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

PROTOTIPO FUNCIONAL PARA EVALUACIÓN DE ESTACIONES DE BOMBEO SUMERGIBLES Y FLUJO EN CANAL ABIERTO EN EL LABORATORIO DE FLUIDOS DEL ITM

Nicolás Ocampo Valencia

Sebastián Orozco Jiménez

Ingeniería Electromecánica

Adrián F. Martínez Pérez

**INSTITUTO TECNOLÓGICO METROPOLITANO
2016**

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

RESUMEN

Un sistema de bombeo sumergible tiene como principio aumentar la presión e impulsar líquidos estando sumergidas en el mismo, incluso a grandes profundidades. Este sistema tiene muchas aplicaciones, tales como, drenar el agua en caso de presentarse una inundación, sistemas de recirculación de agua, abastecimiento para residencias que cuentan con suministro de agua desde tanques subterráneos o tanques de reserva, entre otras.

Con todas estas aplicaciones que tienen este sistema, es importante que los estudiantes del Instituto Tecnológico Metropolitano, tengan un prototipo funcional para evaluación de estaciones de bombeo sumergibles y flujo en canal abierto, ubicado en el laboratorio de fluidos del ITM, en el cual se muestra como seleccionar una bomba sumergible, diseño del tanque, selección de tuberías, diseño de canal de descarga y retorno, visualizar la función de los aquietadores y diseño de vertederos.

El prototipo funcional para evaluación de estaciones de bombeo sumergibles y flujo en canal abierto cuenta con diferente instrumentación como: piezómetro, manómetro, regletas, voltímetro y amperímetro, con la que los estudiantes podrán realizar diferentes mediciones y a partir de estas se podrán realizar diferentes cálculos, como lo son, potencia real de la bomba sumergible, curvas de la bomba sumergible, eficiencia de la bomba sumergible, cálculo de pérdidas, cálculo de caudal por vertederos y cálculo de caudal por métodos poco convencionales.

Palabras clave: Sumergencia, prototipo, succión, variables.

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

RECONOCIMIENTOS

Primeramente a Dios por iluminarnos día a día en todo este camino e impulsarnos a seguir a delante, para superarnos cada día más y ayudarnos a afrontar todos los obstáculos presentados; a nuestras familias, novias y amigos que nos motivaron para optar al título de ingenieros electromecánicos con todo su apoyo y buena energía constantemente; a nuestros profesores del programa de ingeniería electromecánica por los conocimientos impartidos que nos permitieron el desarrollo de las competencias; al profesor Adrián Felipe Martínez Pérez por el asesoramiento en la realización de este trabajo de grado y a todos aquellos que de una u otra manera nos colaboraron con el desarrollo de este proyecto.

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

ACRÓNIMOS

ANSI: American National Standards Institute

HI: Hydraulic Institute

Accesorios: Elementos constitutivos de un sistema de tuberías, diferentes de las tuberías en sí, tales como uniones, codos, tees etc.

Aforo: Conjunto de operaciones para determinar el caudal de un curso de agua para un nivel observado, a un cierto nivel o porcentaje de exactitud.

Altura piezométrica: Altura a la que se elevaría el agua en un tubo piezométrico colocado en un punto de una conducción.

Canal: Conducto descubierto que transporta agua a flujo libre.

Caudal: Cantidad de fluido que pasa por determinado elemento en la unidad de tiempo.

Circuito: Unidad hidráulica que cuenta con alimentación de manera exclusiva e independiente.

Coefficiente de fricción: Coeficiente que representa el efecto de la fricción entre el flujo y la pared del canal, depende de la rugosidad relativa de la tubería o canal y del número de Reynolds.

Coefficiente de rugosidad: Medida de la rugosidad de una superficie, que depende del material y del estado de la superficie interna de una tubería.

Cresta: Punto más elevado de una estructura de rebose.

Estación de bombeo: Componente destinado a aumentar la presión del agua con el objeto de transportarla a estructuras más elevadas.

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

Estructura de disipación: Estructura cuyo objetivo es disminuir la energía específica del flujo en un canal abierto.

Fugas: Cantidad de agua que se pierde en un sistema de acueducto por accidentes en la operación, tales como rotura o fisura de tubos, rebose de tanques, o fallas en las uniones entre las tuberías y los accesorios.

Pendiente: Inclinación longitudinal de un canal o ducto.

Pérdidas: Diferencia entre el volumen de agua que entra a un sistema de acueducto y aquel que sale o es facturado, dependiendo del sistema.

Pérdidas por fricción: Pérdida de energía causada por los esfuerzos cortantes generados por la interacción entre el flujo de agua y las paredes de un conducto.

Sumergencia: Acción de estar inmerso en agua relacionada con sistemas de tubería-bomba.

Tanque de succión: Tanque de almacenamiento desde el cual una bomba succiona el agua que impulsa hacia otro punto de una red.

Tubería: Ducto de sección circular para el transporte de agua.

Válvula de compuerta: Válvula que abre mediante levantamiento de una compuerta o cuchilla, permitiendo así el paso del fluido.

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

TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN.....	8
1.1	Justificación.....	8
1.2	Planteamiento del problema.....	8
1.3	Objetivos.....	8
1.3.1	General.....	8
1.3.2	Específicos.....	8
2.	MARCO TEÓRICO.....	10
2.1	Maquinas hidráulicas.....	10
2.2	Bombas sumergibles.....	10
2.3	Canales.....	11
2.3.1	Tipos de sección transversal empleados en canales.....	12
2.3.1.1	Sección rectangular.....	12
2.3.1.2	Sección trapezoidal.....	13
2.3.1.3	Sección triangular.....	14
2.3.1.4	Sección mixta.....	14
2.3.1.5	Sección natural.....	15
2.3.1.6	Sección circular.....	15
2.3.1.7	Sección de herradura.....	16
2.4	Vertederos.....	16
2.4.1	Clasificación de los vertederos según la altura de la lámina de aguas abajo.....	16
2.4.1.1	Vertedero lámina libre.....	16
2.4.1.2	Vertedero con lámina sumergida.....	17
2.4.2	Según el espesor de la pared.....	17
2.4.2.1	Vertederos de pared delgada y gruesa.....	17
2.4.3	Según su forma geométrica.....	18
2.4.3.1	Rectangulares.....	18
2.4.3.2	Triangulares.....	18
2.4.3.3	Trapezoidales.....	19
2.4.3.4	Circulares.....	19
2.5	Disipador de energía hidráulica (Aquietador).....	20
2.6	Instrumentos de medición.....	21
2.6.1	Voltímetro digital.....	21
2.6.2	Amperímetro.....	21
2.6.3	Piezómetro.....	22
2.6.4	Manómetro.....	23
3.	METODOLOGÍA.....	24

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

4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	34
4.1	Cálculo del canal abierto rectangular.....	34
4.2	Cálculo de dimensiones los vertederos.....	36
4.2.1	Vertedero rectangular con contracción lateral.....	36
4.2.2	Vertedero rectangular sin contracción lateral.....	37
4.2.3	Vertedero triangular de 90°.....	38
4.3	Cálculo de caudal por medio de vertedero.....	39
4.3.1	Cálculo de caudales del vertedero rectangular con contracción lateral.....	41
4.3.2	Cálculo de caudales del vertedero rectangular sin contracción lateral.....	42
4.3.3	Cálculo de caudales del vertedero triangular de 90°.....	42
4.4	Caudal por método volumétrico.....	43
4.5	Caudal por método de la trayectoria.....	44
4.6	Eficiencia de la bomba.....	45
4.6.1	Potencia teórica.....	45
4.6.2	Potencia real.....	46
4.6.3	Rendimiento de la bomba.....	47
4.7	Pérdidas en la tubería.....	47
4.8	Curvas de la bomba.....	48
4.8.1	Curva característica de la bomba Q x p.....	48
4.8.2	Curva de potencia Q x P.....	49
5.	CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO	50
5.1	Conclusiones.....	50
5.2	Recomendaciones.....	51
5.3	Trabajo futuro.....	51
	REFERENCIAS	52
	APÉNDICE.....	54

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

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Justificación

Un sistema de bombeo sumergible es muy poco común que se presente como un banco de pruebas en un laboratorio de una universidad. Normalmente se ven sistemas de bombeo convencionales o comunes, es decir, de bombas centrífugas conectadas a dos tanques, uno de succión y uno de descarga y en el recorrido del sistema una serie de instrumentos para medir y controlar las variables. Este proyecto busca implementar un prototipo funcional de un sistema de bombeo sumergible en el cual la comunidad académica del ITM puede interactuar y adquirir conocimientos para aplicar en sus asignaturas y en su vida profesional en el complejo campo de la hidráulica.

1.2 Planteamiento del problema

La implementación de este prototipo funcional para el laboratorio de fluidos busca dar solución a la necesidad de aprender a diseñar, fabricar sistemas de bombeo para aplicaciones reales y aprender diferentes métodos de mediciones de caudal.

1.3 Objetivos

1.3.1 General

Diseñar y fabricar a partir de cálculos un prototipo de sistema de bombeo sumergible y flujo en canal abierto en el laboratorio de fluidos del ITM, por medio de un circuito cerrado de bombeo con su respectiva instrumentación y herramientas comunes, donde se pueden realizar diagnósticos, los cuales permitan evaluar los componentes y variables bajo condiciones de operación.

1.3.2 Específicos

- Describir el funcionamiento de todos los componentes del prototipo de bombeo sumergible.
- Demostrar métodos de medición de caudal en campo.
- Evaluar diferentes alternativas en un circuito cerrado de bombeo, en el cual se permitirá replicar varios procesos de medición de variables tales como presión, caudal, nivel, voltaje, corriente y potencia de la bomba.

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

- Validar a partir del funcionamiento del sistema datos como eficiencia, curvas de la bomba y pérdidas.
- Realizar la comparación de los resultados teóricos con los reales, medidos en el funcionamiento del prototipo.

La organización que aborda este trabajo de investigación, está basada en la realización de un banco de pruebas con un sistema de bombeo sumergible, en la que se investigan varias teorías de los elementos que componen el prototipo, por lo tanto, basados en dicha investigación se procede a fabricar y se realizan ensayos experimentales para comparar los datos con los teóricos.

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

2. MARCO TEÓRICO

En la realización de este proyecto, es fundamental consultar información acerca de los componentes y funcionamiento de este sistema hidráulico basados en proyectos reales, artículos científicos, revistas, tesis, manual, entre otras fuentes de información. Se hizo una investigación, en la que se determina que estos sistemas de bombes sumergibles son muy poco comunes en el ámbito educativo, siendo de gran importancia para la adquisición de conocimientos en el campo hidráulico. Se describirá desde un concepto base como lo son las maquinas hidráulicas, los distintos componentes y elementos del prototipo.

2.1 Maquinas hidráulicas

Las maquinas hidráulicas o máquinas de fluido son aquellas que intercambian energía con el fluido que esta contenido o que circula por su interior, es decir, el fluido comunica la energía que absorbe la máquina, o bien el fluido es el que recibe la energía que la maquina le transmite.

Las maquinas hidráulicas constituyen una de las aplicaciones fundamentales de la mecánica de fluidos y se encuentran presentes en todo tipo de instalaciones y maquinaria industrial. Su estudio parte del conocimiento de las ecuaciones generales de la conservación de la mecánica de fluidos [1].

Las bombas son un claro ejemplo de las maquinas hidráulicas, las cuales están identificadas de los siguientes tipos: bombas de desplazamiento positivo o volumétricas, bombas de embolo alternativo, bombas volumétricas rotativas o roto estáticas y bombas roto dinámicas las cuales se subdividen en: radiales o centrífugas, axiales y diagonales o helicocentrífugas. En nuestro proyecto utilizaremos una bomba sumergible que entra en la categoría de las radiales y/o centrifugas.

2.2 Bombas sumergibles

Las bombas sumergibles son máquinas capaces de impulsar líquidos estando sumergidas en agua o en cualquier líquido, incluso a grandes profundidades. Se caracterizan por ser la unión del cuerpo de la bomba y el motor. Ambos son sumergidos juntos, ya que están dentro de la misma estructura.

A diferencia de otros tipos de bombas, las sumergibles no dependen de la presión del aire que las rodea, así que pueden impulsar los líquidos a alturas considerables.

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

En términos generales, el funcionamiento de las bombas sumergibles es igual al del resto de las bombas, ya que también pueden convertir la energía mecánica en energía hidráulica. La diferencia es que aquí el motor está sumergido y se acopla directamente a la flecha de la bomba.

Tanto el motor como la flecha están sellados herméticamente. Esta situación podría provocar la elevación en la temperatura de la bomba. Para solucionar este inconveniente, el propio líquido que fluye por la bomba funciona como enfriador.

Para llevar a cabo sus funciones, las bombas sumergibles cuentan con un cuerpo interno formado por difusores e impulsores que pueden fabricarse con acero o termoplásticos. Tanto los difusores como los impulsores serán los encargados de aplicar la presión al líquido y, con esto, conseguir su elevación [2].

2.3 Canales

Se denomina canal a una construcción destinada al transporte de fluidos. Generalmente utilizada para agua y que, a diferencia de las tuberías, es abierta a la atmósfera. También se utilizan como vías artificiales de navegación [3].

Como se verá a continuación y más adelante, las figuras geométricas que pueden tener los canales y los vertederos son iguales así que esto tiende a confundir o a parecer que realizan la misma actividad pero en realidad cada uno tiene una tarea específica.

Los canales como se describió anteriormente son estructuras utilizadas para transportar a un lugar determinado un fluido y tiene como variables el área mojada, el perímetro mojado, profundidad del agua y el radio hidráulico utilizadas para realizar cálculos de caudales. En el caso de los vertederos son utilizados para causar una sobre elevación del nivel en cierto canal, río, lago entre otros lugares con el fin de tener un control de nivel e inclusive también realizar la medición de caudales. Más adelante, en la sección de vertederos se dará una mejor descripción.

Los canales se clasifican en naturales y artificiales.

Canales naturales: Hacen parte de esta categoría aquellos que la acción exclusiva de los agentes de la naturaleza (en particular la erosión) ha conformado a lo largo del tiempo. Esto es, la corrientes naturales como.

- Ríos.
- Arroyos y quebradas
- Estuarios.

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

Canales artificiales: Los canales proyectados y construidos por el hombre.

- Vías navegables.
- Sistema de alcantarillado
- Cunetas
- Vertederos de excedencias
- Aforadores
- Obras de rectificación para corrientes naturales
- Conducciones para abastecimiento de agua potable
- Canaletas
- Acequias
- Canales para riego

2.3.1 Tipos de sección transversal empleadas en canales.

Los canales artificiales se construyen con unas secciones transversales cuya forma obedece a uno, o unos, entre los siguientes criterios: una aplicación específica, economía, topografía, resistencia estructural o estabilidad geotécnica. A continuación se presenta una descripción de las clases con mayor frecuencia [4].

2.3.1.1 Sección rectangular.

Son unos parámetros geométricos, el ancho de base b y la altura h (Figura 1). Puede afirmarse que es la sección más simple entre todas las usadas en las aplicaciones prácticas de la hidráulica de canales. Cuando su conformación es el resultado de una excavación, la estabilidad geotécnica requiere dotarla, casi siempre, de un recubrimiento de hormigón armado. Esta previsión es evidentemente indispensable cuando se construye sobre un terraplén.

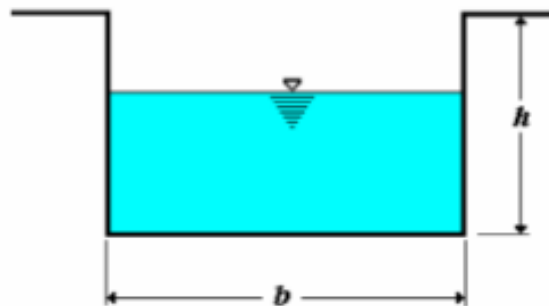


Figura 1. Canal de sección transversal (rectangular). Tomado de: [4].

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

Es factible encontrar también canales rectangulares construidos sin recubrimiento. Se trata de zangas o trincheras que dan lugar a acequias, especialmente en ambientes rurales. Son pues desarrollos artesanales de escasa profundidad de excavación y que, por consiguiente, gozan de estabilidad geotécnica. Así mismo, son canales excavados en roca, cuya calidad admite el corte vertical [4].

2.3.1.2 Sección trapezoidal

Queda determinada por los mismos parámetros que caracterizan la rectangular, b , h , a los que se agregan los taludes laterales Z_1, Z_2 (Figura 2). Es la solución más recomendada cuando es indispensable excavar para construir un canal. Se entiende, por lo tanto, que los taludes se escogen para garantizar la estabilidad geotécnica de la sección transversal. A pesar de esto, es necesario proteger las paredes con algún tipo de material, hormigón armada por lo general, cuando la magnitud de la pendiente del canal para inducir velocidad elevadas.

Un canal con sección transversal trapezoidal podría llegar a ser irrealizable en situaciones como la siguiente. Un trazado plano que tenga que ceñirse a un corredor preestablecido y que precise de una excavación grande es un terreno deleznable. Es evidente que la inestabilidad del terreno requiere de la utilización de taludes laterales elevados que podrían implicar una extensión lateral excesiva por parte de la sección transversal y una eventual invasión a los terrenos adyacentes a la franja demarcada. De ser así, deberá recurrirse indefectiblemente a una sección rectangular.

En resumen: se prefiere usar en la aplicación práctica la sección trapezoidal por su estabilidad y cuando sea factible evitar el recubrimiento. En caso de tener que emplearlo es aconsejable, más bien, tener en cuenta el criterio económico para decidir entre esta o la rectangular [4].

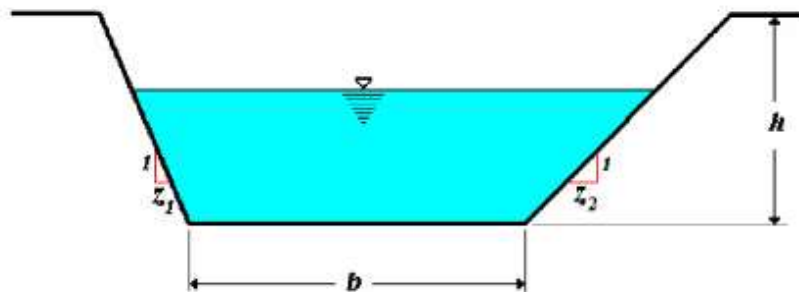


Figura 2. Canal de sección trapezoidal. Tomado de: [4].

2.3.1.3 Sección triangular

Se caracteriza por el parámetro talud Z_1 , Z_2 y por h (Figura 3). Se le utiliza primordialmente destinados al drenaje. Cuando se utiliza en esta clase de aplicaciones, se le llaman cuneta. Se construyen anexas a las vías terrestres y al terraplén de agua debajo de una presa de enrocado o tierra. Uno de los taludes se conforma, habitualmente, según el de la berma de la vía o el de la presa. Suelen llevar recubrimiento. Se le aprovecha también como sección para aforo de caudal [4].

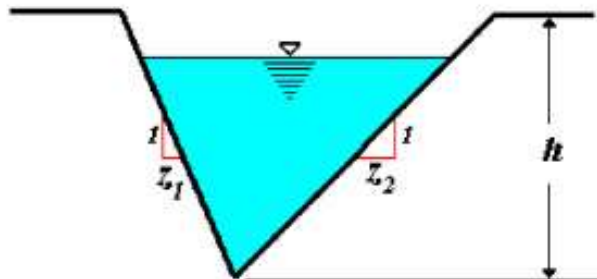


Figura 3. Canal de sección triangular. Tomado de: [4].

2.3.1.4 Sección mixta

Se emplea esta variedad de sección transversal con el objetivo de racionalizar los costos del recubrimiento. Uno de los aspectos principales que se debe al diseñar un canal es el máximo caudal que debe ser capaz de transportar durante su vida útil o periodo de diseño. No obstante, el canal tendrá también que coincide una variedad gama de descargas a lo largo de ese lado, incluidos algunos pequeños caudales. Por ende, la capacidad plena de la sección transversal sólo será demandada esporádicamente y sería un desperdicio utilizar la misma calidad de recubrimiento para toda ella. Se construyen, por tanto, dos secciones transversales. Estas llevan a distinguir sendos canales (Figura 4) [4].

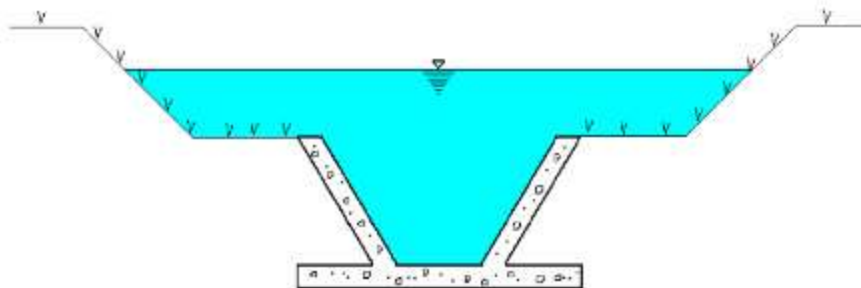


Figura 4. Canal de sección mixta. Tomado de: [4].

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

2.3.1.5 Sección natural

Las corrientes naturales muestran variadas formas en sus secciones transversales debido a los procesos que sirven para crearlas, de suerte que no es factible hablar de una típica (Figura 5), podría pensarse que la forma de esta clase de sección transversal es un casco bastante particular de la mixta. De esto se sigue, que su descripción geométrica debe hacerse indispensablemente por medio de un sistema coordenado cartesiano, el mismo indicado para la sección transversal mixta [4].

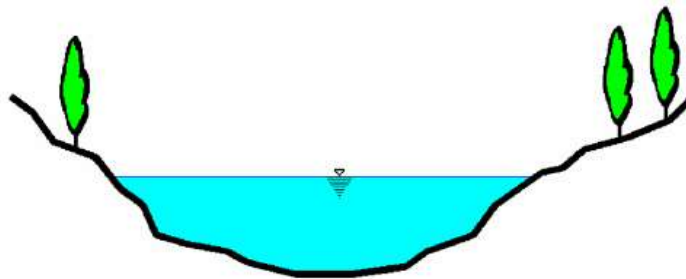


Figura 5. Canal de sección natural. Tomado de: [4].

2.3.1.6 Sección circular

Se especifica con un único parámetro geométrica, el diámetro d (Figura 6). Es raro que se le use en forma abierta, salvo como vertedero para aforo. Lo habitual es hacerlo como sección transversal cerrada y podría operar a presión. Hasta tiempos recientes se le elaboraba exclusivamente en forma industrial, a diferencia de las secciones transversales.

Su aplicación más difundidas es la de colector de aguas lluvias o servidas (alcantarillado). Se trata de tuberías de hormigón instaladas según un trazado elegido [4].

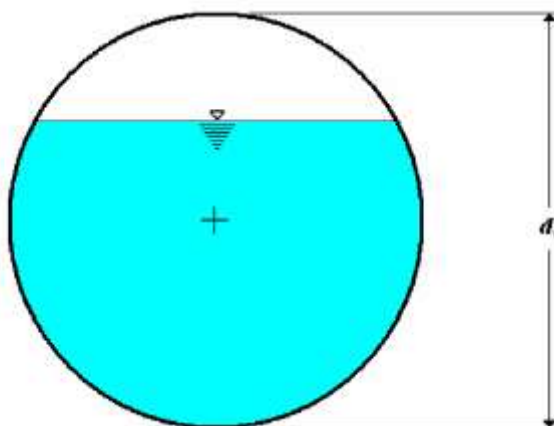


Figura 6. Canal de sección circular. Tomado de: [4].

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

2.3.1.7 Sección de herradura

Concebida para servir de transición a través de obstáculos naturales, como macizos montañosos. Estos explican una geometría que es idéntica a la de estructuras semejantes empleadas en las vías terrestres (túneles). Su forma mixta de trapecio (o de rectángulo) y bóveda circular responde, consecuentemente, al propósito de contribuir a su estabilidad estructural y geotécnica.

De esto se explica que se haga la especificación de esta clase de sección con los parámetros geométricos Z_1 , Z_2 , d_0 , b (Figura 7) [4].

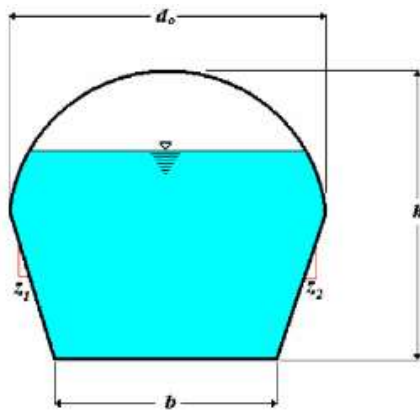


Figura 7. Canal de sección de herradura. Tomado de: [4].

2.4 Vertederos

Como lo describen en [5] un vertedero es un muro o una barrera que se interpone al flujo, causando sobre-elevación del nivel de la lámina aguas arriba y disminución aguas abajo. Las principales funciones de los vertederos son:

- Control de nivel en embalses, canales, depósitos, estanques, etc.
- Aforo o medición de caudales.
- Elevar el nivel del agua.
- Evacuación de crecientes o derivación de un determinado caudal.

2.4.1 Clasificación de los vertederos según la altura de la lámina de aguas abajo

2.4.1.1 Vertedero de lámina libre

Es aquel cuya lamina vertiente toma una forma de caída natural y además, el nivel de agua abajo es inferior a la altura de la barrera (a) [6].

2.4.1.2 Vertedero con lámina sumergida

Es aquel cuya lamina vertiente queda sumergida, cuando el nivel de agua abajo se eleva por encima del límite de la barrera (b) [6].

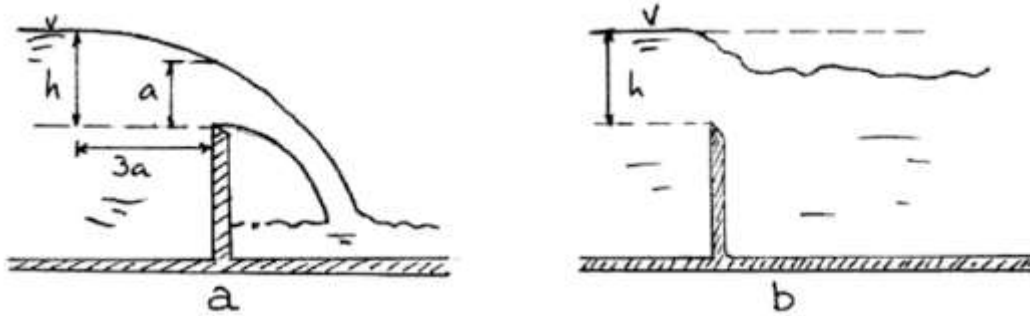


Figura 8. Vertederos con lámina libre y sumergida. Tomado de: [6].

2.4.2 Según el espesor de la pared

2.4.2.1 Vertederos de pared delgada y gruesa

Los vertederos de pared delgada (c), con cresta en arista viva sirven para medir caudales con gran precisión; mientras los vertederos de pared gruesa (d) desaguan un caudal mayor y se emplean como parte de una presa u otra estructura hidráulica para control del nivel [6].

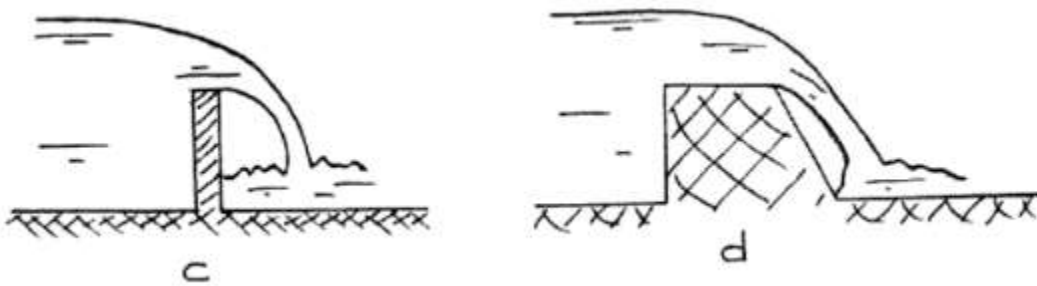


Figura 9. Vertederos de pared delgada y gruesa. Tomado de: [6].

2.4.3 Según su forma geométrica

2.4.3.1 Rectangulares

Los vertederos rectangulares se clasifican en vertederos sin contracción lateral, si el ancho de la abertura del vertedero es igual al ancho del canal y vertederos con contracción lateral en caso contrario [5].

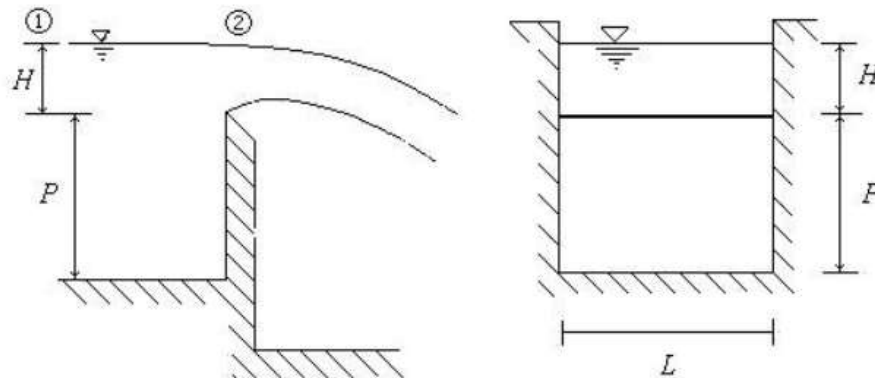


Figura 10. Vertedero rectangular sin contracción lateral. Tomado de: [5].

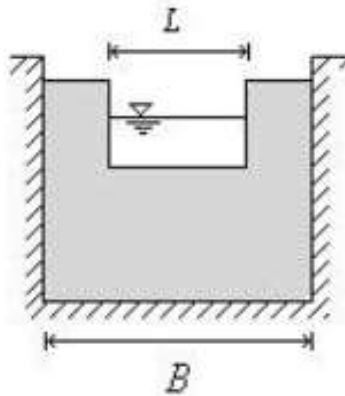


Figura 11. Vertedero rectangular con contracción lateral. Tomado de: [5].

2.4.3.2 Triangulares

Este vertedero se emplea mucho para medir caudales pequeños (inferior a 6 l/s). El ángulo β puede ser cualquiera, aunque es muy frecuente el vertedero triangular con $\beta = 90^\circ$ [5].

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

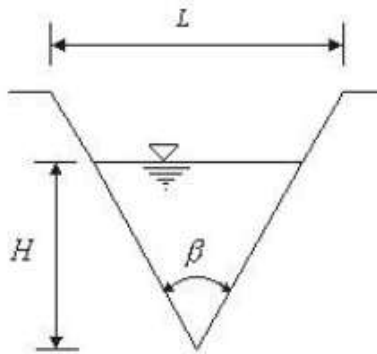


Figura 12. Vertedero triangular. Tomado de: [5].

2.4.3.3 Trapezoidales

Este vertedero ha sido diseñado con el fin de disminuir el efecto de las contracciones que se presentan en un vertedero rectangular contraído [5].

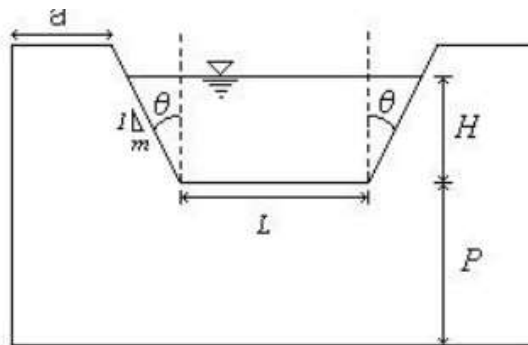


Figura 13. Vertedero trapezoidal. Tomado de: [5].

2.4.3.4 Circulares

Se emplean rara vez, ofrecen como ventajas la facilidad de construcción y que no requieren el nivelamiento de la cresta [5].

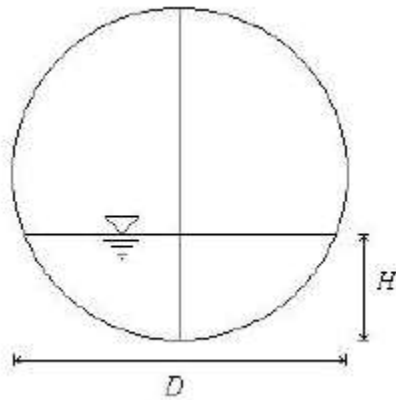


Figura 14. Vertedero circular. Tomado de: [5].

2.5 Disipador de energía hidráulica (Aquietador)

La estructura disipadora de energía es una parte importante del sistema, que tiene por objeto disipar la energía cinética que el agua adquiere en su caída desde el vaso hasta un sitio adecuado en el fondo del cauce, donde no genere problemas de erosión o socavación. Estas estructuras se diseñarán para que el agua, que sale del canal de descarga, se aleje lo máximo posible, dentro de lo económico, de la cortina o de alguna estructura complementaria [7].

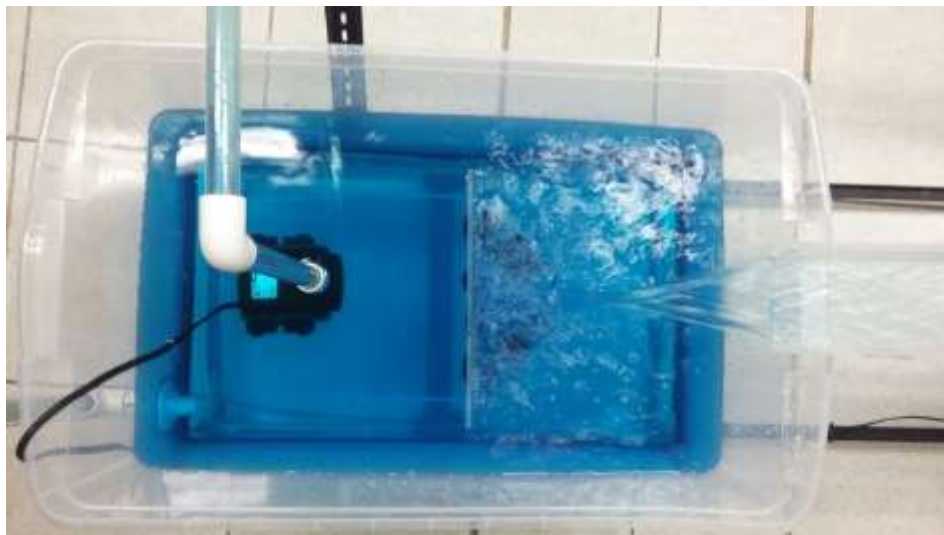


Figura 15. Aquietador prototipo fabricado. Fuente: Autores.

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

2.6 Instrumentos de medición

En esta sección es importante dar a conocer los instrumentos de medición que dan un gran aporte a la función y objetivo del prototipo, por esto los describiremos a continuación.

2.6.1 Voltímetro digital: El voltímetro digital puede ser considerado básicamente como un convertidor analógico/digital conectado a un contador y a una unidad de visualización. La tensión que se quiere medir, una cantidad analógica, se muestrea en algún instante de tiempo y se convierte mediante el convertidor A/D en una señal digital, es decir de impulsos con el número de impulsos indicando el tamaño de la tensión analógica. Estos impulsos se cuentan por el contador [8].

2.6.2 Amperímetro: Un Amperímetro convencional tiene por objetivo medir la intensidad de corriente que se está recorriendo un circuito, bajo esta categoría también entra la intensidad de corriente de las fuentes de poder. Por defecto un amperímetro usa como unidad de medida el Ampere como numero entero, hay amperímetros que pueden medir algunas decenas y centenas, sin embargo para mediciones precisas se puede utilizar un micro amperímetro el cual esta calibrado en millonésimas de amperio o también se puede usar un miliamperímetro que esta calibrado en milésimas de amperio [9].

En este proyecto se utilizará un medidor de voltaje y corriente digital descrito a continuación:

MEDIDOR DE CORRIENTE Y VOLTAJE DIGITAL	
Referencia	D52-2042
Exactitud	1%
Tipo de display	Tubo digital LED de 0,5 pulg
Rango de voltaje AC	80 - 300V, 200 - 450V
Velocidad	2 x seg
Dimensiones	54 x 80 x 64 mm
Tipo de instalación	Carril DIN

Tabla 1. Especificaciones técnicas del medidor de corriente y voltaje digital. Tomado de: [10].

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



Figura 16. Medidor de corriente y voltaje digital D52-2042. Tomado de: [11].

2.6.3 Piezómetro: Instrumento que se utiliza para medir la presión de poros o nivel del agua en perforaciones, terraplenes, cañerías y estanques. La aplicación geotécnica más común es para determinar la presión de agua en el terreno o el nivel de agua en perforaciones [12]. Es una tubería o manguera de diámetro pequeño, abierta en ambos extremos, generalmente no perforada, de modo tal, que no se produzcan filtraciones entre la pared exterior del tubo y el suelo, y permitir que toda el agua que ingrese a su interior lo haga solo por el extremo inferior [13].



Figura 17. Piezómetro prototipo fabricado. Fuente: Autores.

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

2.6.4 Manómetro: Un manómetro es un instrumento de medida de la presión en fluidos (líquidos y gases) en circuitos cerrados. Miden la diferencia entre la presión real o absoluta y la presión atmosférica, llamándose a este valor presión manométrica.

Lo que realmente hacen es comparar la presión atmosférica (la de fuera) con la de dentro del circuito por donde circula el fluido. Por eso se dice que los manómetros miden la presión relativa.

Todos los manómetros tienen un elemento que cambia alguna propiedad cuando son sometidos a la presión, este cambio se manifiesta en una escala o pantalla calibrada directamente en las unidades de presión correspondientes, normalmente en bares o en psi, y una aguja que gira en función de la diferencia de presión entre el exterior y la del circuito donde queremos medir. Es decir la aguja nos mide la presión en el interior del circuito.

Los medidores de presión o manómetros son ampliamente utilizados en todo el mundo, para tareas que van desde el control de la presión de los neumáticos en un coche antes de un viaje a la vigilancia de la presión de varios sistemas dentro de una planta de energía nuclear [14].



Figura 18. Manómetro 0-250 mbar. Fuente: Autores.

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

3. METODOLOGÍA

En el desarrollo del proyecto se realizó un estudio e investigación guiados por el asesor del proyecto en diferentes temas relacionados con el área de ingeniería, con énfasis en el área hidráulica. Se consulta en diferentes bases de datos y libros con el fin de poder determinar teorías, normas y formulas, las cuales son verídicas y confiables y con base a esta información, se procede a diseñar y fabricar el prototipo funcional para evaluación de estaciones de bombeo sumergibles y flujo en canal abierto.

En la etapa de diseño del proyecto, se procede a tomar las medidas en el laboratorio de fluidos del ITM, para determinar las dimensiones del prototipo, donde se tiene disponible 1.50 m de largo, 0.50 m de ancho y 1.5 m de alto.

Para seleccionar la bomba sumergible, se tuvo en cuenta que el prototipo funcional para evaluación de estaciones de bombeo sumergibles y flujo en canal abierto es un circuito cerrado, ya que este va a recircular el agua y las únicas pérdidas serían por tubería y accesorios, ésta tenía que cumplir unas características específicas, como lo son, un caudal mínimo de 20 l/min, necesario para realizar mediciones y una cabeza de descarga óptima aproximada de 1.5 m, teniendo en cuenta el espacio disponible en el laboratorio de fluidos del ITM. Se seleccionó una bomba sumergible para fuentes de ornato y estanques de 45W (Figura 19), modelo AQUA45W, marca Evans, con capacidad de 30 l/min y una cabeza de descarga óptima de 2.0 m



Figura 19. Bomba sumergible Evans. Tomado de: [10].

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

MOTOR	
Tipo de motor	Eléctrico
Potencia del motor	0,10 hp
RPM del motor	3450 RPM
Voltaje	120 V
Fases del motor	Monofásico
BOMBA	
Tipo de bomba	De fuente
Flujo optimo	15,00 LPM
Altura optima	2,0 m
Numero de etapas	1 etapa
Diámetro de succión	0,75 pulg
Diámetro de descarga	0,50 pulg
Tipo de impulsor	Abierto
Material del cuerpo	Plástico
Material del impulsor	Plástico
Material del sello mecánico	Cerámica, carbón, acero inoxidable, buna
INFORMACION ADICIONAL	
Certificación	NOM / ANCE
Dimensiones	11 x 8 x 11 cm
Peso	1,10 kg

Tabla 2. Especificaciones técnicas bomba sumergible Evans AQUA45W. Tomado de: [10].

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

Con la ficha técnica de la bomba antes descrita, se procede a la selección del tanque donde estaría ubicada la bomba sumergible, para determinar el volumen del tanque se tuvo en cuenta la capacidad de la bomba sumergible, que en este caso es de 30 l/min, por lo que se selecciona un tanque con capacidad de 65 l, la cual es un poco más del doble de la capacidad de la descarga, es decir 60 l por 2 minutos y con este volumen se garantiza aún mas que no haya escases de agua en la succión debido al retorno del circuito y por lo tanto formación de vórtices y cavitación. Existe normatividad para la determinación del volumen de un tanque de succión, pero en este caso es un prototipo de laboratorio (banco de pruebas) y un circuito cerrado, por lo tanto no se aplica.

Según la norma ANSI/HI 2.3, las dimensiones del tanque deben cumplir unas exigencias mínimas según el diámetro de succión de la bomba (ver Figura 20).

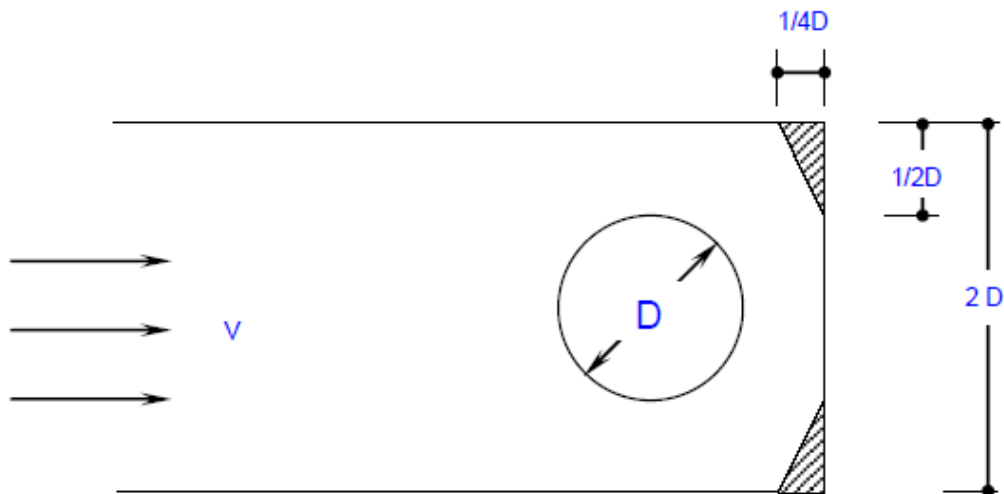


Figura 20. Dimensiones mínimas según diámetro de succión de la bomba. Fuente: Autores.

Para la altura del agua mínima por encima de dicha succión, existe un término llamado Sumergencia (Figura 21) el cual se propone en la norma para evitar el fenómeno de vórtice (ver Figura 22).

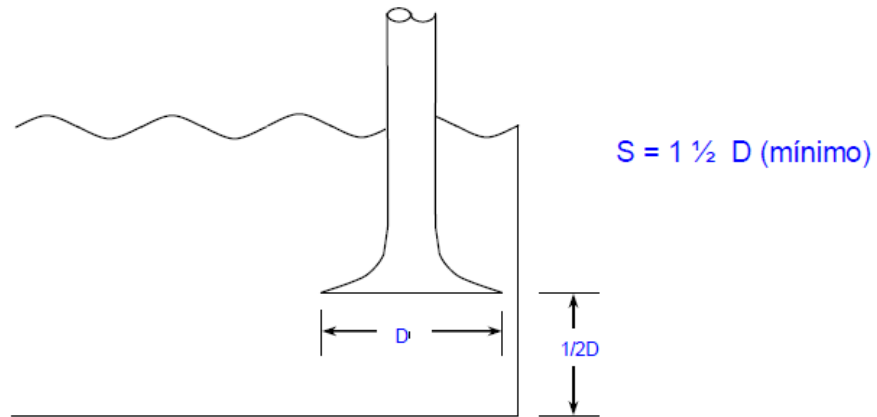


Figura 21. Sumergencia mínima de la succión de la bomba. Fuente: Autores.

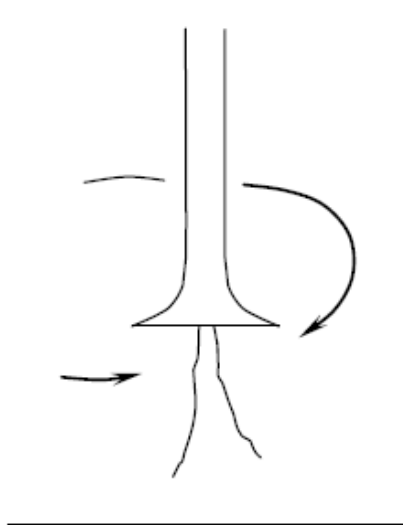


Figura 22. Vórtice generado en la succión de la bomba. Fuente: Autores.

Se continúa con la selección de la tubería. Ésta fue determinada por el tamaño de la descarga de la bomba sumergible, por lo tanto se seleccionó una tubería de ½ pulgada en material pvc transparente, con el fin de que sea más visible el recorrido y el comportamiento del agua.



Figura 23. Tubería transparente PVC utilizada. Tomado de: [15].

En el caso del canal, se escogió uno de sección rectangular ya que este es el más común de los canales y se ajusta a nuestro proyecto, el material seleccionado fue el acrílico transparente para poder visualizar de una forma más fácil. Las dimensiones de éste se determinaron con las siguientes fórmulas:

Area hidráulica $A = by$

Perímetro mojado $P = b + 2y$

Espejo de agua $T = b$

Radio hidráulico $RH = \frac{by}{b + 2y}$

b(m)	Ancho de canal
Y(m)	Altura de agua
N	Coficiente de Manning
S(m)	Pendiente canal

Ecuaciones de canales y vertederos extraídas de [16].

Material	n	Material	N
Plástico (PE, PVC)	0.006-0.010	Fundición	0.012-0.015
Poliéster con vibra de vidrio	0.009	Hormigón	0.012-0.017
Acero	0.010-0.011	Hormigón revestido con gunita	0.016-0.022
Hierro galvanizado	0.015-0.017	Revestimiento bituminoso	0.013-0.016

Tabla 3. Coeficiente de rugosidad de Manning de materiales, Tomado de: [17]

Se continúa con los vertederos, los cuales fueron calculados con las siguientes ecuaciones:

Vertedero rectangular con contracción lateral

$$\text{Coeficiente } C = 1 - \left(\frac{0,742 * L^{0,8} * H^{0,42}}{1 + 16,975 * L^{1,8}} \right)$$

$$\text{Caudal } Q = 1,751 * C * L * H^{1,48}$$

L = Longitud del ancho en m

H = Altura del agua en m

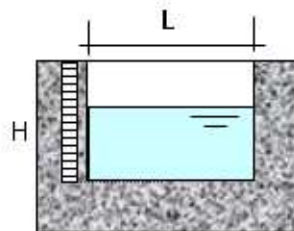


Figura 24. Altura del agua y longitud del vertedero rectangular con contracción lateral.

Fuente: Autores.

Vertedero rectangular sin contracción lateral

$$Q = 1,84 * L * H^{1,5}$$

$$Q \left[\frac{m^3}{s} \right] , \quad H[m]$$

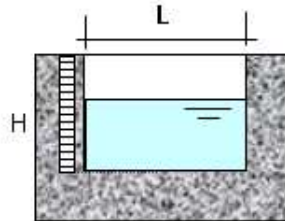


Figura 25. Altura del agua y longitud del vertedero rectangular sin contracción lateral.

Fuente: Autores.

Vertedero triangular con ángulo de 90°

$$Q = 1,35 * H^{2,47}$$

$$Q \left[\frac{m^3}{s} \right] , \quad H[m]$$

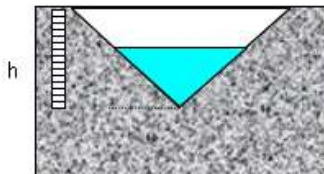


Figura 26. Altura del agua del vertedero triangular con ángulo de 90°. Fuente: Autores.

Cuando se van a realizar mediciones de variables en campo, en este caso caudal, no se tiene disponible instrumentación tal y como se presenta en un sistema industrial, por tal motivo es necesario conocer métodos de medición con herramientas básicas y ecuaciones sencillas las cuales nos arrojarán el dato que deseamos obtener. A continuación se describirán dos métodos para realizar mediciones en campo.

Método volumétrico

Este método es el más común y sencillo para la medición de caudales en particular. Basta con tener una descarga sin mucha turbulencia, es decir, pequeños caudales que podamos

medir con recipientes marcados con los litros que puede contener y cronometrar el tiempo en que se demore en llenar cierta cantidad de agua en el recipiente (Figura 27).

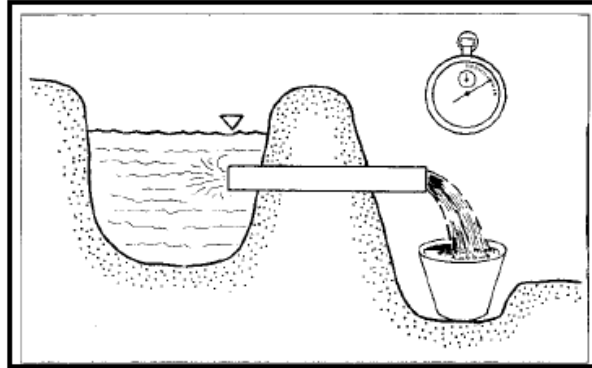


Figura 27. Método volumétrico. Tomado de: [18].

Método de la trayectoria

Para el aforo del agua en tuberías para caudales proporcionados por la descarga de una bomba este método es de gran utilidad. La energía que fluye por la tubería se manifiesta en la descarga de la tubería donde se presenta en los componentes X y Y. Con estos datos se llega a una aproximación del caudal real que presenta la bomba midiendo de forma adecuada. Se utiliza como uno de los métodos de medición en campo por su fácil y rápida operación.

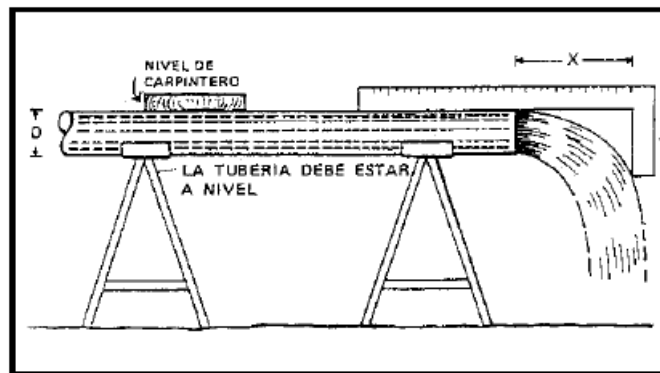


Figura 28. Método de la trayectoria. Tomado de: [18].

Para llevar a cabo esta medición se debe tener la tubería a nivel y ubicar la escuadra paralelamente a la tubería hasta que el lado vertical de la escuadra (mango) roce el chorro de agua de la descarga.

Como en este caso la tubería va a estar completamente llena, entonces utilizamos los siguientes datos:

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

D= Diámetro de la tubería [mm]

X= Trayectoria horizontal [cm]

Y= Trayectoria vertical [cm]

Conociendo estos datos, reemplazamos en la siguiente fórmula:

$$\text{Caudal } Q = X * \sqrt{\frac{1}{Y}} * D * n$$

n: Coeficiente de tubería

Fuente ecuación: [18].

A partir de los ensayos realizados en el prototipo y las mediciones tomadas, se procedió a realizar distintos cálculos los cuales nos dan a conocer el estado y funcionamiento real del prototipo.

Pérdidas en la tubería

Basados en Las ecuaciones de Manning y para el caso de las tuberías, son válidas cuando el ducto es circular y está parcial o totalmente lleno, o cuando el diámetro de la tubería es muy grande. Uno de los inconvenientes de la fórmula es que sólo tiene en cuenta un coeficiente de rugosidad (n) obtenido empíricamente, y no las variaciones de viscosidad con la temperatura. La expresión es la siguiente:

$$h = 10.3 * n^2 * \left(\frac{Q^2}{D^{5.33}} \right) * L$$

Donde:

h: Pérdida de carga o de energía (m)

n: Coeficiente de rugosidad (adimensional)

D: Diámetro interno de la tubería (m)

Q: Caudal (m/s)

L: longitud de la tubería (m)

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

En líneas de conducción las principales pérdidas de energía son por fricción, ya que éstas representan de un 80 a 98 %, por lo que es recomendable que para el caso de estimar las pérdidas de energía totales en líneas de conducción. Las Pérdidas Locales o Secundarias se consideren como un 20% de las pérdidas por Fricción [19].

Las pérdidas locales o secundarias obedecen a cambios de dirección en las tuberías, accesorios o piezas especiales. Estos datos son tabulados, debido al tipo de accesorio, tiene un valor de pérdida en el sistema.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN



Figura 29. Prototipo funcional para evaluación de estaciones de bombeo sumergibles y flujo en canal abierto. Fuente: Autores.

4.1 Calculo del canal abierto rectangular

Se realiza una tabla en Excel (Tabla 4) con las formulas expuestas en la metodología y teniendo en cuenta que la bomba sumergible tiene un caudal de $0.0005 \text{ m}^3/\text{s}$ según ficha técnica y pruebas experimentales, el coeficiente Manning según Figura 24 es 0.010 que en este caso es acrílico y entra en la categoría de los plásticos; el ancho de canal, altura de agua y pendiente de canal se ingresan a la tabla con valores indeterminados hasta que el caudal me arroje el resultado de $0.0005 \text{ m}^3/\text{s}$ aproximadamente.

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

Canal Rectangular abierto

b(m) Ancho de canal	0.07
Y(m) Altura de agua	0.009
n Coeficiente de Manning	0.01
S(m) Pendiente canal	0.04

Ah(m ²)	0.00063
Pm(m)	0.088
Rh(m)	0.007
T(m)	0.07

Q(m³/s)	0.000468
---------------------------	-----------------

Tabla 4. Calculo canal rectangular. Fuente: Autores.

Según los cálculos realizados el canal a fabricar debe de tener como mínimo un ancho de 7 cm, llegará a una altura máxima de agua de 0,9 cm y tendrá una inclinación de 4%.

Se presenta una altura aproximada del agua apenas desciende de los vertederos, debido a la caída y por lo tanto presenta un mayor volumen, pero al final del canal está a una altura de 2 mm aproximadamente debido a la longitud y a la inclinación que se le dio.

Cuando el canal no tiene inclinación, sí se hace una comparación de alturas al principio y al final del tanque y se aplica una ecuación distinta, pero como en este caso tiene una inclinación de 4% entonces la altura al principio y final del canal es la misma, por lo tanto se utiliza la ecuación descrita en la metodología del cálculo del canal.

En la fabricación del canal (Figura 30), basado en los cálculos anteriores se determinaron las siguientes medidas: ancho de 7 cm, altura de las paredes 5 cm, largo de 60 cm e inclinación del 4%.



Figura 30. Canal de retorno del prototipo fabricado. Fuente: Autores.

4.2 Calculo dimensiones de vertederos

4.2.1 Vertedero rectangular con contracción lateral

Se realiza una tabla en Excel (Tabla 5) con las ecuaciones correspondientes a este vertedero mencionadas en la metodología y utilizando una longitud de ancho del canal de $L= 0,05$ m, el resultado arrojado para la altura que va a tener el agua a partir de un caudal medido de $0,0005 \text{ m}^3/\text{s}$ es de $0,03$ m. Con este dato se procede a fabricar el vertedero rectangular con contracción lateral (Figura 31).

ALTURA H EN m	COEFICIENTE C	CAUDAL EN m^3/s
0	1,000	0,000000
0,01	0,991	0,0001

0,02	0,988	0,0003
0,03	0,986	0,0005
0,04	0,984	0,0007
0,05	0,982	0,0010
0,06	0,981	0,0013
0,07	0,979	0,0017
0,08	0,978	0,0020
0,09	0,977	0,0024

Tabla 5. Resultados de dimensiones según cálculos para vertedero rectangular con contracción lateral. Fuente: Autores.

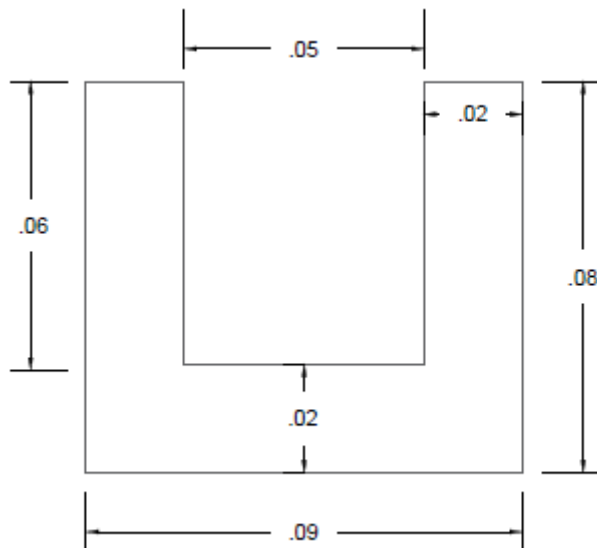


Figura 31. Vertedero rectangular con contracción lateral fabricado. Fuente: Autores.

4.2.2 Vertedero rectangular sin contracción lateral

Se realiza una tabla en Excel (Tabla 6) con la ecuación antes mencionada y utilizando una longitud de ancho del canal de 0,088 m, el resultado arrojado para la altura que va a tener el agua a partir de un caudal medido de 0,0005 m³/s es de 0,02 m. Con este dato se procede a fabricar el vertedero rectangular sin contracción lateral (Figura 32).

ALTURA EN m	CAUDAL EN m ³ /s
0	0,0000
0,01	0,0002
0,02	0,0005
0,03	0,0008
0,04	0,0013
0,05	0,0018
0,06	0,0024
0,07	0,0030
0,08	0,0037
0,09	0,0044

Tabla 6. Resultados de dimensiones según cálculos para vertedero rectangular sin contracción lateral. Fuente: Autores.

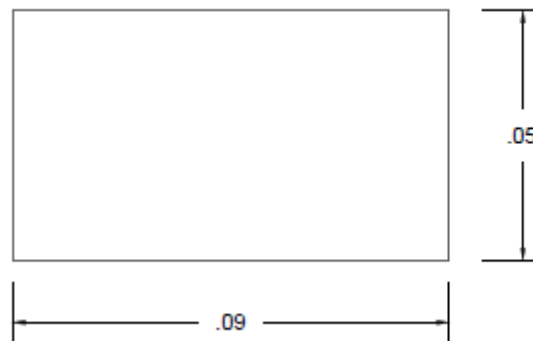


Figura 32. Vertedero rectangular sin contracción lateral fabricado. Fuente: Autores.

4.2.3 Vertedero triangular con ángulo de 90°.

Se realiza una tabla en Excel (Tabla 7) con la ecuación antes mencionada y el resultado arrojado para la altura que va a tener el agua a partir de un caudal medido de 0,0005 m³/s es de 0,04 m. Con este dato se procede a fabricar el vertedero triangular con un ángulo de 90 grados (Figura 33).

ALTURA EN m	CAUDAL EN m ³ /s
0	0,0000
0,01	0,0000
0,02	0,0001
0,03	0,0002

0,04	0,0005
0,05	0,0008
0,06	0,0013
0,07	0,0019
0,08	0,0026
0,09	0,0035
0,1	0,0046
0,11	0,0058
0,12	0,0072

Tabla 7. Resultados de dimensiones según cálculos para vertedero triangular de 90°.

Fuente: Autores.

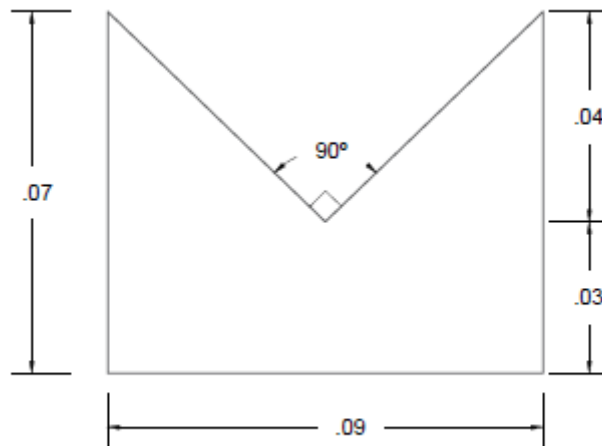


Figura 33. Vertedero triangular de 90° fabricado. Fuente: Autores.

4.3 Calculo de caudal por medio de vertedero.

Con cada uno de los vertederos se realizaron mediciones de caudales y niveles, ya que estas son las principales funciones de estos. A continuación se describen los pasos a seguir para medir el caudal:

- a) Instalar el vertedero en las guías del tanque superior.
- b) Determinar el nivel de referencia (punto 0) de cada vertedero (Figura 34), para poder hallar H.

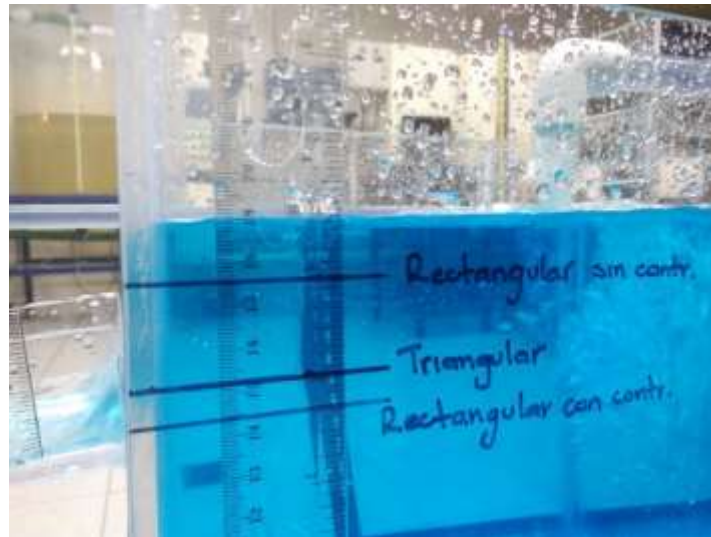


Figura 34. Marcación punto 0 vertederos fabricados. Fuente: Autores.

c) Determinar porcentaje de apertura de la válvula para poder tomar diferentes medidas de H.

El porcentaje de apertura de la válvula de compuerta utilizada se determinó midiendo el número de vueltas, las cuales son 3,75 vueltas aproximadamente. Con este dato, se dividió el volante en 4 segmentos, por lo que cada uno sería 0,25 vueltas y así $0,25 \text{ vueltas} \times 15 = 3,75 \text{ vueltas}$. Ahora, 100% dividido en 15 veces nos da como resultado $6,67\%$ de apertura por cada 0,25 vueltas. En la Figura 35 se representa esquemáticamente lo realizado a la válvula.

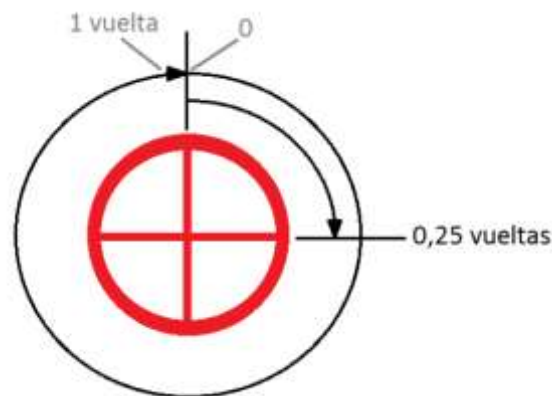


Figura 35. Divisiones de volante de la válvula para determinación de porcentaje de apertura. Fuente: Autores.

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

- d) Tener inicialmente al 100% la válvula abierta y encender la bomba sumergible.
- e) Medir la altura del agua H por encima del punto de referencia para cada vertedero y para cada porcentaje de apertura de la válvula.
- f) Medir la longitud del vertedero por el cual fluye el agua. En el caso del vertedero triangular, simplemente se mide la altura del agua H porque como se conoce el ángulo de 90°, ya tiene una ecuación propia como se detalla en la metodología.
- g) Reemplazar los valores de H y L para cada ecuación según el vertedero y con estos datos finalmente, hallamos el caudal.

A continuación se muestran unas tablas en Excel, donde se registran los datos antes mencionados y se calcula el caudal.

4.3.1 Calculo de caudales del vertedero rectangular con contracción lateral.

C =	0,98787	<i>Caudal $Q = 1,751 * C * L * H^{1,48}$</i>		
% Apertura válvula	Nivel tanque vertedero rectangular con contracción [cm]	H vertedero rectangular con contracción [m]	Longitud vertedero [m]	Caudal Q [m³/s]
100,00	16,5	0,02	0,05	0,00026453
93,33	16,5	0,02	0,05	0,00026453
86,67	16,4	0,019	0,05	0,00024520
80,00	16,4	0,019	0,05	0,00024520
73,33	16,3	0,018	0,05	0,00022634
66,67	16,3	0,018	0,05	0,00022634
60,00	16,3	0,018	0,05	0,00022634
53,33	16,3	0,018	0,05	0,00022634
46,67	16,2	0,017	0,05	0,00020798
40,00	16,2	0,017	0,05	0,00020798
33,33	16,1	0,016	0,05	0,00019013
26,67	16	0,015	0,05	0,00017281
20,00	15,8	0,013	0,05	0,00013983
13,33	15,5	0,01	0,05	0,00009483
6,67	15,3	0,008	0,05	0,00006816
0,00	15,1	0,006	0,05	0,00004453

Tabla 8. Caudales medidos con vertedero rectangular con contracción lateral. Fuente: Autores.

4.3.2 Calculo de caudales del vertedero rectangular sin contracción lateral

$$Q = 1,84 * L * H^{1,5}$$

% Apertura válvula	Nivel tanque vertedero rectangular sin contracción [cm]	H vertedero triangular rectangular sin contracción [m]	Longitud vertedero [m]	Caudal Q [m³/s]
100,00	18,9	0,013	0,09	0,00024546
93,33	18,9	0,013	0,09	0,00024546
86,67	18,9	0,013	0,09	0,00024546
80,00	18,9	0,013	0,09	0,00024546
73,33	18,9	0,013	0,09	0,00024546
66,67	18,8	0,012	0,09	0,00021769
60,00	18,8	0,012	0,09	0,00021769
53,33	18,8	0,012	0,09	0,00021769
46,67	18,8	0,012	0,09	0,00021769
40,00	18,8	0,012	0,09	0,00021769
33,33	18,7	0,011	0,09	0,00019105
26,67	18,7	0,011	0,09	0,00019105
20,00	18,6	0,01	0,09	0,00016560
13,33	18,5	0,009	0,09	0,00014139
6,67	18,3	0,007	0,09	0,00009699
0,00	17,9	0,003	0,09	0,00002721

Tabla 9. Caudales medidos con vertedero rectangular sin contracción lateral. Fuente: Autores.

4.3.3 Calculo de caudales del vertedero triangular de 90°

$$Q = 1,35 * H^{2,47}$$

% Apertura válvula	Nivel tanque vertedero triangular [cm]	H vertedero triangular [m]	Caudal Q [m³/s]
100,00	18,5	0,032	0,00027419
93,33	18,4	0,031	0,00025351
86,67	18,4	0,031	0,00025351
80,00	18,4	0,031	0,00025351
73,33	18,4	0,031	0,00025351
66,67	18,4	0,031	0,00025351
60,00	18,4	0,031	0,00025351
53,33	18,3	0,03	0,00023379
46,67	18,3	0,03	0,00023379
40,00	18,3	0,03	0,00023379
33,33	18,2	0,029	0,00021501
26,67	18,1	0,028	0,00019716
20,00	17,9	0,026	0,00016418
13,33	17,6	0,023	0,00012128
6,67	17,1	0,018	0,00006620
0,00	16	0,007	0,00000642

Tabla 10. Caudales medidos con vertedero triangular de 90°. Fuente: Autores.

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

4.4 Caudal por método volumétrico

Para el caso de este prototipo, al tener la válvula de compuerta abierta al 100% y con la regla instalada en el tanque superior (Figura 36), se mide la cantidad de agua en cierto tiempo, teniendo en cuenta que el área del tanque es de 0,057 m² (0,238 m x 0,238 m) y para hallar el volumen se multiplica dicha área por la altura que se desea medir, además como se menciona anteriormente, contabilizar el tiempo que transcurre en llegar a la altura deseada.

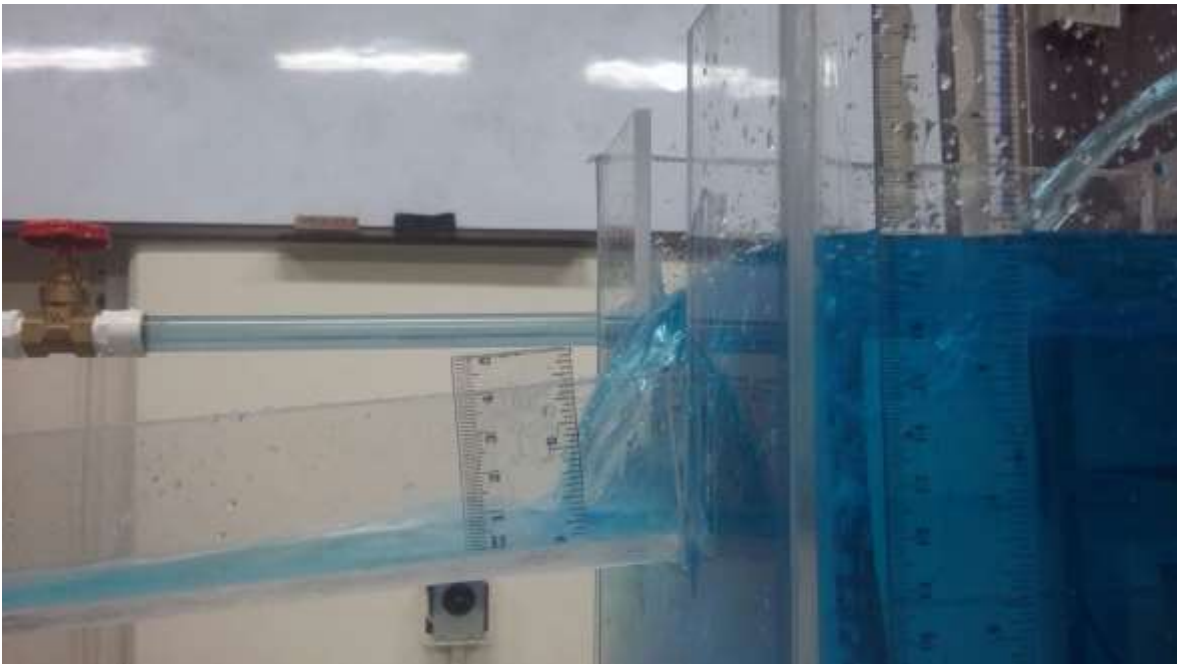


Figura 36. Medición de nivel tanque superior. Fuente: Autores.

Se contabilizó el tiempo hasta que el nivel del agua llegara a 10 cm, por lo que el caudal real se calculó como se muestra a continuación:

$$\text{Volumen del agua} = (0,238 * 0,238 * 0,10)m = 0,0056644 m^3$$

$$\text{Tiempo en llegar a los } 0,10m = 20s$$

$$\text{Caudal } Q = \frac{V}{t} = \frac{0,0056644m^3}{20s} \rightarrow Q = 0,00028322 \frac{m^3}{s} = 0,283 \frac{l}{s}$$

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

El caudal según placa de la bomba es de 30 l/min, es decir, 0,5 l/s y la medición experimental es de 0,283 l/s. Esto quiere decir que la bomba en este sistema está trabajando al 56,6% de los datos de fábrica. Para los caudales máximos (válvula con el 100% de apertura) con los vertederos como se denota en el numeral anterior, también oscilan entre 0,000245 m³/s (0,245 l/s) y 0,000274 m³/s (0,274 l/s).

4.5 Caudal por método de la trayectoria

Para darle lugar a este método, se instaló una cinta métrica a un lado superior del tanque alto, además se debe ayudar con un flexómetro o una regla ubicándola perpendicularmente a la cinta y así se mide una aproximación del chorro de descarga de la bomba (Figura 37).

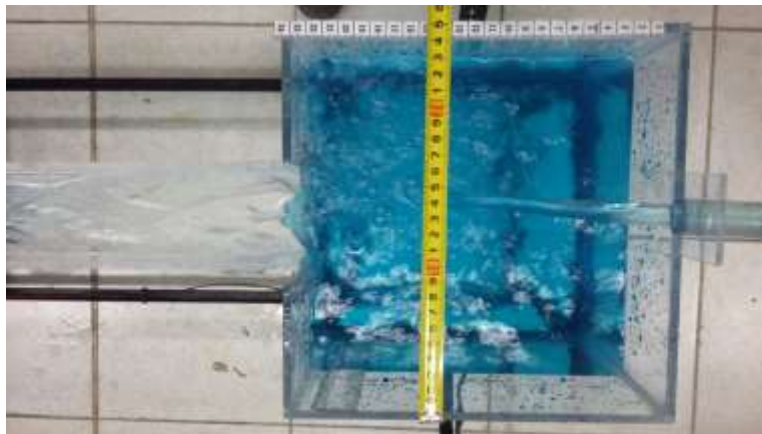


Figura 37. Medición de longitud de chorro de descarga. Fuente: Autores.

Este chorro solo fue posible medirlo con pequeños porcentajes de apertura de la válvula (Tabla 11), ya que con una apertura mayor se causa una perturbación de la medida y se sobrepasa la salida del tanque superior, donde se ubican los vertederos, por lo tanto el agua se derrama y se dificulta medir la longitud.

% Apertura válvula	Longitud descarga [cm]
100	-
93,33	-
86,67	-
80,00	-
73,33	-
66,67	-
60,00	-
53,33	-
46,67	-
40,00	21
33,33	18,5
26,67	16,5
20,00	13
13,33	6
6,67	1
0	0

Tabla 11. Longitud chorro de descarga según apertura de la válvula (X). Fuente: Autores.

Para la distancia vertical (Y), se dan valores aproximados, teniendo en cuenta que la descarga no tiene una longitud considerable, por lo que está el nivel del tanque donde se perturba esta medida.

% Apertura valvula	X	Y	v(1/Y)	D [mm]	Constante	Caudal [l/s]	Caudal [m³/s]
40,00	21	5	0,4472	127	0,00017386	0,207	0,00020737
33,33	18,5	4,5	0,4714	127	0,00017386	0,193	0,00019256
26,67	16,5	4,4	0,4767	127	0,00017386	0,174	0,00017368
20,00	13	3	0,5774	127	0,00017386	0,166	0,00016572
13,33	6	1	1,0000	127	0,00017386	0,132	0,00013248
6,67	1	0,2	2,2361	127	0,00017386	0,049	0,00004937

Tabla 12. Caudal por método de la trayectoria. Fuente: Autores.

4.6 Eficiencia de la bomba

4.6.1 Potencia teórica

Primero se calculó la potencia teórica de la bomba, donde utilizamos datos de placa para reemplazar en la siguiente ecuación:

$$P_b = \rho * g * Q * h_b$$

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

$$P_b = 1000 \frac{Kg}{m^3} * 9.81 \frac{m}{s^2} * 0.0005 \frac{m^3}{s} * 2 m = 9.81 W$$

Donde,

P_b = Potencia teórica de la bomba (W)

ρ = Densidad del fluido (1,000 kg/m³ en el caso del agua)

g = Aceleración de la gravedad (generalmente se adopta: 9.81 m/s²)

Q = Caudal (en el caso 0.0005 m³/s)

h_b = Ganancia de carga en la bomba, o en otros términos, altura dinámica de la bomba (m)

4.6.2 Potencia real

Según (Tabla 13) la potencia real de la bomba cuando la válvula está cerrada completamente es 89.16 W.

Esta potencia fue calculada con la ley de ohm, la cual nos dice:

$$Potencia = Voltaje * Corriente$$

P = V * I			1 Watts = 0.00134 HP	
% APERTURA VALVULA	AMPERAJE (A)	VOLTAJE (V)	POTENCIA (W)	POTENCIA (HP)
0,00	0,743	120	89,16	0,1194744
6,67	0,746	120	89,52	0,1199568
13,33	0,746	120	89,52	0,1199568
20,00	0,745	120	89,4	0,119796
26,67	0,744	120	89,28	0,1196352
33,33	0,744	120	89,28	0,1196352
40,00	0,741	120	88,92	0,1191528
46,67	0,744	120	89,28	0,1196352
53,33	0,743	120	89,16	0,1194744
60,00	0,742	120	89,04	0,1193136
66,67	0,74	120	88,8	0,118992
73,33	0,74	120	88,8	0,118992
80,00	0,739	120	88,68	0,1188312
86,67	0,738	120	88,56	0,1186704
93,33	0,737	120	88,44	0,1185096
100,00	0,737	120	88,44	0,1185096

Tabla 13. Potencia calculada para cada % de apertura de la bomba. Fuente: Autores.

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

4.6.3 Rendimiento de la bomba

Luego de hallar la potencia teórica y la potencia real de la bomba, se procede a calcular el rendimiento o eficiencia de la bomba:

$$\eta = \frac{\text{Potencia teórica}}{\text{Potencia real}} * 100$$

$$\eta = \frac{9.81 \text{ W}}{89.16 \text{ W}} * 100 = 11 \%$$

4.7 Pérdidas en la tubería

El coeficiente de rugosidad según Manning n es 0,006

Diámetro de la tubería teniendo en cuenta que es de 1/2 pulgada equivale a 0,127 m

El caudal del sistema es de 0,0005 (m³/s)

Longitud de la tubería es de 2,58 metros

Aplicamos formula de Manning:

$$h = 10.33 * 0.006^2 * \left(\frac{0.0005^2}{0.127^{5.33}} \right) * 2.58$$

$$h = 1.42858 \times 10^{-05} m$$

4.8 Curvas de la bomba

4.8.1 Curva característica de la bomba Q x p

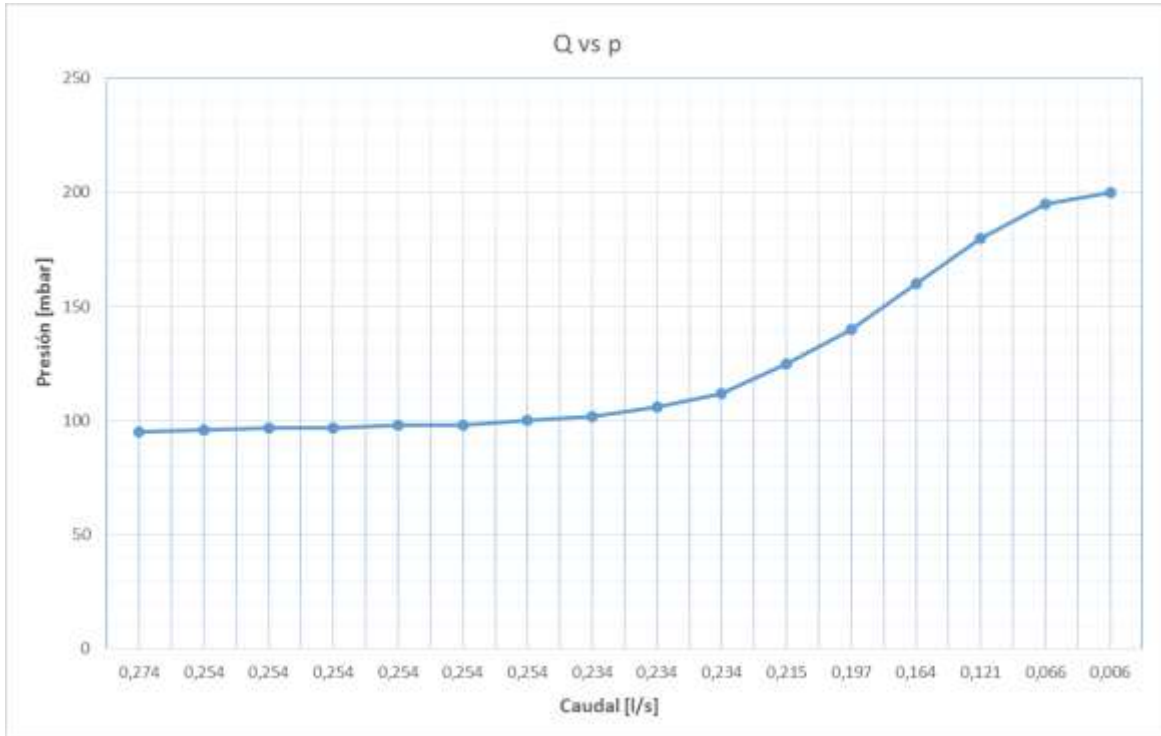


Figura 38. Curva característica de la bomba Q x p. Fuente: Autores.

4.8.2 Curva de potencia Q x P

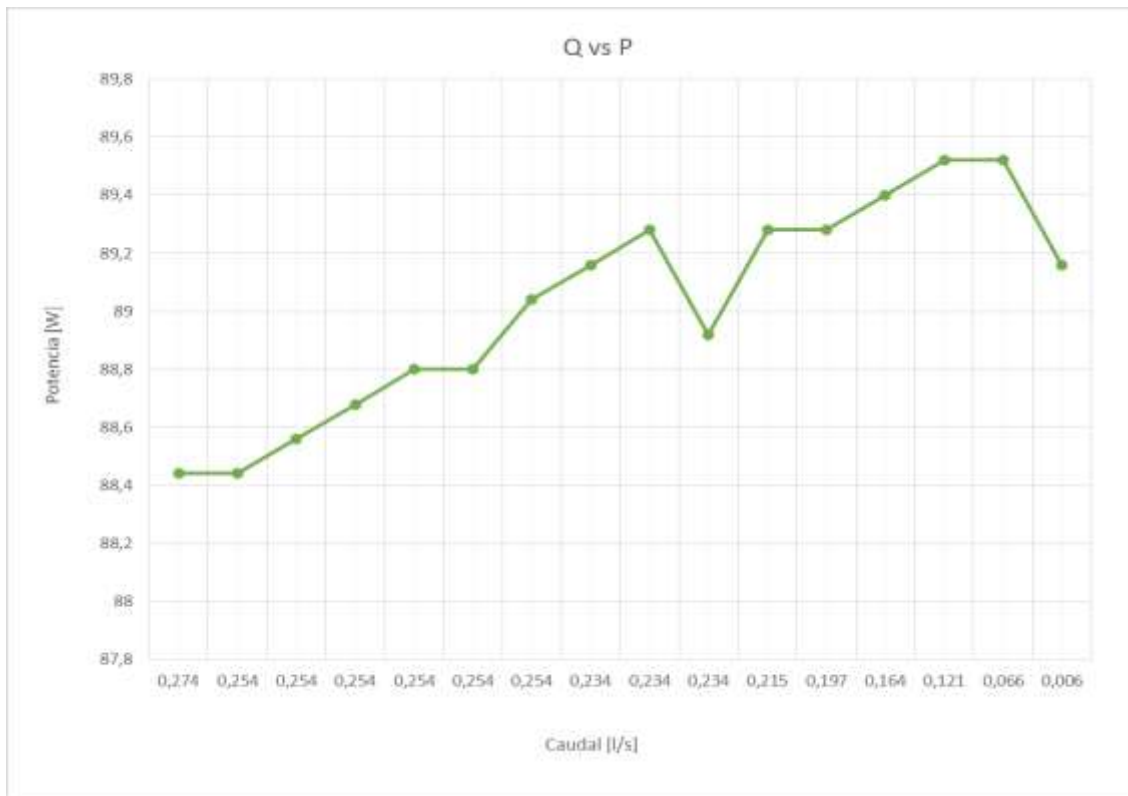


Figura 39. Curva de potencia Q x P. Fuente: Autores.

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

5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

5.1 Conclusiones

- Se concluye que se fabricó el prototipo de sistema de bombeo sumergible y flujo en canal abierto siguiendo las normas técnicas que lo rigen.
- Se determina que el prototipo es completamente funcional donde se pueden realizar las pruebas experimentales expuestas, basándose en una metodología didáctica con los estudiantes del ITM.
- Cada componente del prototipo está descrito de forma clara e ilustrativa de acuerdo a su funcionamiento y aplicaciones en la industria y campo.
- Se demuestran dos diferentes métodos de medición poco convencionales, volumétrico y de la trayectoria, en los que se puede concluir que estos métodos son confiables y se pueden desarrollar en campo en ausencia de instrumentación.
- Los resultados obtenidos luego de las mediciones de las variables permiten realizar diagnósticos y cálculos para determinar el rendimiento del sistema.
- Al comparar los resultados obtenidos experimentalmente con los datos teóricos del sistema, se concluye que: la selección de la capacidad de la bomba sumergible fue la correcta, ya que fue suficiente para abastecer y permitir mediciones del sistema. Los cálculos teóricos de las dimensiones del canal y los vertederos, fueron satisfactorias para realizar las mediciones propuestas y su funcionamiento.
- Teóricamente, la eficiencia de una bomba sumergible es baja, por lo tanto se demuestra en este prototipo que la bomba presenta una eficiencia del 11%.
- Se tiene una limitación en el sistema en cuanto a un instrumento que nos permita medir la velocidad del flujo, el cual es necesario para la medición y verificación de pérdidas por fricción de la tubería y accesorios.
- Con los resultados obtenidos en los métodos de medición para el caudal, se concluye que el sistema realmente está operando entre el 49% y el 57% de los datos de fábrica.

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

5.2 Recomendaciones

- En el diseño de los tanques de succión, se debe obedecer a las normas de diseño las cuales ayudan a evitar una mala operación de la bomba sumergible, debido a que como se vio en este trabajo, se pueden presentar vórtices los cuales deben ser evitados en la succión de la bomba para un mejor rendimiento y operatividad.
- A modo de complemento para el proyecto, se puede utilizar un instrumento para la medición de la velocidad del flujo en el canal y/o en la tubería, con el fin de utilizar este dato para el cálculo de las pérdidas por fricción en las ecuaciones que lo solicitan.
- Cuando se vaya a diseñar un tanque de descarga para la bomba, se debe tener en cuenta el grosor de las láminas a utilizar, ya que en este caso se quería utilizar un tanque con área de 25 x 25 cm, pero como se despreció el grosor del acrílico, quedo con área de 23,8 x 23,8 cm.
- Para un mejor desempeño del método de la trayectoria para la medición de caudales, es necesario que el tanque al que descarga la bomba sea más largo, para que así con la válvula al 100% de apertura se puedan realizar las respectivas medidas, sin tener perturbaciones ni obstrucciones.
- Las mediciones de amperaje para bombas sumergibles pequeñas se deben realizar con un amperímetro de mayor rango de medición, para poder así sacar una mejor curva de potencia donde se evidencien las variaciones que presenta el sistema.

5.3 Trabajo futuro

Con este trabajo se busca ampliar los conocimientos adquiridos en las asignaturas enfocadas en el campo hidráulico a los estudiantes del ITM, con el propósito de que aprendan como diseñar y montar sistemas de bombeo para aplicaciones reales o bancos de pruebas como éste y métodos para medir varias variables en distintos proyectos campestres.

A partir de un prototipo como este, se puede incentivar e inspirar a los estudiantes a realizar mejoras futuras a los distintos bancos de pruebas del laboratorio de fluidos, inclusive a realizar proyectos más innovadores para una aplicación real o para otras instituciones a modo de enseñanza para los estudiantes.

Se puede pensar en fabricar otros vertederos con las formas mencionadas en este trabajo, tales como trapezoidales, circulares, forma de herradura y de triángulos con distintos ángulos y así demostrar con las ecuaciones correspondientes, el cálculo de caudales y medición de niveles.

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

REFERENCIAS

- [1] U. J. S. Domínguez, Maquinas hidráulicas, San Vicente, Alicante: Editorial Club Universitario, 2012.
- [2] «Quiminet,» 4 abril 2012. [En línea]. Available: <http://www.quiminet.com/articulos/conozca-las-caracteristicas-y-aplicaciones-de-las-bombas-sumergibles-2715179.htm>.
- [3] «Wikipedia,» [En línea]. Available: [https://es.wikipedia.org/wiki/Canal_\(ingenier%C3%ADa\)](https://es.wikipedia.org/wiki/Canal_(ingenier%C3%ADa)).
- [4] J. H. C. R., Hidráulica de canales Fundamentos, Medellín: Fondo Editorial Universidad EAFIT, 2006.
- [5] D. d. h. Universidad del Cauca, «Práctica 2. Estudio y patronamiento de vertederos,» Valle del Cauca.
- [6] E. A. Khouri, Apuntes de hidráulica para explotaciones forestales, Oviedo, España: Ediciones de la Universidad de Oviedo, 2004.
- [7] g. d. r. p. y. a. Secretaria de agricultura, «Disipadores de energía,» Montecillo, México.
- [8] W. Bolton, Mediciones y pruebas eléctricas y electrónicas, Londres: Marcombo Boixareu Editores, 1995.
- [9] Luis, «Ingeniería electrónica,» 12 abril 2016. [En línea]. Available: <http://ingenieriaelectronica.org/amperímetros-definición-características/>.
- [10] Evans, «Ficha técnica AQUA45W,» [En línea]. Available: www.evans.com.mx.
- [11] «Aliexpress,» [En línea]. Available: <http://www.aliexpress.com/item/ELECALL-D52-2042-Double-Display-DIN-RAIL-Red-Green-AC80-300V-AC0-1-99-9A-Digital/32623367585.html>.
- [12] «Ecured,» [En línea]. Available: <https://www.ecured.cu/Piez%C3%B3metro#Fuentes>.
- [13] M. V. Béjar, Drenaje, Cartago: Editorial Tecnológica de Costa Rica, 2007.
- [14] «Area tecnología,» [En línea]. Available: <http://www.areatecnologia.com/herramientas/manometro.html>.

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

- [15] GF Piping Systems, «Schedule 40 and 80 Rigid PVC Piping Systems. Harvel Clear PVC,» Irvine, 2015.
- [16] J. M. Azevedo Netto, M. Fernandez Fernandez, R. De Araujo y A. Eiji Ito, Manual de hidráulica, Sao Paulo: Editora Edgard Blucher, 1998.
- [17] F. R. F. Vega, «Slideshare: Sifones,» [En línea]. Available: <http://es.slideshare.net/freddyramirofloresvega/sifones-37123779>.
- [18] A. Villavicencio P. y A. Villablanca F., «Métodos de aforo de caudal (parte 1),» *Informativo Inia-Ururi*, nº 50, pp. 1-8, 2010.
- [19] J. M. Jiménez Terán, A. Ortiz Cedano, E. Castillo Gonzáles, R. Romero López y R. Godos García, Manual de apuntes de la experiencia educativa de tuberías y canales, Veracruz: Creative commons.
- [20] J. H. C. R., Hidráulica de canales Fundamentos, Medellín: Fondo Editorial Eniversidad EAFIT, 2006.

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

APÉNDICE

Apéndice A: Lista de figuras

- Figura 1. Canal de sección transversal (rectangular). Fuente: [20].
- Figura 2. Canal de sección trapezoidal. Fuente: [20].
- Figura 3. Canal de sección triangular. Fuente: [20].
- Figura 4. Canal de sección mixta. Fuente: [20].
- Figura 5. Canal de sección natural. Fuente: [20].
- Figura 6. Canal de sección circular. Fuente: [20].
- Figura 7. Canal de sección de herradura. Fuente: [20].
- Figura 8. Vertederos con lámina libre y sumergida. Fuente: [6].
- Figura 9. Vertederos de pared delgada y gruesa. Fuente: [6].
- Figura 10. Vertedero rectangular sin contracción lateral. Fuente: [5].
- Figura 11. Vertedero rectangular con contracción lateral. Fuente: [5].
- Figura 12. Vertedero triangular. Fuente: [5].
- Figura 13. Vertedero trapezoidal. Fuente: [5].
- Figura 14. Vertedero circular. Fuente: [5].
- Figura 15. Aquietador prototipo fabricado. Fuente: Autores.
- Figura 16. Medidor de corriente y voltaje digital D52-2042. Fuente: [11].
- Figura 17. Piezómetro prototipo fabricado. Fuente: Autores.
- Figura 18. Manómetro 0-250 mbar. Fuente: Autores.
- Figura 19. Bomba sumergible Evans. Fuente: [10].
- Figura 20. Dimensiones mínimas según diámetro de succión de la bomba. Fuente: Autores.
- Figura 21. Sumergencia mínima de la succión de la bomba. Fuente: Autores.
- Figura 22. Vórtice generado en la succión de la bomba. Fuente: Autores.
- Figura 23. Tubería transparente PVC utilizada. Fuente: [15].
- Figura 24. Altura del agua y longitud del vertedero rectangular con contracción lateral. Fuente: Autores.
- Figura 25. Altura del agua y longitud del vertedero rectangular sin contracción lateral. Fuente: Autores.
- Figura 26. Altura del agua del vertedero triangular con ángulo de 90°. Fuente: Autores.
- Figura 27. Método volumétrico. Fuente: [18].

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

- Figura 28. Método de la trayectoria. Fuente [18].
- Figura 29. Prototipo funcional para evaluación de estaciones de bombeo sumergibles y flujo en canal abierto. Fuente: Autores.
- Figura 30. Canal de retorno del prototipo fabricado. Fuente: Autores.
- Figura 31. Vertedero rectangular con contracción lateral fabricado. Fuente: Autores.
- Figura 32. Vertedero rectangular sin contracción lateral fabricado. Fuente: Autores.
- Figura 33. Vertedero triangular de 90° fabricado. Fuente: Autores.
- Figura 34. Marcación punto 0 vertederos fabricados. Fuente: Autores.
- Figura 35. Divisiones de volante de la válvula para determinación de porcentaje de apertura. Fuente: Autores.
- Figura 36. Medición de nivel tanque superior. (Fuente: Autores).
- Figura 37. Medición de longitud de chorro de descarga. Fuente: Autores.
- Figura 38. Curva característica de la bomba Q x p. Fuente: Autores.
- Figura 39. Curva de potencia Q x P. Fuente: Autores.

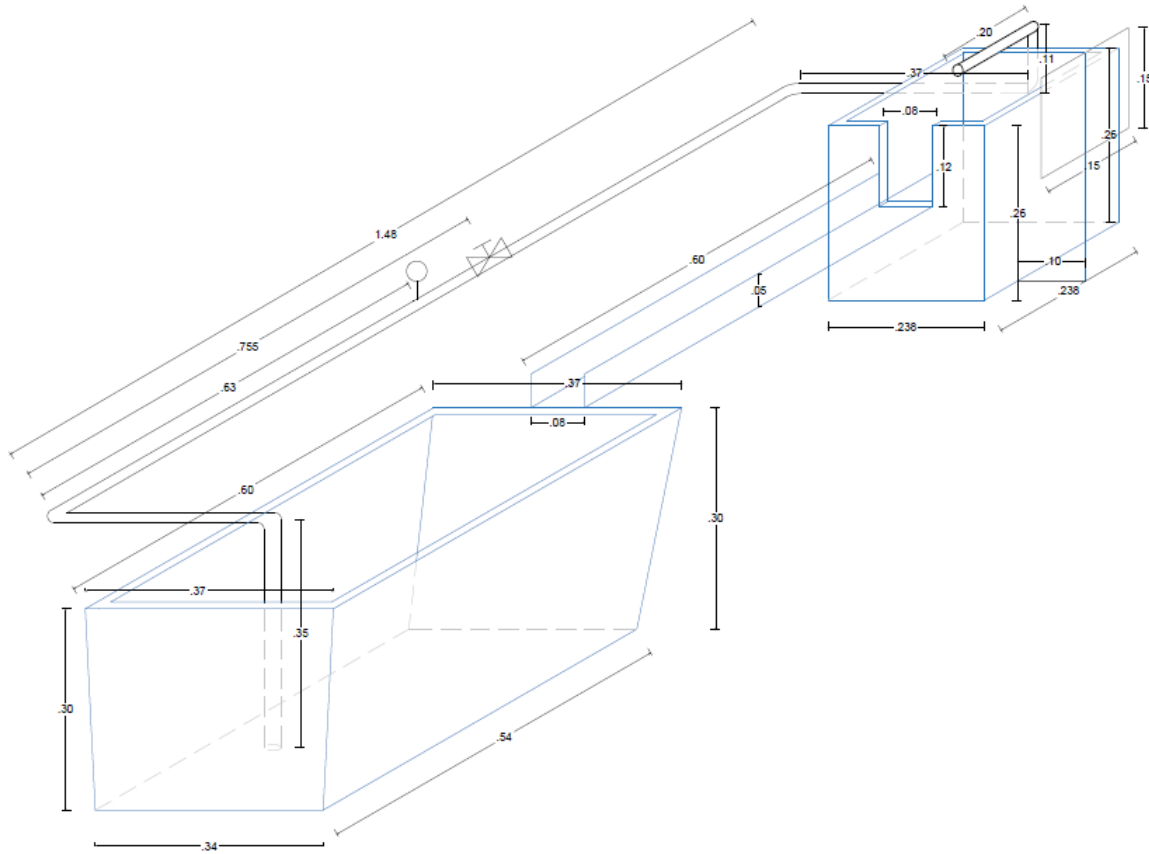
Apéndice B: Lista de tablas

- Tabla 1. Especificaciones técnicas del medidor de corriente y voltaje digital. Fuente: [10].
- Tabla 2. Especificaciones técnicas bomba sumergible Evans AQUA45W. Fuente: [10].
- Tabla 3. Coeficiente de rugosidad de Manning de materiales, Fuente: [17]
- Tabla 4. Calculo canal rectangular. Fuente: Autores.
- Tabla 5. Resultados de dimensiones según cálculos para vertedero rectangular con contracción lateral. Fuente: Autores.
- Tabla 6. Resultados de dimensiones según cálculos para vertedero rectangular sin contracción lateral. Fuente: Autores.
- Tabla 7. Resultados de dimensiones según cálculos para vertedero triangular de 90°. Fuente: Autores.
- Tabla 8. Caudales medidos con vertedero rectangular con contracción lateral. Fuente: Autores.
- Tabla 9. Caudales medidos con vertedero rectangular sin contracción lateral. Fuente: Autores.
- Tabla 10. Caudales medidos con vertedero triangular de 90°. Fuente: Autores.
- Tabla 11. Longitud chorro de descarga según apertura de la válvula. Fuente: Autores.
- Tabla 12. Caudal por método de la trayectoria. Fuente: Autores.

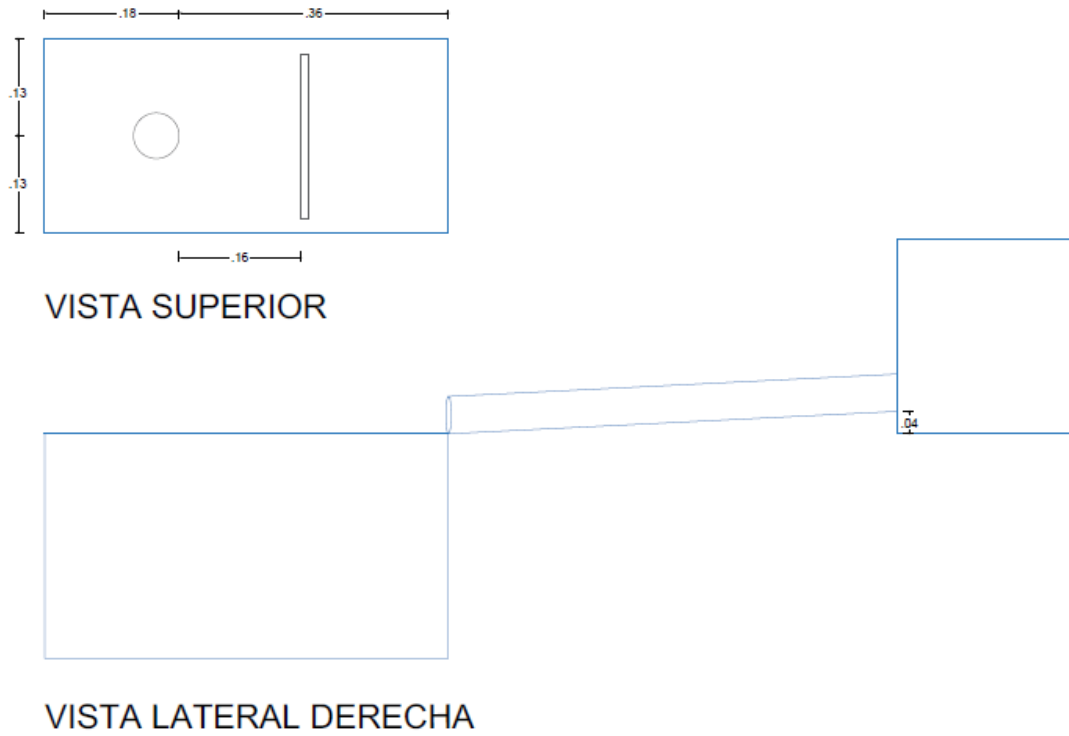
- Tabla 13. Potencia calculada para cada % de apertura de la bomba. Fuente: Autores.

Apéndice C: Planos prototipo funcional para evaluación de estaciones de bombeo sumergibles y flujo en canal abierto

VISTA LATERAL DERECHA



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



Falta la guía de laboratorio, debe ser agregada como un anexo.

FIRMA ESTUDIANTES Sebastián O. J.

Nicolas ocampo V.

FIRMA ASESOR Adrián F. Martínez

FECHA ENTREGA: _____

FIRMA COMITÉ TRABAJO DE GRADO DE LA FACULTAD _____

RECHAZADO ___ ACEPTADO ___ ACEPTADO CON MODIFICACIONES _____

ACTA NO. _____

FECHA ENTREGA: _____

FIRMA CONSEJO DE FACULTAD _____

ACTA NO. _____

FECHA ENTREGA: _____