

**DOTACIÓN DEL EQUIPO PARA EL ESTUDIO DEL PRINCIPIO DE BERNOULLI  
Y FORMULACION DE LOS PROTOCOLOS DE FUNCIONAMIENTO, PARA EL  
LABORATORIO DE HIDRÁULICA DE LA UNIVERSIDAD DE NARIÑO**

**JULIANA GUERRERO BURBANO  
ESTEBAN DAVID ZAMBRANO JURADO**

**UNIVERSIDAD DE NARIÑO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL  
SAN JUAN DE PASTO  
2018**

**DOTACIÓN DEL EQUIPO PARA EL ESTUDIO DEL PRINCIPIO DE BERNOULLI  
Y FORMULACION DE LOS PROTOCOLOS DE FUNCIONAMIENTO, PARA EL  
LABORATORIO DE HIDRÁULICA DE LA UNIVERSIDAD DE NARIÑO**

**JULIANA GUERRERO BURBANO  
ESTEBAN DAVID ZAMBRANO JURADO**

**Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de  
Ingenieros Civiles**

**Director:  
Ing. MSc. ROBERTO SALAZAR CANO  
(Magíster en Ingeniería Sanitaria y Ambiental)**

**UNIVERSIDAD DE NARIÑO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL  
SAN JUAN DE PASTO  
2018**

## **NOTA DE RESPONSABILIDAD**

Las ideas aportadas en el trabajo de grado son responsabilidad exclusiva de los autores.

Artículo 1° acuerdo # 324 del 11 de octubre de 1966 del Honorable Consejo Directivo de la Universidad de Nariño.

“La Universidad de Nariño no se hace responsable de las opiniones o resultados obtenidos en el presente trabajo y para su publicación priman las normas sobre el derecho de autor”

Artículo 13, Acuerdo N. 005 de 2010 emanado del Honorable Consejo Académico.

**Nota de aceptación**

---

---

---

---

---

---

---

Presidente de Jurado

---

Jurado

San Juan de Pasto, Noviembre de 2018

## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo a mis padres que me apoyaron no solo en mi paso por la universidad sino en cada circunstancia de la vida, a mi hijo por ser mi motivación y orgullo, a mis hermanas por siempre estar.

Juliana Guerrero

## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo primeramente a Dios que fue el que nos abrió las sendas y el camino para llegar a la meta de ser profesionales, a mi Esposa que siempre estuvo a mi lado, a mi Hijo y finalmente a mis Padres que fueron los que me motivaron con paciencia y amor.

Esteban Zambrano

## **AGRADECIMIENTOS**

Al ingeniero Roberto Salazar director del presente trabajo de grado, por brindarnos su tiempo y sus valiosos conocimientos en la elaboración y desarrollo del mismo.

A Roberto García, por su ayuda incondicional en la adecuación del equipo y desarrollo de actividades de laboratorio.

A nuestros compañeros con quienes compartimos todo este proceso y nos apoyaron en cada paso.

A la Universidad de Nariño por formarnos como profesionales y permitirnos cumplir el sueño de ser Ingenieros Civiles.

Y a Dios por ser guía espiritual.

## RESUMEN

En el proceso de aprendizaje de la carrera de Ingeniería Civil de la Universidad de Nariño, los estudiantes van desarrollando capacidades y habilidades teóricas y prácticas, que permiten diseñar, construir e implementar prototipos de uso aplicado a la Hidráulica y Mecánica de Fluidos, con el objeto de contribuir al desarrollo investigativo y uso del Laboratorio de Hidráulica y saneamiento, dispuesto en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Nariño. Para tal fin, se dispone a diseñar y construir un prototipo para el estudio del “Principio de Bernoulli”, con su respectivo protocolo de funcionamiento.

Esta actividad, permite entre otras razones, descubrir las necesidades reales en el campo del diseño y construcción de acueductos, alcantarillados, sistemas de tratamiento de aguas residuales, propios de la carrera de ingeniería civil, pero también demostrar su uso en la agricultura y la implementación de sistemas de riego eficiente, trampas de grasa y biodigestores; para el campo automotriz en cuanto a inyectores, motores y carburadores de presión con gas; o incluso en el deporte para demostrar los principios de la natación y la presión de los cuerpos sobre el agua, la velocidad y fricción que genera.

El presente trabajo de grado, se divide en tres partes: la primera de ellas, es la argumentación teórica del “Principio de Bernoulli”; el segundo aspecto presenta el diseño y construcción del prototipo que estará a disposición del laboratorio de hidráulica y saneamiento básico de la Universidad de Nariño; Por último se presenta la validación del prototipo a través de experimentos de flujo continuo de agua y el protocolo de funcionamiento, para apoyo de docentes y estudiantes de futuras generaciones que deseen estudiar el principio de Bernoulli en el laboratorio y mejorar el prototipo implementado por este estudio.



## **ABSTRACT**

In the process of learning the career of Civil Engineering at the University of Nariño, students develop skills and theoretical and practical skills, which allow design, build and implement prototypes applied to the Hydraulics and Mechanics of Fluids, with the object to contribute to the research development and use of the Hydraulics and Sanitation Laboratory, arranged in the Faculty of Engineering of the University of Nariño. For this purpose, he plans to design and build a prototype for the study of the "Bernoulli Principle", with its respective operating protocol.

This activity allows, among other reasons, to discover the real needs in the field of design and construction of aqueducts, sewage systems, wastewater treatment systems, typical of the civil engineering career, but also to demonstrate its use in agriculture and the implementation of efficient irrigation systems, grease traps and biodigesters; for the automotive field in terms of injectors, motors and carburetors of pressure with gas; or even in sports to demonstrate the principles of swimming and the pressure of bodies on water, the speed and friction that it generates.

The present work of degree, is divided into three parts: the first of them, is the theoretical argumentation of the "Bernoulli Principle"; the second aspect presents the design and construction of the prototype that will be available to the laboratory of hydraulics and basic sanitation of the University of Nariño; Finally, the validation of the prototype is presented through experiments of continuous flow of water and the operating protocol, to support teachers and students of future generations who wish to study the principle of Bernoulli in the laboratory and improve the prototype implemented by this study. .

## GLOSARIO

**ANÁLISIS:** Examen detallado de un objeto o situación para conocer sus características, cualidades, o su estado y extraer conclusiones que se realiza separando o considerando por separado las partes que la constituyen.

**BOMBA HIDRÁULICA:** Es una máquina generadora, que transforma la energía (generalmente energía mecánica) con la que es accionada en energía del fluido incompresible que mueve.

**CANAL:** Es un conducto en el cual un líquido fluye de forma continua y sin restricciones.

**CINÉTICA:** Parte de la física que estudia los sistemas estáticos o en movimiento mediante el empleo de los conceptos de longitud, tiempo y masa.

**FLUJO COMPRESIBLE:** Se le conoce como dinámica de gases, siendo esta una nueva rama de la mecánica de fluidos, la cual describe estos flujos. En un flujo usualmente hay cambios en la presión, asociados con cambios en la velocidad.

**FLUJO CONSTANTE:** Cantidad que tiene un valor fijo en un determinado proceso, cálculo, etc.

**DENSIDAD:** Magnitud que expresa la relación entre la masa y el volumen de un cuerpo. Su unidad en el Sistema Internacional es el kilogramo por metro cúbico ( $\text{kg/m}^3$ ).

**EYECTORES:** Bomba de chorro en que la presión de salida o descarga es intermedia entre las de entrada y de succión. Extrae polvo además de fluidos.

**HIDRODINÁMICA:** Pertenece o relativa a la hidrodinámica. Parte de la mecánica que estudia el movimiento de los fluidos.

**INCOMPRESIBLE:** Es aquel en los cuales los cambios de densidad de un punto a otro son despreciables, mientras se examinan puntos dentro del campo de flujo.

**INERCIA:** Propiedad de los cuerpos de no modificar su estado de reposo o movimiento si no es por la acción de una fuerza.

**PRESIÓN:** fuerza ejercida sobre determinado objeto por una unidad de área, la presión de los fluidos no es igual que la que se ejerce sobre los sólidos, ya que dependiendo de dónde este contenido un fluido puede o no cambiar su forma.

**VÁLVULA:** Instrumento en forma de lámina curva doblada, que se utiliza para separar los bordes de una incisión quirúrgica.

**VELOCIDAD:** es la velocidad media de las partículas del líquido en un punto específico a la distancia media que recorren por unidad de tiempo, medida en metros por segundo o en metros por minuto.

**VISCOSIDAD:** Cualidad de viscoso. Propiedad de los fluidos que caracteriza su resistencia a fluir, debida al rozamiento entre sus moléculas.

## CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN .....	17
1. DISEÑO .....	31
1.1 DISEÑO TUBO DE VENTURI.....	31
1.2 DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO PARA EL ESTUDIO .....	32
1.3 TUBO DE PITOT .....	33
2. CONSTRUCCION.....	34
2.1 PARTES DEL EQUIPO.....	36
2.2 DETALLES.....	36
2.2.1 Medidas del Aparato Bernoulli. ....	36
2.3 PRUEBA TÉCNICA DEL APARATO PARA DEMOSTRAR EL PRINCIPIO DE BERNOULLI .....	37
2.3.1 Manual de funcionamiento. ....	37
2.3.2 Nivelación del Aparato de Bernoulli .....	37
2.3.3 Sistema de disipación de energía .....	37
2.3.4 Apertura de la llave de bomba hidráulica y verificación de la llave del equipo .....	37
3. ANALISIS DE RESULTADOS.....	39
3.1 CALIBRACION.....	39
3.2 ANALISIS DE VELOCIDAD .....	47
3.3 ANALISIS DE PRESION.....	55
4. CONCLUSIONES .....	66
5. RECOMENDACIONES .....	68
BIBLIOGRAFIA.....	69
ANEXOS.....	71

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Sección transversal del tubo de Venturi.....	23
Figura 2. Esquema General del Tubo de Venturi.....	27
Figura 3. Tubo Pitot. ....	33
Figura 4. Aparato de Bernoulli ensamblado.....	35
Figura 5. Tubo Venturi – Dimensiones.....	36

## LISTA DE GRAFICAS

	Pág.
Grafica 1. Log(Q) Vs Log( $\Delta h$ ).....	42
Grafica 2. Curva de calibración Q ecuación Vs $\Delta h$ . ....	43
Grafica 3. Comparación Caudal teórico Vs Caudal teórico corregido. ....	45
Grafica 4. Comparación de caudales.....	47
Grafica 5. Representación de la velocidad real de 25 ensayos en tubo de Venturi. .....	49
Grafica 6. Representación de la Velocidad teórica entre puntos de medición tubo de Venturi. ....	51
Grafica 7. Velocidad real Vs Velocidad teórica ensayo 1.....	52
Grafica 8. Velocidad real Vs Velocidad teórica ensayo 5.....	52
Grafica 9. Velocidad real Vs Velocidad teórica ensayo 10.....	53
Grafica 10. Velocidad real Vs Velocidad teórica ensayo 15.....	53
Grafica 11. Velocidad real Vs Velocidad teórica ensayo 20.....	54
Grafica 12. Velocidad real Vs Velocidad teórica ensayo 25.....	54
Grafica 13. Comportamiento de la presión ensayo 1. ....	60
Grafica 14. Representación de la presión estática ensayo 1. ....	60
Grafica 15. Representación de la presión dinámica ensayo 1. ....	60
Grafica 16. Comportamiento de la presión ensayo 5. ....	61
Grafica 17. Representación de la presión estática ensayo 5. ....	61
Grafica 18. Representación de la presión dinámica ensayo 5. ....	61
Grafica 19. Comportamiento de la presión ensayo 10. ....	62
Grafica 20. Representación de la presión estática ensayo 10. ....	62
Grafica 21. Representación de la presión dinámica ensayo 10. ....	62
Grafica 22. Comportamiento de la presión ensayo 15. ....	63
Grafica 23. Representación de la presión estática ensayo 15. ....	63
Grafica 24. Representación de la presión dinámica ensayo 15. ....	63
Grafica 25. Comportamiento de la presión ensayo 20. ....	64
Grafica 26. Representación de la presión estática ensayo 20. ....	64
Grafica 27. Representación de la presión dinámica ensayo 20. ....	64
Grafica 28. Comportamiento de la presión ensayo 25. ....	65
Grafica 29. Representación de la presión estática ensayo 25. ....	65
Grafica 30. Representación de la presión dinámica ensayo 25. ....	65

## LISTA DE CUADROS

Pág.

Cuadro 1. Resumen de datos obtenidos en laboratorio.....	39
Cuadro 2. Calculo de logaritmos de caudales observados y diferencias de alturas. .....	41
Cuadro 3. Calculo de caudales generados con la ecuación de calibración. ....	43
Cuadro 4. Calculo del coeficiente de descarga.....	44
Cuadro 5. Calculo de porcentaje de error obtenido y ajustado. ....	46
Cuadro 6. Calculo de velocidad de referencia estandarizada.....	48
Cuadro 7. Calculo de velocidad real. ....	48
Cuadro 8. Calculo de velocidad teórica entre punto de mayor diámetro y el punto 3 (Garganta).....	50
Cuadro 9. Resumen alturas piezómetros tubo de Venturi. ....	56
Cuadro 10. Calculo de presión estática. ....	57
Cuadro 11. Calculo de presión dinámica. ....	58
Cuadro 12. Calculo de presión total.....	59

## LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo 1. Ensayos de laboratorio.....	72
Anexo 2. Registro fotográfico.....	78
Anexo 3. Plano equipo para la demostración del principio de Bernoulli.....	81
Anexo 4. Protocolo de funcionamiento coeficiente de descarga o factor de paso.... .....	82
Anexo 5. Protocolo de funcionamiento demostración del principio de Bernoulli...88	
Anexo 6. Protocolo de funcionamiento comportamiento de la presión.....	107



## INTRODUCCIÓN

La presente investigación consistió en el diseño y prueba de un prototipo para el estudio de “El principio de Bernoulli”<sup>1</sup>, el cual describe el comportamiento de un fluido a lo largo de una corriente, relacionando la velocidad del flujo y su presión, por lo que un aumento en la velocidad genera una pérdida de presión y viceversa.

Este principio expresa que un fluido ideal, es decir, sin viscosidad ni rozamiento que circule por un conducto cerrado, tiene una energía constante a lo largo de su recorrido. Este principio fue desarrollado por Daniel Bernoulli en 1738 y expuesto su obra Hidrodinámica<sup>2</sup>, que se ha convertido en un insumo importante para el campo de la ingeniería civil y el diseño y construcción de obras de acueducto y alcantarillado a nivel mundial y los sistemas de bombeo y presión para otros sectores, incluyendo la extracción de hidrocarburos.

Para la aplicación y demostración del caso sobre el principio de Bernoulli, se hizo uso del tubo de Venturi, que es un dispositivo utilizado para medir la velocidad de un flujo en un fluido incompresible (Pedroza, Ortiz & Martínez, 2007), ya que este tubo formado por dos troncos con un cono de diferentes diámetros unidos por un tubo estrecho y este a su vez conectado a la conducción por otro tubo constituye un manómetro, que permite determinar la diferencia de presiones que se produce entre esos dos troncos por la diferencia de velocidad del flujo de líquidos.

El equipo estudio en un tramo de medición con un Tubo de Venturi, con seis puntos de medición de la presión, la cual fue registrada en un manómetro de tubo múltiple, adicionalmente se puede calcular la presión total en la salida del tubo que se denomina presión de estancamiento o presión total del flujo en el punto, la cual se efectúa mediante una sonda Pitot en sentido axial respecto al tubo de Venturi y se determina la lectura en un segundo manómetro de tubo, demostrando así el principio de Bernoulli en diferentes puntos del tubo de Venturi.

En los laboratorios de hidráulica y Saneamiento Básico del programa de Ingeniería Civil de la Universidad de Nariño, desde hace muchos años se viene trabajando en conjunto con estudiantes y docentes, trabajos de grado e investigación para aportar tanto el conocimiento como los recursos económicos, a fin de fortalecer dichos laboratorios en las áreas como mecánica de fluidos e hidráulica y saneamiento, para lo que se han incorporado canales, bombas orificios,

---

<sup>1</sup> RIAÑO Valle, F. El nacimiento de la Hidrodinámica Teórica. Ingeniería Hidráulica y Ambiental. Londrés, 2014, p. 66-78.

<sup>2</sup> NEWTON, I., BERNOULLI, D., MACLAURIN, C., & EULER, L. Philosophiae naturalis principia mathematica (Vol. 1). excudit G. Brookman; impensis TT et J. Tegg, Londini. 1833, p. 55.

vertederos, tuberías entre otros para los diferentes ensayos a realizarse en estas área.

También es importante mencionar que el equipo para el estudio del Principio de Bernoulli, complemento la primera etapa que se llevó a cabo en el trabajo de grado denominado: “Dotación del Banco Básico Hidrodinámico y Elaboración del Protocolo de Funcionamiento, Primera Etapa para el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad de Nariño”, siendo este banco el encargado del paso y suministro de agua para el funcionamiento del equipo.

### **Tema de la investigación**

### **Título de la investigación**

Esta investigación se denominó: “Dotación del equipo para el estudio del principio de Bernoulli y formulación de los protocolos de funcionamiento, para el laboratorio de hidráulica de la universidad de Nariño”

### **Modalidad de la investigación**

Esta investigación es de aplicación sobre conocimientos adquiridos en el programa de Ingeniería Civil de la Universidad de Nariño

### **Área de la investigación**

De acuerdo a lo emanado por el Consejo Académico en el Acuerdo No. 10 del 7 de febrero de 2014, este trabajo centra su actuar en:

- Área de ciencias básicas: Subárea: Física; Tema: Mecánica.
- Área de ciencias básicas de ingeniería: Subárea: Mecánica; Tema: Mecánica de fluidos.
- Área de ingeniería aplicada: Subárea: Hidráulica; Temas: Estructuras hidráulicas a flujo libre.

### **Alcance y delimitación**

El desarrollo de las actividades se ejecutó durante un intervalo de tiempo de cinco (5) meses, dentro de los cuales se realizó las siguientes actividades:

- Montaje del equipo para el estudio del Principio de Bernoulli.
- Adaptación del equipo al Banco Básico Hidrodinámico.

- Calibración del equipo para su óptimo desempeño en la realización de los ensayos de laboratorio para demostración del Teorema de Bernoulli. a). Medición de caudal en el laboratorio de hidráulica y saneamiento de la Universidad de Nariño a través de circuito cerrado que se retroalimentara por la acción de una bomba; b). Medición de la presión a lo largo del tubo Venturi y la determinación del factor de paso.
- Establecer el protocolo de funcionamiento correspondiente y garantizar el correcto funcionamiento, control y manejo del equipo.

Este estudio se generó como complemento al trabajo de grado denominado: "Dotación del banco básico hidrodinámico y elaboración del protocolo de funcionamiento, primera etapa para el laboratorio de hidráulica de la universidad de Nariño"<sup>3</sup> desarrollado en el año 2015, por estudiantes del programa de ingeniería Civil de la Universidad de Nariño.

## **Problema de investigación**

### **Descripción del problema**

En el programa de Ingeniería Civil, de la Universidad de Nariño fue necesario implementar prototipos y realizar pruebas de diferentes laboratorios en el área de la hidráulica y la mecánica de fluidos, con objeto de profundizar su investigación y aplicabilidad. Para estos fines, el programa académico de Ingeniería Civil de la universidad de Nariño cuenta con el Laboratorio de Hidráulica y Saneamiento Básico, para la realización de diferentes pruebas prácticas.

Sin embargo, debido a los pocos recursos financieros que la Universidad destina a la actualización y compra de equipos para el Laboratorio de hidráulica, las actividades prácticas académicas se han visto afectadas, y por ende la aplicación de conocimientos teóricos en el área de estudio.

Frente a esta situación, se presentó este estudio práctico de investigación, con objeto de proponer alternativas sencillas e innovadoras, para ayudar a la generación de conocimientos mediante el diseño y prueba de un equipo para el estudio del Principio de Bernoulli. Esta actividad permitió fortalecer el laboratorio de hidráulica para la realización de actividades prácticas y la aplicación de los conocimientos adquiridos por los estudiantes del programa de Ingeniería Civil de la Universidad de Nariño, y otros programas académicos que así lo requieran.

---

<sup>3</sup> GÓMEZ, M. & GÓMEZ, M. Dotación del banco básico hidrodinámico y elaboración del protocolo de funcionamiento, primera etapa para el laboratorio de hidráulica de la Universidad de Nariño. Informe final de Trabajo de Grado. Universidad de Nariño, San Juan de Pasto, 2015.

El presente trabajo de grado, busco entre otras actividades incentivar a estudiantes, docentes y administrativos a gestionar la elaboración de equipos propios y dotar de equipos idóneos para realizar laboratorios prácticos, en las áreas del conocimiento, especialmente en los temas de hidráulica y mecánica de fluidos, aspectos esenciales en la formación académica de los estudiantes del programa de Ingeniería Civil de la Universidad de Nariño.

### **Formulación del problema**

¿Cuenta el laboratorio de Hidráulica y Saneamiento básico del programa de ingeniería civil, con un equipo adecuado con el cual estudiar la demostración del Principio de Bernoulli y la ecuación de continuidad como también para realizar prácticas académicas e investigaciones que analicen variables tan importantes como la velocidad, caudal, presión y coeficiente de descarga?

Por lo anterior se propuso el desarrollo del proyecto de grado “DOTACIÓN DEL EQUIPO PARA EL ESTUDIO DEL PRINCIPIO DE BERNOULLI Y FORMULACION DE LOS PROTOCOLOS DE FUNCIONAMIENTO, PARA EL LABORATORIO DE HIDRÁULICA DE LA UNIVERSIDAD DE NARIÑO”.

### **Justificación**

El estudio de la mecánica de fluidos es sumamente importante en el área de la Ingeniería Civil, porque ayuda a comprender el comportamiento de los fluidos compresibles e incompresibles, tanto en estado de equilibrio – *hidrostática*, como en movimiento – *Hidrodinámica*. (Rivera, s, f.).

En este caso en particular, se consideró el flujo de agua, como líquido principal de la prueba. Por tal motivo, el presente trabajo de investigación aplicada busco llevar a la práctica el Principio de Bernoulli y diseñar un prototipo de medición y su protocolo que permita generar espacios académicos prácticos en el laboratorio de Hidráulica y Saneamiento de la Universidad de Nariño.

La demostración del principio de Bernoulli, tienen gran valor en el ámbito académico y en el profesional, además para el laboratorio de hidráulica y saneamiento de la Universidad de Nariño, se convierte en una alternativa de investigación práctica aplicada en la representación de desarrollo de la presión mediante tubo Venturi, la determinación del factor de paso y la demostración del principio de Bernoulli, demostrando que el conocimiento adquirido en el aula en las asignaturas de hidráulica y la mecánica de fluidos son importantes en el campo, como bases fundamentales para el desarrollo de proyectos civiles, diseño y construcción de sistemas de tratamiento de aguas o plantas de potabilización, acueductos y alcantarillados.

## Objetivos

### Objetivo general

Diseñar y construir el equipo para el estudio del Principio de Bernoulli, en el laboratorio de hidráulica de la Universidad de Nariño.

### Objetivos específicos

- Realizar el montaje del equipo necesario para demostrar el Principio de Bernoulli
- Calibración del equipo para el estudio del principio de Bernoulli.
- Desarrollar el protocolo de funcionamiento del equipo para la determinación del factor de paso o coeficiente de descarga.
- Desarrollar el protocolo de funcionamiento del equipo para la demostración de la velocidad en tubo de Venturi.
- Desarrollar protocolo de funcionamiento del equipo para la representación del desarrollo de la presión en tubo Venturi.
- Complementar el montaje del Banco de Pruebas Hidrodinámico, con el equipo para el estudio del principio de Bernoulli.

## Marco teórico

### Fundamentos teóricos

La teoría para desarrollar el presente trabajo de aplicación, abarco principalmente la Ecuación de Bernoulli y la Ecuación de Continuidad que hacen parte de la mecánica de fluidos, y la medición de flujos aplicándolo al tubo de Venturi, a continuación, se presenta un detalle de esta teoría:

**Rapidez de flujo del volumen en un fluido (Q).** Es el volumen de fluido que pasa por una sección transversal por unidad de tiempo (más conocido como caudal), y se puede expresar en las siguientes unidades l/min, m<sup>3</sup>/s, Galón/min, pies<sup>3</sup>/s y la formula general es<sup>4</sup>:

$$Q = V * A \quad (1)$$

---

<sup>4</sup> MOTT, R. L. Mecánica de fluidos. Pearson educación. México, 2006, p. 156.

Dónde:

V: velocidad promedio del flujo

A: Área de la sección transversal

El caudal (Q), también puede calcularse por la cantidad de fluido que pasa sobre una superficie en un tiempo determinado, método volumétrico:

$$Q = \frac{v}{t} \quad (2)$$

Dónde:

v: Volumen del flujo

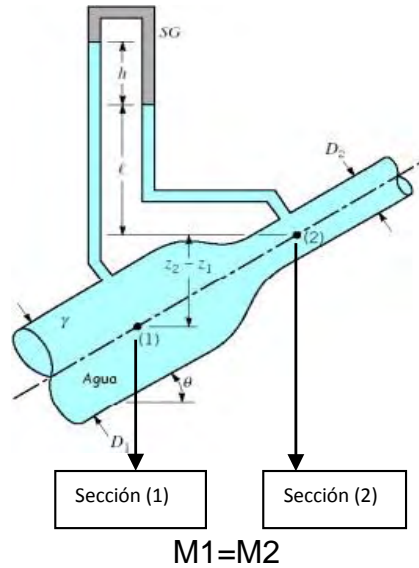
t: Tiempo

### **Ecuación de continuidad.**

- La ecuación de continuidad no es más que un caso particular del principio de conservación de la masa.
- Se basa en que el caudal (Q) del fluido ha de permanecer constante a lo largo de toda la conducción.

Si un fluido fluye desde la sección (1) hacia la sección (2) con rapidez constante, es decir, si la cantidad de fluido que pasa por cualquier sección en un cierto tiempo dado es constante, entonces la masa de fluido que pasa por la sección (2) en un tiempo dado debe ser la misma que la que fluye por la sección (1), en el mismo tiempo. Entre las secciones (1) y (2) no hay generación ni acumulación de masa por unidad de tiempo, esto es:

Figura 1. Sección transversal del tubo de Venturi.



Fuente: <https://image.slidesharecdn.com/ecuaciondebernoullimododecompatibilidad-140320061558-phpapp01/95/ecuacionde-bernoullimodo-de-compatibilidad-15-638.jpg?cb=1395296219>.

Donde:

$M_1 - M_2$  = masa en dos puntos del tubo de Venturi

Como  $M = \rho \cdot v \cdot A$  entonces:

$$\rho_1 \cdot V_1 \cdot A_1 = \rho_2 \cdot V_2 \cdot A_2 \quad (3)$$

Donde:

$\rho$  = densidad del fluido

$V$  = velocidad

$A$  = área transversal del tubo

Si el fluido que circula entre las secciones 1 y 2 es incompresible ( $\rho_1 = \rho_2$ ), la ecuación de continuidad se expresa por:

$$V_1 \cdot A_1 = V_2 \cdot A_2 \quad (4)$$

$$Q_1 = Q_2 \quad (5)$$

$Q_1 - Q_2$  = caudal en dos puntos diferentes del tubo

$V_1 - V_2$  = velocidad en dos puntos diferentes del tubo

**Ecuación de Bernoulli.** Ley de conservación de la energía: “la energía no puede ser creada ni destruida, solo se transforma de un tipo en otro”. Cuando se analizan problemas de flujo en conductos, es necesario considerar tres formas de energía<sup>5</sup>:

- **Energía de flujo:** (llamada también Energía de presión o trabajo flujo): Representa la cantidad de trabajo necesaria para mover el elemento de fluido a través de una cierta sección en contra de la presión  $\rho$ <sup>6</sup>.

$$E_f = \frac{W * P}{\gamma} \quad (6)$$

Dónde:

W: peso del fluido

P: presión

$\gamma$ : peso específico del fluido

- **Energía potencial:** Debido a su elevación, la energía potencial del elemento de fluido con respecto a algún nivel de referencia está dada por:

$$E_p = W * Z \quad (7)$$

Dónde:

Z: diferencia de altura

W: peso del fluido

- **Energía cinética:** Debido a su velocidad la energía cinética del elemento del fluido es:

$$E_k = \frac{W * V^2}{2g} \quad (8)$$

Dónde:

W: peso del fluido

V= velocidad del fluido

g= gravedad de la tierra

La cantidad total de energía que posee el elemento de fluido será la suma de las tres energías anteriores:

$$E = E_f + E_p + E_k \quad (9)$$

---

<sup>5</sup> GONZALES CHAMORRO, Juan. Slide share: ecuación de Bernoulli. Atacama, Chile, 2005. Disponible en: <https://es.slideshare.net/jcesarvp/ecuacionde-bernoullimodo-de-compatibilidad> [Citado el 20 de febrero de 2018].

<sup>6</sup> MOTT, R. L. Mecánica de fluidos. Pearson educación. México, 2006, p. 66.



$$E = \frac{W \cdot P}{Y} + W \cdot Z + \frac{W \cdot V^2}{2g} \quad (10)$$

Donde:

Ef = energía de flujo.

Ep = energía potencial.

Ek = energía cinética.

Si entre las secciones 1 y 2 no se agrega ni se pierde energía, entonces el principio de conservación de energía establece que:

$$E1 = E2 \quad (11)$$

$$\left( \frac{W \cdot P1}{Y} + W \cdot Z1 + \frac{W \cdot V1^2}{2g} \right) = \left( \frac{W \cdot P2}{Y} + W \cdot Z2 + \frac{W \cdot V2^2}{2g} \right) \quad (12)$$

Simplificando el peso del elemento de fluido, se obtiene la Ecuación de Bernoulli:

$$\left( \frac{P1}{Y} + Z1 + \frac{V1^2}{2g} \right) = \left( \frac{P2}{Y} + Z2 + \frac{V2^2}{2g} \right) \quad (13)$$

La Ecuación de Bernoulli se deriva del principio de conservación de la Energía Mecánica.

$$\left( \frac{P}{Y} + Z + \frac{V^2}{2g} \right) = \text{Constante} \quad (14)$$

$$\left( \frac{P}{Y} + Z \right) = \text{Cabeza piezometrica} \quad (15)$$

$$\left( \frac{V^2}{2g} \right) = \text{Cabeza de velocidad} \quad (16)$$

Donde:

P= presión

Z= altura piezometrica

V= velocidad

g= gravedad

Y= peso específico

## **Restricciones de la Ecuación de Bernoulli.**

- Es válida solamente para fluidos incompresibles, puesto que el peso específico del fluido se tomó como el mismo en las dos secciones de interés.
- No puede haber dispositivos mecánicos entre las dos secciones de interés que pudieran agregar o eliminar energía del sistema, ya que la ecuación establece que la energía total del sistema del fluido es constante.
- No puede haber transferencia de calor hacia adentro o afuera del sistema.
- No puede haber pérdidas de energía debidas a la fricción.

**Medición de flujo.** La medición de flujo es una función importante dentro de cualquier organización que emplee fluidos para realizar sus operaciones regulares.

Se refiere a la capacidad de medir la velocidad. El flujo volumétrico o el flujo másico de cualquier líquido o gas. Hay muchos dispositivos para medir el flujo. Algunos miden el flujo volumétrico de forma directa, mientras que otros miden una velocidad promedio del flujo que se convierte a flujo volumétrico por medio de  $Q = Av$ . Algunos proporcionan mediciones primarias directas, en tanto otros requieren de calibración o la aplicación de un coeficiente de descarga a la salida observada del instrumento.

La forma de la salida del medidor de flujo también varía en forma considerable de un tipo a otro. La lectura puede provenir de la presión, nivel de líquido, contador mecánico, posición de un indicador la corriente de fluido, señal eléctrica continua o una serie de pulsos eléctricos. El dispositivo que escogimos fue el medidor de Venturi.

Virtualmente, cualquier dispositivo de medición del flujo que se instale y opere en forma apropiada tiene una exactitud dentro de 10% del flujo real. La mayor parte de los medidores comerciales una exactitud de 2% y hay algunos de los que se afirma es de 0.5. Por lo general, si se desea más exactitud el costo es un factor importante.

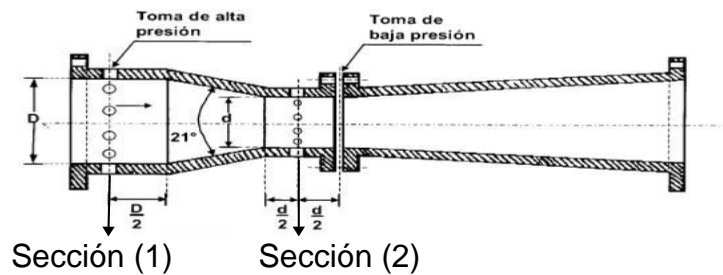
Ciertos tipos de medidores de flujo requieren calibrarse. Algunos fabricantes proporcionan la calibración en forma de gráfica o tabla de resultados reales versus la lectura del indicador. Algunos están equipados para la lectura directa, con escalas calibradas en las unidades de flujo que se desea.

En el caso de los medidores más importantes, tales como los de carga variable, se ha determinado formas y dimensiones geométricas estándar para las que se

dispone de datos empíricos. Estos datos relacionan el flujo con una variable que se mide con facilidad, tal como la diferencia de presión o el nivel de un fluido<sup>7</sup>.

**Tubo de Venturi.** En la siguiente figura tenemos un tubo de Venturi con sus partes principales, el flujo que viene de la tubería principal en la sección ancha se hace acelerar a través de una sección estrecha denominada garganta, donde la presión del fluido disminuye. Después, el flujo se expande a través de una porción divergente que alcanza el mismo diámetro de la tubería principal. Se coloca tomas de presión en la pared del tubo de la sección ancha y la garganta. Estas tomas de presión se conectan a ambos lados de un manómetro diferencial, de modo que la deflexión  $h$  sea una indicación de la diferencia de presión  $p_1 - p_2$ .

Figura 2. Esquema General del Tubo de Venturi.



Fuente: <https://www.monografias.com/trabajos6/tube/Image2168.gif>

Se empleó la ecuación de la energía y la de continuidad para obtener la relación con que se calcula el flujo volumétrico. Con el empleo de las secciones (1) y (2) como puntos de referencia en la figura 2, se escribe las ecuaciones siguientes:

$$E = E_f + E_p + E_k \quad (17)$$

Si entre las secciones 1 y 2 no se agrega ni se pierde energía, entonces el principio de conservación de energía establece que:

$$E_1 = E_2$$

$$E_{k_1} + E_{p_1} + E_{f_1} = E_{k_2} + E_{p_2} + E_{f_2} \quad (18)$$

$$\frac{1}{2} \rho V_1^2 + \rho g h_1 + P_1 = \frac{1}{2} \rho V_2^2 + \rho g h_2 + P_2 \quad (19)$$

<sup>7</sup> Disponible en: <http://www.smar.com/espanol/articulos-tecnicos/medicion-de-flujo>. [citado el 9 de febrero de 2018].

Teniendo en cuenta que el tubo se encontro nivelado entonces:

$$h_1=h_2 \quad (20)$$

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho V_1^2 = P_2 + \frac{1}{2}\rho V_2^2 \quad (21)$$

$$P_1 - P_2 = \frac{1}{2}\rho V_2^2 - \frac{1}{2}\rho V_1^2 \quad (22)$$

$$\frac{2(P_1-P_2)}{\rho} = (V_2^2 - V_1^2) \quad (23)$$

Por la ecuación de continuidad se tiene:

$$A_1 V_1 = A_2 V_2 \quad (24)$$

$$V_2 = \frac{A_1}{A_2} V_1 \quad (25)$$

Reemplazando

$$\frac{2(P_1-P_2)}{\rho} = \left(\frac{A_1}{A_2} V_1\right)^2 - (V_1)^2 \quad (26)$$

$$\frac{2(P_1-P_2)}{\rho} = (V_1)^2 \left(\frac{A_1^2-A_2^2}{A_2^2}\right) \quad (27)$$

$$\frac{2(P_1-P_2)A_2^2}{\rho(A_1^2-A_2^2)} = (V_1)^2 \quad (28)$$

$$V_1 = A_2 \sqrt{\frac{2(P_1-P_2)}{\rho(A_1^2-A_2^2)}} \quad (29)$$

$$V_1 = A_2 \sqrt{\frac{2(\Delta P)}{\rho(A_1^2-A_2^2)}} \quad (30)$$

$$V_2 = A_1 \sqrt{\frac{2(\Delta P)}{\rho(A_1^2-A_2^2)}} \quad (31)$$

El número de Reynolds (NR) relaciona la densidad, viscosidad, velocidad y dimensión típica de un flujo en una expresión adimensional, que interviene en numerosos problemas de dinámica de fluidos. Dicho número o combinación adimensional aparece en muchos casos relacionado con el hecho de que el flujo pueda considerarse laminar (número de Reynolds pequeño) o turbulento (número de Reynolds grande). Para un fluido que circula por el interior de una tubería circular recta, el número de Reynolds viene dado por<sup>8</sup>:

---

<sup>8</sup> Disponible en: <https://es.slideshare.net/edosilva/laboratorio-1-determinacin-de-tipos-de-flujo-segn-reynolds>. [citado el 25 de febrero de 2018].

$$Re = \frac{\rho v_s D}{\mu} \quad (32)$$

O equivalentemente por:

$$Re = \frac{v_s D}{\nu} \quad (33)$$

Dónde:

Re: Numero de Reynolds

$\rho$ : Densidad del fluido

$v_s$ : Velocidad característica del fluido

$D$  : Diámetro de la tubería a través de la cual circula el fluido o longitud

$\mu$ : viscosidad del fluido

**Calibración.** Es el proceso para establecer, bajo unas condiciones específicas el error en el instrumento de medición con respecto de un patrón de incertidumbre conocida. De esta manera se determinaron los factores de corrección para el instrumento y se verifico que el error del mismo se encuentre dentro de los límites tolerables<sup>9</sup>.

Incertidumbre: intervalo de valores entre los cuales se encuentra un valor verdadero.

Error: es la diferencia que hay entre el valor medido de una variable y el valor real o calculado matemáticamente.

**Calibración del Flujo.** Consistió en la comparación de señales de salida de un instrumento de medición en particular contra un patrón de incertidumbre, usualmente con sistemas que colectan el flujo total del fluido durante un intervalo de tiempo medido. Este flujo es convencionalmente medido volumétricamente o gravimétricamente.

Para medir el flujo de líquidos para calibración se requirió instrumentos para medir masa, tiempo, longitud, volumen y temperatura muy exactos, las incertidumbres implicadas en mediciones de flujo de fluidos resultan del tipo de instalaciones y procedimientos utilizados en la calibración.

**Calibración de flujo volumétrico.** Los líquidos pueden ser contenidos dentro de un recipiente abierto, uno de los métodos más convenientes para la calibración es el empleo de patrones volumétricos calibrados.

---

<sup>9</sup> STREETER, V. L. y E. B. Wylie, "Mecánica de los Fluidos". 6ta edición, McGraw-Hill Latinoamericana S. A., Bogotá, 1981. p. 102.

Para realizar la calibración de forma correcta y confiable se tuvieron en cuenta las siguientes consideraciones:

- El medidor de flujo fue calibrado con el líquido a emplear.
- No existieron vibraciones o pulsaciones que pudieran afectar el comportamiento del medidor de flujo.
- El número de valores de flujo seleccionado estuvo entre 2 y 5 flujos diferentes dentro del alcance del medidor para cada prueba de ensayo<sup>10</sup>.

---

<sup>10</sup> Disponible en: [http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08\\_3300\\_C.pdf](http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_3300_C.pdf). [citado el 2 de abril de 2018].

## 1. DISEÑO

Al finalizar el trabajo de investigación los resultados fueron la instalación y puesta en marcha del equipo para el estudio de Bernoulli con su respectivo protocolo de funcionamiento, para poder realizar ensayos como la representación del desarrollo de la presión en tubo Venturi, determinación del factor de paso y demostración del principio de Bernoulli, el cual quedara en el Laboratorio de Hidráulica a disposición de estudiantes y docentes.

### 1.1 DISEÑO TUBO DE VENTURI

La metodología para el cálculo de las dimensiones del tubo de Venturi fue la siguiente: se partió de la suposición de necesitar un diferencial de presión de 1,2 metros, teniendo en cuenta la altura tanto del laboratorio como la del banco básico hidrodinámico y de un caudal de alimentación de 0,0008 m<sup>3</sup>/seg, sabiendo que<sup>11</sup>:

$$Q = C_d A_2 \sqrt{2gh}. \quad (34)$$

Q= Caudal

Cd= coeficiente de descarga

A<sub>2</sub>= Área en la garganta

g= gravedad

h= altura piezometrica

El equipo de Venturi que se utilizo fue diseñado para minimizar las pérdidas de energía en la garganta, ya que posee un plástico liso, por eso es común que el coeficiente de descarga esté cercano a 1.0), siendo este el valor adoptado.

Reemplazando y despejando en la ecuación (34):

$$A_2 = \frac{0,0008}{1\sqrt{2 * 9,81 * 1,2}}$$

$$A_2 = 0,0001649$$

A partir de la formula  $A = \pi * d^2/4$ , se despejo el valor del diámetro:

$$d = \sqrt{\frac{4(0,0001649)}{\pi}}$$

---

<sup>11</sup> Disponible en: <http://www.valvias.com/coeficiente-de-descarga.php>. [citado el 2 de abril de 2018].

$$d = 0,0145$$

Por construcción se asumió un diámetro en la garganta de 0,015 m.

Los autores en la actualidad señalan que para el diseño de tubos Venturi está definido por un Angulo convergente de  $21^{\circ} \pm 1$  y un ángulo divergente entre  $7^{\circ}$  y  $15^{\circ}$  en su diseño clásico.

Angulo convergente =  $20^{\circ}$

Angulo divergente =  $11^{\circ}$

Diámetro entrada tubo = 37 mm

El diámetro de entrada del tubo se asumió teniendo en cuenta un diámetro comercial de  $1 \frac{1}{4}$ " (pulgadas).

## **1.2 DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO PARA EL ESTUDIO**

La estructura del ensayo se compone de un tramo de medición con un tubo Venturi transparente con sus tuberías correspondientes y 2 dispositivos para medir la presión. El tubo cuenta con seis tomas de medición que permite la indicación del desarrollo estático de la presión por el tubo inundado en un manómetro de tubito múltiple. La presión total se mide con sonda Pitot y se indica en un segundo manómetro de tubito. El caudal de paso se determina a través del depósito volumétrico del módulo básico.

Detalles:

- Medidas tablero: largo 1,20 mts ancho 0,80 mts.
- Tuvo Venturi transparente, subdividido en 6 segmentos cada uno con conexión de medición.
- Manómetro de tubito séxtuplo, rango de medición: 1000 mmWS.
- Manómetro de tubito, rango de medición 1000 mmWS.

La totalidad de la estructura del ensayo se encuentra esquemáticamente dispuesta sobre el Banco Básico Hidrodinámico, que se encarga de suministrar el agua al equipo, como ya fue mencionado este Banco se elaboró con el trabajo de grado denominado: "Dotación del banco básico hidrodinámico y elaboración del protocolo de funcionamiento, primera etapa para el laboratorio de hidráulica de la universidad de Nariño".



### 1.3 TUBO DE PITOT

El tubo de Pitot fue inventado por el ingeniero francés Henri Pitot en 1732, sirve para calcular la presión total, también llamada presión de estancamiento, presión remanente o presión de remanso (suma de la presión estática y de la presión dinámica). En el punto (1) del esquema, embocadura del tubo, se forma un punto de estancamiento, la velocidad allí ( $v_1$ ) es nula, y la presión según la ecuación de Bernoulli aumenta hasta<sup>12</sup>:

$$\frac{P_1}{\rho} = \frac{P_t}{\rho} = \frac{P_0}{\rho} + \frac{V_0^2}{2} \quad (35)$$

Por lo tanto:

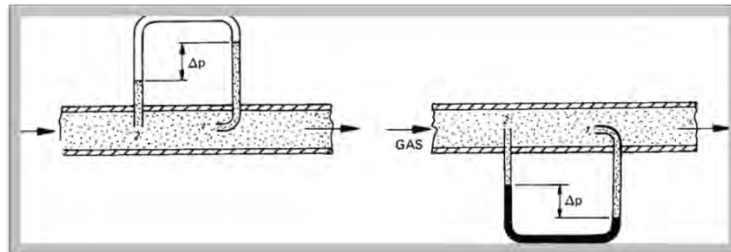
$$P_t = P_0 + \rho * \frac{V_0^2}{2} \quad (36)$$

Dónde:

$v_0$  y  $P_0$  (presión y velocidad de la corriente in-perturbada o inicial.)

$P_t$  (Presión total o de estancamiento.)

Figura 3. Tubo Pitot.



Fuente: <http://www.sapiensman.com/tecnoficio/docs1/images/tubo%20de%20Pitot.jpg>

<sup>12</sup> Disponible en: <https://es.scribd.com/presentation/362536090/Mecanica-de-Fluidos#>. [citado el 2 de abril de 2018].

## 2. CONSTRUCCION

Para ejecutar el montaje del equipo para estudiar el Principio de Bernoulli, se partió del elemento principal, es decir, el tubo Venturi; este fue elaborado paso a paso de la siguiente manera:

- Se procedió a elaborar un molde del tubo en madera densa, con el propósito de lograr una superficie lisa al ser torneado; de esta forma se logró que el tubo Venturi tuviera la textura requerida (sin imperfecciones de rugosidad). (Ver anexo 2 registro fotográfico, foto 1).
- Una vez se consiguió pulido el molde, se hizo el acople de dos elementos roscados (a cada extremo del molde), con el fin de que el que va a ser el tubo Venturi pueda desarmarse, ver anexo 2 Registro fotográfico, Foto 2. Posteriormente se llevó a cabo la fundición del tubo con resina, hasta lograr las condiciones adecuadas para la elaboración de un tubo de óptima calidad (transparencia, textura, resistencia, etc.). (Ver anexo 2 registro fotográfico, foto 3).
- Luego se procedió a hacer las 6 perforaciones en el tubo, para la instalación de los manómetros, cuyo diámetro fue el mismo para todas, para el acople se utilizó: manguera calibre 25 mm, racores de ensamble para el acople de los elementos de cada manómetro al tubo Venturi, una broca, un machuelo, seis abrazaderas y cinta teflón (Ver anexo 2 Registro fotográfico, foto 4, y foto 5).
- Después de este punto, se preparó cada uno de los accesorios para tubería (de 1 y 1/4”), los cuales se acoplaron al tubo principal, al final, quedo listo el acople y con el uso de pegamento para tubos PVC se unieron las partes con mucho cuidado, de tal manera que tampoco en esta parte se presente goteo por fugas de agua. (Ver anexo 2 Registro fotográfico, foto 6).
- Respecto al proceso de ensamble del Sistema de Tubo Pitot, se pudieron observar los accesorios de acoplamiento que se utilizaron: rosca (color blanco); tubo de cobre (3/16); manguera flexible (negra); y algunos “norrin” (especie de argollas pequeñas). En seguida fue acoplado el tubo de cobre de la manera más precisa y se continuó con todo el acople del tubo Pitot y la adaptación del tubo a los otros accesorios de tubería. (Ver anexo 2 registro fotográfico, foto 7).
- El siguiente paso consistió en fabricar la estructura de soporte del Aparato de Bernoulli, con tubo cuadrado metálico de 5 x 5 cm. El soporte superior, fue ensamblado en el sistema de los manómetros de tubo, de acuerdo a la

posición de las perforaciones realizadas. Dichos soportes se elaboraron en ángulo metálico de 1 x 1/8". El sistema (cámara) de compresión de aire, el cual se adaptó al equipo en su parte superior se acoplará a cada uno de los seis manómetros de tubo que vienen conectados al tubo Venturi.

- Finalmente se adaptó a la estructura un tablero en material ajoinchapo de medidas de 0.80 \* 1.20 mts. Sobre el cual se imprimió la imagen con los rangos de medición de cada manómetro, iniciando en cero mm hasta 100 mm, que corresponde a la altura máxima de medición, soportada por el equipo y así mismo un gráfico representativo del tubo de Venturi con sus respectivas medidas. esto para determinar la lectura de la presión de cada uno y hacer los cálculos respectivos.

Figura 4. Aparato de Bernoulli ensamblado.



Fuente: Esta investigación.

## 2.1 PARTES DEL EQUIPO

Plano equipo para la demostración del Principio de Bernoulli. (Ver anexo 3).

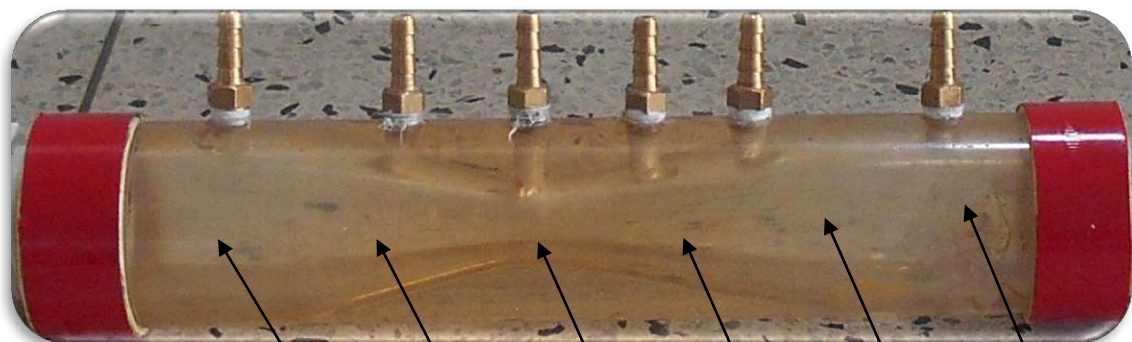
- Inserto diámetro 1”.
- Buge soldado – diámetro 1 ¼”.
- Válvula de compuerta metálica diámetro 1 ¼”.
- Codo 90° diámetro 1 ¼”.
- Tubo PVC diámetro 1 ¼”.
- Adaptador macho diámetro 1 ¼”.
- Tubo de Venturi con 6 puntos de medición de presión.
- Adaptador macho diámetro 1 ¼”.
- Tubo PVC diámetro 1 ¼” (tener en cuenta longitud de desarrollo).
- Adaptador macho diámetro 1 ¼”.
- Tubo PVC diámetro 1 ¼”.
- T de diámetro 1 ¼” (revisar que sigue).
- Buge reducido de diámetro 1 ¼” \* 3/8”.
- Tubo PITOT.
- Tubo PVC diámetro 1 ¼”.

## 2.2 DETALLES

### 2.2.1 Medidas del Aparato Bernoulli.

- Tablero: base 0,80 m, altura 1,20 m, peso 11 kg.
- Tuvo Venturi transparente, subdividido en 6 segmentos cada uno con conexión de medición.

Figura 5. Tubo Venturi – Dimensiones.



Diámetro - mm	37	25.9	15	21.3	29.3	37
Área - m <sup>2</sup>	0.00107	0.00053	0.00018	0.00036	0.00069	0.00107

Fuente: Esta investigación.

## **2.3 PRUEBA TÉCNICA DEL APARATO PARA DEMOSTRAR EL PRINCIPIO DE BERNOULLI**

**2.3.1 Manual de funcionamiento.** Previa conexión del suministro de la bomba de agua, se ejecuta cada uno de los siguientes pasos:

Procedimiento a seguir:

- Tener el registro de los diámetros del tubo Venturi.
- Armar el equipo experimental.
- Permitir la entrada del fluido.
- Conectar y encender la bomba, esperar que el fluido se estabilice.
- Medir la diferencia de alturas en los ramales de tubo Venturi.
- Calcular analíticamente el caudal, considerando el diámetro y la altura.
- Comprobar experimentalmente el caudal calculado.
- Limpiar, secar y guardar el equipo.

**2.3.2 Nivelación del Aparato de Bernoulli.** Para esto, es importante guiarse de un instrumento de nivelación; según el cual, se deben hacer los ajustes necesarios de cada uno de los cuatro pies ubicados en la base del aparato. Este proceso sencillo es determinante en la obtención de las medidas que marca cada uno de los manómetros.

**2.3.3 Sistema de disipación de energía.** Este procedimiento se debe realizar fin de disminuir las pérdidas generadas con la formación de burbujas de aire, causadas por las descargas de agua, tanto de la bomba hidráulica como del aparato de Bernoulli, para esto es necesario la utilización de un dissipador relleno de gravilla, al cual se le insertara la manguera de salida de agua desde la bomba.

**2.3.4 Apertura de la llave de bomba hidráulica y verificación de la llave del equipo.** Deberá estar abierta totalmente para permitir la entrada del flujo de agua. Es indispensable observar y evitar la formación de burbujas de aire en el fluido, las cuales afectan el proceso de lectura de la presión en los manómetros, generándose así datos erróneos, también es importante que la apertura inicial de la llave, se realice de manera gradual, para impedir un posible daño en el tubo de Venturi. En esta parte, es importante resaltar que, si se cierra dicha llave de forma brusca y hasta el tope, el tubo Venturi se rompe y deja de ser útil.

- Cuando comienzan a subir parcialmente los niveles de agua por los tubitos, se procede a purgar, desde la cámara de compresión de aire (parte superior izquierda del aparato), asegurándose que los niveles de agua que suben por los manómetros no sobrepasen la mitad del tablero de lectura; de no ser así, se corre el riesgo de dañar el aparato.

- El acto de purgar el aire, permite mejorar los niveles de presión en cada manómetro. Por lo tanto, si se suben demasiado se recomienda proceder a purgar para que bajen tales niveles.
- En el centro del tubo Venturi, donde este se hace más estrecho, la presión va a ser menor que en los otros segmentos del mismo.

En esta parte del proceso, se hace la toma de lectura de la presión en los 6 manómetros en diferentes caudales, para lo cual hay que asegurarse que el tubo Pitot se hale hacia atrás cuidadosamente. Para esta actividad, se requiere los siguientes elementos instrumentos de medición:

- Probetas de medición milimetradas
- Cronometro.
- Termómetro.
- Cámara para registro visual.

Por último, se apaga el sistema desde el banco hidrodinámico y se procede a vaciar el aparato de Bernoulli.

### 3. ANALISIS DE RESULTADOS

#### 3.1 CALIBRACION

Para determinar el coeficiente de descarga del tubo de Venturi en estudio, se realizó un total de veinticinco (25) ensayos de laboratorio (ver anexo 1) a fin de realizar la calibración del caudal.

A continuación, se presenta un resumen de los datos obtenidos y el cálculo del caudal observado en laboratorio:

Cuadro 1. Resumen de datos obtenidos en laboratorio.

Ensayo	$\Delta h$ (m)	Volumen (L)	Tiempo (seg)	Q (L/seg)	Q (m3/seg)
1	0,9686	0,4994	0,492	1,01504	0,001015
2	0,9566	0,8598	0,864	0,99514	0,000995
3	0,9498	0,7114	0,740	0,96135	0,000961
4	0,8920	0,5766	0,626	0,92109	0,000921
5	0,8472	0,7296	0,866	0,84249	0,000842
6	0,8306	0,6092	0,750	0,81227	0,000812
7	0,7948	0,9820	0,982	1,00000	0,001000
8	0,7724	0,6496	0,932	0,69700	0,000697
9	0,7504	0,8612	1,300	0,66246	0,000662
10	0,7358	0,6368	0,962	0,66195	0,000662
11	0,7300	0,7846	1,196	0,65602	0,000656
12	0,7034	0,8602	1,338	0,64290	0,000643
13	0,6650	0,8612	1,380	0,62406	0,000624
14	0,6444	0,6948	1,128	0,61596	0,000616
15	0,6310	0,8094	1,350	0,59956	0,000600
16	0,5722	0,738	1,232	0,59903	0,000599
17	0,5324	0,7162	1,308	0,54755	0,000548
18	0,5288	0,8536	1,572	0,54300	0,000543
19	0,4590	0,7490	1,418	0,52821	0,000528
20	0,4372	0,7036	1,372	0,51283	0,000513
21	0,4316	0,7998	1,564	0,51138	0,000511
22	0,3328	0,7512	1,660	0,45253	0,000453
23	0,3084	0,6712	1,508	0,44509	0,000445
24	0,2096	0,6718	1,822	0,36872	0,000369
25	0,1738	0,6678	2,122	0,31470	0,000315

Fuente: Esta investigación.

La tabla que se muestra a continuación relaciona; el número de ensayo, la altura del tubo de entrada (que siempre es el que presenta la mayor altura y, por lo tanto, nos ofrece un punto de referencia del nivel máximo del nivel del agua, en el equipo.), luego tenemos dos columnas que son el volumen promedio y, el tiempo

promedio, medidos en el laboratorio con una probeta y un cronometro, y por último el caudal experimental, con sus dos respectivas unidades de medida en L/s y m<sup>3</sup>/s.

Como se puede apreciar, hay una relación proporcionalmente directa entre el caudal y la altura, lo que quiere decir que a mayor caudal mayor altura.

Ahora si teniendo en cuenta la ecuación general de calibración para el cálculo de caudal real, se observa que es del tipo exponencial y está representada por:

$$Q_{real} = k(\Delta h)^n \quad (37)$$

Donde los valores de k y n son constantes que se determinaron aplicando el método de regresión, al linealizar esta ecuación con las leyes de los logaritmos se obtuvo<sup>13</sup>:

$$\log(Q_{real}) = n \log(\Delta h) + \log(k) \quad (38)$$

La cual se interpreto como una ecuación lineal:

$$y = mx + b \quad (39)$$

Donde:

$$y = \log(Q_{real})$$

$$n = m$$

$$x = \log(\Delta h)$$

$$b = \log(k)$$

---

<sup>13</sup> Disponible en: <http://m.educarchile.cl/portal/mobile/ficha-tematica.xhtml?id=216689>. [citado el 15 de abril de 2018].

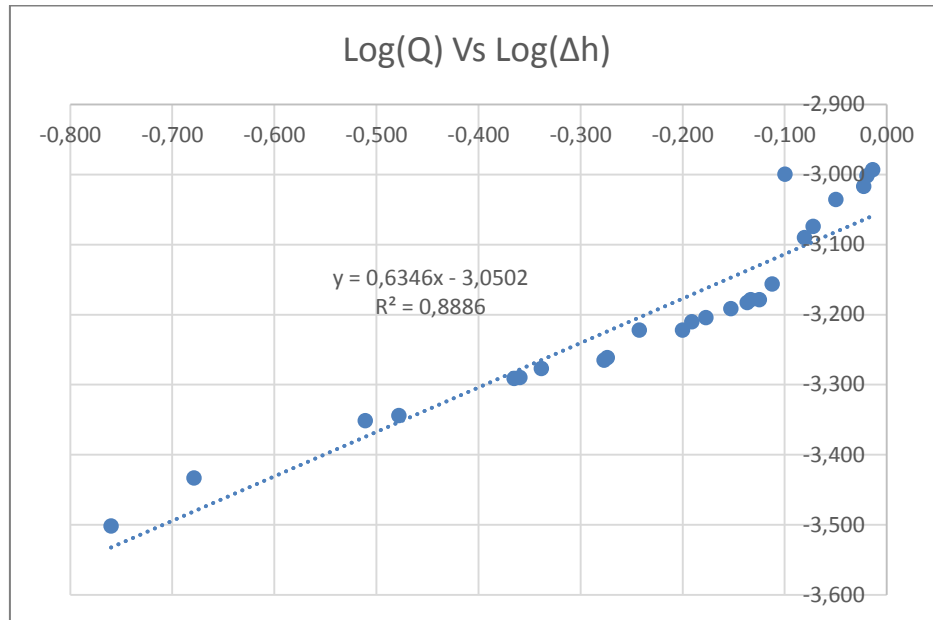


Cuadro 2. Calculo de logaritmos de caudales observados y diferencias de alturas.

<b>Ensayo</b>	<b><math>\Delta h</math> (m)</b>	<b>Q (m<sup>3</sup>/seg)</b>	<b>Log(<math>\Delta h</math>)</b>	<b>Log (Q)</b>
1	0,9686	0,00102	-0,01386	-2,993517
2	0,9566	0,00100	-0,01927	-3,002116
3	0,9498	0,00096	-0,02237	-3,017118
4	0,8920	0,00092	-0,04964	-3,035700
5	0,8472	0,00084	-0,07201	-3,074433
6	0,8306	0,00081	-0,08061	-3,090301
7	0,7948	0,00100	-0,09974	-3,000000
8	0,7724	0,00070	-0,11216	-3,156770
9	0,7504	0,00066	-0,12471	-3,178839
10	0,7358	0,00066	-0,13324	-3,179172
11	0,7300	0,00066	-0,13668	-3,183083
12	0,7034	0,00064	-0,15280	-3,191857
13	0,6650	0,00062	-0,17718	-3,204775
14	0,6444	0,00062	-0,19084	-3,210449
15	0,6310	0,00060	-0,19997	-3,222171
16	0,5722	0,00060	-0,24245	-3,222554
17	0,5324	0,00055	-0,27376	-3,261573
18	0,5288	0,00054	-0,27671	-3,265198
19	0,4590	0,00053	-0,33819	-3,277194
20	0,4372	0,00051	-0,35932	-3,290028
21	0,4316	0,00051	-0,36492	-3,291255
22	0,3328	0,00045	-0,47782	-3,344353
23	0,3084	0,00045	-0,51089	-3,351549
24	0,2096	0,00037	-0,67861	-3,433308
25	0,1738	0,00031	-0,75995	-3,502099

Fuente: Esta investigación.

Grafica 1. Log(Q) Vs Log( $\Delta h$ ).



Fuente: Esta investigación.

Por medio de la regresión se obtuvo

$$y = 0,6346x - 3,0502$$

De la cual

$$m = 0,6346 \quad y \quad k = \log^{-1}(-3,0502) = 0,0008908$$

Reemplazando en la ecuación general de caudal real se tuvo:

$$Q_{real} = k(\Delta h)^n \quad Q_{real} = 0,0008908(\Delta h)^{0,6346}$$

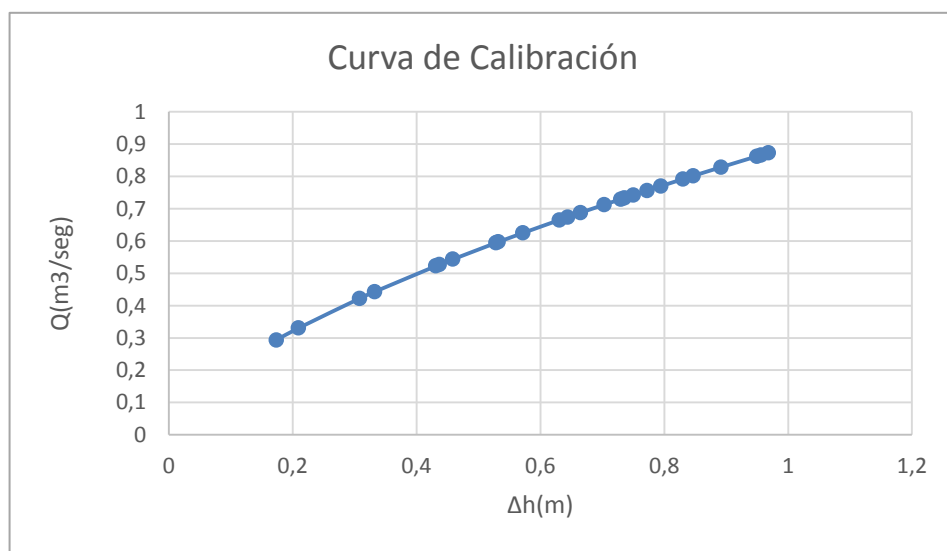
Con la ecuación general de calibración obtenida, se calcularon los caudales generados por dicha ecuación, y se hizo una comparación con los caudales obtenidos en el laboratorio.

Cuadro 3. Calculo de caudales generados con la ecuación de calibración.

Ensayo	Q (m3/seg)	$\Delta h$ (m)	Q ecuación (m3/seg)
1	0,00102	0,9686	0,000873
2	0,00100	0,9566	0,000866
3	0,00096	0,9498	0,000862
4	0,00092	0,8920	0,000828
5	0,00084	0,8472	0,000802
6	0,00081	0,8306	0,000792
7	0,00100	0,7948	0,000770
8	0,00070	0,7724	0,000756
9	0,00066	0,7504	0,000742
10	0,00066	0,7358	0,000733
11	0,00066	0,7300	0,000730
12	0,00064	0,7034	0,000713
13	0,00062	0,6650	0,000688
14	0,00062	0,6444	0,000674
15	0,00060	0,6310	0,000665
16	0,00060	0,5722	0,000625
17	0,00055	0,5324	0,000597
18	0,00054	0,5288	0,000595
19	0,00053	0,4590	0,000543
20	0,00051	0,4372	0,000527
21	0,00051	0,4316	0,000523
22	0,00045	0,3328	0,000443
23	0,00045	0,3084	0,000422
24	0,00037	0,2096	0,000330
25	0,00031	0,1738	0,000293

Fuente: Esta investigación.

Grafica 2. Curva de calibración Q ecuación Vs  $\Delta h$ .



Fuente: Esta investigación.

Para calcular el coeficiente de descarga  $C_d$  fue necesario igualar la ecuación obtenida a partir de la calibración y la fórmula general de caudal real, así mismo se calculó el caudal teórico para posteriormente realizar la corrección utilizando el  $C_d$ , despejando el  $C_d$  se obtuvo<sup>14</sup>:

$$C_d = \frac{Q_{real}}{Q_{teorico}} \quad (40)$$

$$C_d = \frac{0,0008908(\Delta h)^{0,6346}}{\sqrt{2g\Delta h}}$$

Cuadro 4. Calculo del coeficiente de descarga.

Ensayo	$\Delta h$ (m)	Q (m3/seg)	$C_d$	Q teórico (m3/seg)	Q teórico corregido (m3/seg)	Q teórico (L/seg)	Q teórico corregido (L/seg)
1	0,9686	0,00102	1,133740	0,000781	0,0008850	0,78058	0,88498
2	0,9566	0,00100	1,131839	0,000776	0,0008780	0,77573	0,87801
3	0,9498	0,00096	1,130753	0,000773	0,0008740	0,77297	0,87404
4	0,8920	0,00092	1,121238	0,000749	0,0008399	0,74908	0,83990
5	0,8472	0,00084	1,113488	0,000730	0,0008129	0,73003	0,81288
6	0,8306	0,00081	1,110526	0,000723	0,0008027	0,72284	0,80274
7	0,7948	0,00100	1,103960	0,000707	0,0007806	0,70709	0,78060
8	0,7724	0,00070	1,099720	0,000697	0,0007666	0,69706	0,76657
9	0,7504	0,00066	1,095451	0,000687	0,0007526	0,68706	0,75264
10	0,7358	0,00066	1,092558	0,000680	0,0007433	0,68034	0,74331
11	0,7300	0,00066	1,091395	0,000678	0,0007396	0,67766	0,73959
12	0,7034	0,00064	1,085955	0,000665	0,0007224	0,66520	0,72237
13	0,6650	0,00062	1,077781	0,000647	0,0006971	0,64678	0,69709
14	0,6444	0,00062	1,073225	0,000637	0,0006833	0,63669	0,68331
15	0,6310	0,00060	1,070194	0,000630	0,0006743	0,63003	0,67426
16	0,5722	0,00060	1,056196	0,000600	0,0006337	0,59996	0,63367
17	0,5324	0,00055	1,045996	0,000579	0,0006053	0,57872	0,60534
18	0,5288	0,00054	1,045042	0,000577	0,0006027	0,57676	0,60274
19	0,4590	0,00053	1,025318	0,000537	0,0005510	0,53735	0,55095
20	0,4372	0,00051	1,018624	0,000524	0,0005342	0,52443	0,53420
21	0,4316	0,00051	1,016858	0,000521	0,0005298	0,52106	0,52985

<sup>14</sup> FRISH, S. Curso de física general. Tomo 3. Editorial Alonso, M. 1979 Física Mecánica y termodinámica. Mr Mosio Addison- Wesley Iberoamérica. Estados Unidos, 1977.

22	0,3328	0,00045	0,981894	0,000458	0,0004493	0,45755	0,44927
23	0,3084	0,00045	0,971882	0,000440	0,0004281	0,44046	0,42807
24	0,2096	0,00037	0,922652	0,000363	0,0003350	0,36311	0,33503
25	0,1738	0,00031	0,899682	0,000331	0,0002975	0,33065	0,29748

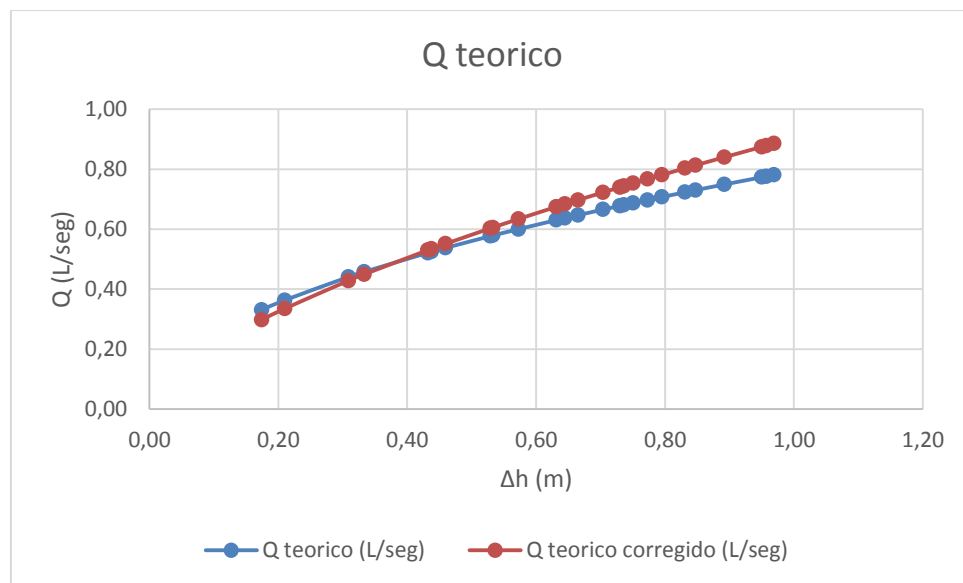
Fuente: Esta investigación.

El caudal teórico calculado a partir de la Ecuación de Bernoulli (Q Teórico) no es igual al caudal real obtenido en forma práctica (Q Real), ya que no considera las pérdidas de energía existentes en el sistema de Tubo de Venturi utilizado. Para poder obtener el caudal real se debió multiplicar al caudal teórico por lo el coeficiente de descarga (Cd).

Por lo tanto, con el coeficiente de descarga (Cd) pudimos ver la cantidad de energía que se pierde o se gana en el tubo de Venturi.

Analizando los datos se descubrió que en los datos del 22 al 25 hubo una pérdida de energía, del dato 23 al 8 tenemos una perdida aproximada a 1, lo que nos mostró que las pérdidas en estos datos fueron insignificantes, y el resto del 7 al 1 hubo una ganancia de energía, lo que mostro que hay un problema para los datos que superan las alturas de  $0.7724 \text{ m}^{15}$ .

Grafica 3. Comparación Caudal teórico Vs Caudal teórico corregido.



Fuente: Esta investigación.

<sup>15</sup> Disponible en: [http://C:/Users/USUARIO/Downloads/171-390-2-PB%20\(1\).pdf](http://C:/Users/USUARIO/Downloads/171-390-2-PB%20(1).pdf). [citado el 15 de marzo de 2018].

Finalmente se calcularon los porcentajes de error.

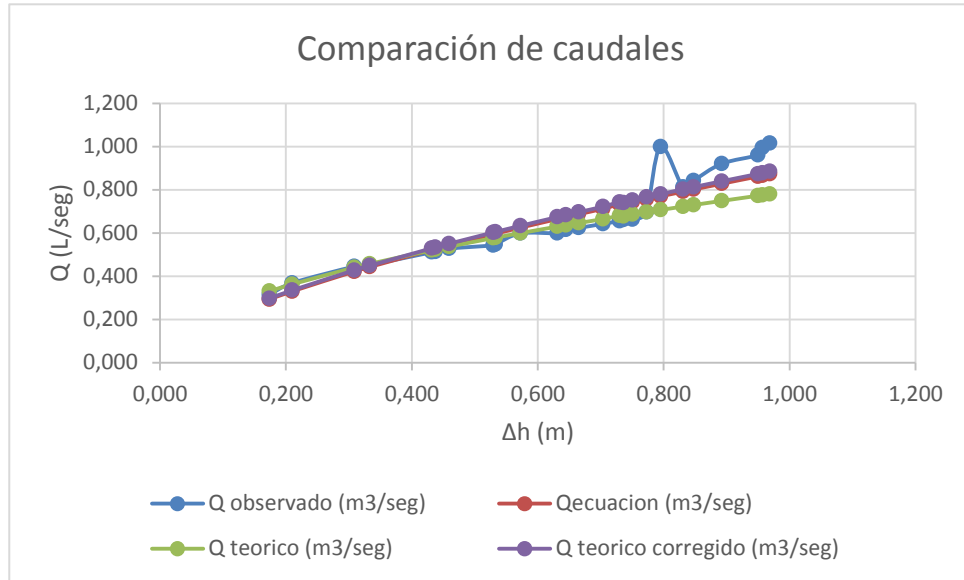
Cuadro 5. Calculo de porcentaje de error obtenido y ajustado.

ENSAYO	1	2	3	4	5	6	7
	$\Delta h$ (m)	Q (m <sup>3</sup> /seg)	Q ecuación (m <sup>3</sup> /seg)	Q teórico	Q teórico corregido	%error obtenido	%error ajustado
1	0,96860	0,001015	0,000873	0,0007806	0,000885	23,098	1,379
2	0,95660	0,000995	0,000866	0,0007757	0,000878	22,048	1,379
3	0,94980	0,000961	0,000862	0,0007730	0,000874	19,595	1,379
4	0,89200	0,000921	0,000828	0,0007491	0,000840	18,674	1,379
5	0,84720	0,000842	0,000802	0,0007300	0,000813	13,349	1,379
6	0,83060	0,000812	0,000792	0,0007228	0,000803	11,009	1,379
7	0,79480	0,001000	0,000770	0,0007071	0,000781	29,291	1,379
8	0,77240	0,000697	0,000756	0,0006971	0,000767	0,009	1,379
9	0,75040	0,000662	0,000742	0,0006871	0,000753	3,713	1,379
10	0,73580	0,000662	0,000730	0,0006777	0,000740	2,372	1,379
11	0,73000	0,000656	0,000733	0,0006803	0,000743	3,708	1,379
12	0,70340	0,000643	0,000713	0,0006652	0,000722	3,468	1,379
13	0,66500	0,000624	0,000688	0,0006468	0,000697	3,642	1,379
14	0,64440	0,000616	0,000674	0,0006367	0,000683	3,365	1,379
15	0,63100	0,000600	0,000665	0,0006300	0,000674	5,083	1,379
16	0,57220	0,000599	0,000625	0,0006000	0,000634	0,156	1,379
17	0,53240	0,000548	0,000597	0,0005787	0,000605	5,692	1,379
18	0,52880	0,000543	0,000595	0,0005768	0,000603	6,216	1,379
19	0,45900	0,000528	0,000543	0,0005373	0,000551	1,730	1,379
20	0,43720	0,000513	0,000527	0,0005244	0,000534	2,262	1,379
21	0,43160	0,000511	0,000523	0,0005211	0,000530	1,893	1,379
22	0,33280	0,000453	0,000443	0,0004576	0,000449	1,110	1,379
23	0,30840	0,000445	0,000422	0,0004405	0,000428	1,041	1,379
24	0,20960	0,000369	0,000330	0,0003631	0,000335	1,519	1,379
25	0,17380	0,000315	0,000293	0,0003307	0,000297	5,068	1,379

Fuente: Esta investigación.

El porcentaje de error calculado a partir del caudal real y caudal teórico corregido se muestra en la columna 6, mostrando mayores porcentajes de error en los caudales máximos.

Grafica 4. Comparación de caudales.



Fuente: Esta investigación.

Una vez terminado el proceso de calibración y determinación del caudal se procedió a formular el respectivo protocolo de funcionamiento para el laboratorio, el documento se presenta como Anexo digital el CD, así mismo se encuentra una copia impresa en el Laboratorio de Hidráulica y Saneamiento Básico de la Universidad de Nariño.

### 3.2 ANALISIS DE VELOCIDAD

El tubo de Venturi en estudio tiene seis puntos de medición, a continuación, se muestran los valores de velocidad de referencia estandarizada que se derivaron de la geometría del tubo<sup>16</sup>.

$$\hat{W} = \frac{A_1}{A_i} \quad (41)$$

<sup>16</sup> Gunt hamburg Geratebau GmbH Fahrenberg 14 Barsbittel – Alemania equipo para la enseñanza técnica.

Cuadro 6. Calculo de velocidad de referencia estandarizada.

Punto de medición i	Diámetro en i Di (m)	A (m <sup>2</sup> .10 <sup>-4</sup> )	Ŵ
1	0,0370	0,00108	1,00
2	0,0259	0,00053	2,04
3	0,0150	0,00018	6,08
4	0,0213	0,00036	3,02
5	0,0293	0,00067	1,59
6	0,0370	0,00108	1,00

Fuente: Esta investigación.

Con los valores calculados de velocidad de referencia se pudieron calcular las velocidades teóricas en los seis puntos de medición del tubo a partir de un valor inicial.

Si el caudal es constante, se obtuvo un valor inicial para calcular la velocidad real.

$$V_{real} = \frac{Q}{A_1}$$

Cuadro 7. Calculo de velocidad real.

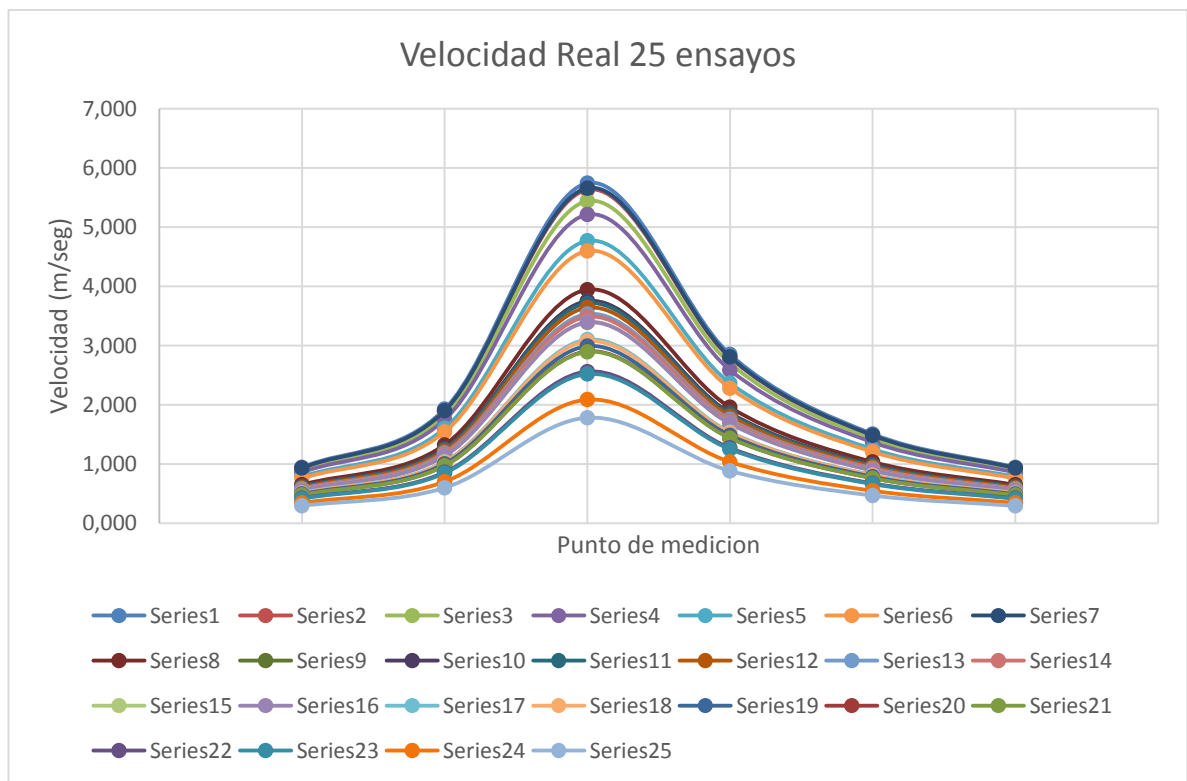
ENSAYO	Q (m <sup>3</sup> /seg)	V1	V2	V3	V4	V5	V6
1	0,0010150	0,9440	1,9266	5,7440	2,8486	1,5054	0,9440
2	0,0009951	0,9255	1,8888	5,6313	2,7928	1,4759	0,9255
3	0,0009614	0,8941	1,8247	5,4401	2,6979	1,4258	0,8941
4	0,0009211	0,8567	1,7483	5,2123	2,5849	1,3661	0,8567
5	0,0008425	0,7836	1,5991	4,7675	2,3644	1,2495	0,7836
6	0,0008123	0,7554	1,5417	4,5965	2,2796	1,2047	0,7554
7	0,0010000	0,9301	1,8981	5,6588	2,8064	1,4831	0,9301
8	0,0006970	0,6482	1,3229	3,9442	1,9561	1,0337	0,6482
9	0,0006625	0,6161	1,2574	3,7488	1,8591	0,9825	0,6161
10	0,0006620	0,6157	1,2564	3,7459	1,8577	0,9818	0,6157
11	0,0006560	0,6101	1,2452	3,7123	1,8411	0,9730	0,6101
12	0,0006429	0,5979	1,2203	3,6381	1,8042	0,9535	0,5979
13	0,0006241	0,5804	1,1845	3,5314	1,7514	0,9256	0,5804
14	0,0006160	0,5729	1,1691	3,4856	1,7286	0,9135	0,5729
15	0,0005996	0,5576	1,1380	3,3928	1,6826	0,8892	0,5576
16	0,0005990	0,5571	1,1370	3,3898	1,6811	0,8884	0,5571



17	0,0005476	0,5093	1,0393	3,0985	1,5367	0,8121	0,5093
18	0,0005430	0,5050	1,0307	3,0728	1,5239	0,8053	0,5050
19	0,0005282	0,4913	1,0026	2,9891	1,4824	0,7834	0,4913
20	0,0005128	0,4770	0,9734	2,9020	1,4392	0,7606	0,4770
21	0,0005114	0,4756	0,9706	2,8938	1,4351	0,7584	0,4756
22	0,0004525	0,4209	0,8589	2,5608	1,2700	0,6712	0,4209
23	0,0004451	0,4140	0,8448	2,5187	1,2491	0,6601	0,4140
24	0,0003687	0,3429	0,6998	2,0865	1,0348	0,5468	0,3429
25	0,0003147	0,2927	0,5973	1,7809	0,8832	0,4667	0,2927

Fuente: Esta investigación.

Grafica 5. Representación de la velocidad real de 25 ensayos en tubo de Venturi.



Fuente: Esta investigación.

Como se pudo observar en el gráfico, la velocidad se hace mayor en la garganta del tubo debido al ensanchamiento del diámetro, si se desean obtener mayores velocidades se puede aumentar el caudal o reducir el diámetro.

Luego se realizó un análisis de la velocidad teórica calculada a partir de la diferencia de alturas entre un punto de mayor diámetro a uno de menor, para este

caso se tomaron respecto al punto tres ubicado en la garganta del tubo, los resultados se muestran en la siguiente tabla:

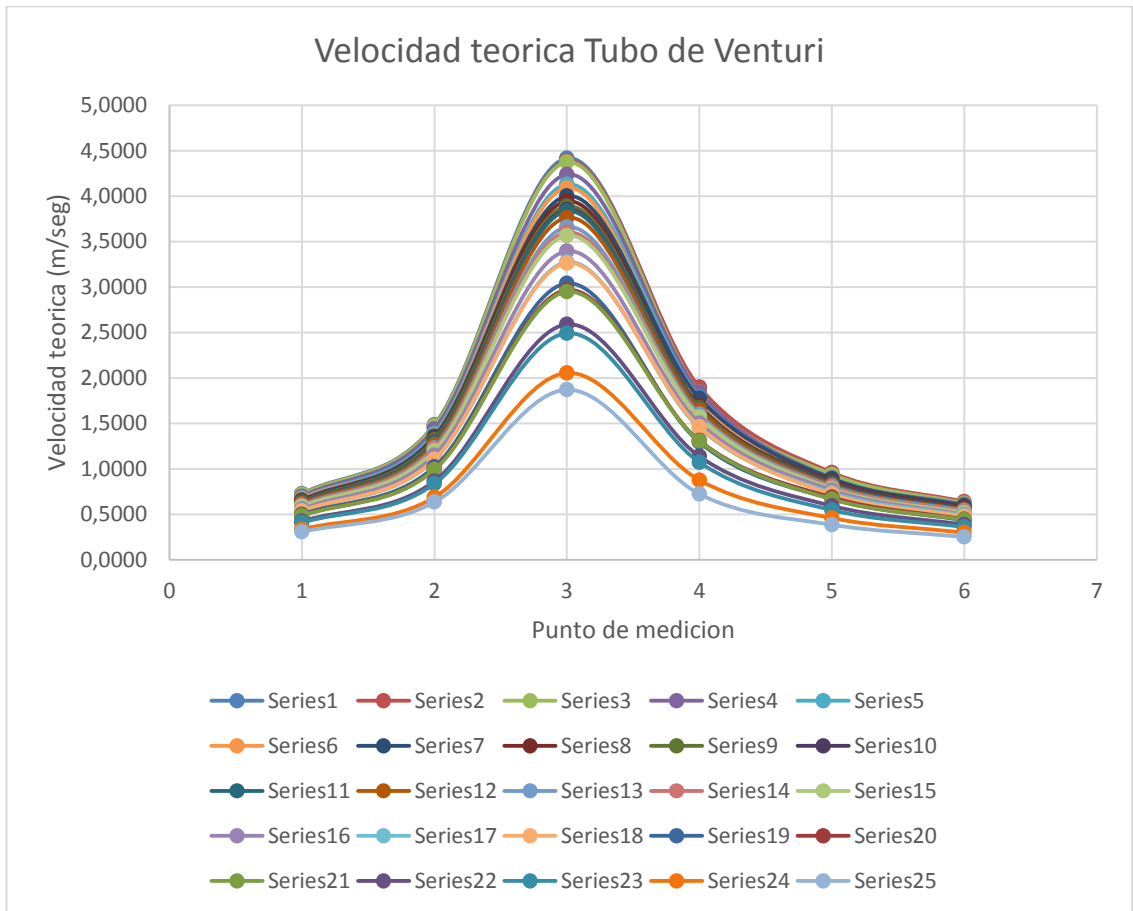
$$V_1 = A_2 \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho(A_1^2 - A_2^2)}}$$

Cuadro 8. Calculo de velocidad teórica entre punto de mayor diámetro y el punto 3 (Garganta).

ENSAYO	1	2	3	4	5	6
1	0,7254	1,4838	4,4139	1,8830	0,9410	0,6110
2	0,7209	1,4732	4,3864	1,8972	0,9597	0,6378
3	0,7184	1,4724	4,3708	1,8432	0,9377	0,6222
4	0,6962	1,4360	4,2357	1,8405	0,8980	0,6072
5	0,6785	1,3873	4,1280	1,7863	0,8952	0,5941
6	0,6718	1,3627	4,0874	1,7267	0,8722	0,5815
7	0,6571	1,3566	3,9983	1,7751	0,8934	0,5939
8	0,6478	1,3305	3,9416	1,6917	0,8675	0,5742
9	0,6385	1,3177	3,8850	1,6703	0,8490	0,5614
10	0,6323	1,2938	3,8470	1,6500	0,8459	0,5583
11	0,6298	1,2876	3,8318	1,6583	0,8347	0,5514
12	0,6182	1,2647	3,7614	1,6440	0,8225	0,5470
13	0,6011	1,2313	3,6573	1,5994	0,8072	0,5383
14	0,5917	1,2131	3,6002	1,5652	0,7957	0,5260
15	0,5855	1,1996	3,5625	1,5691	0,7829	0,5157
16	0,5576	1,1487	3,3925	1,5018	0,7647	0,4956
17	0,5378	1,0997	3,2724	1,4499	0,7382	0,4853
18	0,5360	1,1028	3,2613	1,4619	0,7214	0,4762
19	0,4994	1,0211	3,0385	1,2918	0,6691	0,4337
20	0,4874	0,9949	2,9654	1,3096	0,6860	0,4451
21	0,4842	0,9903	2,9464	1,3043	0,6664	0,4405
22	0,4252	0,8649	2,5872	1,1364	0,5929	0,3867
23	0,4093	0,8351	2,4906	1,0716	0,5468	0,3603
24	0,3375	0,6874	2,0532	0,8759	0,4589	0,2992
25	0,3073	0,6339	1,8697	0,7232	0,3856	0,2515

Fuente: Esta investigación.

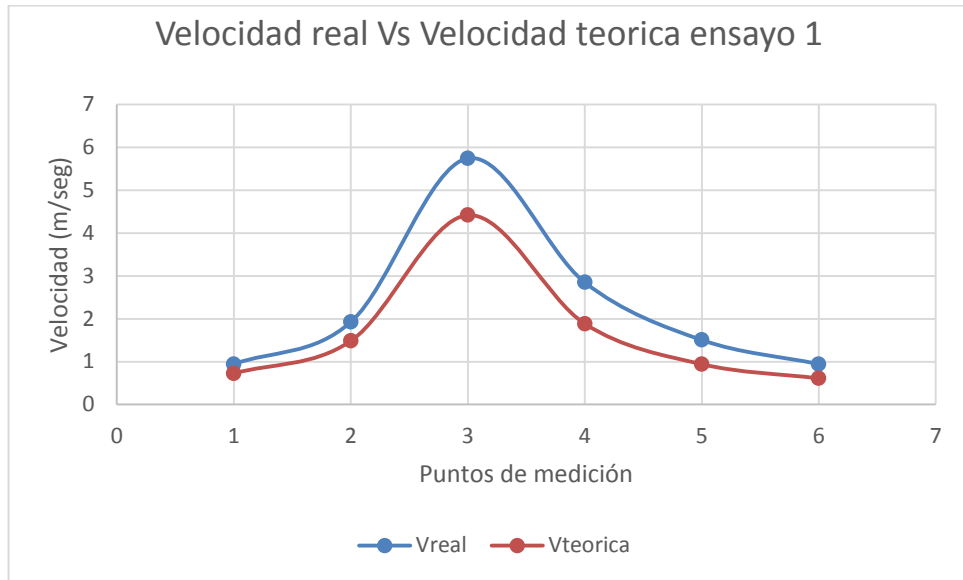
Grafica 6. Representación de la Velocidad teórica entre puntos de medición tubo de Venturi.



Fuente: Esta investigación.

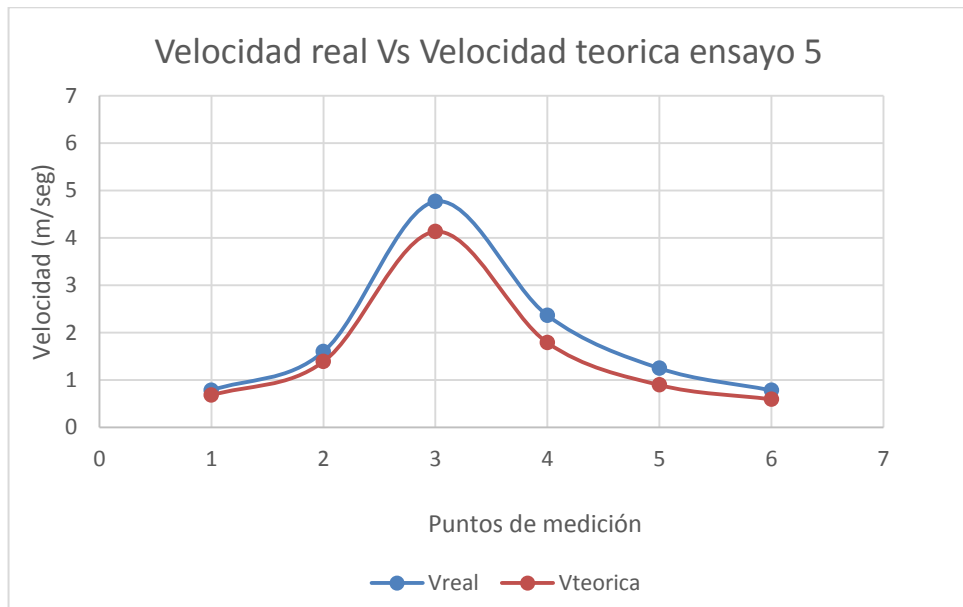
Posteriormente se realizó un análisis grafico de la velocidad real y la velocidad teórica para 6 puntos de medición.

Grafica 7. Velocidad real Vs Velocidad teórica ensayo 1.



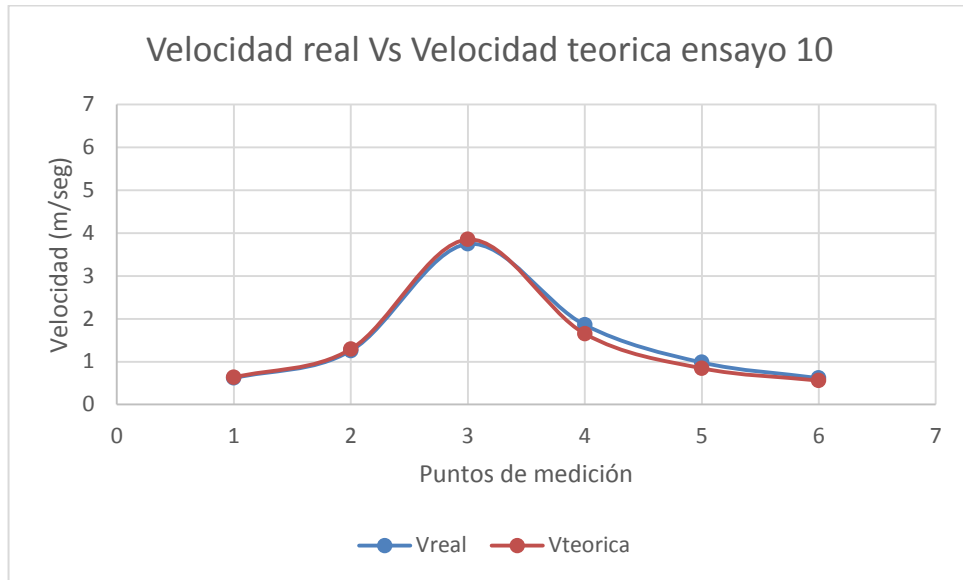
Fuente: Esta investigación.

Grafica 8. Velocidad real Vs Velocidad teórica ensayo 5.



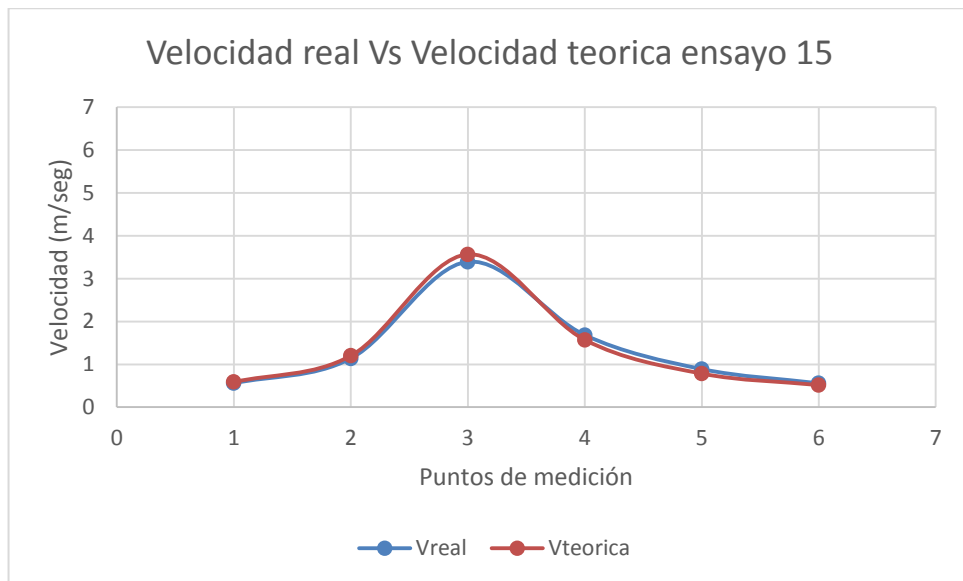
Fuente: Esta investigación.

Grafica 9. Velocidad real Vs Velocidad teórica ensayo 10.



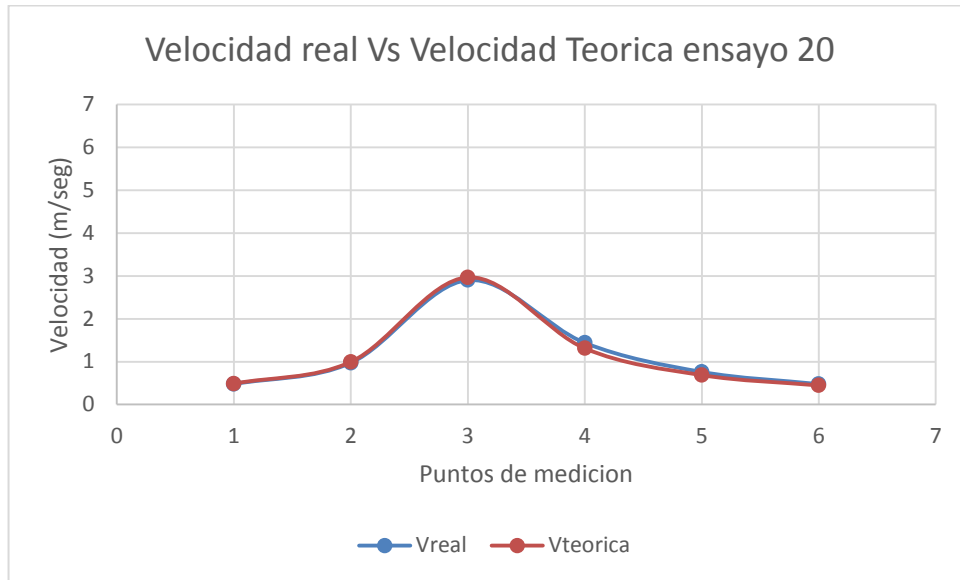
Fuente: Esta investigación.

Grafica 10. Velocidad real Vs Velocidad teórica ensayo 15.



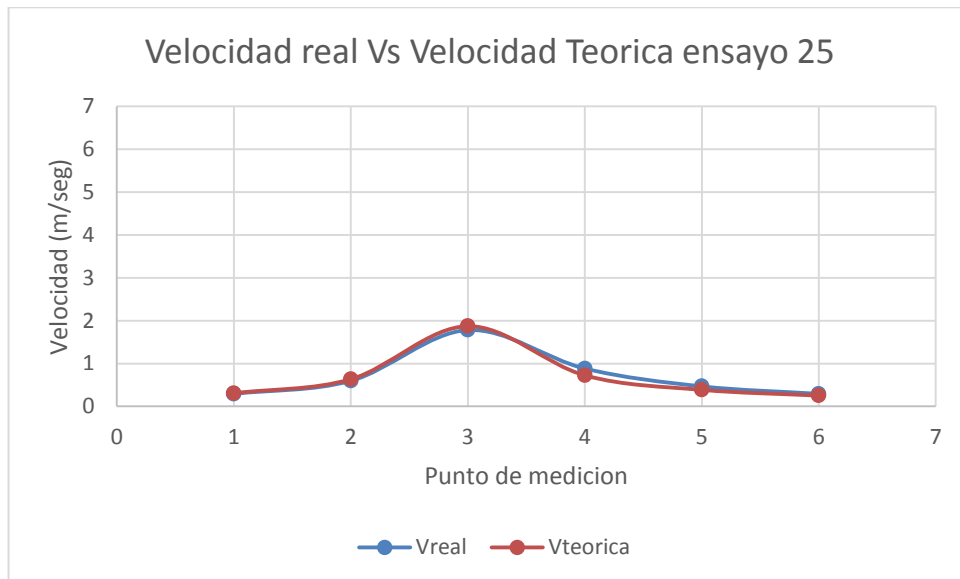
Fuente: Esta investigación.

Grafica 11. Velocidad real Vs Velocidad teórica ensayo 20.



Fuente: Esta investigación.

Grafica 12. Velocidad real Vs Velocidad teórica ensayo 25.



Fuente: Esta investigación.

En las gráficas anteriormente mostradas se pudo evidenciar que la velocidad real presento variaciones respecto a la teórica al tener caudales aproximados al mayor aceptado por el equipo, esto se presentó por los errores cometidos en el proceso de medición.

Una vez terminado el proceso de análisis de velocidad se procedió a formular el respectivo protocolo de funcionamiento para el laboratorio, el documento se presenta como Anexo digital el CD, así mismo se encuentra una copia impresa en el Laboratorio de Hidráulica y Saneamiento Básico de la Universidad de Nariño.

### **3.3 ANALISIS DE PRESION**

En el tubo de Venturi se presentaron tres casos de presión, la presión estática, la presión dinámica y la presión total; a continuación se presenta un resumen de las alturas observadas en los piezómetros para veinticinco ensayos realizados.

El piezómetro siete (Pitot) determino la presión total del tubo de Venturi a la salida del mismo.

Cuadro 9. Resumen alturas piezómetros tubo de Venturi.

ENSAYO	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4	Punto 5	Punto 6	Punto 7
	H1 (m)	H2 (m)	H3 (m)	H4 (m)	H5 (m)	H6 (m)	PITOT (m)
1	0,9686	0,9030	0,0000	0,5694	0,6408	0,6872	0,7830
2	0,9566	0,8902	0,0000	0,5780	0,6666	0,7488	0,7784
3	0,9498	0,8892	0,0000	0,5456	0,6364	0,7126	0,7540
4	0,8920	0,8920	0,8920	0,8920	0,8920	0,8920	0,8920
5	0,8472	0,7894	0,0000	0,5124	0,5800	0,6496	0,6800
6	0,8306	0,7616	0,0000	0,4788	0,5506	0,6224	0,6522
7	0,7948	0,7548	0,0000	0,5060	0,5776	0,6492	0,6678
8	0,7724	0,7260	0,0000	0,4596	0,5446	0,6068	0,6262
9	0,7504	0,7122	0,0000	0,4480	0,5216	0,5800	0,6074
10	0,7358	0,6866	0,0000	0,4372	0,5178	0,5736	0,5998
11	0,7300	0,6800	0,0000	0,4416	0,5042	0,5596	0,5948
12	0,7034	0,6560	0,0000	0,4340	0,4896	0,5508	0,5592
13	0,6650	0,6218	0,0000	0,4108	0,4716	0,5334	0,5326
14	0,6444	0,6036	0,0000	0,3934	0,4582	0,5092	0,5260
15	0,6310	0,5902	0,0000	0,3954	0,4436	0,4894	0,5032
16	0,5722	0,5412	0,0000	0,3622	0,4232	0,4520	0,4698
17	0,5324	0,4960	0,0000	0,3376	0,3944	0,4334	0,4492
18	0,5288	0,4988	0,0000	0,3432	0,3766	0,4174	0,4224
19	0,4590	0,4276	0,0000	0,2680	0,3240	0,3462	0,3676
20	0,4372	0,4060	0,0000	0,2754	0,3406	0,3646	0,3638
21	0,4316	0,4022	0,0000	0,2732	0,3214	0,3572	0,3646
22	0,3328	0,3068	0,0000	0,2074	0,2544	0,2752	0,2816
23	0,3928	0,3704	0,0844	0,2688	0,3008	0,3234	0,3340
24	0,3380	0,3222	0,1284	0,2516	0,2808	0,2932	0,2948
25	0,2922	0,2832	0,1184	0,2024	0,2260	0,2348	0,2248

Fuente: Esta investigación.

Teniendo en cuenta estos datos se determinó la presión estática en cada punto de medición y para cada uno de los ensayos realizados, a continuación se muestran dichos resultados:

Aplicando la ecuación:

$$h_{est} = \frac{P}{\gamma}$$



Cuadro 10. Cálculo de presión estática.

ENSAYO	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4	Punto 5	Punto 6	Punto 7
	Hest1 (m)	Hest2 (m)	Hest3 (m)	Hest4 (m)	Hest5 (m)	Hest6 (m)	PITOT (m)
1	0,098837	0,092143	0,000000	0,058102	0,065388	0,070122	0,079898
2	0,097612	0,090837	0,000000	0,058980	0,068020	0,076408	0,079429
3	0,096918	0,090735	0,000000	0,055673	0,064939	0,072714	0,076939
4	0,091020	0,091020	0,091020	0,091020	0,091020	0,091020	0,091020
5	0,086449	0,080551	0,000000	0,052286	0,059184	0,066286	0,069388
6	0,084755	0,077714	0,000000	0,048857	0,056184	0,063510	0,066551
7	0,081102	0,077020	0,000000	0,051633	0,058939	0,066245	0,068143
8	0,078816	0,074082	0,000000	0,046898	0,055571	0,061918	0,063898
9	0,076571	0,072673	0,000000	0,045714	0,053224	0,059184	0,061980
10	0,075082	0,070061	0,000000	0,044612	0,052837	0,058531	0,061204
11	0,074490	0,069388	0,000000	0,045061	0,051449	0,057102	0,060694
12	0,071776	0,066939	0,000000	0,044286	0,049959	0,056204	0,057061
13	0,067857	0,063449	0,000000	0,041918	0,048122	0,054429	0,054347
14	0,065755	0,061592	0,000000	0,040143	0,046755	0,051959	0,053673
15	0,064388	0,060224	0,000000	0,040347	0,045265	0,049939	0,051347
16	0,058388	0,055224	0,000000	0,036959	0,043184	0,046122	0,047939
17	0,054327	0,050612	0,000000	0,034449	0,040245	0,044224	0,045837
18	0,053959	0,050898	0,000000	0,035020	0,038429	0,042592	0,043102
19	0,046837	0,043633	0,000000	0,027347	0,033061	0,035327	0,037510
20	0,044612	0,041429	0,000000	0,028102	0,034755	0,037204	0,037122
21	0,044041	0,041041	0,000000	0,027878	0,032796	0,036449	0,037204
22	0,033959	0,031306	0,000000	0,021163	0,025959	0,028082	0,028735
23	0,040082	0,037796	0,008612	0,027429	0,030694	0,033000	0,034082
24	0,034490	0,032878	0,013102	0,025673	0,028653	0,029918	0,030082
25	0,029816	0,028898	0,012082	0,020653	0,023061	0,023959	0,022939

Fuente: Esta investigación.

Ahora y teniendo en cuenta los cálculos realizados para la velocidad real se calculó la presión dinámica en los puntos de medición, en la tabla 11 se muestran dichos resultados y utilizando la siguiente ecuación:

$$h_{din} = \frac{V^2}{2g}$$

Cuadro 11. Calculo de presión dinámica.

ENSAYO	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4	Punto 5	Punto 6	PITOT
	Hdin1 (m)	Hdin2 (m)	Hdin3 (m)	Hdin4 (m)	Hdin5 (m)	Hdin6 (m)	Hdin7 (m)
1	0,045424	0,189186	1,681604	0,413590	0,115510	0,045424	0,186481
2	0,043660	0,181840	1,616309	0,397531	0,111025	0,043660	0,179240
3	0,040745	0,169702	1,508416	0,370995	0,103613	0,040745	0,167276
4	0,037404	0,155784	1,384706	0,340568	0,095116	0,037404	0,153557
5	0,031293	0,130334	1,158486	0,284930	0,079577	0,031293	0,128470
6	0,029088	0,121149	1,076847	0,264851	0,073969	0,029088	0,119417
7	0,044087	0,183621	1,632138	0,401424	0,112112	0,044087	0,094615
8	0,021418	0,089204	0,792898	0,195013	0,054464	0,021418	0,087928
9	0,019348	0,080583	0,716272	0,176167	0,049201	0,019348	0,079431
10	0,019318	0,080460	0,715176	0,175897	0,049126	0,019318	0,079309
11	0,018974	0,079024	0,702411	0,172758	0,048249	0,018974	0,077894
12	0,018222	0,075894	0,674596	0,165917	0,046338	0,018222	0,074809
13	0,017170	0,071511	0,635634	0,156334	0,043662	0,017170	0,070488
14	0,016727	0,069667	0,619239	0,152302	0,042536	0,016727	0,068670
15	0,015848	0,066006	0,586700	0,144299	0,040300	0,015848	0,065062
16	0,015820	0,065889	0,585664	0,144044	0,040229	0,015820	0,064947
17	0,013218	0,055052	0,489339	0,120353	0,033613	0,013218	0,054265
18	0,012999	0,054141	0,481239	0,118361	0,033056	0,012999	0,053367
19	0,012301	0,051231	0,455374	0,111999	0,031280	0,012301	0,050499
20	0,011595	0,048291	0,429240	0,105572	0,029485	0,011595	0,047601
21	0,011529	0,048019	0,426821	0,104977	0,029318	0,011529	0,047332
22	0,009028	0,037603	0,334235	0,082205	0,022959	0,009028	0,037065
23	0,008734	0,036377	0,323339	0,079525	0,022210	0,008734	0,035857
24	0,005994	0,024964	0,221891	0,054574	0,015242	0,005994	0,024607
25	0,004366	0,018185	0,161644	0,039756	0,011103	0,004366	0,017925

Fuente: Esta investigación.

La presión total en el tubo de Venturi fue la sumatoria de la presión estática y presión dinámica.

$$H_{tot} = h_{est} + h_{din}$$

Cuadro 12. Calculo de presión total.

ENSAYO	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4	Punto 5	Punto 6	PITOT
	Htot1 (m)	Htot2 (m)	Htot3 (m)	Htot4 (m)	Htot5 (m)	Htot6 (m)	Hdin7 (m)
1	0,144260	0,281329	1,681604	0,471692	0,180897	0,115546	0,266379
2	0,141272	0,272677	1,616309	0,456511	0,179045	0,120068	0,258669
3	0,137664	0,260437	1,508416	0,426668	0,168552	0,113460	0,244214
4	0,128424	0,246805	1,475726	0,431589	0,186136	0,128424	0,244577
5	0,117742	0,210885	1,158486	0,337215	0,138760	0,097579	0,197858
6	0,113843	0,198863	1,076847	0,313708	0,130153	0,092598	0,185968
7	0,125190	0,260642	1,632138	0,453057	0,171051	0,110332	0,162758
8	0,100234	0,163285	0,792898	0,241911	0,110036	0,083336	0,151826
9	0,095919	0,153257	0,716272	0,221881	0,102425	0,078532	0,141411
10	0,094400	0,150521	0,715176	0,220510	0,101962	0,077849	0,140513
11	0,093463	0,148411	0,702411	0,217819	0,099698	0,076076	0,138588
12	0,089998	0,142833	0,674596	0,210202	0,096297	0,074426	0,131870
13	0,085027	0,134960	0,635634	0,198252	0,091784	0,071598	0,124835
14	0,082482	0,131258	0,619239	0,192445	0,089291	0,068686	0,122344
15	0,080236	0,126230	0,586700	0,184646	0,085566	0,065787	0,116409
16	0,074208	0,121114	0,585664	0,181003	0,083413	0,061942	0,112886
17	0,067545	0,105665	0,489339	0,154802	0,073858	0,057443	0,100102
18	0,066958	0,105039	0,481239	0,153381	0,071485	0,055591	0,096469
19	0,059137	0,094864	0,455374	0,139346	0,064341	0,047627	0,088009
20	0,056207	0,089720	0,429240	0,133674	0,064240	0,048799	0,084723
21	0,055570	0,089060	0,426821	0,132854	0,062114	0,047978	0,084536
22	0,042988	0,068909	0,334235	0,103368	0,048918	0,037110	0,065800
23	0,048816	0,074173	0,331951	0,106954	0,052904	0,041734	0,069938
24	0,040484	0,057841	0,234993	0,080248	0,043895	0,035912	0,054688
25	0,034183	0,047083	0,173725	0,060409	0,034165	0,028326	0,040864

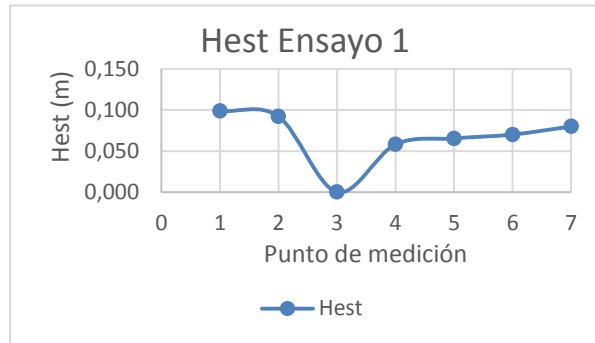
Fuente: Esta investigación.

Al analizar los datos de las distintas presiones se pudo observar que la presión estática cumplió con el principio de Bernoulli, ya que la mayoría de los valores en el punto 3, que es el punto de reducción en la garganta fueron cero en su mayoría y el dato menor en los demás puntos (ver cuadro 10).

En la presión dinámica se observó que a mayor velocidad mayor presión dinámica, y como el punto 3 que es la garganta del tubo Venturi, donde la velocidad es mayor se obtuvo que la presión dinámica en este punto es la mayor (ver cuadro 11).

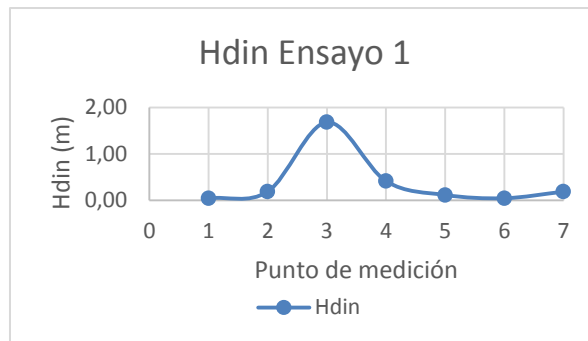
Finalmente se realizó un análisis gráfico del comportamiento de la presión en el tubo de Venturi de 6 ensayos.

Grafica 13. Comportamiento de la presión ensayo 1.



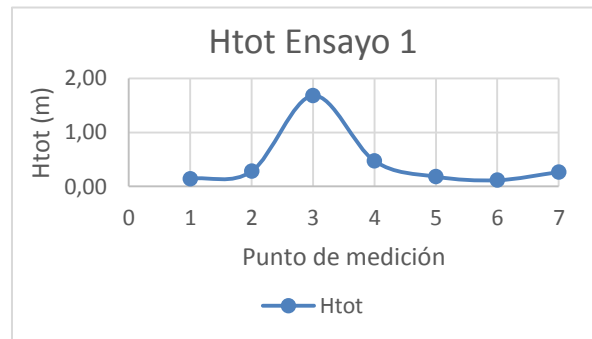
Fuente: Esta investigación.

Grafica 14. Representación de la presión estática ensayo 1.



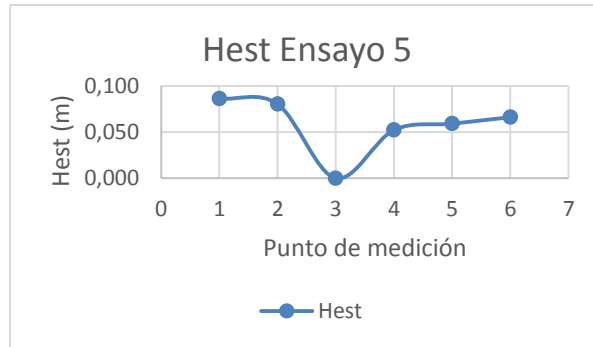
Fuente: Esta investigación.

Grafica 15. Representación de la presión dinámica ensayo 1.



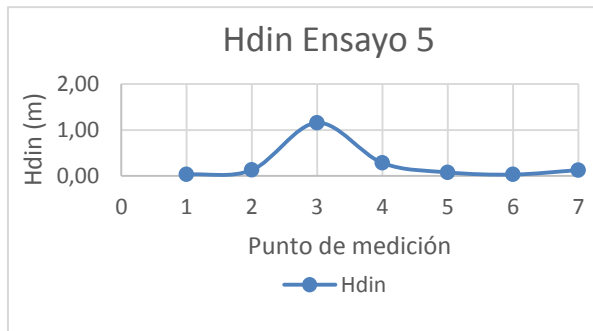
Fuente: Esta investigación.

Grafica 16. Comportamiento de la presión ensayo 5.



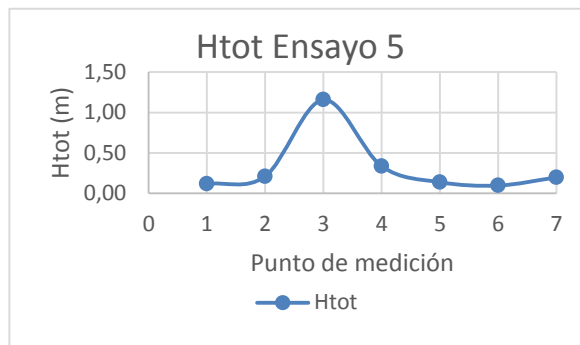
Fuente: Esta investigación.

Grafica 17. Representación de la presión estática ensayo 5.



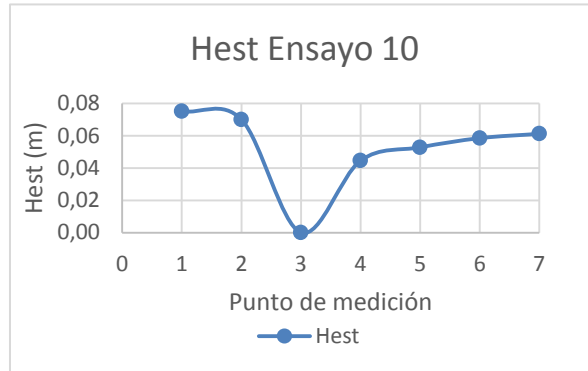
Fuente: Esta investigación.

Grafica 18. Representación de la presión dinámica ensayo 5.



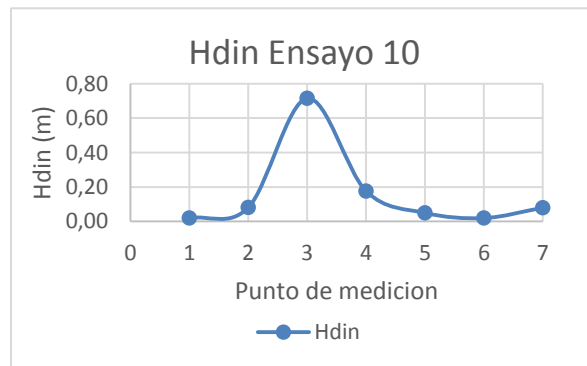
Fuente: Esta investigación.

Grafica 19. Comportamiento de la presión ensayo 10.



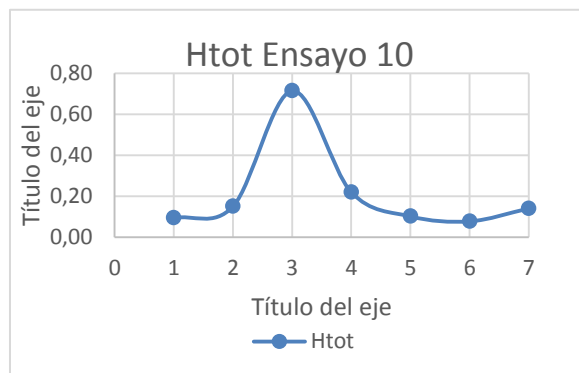
Fuente: Esta investigación.

Grafica 20. Representación de la presión estática ensayo 10.



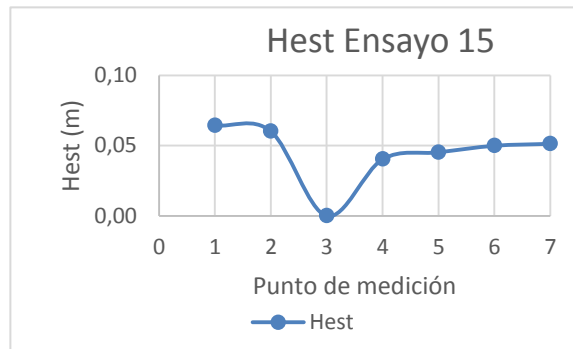
Fuente: Esta investigación.

Grafica 21. Representación de la presión dinámica ensayo 10.



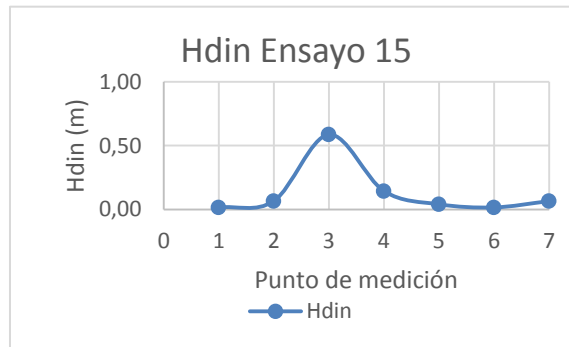
Fuente: Esta investigación.

Grafica 22. Comportamiento de la presión ensayo 15.



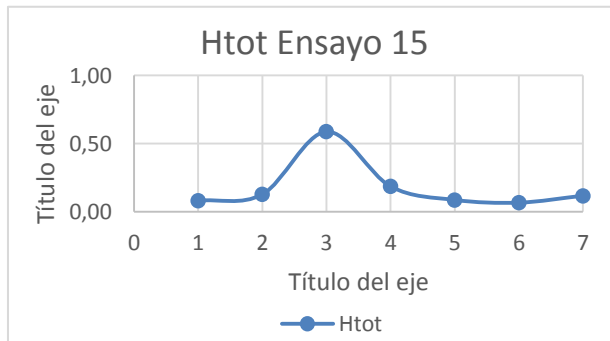
Fuente: Esta investigación.

Grafica 23. Representación de la presión estática ensayo 15.



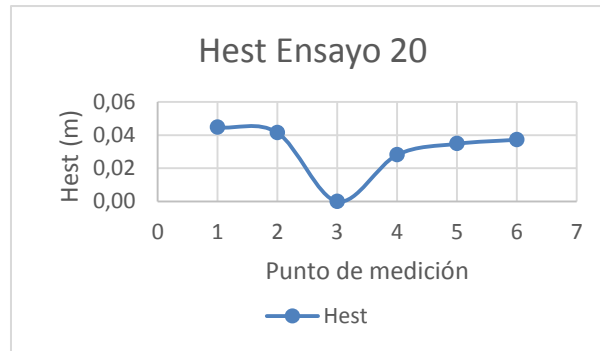
Fuente: Esta investigación.

Grafica 24. Representación de la presión dinámica ensayo 15.



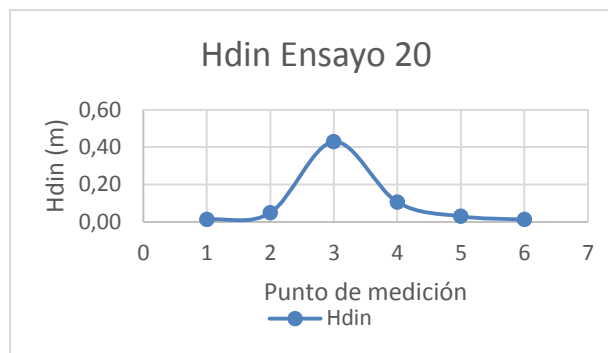
Fuente: Esta investigación.

Grafica 25. Comportamiento de la presión ensayo 20.



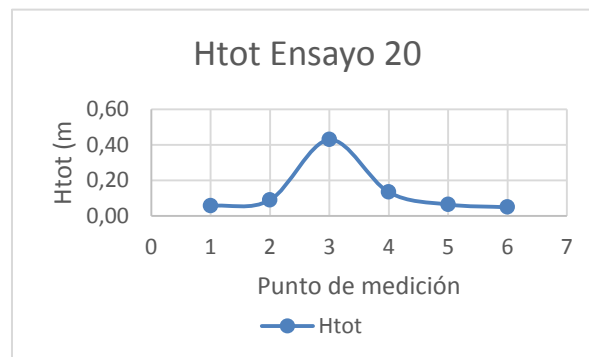
Fuente: Esta investigación.

Grafica 26. Representación de la presión estática ensayo 20.



Fuente: Esta investigación.

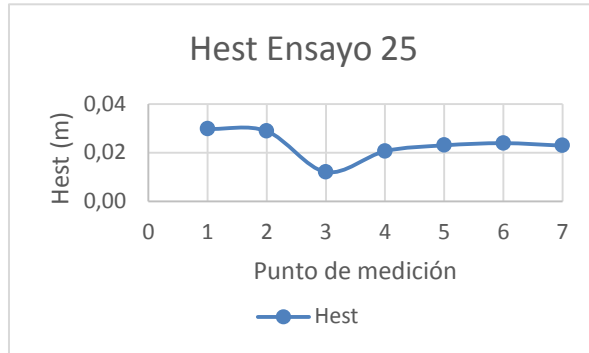
Grafica 27. Representación de la presión dinámica ensayo 20.



Fuente: Esta investigación.

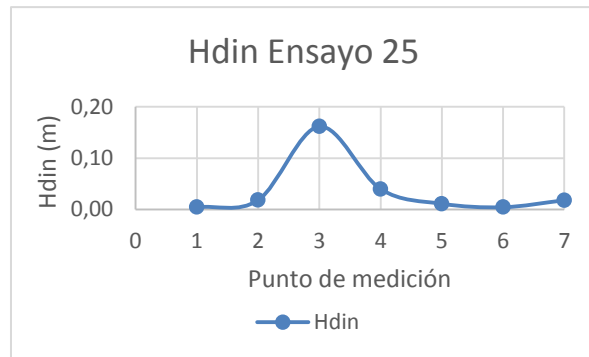


Grafica 28. Comportamiento de la presión ensayo 25.



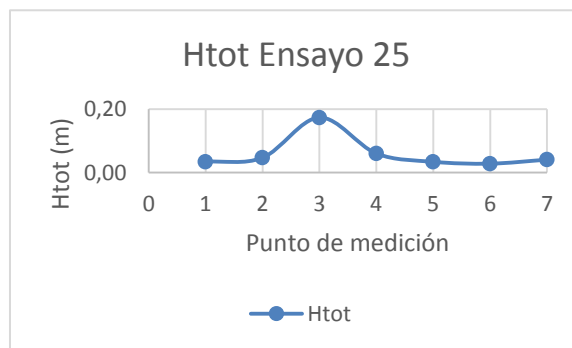
Fuente: Esta investigación.

Grafica 29. Representación de la presión estática ensayo 25.



Fuente: Esta investigación.

Grafica 30. Representación de la presión dinámica ensayo 25.



Fuente: Esta investigación.

Una vez terminado el proceso de análisis de presión se procedió a formular el respectivo protocolo de funcionamiento para el laboratorio, el documento se presenta como Anexo digital el CD, así mismo se encuentra una copia impresa en el Laboratorio de Hidráulica y Saneamiento Básico de la Universidad de Nariño.

#### 4. CONCLUSIONES

Se analizó las gráficas obtenidas a partir de los diferentes cálculos de presión y velocidad y se pudo comprobar el principio de Bernoulli, partiendo de la teoría que a un menor diámetro o sección más estrecha como lo es la garganta del tubo Venturi la velocidad es mayor y la presión disminuye, caso contrario se observó en los diámetros mayores donde se obtiene mayor presión y menor velocidad.

Se determinó como límite máximo de caudal valores iguales o menores a un (1) litro por segundo, a fin de obtener porcentajes de errores dentro de los rangos permitidos para los fluidos que no supere el 10%, a caudales mayores se determinaron errores elevados que difieren del real.

Según los resultados obtenidos se determinó que a un caudal de 0,697 litros por segundo el equipo presenta el mejor comportamiento entre datos reales y teóricos siendo este el valor recomendado para el estudio del principio de Bernoulli.

La dotación del equipo para la demostración del principio de Bernoulli fue de gran importancia para reforzar los estudios de la mecánica de fluidos, permitiendo a la Universidad la posibilidad de ampliar los conocimientos a sus estudiantes de manera práctica.

El proceso de calibración fue de gran importancia ya que a partir de la ecuación de calibración se logró obtener el coeficiente de descarga y realizar los ajustes al caudal y obtener datos reales y los errores cometidos a partir de variables propias del proceso de medición.

Los resultados obtenidos de los escenarios hidráulicos modelados han permitido comprender con mayor detalle el funcionamiento del Venturi y la determinación de modelos matemáticos de tipo regresivo sobre variabilidad de sus características de operación.

El porcentaje de error calculado mostro mayores resultados cuando el caudal se acerca al valor máximo soportado por el equipo, esto es debido a las equivocaciones cometidas en el procedimiento de ensayo donde la precisión en la medida del volumen por unidad de tiempo pierde precisión, así mismo se deben tener en cuenta las burbujas presentes tanto en los manómetros como en el tubo Venturi por un mal proceso de purgado y de disipación de energía.

El equipo para el estudio del principio de Bernoulli, necesita un tiempo considerable antes de realizar las respectivas lecturas, ya que el sistema en si le toma un tiempo determinado estabilizarse.

Otro factor importante que aumento los porcentajes de error, es el mal ajuste de las herramientas que se utilizan en la práctica de laboratorio, como por ejemplo la nivelación del soporte del equipo y la tubería que conforma el sistema.

## 5. RECOMENDACIONES

Se recomienda tener especial cuidado con la manipulación del tubo de Venturi, ya que al ser de un material tipo cristal puede ser roto, por lo anterior se debe tener en cuenta que un cambio brusco en el caudal puede generar daños en el tubo, así mismo la válvula de entrada al tubo debe permanecer abierta a fin de evitar posibles inconvenientes.

El equipo está diseñado para ser utilizado con agua, teniendo en cuenta que el proceso de limpieza al ser utilizado con otro tipo de fluido sería complicado.

Se recomienda la toma de volumen volumétrico utilizando elementos de medición lo más exactos posibles, a fin de reducir porcentajes de error altos.

Debido a los inconvenientes presentados en la realización de los ensayos iniciales al notar la presencia excesiva de burbujas debido a la succión de la bomba se recomienda utilizar un sistema de filtración con grava, ya que dichas burbujas afectan las mediciones en los piezómetros.

## BIBLIOGRAFIA

ÇENGEL, Y. A., CIMBALA, J. M., & SKNARINA, S. F. Mecánica de fluidos: fundamentos y aplicaciones (Vol. 1). McGraw-Hill. 2006.

DE LEÓN, G. P., & Oxmar, V. Fundamentos de la anemometría basada en tubos pitot para flujo incomprensible. 2002.

DELGADO Romero, V. A. Elaboración de un tubo de pitot artesanal para medir diferentes caudales de flujo que permitan validar las ecuaciones de aforo. 2017.

Española, R. R. A. Ortografía de la lengua española. Espasa. 2010.

FOX, R. W., McDonald, A. T., Cázares, G. N., & Callejas, R. L. Introducción a la Mecánica de Fluidos. McGraw-Hill. 1995.

FRISH, S. Curso de física general. Tomo 3. Editorial Alonso, M. 1979 Física Mecánica y termodinámica. Mr Mosio Addison- Wesley Iberoamérica. Estados Unidos, 1977.

GÓMEZ, M. & GÓMEZ, M. (2015). Dotación del banco básico hidrodinámico y elaboración del protocolo de funcionamiento, primera etapa para el laboratorio de hidráulica de la Universidad de Nariño. Informe final de Trabajo de Grado. Universidad de Nariño, San Juan de Pasto.

GONZALES CHAMORRO, Juan. Slide share: ecuación de Bernoulli. Atacama, Chile, 2005. Disponible en: <https://es.slideshare.net/jcesarvp/ecuacionde-bernoullimodo-de-compatibilidad>.

MANCO Silva, D. G., GUERRERO Erazo, J., & OCAMPO Cruz, A. M. Eficiencia en el consumo de agua de uso residencial. Revista Ingenierías Universidad de Medellín 2012, 11(21).

MATAIX, C. M., GILES, R. V. E., LIU, J. B., CHENG Moneva Moneva, Jaime, Ranald, T. R., Giles, J. B. E., & FACORRO Ruiz, L. A. Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas. Oxford University Press. 1982.

MAYA Martínez, c. J., BRIONES Sánchez, Gregorio, ORTEGA Rivera, F. D., & ROJAS Peña, Carlos. Diseño, ensamble y evaluación de un equipo de inyección múltiple tipo Venturi para fertirrigación. 2016.

MILNE-Thomson, L. M. Tratado de hidrodinámica teórica. 1951.

MOTT, R. L. Mecánica de fluidos. Pearson educación. México, 2006, p. 156.

NEWTON, I., BERNOULLI, D., MACLAURIN, C., & EULER, L. Philosophiae naturalis principia mathematica (Vol. 1). excudit G. Brookman; impensis TT et J. Tegg, Londini. 1833, p. 55.

ORTEGA Haro, R. A. Diseño construcción y operación de un banco hidráulico y venturímetro para pruebas hidráulicas. 2013.

PEDROZA González, E., ORTIZ Medel, J., & MARTÍNEZ González, F. Historia del Teorema de Bernoulli. Acta Universitaria, 17(1). 2007.  
RIÑO Valle, F. El nacimiento de la Hidrodinámica Teórica. Ingeniería Hidráulica y Ambiental. 2014, 66-78.

RIVERA, E. (s, f). Mecánica de fluidos, de erivera, Disponible En: <http://erivera-2001.com/MEC2245.html>. [Citado el 15 de septiembre de 2017].

REYNOLDS, Osborne. An experimental investigation of the circumstances which determine whether the motion of water shall be direct or sinuous, and of the law of resistance in parallel channels "Proceedings of the Royal Society of London (1854-1905). 1883-01-01.

SÁNCHEZ Vásquez, I. J., & ZAMBRANO, G. Manual operativo del laboratorio de operaciones unitarias I. Aparatos medidores de flujo bancos hidráulicos, medidor de Venturi y medidor de orificio.

STREETER, V. Propiedades de los fluidos y definiciones en Mecánica de los fluidos, México. 2004.

STREETER, V. L. y E. B. Wylie, "Mecánica de los Fluidos". 6ta edición, McGraw-Hill Latinoamericana S. A., Bogotá, 1981. p. 102.

TRUESDELL, C. Notes on the history of the general equations of hydrodynamics. The American Mathematical Monthly. 1953, p. 445-458.

# **ANEXOS**