{P_2}} - 1\right)} = \frac{1,9886 \times 10^{-6} [m^3]}{1,0064 - 1} = 3,1253 \times 10^{-4} [m^3]$$

Reemplazando en la ecuación 24 para encontrar los volúmenes en el segundo y primer estado.

$$v_2 = v_3 * \sqrt[1,2]{\frac{P_3}{P_2}} = 1,0064 * 3,1253 \times 10^{-4} [m^3] = 3,1452 \times 10^{-4} [m^3]$$

$$v_1 = v_2 * \sqrt[1,2]{\frac{P_2}{P_1}} = 2,8469 * 3,1452 \times 10^{-4} [m^3] = 8,9543 \times 10^{-4} [m^3]$$

En la *Tabla 14* se muestra la síntesis de los datos encontrados previamente, así mismo se expone la gráfica presión vs volumen del proceso termodinámico.

Tabla 14. Estados tanque de alivio

Estado	Presión [kPa]	$\sqrt[1,2]{\frac{P_{n+1}}{P_n}}$	$v [m^3]$	$v[l]$
1	101,60	2,8469	$8,9543 \times 10^{-4}$	0,8954
2	356,57	1,0064	$3,1452 \times 10^{-4}$	0,3145
3	359,30	1,0064	$3,1253 \times 10^{-4}$	0,3125

Fuente: elaboración propia

Con los datos de entrada de la segunda superficie, que son: $P_2 = 258,6kPa$, $P_2 = 266,3kPa$ y $v_{ciclo} = 4,787 \times 10^{-6} [m^3]$ se obtiene la Tabla 15.

Tabla 15. capacidad de pulmón necesaria para la cabeza de 16m

Estado	Presión [kPa]	$\sqrt[1,2]{\frac{P_{n+1}}{P_n}}$	$v [m^3]$	$v[l]$
1	101,60	2,1780	$4,27 \times 10^{-4}$	0,4270
2	258,6	1,0250	$1,961 \times 10^{-4}$	0,1961
3	266,3	1,0250	$1,91 \times 10^{-4}$	0,1913

Fuente: elaboración propia

El tanque que se utiliza tiene las siguientes características:

Tabla 16. especificaciones tanque de alivio

Material	Aluminio
Diámetro interior	107mm
Espesor	1,5mm
Área transversal	$8,99 \times 10^{-3}$
Volumen	1,1 litro
Presión máxima soportada	90PSI

Fuente: elaboración propia

4.2.10 Cálculo de pérdidas por fricción tubería de descarga de la bomba. Se calcula la velocidad del fluido a la salida de la bomba:

$$V_{out} = \frac{Q_{out}}{A_{out}} = \frac{2,6189 \times 10^{-6} \left[\frac{m^3}{s} \right]}{\frac{\pi}{4} (0,01587m)^2} = 0,0132 \left[\frac{m}{s} \right]$$

Se procede a encontrar el número de Reynolds con un valor de viscosidad cinemática con $25^\circ C$ (ver anexo E), debido a que la temperatura aumenta en el sitio de instalación de la manguera.

$$NR = \frac{0,0132 \left[\frac{m}{s} \right] * 0,01587[m]}{8,94 \times 10^{-7} \left[\frac{m^2}{s} \right]} = 235,025$$

Como el número de Reynolds es menor a 2.000 el flujo en la tubería de salida será laminar, el siguiente paso es calcular el factor de fricción.

$$f = \frac{64}{NR} = \frac{64}{235,025} = 0,2713$$

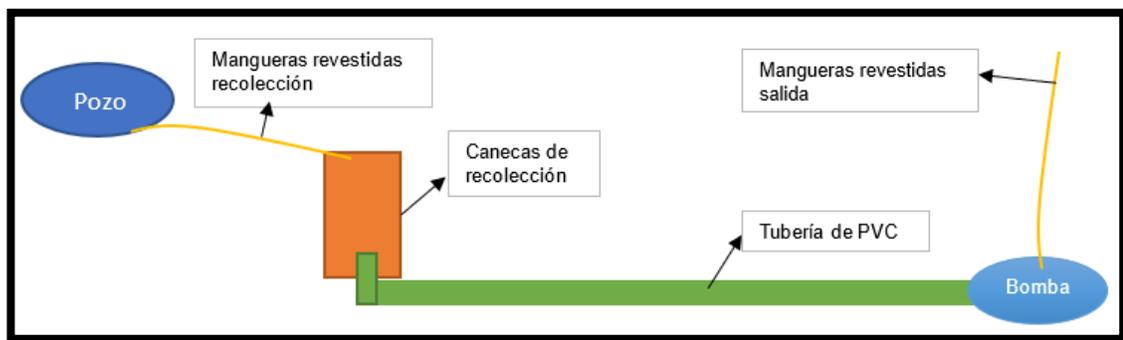
Finalmente, las pérdidas por fricción se calculan teniendo en cuenta que la longitud de la tubería de descarga es de $82,57[m]$.

$$h_{Lout} = 0,2713 \cdot \frac{82,57m}{0,01587m} \frac{\left(0,0132 \frac{m}{s}\right)^2}{2 \left(9,81 \frac{m}{s^2}\right)} = 0,01258 [m]$$

4.3 MODELADO Y VALIDACIÓN DEL DISEÑO

4.3.1 Sistema de bombeo. Se muestra a continuación un esquema de los elementos que conforman el sistema hidráulico, desde la captación de agua del pozo hasta la bomba.

Figura 26. Esquema montaje hidráulico



Fuente: elaboración propia

En la Tabla 17 se muestran los componentes que conforman el sistema hidráulico dividido en cuatro subsistemas, este listado sirve también para adquirirlos.

Tabla 17. Componentes sistema de bombeo

Subsistema	Componentes	Cantidad
Filtrado y recolección	Malla tipo zancudo	0.5 metros
	Manguera revestida 1/2in	12 metros
	Canecas de 20 litros	4 unidades
	Niple galvanizado 4cm	3 unidades
	Sello mecánico	7 unidades
	Tuerca 1in	6 unidades

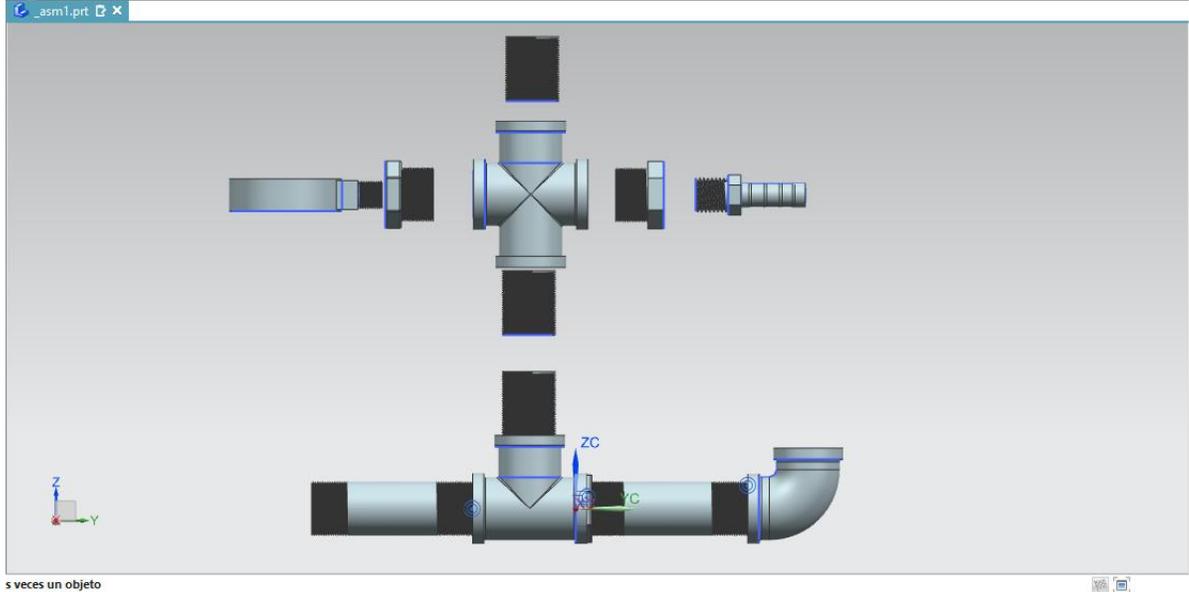
	Macho de PVC 1in	1 unidad
Abastecimiento de agua y anclaje	Codo 90° PVC 1in	1 unidad
	Tubo PVC 1in	8 metros
	Válvula de bola PVC 1in	1 unidad
	Unión universal 1in	1 unidad
	Unión de PVC a galvanizado 1in	1 unidad
	Cemento CEMEX	1/2 bulto
	Gravilla	1 bulto
	Abrazaderas de pared 1in	2 unidades
	Pernos expansivos 1/4in	4 unidades
Bombeo	Arandelas 1/8in	4 unidades
	Niple galvanizado 10cm	2 unidades
	Codo 90°, 1in galvanizado	1 unidad
	Cruz galvanizada 1in	1 unidad
	Te 1in galvanizada	1 unidad
	Niple galvanizado 4cm	5 unidades
Bombeo	Válvula antirretorno 1in	1 unidad
	Válvula de pie modificada 1in	1 unidad
	Reducción bushing para manómetro	1 unidad
	Manómetro	1 unidad

	Reducción bushing 1in a 1/2in	1 unidad
	Tuerca 1in	1 unidad
	Tanque compresor 1litro	1 unidad
Entrega	Unión universal con registro 1in	1 unidad
	Adaptador a manguera 1/2in	1 unidad
	Manguera salida 1/2in	60 metros
	Unión manguera 1/2in	1 unidad
	Abrazadera manguera 1/2in	4 unidades

Fuente: elaboración propia

4.3.2 Modelado en NX 12. Se realiza el modelado de las piezas que conforman la bomba para validar su ensamble previo a la compra de materiales para revisar si hace falta alguna pieza. El cuerpo del ariete se muestra a continuación.

Figura 27. Modelado en NX ariete



Fuente: elaboración propia

4.4 CONSTRUCCIÓN Y PRUEBAS DEL ARIETE.

Luego de realizar el modelado y verificación de piezas, se dispone a la fabricación y ensamble del ariete, además del alistamiento de las canecas de recolección.

4.4.1 Fabricación pulmón de alivio. Se elige el tanque de una pistola de compresor de **1litro** capaz de soportar **90PSI** de presión, puesto que es la mejor opción según los datos calculados. Se procede entonces a su modificación, realizando una perforación en la tapa con una piedra cónica para pulidora con el fin de insertar un niple galvanizado de **4cm**, después de esto se realiza un sellado con sellante Rally y luego se dispone de la tuerca para realizar un adecuado ajuste y lograr su correcto montaje (*Figura 28*).

Figura 28. Fabricación del tanque de alivio



Fuente: elaboración propia

4.4.2 Modificación válvula de Pie. Esta válvula es la encargada de generar el golpe de ariete y la efectividad de su funcionamiento es de suma importancia para generar el bombeo. Por lo anterior, se decide modificar la válvula debido a que el resorte y la carrera deben adecuarse según los cálculos. Además, es lo más conveniente porque el fabricante asegura tolerancias y procesos de mecanizado que garantizan una presión de trabajo de **150PSI** que está muy por encima a la presión generada por el golpe.

Figura 29. Válvula de pie sin modificaciones



Fuente: Homecenter.com

Se procede a generar un ensamble con un tornillo allen de $3/16in$, roscando el interior de su cabeza con un macho, para ensamblarlo con la parte superior roscada del vástago del pulsador.

Figura 30. Modificación pulsador



Fuente: elaboración propia

Por otra parte, los orificios de la válvula de pie mostrados en la *figura 31* son limados con el fin de lograr un mejor deslizamiento del nuevo vástago y ensamblar el resorte.

Figura 31. Cuerpo válvula de pie



Fuente: elaboración propia

Posterior a esto se ubica en el vástago una tuerca tipo mariposa para lograr graduar la carrera a conveniencia y dos más para restringir su movimiento por el golpeteo de la válvula.

Figura 32. Válvula de pie modificada



Fuente: elaboración propia

4.4.3 Ensamble piezas normalizadas bomba. Los elementos normalizados para la construcción de la bomba son adquiridos en la localidad de los Mártires (centro de Bogotá). Luego de adquirir todos los componentes se realiza su respectivo ensamble con la ayuda de una llave de tubo y un hombre solo. Por otra parte, fue necesario comprar cinta teflón con el fin de asegurar un sellado total y evitar posibles fugas de agua en el cuerpo del ariete.

Figura 33. Componentes ensamble bomba de ariete



Fuente: elaboración propia

4.4.4 Alistamiento canecas de almacenamiento. Las parte inferior y tapas de las canecas de almacenamiento son perforadas con una copa sierra para talador adquirida previamente, las perforaciones se realizan en el centro de cada una con el fin de garantizar un apilamiento vertical. Posterior a esto, se realiza un ensamble de las piezas que se encargan de unir los valdes de la siguiente manera:

1. El niple es introducido de tal manera que su distancia sea la misma a cada mitad de la perforación para dar un apriete igual a cada lado.
2. Se instalan dos empaques en la parte frontal y posterior del niple, debido a que estos elementos tendrán contacto directo con el agua, asegurando que

no existan fugas de ningún tipo. En la siguiente figura se muestra el ensamble de la unión de la caneca por la que fluirá el agua hacia la tubería de transporte de PVC.

Figura 34. Sistema de unión valdes de recolección



Fuente: elaboración propia

4.4.5 Banco de pruebas hidráulicas. Antes de realizar la instalación de la bomba en la finca es necesario asegurar su funcionamiento, como no se cuenta con un banco de pruebas para este tipo de bombas, se dispone a ponerla en la vivienda de uno de los desarrolladores del proyecto.

Se construye así una instalación hidráulica alimentada por el sistema de la vivienda, asegurando una presión de entrada a la bomba constante, los elementos utilizados fueron: un codo de 90° en PVC, un tramo de tubería de PVC de 1 metro y una válvula de bola en PVC de una pulgada de diámetro, además, limpiador y soldadura para tubería.

Figura 35. Tubo de abastecimiento, banco de pruebas



Fuente: elaboración propia

Figura 36. Ensamble sistema de pruebas



Fuente: elaboración propia

Posterior a esto se siguen los siguientes pasos:

1. Conocer la presión que entrará a la bomba, esto se logra conectando brevemente el manómetro a la salida del tramo de tubería.
2. Se realiza la inspección de fugas en el tanque de alivio conectando este mediante la unión universal y la unión de galvanizado a PVC.

Figura 37. Prueba de fugas tanque de alivio



Fuente: elaboración propia

3. Una vez ensamblado el ariete hidráulico, se realiza la prueba de fugas, para esto a la salida del ariete es conectada una manguera de polietileno domestica con un aspersor en su extremo a fin de no generar desperdicios de agua adicionales a los ocasionados a la salida en la válvula de impulso.

Figura 38. Inspección de fugas ariete



Fuente: elaboración propia

4. La bomba se pone en funcionamiento durante dos horas, en este tiempo se gradúa la carrera del pulsador para evidenciar su funcionamiento en diferentes condiciones. Seguido a esto, se verifica su bombeo, abriendo el aspersor de la manguera dispuesta a una altura aproximada de dos metros.

Se resalta que en el banco de pruebas se genera el cierre total de la válvula de salida para conocer el máximo valor de cabeza que la bomba puede suministrar con la presión entregada por el sistema de la vivienda, así se obtiene un valor de 45 PSI aproximadamente 32 metros de altura de cabeza para las condiciones dadas.

Finalmente, se genera el desensamble del banco de pruebas y la bomba para posteriormente ser llevada a la finca para su instalación.

4.4.6 Alistamiento del terreno e instalación. Las piezas de los sistemas de recolección y entrega para la construcción del proyecto son comprados en Bogotá por su facilidad para transportarlos; la tubería de PVC y los materiales para la fijación de la bomba al suelo son adquiridos en Bituima gracias a su disponibilidad en las ferreterías del municipio. Los pasos previos a la instalación se muestran a continuación:

1. Se realiza una limpieza general del terreno, seguido a esto la toma de niveles desde la salida del arroyo hasta el punto de abastecimiento y bombeo con ayuda de una manguera de nivel para garantizar las alturas y distancias tomadas en los cálculos.
2. Las superficies de apoyo de las canecas y anclaje de la bomba deben ser lo suficientemente fuertes como para soportar el peso y las vibraciones en el funcionamiento, es por esto por lo que se decide fundir una placa en concreto, rodeándola de piedras para evitar la caída de tierra y erosión en la superficie, además, los pernos de anclaje se fijan en la mezcla de concreto para lograr un mayor agarre luego del secado, del mismo modo, se genera el desnivel correspondiente para que el caudal desechado por la bomba siga su curso por el arroyo mediante un tubo de PVC y un camino natural. Por otra parte, se abre una zanja en el suelo para dar paso a la tubería de PVC. (*Figura 39*).

Figura 39. Fundición placas de concreto



Fuente: elaboración propia

3. Luego de un día de secado del concreto, se procede al cortado y anclaje de los ductos que transportarán el líquido hasta los valdes, se dispone de un filtro de malla tipo zancudo en la entrada de las dos mangueras para evitar el transporte de tierra. Por otra parte, en la parte superior del pozo se sobrepone un trozo de malla para obstruir el paso de impurezas de mayor tamaño como ramas u hojas secas.

Figura 40. Maya de filtro pozo



Fuente: elaboración propia

4. En este paso se procede al montaje de las canecas sobre la placa de concreto elaborada para tal fin, el sistema de fijación entre estas se realiza mediante lo explicado...**en el apartado 4.3.3.4...** en la última caneca se instala un macho en PVC que se conectara a la tubería de abastecimiento para transportar el agua a la bomba.

Figura 41. Instalación sistema de recolección y abastecimiento.



Fuente: elaboración propia

5. Finalmente se realiza el corte la tubería de PVC, limpieza y soldadura de la plomería y el anclaje de la bomba. Para terminar, el sistema completo se pone a prueba con la válvula de salida cerrada, buscando posibles fugas para su respectiva corrección, así mismo se verifica el apriete de los pernos de anclaje y el desagüe, debido a que las vibraciones pueden soltar la bomba y el agua acumulada erosionar el terreno.

Figura 42. Prueba de fugas general



Fuente: elaboración propia

Figura 43. Anclaje ariete a placa de concreto fabricada



Fuente: elaboración propia

5. DATOS DE FUNCIONAMIENTO Y CARACTERIZACIÓN

5.1 PRUEBA 0

La prueba inicial fue esencialmente para probar que la bomba funcionaba, ver las fugas que se podrían presentar y que podía llegar a las condiciones de diseño planteadas; se probaron todos los resortes mostrados en la *Figura 25* y para cada uno se llegó a tener una presión por encima de 40 *psi*, la prueba se muestra en la *Figura 44*.

Figura 44. Prueba 0



Fuente: elaboración propia

Se utilizó el resorte escogido en la fase de diseño, cabe resaltar que la presión de la tubería de admisión es de 80 *kPa* (medida ubicando el manómetro a la salida del ducto) donde se pudieron obtener los siguientes datos, *Tabla 18*:

Tabla 18. Resultados de prueba 0

K (N/m)	Presión entrada kPa	Presión Salida kPa	t prueba s	n de pulsaciones	t ciclo s
542,857	80	275,78979	15,87	21	0,75571

Fuente: elaboración propia

El tiempo de prueba se midió con un cronómetro, contando las pulsaciones y así determinar el tiempo de ciclo.

Se escogieron en total 3 resortes para dar una descripción del funcionamiento de la bomba con cada uno de estos, las observaciones se consignaron en la *tabla 19* a continuación:

Tabla 19. Observaciones de la prueba 0 con diferentes resortes

$K \left[\frac{N}{mm} \right]$	Observaciones
3,60	El rango de funcionamiento fue 10Psi a 40Psi, antes de este rango el fluido no tenía fuerza suficiente para levantar el pulsador, fue necesario forzar el golpe; después del rango, el resorte no tenía la fuerza para devolver el pulsador.
24,5	Con una carrera pequeña (1mm) funcionó en un rango de 20Psi a 30Psi, se cambia la carrera a una mayor (4mm), el sistema no funciona con esta carrera.
0,54	Este es el resorte usado en la fase de diseño, el rango de funcionamiento es 30Psi a 40Psi con las condiciones de esta primera prueba.

Fuente: elaboración propia

Mientras aumenta la presión en el ducto de salida, el tiempo de ciclo aumenta, haciendo que cuando se llega a la presión máxima, el número de ciclos por minuto sea pequeño.

Adicionalmente, en la primera prueba alcanzó a deslizarse una tira del material sellante de la tubería galvanizada (teflón) hasta la válvula check, esto provocó un atascamiento en el plato de esta válvula haciendo que la sobrepresión no se generara correctamente.

5.2 PRUEBAS DE CAMPO

Luego de instalada la bomba en el terreno de la finca se hicieron varias pruebas y se tomaron 5 series de datos, evidenciados en la *Tabla 20*. Los datos se tomaron llenando un envase de un volumen conocido con una marcación (1l y 0,5l), tomando el tiempo de llenado a la salida del ducto de impulsión, con el tiempo de llenado y el volumen que es vertido dentro del envase se calcula el caudal de salida. Primero que todo con la manguera extendida se logró ver que la presión máxima de la bomba era 44Psi o 31 metros de cabeza, no hubo caudal saliente.

Tabla 20. resultados pruebas de campo

Prueba	H	Presión manómetro		Neu.	Golpes	t ciclo	t Prueba	Volumen vertido	Caudal de salida	
	m	kPa	Psi		n/min	s	s	L	LPM	m ³ /s
1	16	165,47	24	Si	108	0,5556	61	0,5	0,4918	8,20x10 ⁻⁶
2	26	248,21	36	Si	102	0,5882	121	0,5	0,2479	4,13x10 ⁻⁶
2,1	26	248,21	36	No	105	0,5714	136	0,5	0,2206	3,68x10 ⁻⁶
3	26	248,21	36	Si	102	0,5882	133	0,5	0,2256	3,76x10 ⁻⁶
4	16	165,47	24	Si	114	0,5263	123	1	0,4878	8,13x10 ⁻⁶

Fuente: elaboración propia

Las pulsaciones por minuto se tomaron haciendo el conteo, de aquí mismo se puede sacar el tiempo de ciclo, las presiones de las segunda y tercera columna fueron tomadas a partir de la medición marcada del manómetro.

Para la prueba 2,1 se retiró el neumático para tener un punto de comparación respecto a que la bomba funcionaba de manera diferente con este elemento en el pulmón, la primera suposición es que la rigidez del neumático permite una descompresión más súbita, después se analizara tan afirmación.

De la tabla anterior y de la *ecuación 42* para la potencia total se puede sacar la siguiente lista de resultados (*Tabla 21*):

Tabla 21. Datos obtenidos a partir de resultados de las pruebas de campo

Prueba	p	η	V por ciclo		Aire en el pulmón		t de 1 a 3		Diferencia
	Watts	%	m3	L	m3	L	teórico	real	%
1	1,3563	26,7232	$4,55 \times 10^{-6}$	$4,55 \times 10^{-3}$	$4,31 \times 10^{-4}$	0,4307	0,3644	0,3300	9,43
2	1,0257	24,9754	$2,43 \times 10^{-6}$	$2,43 \times 10^{-3}$	$1,09 \times 10^{-3}$	1,0916	0,3602	0,3102	13,89
2,1	0,9125	22,2208	$2,10 \times 10^{-6}$	$2,10 \times 10^{-3}$	$9,43 \times 10^{-4}$	0,9434	0,3602	0,3001	16,70
3	0,9331	22,7220	$2,21 \times 10^{-6}$	$2,2 \times 10^{-3}$	$9,93 \times 10^{-4}$	0,9931	0,3602	0,3000	16,72
4	1,3453	26,5059	$4,28 \times 10^{-6}$	$4,28 \times 10^{-3}$	$4,05 \times 10^{-4}$	0,4047	0,3644	0,3300	9,43

Fuente: elaboración propia

Anteriormente ya se explicó cómo se obtenía cada valor, cuando se calculó la potencia estimada y eficiencia para determinar si los cálculos tenían sentido desde la parte teórica. Las últimas 3 columnas son el tiempo del ciclo entre el primer y tercer periodo tanto teórico como real, y la desviación entre los dos. Los datos del tiempo entre los periodos se pudieron obtener a través de un análisis cuadro a cuadro de las evidencias de las pruebas mediante un programa de edición de video.

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

6.1 PRUEBA 0

- Se puede ver que el funcionamiento de la bomba inicialmente depende del caudal de entrada a la bomba; las variaciones pequeñas de presión no afectan en magnitud el funcionamiento de la bomba, puesto a que el pulsador funciona principalmente por la cabeza dinámica del sistema, al reducir la carrera de manera progresiva en cada ciclo se transforma parte de la cabeza estática que aún lleva el fluido, en cabeza dinámica.

Recordando la ecuación de la fuerza de arrastre:

$$F_{arraastre} = \frac{\varphi_s * (V_{corregida})^2 * A * \gamma}{g}$$

La cabeza dinámica depende de la velocidad, al reducir el área por donde pasa el agua, la inercia que lleva el fluido trata de mantener el caudal, haciendo que la velocidad aumente y que a su vez la fuerza de arrastre aumente.

La presión estática afecta el sistema en los puntos donde el pulsador esta estático, es decir que, si la fuerza de arrastre es muy grande a la vez que la presión en la válvula de pie, se levanta el plato y la válvula queda cerrada debido a que el resorte no tiene la fuerza suficiente para desplazar el plato hacia abajo y contrarrestar la presión del sistema.

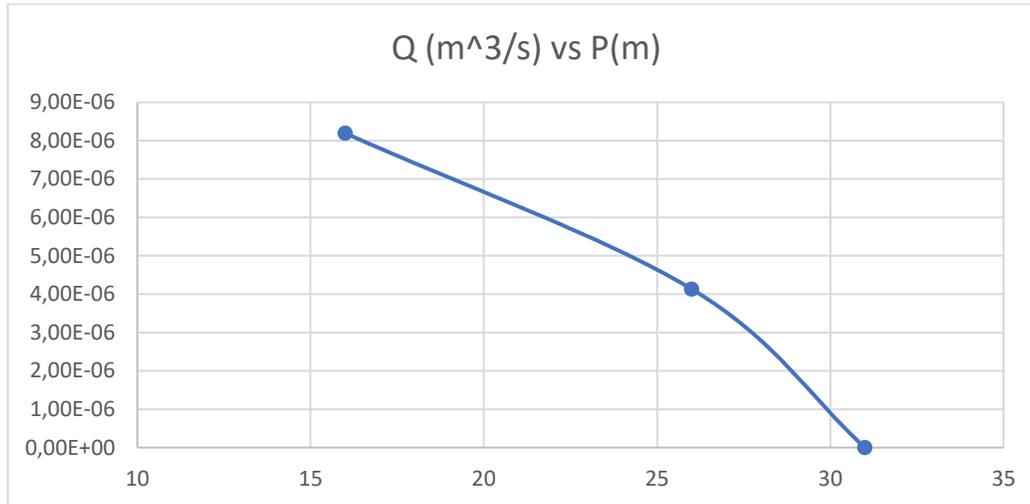
- Cuando se inicia el funcionamiento de la bomba con una presión de salida igual a la atmosférica, no hay caudal y la presión aumenta por cada pulsación, es necesario que allá un ducto de salida que ejerza una presión estática sobre el pulmón, de lo contrario no aumentara la presión debida al golpe, en el caso de esta prueba se ubicó una manquera de jardín con una pistola que ayudaba a regular la presión de la bomba. Mientras aumenta la presión, aumenta la cantidad de agua en el pulmón, lo que hace natural que al abrir la válvula de la pistola salga agua a alta presión.

- Cuando la presión en el pulmón es muy pequeña, hay presencia de sobre amortiguamiento, esto se ve en los datos cualitativos de la *Tabla 19*; antes del rango de funcionamiento, al llegar la sobrepresión a la válvula antirretorno se amortigua en su totalidad y la presión que hay en el ducto de admisión puede hacer que la válvula quede abierta.
- Cuando la presión es alta, la sobrepresión no se amortigua lo suficiente para disminuir la fuerza que ejerce el fluido sobre el pulsador, haciendo que se atasque, cerrando la válvula de pie; esto se puede evitar con un resorte más rígido.
- Una constante del resorte alta afecta, haciendo que el plato retorne con mayor velocidad, una suposición que se hace es que esto disminuye el tiempo de ciclo, lo que podría aumentar la eficiencia de la bomba debido a que significa que debería haber mayor cantidad de golpes por minuto, que indirectamente llevaría a mayor caudal de salida.
- El resorte con una constante de $24,5 \left[\frac{N}{mm} \right]$ no funcionó al aumentarle la carrera del pulsador a $4mm$, tiene que ver con que el coeficiente φ_s es inversamente proporcional a la magnitud de la carrera, es decir la fuerza de arrastre disminuye, si la constante del resorte es muy grande el fluido no tendrá suficiente fuerza para devolver la válvula; del mismo modo, al tener una carrera de $1mm$ si hubo funcionamiento, pero no se llegó a la cabeza de $40Psi$ como en las otras dos pruebas, esto puede llegar a ser porque el coeficiente de pérdida en el pulsador R_s también se comporta como el coeficiente φ_s , es decir que con una carrera muy pequeña, las pérdida de cabeza dinámica es alta, haciendo que el caudal disminuya y a su vez que la sobrepresión (que es directamente proporcional a la velocidad del fluido y la celeridad) se reduzca, evitando que se llegue a la presión estimada en el pulmón.

6.2 PRUEBAS DE CAMPO

Se obtiene que para la bomba las condiciones de salida son muy importantes, entre mayor altura de salida, menor caudal, en la *Figura 45* lo evidencia:

Figura 45. Gráfica Caudal vs Cabeza

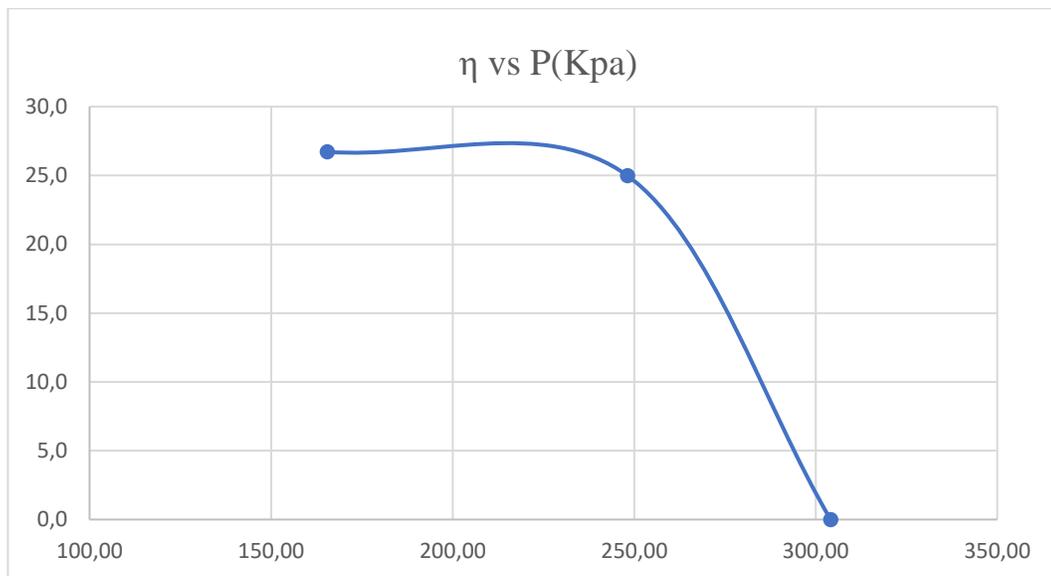


Fuente: elaboración propia

La presión está en metros de cabeza, se nota que mientras más aumenta la presión, más disminuye el caudal hasta llegar a 0, esto es debido a que la sobrepresión llega a igualar la presión del pulmón y no se abre la válvula antirretorno para el paso del agua. Mientras que al ir disminuyendo la altura de salida, va aumentando el caudal, pero como se ve en la gráfica, esta relación no es lineal, y por la tendencia de la gráfica se podría esperar que en alturas pequeñas cercanas a la cabeza de entrada, el caudal tiende a ser constante; de ser así la eficiencia podría disminuir en alturas pequeñas; esta última hipótesis nace del hecho que si se tiene una altura pequeña x_1 con una potencia p_1 y se decae la altura de salida x_2 , el caudal inicial es menor que el caudal del segundo punto, es decir que la potencia p_2 será menor que p_1 (puesto a que la potencia es proporcional a la presión o cabeza) y si el tiempo de ciclo varía muy poco, como se puede ver en los resultados de la prueba de campo, el caudal de entrada tiende a ser constante, por ende la potencia a la entrada también tendería a ser constante, es decir que al final la eficiencia en alturas pequeñas decae.

- De la prueba 2,1, retirando el neumático del pulmón se aprecia que la eficiencia del sistema cae en un 2,76% respecto a la prueba 2, hay que tener en cuenta que esta eficiencia afecta directamente el caudal puesto a que la cabeza de salida no se altera, respecto a la prueba 3 la variación en la eficiencia es mucho más pequeña, tanto así que se podría suponer que la bomba paso de trabajar a unas condiciones menos ideales que en la prueba 2.
- Las pruebas con mayor eficiencia son la 1 y la 4, esto afirma la hipótesis planteada en el procedimiento para adquirir el caudal de salida a partir de una eficiencia y una potencia estimadas, la eficiencia es decreciente respecto a la presión y creciente respecto al caudal, de esta manera teniendo 3 puntos se puede apreciar la siguiente gráfica:

Figura 46. eficiencia vs cabeza



Fuente: elaboración propia

Entonces, teniendo en cuenta lo ya dicho, la eficiencia con presiones bajas debe disminuir, la forma de la gráfica en la *Figura 46* en verdad debería ser parabólica, pero no se obtuvieron datos adicionales.

- El tiempo de ciclo es menor en presiones bajas, esto también se deduce en la prueba 0, además significa que el caudal real de la bomba siempre será mayor al teórico, esto puede estar relacionado con la presencia del resorte, que acorta el tiempo de ciclo al hacer que el tiempo de apertura de la válvula sea menor. En las últimas 3 columnas de la *Tabla 20* se puede apreciar que hay una desviación entre el tiempo de los tres primeros periodos calculados en promedio de 13,24%, por la imprecisión de la cámara al grabar esta desviación podría ser mayor o menor.
- Los caudales de salida tanto como la cabeza de salida de 16m y 26m son mayores a los esperados, se sabe que el caudal de salida depende de la capacidad del pulmón. Calculando el volumen por ciclo de cada prueba, se puede en una hoja de cálculo de Excel reemplazar los valores, teniendo ya las presiones de cada estado termodinámico y hacer el procedimiento para calcular la capacidad que debería tener el pulmón en cada volumen por ciclo, los resultados para la cabeza de 26m son cercanos a 1l, siendo el valor para la segunda prueba la de mayor cercanía al volumen real de aire del tanque.
- Las capacidades del tanque para la cabeza de 16m son cercanos a 0,4l, y la eficiencia de estas pruebas son aproximadas al 27%, mucho menos a la estimada en el proceso de obtención de datos, esto correspondería a la eficacia del diseño, puesto a que se diseñó la bomba para unas condiciones óptimas de cabeza de 26 metros y un caudal de salida de 0,143LPM, fuera de estas condiciones la eficacia del diseño es cualitativamente menor.

7. CONCLUSIONES

- Se instaló una bomba con una altura de salida de 26 metros y un caudal de 0,2479 *LPM* para cubrir una demanda de 0,143*LPM*, cumpliendo con los cálculos, dando como eficaz el diseño.
- El resorte escogido con una constante de $0,54 \left[\frac{N}{mm} \right]$ acorta el tiempo de apertura del pulsador, haciendo que haya un desfase promedio entre el tiempo teórico y real de 13,24% de los periodos 1 al 3 con 26m de cabeza. Además, aumenta la eficiencia del sistema de 14,14% calculado y 24,97% real.
- La constante del resorte no afecta directamente la sobrepresión, como si lo hace la carrera; afecta sobre el funcionamiento del pulsador, una baja constante no abre la válvula, una alta no permite el cierre.
- A una altura de 16m el caudal llegó a 0,4918 *LPM* y a una eficiencia de 26,7%, diferente al 50% esperado, es decir que entre menor altura de salida habrá mayor caudal de entrega y un rendimiento también mayor, pero a su vez el diseño será menos eficaz.
- Entre la prueba sin neumático en el pulmón y las otras 2 con la cabeza de 26m hay una diferencia en el rendimiento de hasta 2,76%, es decir que un elemento flexible dentro del pulmón aumenta la eficiencia de la bomba.
- La filtración es esencial para el buen funcionamiento, el caudal también depende de que la válvula antirretorno no sufra ningún atascamiento.

8. PRESUPUESTO

Para el desarrollo del proyecto las fuentes de consulta bibliográfica fueron de recursos de la biblioteca en la universidad; como las bases de datos a las que los estudiantes tenemos acceso gratuito, videos publicados en la web por programas sobre el tema, así mismo de libros de mecánica de fluidos y maquinas hidráulicas que se encuentran en la Facultad.

Los insumos para transportes de los tiquetes de ida y vuelta para las visitas a la finca, cotización de materiales y su respectiva compra se repartieron con el 70% del presupuesto para el proyecto por cuenta de los autores y el 30% restante por el propietario de la finca con quien se llegó a este acuerdo.

Se muestra a continuación en la *Tabla 22*, un listado general de los gastos que se tuvieron en cuenta para el desarrollo total del proyecto.

Tabla 22. Presupuesto proyecto

Subsistema	Componentes	Cantidad	Valor total en pesos colombianos
Filtrado y recolección	Malla tipo zancudo	0.5 metros	2.000
	Manguera revestida 1/2in para recolección y salida	90 metros	50.000
	Canecas de 20 litros	4 unidades	1.500
	Niple galvanizado 4cm	3 unidades	7.500
	Sello mecánico	7 unidades	7.000
	Tuerca 1in	6 unidades	9.000
	Macho de PVC 1in	1 unidad	1.000
Abastecimiento de agua y anclaje	Codo 90° PVC 1in	1 unidad	1.500
	Tubo PVC 1in	8 metros	31.000

	Válvula de bola PVC 1in	1 unidad	9.900
	Unión universal 1in	1 unidad	4.500
	Unión de PVC a galvanizado 1in	1 unidad	2.000
	Cemento CEMEX	1/2 bulto	11.500
	Gravilla	1 bulto	5.000
	Abrazaderas de pared 1in	2 unidades	1.600
	Pernos expansivos 1/4in	4 unidades	1.200
	Arandelas 1/8in	4 unidades	450
Bombeo	Niple galvanizado 10cm	2 unidades	12.400
	Codo 90°, 1in galvanizado	1 unidad	5.900
	Cruz galvanizada 1in	1 unidad	6.000
	Te 1in galvanizada	1 unidad	5.700
	Niple galvanizado 4cm	5 unidades	10.000
Bombeo	Válvula antirretorno 1in	1 unidad	18.000
	Válvula de pie Helbert 1in	1 unidad	48.900
	Reducción bushing para manómetro	1 unidad	2.000
	Manómetro	1 unidad	11.000
	Reducción bushing 1in a 1/2in	1 unidad	2.000
	Tuerca 1in	1 unidad	1.500

	Tanque compresor 1litro	1 unidad	38.000
Entrega	Unión universal con registro 1in	1 unidad	15.000
	Adaptador a manguera 1/2in	1 unidad	4.500
	Manguera salida polietileno 1/2in	50 metros	15.000
	Unión manguera 1/2in	1 unidad	150
	Abrazadera manguera 1/2in	4 unidades	1.600
Viáticos	Pasajes ida y vuelta 7 visitas	14 unidades	140.000
	Alimentación promedio 2 personas		100.000
TOTAL			554.300

Fuente: elaboración propia

9. CRONOGRAMA

Se dispondrá a discutir diferentes problemáticas adquiridas en el diseño, la fabricación de la máquina y desarrollo de los diferentes informes a entregar al tutor del proyecto, trabajando cuatro horas semanales o más si la complejidad del proyecto aumenta. En el diagrama e Gantt mostrado a continuación (*Tabla 23*) se llevará a cabo el control de actividades a realizar en el proyecto Se tomará como semana uno desde el domingo 6 de agosto del 2018.

Tabla 23. Diagrama de Gantt

Semana \ Actividad	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Visita reconocimiento del terreno	X																	
Toma de datos del caudal entregado por el arroyo	X		X			X												
Consultas antecedentes del proyecto		X	X	X														
Cálculos de diseño							X	X										
Revisión de cálculos desarrollados									X	X								
Diseño en programa CAD NX12											X	X						
Cotización de material													X					
Compra de material y construcción															X			
Limpieza y alistamiento del terreno de instalación																X		
Puesta a prueba e instalación																	X	X

Fuente: elaboración propia

10. REFERENCIAS

- Anónimo. (s.f.). *Impulsión de Aguas Residuales: Golpe de Ariete en Tuberías de Impulsión. Sección 2: cálculo del golpe de ariete*. Universidad de Salamanca, centro de investigación y desarrollo tecnológico del agua, Salamanca. Obtenido de <http://cidta.usal.es/Cursos/redes/modulos/Libros/unidad%209/calgolpe.PDF>
- Budynas, R., & Nishbett, K. (2008). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*. México: McGraw-Hill.
- Calero, C., & Guaman, D. (2011). *Diseño y construcción de una bomba de ariete hidráulico. (Proyecto de grado Ingeniería Mecánica)*. Escuela Politécnica Nacional. Facultad de ingeniería Mecánica, Quito.
- Crisitan Napoleon Campaña Calero, D. A. (2011). Diseño y Construcción de una Bomba de Ariete Hidraulico. *Escuela Politecnica Nacional, Facultad de Ingenieria Mecanica*, 47-48.
- Escobar, I. (2014). *Cálculo numérico y analítico de las ecuaciones de Karman-Prandtl para la estimación del coeficiente de fricción. (Proyecto fin de carrera ingeniería técnica naval. Especialidad en estructuras marinas.)*. Universidad Politécnica de Cartagena. Escuela técnica superior de ingeniería Naval y Oceánica, Cartagena de Indias.
- Galarza Chacón, R. F. (2013). *Estudio de factores hidráulicos en una bomba de ariete y su efecto sobre la eficiencia (Tesis de grado para la obtención del título de Ingeniero mecánico)*. Universidad Técnica de Ambato, Facultad de ingeniería civil y mecánica, Ambato.
- Gonzales Alayza, E. A. (2015). *Diseño y construcción de una bomba de ariete para una capacidad de 102 litros por hora y una altura de 8 metros (Tesis para optar por el título profesional de Ingeniero mecánico-electricista)*. Universidad católica de Santa María, Facultad de ciencias e ingenierías físicas y formales, escuela de profesionales de ingeniería mecánica, mecánica eléctrica y mecatrónica, Arequipa, Perú.
- Isla, P. (2017). *Ariete hidráulico para riego. Diseño, construcción y montaje (HYDRAULIC RAM FOR IRRIGATION. DESIGN, CONSTRUCTION AND MOUNTING)*. (Proyecto para acceder al título de ingeniero industrial.). Universidad de Cantabria. Escuela técnica superior de ingenieros industriales y de telecomunicaciones, Cantabria.

- Lee Spring. (s.f). Catálogo de productos serie 23. *Resortes de catálogos y hechos a la medida, resortes de compresion serie estándar*, 107.
- Mataix, C. (1982). *Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas* (2 ed.). México D.F: Alfaomega.
- Méndez, M. V. (1995). *Tuberías a presión en los sistemas de abastecimiento de agua*. Caracas, Venezuela: Fondo Polar-UCAB.
- Mexichem soluciones integrales,PAVCO. (2014). *Manual técnico tubosistemas presión PVC*. Bogotá D.C.
- Mott, R. L. (2006). *Mecánica de fluidos*. México: Pearson Educación de México.
- Nieto, J. (26 de agosto de 2018). Fenómeno del Niño: qué tan probable es que se anticipe. *Portafolio*, 1-2. Obtenido de <http://www.portafolio.co/economia/fenomeno-del-nino-que-tan-probable-es-que-se-anticipe-520460>
- NUCLEAR, C. (2013). General Engineering Data. *Resistance Coefficient k, Equivalent Length l/d and Flow Coefficient Cv*. NU-SEC8-BU-EN-LT-CN-2013_08, 5-7.
- Pérez Farrás , L., & Guitelman, A. (2005). *Estudio de transitorios: golpe de ariete*. Universidad de Buenos Aires.Facultad de ingeniería, departamento de hidráulica, cátedra de construcciones hidráulicas, Buenos Aires.
- Rengifo, S., & Gallego, J. D. (2016). *Diseño y construcción de un sistema de ariete hidráulico para el aprovechamiento de aguas lluvias.(Trabajo de grado de Tecnología mecánica)*. Universidad Tecnológica de Pereira.Facultad de tecnologías, Pereira.
- Romero Guerrero, J., & Lorenzo Gutiérrez , L. (2014). El ariete hidráulico. Proyecto e instalación en Ntongui (Angola). *Diseño y Tecnología para el Desarrollo*, 1(1), 224-237. Obtenido de <http://polired.upm.es/index.php/distecd/article/view/2512>
- Rubiano Suarez, S. A., & Cuervo Contreras, J. (2017). *Diseño y montaje de un sistema de bombeo mediante ariete hidráulico (Proyecto de grado de tecnología mecánica)*. Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá.
- Smart, T. (2018). Medidor de Ángulo. (1.2.1), 12-14. Estambul. Obtenido de https://play.google.com/store/apps/details?id=com.stfactory.anglemeter&hl=es_CO

ANEXOS

Anexo A. Tabla de iteraciones para la carrera ideal del pulsador

S	Fd	Fuerza resorte	Diferencia Sin masa	Diferencia con masa
0,00501	3,2423	2,7197	0,5225	0,0812
0,00502	3,2337	2,7251	0,5085	0,0672
0,00503	3,2251	2,7306	0,4946	0,0533
0,00504	3,2167	2,7360	0,4807	0,0394
0,00505	3,2082	2,7414	0,4668	0,0255
0,00506	3,1998	2,7469	0,4530	0,0117
0,00507	3,1915	2,7523	0,4392	-0,0021
0,00508	3,1831	2,7577	0,4254	-0,0159
0,00509	3,1749	2,7631	0,4117	-0,0296
0,00510	3,1666	2,7686	0,3981	-0,0432
0,00520	3,0866	2,8229	0,2638	-0,1775
0,00521	3,0788	2,8283	0,2506	-0,1907
0,00522	3,0711	2,8337	0,2374	-0,2039
0,00523	3,0634	2,8391	0,2243	-0,2170
0,00524	3,0557	2,8446	0,2112	-0,2301
0,00525	3,0481	2,8500	0,1981	-0,2432
0,00526	3,0405	2,8554	0,1851	-0,2562
0,00527	3,0330	2,8609	0,1721	-0,2692
0,00528	3,0255	2,8663	0,1592	-0,2821
0,00529	3,0180	2,8717	0,1463	-0,2950
0,0053	3,0106	2,8771	0,1334	-0,3079
0,0054	2,9383	2,9314	0,0069	-0,4344
0,0055	2,8696	2,9857	-0,1161	-0,5574
0,0056	2,8043	3,0400	-0,2357	-0,6770
0,0057	2,7421	3,0943	-0,3522	-0,7935

Fuente: elaboración propia

Tabla de iteraciones para la carrera ideal del pulsador (Continuación)

0,0058	2,6829	3,1486	-0,4657	-0,9070
0,0059	2,6266	3,2029	-0,5763	-1,0176
0,0060	2,5728	3,2571	-0,6843	-1,1256
0,0061	2,5216	3,3114	-0,7898	-1,2311
0,0062	2,4728	3,3657	-0,8929	-1,3342
0,0063	2,4262	3,4200	-0,9938	-1,4351
0,0064	2,3816	3,4743	-1,0927	-1,5340

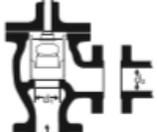
Fuente: elaboración propia

Anexo B. Tablas para el cálculo de pérdidas de válvulas

Stop Check Valves Globe and Angle Type



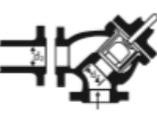
if:
 $\beta = 1 \dots K_1 = 400 f_T$
 $\beta < 1 \dots K_2 = \text{Formula 7}$
Minimum pipe velocity (fps) for full disc lift
 $= 55 \beta^2 \sqrt{V}$



if:
 $\beta = 1 \dots K_1 = 200 f_T$
 $\beta < 1 \dots K_2 = \text{Formula 7}$
Minimum pipe velocity (fps) for full disc lift
 $= 75 \beta^2 \sqrt{V}$



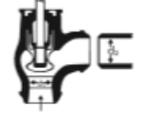
if:
 $\beta = 1 \dots K_1 = 300 f_T$
 $\beta < 1 \dots K_2 = \text{Formula 7}$
Minimum pipe velocity (fps) for full disc lift
 $= 60 \beta^2 \sqrt{V}$



if:
 $\beta = 1 \dots K_1 = 350 f_T$
 $\beta < 1 \dots K_2 = \text{Formula 7}$



if:
 $\beta = 1 \dots K_1 = 55 f_T$
 $\beta < 1 \dots K_2 = \text{Formula 7}$
Minimum pipe velocity (fps) for full disc lift
 $= 140 \beta^2 \sqrt{V}$



if:
 $\beta = 1 \dots K_1 = 55 f_T$
 $\beta < 1 \dots K_2 = \text{Formula 7}$

Foot Valves with Strainer

Poppet Disc



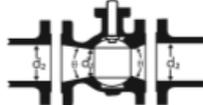
$K = 420 f_T$
Minimum pipe velocity (fps) for full disc lift
 $= 15 \sqrt{V}$

Hinged Disc



$K = 75 f_T$
Minimum pipe velocity (fps) for full disc lift
 $= 35 \sqrt{V}$

Ball Valves



if: $\beta = 1, \theta = 0 \dots K_1 = 3 f_T$
 $\beta < 1$ and $\theta \geq 45^\circ \dots K_2 = \text{Formula 5}$
 $\beta < 1$ and $45^\circ < \theta < 180^\circ \dots K_2 = \text{Formula 6}$

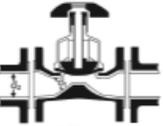
Butterfly Valves



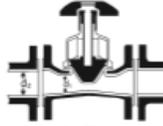


Size Range	Centric	Double Offset	Triple Offset
2" - 8"	$K=45 f_T$	$K=74 f_T$	$K=218 f_T$
10" - 14"	$K=35 f_T$	$K=52 f_T$	$K=96 f_T$
16" - 24"	$K=25 f_T$	$K=43 f_T$	$K=55 f_T$

Diaphragm Valves



Weir:
 $\beta = 1 \dots K_1 = 149 f_T$



Straight Through
 $\beta = 1 \dots K_1 = 39 f_T$

www.cranenuclear.com

Fuente: CRANE NUCLEAR. General Engineering Data. Bolingbrook, IL 60440 USA. NU-SEC8-BU-EN-LT-CN-2013_08

Anexo C. Tabla para el cálculo de pérdidas principales en una tubería de PVC.

Pérdidas por Fricción m/m										
Q	1/2" RDE		3/4" RDE		1" RDE		1.1/4" RDE	1.1/2" RDE	2" RDE	
	9	13.5	11	21	13.5	21	21	21	21	21
0,1	0,0188	0,0184	0,0050	0,0034	0,0014	0,0010				
0,2	0,0679	0,0663	0,0180	0,0122	0,0049	0,0037				
0,3	0,1437	0,1404	0,0380	0,0257	0,0104	0,0078	0,0025	0,0022		
0,4	0,2448	0,2391	0,0648	0,0438	0,0177	0,0133	0,0043	0,0033		
0,5	0,3698	0,3613	0,0979	0,0662	0,0267	0,0201	0,0064	0,0047		
0,6	0,5182	0,5062	0,1371	0,0928	0,0374	0,0281	0,0090	0,0062	0,0021	0,
0,7	0,6892	0,6733	0,1824	0,1235	0,0497	0,0374	0,0120	0,0079	0,0027	0,
0,8	0,8823	0,8619	0,2335	0,1581	0,0637	0,0479	0,0154	0,0099	0,0033	0,
0,9	1,0972	1,0718	0,2904	0,1965	0,0792	0,0595	0,0191	0,0120	0,0041	0,
1,0	1,3333	1,3024	0,3529	0,2388	0,0962	0,0723	0,0232	0,0143	0,0048	0,
1,1	1,5904	1,5536	0,4209	0,2849	0,1148	0,0863	0,0277	0,0168	0,0057	0,
1,2	1,8681	1,8249	0,4944	0,3346	0,1348	0,1013	0,0325	0,0195	0,0066	0,
1,3			0,5733	0,3880	0,1563	0,1175	0,0377	0,0223	0,0075	0,
1,4			0,6576	0,4451	0,1793	0,1348	0,0432	0,0254	0,0086	0,
1,5			0,7471	0,5057	0,2037	0,1531	0,0491	0,0286	0,0097	0,
1,6			0,8418	0,5698	0,2295	0,1725	0,0554	0,0320	0,0108	0,
1,7			0,9417	0,6374	0,2568	0,1930	0,0619	0,0356	0,0120	0,
1,8			1,0468	0,7085	0,2854	0,2145	0,0688	0,0393	0,0133	0,
1,9			1,1569	0,7830	0,3155	0,2371	0,0761	0,0432	0,0146	0,
2,0			1,2720	0,8610	0,3469	0,2607	0,0836	0,0515	0,0174	0,
2,2					0,4137	0,3110	0,0998	0,0605	0,0205	0,
2,4					0,4860	0,3653	0,1172	0,0702	0,0237	0,
2,6					0,5636	0,4236	0,1359	0,0805	0,0272	0,
2,8					0,6464	0,4858	0,1559	0,0915	0,0309	0,
3,0					0,7344	0,5519	0,1771	0,1217	0,0411	0,
3,5					0,9767	0,7341	0,2355	0,1558	0,0526	0,

Fuente: MEXICHEM SOLUCIONES INTEGRALES, PAVCO. Manual técnico tubosistemas presión PVC. Bogotá D.C.,2014.

Anexo D. Iteraciones

Iteración 1.

	(m ³ /s)	l/s	LPM	v
<i>Q_{maximo}</i>	5,8658,E-04	0,5866	35,19	1,6573
<i>Q_{medio}</i>	5,2504,E-04	0,5250	31,50	1,4835
<i>Q_{minimo}</i>	4,6351,E-04	0,4635	27,81	1,3096
	(m ³ /s)	l/s	LPM	error(%)
<i>Q_{real}</i>	5,6456,E-04	0,5631	33,79	6,7627

Iteración 2.

	(m ³ /s)	l/s	LPM	v
<i>Q_{maximo}</i>	5,8658,E-04	0,5866	35,19465	1,6573
<i>Q_{medio}</i>	5,5581,E-04	0,5558	33,34866	1,5704
<i>Q_{minimo}</i>	5,2504,E-04	0,5250	31,50267	1,4835
	(m ³ /s)	l/s	LPM	error(%)
<i>Q_{real}</i>	5,6205,E-04	0,5620	33,72	1,1099

Iteración 3.

	(m ³ /s)	l/s	LPM	v
<i>Q_{maximo}</i>	5,8658,E-04	0,5866	35,19	1,6573
<i>Q_{medio}</i>	5,7119,E-04	0,5712	34,27	1,6139
<i>Q_{minimo}</i>	5,5581,E-04	0,5558	33,35	1,5704
	(m ³ /s)	l/s	LPM	error(%)
<i>Q_{real}</i>	5,6079,E-04	0,5608	33,65	-1,8549

Iteración 4.

	(m ³ /s)	l/s	LPM	v
<i>Q_{maximo}</i>	5,7119,E-04	0,5712	34,27	1,6139
<i>Q_{medio}</i>	5,6350,E-04	0,5635	33,81	1,5921
<i>Q_{minimo}</i>	5,5581,E-04	0,5558	33,35	1,5704
	(m ³ /s)	l/s	LPM	error(%)
<i>Q_{real}</i>	5,6142,E-04	0,5600	33,6013458	-0,6214

Iteración 5.

	(m ³ /s)	l/s	LPM	v
<i>Q_{maximo}</i>	5,635,E-04	0,5635	33,81	1,5921
<i>Q_{medio}</i>	5,597,E-04	0,5597	33,58	1,5813
<i>Q_{minimo}</i>	5,558,E-04	0,5558	33,35	1,5704
	(m ³ /s)	l/s	LPM	error(%)
<i>Q_{real}</i>	5,6174,E-04	0,5617	33,70	0,3700

Iteración 6.

	(m ³ /s)	l/s	LPM	v
<i>Q_{maximo}</i>	5,6350,E-04	0,5635	33,81	1,5921
<i>Q_{medio}</i>	5,6158,E-04	0,5616	33,69	1,5867
<i>Q_{minimo}</i>	5,5966,E-04	0,5597	33,58	1,5813
	(m ³ /s)	l/s	LPM	error(%)
<i>Q_{real}</i>	5,6158,E-04	0,5616	33,69	-0,0003

Anexo E. Propiedades del agua

Temperatura (°C)	Peso específico γ (kN/m ³)	Densidad ρ (kg/m ³)	Viscosidad dinámica η (Pa·s)	Viscosidad cinemática ν (m ² /s)
0	9.81	1000	1.75×10^{-3}	1.75×10^{-6}
5	9.81	1000	1.52×10^{-3}	1.52×10^{-6}
10	9.81	1000	1.30×10^{-3}	1.30×10^{-6}
15	9.81	1000	1.15×10^{-3}	1.15×10^{-6}
20	9.79	998	1.02×10^{-3}	1.02×10^{-6}
25	9.78	997	8.91×10^{-4}	8.94×10^{-7}
30	9.77	996	8.00×10^{-4}	8.03×10^{-7}
35	9.75	994	7.18×10^{-4}	7.22×10^{-7}
40	9.73	992	6.51×10^{-4}	6.56×10^{-7}
45	9.71	990	5.94×10^{-4}	6.00×10^{-7}
50	9.69	988	5.41×10^{-4}	5.48×10^{-7}
55	9.67	986	4.98×10^{-4}	5.05×10^{-7}
60	9.65	984	4.60×10^{-4}	4.67×10^{-7}
65	9.62	981	4.31×10^{-4}	4.39×10^{-7}
70	9.59	978	4.02×10^{-4}	4.11×10^{-7}
75	9.56	975	3.73×10^{-4}	3.83×10^{-7}
80	9.53	971	3.50×10^{-4}	3.60×10^{-7}
85	9.50	968	3.30×10^{-4}	3.41×10^{-7}
90	9.47	965	3.11×10^{-4}	3.22×10^{-7}
95	9.44	962	2.92×10^{-4}	3.04×10^{-7}
100	9.40	958	2.82×10^{-4}	2.94×10^{-7}

Fuente: MOTT (2006)