

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL
DE HUAMANGA**

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y METALURGIA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA



**Diseño de un módulo de medidores de flujo: tubo venturi, placa
orificio y vertedero para el laboratorio de mecánica de fluidos**

Tesis para optar el título profesional de:
Ingeniera Química

Presentado por:
Bach. Ruth Karina Gutierrez Oriundo

Asesor:
Mg. Sc. Cipriano Mendoza Rojas

**Ayacucho - Perú
2024**

DEDICATORIA

Le dedico los resultados de este trabajo a mi familia, mi madre quien me apoya de forma incondicional, mis hermanos que siempre están presente en cada etapa de mi vida brindándome su apoyo.

Principalmente a la persona que está presente en cada paso que doy quien fue mi fortaleza durante este proceso, quién me enseñó a luchar por mis sueños, mi padre. Aunque ahora no pueda verlo ni mucho menos abrazarlo, lo abrazo con el alma. Gracias a mi familia por confiar en mí.

AGRADECIMIENTO

A la Universidad Nacional San Cristóbal de Huamanga mi alma mater por ayudarme en mi formación profesional, a la Facultad de Ingeniería Química y Metalurgia por haber contribuido con mi formación académica, a la Escuela Profesional de Ingeniería Química por darme las herramientas y el conocimiento para realizar el presente trabajo.

A mis profesores de quienes he aprendido mucho durante mi formación profesional, es mi mayor reconocimiento por su labor de formar profesionales exitosos, les agradezco infinitamente por su gran apoyo.

A mi asesor, M. Sc. Cipriano Mendoza Rojas, por su paciencia y orientación durante este proceso que se desarrolló esta tesis. Al personal del taller Electromecánico “Holger K. Hansen”, al Ing. Alejandro Tineo Morote y al Ing. Aquiles López La Serna por sus consejos y las enseñanzas complementarias que me brindaron.

RESUMEN

Los medidores de flujo en la actualidad son importantes en diferentes industrias, debido a que permite conocer los caudales que pasan por diferentes ductos o canales. Actualmente la Escuela Profesional de Ingeniería Química de la Facultad de Ingeniería Química y Metalurgia cuenta con un laboratorio de Mecánica de Fluidos en el cual se cuenta con dos equipos de medidores de flujo donde uno de ellos tiene un tiempo de operación de aproximadamente 30 años debido a ello las lecturas realizadas arrojan porcentajes de error de 2 % a 16 % en los caudales, el segundo equipo es para analizar las pérdidas de carga en los medidores que tiene el equipo.

Este trabajo tiene por objetivo diseñar un módulo de medidores de flujo de fluidos de tipo: Venturi, orificio y vertedero, por lo que se construyó el módulo, tomando como referencias las normas y especificaciones para el diseño de cada una de los medidores del módulo.

El tipo de investigación es aplicada a nivel explicativo con el diseño experimental, el trabajo tiene un propósito práctico, al momento de analizar los datos obtenidos de las evaluaciones se aplican principios de la mecánica de fluidos donde se obtienen condiciones controladas y de manipulación.

En la evaluación se trabajó con caudales de 15 L/min a 75 L/min medidos en un medidor directo (rotámetro) y se obtuvo los caudales y coeficientes de descarga para los medidores por medio de las lecturas de los manómetros diferenciales y las cargas para el vertedero.

Como conclusión se obtuvo los porcentajes de error de 0 % a 3 % para el Venturi, 2 % a 6,5 % para el orificio, 0 % a 4 % para el vertedero rectangular y 0 % a 6 % para el vertedero triangular, llegando a la conclusión que el medidor más exacto es el medidor de Venturi para canales cerrados y para canales abiertos es el vertedero triangular para caudales pequeños y el vertedero rectangular para caudales grandes.

Palabras claves: Diseño, evaluación, medidores de flujo.

ABSTRACT

Flow meters are important in different industries today, because they allow you to know the flow rates that go through different ducts or channels. Currently the Professional School of Chemical Engineering of the Faculty of Chemical Engineering and Metallurgy has a Fluid Mechanics laboratory in which there are two sets of flow meters where one of them has an operating time of approximately 30 years, due to which the readings carried out show percentages error rate from 2% to 16% in flow rates, the second piece of equipment is to analyze the pressure drops in the meters that the equipment has.

The objective of this work is to design a module of fluid flow meters of type: Venturi, orifice and weir, so the module was built, taking the standards and specifications as references for the design of each of the meters in the module.

The type of research is applied at an explanatory level with the experimental design, the work has a practical purpose, when analyzing the data obtained from the evaluations, principles of fluid mechanics are applied where controlled and handling conditions are obtained.

In the evaluation, flow rates from 15 L/min to 75 L/min measured in a direct meter (rotameter) were used and the flow rates and discharge coefficients for the meters were obtained by means of the readings of the differential pressure gauges and the loads for the landfill.

In conclusion error rates were 0 % to 3 % for the Venturi, 2 % to 6,5 % for the orifice, 0 % to 4 % for the rectangular weir and 0 % to 6 % for the triangular landfill, concluding that the most accurate meter is the Venturi meter for closed channels and for open channels, it is the triangular weir for small flows.

Keywords: Design, evaluation, flow meters.

ÍNDICE

DEDICATORIA.....	i
AGRADECIMIENTO.....	ii
RESUMEN.....	iii
ABSTRACT.....	iv
ÍNDICE.....	v
LISTA DE FIGURAS.....	x
LISTA DE TABLAS.....	xii
INTRODUCCIÓN.....	xiv
CAPÍTULO I ASPECTOS GENERALES.....	1
1.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN.....	1
1.1.1. Antecedentes internacionales.....	1
1.1.2. Antecedentes nacionales.....	2
1.2. PLANTEAMIENTO DE PROBLEMA.....	3
1.2.1. Problema general.....	4
1.2.2. Problemas específicos.....	5
1.3. OBJETIVOS.....	5
1.3.1. Objetivo general.....	5
1.3.2. Objetivos específicos.....	5
1.4. HIPÓTESIS.....	6
1.4.1. Hipótesis general.....	6
1.4.2. Hipótesis específicas.....	6
1.5. JUSTIFICACIÓN.....	6
1.5.1. Técnica.....	6
1.5.2. Económica.....	6
1.5.3. Académica.....	7
1.6. DELIMITACIÓN.....	7
1.6.1. Delimitación espacial.....	7
1.6.2. Delimitación temporal.....	7

CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO	8
2.1. MECÁNICA DE FLUIDOS	8
2.1.1. Propiedades de un fluido.....	8
2.1.2. Clasificación de los fluidos.....	9
2.2. RÉGIMEN DE FLUJO	10
2.2.1. Flujo laminar.....	11
2.2.2. Flujo turbulento.....	11
2.3. RAPIDEZ DE FLUJO DE FLUIDO Y LA ECUACIÓN DE CONTINUIDAD.....	12
2.3.1. Rapidez de flujo de fluido	12
2.3.2. Ecuación de continuidad	12
2.3.3. Conservación de la energía y ecuación de Bernoulli	14
2.4. FLUJO DE FLUIDOS EN CANALES	16
2.4.1. Clasificación del flujo en canal abierto.....	17
2.4.2. Consideraciones de energía.....	17
2.4.3. Radio hidráulico y numero de Reynolds en el flujo en canal abierto	19
2.4.4. Flujo en un canal de profundidad uniforme.....	20
2.4.5. Flujo de variación rápida	22
2.5. MEDIDORES DE FLUJO	22
2.5.1. Factores para la selección de un medidor de flujo.....	24
2.5.2. Medidores volumétricos.....	25
2.5.3. Medidores de presión diferenciales	25
2.5.4. Medidor de área variable.....	33
2.5.5. Medidor de canal abierto	35
2.6. NORMAS APLICADAS PARA MEDIDORES DE FLUJO	42
CAPÍTULO III METODOLOGÍA.....	44
3.1. DELIMITACIÓN DEL ESTUDIO.....	44
3.2. NIVEL Y TIPO DE INVESTIGACIÓN.....	44
3.3. POBLACIÓN Y MUESTRA.....	45

3.3.1. Población	45
3.3.2. Muestra	45
3.4. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS	45
3.4.1. Técnicas de recolección de datos.....	45
3.4.2. Instrumentos de recolección de datos	46
3.5. METODOLOGÍA.....	46
3.6. DETERMINACIÓN DE VARIABLES DE OPERACIÓN	47
3.7. DATOS DE LA SELECCIÓN DE TUBERÍA.....	48
3.8. DISEÑO DEL MÓDULO DE MEDIDORES DE FLUJO	48
3.8.1. Caudal.....	48
3.8.2. Diseño de tubo de Venturi	49
3.8.3. Diseño de placa de orificio.....	50
3.8.4. Diseño de vertedero	51
3.9. CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE DEL MÓDULO DE MEDIDORES DE FLUJO	53
3.10. PUESTA EN MARCHA Y EVALUACIÓN DEL MÓDULO DE MEDIDORES DE FLUJO.....	53
CAPÍTULO IV SELECCIÓN, DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL MÓDULO.....	54
4.1. ETAPA DE SELECCIÓN.....	54
4.1.1. Selección de materiales para los medidores de flujo	54
4.1.2. Selección de materiales de construcción.....	55
4.2. ETAPA DE DISEÑO.....	57
4.2.1. Diseño de medidores de flujo	57
4.2.2. Representación del diseño del módulo	65
4.2.3. Plano eléctrico.....	72
4.3. ETAPA DE CONSTRUCCIÓN	74
4.3.1. Construcción de cada elemento del módulo de medidores de flujo	74
4.3.2. Montaje de las unidades en el módulo de medidores de flujo.....	78
CAPÍTULO V PUESTA EN MARCHA Y EVALUACIÓN.....	79
5.1. PRUEBAS ELÉCTRICAS DEL TABLERO DE CONTROL.....	79

5.2. PRUEBAS HIDRÁULICAS	80
5.3. DESCRIPCIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DEL MÓDULO DE MEDIDORES DE FLUJO.....	80
5.4. CALIBRACIÓN DE LOS MEDIDORES.....	81
5.4.1. Calibración del rotámetro.....	81
5.4.2. Calibración del medidor de tubo Venturi	81
5.4.3. Calibración de medidor de placa de orificio	82
5.4.4. Calibración de vertedero.....	82
5.5. PUESTA EN MARCHA	83
CAPÍTULO VI RESULTADOS Y DISCUSIONES	84
6.1. RESULTADOS DE CALIBRACIÓN DE LOS MEDIDORES	84
6.1.1. Datos experimentales para la calibración de los medidores de rotámetro, Venturi y orificio	84
6.1.2. Datos experimentales para la calibración del vertedero rectangular	91
6.1.3. Datos experimentales para la calibración del vertedero triangular	95
6.2. RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN	98
6.2.1. Datos generales de los fluidos.....	98
6.2.2. Datos generales de los medidores de flujo (Rotámetro, Venturi, orificio, vertedero).....	99
6.2.3. Cálculos de la evaluación del medidor de Venturi.....	100
6.2.4. Cálculos de la evaluación del medidor de orificio	105
6.2.5. Cálculo de la evaluación del vertedero rectangular.....	109
6.2.6. Cálculos de la evaluación del vertedero triangular.....	111
6.3. EVALUACIÓN DEL EQUIPO QUE SE ENCUENTRA EN EL LABORATORIO DE MECÁNICA DE FLUIDOS	114
6.3.1. Datos generales	114
6.3.2. Resultados de los cálculos de la evaluación.....	115
6.4. DISCUSIÓN	119
CONCLUSIONES	124

RECOMENDACIONES	126
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	127
LISTA DE ABREVIATURAS.....	130
GLOSARIO	131
ANEXOS	132

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 <i>Porción de un sistema de distribución de fluidos que muestra variaciones en la velocidad, la presión y la elevación.....</i>	13
Figura 2 <i>Elemento de fluido utilizado en la ecuación de Bernoulli.....</i>	15
Figura 3 <i>Geometría característica de un canal abierto</i>	18
Figura 4 <i>Geometría de secciones de canal abierto.....</i>	21
Figura 5 <i>Los principios de medida de los medidores de caudal</i>	23
Figura 6 <i>Esquema del principio de Bernoulli.....</i>	26
Figura 7 <i>Disposición de las tomas de presión diferencial.....</i>	28
Figura 8 <i>Medidores de tubo Venturi.....</i>	29
Figura 9 <i>Coefficiente de Venturi vs. número de Reynolds</i>	30
Figura 10 <i>Esquema de instalación de placa orificio</i>	31
Figura 11 <i>Tipos de orificio.....</i>	31
Figura 12 <i>Coefficiente de orificio vs. número de Reynolds</i>	32
Figura 13 <i>Dos tipos de medidores de área variable.....</i>	34
Figura 14 <i>Contracción lateral en vertederos</i>	35
Figura 15 <i>Vertedero rectangular con contracciones, corte y perfil.....</i>	37
Figura 16 <i>Grafica para la determinación del constante k_b</i>	39
Figura 17 <i>Coefficiente de descarga según Kindsvater y Carter</i>	39
Figura 18 <i>Vertedero triangular</i>	40
Figura 19 <i>Coefficiente de gasto u de vertedero triangular en la fórmula de la Universidad Católica de Chile</i>	42
Figura 20 <i>Valores de K en la fórmula de la Universidad Católica de Chile para vertederos triangulares.....</i>	42
Figura 21 <i>Diagrama de bloques del proceso metodología de investigación.....</i>	47
Figura 22 <i>Diseño de tubo Venturi</i>	50
Figura 23 <i>Diseño de placa de orificio.....</i>	51
Figura 24 <i>Rotámetro seleccionado</i>	55
Figura 25 <i>Dimensiones del medidor de tubo de Venturi (mm)</i>	58
Figura 26 <i>Dimensiones del medidor de placa de orificio (mm).....</i>	60
Figura 27 <i>Lectura del valor del constante k_b</i>	62
Figura 28 <i>Lectura del coeficiente de descarga para vertedero rectangular.....</i>	62
Figura 29 <i>Determinación del coeficiente de gasto μ de vertederos triangulares en la fórmula de la Universidad Católica de Chile</i>	64

Figura 30	<i>Lectura de la constante K en la fórmula de la Universidad Católica de Chile para vertederos triangulares.....</i>	64
Figura 31	<i>Dimensiones del vertedero rectangular y triangular (mm)</i>	65
Figura 32	<i>Elevación frontal del módulo de medidores de fluido</i>	66
Figura 33	<i>Elevación posterior del módulo de medidores de fluido</i>	67
Figura 34	<i>Vista lateral izquierda y derecha respectivamente del módulo de medidores de flujo.</i>	68
Figura 35	<i>Vista superior del módulo de medidores de fluido.....</i>	68
Figura 36	<i>Vista de elevación frontal 3D del módulo de medidores de flujo</i>	69
Figura 37	<i>Vista de elevación posterior 3D del módulo de medidores de flujo</i>	69
Figura 38	<i>Vista de elevación lateral izquierda y derecha 3D del módulo de medidores de flujo</i>	70
Figura 39	<i>Vista superior 3D del módulo de medidores de flujo</i>	70
Figura 40	<i>Vista isométricas 1 en 3D</i>	71
Figura 41	<i>Vista isométricas 2 en 3D</i>	72
Figura 42	<i>Instalaciones eléctricas A) Circuito de fuerza, B) Circuito de mando.....</i>	73
Figura 43	<i>Estructura de soporte del módulo de fluidos</i>	74
Figura 44	<i>Cortes de las tuberías.....</i>	75
Figura 45	<i>Medidor de tubo Venturi construido</i>	75
Figura 46	<i>Medidor de placa de orificio construido.....</i>	76
Figura 47	<i>Medidor de vertedero triangular y rectangular construido</i>	76
Figura 48	<i>Tanque de almacenamiento de agua construido.....</i>	77
Figura 49	<i>Conexiones en el tablero de control.....</i>	78
Figura 50	<i>Montaje del medidor de flujo de fluidos.....</i>	78
Figura 51	<i>$\ln(Q_{Erot})$ vs. $\ln(Q_{prom})$ para el medidor de rotámetro</i>	87
Figura 52	<i>$\ln(Q)$ promedio vs. $\ln(\Delta hV)$ para el medidor de Venturi.....</i>	89
Figura 53	<i>$\ln(Q)$ promedio vs. $\ln(\Delta hO)$ para el medidor de orificio.....</i>	90
Figura 54	<i>$\ln(Q)$ promedio vs. $\ln(\Delta hVR)$ para el medidor de vertedero con compuerta rectangular.....</i>	94
Figura 55	<i>$\ln(Q_{prom})$ vs. $\ln(\Delta h)$ para el vertedero con compuerta rectangular.....</i>	97
Figura 56	<i>Coeficiente de descarga del medidor de Venturi vs. número de Reynolds</i>	104
Figura 57	<i>Coeficiente de orificio vs. número de Reynolds</i>	108
Figura 58	<i>Diferencia de presión vs. caudal de los medidores</i>	122

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 <i>Propiedades de los fluidos</i>	9
Tabla 2 <i>Clasificación de los fluidos</i>	10
Tabla 3 <i>Comparación de flujo laminar, transitorio y turbulento</i>	11
Tabla 4 <i>Definición y unidades de la rapidez de flujo</i>	12
Tabla 5 <i>Ventajas y desventajas de tubo Venturi</i>	30
Tabla 6 <i>Ventajas y desventajas de placa orificio</i>	32
Tabla 7 <i>Ventajas y desventajas del rotámetro</i>	34
Tabla 8 <i>Fórmulas experimentales para determinar el coeficiente de gastos para vertederos rectangulares</i>	37
Tabla 9 <i>Fórmula experimental para determinar los coeficientes de gasto μ o C para vertederos triangulares con diferentes ángulos</i>	41
Tabla 10 <i>Normas aplicadas para los medidores diferenciales</i>	43
Tabla 11 <i>Variables independientes y dependientes de la investigación</i>	48
Tabla 12 <i>Materiales para el módulo de medidores de flujo</i>	56
Tabla 13 <i>Datos experimentales para los medidores de rotámetro, Venturi y orificio</i>	84
Tabla 14 <i>Resultados de caudales experimentales</i>	86
Tabla 15 <i>Datos experimentales para la calibración de rotámetro</i>	87
Tabla 16 <i>Datos experimentales para la calibración del tubo de Venturi</i>	88
Tabla 17 <i>Datos experimentales para la calibración de medidor de orificio</i>	90
Tabla 18 <i>Datos experimentales para el vertedero rectangular</i>	91
Tabla 19 <i>Resultados de los caudales experimentales para el vertedero rectangular</i>	92
Tabla 20 <i>Datos experimentales para la calibración del vertedero rectangular</i>	93
Tabla 21 <i>Datos experimentales para el vertedero triangular</i>	95
Tabla 22 <i>Resultados de caudales para el vertedero triangular</i>	96
Tabla 23 <i>Datos experimentales para la calibración del vertedero triangular</i>	97
Tabla 24 <i>Datos del vertedero rectangular y triangular</i>	99
Tabla 25 <i>Datos experimentales del medidor de Venturi</i>	100
Tabla 26 <i>Resultados de los caudales experimentales para el Venturi y orificio</i> ...	101
Tabla 27 <i>Resultados del caudal del medidor de Venturi y su porcentaje de error</i>	103
Tabla 28 <i>Resultados del coeficiente de descarga del Venturi y el número de Reynolds</i>	104
Tabla 29 <i>Datos experimentales para el medidor de orificio</i>	105

Tabla 30	<i>Resultados del caudal del medidor de orificio y su porcentaje de error.</i>	106
Tabla 31	<i>Resultados del coeficiente de descarga del orificio y el número de Reynolds</i>	108
Tabla 32	<i>Datos experimentales para el vertedero rectangular.</i>	109
Tabla 33	<i>Resultados de los caudales experimentales para el vertedero rectangular</i>	110
Tabla 34	<i>Resultados de caudales para el vertedero rectangular</i>	111
Tabla 35	<i>Datos experimentales para el vertedero triangular</i>	111
Tabla 36	<i>Resultados de los caudales experimentales para el vertedero triangular</i>	113
Tabla 37	<i>Resultados de caudales para el vertedero triangular</i>	114
Tabla 38	<i>Datos experimentales del Venturi y orificio</i>	115
Tabla 39	<i>Resultados del caudal del medidor de Venturi y su porcentaje de error</i>	116
Tabla 40	<i>Resultados del coeficiente de descarga del Venturi y el número de Reynolds</i>	116
Tabla 41	<i>Resultados del caudal del medidor de orificio y su porcentaje de error.</i>	117
Tabla 42	<i>Resultados del coeficiente de descarga del orificio y el número de Reynolds</i>	117
Tabla 43	<i>Datos experimentales para el vertedero rectangular.</i>	118
Tabla 44	<i>Resultados experimentales para el vertedero rectangular</i>	118
Tabla 45	<i>Datos experimentales para el vertedero triangular</i>	119
Tabla 46	<i>Resultados experimentales para el vertedero triangular</i>	119
Tabla 47	<i>Resumen de los resultados obtenidos para el medidor de Venturi</i>	120
Tabla 48	<i>Resumen de los resultados obtenidos para el medidor de orificio</i>	120
Tabla 49	<i>Resumen de los resultados obtenidos para el vertedero rectangular....</i>	121
Tabla 50	<i>Resumen de los resultados obtenidos para el vertedero triangular.....</i>	121

INTRODUCCIÓN

La Escuela Profesional de Ingeniería Química de la Facultad de Ingeniería Química y Metalurgia cuenta con un laboratorio de Mecánica de Fluidos donde hay un conjunto de equipos experimentales los cuales permiten a los estudiantes realizar las prácticas de verificación de conceptos teóricos. Dentro de ellos se encuentra disponible el equipo modular de medidores de flujo de fluidos que tiene más de 30 años de antigüedad y los resultados de los ensayos experimentales al corroborar con los resultados teóricos arrojan resultados experimentales con errores considerables debido a factores como la acumulación de sarro, por falta de mantenimiento y por el deterioro que presenta por años de funcionamiento teniendo como un rango de error de 2 % a 16 % registrados en las prácticas, también se cuenta con un nuevo equipo con resultados de 20 % a 30 % de error registrados en los informes de prácticas.

Debido a estas razones se observó estas deficiencias en el módulo de flujo de fluidos y se plantea el diseño de un nuevo equipo modular de flujo de fluidos para así obtener mayor exactitud en los cálculos de caudal, permitiendo a los estudiantes la mejor comprensión de información. Por lo que el objetivo es el diseño de un módulo de medidores de flujo de fluidos con mayor exactitud de medición de caudal, para obtener mejores resultados prácticos y así verificar los valores teóricos.

El módulo de medidores de flujo se diseñó tomando de referencia a las normas ISO 5167 para el caso de los medidores diferenciales y para los vertederos se seleccionó la fórmula de Kindsvater-Carter para el vertedero rectangular y la fórmula de la Universidad Católica de Chile para el vertedero triangular los cuales mencionan las especificaciones de diseño. Posteriormente se construyó en material de acero inoxidable a excepción del medidor de Venturi (acrílico) que permite visualizar el flujo de agua al interior del medidor, se tomó valores de 15 L/min a 75 L/min para la evaluación donde se obtuvo resultados de caudal experimentales, con porcentajes de error de 0 % a 3 % para el Venturi, 2 % a 6,5 % para el medidor de orificio, 0 % a 4 % para el vertedero rectangular y 0 % a 6 % para el vertedero triangular. Donde entre los medidores del módulo de fluidos el más preciso es el Venturi. También se obtuvo los coeficientes de descarga para los medidores de forma práctica para el medidor de Venturi (C_v) es 0,97, para el medidor de orificio (C_o) es 0,65. Del mismo modo, los coeficientes de descarga es 0,6 para el vertedero rectangular y 0,61 para el vertedero triangular.

CAPÍTULO I

ASPECTOS GENERALES

1.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

1.1.1. Antecedentes internacionales

Alarcon y Gutierrez (2018), desarrolló una investigación titulada **“Diseño y construcción de un banco de prueba para realización del ensayo de vertederos y de resalto hidráulico, para el laboratorio de hidráulica de la Universidad Piloto de Colombia-Seccional Alto Magdalena”** en Colombia. El objetivo de su tesis es diseñar y construir un módulo de prueba para la evaluación de ensayos de vertederos, para el laboratorio de hidráulica de la Universidad Piloto de Colombia Seccional del Alto Magdalena, donde una de las maneras más fáciles para medir el flujo de un fluido son los medidores como los vertederos que tiene muchos tipos donde su diseño y fabricación son sencillas a bajo costo donde se aplica en un canal pequeño con poco sedimento para laboratorios, este trabajo donde se evaluó los vertederos rectangulares donde se llegó a concluir que son los más convenientes para flujos grandes y los vertederos triangulares para flujos pequeños. Se realizó la calibración entre caudal vs carga, donde para los vertederos que tiene contracciones es mejor evaluarlo en un rango de caudal de 5 a 10 L/s y para vertederos con crestas delgadas, pero aun así son eficaces para mediciones de caudales, con una correcta condición de toma de datos llegaron a corregir y obtener resultados más satisfactorios.

Flores Solis (2016), desarrolló una investigación titulada “**Diseño y construcción de un prototipo de laboratorio para realizar prácticas en fluidos incompresibles**” en México. Su investigación tuvo como objetivo principal realizar una construcción en los ambientes de laboratorio para su posterior evaluación con fluido incompresible en varias mediciones para ello se construyó un equipo con menor costo, con la finalidad que los estudiantes aumenten sus conocimientos en los diversos medidores que se usan. Donde para su desarrollo se realizan los cálculos de diseño para la placa de orificio, las particularidades de la línea de tubería, también posteriormente se realizaron diferentes evaluaciones para verificar las fugas, las correctas conexiones entre otras, concluyendo que se realizó este trabajo para que los estudiantes tengan a su alcance equipos donde pueden evaluar diferentes cosas como: el tipo de flujo, la temperatura de operación, las mediciones de presión, etc. Teniendo como efecto la correcta operatividad del equipo.

García y Neira (2016), realizó una investigación titulada “**Diseño y construcción de un sistema didáctico de medición de flujo mediante el principio diferencial de presión**” en Ecuador. En su investigación tiene como finalidad el diseño y la construcción de un módulo pedagógico para medir el flujo implementando medidores (placa de orificio, boquilla y tubo Venturi) usando las normas internacionales ISO 5167, donde para su desarrollo se realizaron las comparaciones de los medidores y calcularon las dimensiones referenciales que tendrá cada medidor usando las ecuaciones para su posterior construcción se realizó de acuerdo a las normas estándares posteriormente evaluándolo el equipo llegando a la conclusión que el módulo tiene una eficiencia del 75 % al 85 % por lo cual es admisible. Donde de los 3 medidores instalados el medidor de tubo de Venturi tiene menor porcentaje de error por lo que es el mejor medidor, pero el medidor de orificio es el más usado por su bajo costo.

1.1.2. Antecedentes nacionales

Amacifuén et al. (2010), desarrolló una investigación titulada “**Diseño, construcción e instalación de un equipo para la medición de flujo y pérdidas por fricción para el laboratorio de Procesos y Operaciones Unitarias de la FIQ-UNAP**”, en Iquitos. El objetivo principal fue el diseño y la construcción de un nuevo módulo experimental para sus prácticas de Procesos y Operaciones Unitarias para su Facultad de Ingeniería Química de la UNAP. Realizándose una investigación con el método

experimental, donde se desarrolló la instalación del equipo. Aplicaron el método experimental a los diferentes parámetros para su posterior desarrollo del módulo, también desarrollan los cálculos necesarios, la selección de medidores de flujo y las especificaciones a los materiales a usar para su construcción. Una vez finalizada el módulo se realiza la operación donde tomaron 3 caudales de referencia (18,5 L/min, 15,0 L/min, 13,5 L/min) para evaluar los datos con los cuales llegaron a la conclusión que el caudal mínimo (13,5 L/min) es más adecuado para obtener mejores lecturas de datos y analizar las pérdidas de carga donde el porcentaje de error que obtuvieron fue de 17,31 % realizando la comparación con los cálculos teóricos.

Alejos Zelaya (2018), realizó una investigación titulada “**Diseño de un banco hidráulico para el estudio experimental de las pérdidas de carga en redes de distribución hidráulica. Laboratorio de mecánica de fluidos y maquinas térmicas FIME-UNAC**”, en Callao. Su investigación tuvo el propósito de diseñar un banco hidráulico para analizar las perdidas por fricción en las líneas de tuberías hidráulicas para sus prácticas en Mecánica de Fluidos y Maquinas Térmicas de la FIME-UNAC. Donde empleo un enfoque no experimental, aplicativo-tecnológico y el método empírico, para analizar los datos experimental de las perdidas por fricción en las líneas hidráulicas empleando las ecuaciones y los diagramas necesarios, para comparar los datos teóricos con los datos prácticos se debe construir el módulo donde para las pérdidas de fricción regulares, perdidas de fricción en accesorios se realizan los cálculos para diferentes velocidades de flujo donde en este módulo se podría modificar la posición de las válvulas para evaluar en series y paralelos, concluyendo que realiza una propuesta del diseño y construcción del módulo para así mejorar los equipos para la Facultad de Ingeniería Mecánica y de Energía.

1.2. PLANTEAMIENTO DE PROBLEMA

Existen una variedad de medidores de flujo que se emplean en diferentes campos como las industrias petroleras, la industria agrícola, industria de procesamiento de productos químicos, la industria de las destilerías, plantas de tratamiento de agua entre otros, en las diferentes industrias una de las variables más importantes es el flujo de fluidos, debido a que en los diferentes procesos está presente un fluido, por lo tanto, los medidores de caudal son importantes en la actividad profesional del ingeniero químico, ya que en la mayoría de los procesos existe la necesidad de controlar la salida o el ingreso del caudal con la finalidad de mejorar los costos de

producción. Por lo tanto, estos medidores son equipos que nos ayudan a supervisar los flujos de fluidos en los procesos. Según Darby (2001), menciona que entre los medidores más exactos esta la placa de orificio y tubo de Venturi con un $\pm 1\%$ en términos de escala, de igual forma están los medidores de Pitot y rotámetro tiene una exactitud de $\pm 2\%$ en términos de escala.

Actualmente en la Universidad Nacional San Cristóbal de Huamanga, la Escuela Profesional de Ingeniería Química cuenta con un laboratorio de Mecánica de Fluidos donde se encuentra un equipo de medidores de flujo que tiene más de 30 años de operación, cuentan con medidores como: Venturi, orificio y rotámetro, tiene un rango caudal de 0 L/min a 34 L/min que arroja errores de un rango 2 % a 16 %, el segundo equipo tiene un rango de caudal de 0 L/min a 20 L/min en las puestas en marcha arroja errores de un 20 % a 30 %. Por consiguiente, hay necesidad de implementar un nuevo equipo experimental, para ello la Facultad cuenta con un taller electromecánico que tiene mucha experiencia en la construcción de equipos modulares, por otro lado, no existe un personal calificado para operar este tipo de equipos importados. Ahora bien, cuando son construidos a través del taller electromecánico existe la posibilidad de tener capacitación constante en el manejo del módulo.

El módulo de medidores de flujo se usa con mucha frecuencia por estudiantes y visitantes de otras escuelas profesionales, al plantear el diseño de un nuevo equipo implementado con los siguientes medidores: tubo Venturi, placa orificio y vertedero, los cuales se seleccionan por su frecuente uso, el desarrollo de este equipo será un modelo pedagógico, así al tener un nuevo módulo de medidores de flujo de fluidos nos permite tener datos prácticos que se aproximen a los datos teóricos con mayores exactitudes y menores porcentajes de error. Por tal motivo, se propone el presente proyecto, diseño de un módulo de medidores de flujo de fluidos.

1.2.1. Problema general

¿Cómo diseñar un módulo de medidores de flujo de fluidos de tipo Venturi, placa de orificio y vertedero, para mejorar la exactitud de medición en el laboratorio de Mecánica de Fluidos de la Facultad de Ingeniería Química y Metalurgia de la Universidad Nacional San Cristóbal de Huamanga?

1.2.2. Problemas específicos

- ¿Cuál es el dimensionamiento adecuado de cada medidor de flujo de fluidos: tubo Venturi, placa orificio y vertedero considerando sus características y parámetros?
- ¿Cuáles son los materiales más apropiados para la construcción de cada uno de los medidores de flujo de fluidos?
- ¿Cómo construir un módulo de medidores de flujo de fluidos tipo Venturi, placa de orificio y vertedero?
- ¿Cómo evaluar el comportamiento de caudal en cada uno de los medidores de flujo diseñados para mejorar la exactitud en el laboratorio de Mecánica de Fluidos?

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo general

Diseñar un módulo de medidores de flujo de fluidos de tipo Venturi, placa de orificio y vertedero, para mejorar la exactitud de medición en el laboratorio de Mecánica de Fluidos de la Facultad de Ingeniería Química y Metalurgia de la Universidad Nacional San Cristóbal de Huamanga.

1.3.2. Objetivos específicos

- Dimensionar cada medidor de flujo de fluidos: tubo Venturi, placa orificio y vertedero en función de sus características y parámetros específicos.
- Seleccionar los materiales más apropiados para la construcción de cada uno de los medidores de flujo de fluidos.
- Construir el módulo de medidores de flujo de fluidos tipo Venturi, placa de orificio y vertedero.
- Evaluar el comportamiento de caudal en cada uno de los medidores de flujo diseñados para mejorar la exactitud en el laboratorio de Mecánica de Fluidos.

1.4. HIPÓTESIS

1.4.1. Hipótesis general

El buen diseño de un módulo de medidores de flujo de fluidos que integre un tubo Venturi, placa orificio y vertedero, permite mejorar significativamente la exactitud de medición en el laboratorio de Mecánica de Fluidos de la Facultad de Ingeniería Química y Metalurgia de la Universidad Nacional San Cristóbal de Huamanga.

1.4.2. Hipótesis específicas

- Con una buena especificación de las características y parámetros de cada medidor de flujo de fluidos: tubo Venturi, placa orificio y vertedero, se logrará el adecuado dimensionamiento.
- La selección apropiada de materiales permitirá la construcción de cada uno de los medidores de flujo de fluidos.
- Un buen proceso de trabajo mecánico permitirá la construcción del módulo de medidores de flujo de fluidos tipo tubo Venturi, placa orificio y vertedero.
- Para una buena evaluación del comportamiento de caudal en cada uno de los medidores diseñados permitirá significativamente una mejora en la exactitud en el laboratorio de Mecánica de Fluidos.

1.5. JUSTIFICACIÓN

1.5.1. Técnica

Para el presente proyecto se cuenta con los conocimientos fundamentales de la asignatura de mecánica de fluidos, aplicados al diseño y construcción del equipo de medidores de caudal y su respectiva evaluación y para lo cual se cuenta con un personal capacitado en la construcción de diferentes equipos experimentales en el taller electromecánico “Holger K. Hansen” y la tecnología para la implementación de módulo de medidores de flujo de fluidos.

1.5.2. Económica

Este equipo es uno de los equipos de importación que tiene un alto costo de adquisición, por lo que con el presente trabajo se realizará la construcción a bajo costo en el taller electromecánico, donde estos pueden comercializarse a otras

universidades con asistencia técnica en su operación para su debido uso. Utilizando materiales de disponibilidad en el mercado nacional.

1.5.3. Académica

Este equipo que se construirá y evaluará estará disponible en el laboratorio de mecánica de fluidos para las prácticas de laboratorio con fines de mejorar la obtención de datos experimentales con mayor precisión en el campo de los medidores de flujo de fluidos, también aportará en la experiencia de manejo de uso del módulo de medidores de flujo de fluidos.

1.6. DELIMITACIÓN

1.6.1. Delimitación espacial

La Universidad Nacional San Cristóbal de Huamanga en la Facultad de Ingeniería Química cuenta con el taller electromecánico “HOLGER K. HANSEN” para su desarrollo del proyecto se utilizó la infraestructura y los ambientes, para la construcción y evaluación de los medidores de caudal, también las áreas del laboratorio de mecánica de fluidos.

1.6.2. Delimitación temporal

Para realizar presente trabajo, se toma como referencia el año 2023.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. MECÁNICA DE FLUIDOS

La mecánica de fluidos es una ciencia que se ramifica en varias especialidades tales como la aerodinámica, hidráulica, ingeniería naval, dinámica de gases y procesos de flujo. Tiene relación con la dinámica, la estática y la cinética, ya que el movimiento de un fluido se produce debido al desequilibrio de las fuerzas que actúan sobre él. Donde un fluido es una sustancia que se deforma constantemente bajo un esfuerzo cortante por muy pequeña que sea. (Streeter et al., 2000, p.14)

Giles et al. (1994), menciona que los fluidos se dividen en líquidos y gases los cuales se diferencian por que los líquidos son prácticamente incompresibles, de volumen definido mientras que los gases comprensibles, una masa de gas se expande hasta ocupar las partes del recipiente que lo contenga. (p. 1)

2.1.1. Propiedades de un fluido

Las propiedades físicas de un fluido permiten la caracterización de su comportamiento para diferenciarlos. Según Streeter et al. (2000):

Los cálculos de movimiento de fluidos, la viscosidad y la densidad son las propiedades del fluido que con más generalidades se utilizan; desempeñan un papel importante en el movimiento en canales abiertos y cerrados. (p. 14)

Tabla 1*Propiedades de los fluidos*

Propiedades	Concepto	Unidades (SI)
Densidad	Es la cantidad de masa por unidad de volumen de una sustancia.	$\frac{kg}{m^3}$
Peso específico	Es la relación del peso por unidad de volumen de una sustancia.	$\frac{N}{m^3}$
Volumen específico	Es el volumen ocupado por unidad de masa de masa de fluido.	$\frac{m^3}{kg}$
Viscosidad	La viscosidad es una medida de resistencia a la deformación, controla la cantidad de fluido que puede transportarse por una tubería durante un periodo determinado.	$\frac{m^2}{s}, Pa * s$
Presión	Es la cantidad de fuerza que se ejerce sobre una unidad de área de alguna sustancia	$\frac{N}{m^2}$
Tensión superficial	Es el fenómeno por lo que la superficie de un líquido tiende a comportarse como una película delgada elástica.	---

Nota. Adaptado de *Mecánica de fluidos aplicado al diseño de procesos industriales* (pp. 20-30), por Mendoza R, C., 2015, Universidad Nacional San Cristóbal de Huamanga.

2.1.2. Clasificación de los fluidos

La clasificación de un fluido se puede dar dependiendo de las características físicas que se muestran en la tabla 2.

Tabla 2

Clasificación de los fluidos

Clasificación según el estado de la materia	
Gases	Es un estado de la materia donde las moléculas interactúan débilmente bajo ciertas condiciones de presión y temperatura, adoptan la forma y el volumen del recipiente que lo contiene, son altamente compresibles.
Líquidos	Es un estado de la materia donde las moléculas son menos separadas que los gases y no tan próximos como los sólidos, son altamente incompresibles.
Clasificación según la viscosidad y su esfuerzo cortante	
Newtonianos	Son fluidos donde la viscosidad es constante con respecto al tiempo, tiene un comportamiento lineal.
No newtonianos	Son fluidos que no tiene una viscosidad definida, es decir, varía de acuerdo al esfuerzo cortante y la temperatura.
Clasificación según la densidad	
Compresibles	Son fluidos donde una variación de la densidad de un punto a otro no es despreciable, es decir, la densidad no es constante.
No compresibles	Son fluidos donde la variación de la densidad de un punto a otro es despreciable, es decir, la densidad es constante.

Nota. Adaptado de *Mecánica de fluidos aplicado al diseño de procesos industriales* (p. 27), por Mendoza R, C., 2015, Universidad Nacional San Cristóbal de Huamanga.

2.2. RÉGIMEN DE FLUJO

El régimen de flujo es importante para identificar el tipo de fluido que circula por el sistema. Mott y Untener (2015) plantea que:

Es necesario un medio para identificar el tipo de flujo, Reynolds demostró que es posible predecir si es un flujo laminar, turbulento y transitorio, debido a que muchos flujos circulan por tuberías opacas, para tubos redondos se demostró en forma experimental con la siguiente ecuación. (p. 181)

$$Re = \frac{vD\rho}{\mu} \quad Ec. (1)$$

Donde:

v : Velocidad [$\frac{m}{s}$]

D : Diámetro [m]

ρ : Densidad [$\frac{kg}{m^3}$]

μ : Viscosidad [$N \cdot \frac{s}{m^2}$]

Tabla 3

Comparación de flujo laminar, transitorio y turbulento

Tipo de flujo		
Laminar	Transitorio	Turbulento
$Re \leq 2300$	$2300 \leq Re \leq 4000$	$Re \geq 4000$

Nota. Tomado de *Mecánica de fluidos fundamentos y aplicaciones* (p. 340), por Gengel y *Cimbala*, 2012, McGrawHill Education.

2.2.1. Flujo laminar

Un flujo laminar es el movimiento de un fluido en láminas unas sobre otras adyacentemente, las partículas de flujo se mueven linealmente en corrientes definidas. Además, el flujo es característico de un fluido viscoso o de un fluido en que la viscosidad es significativa (Franzini y Finnemore, 1999, p. 66).

2.2.2. Flujo turbulento

Un flujo turbulento tiende a un movimiento irregular de partículas durante un tiempo determinado, las partículas pequeñas se mueven unas contra otras de forma errática que son la causa de la acción turbulenta que se observa (Franzini y Finnemore, 1999, p. 67).

2.3. RAPIDEZ DE FLUJO DE FLUIDO Y LA ECUACIÓN DE CONTINUIDAD

2.3.1. Rapidez de flujo de fluido

Según Mott (2006), “la cantidad de fluido que pasa por un sistema por unidad de tiempo se puede expresar por medio de tres términos distintos” (p.154).

- Flujo volumétrico (Q) es el volumen de fluido que circula en una sección por unidad de tiempo.
- Flujo en peso (W) es el peso del fluido que circula en una sección por unidad de tiempo.
- Flujo masico (M) es la masa de fluido que circula en una sección por unidad de tiempo (Mott, 2006, p. 154).

Tabla 4

Definición y unidades de la rapidez de flujo

Símbolos	Nombres	Definición	Unidades del SI
Q	Rapidez del flujo de volumen	$Q = vA$	m^3/s
W	Rapidez del flujo de peso	$W = \gamma Q$	N/s
		$W = \gamma Av$	
M	Rapidez del flujo de masa	$M = \rho Q$	kg/s
		$M = \rho Av$	

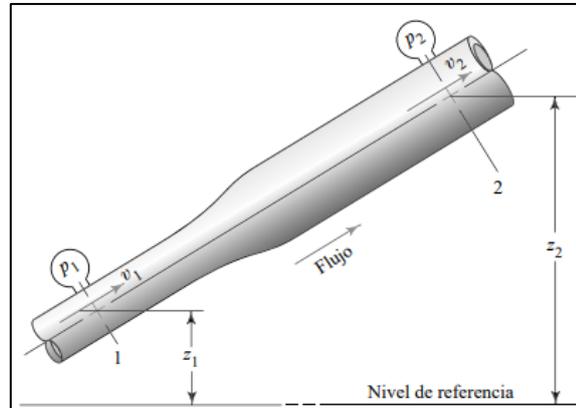
Nota. Adoptado de *Mecánica de fluidos* (p.155), por Mott y Untener, 2015, Pearson Educación.

2.3.2. Ecuación de continuidad

El método empleado para calcular la velocidad del flujo de un fluido en un sistema de tuberías cerrado depende del principio de continuidad. La tubería de la figura 1. Un fluido fluye desde la sección 1 hasta la sección 2 una velocidad consistente. Es decir, la cantidad de fluido que fluye a lo largo de cualquier sección en una cantidad de tiempo dada es constante. Esto se conoce como flujo estable. Ahora bien, si no se añade, almacena o elimina fluido entre la sección 1 y la sección 2, entonces la masa de fluido que fluye por la sección 2 en una determinada cantidad de tiempo debe ser la misma que la fluye por la sección 1. (Mott y Untener, 2015, p.120)

Figura 1

Porción de un sistema de distribución de fluidos que muestra variaciones en la velocidad, la presión y la elevación



Nota. Tomado de *Mecánica de fluidos* (p. 120), por Mott y Untener, 2015, Pearson Educación.

En términos de rapidez de flujo de masa se expresa

$$M_1 = M_2 \quad \text{Ec. (2)}$$

Donde $M = \rho Av$, donde la ecuación de continuidad para cualquier fluido ya sea líquidos o gases.

$$\rho_1 A_1 v_1 = \rho_2 A_2 v_2 \quad \text{Ec. (3)}$$

La ecuación se denomina ecuación de continuidad. Se utiliza para relacionar la densidad del fluido, el área del flujo y la velocidad de flujo en dos secciones del sistema en el que existe un flujo estable. Si el fluido presente en la tubería de la figura 1 es incompresible, entonces el término ρ_1 y ρ_2 son iguales y pueden cancelarse. Ecuación de continuidad para líquidos. (Mott y Untener, 2015, p.120)

$$A_1 v_1 = A_2 v_2 \quad \text{Ec. (4)}$$

O bien, puesto que $Q = Av$, se tiene

$$Q_1 = Q_2 \quad \text{Ec. (5)}$$

2.3.3. Conservación de la energía y ecuación de Bernoulli

“Por la física se sabe que la energía no se crea ni se destruye, sino que se puede transformar de una forma a otra, este es un enunciado de la ley de conservación de la energía” (Mott y Untener, 2015, p.127).

Según Mott y Untener (2015), plantea que en un análisis de un problema de flujo en tuberías se menciona tres formas de energía:

- Energía potencial (PE), debido a su elevación, la energía potencial del elemento, en relación con algún nivel de referencia, donde w es el peso del elemento.

$$PE = wz \quad \text{Ec. (6)}$$

- Energía cinética (KE), debido a su velocidad, la energía cinética del elemento es:

$$KE = \frac{wv^2}{2g} \quad \text{Ec. (7)}$$

- Energía de presión (FE), representa la cantidad de trabajo necesaria para mover el elemento de fluido a través de una sección determinada contra la presión p . (p.127)

$$FE = \frac{wP}{\gamma} \quad \text{Ec. (8)}$$

La energía total son estas tres formas poseídas por el elemento de fluido

$$E = PE + KE + FE = wz + \frac{wv^2}{2g} + \frac{wP}{\gamma} \quad \text{Ec. (9)}$$

Donde:

w : Peso del elemento

z : Nivel de referencia

v : Velocidad del fluido

γ : Peso específico

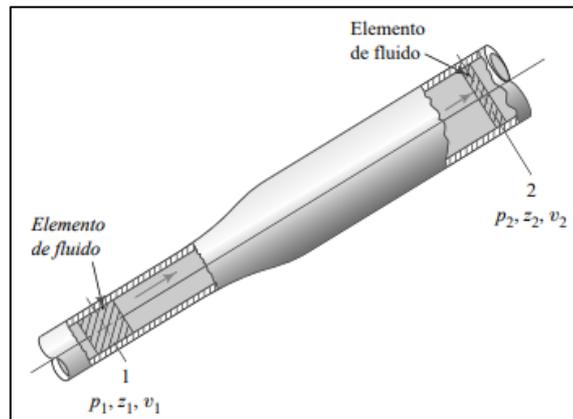
Donde simplificando la ecuación (9) y reemplazando el peso específico ($\gamma = \rho g$)

$$z + \frac{v^2}{2g} + \frac{P}{\rho g} = \text{constante a lo largo de la línea (H)} \quad \text{Ec. (10)}$$

Donde la ecuación (10) es en un flujo estacionario e incompresible.

Figura 2

Elemento de fluido utilizado en la ecuación de Bernoulli



Nota. Tomado de *Mecánica de fluidos* (p. 128), por Mott y Untener, 2015, Pearson Educación.

La energía total en la sección 1 y en la sección 2

$$E_1 = z_1 + \frac{v_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\rho g} \quad \text{Ec. (11)}$$

$$E_2 = z_2 + \frac{v_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\rho g} \quad \text{Ec. (12)}$$

Cada uno de estos términos se expresa en unidades de energía, que son newton.metros (N.m) en el sistema de unidades SI. De la figura 2, el cual va de la sección 1 a la sección 2. Los valores de P, z y v son diferentes en las dos secciones. Si no se añade energía al fluido ni se pierde energía entre las secciones 1 y 2, entonces el principio de conservación de la energía exige que: (Mott y Untener, 2015, p. 128)

$$E_1 = E_2 \quad \text{Ec. (13)}$$

$$z_1 + \frac{v_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\rho g} = z_2 + \frac{v_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\rho g} \quad \text{Ec. (14)}$$

Donde:

P_1, P_2 : Presión en el punto 1 y 2 respectivamente.

z_1, z_2 : Nivel de referencia del punto 1 y 2 respectivamente.

g : gravedad.

La ecuación de Bernoulli explica los cambios en la carga de elevación, la carga de presión y la carga de velocidad entre dos puntos de un sistema de flujo de fluidos. Se supone que no hay pérdidas ni adiciones de energía entre los dos puntos, por lo que la carga total permanece constante. (Mott y Untener, 2015, p. 128)

2.4. FLUJO DE FLUIDOS EN CANALES

Un canal abierto es aquel en el que el flujo no está completamente encerrado por límites fijos, tiene una superficie libre sujeta únicamente a la presión atmosférica. El flujo dentro de este canal no es causado por una convección externa sino por la componente gravitatoria que actúa en la dirección de la pendiente del canal. Por lo tanto, el flujo en canales abiertos a menudo se llama flujo de superficie libre o flujo por gravedad. Los principales tipos de caminos abiertos son ríos y arroyos, en muchos casos, se pueden construir canales artificiales para suministro de agua, proyectos hidroeléctricos, irrigación, suministro de agua urbano, drenaje, control de inundaciones y otros usos (Franzini y Finnemore, 1999, p. 255)

Sotelo Ávila (2002), menciona las fuerzas que perturban el flujo en una tubería actúan sobre el movimiento de un fluido a lo largo de una superficie libre.

- La fuerza de gravedad, como la más importante en el movimiento.
- La fuerza de resistencia causada por arrastre creado en límites rígidos por la fricción y la naturaleza casi siempre turbulenta del flujo.
- La fuerza de presión ejercida sobre los límites del canal, particularmente en las zonas donde cambia su geometría.
- Las fuerzas asociadas con la viscosidad del líquido no juegan un papel importante en el flujo turbulento. (p.1)

2.4.1. Clasificación del flujo en canal abierto

Para el flujo en un canal abierto, la presencia de una superficie libre permite varios tipos de flujo. La libertad adicional que permite un fluido para elegir la ubicación y configuración de su superficie libre porque no llena completamente un conducto permite que ocurran fenómenos que no ocurren en el flujo de ducto cerrado (Munson et al., 1999, p. 624).

Según Munson et al., (1999) la clasificación en los canales abiertos son los siguientes:

- El flujo inestable o estable dependiendo de si la profundidad cambia o no con el tiempo.
- Flujo uniforme si la profundidad del fluido no varía a lo largo del canal.
- Flujo no uniforme o variado si la profundidad varía con la distancia y se clasifican en:
 - Flujo de variación rápida, si la profundidad del fluido cambia de manera considerable sobre una distancia relativamente corta.
 - Los flujos de variación gradual, son aquellos en que la profundidad del flujo cambia lentamente con la distancia a lo largo del canal. (p.624)

2.4.2. Consideraciones de energía

Cengel y Cimbala (2012), menciona que la energía mecánica total de un líquido donde las densidades son casi constantes en cualquier sección transversal de un canal abierto es:

$$H = z + y + \frac{v^2}{2g} \quad \text{Ec. (15)}$$

Donde:

z : Profundidad del flujo.

y : Elevación de fondo de canal.

v : Velocidad promedio del flujo.

La ecuación de energía aplicada al flujo en un canal abierto entre la sección 1 y 2, Donde el h_L es la pérdida de carga por efectos de fricción. (p. 712)

$$y_1 + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} = y_2 + z_2 + \frac{v_2^2}{2g} + h_L \quad \text{Ec. (16)}$$

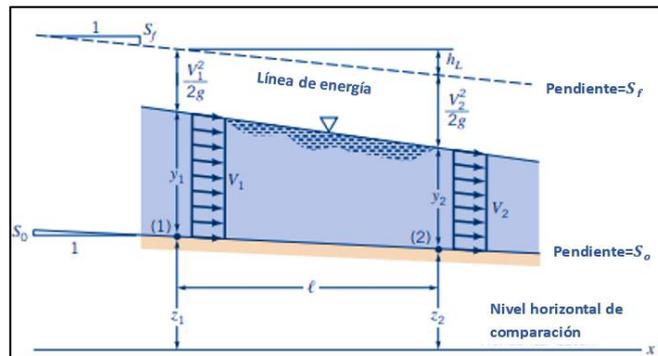
En canal abierto el flujo se conduce por gravedad por lo que un canal esta ligeramente inclinado, la pendiente del fondo del canal o pendiente de fondo es constante sobre el segmento mostrado.

$$S_0 = \frac{z_1 - z_2}{x_1 - x_2} = \frac{z_1 - z_2}{L} \quad \text{Ec. (17)}$$

Las profundidades y y las velocidades del fluido son y_1 , y_2 , v_1 y v_2 como se indica. Obsérvese que la profundidad del fluido se mide en la dirección vertical y que la distancia (x) es horizontal. Para casi todos los flujos en un canal abierto el valor de S_0 es muy pequeño y el fondo es caso horizontal. (Munson et al., 1999, p.629)

Figura 3

Geometría característica de un canal abierto



Nota. Tomado de *Fundamentos de mecánica de fluidos* (p. 630), por Munson et al., 1999, Limusa, S. A.

Si el fondo de la canal es recto y la pendiente del fondo es constante la caída de presión es la sección 1 y 2 puede expresarse como $z_1 - z_2 = S_0 L$ por lo que la ecuación se convierte, el cual es una ecuación independiente del nivel de referencia de elevación.

$$y_1 + S_0 L + \frac{v_1^2}{2g} = y_2 + \frac{v_2^2}{2g} + h_L \quad \text{Ec. (18)}$$

Según Munson et al., (1999) menciona las ecuaciones de energía para canales abiertos:

La pérdida de carga se escribirá en términos de la pendiente de la línea de energía, $S_f = h_L/l$ también llamada pendiente de fricción, la línea de energía está situada a una distancia z (la elevación que hay desde algún nivel hasta el fondo del canal) más la pérdida de carga (P/γ) más la carga de velocidad ($v^2/2g$) por arriba del nivel.

$$y_1 - y_2 = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} + (S_f - S_0)L \quad \text{Ec. (19)}$$

Si no hay pérdida de carga, la línea de energía es horizontal ($S_f = 0$) y la energía total del flujo puede cambiar entre energía cinética y energía potencial de manera conservativa. En el caso específico de un fondo horizontal de canal horizontal ($S_0 = 0$). (p. 629)

$$y_1 - y_2 = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} \quad \text{Ec. (20)}$$

2.4.3. Radio hidráulico y numero de Reynolds en el flujo en canal abierto

2.4.3.1. Radio hidráulico

Una característica de los canales abiertos es el radio hidráulico, que se define como la relación entre el área de la sección transversal del flujo neto y el perímetro de la sección transversal mojada. (Mott y Untener, 2015, p. 375)

$$R_h = \frac{A}{WP} = \frac{\text{Área}}{\text{Perímetro mojado}(wp)} \quad \text{Ec. (21)}$$

2.4.3.2. Número de Reynolds para canales abiertos

$$Re = \frac{vR_h}{\mu} \quad \text{Ec. (22)}$$

Donde los rangos son:

- $Re < 500$, flujo laminar.
- $500 < Re < 2000$, flujo transitorio.
- $Re > 2000$, flujo turbulento (Mott y Untener, 2015).

2.4.4. Flujo en un canal de profundidad uniforme

Las características de un flujo uniforme es que las pendientes de la superficie y del fondo son las mismas. Se usará el termino S_o para referirnos a la pendiente del fondo de canal y S_f se refiere a la pendiente de la línea de energía. Por lo tanto $S_o = S_f$ para un fluido uniforme, en canales prismáticos existe el flujo uniforme, es decir, en canales con sección rectangular, trapezoidal, triangular y circular, además la pendiente S_o debe ser constante, en cambio sí es cambiante la corriente de flujo variado. (Mott y Untener, 2015, p. 376)

La mayoría de los canales están diseñados para transportar fluidos a una misma profundidad a lo largo de su longitud, donde la sección transversal y su profundidad son uniformes en la mayoría de los canales de irrigación, pero en los canales naturales rara vez son uniformes, por lo que se realiza una suposición de flujo uniforme par la aproximación del caudal (Munson et al., 1999, p.634).

2.4.4.1. Flujo permanente y uniforme

Munson et al (1999) afirma que el flujo permanente y uniforme es aquel que no cambia respecto al tiempo y espacio. Donde tenemos:

- y_1, y_2 son las profundidades del canal y las demás profundidades dentro de una sección 1 y 2 son iguales.
- v_1, v_2 son las velocidades medias del canal y las demás velocidades dentro de una sección 1 y 2 son iguales (p.635).

2.4.4.2. Geometría de los canales abiertos típicos

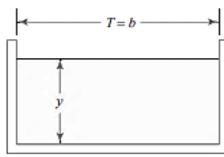
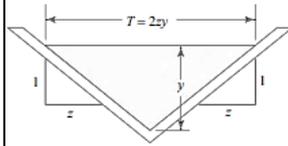
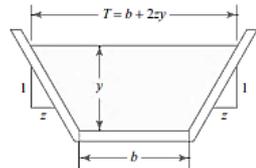
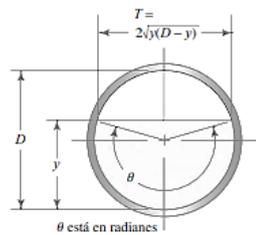
El tramo de canales naturales tiene una forma irregular y cambia constantemente de una posición a otra, los canales artificiales se diseñan con secciones geométricas regulares, siendo las más usadas: la trapezoidal, la rectangular, la triangular y la semicircular. Para la selección de los canales depende del tipo de canal que se va construir, donde la trapezoidal es la más común en los revestimientos y no revestimientos, la rectangular en los revestimientos con materiales estables, la triangular en los pequeños y en

cunetas de carreteras y la semicircular en alcantarillas, colectores y túneles. (Sotelo Ávila, 2002, p. 7)

- Canales trapezoidales, son populares debido a su forma eficiente que tiene una gran área de flujo en relación con el perímetro mojado. Los lados inclinados son adecuados para canales hechos en tierra debido a que se pueden establecer pendientes con un ángulo en el que los materiales de construcción sean estables.
- Canales rectangulares es un caso especial del trapecoide con una pendiente lateral de 90° o $z = 0$. Los canales de concreto formado suelen hacerse con esta forma, entre otros. (Mott y Untener, 2015, p 380)

Figura 4

Geometría de secciones de canal abierto

Sección	Área A	Perímetro mojado WP	Radio hidráulico R
<p>Rectángulo</p> 	by	$b + 2y$	$\frac{by}{b + 2y}$
<p>Triángulo</p> 	zy^2	$2y\sqrt{1 + z^2}$	$\frac{zy}{2\sqrt{1 + z^2}}$
<p>Trapezoide</p> 	$(b + zy)y$	$b + 2y\sqrt{1 + z^2}$	$\frac{(b + zy)y}{b + 2y\sqrt{1 + z^2}}$
<p>Círculo</p>  <p>$T = 2\sqrt{y(D-y)}$</p> <p>θ está en radianes</p>	$\frac{(\theta - \text{sen } \theta) D^2}{8}$	$\theta D/2$	$\left[\frac{\theta - \text{sen } \theta}{\theta} \right] \frac{D}{4}$

Nota: θ debe estar en radianes.
 Para $y < D/2$, $\theta = \pi - 2 \text{sen}^{-1}[1 - (2y/D)]$
 Para $y > D/2$, $\theta = \pi + 2 \text{sen}^{-1}[(2y/D) - 1]$

Nota. Adoptado de *Mecánica de fluidos* (p. 381), por Mott y Untener, 2015, Pearson Educación.

2.4.5. Flujo de variación rápida

El flujo en canales abiertos se llama flujo de variación rápida si su profundidad cambia de manera evidente en una distancia relativamente corta en la dirección del flujo. Estos flujos ocurren en compuertas de desagüe, vertederos de pared delgada o gruesa, cascadas y la sección de transición de canales que se expanden o se contraen. Un cambio en la sección transversal del canal es importante razón para que los flujos de variación rápida ocurran. Pero algunos flujos de variación rápida, como los flujos a través de compuertas de desagüe, suceden inclusive en regiones donde la sección transversal del canal es constante. (Munson et al., 1999, p.652)

2.4.5.1. Vertedero de pared delgada

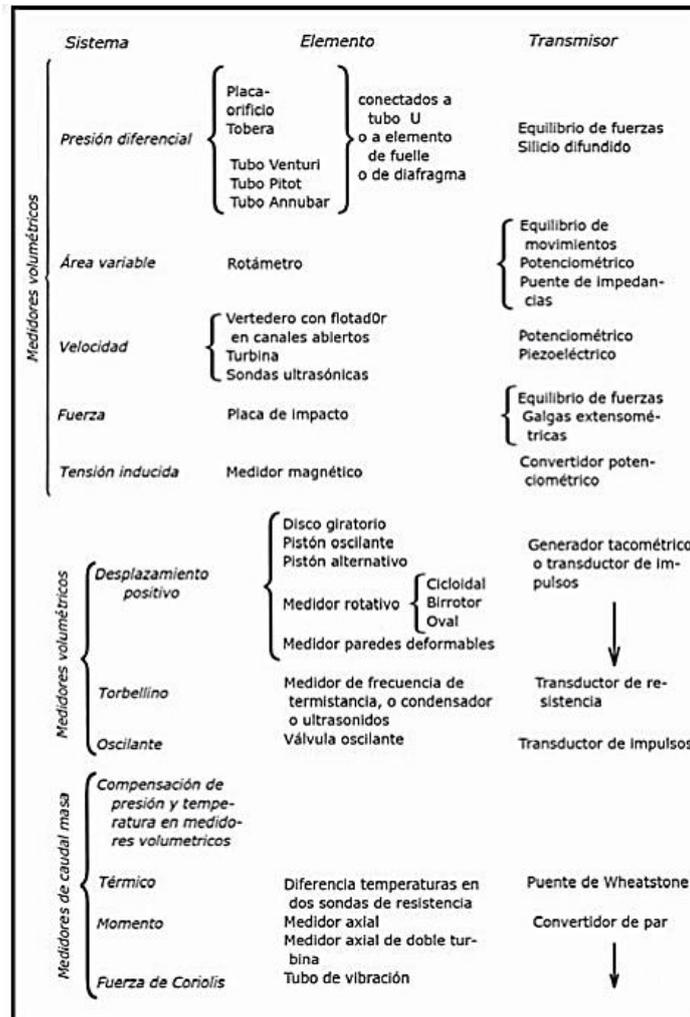
Un vertedero de pared delgada es esencialmente una placa lisa vertical de borde pronunciado colocada a través del canal de modo que el fluido debe circular a través del borde pronunciado y caer en el depósito corrientes debajo de la placa del vertedero. Las formas de la placa son el rectangular, el triangular y trapezoidal que son las más comunes. Los principales mecanismos que ejercen en un vertedero son la gravedad y la inercia, donde la gravedad acelera al fluido desde su elevación de superficie libre corriente arriba del vertedero hasta una velocidad más alta a medida que fluye hacia abajo (Munson et al., 1999, p.659).

2.5. MEDIDORES DE FLUJO

La medición de flujos de fluidos es de suma importancia tanto en las grandes industrias, nivel de laboratorios y planta piloto. Tenemos dos tipos de medidores el volumétrico y el masico, donde se determina el caudal de volumen y el caudal de masa respectivamente. Para medidas generales de flujo se usan los medidores volumétricos y cuando la precisión de la medida es necesaria se usa los medidores de caudal masico. (Creus, 2010, p.105)

Figura 5

Los principios de medida de los medidores de caudal



Nota. Tomado de *Instrumentación industrial* (p.105), por Creus, 2010, Alfaomega.

Dulhoste (2015), las mediciones de flujo en los diferentes procesos industriales se hacen necesarios por dos principales razones:

- En un proceso se debe determinar los caudales de los fluidos, para establecer la proporción tanto en masa o en volumen.
- Es necesario calcular los costos, para ello se establece la porción de fluido gastado. (p.1)

2.5.1. Factores para la selección de un medidor de flujo

Existen muchos dispositivos para medición de flujo, algunos miden el caudal volumétrico en forma directa, otros miden la velocidad de flujo promedio que después se puede convertir en rapidez de flujo de volumen mediante el uso de $Q = Av$. Algunas proporcionan mediciones primarias directas, mientras que otros requieren una calibración o la aplicación de un coeficiente de descarga al resultado observado en el dispositivo. Para la selección de medidores se debe tomar en cuenta algunos indicadores como las presiones, los niveles de líquido, los contadores mecánicos. También se debe tomar en cuenta el costo, el tamaño del medidor que se seleccionara, la presión del sistema entre otros. (Mott y Untener, 2015, p.396)

Mott y Untener (2015) plantea que para la selección de fluido se debe tomar en cuenta varios factores

- **Rango:** Los medidores disponibles comercialmente pueden medir flujos en agua de riego, sistema de agua y en colectores municipales desde (mL/s), para mediciones más exactas de laboratorio hasta (m³/s), las relaciones de caudales máximos que los medidores puedan medir sobre los caudales mínimos que puedan medir dentro de la precisión establecida es la cobertura.
- **Precisión requerida:** Si tenemos una precisión de 5 % del flujo real, entonces el medidor de flujo se instaló y opera de forma adecuada. La mayoría de los medidores tiene un rango de precisión del 0,5 % al 2 %, donde también si se desea mayor precisión los costos son otro de los factores a considerar.
- **Pérdida de presión:** Las construcciones de los tipos de medidores son variados, donde de acuerdo a que tipo de medidor varia las pérdidas de energía o perdidas de presión a excepción de algunos casos. Al colocar una limitación o unos dispositivos mecánicos en la línea de fluido el cual también genera una pérdida de presión.
- **Tipo de fluido:** En los fluidos tenemos los líquidos y los gases donde es uno de los factores que interviene por sus propiedades del fluido. También es importante la viscosidad del fluido, la temperatura de operación, las corrosiones y la conductividad eléctrica.
- **Calibración:** Hay medidores los cuales vienen ya calibrados para tomar lecturas directas mientras que otros medidores se debe realizar una calibración previamente antes de su uso, donde para calibrar se debe usar

otros medidores como un estándar para comparar las lecturas del medidor que se calibrara. (p.397)

2.5.2. Medidores volumétricos

Los medidores volumétricos determinan el caudal en el volumen de fluido, bien sea directamente (desplazamiento), bien indirectamente por deducción o inferencia (presión diferencial, área variable, velocidad, fuerza, tensión inducida, torbellino). Es necesario señalar que la medida de caudal volumétrico en la industria se lleva a cabo principalmente con elementos que dan lugar a una presión diferencial al paso del fluido. Entre estos elementos se encuentran la placa de orificio o diafragma, la tobera, el tubo de Venturi, el tubo Pitot y el tubo annubar. (Creus, 2015, p.106)

2.5.3. Medidores de presión diferenciales

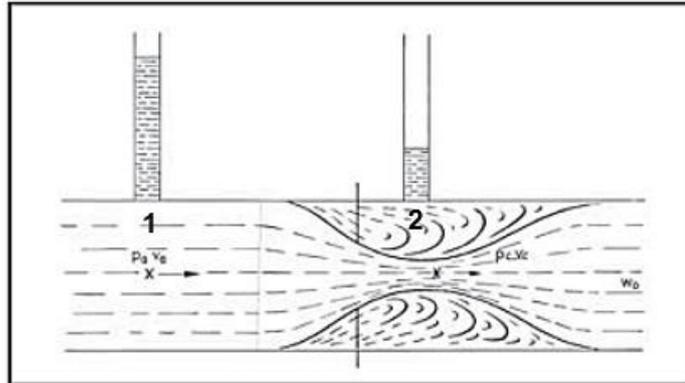
Los medidores de presión diferencial se utilizan ampliamente en aplicaciones y laboratorios industriales por su sencillez, confiabilidad, robustez y bajo costo. Su funcionamiento se basa en el principio de que, cuando hay una obstrucción en un ducto o tubo, aparece un diferencial de presión a través de la obstrucción. Esta caída de presión se puede correlacionar con la descarga mediante una calibración, y después se puede utilizar la curva de presión-descarga para determinar la descarga leyendo la presión diferencial. (Potter y Wiggert, 1998, p. 645)

2.5.3.1. Fórmula general

Los factores de presión se basan en la caída de presión causada por la constricción de la tubería a través de la cual fluye el fluido. La caída de presión es captada por tomas de presión colocadas antes y después del medidor (Creus, 2010, p. 106).

Figura 6

Esquema del principio de Bernoulli



Nota. Tomado de *Instrumentación industrial* (p.107), por Creus, 2010, Alfaomega.

La figura 6 muestra un medidor de presión diferencial representativo, consideremos que hay un flujo estable en un ducto circular donde se obtiene la ecuación Bernoulli (Ec. 14) y con la ecuación de continuidad (Ec. 4)

$$\frac{P_1}{\rho g} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\rho g} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g}$$

$$A_1 v_1 = A_2 v_2$$

Con estas dos ecuaciones despejamos la velocidad de flujo en la contracción.

$$v_2 = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}} \sqrt{2g(p_1 - p_2)} \quad \text{Ec. (23)}$$

La descarga ideal es igual al área multiplicada por la velocidad promedio.

$$Q_{ideal} = v_1 A_2 = \frac{A_2}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}} \sqrt{2g(p_1 - p_2)} \quad \text{Ec. (24)}$$

Donde el valor de la diferencia de \$(p_1 - p_2)\$ es según el caso de uso del manómetro:

- Piezómetro:

$$P_1 - P_2 = gh\rho \quad \text{Ec. (25)}$$

- Manómetro diferencial:

$$P_1 - P_2 = gh(\rho_m - \rho) \quad \text{Ec. (26)}$$

Según Potter y Wiggert (1998) menciona que la descarga real difiere de la ideal por dos razones principales, puesto que el flujo de fluido es real.

- La fricción hace que la velocidad en la línea central sea mayor que la velocidad media en cada sección transversal.
- La carga piezométrica evaluada en la vena contracta es h_2 , la lectura conocida en la derivación de presión corriente abajo. También, puesto que se desconoce el área de la vena contracta, se sustituye $C_d A_2$, donde C_d es el coeficiente de descarga. (pp. 646-647)

Donde el coeficiente de descarga es el producto del coeficiente de contracción y un coeficiente de velocidad, de modo que la descarga real es:

$$Q_{real} = \left[\frac{C_d A_2}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}} \sqrt{2g\Delta h(P_1 - P_2)} \right] \quad Ec. (27)$$

Para una sección transversal circular, que es típica de la generalidad de los medidores de presión diferencial, conviene introducir el coeficiente de diámetro.

$$\beta = \sqrt{\frac{A_2}{A_1}} = \frac{d}{D} \quad Ec. (28)$$

2.5.3.2. Elementos de presión diferencial

Creus (2010) afirma que la placa de orificio o también llamada diafragma se basa en una placa con una perforación que se instala en la tubería. Donde se realiza dos tomas manométricas diferenciales antes y después de la placa. (p.116)

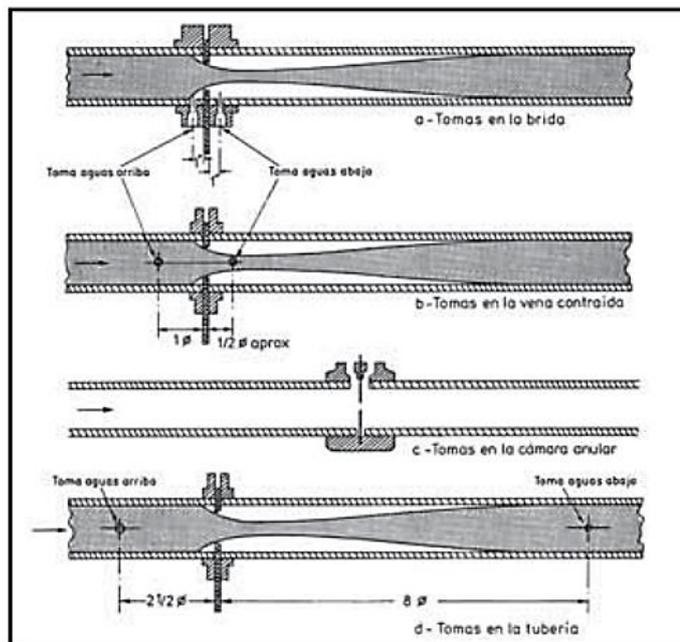
Según Creus (2010) para las tomas manométricas hay diferentes arreglos como:

- **Tomas en la brida:** Son de las más usadas por su fácil instalación, donde se taladra las tomas en las bridas y ubicada a 1" de distancia de la placa, se observa en la figura 7.a.
- **Tomas en la vena contraída:** La toma siguiente está ubicada donde la vena logra su diámetro más pequeño, donde depende de la razón de diámetros que sería alrededor de $1/2 \varnothing$ de la tubería y la toma previa a $1 \varnothing$ de la tubería, se observa en la figura 7.b.

- **Tomas en la cámara anular:** Las tomas están colocadas seguidamente antes y después del orificio y se requiere usar una cámara anular especial, este tipo de tomas es usada en países europeos, se muestra en figura 7.c.
- **Tomas en tuberías:** Las tomas antes y después están colocadas a $2 \frac{1}{2} \phi$ y 8ϕ respectivamente. Son usadas cuando se necesita aumentar la distancia de medidas de medidores de caudales dados, se muestra en la figura 7.d. (p. 117)

Figura 7

Disposición de las tomas de presión diferencial



Nota. Tomado de *Instrumentación industrial* (p.116), por Creus, 2010, Alfaomega.

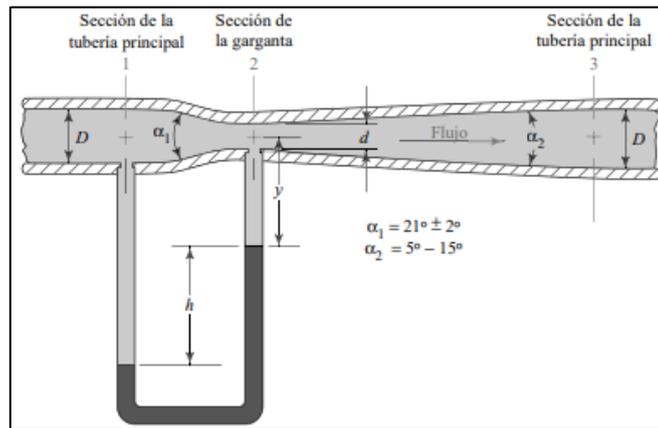
2.5.3.3. Tubo Venturi

Un medidor de tubo Venturi consiste en un cono truncado en la cual el área de la sección transversal perpendicular al flujo disminuye, de una sección cilíndrica corta de un cono truncado en el cual el área de la sección transversal aumenta hasta su valor original. Hay tomas de presión tanto corriente arriba como la sección cilíndrica corta (la “garganta”); están conectados a algún dispositivo de medición de diferencia de presión. (Nevers, 2007, p.148)

Le permite medir caudales un 60 % más altos que en la placa de orificio y con una caída de presión de un (10 - 20) % de presión diferencial, tiene alta precisión de aproximadamente $\pm 0,75$ % (Creus, 2010).

Figura 8

Medidores de tubo Venturi



Nota. Tomado de *Mecánica de fluidos* (p.398), por Mott y Untener, 2015, Pearson Educación.

Las proporciones recomendadas son ángulo del cono de entrada $\alpha_1 = 21 \pm 1$ grados, ángulo del cono de salida $\alpha_2 = 7$ a 15 grados. Para asegurar mejores resultados, conviene que las secciones recta y cónica estén unidas por medio de superficies curvas lisas. (Dulhoste, 2015, p.12)

El flujo volumétrico del Venturi es:

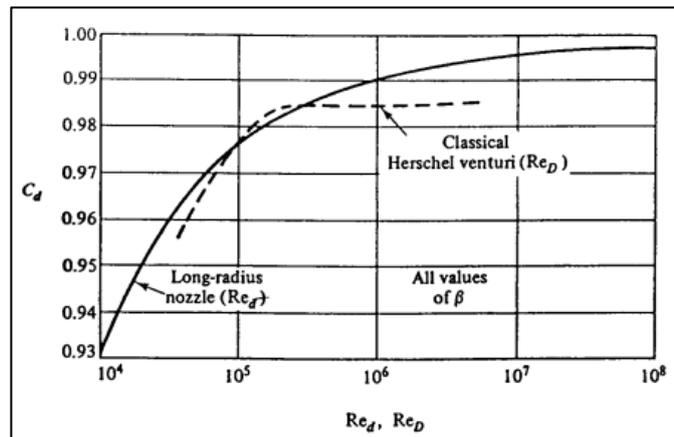
$$Q_{real} = \frac{C_v A_2}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}} \sqrt{\frac{2g\Delta h(\rho_{Hg} - \rho_w)}{\rho_w}} \quad Ec. (29)$$

El coeficiente de descarga de Venturi (C_v) no es constante y depende principalmente del número de Reynolds y de la geometría del tubo. Su valor varío ligeramente de un medidor a otro y oscila en el rango de 0,92 a 0,99. Experimentalmente su valor se calcula como:

$$C_v = \frac{Q_{exp}}{Q_{ideal}} \quad Ec. (30)$$

Figura 9

Coefficiente de Venturi vs. número de Reynolds



Nota. Tomado de *Chemical engineering Fluid Mechanics* (p. 297), por Darby, R., 2001.

En la siguiente tabla se mencionan las ventajas y desventajas del medidor de Venturi.

Tabla 5

Ventajas y desventajas de tubo Venturi

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Alta exactitud. • El mantenimiento que requiere es mínimo. • La caída de presión es pequeña. • Se puede usar en la medición de grandes flujos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Alto costo, el costo de fabricación de un tubo de Venturi es alrededor de 20 veces de una placa de orificio que se use para medir el mismo flujo. • Mas difícil de instalar.

Nota: Tomado de *Medición de flujo* (p. 14), por Dulhouste, 2015, Escuela de Ingeniería Mecánica.

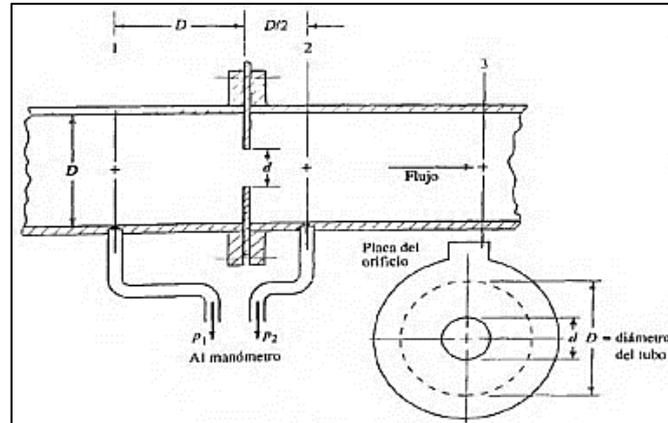
2.5.3.4. Placa de Orificio

El medidor de Venturi descrito antes es un dispositivo confiable de medición de flujo, Además, el caudal presenta muy poca perdida de presión, por esta razón se usa ampliamente en particular para los flujos líquidos y gases de gran volumen. Sin embargo, el medidor es complejo de construir y por eso es costoso. Por lo que el medidor de placa de orificio consiste en una placa plana con un orificio y otra justo corriente abajo, si la dirección de flujo es horizontal y se aplica la ecuación de Bernoulli ignorando la fricción, del punto 1 al 2. Se

obtiene exactamente la misma ecuación que se determinó para un medidor de Venturi. (Nevers, 2007, p. 152)

Figura 10

Esquema de instalación de placa orificio

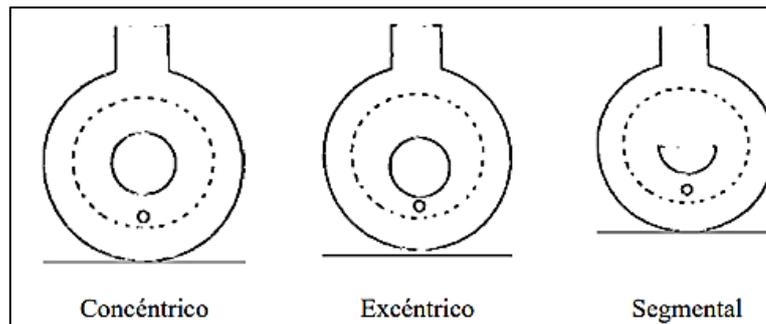


Nota. Adoptado de *Mecánica de fluidos* (p.483), por Mott, 2006, Pearson Educación.

Las placas de orificio tienen tres formas los cuales son concéntrico, excéntrico o segmental, los cuales los dos últimos permiten medir fluidos que contengan sólidos y gases en pequeñas cantidades. Además, estos medidores tienen una exactitud de aproximadamente $(\pm 1 - \pm 2) \%$ (Creus, 2010).

Figura 11

Tipos de orificio



Nota. Tomado de *Medición de flujo* (p. 5), por Dulhouste, 2015, Escuela de Ingeniería Mecánica.

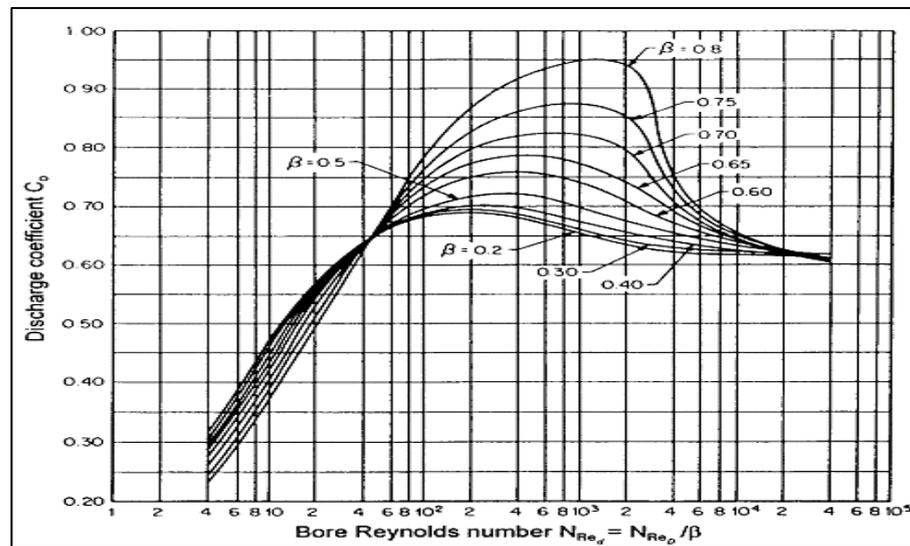
El flujo volumétrico para placa de orificio es:

$$Q_{real} = \frac{C_o A_2}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}} \sqrt{\frac{2g\Delta h(\rho_{Hg} - \rho_w)}{\rho_w}} \quad Ec. (31)$$

El valor de coeficiente de contracción es $C_o = 0,62$ para el caso de $Re(orificio) > 10000$. (Nevers, 2007).

Figura 12

Coeficiente de orificio vs. número de Reynolds



Nota. Tomado de *Chemical engineering Fluid Mechanics* (p. 306), por Darby, R., 2001.

En la siguiente tabla se mencionan las ventajas y desventajas del medidor de orificio.

Tabla 6

Ventajas y desventajas de placa orificio

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> Bajo costo. Fácil de fabricar. Fácil de instalar. No requiere de mantenimiento excesivo 	<ul style="list-style-type: none"> Su exactitud no es muy elevada, del orden de ± 1 a $\pm 21\%$. Sufren permanente desgaste debido a la erosión del fluido.

Nota. Tomado de *Medición de flujo* (p. 9), por Dulhouste, 2015, Escuela de Ingeniería Mecánica.

2.5.4. Medidor de área variable

Existen muchos tipos de flujómetros de área variable, como el flujómetro basado por la gravedad, donde se coloca verticalmente para que el fluido entre desde el fondo y salga de lo alto, la precisión de estos flujómetros usualmente es de $\pm 5\%$, estos medidores requieren de una verificación visual por lo que el fluido que se emplea debe ser claros o fluidos que no opaquen el flotador, por lo que es recomendable una instalación con tráfico mínimo. (Cengel y Cimbala, 2012, p. 388)

2.5.4.1. Rotámetro

En los dispositivos previamente analizados se emplea una geometría fija, y en ellos se lee una diferencia en presión que es proporcional al cuadro de gasto volumétrico. En un rotámetro se emplea una diferencia de presión fija y una geometría variable, la cual es una función simple del gasto volumétrico, consiste en un tubo ahusado transparente (de vidrio o plástico), en el cual el fluido cuyo flujo se va a medir fluye hacia arriba y un flotador interior, el cual puede tener varias formas. (Nevers, 2007, p. 154)

Dulhouste (2015) menciona algunas características del rotámetro son:

- **Linealidad:** Un rotámetro típico tiene una escala que se aleja de lo lineal en un 5 %.
- **Exactitud:** Esta varía con la longitud de la escala y el grado de calibración. Es común una exactitud de $\pm 2\%$ de la escala completa.
- **Capacidad:** Los rotámetros son los instrumentos más comúnmente utilizados en la medición de pequeños flujos. (p. 28)

Figura 13

Dos tipos de medidores de área variable



Nota: La figura muestra dos tipos de rotámetros, a) medidor ordinario basado en la gravedad y b) un medidor opuesto a un resorte. Tomado de *Mecánica de fluidos fundamentales y aplicaciones* (p. 389), por Cengel y Cimbala, 2012, McGrawHill Educación.

En la siguiente tabla se mencionan las ventajas y desventajas del rotámetro.

Tabla 7

Ventajas y desventajas del rotámetro

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none">• Las escalas de las lecturas son casi lineales.• No es necesario mucha longitud de tubería antes y después del rotámetro.• Estos tienen mucha resistencia a fluidos corrosivos.	<ul style="list-style-type: none">• El medidor es sensible a la variación de viscosidad del fluido.• Si el medidor es de vidrio es poco resistente.• Si se necesita un rotámetro de 4" tiene mayor costo.

Nota. Tomado de *Medición de flujo* (p. 28), por Dulhouste, 2015, Escuela de Ingeniería Mecánica.

2.5.5. Medidor de canal abierto

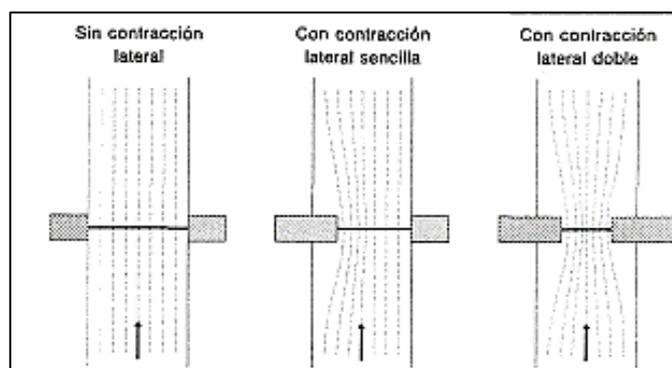
Un canal abierto es aquel que tiene la superficie superior abierta a la atmosfera. Los más conocidos son los arroyos naturales, las alcantarillas que funcionan parcialmente llenas, los sistemas de manejo de aguas residuales y los drenajes pluviales. En la actualidad en las diferentes industrias se emplean canales abiertos para recolectar el exceso de los líquidos de proceso y devolverlos a los tanques de retención entre otros. Son dos tipos que son utilizados ampliamente los vertederos y los canales aforados. (Mott y Untener, 2015, p 388)

2.5.5.1. Vertederos

En un vertedero ocurre la descarga de un líquido que se realiza por encima de una placa y a superficie libre, donde puede presentar diferentes formas según las finalidades a que se destinen. Así, cuando la descarga se efectúa sobre una placa con perfil de cualquier forma, pero con arista en contacto con el agua, el vertedero es de pared delgada; por el contrario, cuando el contacto entre la pared y la lámina vertiente es más bien toda una superficie, el vertedero es de pared gruesa. Ambos tipos pueden utilizarse como dispositivo de aforo en laboratorios o en canales de pequeñas dimensiones, pero el segundo puede emplearse como obra de control o de excedencias en una presa y también de aforo en canales grandes. (Sotelo Ávila, 1997, p. 241)

Figura 14

Contracción lateral en vertederos



Nota. Tomada de *Elementos de diseño para acueducto y alcantarillados* (p. 65), por López Cualla, 1995, Escuela colombiana de ingeniería.

Villón Béjar (2007) menciona algunas ventajas que ofrecen los vertederos en la medición del agua:

- Se logra precisión en los aforos
- La construcción de la estructura es sencilla
- No son obstruidos por los materiales que flotan en el agua.
- La duración del dispositivo es relativamente larga. (p.339)

2.5.5.2. Vertedero rectangular

“Los vertederos rectangulares, en general, se utiliza para caudales entre 200 L/s y 1600 L/s. en la siguiente figura se observa un vertedero de pared delgada con contracciones laterales” (López Cualla, 1995, p. 64).

La ecuación de flujo volumétrico para un vertedero rectangular es generada desde la ecuación de Bernoulli entre 2 puntos, el primero aguas arriba y el segundo en la misma cresta.

La descarga teórica es:

$$Q = \frac{2}{3} \sqrt{2g} b h^{3/2} \quad \text{Ec. (32)}$$

La descarga real se obtiene aplicando un coeficiente de descarga (μ) y llega a:

$$Q = \frac{2}{3} \sqrt{2g} \mu b h^{3/2} \quad \text{Ec. (33)}$$

Donde:

Q : Caudal (m^3/s)

g : gravedad (m/s^2)

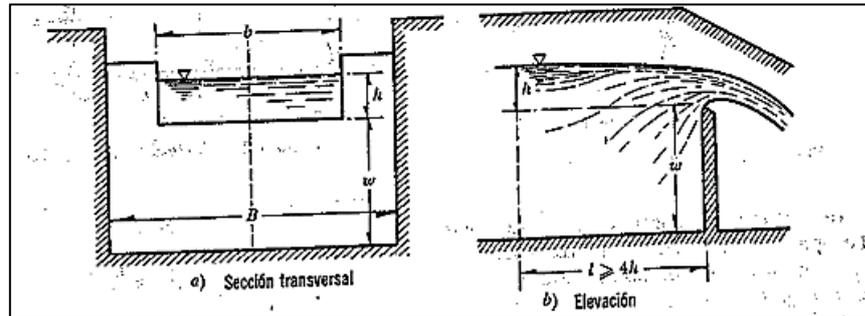
μ : coeficiente de gasto.

b : ancho de vertedero (m)

h : Altura de agua sobre la horizontal (m).

Figura 15

Vertedero rectangular con contracciones, corte y perfil



Nota. Tomado de Hidráulica general (p. 243), por Sotelo Ávila, 1997, (Limusa, S. A.)

según Sotelo Ávila (1997) para tener mejores resultados en la medición de gastos con vertederos rectangulares se recomienda la cresta del vertedero sea perfectamente horizontal. El plano del vertedero deber normal al flujo y la cara, aguas arriba, perfectamente vertical, plana y lisa. El vertedero debe instalarse al centro del canal recto que tenga una longitud mínima de cuatro veces la longitud de la cresta del vertedero. (p.245)

Para determinar el coeficiente de descarga se tiene una serie de ecuaciones las de forma experimental.

Tabla 8

Fórmulas experimentales para determinar el coeficiente de gastos para vertederos rectangulares

Autor	Fórmula	Límites de aplicación
Hegly (1921)	$\mu = \left[0,6075 - 0,045 \left(\frac{B-b}{B} \right) + \frac{0,0041}{h} \right] \left[1 + 0,55 \left(\frac{b}{B} \right)^2 \left(\frac{h}{h+w} \right)^3 \right]$	$0,10\text{m} \leq h \leq 0,60\text{m}$ $0,50\text{m} \leq b \leq 2,00\text{m}$ $0,20\text{m} \leq w \leq 1,13\text{m}$ $h/b > 0,13$
Sociedad Suiza de ingenieros y arquitectos (1924)	$\mu = \left[0,578 - 0,037 \left(\frac{b}{B} \right)^2 + \frac{3,615 - 3 \left(\frac{b}{B} \right)^2}{100h + 1,6} \right] \left[1 + 0,5 \left(\frac{b}{B} \right)^4 \left(\frac{h}{h+w} \right)^2 \right]$	$0,02\text{m} \leq h \leq 0,8\text{m}$ $b \leq 0,38\text{m}; w \geq 0,30\text{m}$ $h/w \leq 1$ contracciones laterales sin contracciones: $0,02\text{m} \leq h \leq 0,8\text{m}; h/w \leq 1$ $h/b \leq 1$

Hamilton-smith	$\mu = 0,616\left(1 - \frac{b}{10B}\right)$	<p>0,075 m ≤ h ≤ 0,6 m; 0,3m ≤ b</p> <p>0,3m ≤ w; h ≤ w/2</p> <p>b ≤ (B-2h), h/b ≤ 0,5</p> <p>Si B(h+w) < 10bh, Reemplazar</p> <p>$h' = h + 1,4\left(\frac{v^2}{2g}\right)$ siendo v = $\left[\frac{Q}{B(h+w)}\right]$ es la velocidad.</p>
Francis	$\mu = 0,623 \left[1 - 0,1n \frac{h}{b}\right]$ $\left[\left(1 + \frac{v_o^2}{2gh}\right)^{\frac{3}{2}} - \left(\frac{v_o^2}{2gh}\right)^{\frac{3}{2}}\right]$	<p>0,18 ≤ h ≤ 0,5m</p> <p>2,40m ≤ b ≤ 3,0m</p> <p>0,6m ≤ w ≤ 1,5m</p> <p>b ≥ 3h; v = $\left[\frac{Q}{B(h+w)}\right], n=2$</p>
Rehbock	$\mu = \left[0,6035 + 0,0813 \left(\frac{h + 0,0011}{w}\right)\right] \left[\left(1 + \frac{0,0011}{h}\right)^{\frac{3}{2}}\right]$	<p>0,18m ≤ h ≤ 0,5m</p> <p>b ≥ 0,3m</p> <p>w ≥ 0,06m</p> <p>h/w ≤ 1</p> <p>vale solo sin contracciones laterales.</p>

Nota. Tomado de Hidráulica general (p. 246), por Sotelo Ávila, 1997, (Limusa, S.A.)

Otra fórmula para vertederos rectangulares es el de Kindsvater-Carter que es una fórmula de mayor confiabilidad es aplicada en todos los vertederos rectangulares con contracciones o sin ellas, el coeficiente de descarga propia de la formula tiene origen experimental y aparece en la figura 16. (Rocha Felices, s.f p.473)

$$Q = C_e \frac{2}{3} \sqrt{2g} (b + K_b) (h + K_h)^{\frac{3}{2}} \quad \text{Ec. (34)}$$

Donde:

b : Longitud equivalente del vertedero.

K_b : en función de b/B.

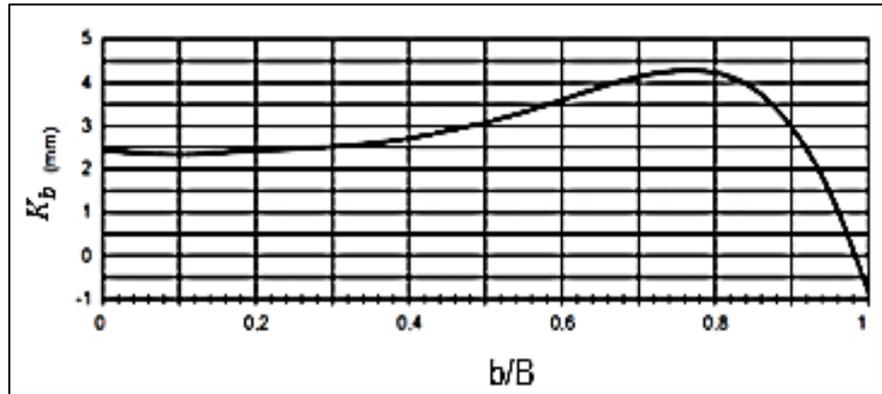
K_h : 0,001m para todos los valores de b/B.

C_e : Coeficiente efectivo de descarga.

Usando la figura 14 y 15 para obtener la ecuación de flujo volumétrico.

Figura 16

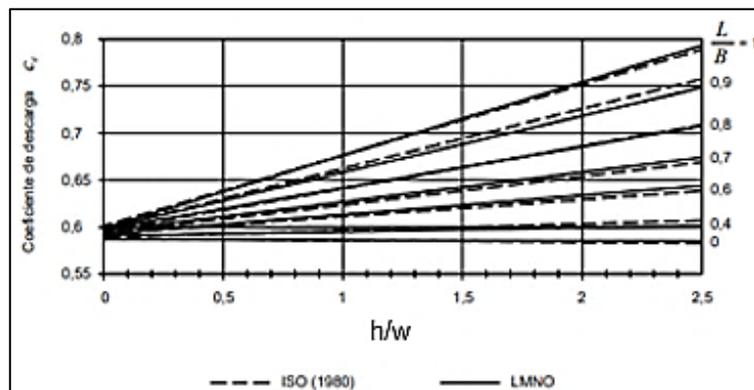
Grafica para la determinación del constante kb



Nota. Tomada de *Hidráulica de tuberías y canales* (p. 473), por Rocha Felices, s.f.

Figura 17

Coefficiente de descarga según Kindsvater y Carter



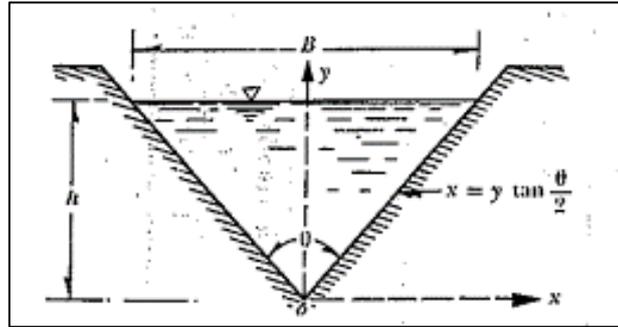
Nota. Tomada de *Hidráulica de tuberías y canales* (p. 474), por Rocha Felices, s.f.

2.5.5.3. Vertedero triangular

“Son usados para caudales menores de 30L/s y cargas hidráulicas comprendidas de 6 a 60 cm. Su sensibilidad es mejor que las de los vertederos rectangulares para caudales comprendidos entre 40 y 300 L/s” (López Cualla, 1995, p. 66).

Figura 18

Vertedero triangular



Nota. Tomado de *Hidráulica general* (p. 251), por Sotelo Ávila, 1997, (Limusa, S. A.)

La ecuación teórica de los vertederos triangulares es:

$$Q = \frac{8}{15} \sqrt{2g} \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \mu h^{\frac{5}{2}} \quad \text{Ec. (35)}$$

Donde:

Q : Caudal (m^3/s).

θ : Ángulo central.

h : Carga sobre la cresta del vertedero (m).

μ : Coeficiente de gasto.

La ecuación para el cálculo de caudal real es:

$$C = \frac{8}{15} \sqrt{2g} \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \mu \quad \text{Ec. (36)}$$

La fórmula de descarga para un vertedero triangular de un ángulo dado puede expresarse así.

$$Q = C h^{5/2} \quad \text{Ec. (37)}$$

“Los valores característicos de C_{vt} para vertederos triangulares están en el intervalo de 0,58 a 0,62” (Munson et al., 2013, p. 584).

Los valores de coeficientes de gastos se determinan de forma experimental las fórmulas se pueden observar en la tabla 9.

Tabla 9

Fórmula experimental para determinar los coeficientes de gasto μ o C para vertederos triangulares con diferentes ángulos

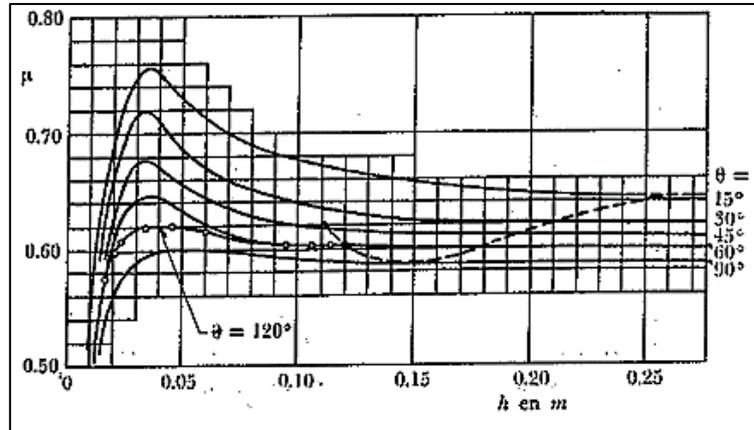
Autor	Fórmula	Límites de aplicación
Universidad Católica de Chile	$C = \frac{8}{15} \sqrt{2g} \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \mu k$	$15^\circ \leq \theta \leq 120^\circ$ Si $B/h \geq 5$ con $\theta = 90^\circ$ Si $B/h \geq 2,0$ para $\theta = 45^\circ$. $K=1$
Gourley y Crimp	$C = \frac{1,32 \tan\left(\frac{\theta}{2}\right)}{h^{0,03}}$	Valido solo para 45° , 60° y 90°
Hegly (1921)	$\mu = \left[0,5812 + \frac{0,00375}{h}\right] \left\{1 + \left[\frac{h^2}{B(h+w)}\right]^2\right\}$	$\theta = 90^\circ$ $0,1 \text{ m} \leq h \leq 0,5 \text{ m}$ y profundidades w pequeñas.
Barr (1909)	$\mu = 0,565 + \frac{0,0087}{h^{0,5}}$	$\theta = 90^\circ$ con cargas $0,05 \text{ m} \leq h \leq 0,25 \text{ m}$; $W = 3h$ $B = 8h$
Koch (1923) Yarnall (1926)	$\mu = 0,58$	$\theta = 90^\circ$ con cargas muy grandes, $w = 3h$, $B = 8h$ No se limita con precisión el rango de validez.
Heyndrickx	$\mu = \left[0,5775 + 0,214h^{1,85}\right] \left\{1 + \left[\frac{h^2}{B(h+w)}\right]^2\right\}$	$\theta = 60^\circ$ con cargas normales. Es bastante precisa

Nota. Tomado de *Hidráulica general* (p. 252), por Sotelo Ávila, 1997, (Limusa, S. A.)

Con la fórmula de la Universidad Católica de Chile, para determinar el coeficiente de gastos (μ) y el valor de k se usa las siguientes figuras.

Figura 19

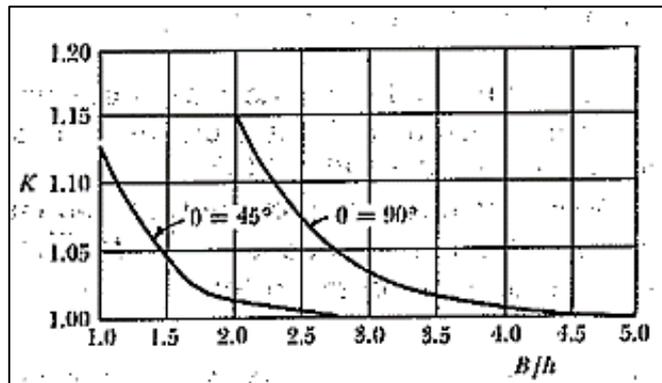
Coefficiente de gasto u de vertedero triangular en la fórmula de la Universidad Católica de Chile



Nota. Tomado de Hidráulica general (p. 253), por Sotelo Ávila, 1997, (Limusa, S. A.)

Figura 20

Valores de K en la fórmula de la Universidad Católica de Chile para vertederos triangulares



Nota. Tomado de Hidráulica general (p. 253), por Sotelo Ávila, 1997, (Limusa, S. A.)

2.6. NORMAS APLICADAS PARA MEDIDORES DE FLUJO

Según Creus, (2010) menciona estas normas nos indican las condiciones de instalación en tramos rectos de las tuberías con distancia mínimas. Cuando esas condiciones de distancia son críticas. Para el cálculo de los diafragmas, toberas y tubos Venturi se utilizan normas variadas, entre las cuales se encuentran las siguientes:

Tabla 10*Normas aplicadas para los medidores diferenciales*

N°	Normas estándar	Descripción
1	ISO 5167-1:2003 año confirmado 2014	Medición de caudal de fluido mediante placa de orificio y boquillas
2	ISO 5167-2: 2003 año confirmado 2014	Medición de flujo mediante presión diferencial Método: Orificio
3	ISO 5167-4: 2003 año confirmado 2014	Medición del flujo mediante presión diferencial. Método: Venturi.
4	ISO 4006: 1991 año confirmado 2019	Medición del flujo de fluido en conductos cerrados. Vocabulario y símbolos.

Nota: Tomado de *Water Meters, Instrumentation & SCADA* (p. 63), Por Ministerio de Vivienda y Asuntos Urbanos (2020).

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

En este capítulo se presenta los procedimientos que se realizó para el diseño del módulo del medidor de flujo.

3.1. DELIMITACIÓN DEL ESTUDIO

El diseño del módulo de medidores de flujo se realiza en la Universidad Nacional San Cristóbal de Huamanga en la Facultad de Ingeniería Química y Metalurgia que cuenta con el taller electromecánico “HOLGER K. HANSEN” donde se realizó la construcción y evaluación del módulo utilizando la infraestructura y los ambientes, también las áreas del laboratorio de mecánica de fluidos.

3.2. NIVEL Y TIPO DE INVESTIGACIÓN

El tipo de investigación es aplicada tiene propósitos prácticos inmediatos bien definidos, es decir, se realiza una investigación para actuar, transformar, producir cambios en determinado sector de la realidad. También el nivel explicativo da a conocer las causas que dan origen al hecho en estudio, necesariamente supone la presencia de dos o más variables. (Carrasco, 2005, p.43)

Es una investigación de **tipo aplicada** y **nivel explicativo**, por que al momento de realizar la puesta en marcha del módulo y obtener los datos del caudal, aplicando los principios y fórmulas de mecánica de fluidos en medidores, obtenemos condiciones

controladas y de manipulación de variable independiente para producir unas probables alteraciones en las variables dependientes.

3.3. POBLACIÓN Y MUESTRA

3.3.1. Población

El módulo de medidores de caudal del laboratorio de Mecánica de Fluidos de la Escuela Profesional de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería Química y Metalurgia, Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga.

3.3.2. Muestra

Se toma como muestra el módulo de medidores de caudal del tipo tubo Venturi, placa orificio y vertedero.

3.4. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

3.4.1. Técnicas de recolección de datos

Las técnicas de recolección de datos para este trabajo se usaron:

- Prueba hidráulica, con la finalidad de corroborar las correctas conexiones del módulo de medidores de flujo.
- Prueba de conexiones eléctricas, con la finalidad de verificar el correcto funcionamiento de la parte eléctrica del módulo de medidores de fluido.
- Prueba de aforo volumétrico, con el objetivo de realizar las pruebas en marcha del módulo de medidores de flujo y verificar el adecuado funcionamiento. También, para calibrar los medidores de flujo.
- Para el procesamiento de datos se empleó el programa de Excel para generar tablas, figuras y obtener los resultados para extraer las conclusiones.

3.4.2. Instrumentos de recolección de datos

Para el presente trabajo se usaron los siguientes instrumentos de recolección de datos son:

- Probeta para la medición volumétrica de 1000 mL.
- Termómetro, es para medir a que temperatura se realizara la evaluación para determinar la densidad y viscosidad para realizar los cálculos.
- Cronometro o temporizador, se usa para determinar el tiempo para una determinada cantidad de fluido.
- Medidores de flujo, los cuales son medidor de Venturi, medidor de orificio y vertedero rectangular y triangular.

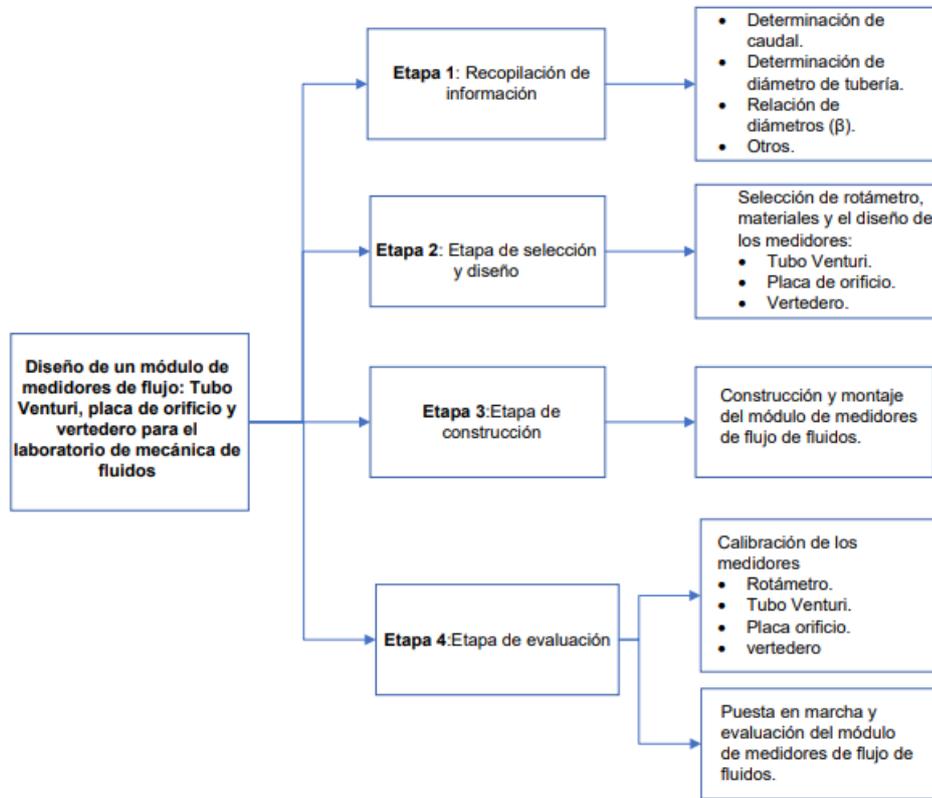
3.5. METODOLOGÍA

El diseño de medidores de flujo de tipo Venturi, orificio y vertedero consisten en 4 etapas.

- Recopilación de información, esta etapa se define las características de los medidores con referencias bibliográficas, definiendo el diámetro de tubería, la relación de diámetros (β) entre otros, que es necesario para el diseño de los medidores de Venturi y orificio.
- Etapa de selección y diseño, en esta etapa se seleccionará el medidor de rotámetro y los materiales que se emplearan para los medidores diseñados tubo Venturi, placa orificio y vertedero. A continuación, se diseñará los medidores donde se usarán soportes bibliográficos como las normas ISO 5167 para el diseño del módulo de medidores de flujo.
- Etapa construcción, teniendo en cuenta la etapa anterior se procederá a la construcción del módulo, posteriormente el montaje del módulo de medidores de flujo.
- Etapa de evaluación, se realizó las pruebas de fugas de agua, pruebas eléctricas, calibración de los medidores y las pruebas en marcha del módulo de medidores de flujo.

Figura 21

Diagrama de bloques del proceso metodología de investigación



3.6. DETERMINACIÓN DE VARIABLES DE OPERACIÓN

La selección de variables es muy importante para el correcto funcionamiento del módulo de medidores de flujo entre ellas las variables fijas los cuales se considerarán:

- Densidad.
- Viscosidad.

También se cuenta con las variables independientes y dependientes definidas para el diseño del módulo de medidores de flujo.

Tabla 11

Variables independientes y dependientes de la investigación

Variables Independientes	Variables dependientes
Medidores de fluido: tubo Venturi, placa orificio y vertedero.	Diseño del módulo de medidores de flujo de fluidos
Indicadores	Indicadores
<ul style="list-style-type: none">• Tubo Venturi.• Placa orificio.• Vertedero	<ul style="list-style-type: none">• Construcción de medidores de flujo.• Evaluación del Módulo de medidores de flujo.

3.7. DATOS DE LA SELECCIÓN DE TUBERÍA

Para el diámetro de la tubería se seleccionó la tubería de acero inoxidable cedula 40 de 1 pulgada con un diámetro interior de 27,3 mm para hacer más asequible la construcción de los medidores de tubo Venturi y placa de orificio.

3.8. DISEÑO DEL MÓDULO DE MEDIDORES DE FLUJO

El diseño de los medidores de flujo se realizó bajo parámetros establecidos en fuentes bibliográficas, donde los medidores diseñados son: tubo Venturi, placa de orificio y vertedero. Además, se usó los programas de AutoCAD 2021 y Revit 2021 para realizar la representación del diseño.

3.8.1. Caudal

Para determinar el caudal se tomará el diámetro de la tubería de 1 pulg. que se usará para el módulo de medidores de flujo.

$$Q = A * v \quad \text{Ec. (38)}$$

Donde:

A: Área de círculo

v: Velocidad de fluido.

También al área de la tubería es:

$$A = \frac{\pi D^2}{4} \quad \text{Ec. (39)}$$

Donde:

D : Diámetro de tubería

3.8.2. Diseño de tubo de Venturi

Los criterios de diseño se toman de las normas ISO 5167, el cual menciona los criterios para un medidor de Venturi. La relación de diámetros depende de la ecuación (28), tanto de la tubería como de la garganta de tubo de Venturi.

$$\beta = \frac{d_v}{D} \quad \text{Ec. (40)}$$

Donde:

d_v : Diámetro de la garganta del tubo Venturi.

D : diámetro de la tubería.

Una vez determinado el valor de la relación de diámetros β , se procede a determinar el coeficiente de Venturi en función al número de Reynolds. Darby (2001) plantea:

El coeficiente de Venturi no difiere mucho de 1 con un valor aproximado de 0,985 para número de Reynolds superiores a $2 * 10^5$, Para $Re > 4000$ el coeficiente de descarga para el Venturi, así como para el orificio se puede calcular con la ecuación general. (p. 297)

$$C_d = C_\infty + \frac{b}{N_{Re}^n} \quad \text{Ec. (41)}$$

Donde los parámetros C_∞ , b y n se dan en el anexo C.

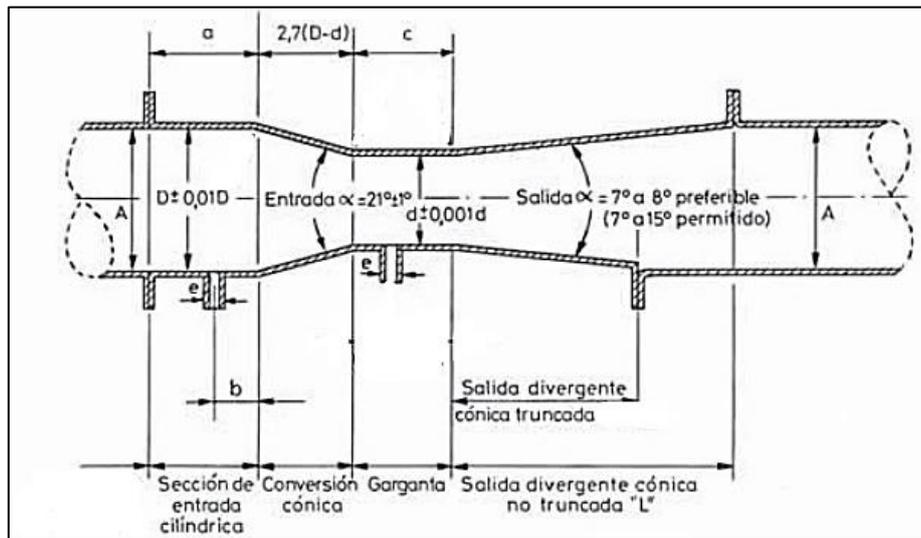
Creus (2010), menciona criterios de diseño en base a las normas ISO 5167 son:

- Sección de salida de cono divergente ($7^\circ \leq \alpha \leq 15^\circ$), preferiblemente de 7° a 8° .
- Sección de entrada cono convergente ($21^\circ \pm 1^\circ$).
- El diámetro de las tomas del manómetro diferencial es entre 4 - 10 mm
- Convergencia cónica debe estar en un valor de $2,7(D - d_v)$

- Las tomas de presión son de varias formas para el presente trabajo las tomas son en la vena contraída, la toma aguas arriba es a 1D y la toma aguas abajo es 1/2D.

Figura 22

Diseño de tubo Venturi



Nota. Tomado de *Instrumentación industrial* (p.135), por Creus, 2010, Alfaomega.

3.8.3. Diseño de placa de orificio

La placa de orificio se toma de las normas ISO 5167, el cual se encuentran los criterios de diseño, donde como en el caso del tubo de Venturi es necesario la relación de diámetros.

$$\beta = \frac{d_o}{D} \quad \text{Ec. (42)}$$

Donde:

d_o : Diámetro de la garganta de placa de orificio.

D : diámetro de la tubería.

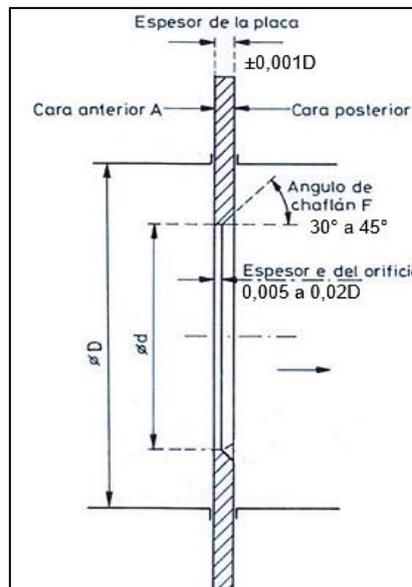
Del mismo modo que en el caso de Venturi, se procede a calcular el coeficiente de descarga del orificio con la ecuación (41).

Creus (2010), menciona los criterios que se tomaran en cuenta para el diseño estos son:

- Las placas de orificio por lo general se fabrican del intervalo $0,2 \leq \beta \leq 0,8$.
- El ángulo chaflán de la placa de orificio debe ser de aproximadamente $45^\circ \pm 15^\circ$.
- Espesor de placa en contacto con el fluido esta entre $0,005D$ a $0,02D$.
- El valor de diámetro de orificio (d_o) debe ser superior a $12,5 \text{ mm}$
- Las tomas de presión, existen diversas formas la que se aplicará en este presente trabajo es las tomas en bridas, debido a que es una de las configuraciones más simples, las tomas se colocan $25,4 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$ aguas arriba y aguas abajo, cuando $\beta > 0,6$ y $D < 150 \text{ mm}$.
- El diámetro de las tomas de manómetros diferenciales debe ser inferior a 13 mm

Figura 23

Diseño de placa de orificio



Nota. Tomado de *Instrumentación industrial* (p.134), por Creus, 2010, Alfaomega.

3.8.4. Diseño de vertedero

Para el diseño del vertedero el largo del canal depende del tipo de compuerta, en este trabajo son de dos tipos el triangular y rectangular, por lo tanto, para determinar las dimensiones del canal primero se dimensionará las compuertas.

- **Canal de vertedero**

Para el canal de vertedero se toma en consideración las dos compuertas que se diseñara que son la triangular y la rectangular. Por lo tanto, la fórmula Kindsvater-Carter tiene las especificaciones de diseño para el canal de vertedero son:

- La longitud del vertedero y el ancho del canal debe ser superior de 12 cm.
- El vertedero debe tener una longitud de canal mínima de cuatro veces la longitud de la carga (h) del vertedero. (Rocha Felices, s.f, p.473)

- **Vertedero con compuerta rectangular**

Según Rocha Felices (s.f), plantea el vertedero se usará la fórmula de Kindsvater-Carter, que es una fórmula de mayor confiabilidad donde se aplica en vertederos rectangulares con contracción o sin ellas es la ecuación (34).

Especificaciones de diseño del vertedero rectangular son:

- El vertedero debe ser propiamente en pared delgada, la cresta debe ser de 1 a 2,5 mm de espesor.
- El nivel de la superficie libre de aguas abajo debe estar por lo menos 6 cm debajo de la cresta del vertedero.
- La relación entre la carga (h) y la altura (w) del umbral debe ser menor que 2,5. (Rocha Felices, s.f, p.474)

- **Vertederos con compuerta triangular**

El vertedero triangular seleccionado es de un ángulo de 45° se usará la fórmula de la Universidad Católica de Chile en la siguiente ecuación (37).

Especificaciones de diseño para vertedero triangular:

- El ancho de canal de aproximación sea igual o mayor a 2 veces la carga sobre el vertedero ($B \geq 2h$).
- La cresta debe ser entre 1 a 2,5 mm de espesor. (Rocha Felices, s.f, p. 480)

3.9. CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE DEL MÓDULO DE MEDIDORES DE FLUJO

El módulo de medidores de fluido se construyó los medidores de tubo Venturi, placa de orificio y vertederos con compuerta triangular y rectangular, estos medidores se implementaron con los siguientes criterios:

- Se realizó una adecuada selección de materiales que garantiza construir las partes del módulo de flujo con el correcto funcionamiento.
- Disponibilidad de los materiales en el mercado.
- Finalizado el diseño de los medidores de flujo se seleccionó los materiales que se emplearon, posteriormente se procedió a la adquisición de ellos.
- Con las dimensiones se procedió al corte de las unidades que conformaron el módulo de medidores de flujo.
- Construcción del módulo de medidores de flujo.
- Ensamblaje del módulo de medidores de flujo.

En el módulo de medidores de flujo diseñado está constituido por:

- Medidor de rotámetro.
- Medidor de tubo Venturi.
- Medidor de orificio.
- Vertedero.
- Tablero de control.

3.10. PUESTA EN MARCHA Y EVALUACIÓN DEL MÓDULO DE MEDIDORES DE FLUJO

Una vez ensamblada el módulo, se realizó las pruebas eléctricas en el tablero para verificar el correcto funcionamiento, seguido de las pruebas hidráulicas en el módulo y en caso que sea necesario corregir alguna fuga. Estas pruebas se realizan con la finalidad de verificar las conexiones realizadas.

Se realizo las pruebas en el módulo para su respectiva calibración en los medidores para garantizar su correcto funcionamiento en las pruebas; posterior a ello, se realizó las evaluaciones para verificar los caudales en cada medidor y realizar una comparación con los cálculos teóricos.

CAPÍTULO IV

SELECCIÓN, DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL MÓDULO

En este capítulo se realiza la selección y los diseños para el módulo de medidores especificando las medidas de cada medidor para posteriormente realizar la construcción del módulo.

4.1. ETAPA DE SELECCIÓN

4.1.1. Selección de materiales para los medidores de flujo

Para los medidores diseñados se seleccionó los materiales adecuados:

- Para el tubo de Venturi se empleó el tubo acrílico.
- Para la placa de orificio se empleó el acero inoxidable de un espesor de 2,5 mm
- Para el vertedero se empleó planchas de acero inoxidable de un espesor de 2,5 mm

Para el módulo de medidores se adquirió un medidor de rotámetro.

4.1.1.1. Selección del rotámetro

Para la adquisición del rotámetro, se supone un caudal promedio de 55 L/min, por lo cual se dispone de un rotámetro de una escala de 10-110 LPM como se muestra en la figura 24.

Las características del rotámetro adquirido:

- Rango de medición: 10 - 110 LPM.
- Material del cuerpo: Acrílico, plástico ABS.
- Flotador de acero inoxidable.
- Exactitud $\pm 4\%$.
- Presión de trabajo: 0,6 Mpa.
- Temperatura de trabajo: (0 - 60) °C.
- Conexiones roscas hembra NTP de 1 pulg.
- Modelo: LZM-25 g.
- Marca: Blue White.

Figura 24

Rotámetro seleccionado



4.1.2. Selección de materiales de construcción

Para determinar los materiales que se emplearon se tomaron en cuenta la resistencia ante la corrosión, la disponibilidad. La siguiente tabla 12 muestra los materiales que se emplearon en la construcción del módulo de medidores de flujo.

Tabla 12*Materiales para el módulo de medidores de flujo*

Descripción	Dimensiones	Cantidad
Bomba de agua centrifuga 1 HP.	D = 0,0254 m	1
Unión universal acero inoxidable.	D = 0,0254 m	3
Codo estándar acero inoxidable 90°	D = 0,0254 m	6
Niple de acero inoxidable	D = 0,0254 m L = (0,17; 0,15; 0,18; 0,52; 0,14; 0,60; 0,07; 0,19; 0,31; 0,38; 0,39; 0,25) m	(1, 2, 1, 2, 1, 1, 1, 2, 1, 1, 2, 1)
Válvula de bola acero inoxidable	D = 0,0254 m	4
Tubo cuadrado 1pulg X 1pulg de acero inoxidable	A = 0,0254 m L = (1,2; 0,45; 0,18; 1,55; 0,6) m	(3, 4, 8, 2, 2)
Lámina de acero inoxidable	A = 0,3 m L = 0,70 m	1
Lámina de acero inoxidable	A = 1 m L = 1,62 m	1
Lámina de acero inoxidable	A=0,32 m L=1,92 m	1
Luces led piloto de (verde, naranja)	—	2
Botón de paro de emergencia	—	1
Gabinete metálico 30X30	—	1
Abrazadera	—	2

	D = 0,0254 m	
Rotámetro	Rango volumétrico 10 - 110 LPM	1
	Material acrílico	
Placas de medidor orificio acero inoxidable	—	1
	D = 0,0254 m	
Medidor de flujo Venturi	Material acrílico	1
Llave termomagnética	—	1
Pulsador de encendido y apagado	—	1
Contactador	—	1
Borneras	—	1
Cables N° 12 de conexión	—	—
Manguera automotriz	L = 5 m	1
Válvula de bola acero inoxidable	D = 0,00635 m	4
Válvula de bola de acero inoxidable	D = 0,003175 m	2

Nota: La tabla muestra los materiales que se emplean para el módulo, donde A: ancho, L: longitud y D: diámetro.

4.2. ETAPA DE DISEÑO

Para el inicio del diseño de los medidores se tuvo en cuenta las variables en función a cada medidor, los materiales de construcción. También los planos para tener de referencia para su construcción.

4.2.1. Diseño de medidores de flujo

Se diseñaron tres medidores de flujo seleccionados que son la placa de orificio, el tubo de Venturi y el vertedero.

4.2.1.1. Medidor de Venturi

El medidor de Venturi se diseña con un coeficiente de la relación de diámetros es $\beta = 0,61$; de acuerdo a la referencia bibliografía de Potter y Wiggert (1998). En la figura 25 se muestra el tubo de Venturi con sus respectivas dimensiones.

Con la ecuación (40), se determina el diámetro de la garganta del Venturi, teniendo de dato el diámetro interno de la tubería de 1 pulgada, con un diámetro interior de 27,3 mm medido con ayuda de un vernier.

$$D_{interior} = 27,3 \text{ mm}$$

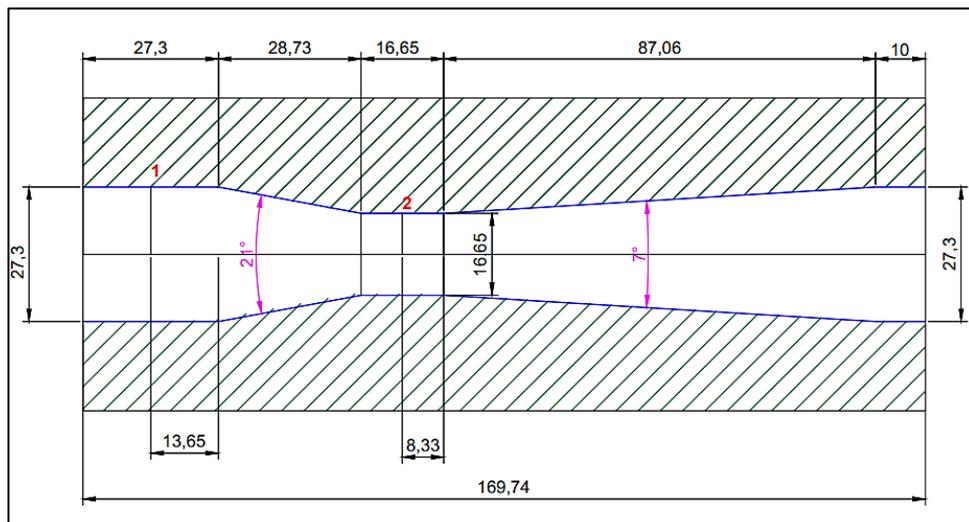
$$\beta = \frac{d_v}{D} = \frac{d_{venturi}}{27,3 \text{ mm}} = 0,61$$

$$d_v = 16,65 \text{ mm}$$

Para el diseño se toma las normas ISO 5167 parte 4, donde especifica las restricciones que se toma para las medidas del medidor de tubo de Venturi (Véase Anexo B y C).

Figura 25

Dimensiones del medidor de tubo de Venturi (mm)



Respectivamente se procede a calcular el coeficiente de descarga del Venturi con la ecuación (41), donde los parámetros se leen en el anexo C, para el cual se consideró un flujo turbulento, donde se selecciona *ASME long radius* para el caso del Venturi:

$$C_{\infty} = 0,9975$$

$$b = -6,53\beta^{4,1}$$

$$n = 0,5$$

$$N_{Re} = 10^4$$

Reemplazando estos valores en la ecuación (41) calculamos el valor del coeficiente de descarga del medidor de Venturi (C_v).

$$C_v = 0,9975 - \frac{6,53(0,61)^{0,5}}{(10^4)^{0,5}} = 0,9465 \cong 0,95$$

Con este resultado de 0,95 de coeficiente de Venturi se toma como dato teórico y la comparación en las evaluaciones prácticas y verificar el coeficiente de descarga del medidor de Venturi.

4.2.1.2. Medidor de placa de orificio

El medidor de orificio se diseña con el mismo valor de coeficiente ($\beta = 0.61$) que el del tubo de Venturi, donde las dimensiones de la placa se pueden observar en la figura 26 para su construcción. Donde para el módulo la tubería es de 1 pulgada con un diámetro interior de 27,3 mm.

Para el diseño se toma las normas ISO 5167 parte 2, donde especifica las restricciones que se toma para las medidas del medidor (Véase Anexo B y C).

Reemplazando en la ecuación (42):

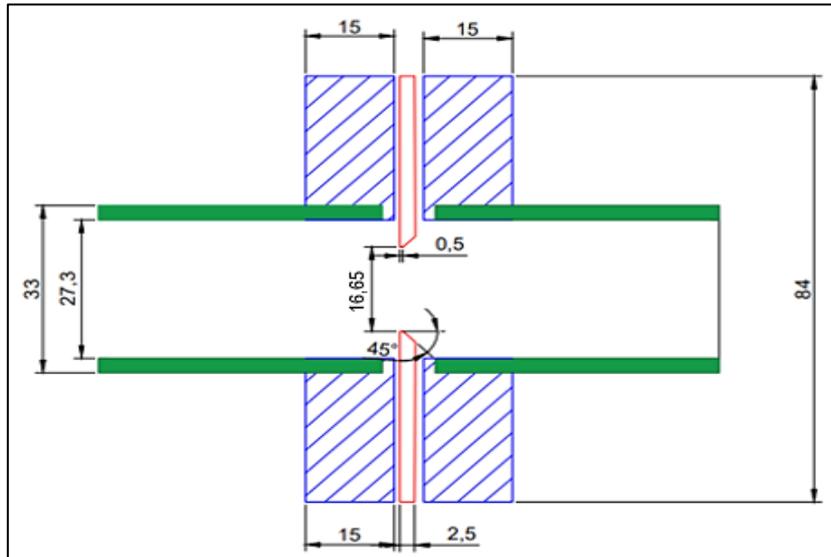
$$D_{interior} = 27,3 \text{ mm}$$

$$\beta = \frac{d_o}{D} = \frac{d_{orificio}}{27,3 \text{ mm}} = 0,61$$

$$d_o = 16,65 \text{ mm}$$

Figura 26

Dimensiones del medidor de placa de orificio (mm)



Posteriormente se procede a calcular el coeficiente descarga de orificio con la ecuación (41), donde los parámetros se leen en el anexo C, se toma en consideración el flujo turbulento, para el caso del orificio se selecciona tomas en las esquinas de la placa de orificio (*Corner taps*):

$$C_{\infty} = 0,5959 + 0,0312(\beta)^{2,1} - 0,184(\beta)^8$$

$$b = 91,71\beta^{2,5}$$

$$n = 0,75$$

$$N_{Re} = 10^4$$

Reemplazando estos valores en la ecuación (41) calculamos el valor del coeficiente de descarga del medidor de orificio (C_o)

$$C_o = 0,5959 + 0,0312(0,61)^{2,1} - 0,184(0,61)^8 + \frac{91,71(0,61)^{2,5}}{(10^4)^{0,75}} = 0,62$$

Con el resultado de 0,62 de coeficiente de orificio se toma como dato teórico para realizar el diseño y la comparación en las evaluaciones prácticas.

4.2.1.3. Vertedero

Para el diseño del vertedero se tomó dos formas la triangular y la rectangular. De manera que, se diseña estos dos tipos.

- **Canal de vertedero**

Para el diseño del canal de vertedero se toma en cuenta las especificaciones de la fórmula de Kindsvater-Carter mencionadas en el capítulo III para el vertedero triangular y rectangular, esto nos lleva a las siguientes medidas:

- Largo del canal (L): 0,65 m. Por lo tanto, cumplió con que la longitud del canal debe ser mínimo 4 veces la carga ($L \geq 4h$).
- Altura del canal (H): 0,20 m.
- Ancho del canal (B): 0,20 m.

La altura de canal y ancho de canal cumplen con las especificaciones de diseño que menciono que deben ser superiores a 12 cm.

- **Vertedero rectangular con contracciones**

Para determinar las dimensiones para el vertedero rectangular se emplea la formula Kindsvater-Carter, en el que mencionan las especificaciones de diseño mencionadas en el capítulo III. Para determinar el caudal se emplea la ecuación (34).

Las medidas del vertedero rectangular

- Ancho de vertedero (b): 0,12 m. Por lo tanto, cumplió con lo especificado que debe tener un valor mayor a 12 cm.
- Ancho de canal (B): 0,20 m. Del mismo modo cumpliendo las especificaciones de tener un valor mayor a 12 cm.
- Cresta aguas abajo (w): 0,06 m. cumpliendo las especificaciones que el nivel de la superficie aguas abajo deber ser por lo menos 6 cm.

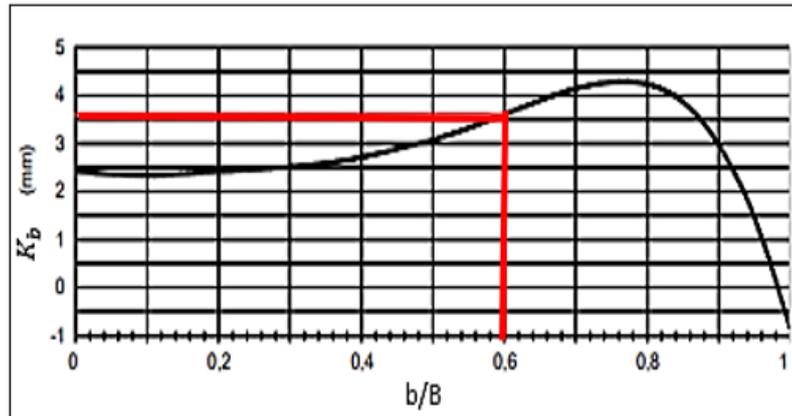
Una vez dimensionado el vertedero rectangular se procede a realizar los cálculos para determinar la ecuación de caudal, en la figura 27 se puede leer los valores de K_b en función al valor de b/B.

Entonces la relación es:

$$\frac{b}{B} = \frac{0,12 \text{ m}}{0,20 \text{ m}} = 0,60$$

Figura 27

Lectura del valor del constante k_b



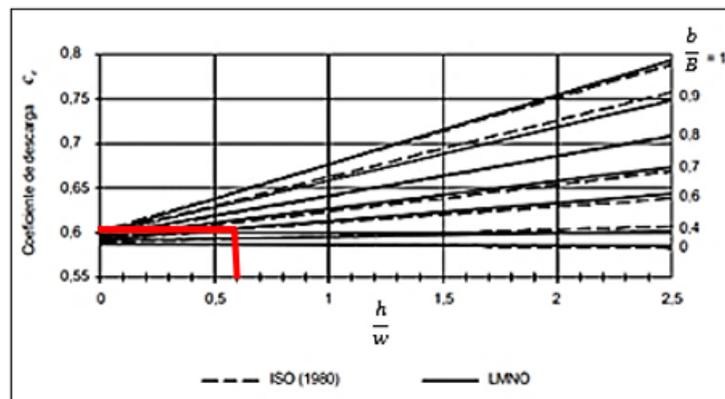
Nota. Tomada de *Hidráulica de tuberías y canales* (p. 473), por Rocha Felices, s.f.

En la figura 27 podemos leer que el valor de la constante K_b es $3,7 \text{ mm} \cong 0,0037 \text{ m}$, con el cual determinamos el coeficiente de descarga según Kindsvater y Carter.

A continuación, la relación de la carga por la cresta aguas abajo (h/w) tiene un resultado semejante a la relación de ancho de vertedero por ancho del canal (b/B) por lo que tomamos el valor de 0,6 para realizar la lectura de coeficiente de descarga.

Figura 28

Lectura del coeficiente de descarga para vertedero rectangular



Nota. Tomada de *Hidráulica de tuberías y canales* (p. 474), por Rocha Felices, s.f.

Por lo tanto, en la figura 28 se lee el coeficiente efectivo de descarga (C_e) es: $C_e = 0,6$. Reemplazando en la ecuación (34) se determina el caudal en función de la carga, con la ecuación característica del vertedero rectangular:

$$Q = 0,6 * \frac{2}{3} \sqrt{2 * 9,81 \frac{m}{s^2} (0,12m + 0,0037)(h + 0,001m)^{\frac{3}{2}}}$$

$$Q = 0,2192(h + 0,001 m)^{\frac{3}{2}} \quad Ec. (43)$$

La ecuación (43) determina el caudal en el vertedero con compuerta rectangular.

- **Vertedero triangular**

El vertedero triangular de pared delgada se empleó del ángulo 45° , donde para el diseño de la compuerta del vertedero se toman las siguientes medidas:

Medidas del vertedero triangular:

- Ancho del canal (B): 0,20 m.
- Ancho del vertedero (b): 0,1159 m. se obtuvo este dato por relaciones trigonométricas

Aplicando la ecuación (37) y la ecuación (36), la fórmula de la Universidad Católica de Chile las condiciones para emplear esta fórmula son:

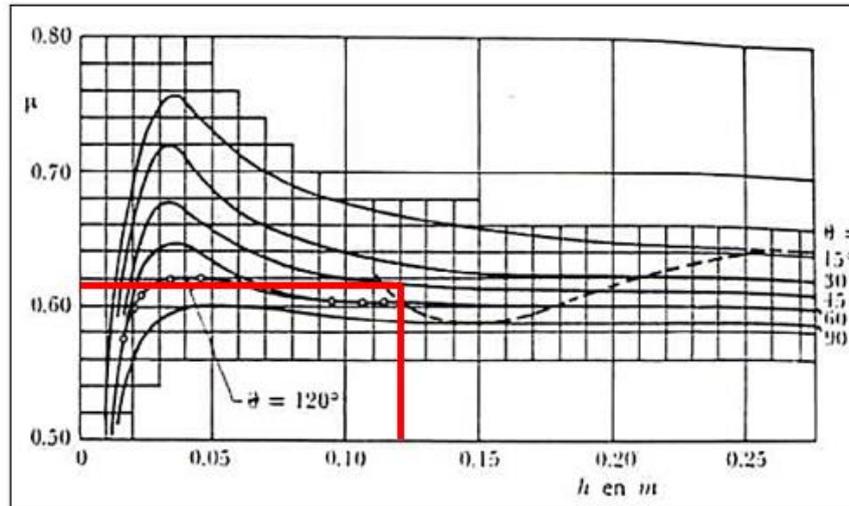
- Para el ángulo $\theta = 45^\circ$ por lo cual se encuentra en el rango de $15^\circ \leq \theta \leq 120^\circ$.
- La relación de $h/B \geq 2$ para un ángulo de 45° .

$$\frac{B}{h} = \frac{0,20}{0,12} = 2$$

Realizamos la lectura en el coeficiente de gasto (μ) de vertedero triangular en la siguiente figura 29.

Figura 29

Determinación del coeficiente de gasto μ de vertedores triangulares en la fórmula de la Universidad Católica de Chile

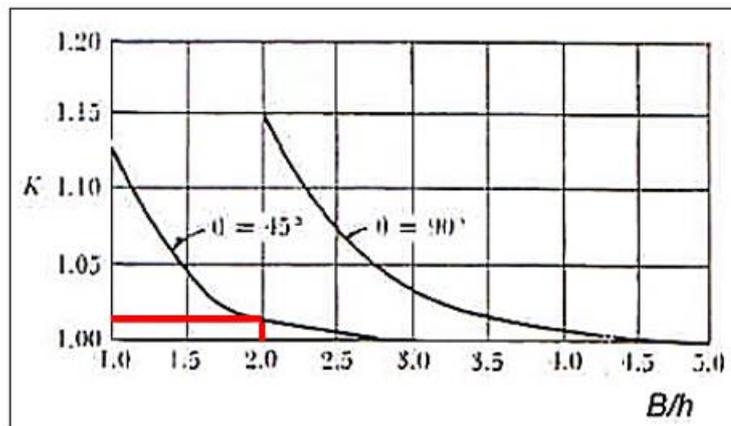


Nota. Tomado de *Hidráulica general* (p. 253), por Sotelo Ávila, 1997, Limusa, S. A.

En la figura 29 podemos obtener el valor del coeficiente de gasto (μ) que es igual a 0,618; con el cual se determina el valor de la constante K.

Figura 30

Lectura de la constante K en la fórmula de la Universidad Católica de Chile para vertedores triangulares



Nota. Tomado de *Hidráulica general* (p. 253), por Sotelo Ávila, 1997, Limusa, S. A.

De esta figura 30 se lee el valor de la constante "k" que es 1,015 el cual se reemplazara en la ecuación (36) para determinar el valor del coeficiente de descarga (C).

$$C = \frac{8}{15} * \sqrt{2 * 9,81 \frac{m^2}{s} \tan\left(\frac{45^\circ}{2}\right) * 0,618 * 1,015} = 0,61$$

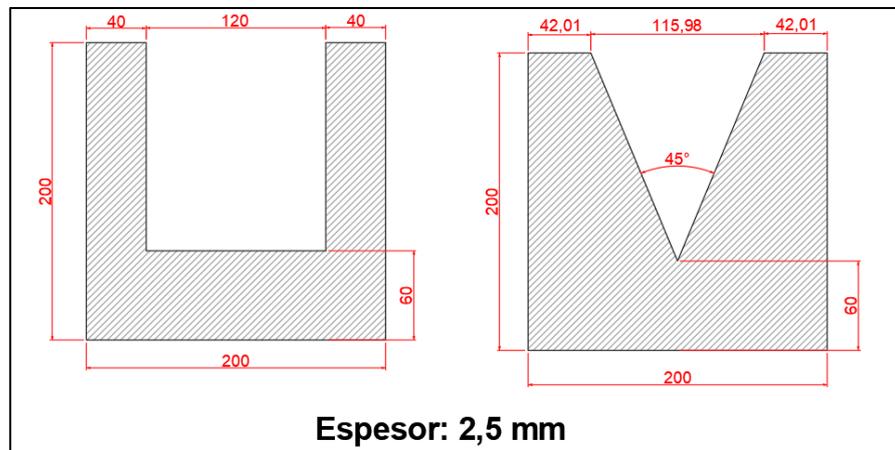
Reemplazando en la ecuación (37)

$$Q = 0,61 * (h)^{\frac{5}{2}} \quad Ec. (44)$$

La ecuación (48) determina el caudal en el vertedero con compuerta triangular.

Figura 31

Dimensiones del vertedero rectangular y triangular (mm)



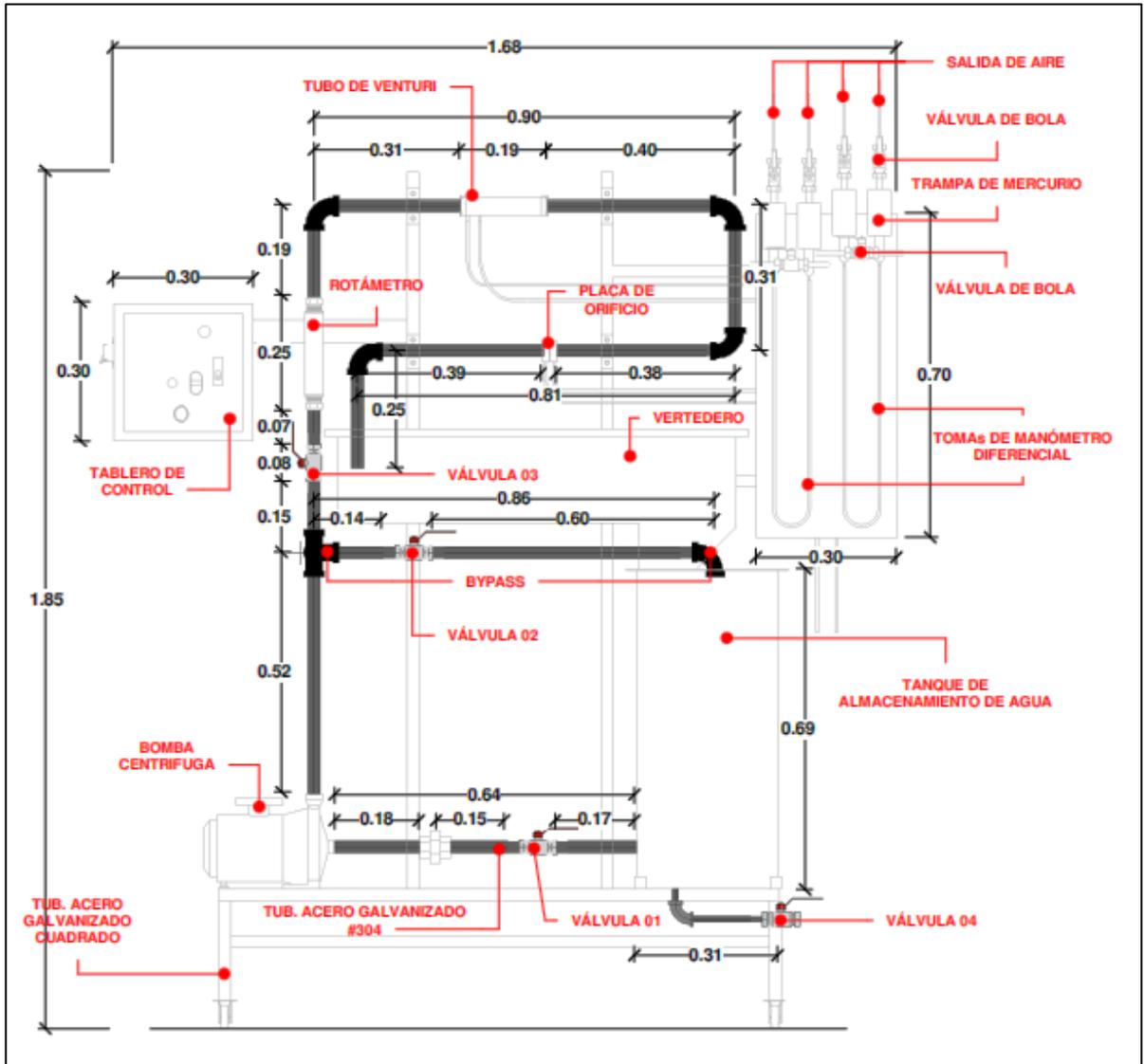
4.2.2. Representación del diseño del módulo

El diseño del módulo de medidores de flujo de fluidos se realiza en el programa de Revit 2021 para la representación del módulo. En las siguientes figuras se muestran los diferentes planos mecánicos del módulo de medidores de flujo.

Para la ubicación de cada medidor en el módulo fue en función de las normas de instalación de medidores de flujo de 8D como se indican en el anexo B. La figura 32 muestra el plano de la vista frontal donde se visualizan las dimensiones de las tuberías.

Figura 32

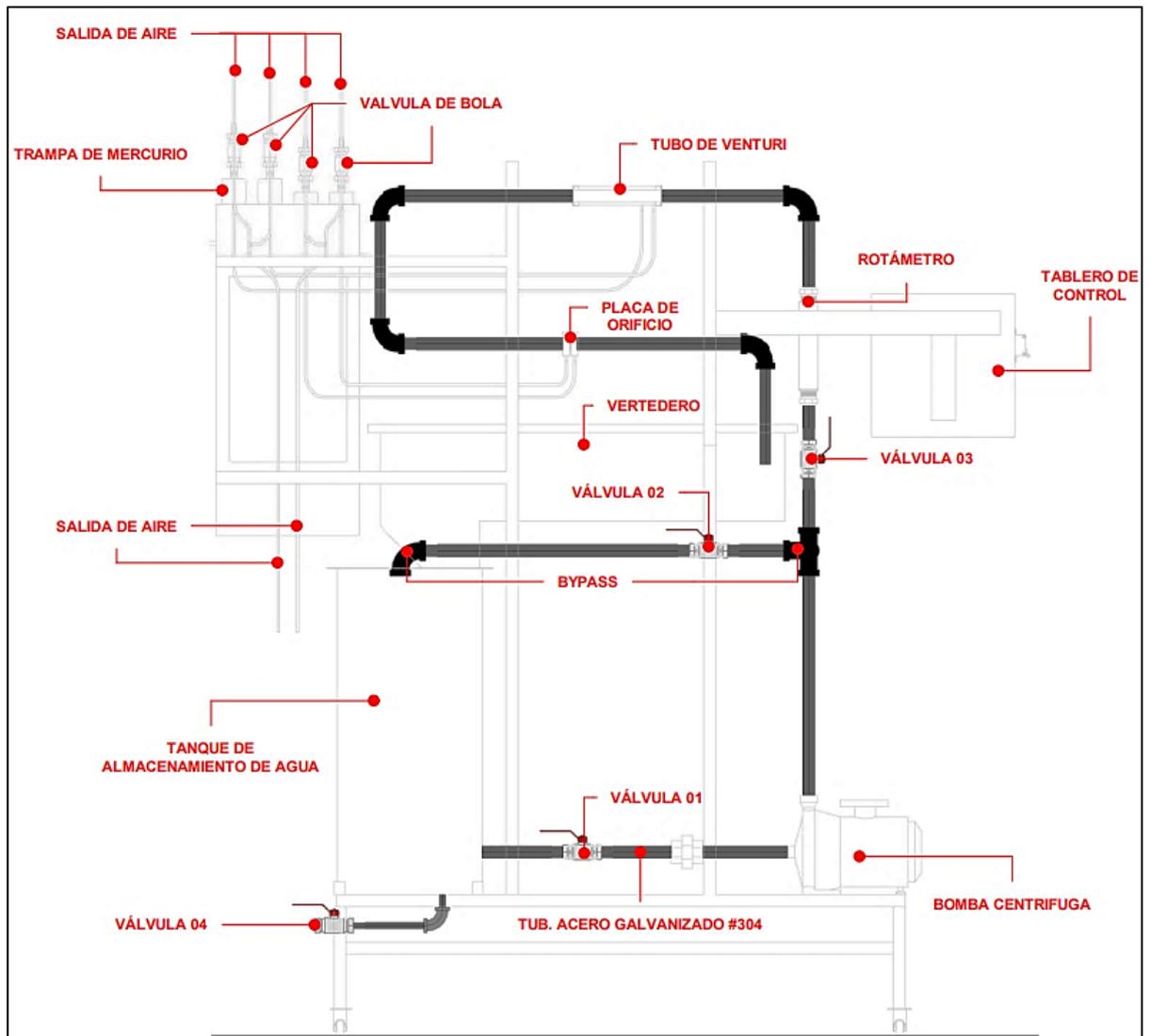
Elevación frontal del módulo de medidores de fluido



La figura 33 muestra la vista posterior del módulo de medidores de flujo de fluidos

Figura 33

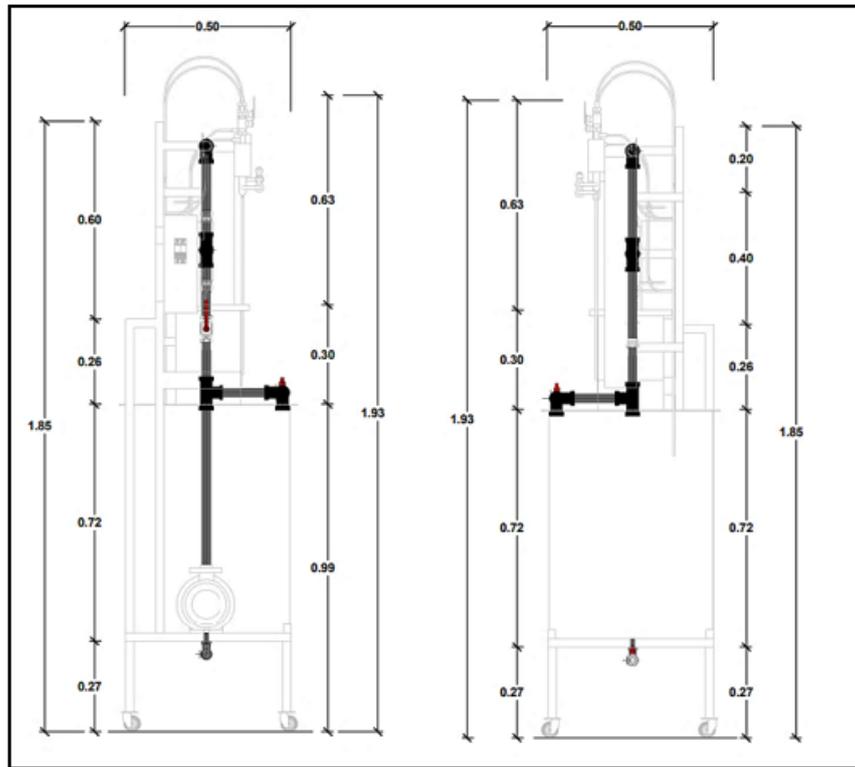
Elevación posterior del módulo de medidores de fluido



La siguiente figura 34 muestra las vistas del lateral de izquierda y derecha del módulo de medidores de flujo de fluidos.

Figura 34

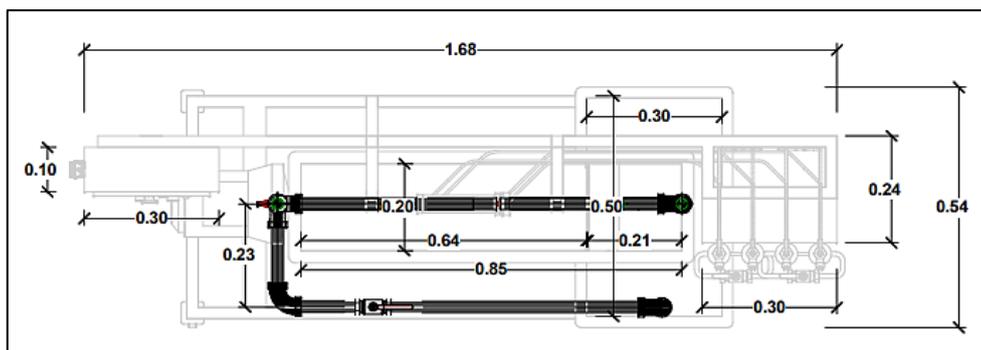
Vista lateral izquierda y derecha respectivamente del módulo de medidores de flujo.



La figura 35 muestra la vista de la parte superior del módulo de medidores de flujo de fluido.

Figura 35

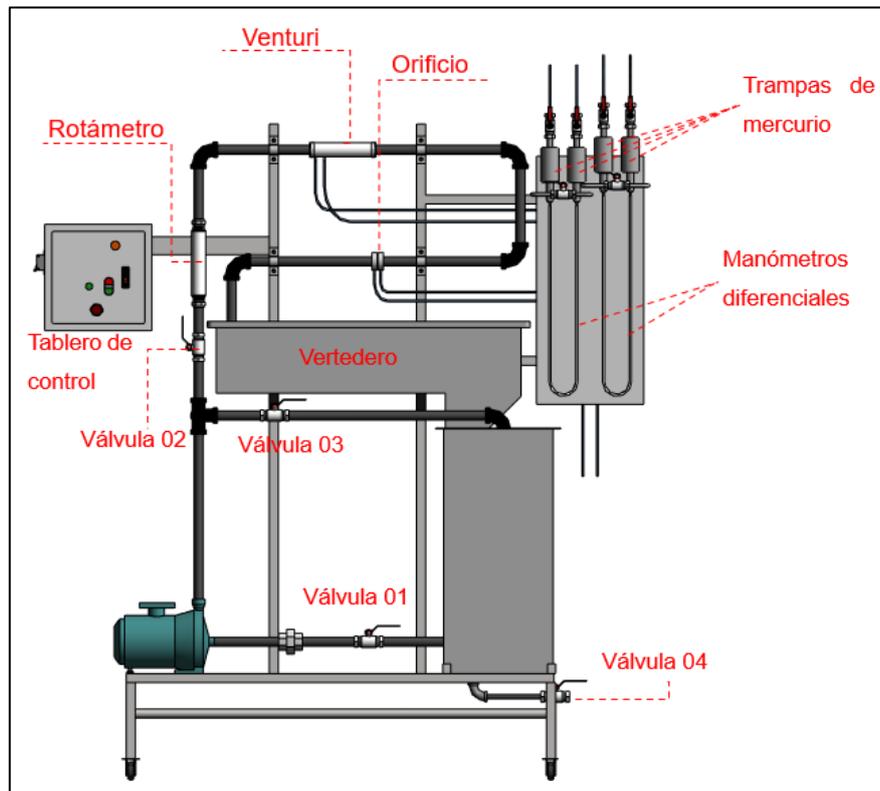
Vista superior del módulo de medidores de fluido



En las vistas en 3D son para visualizar el módulo de medidores de flujo más realista realizadas con el programa de Revit 2021. La figura 36 el módulo frontal en 3D.

Figura 36

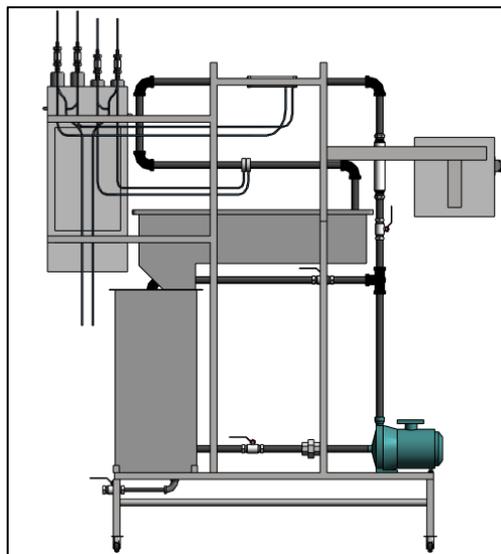
Vista de elevación frontal 3D del módulo de medidores de flujo



En la figura 37 se muestra una vista del módulo de medidores de flujo en 3D de la parte posterior.

Figura 37

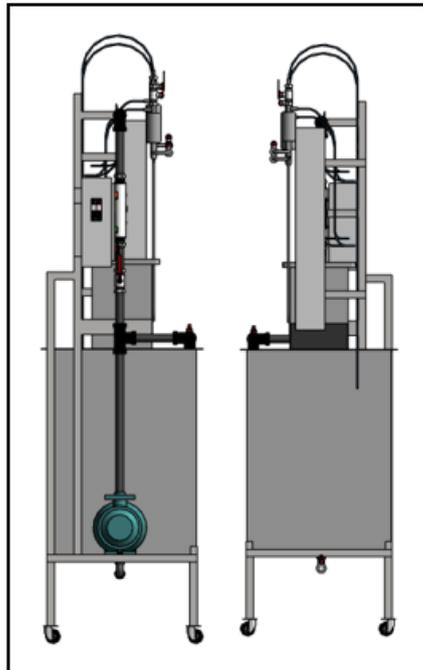
Vista de elevación posterior 3D del módulo de medidores de flujo



La figura 38 muestra la vista lateral izquierda y derecha en 3D del módulo de medidores de flujo.

Figura 38

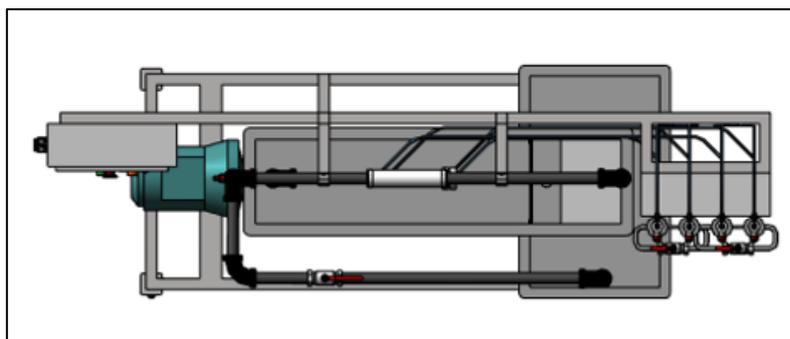
Vista de elevación lateral izquierda y derecha 3D del módulo de medidores de flujo



En la figura 39 se observa la vista superior del módulo de medidores de flujo en 3D.

Figura 39

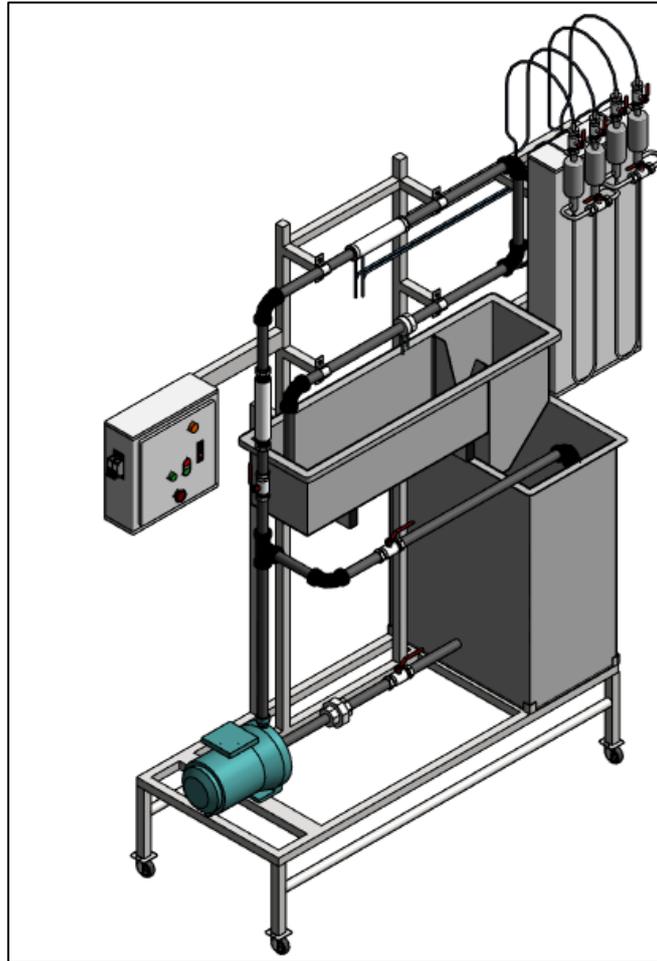
Vista superior 3D del módulo de medidores de flujo



La figura 40 muestra la vista isométrica con una ligera inclinación.

Figura 40

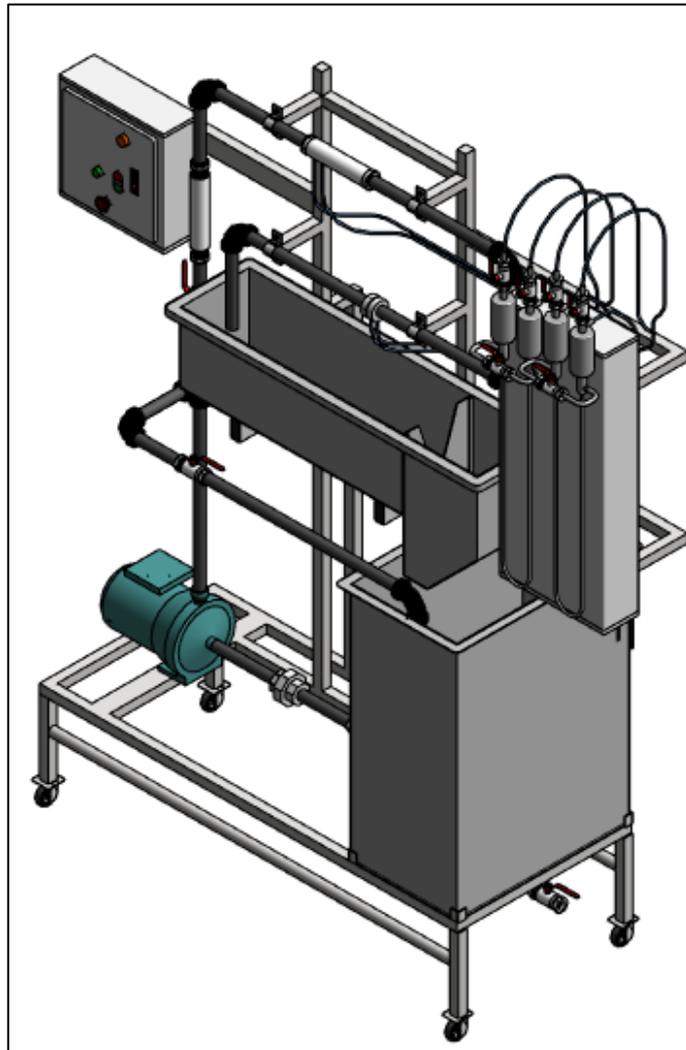
Vista isométricas 1 en 3D



La figura 41 muestra una vista isométrica con un ligero ángulo de inclinación del módulo de medidores de fluido.

Figura 41

Vista isométricas 2 en 3D



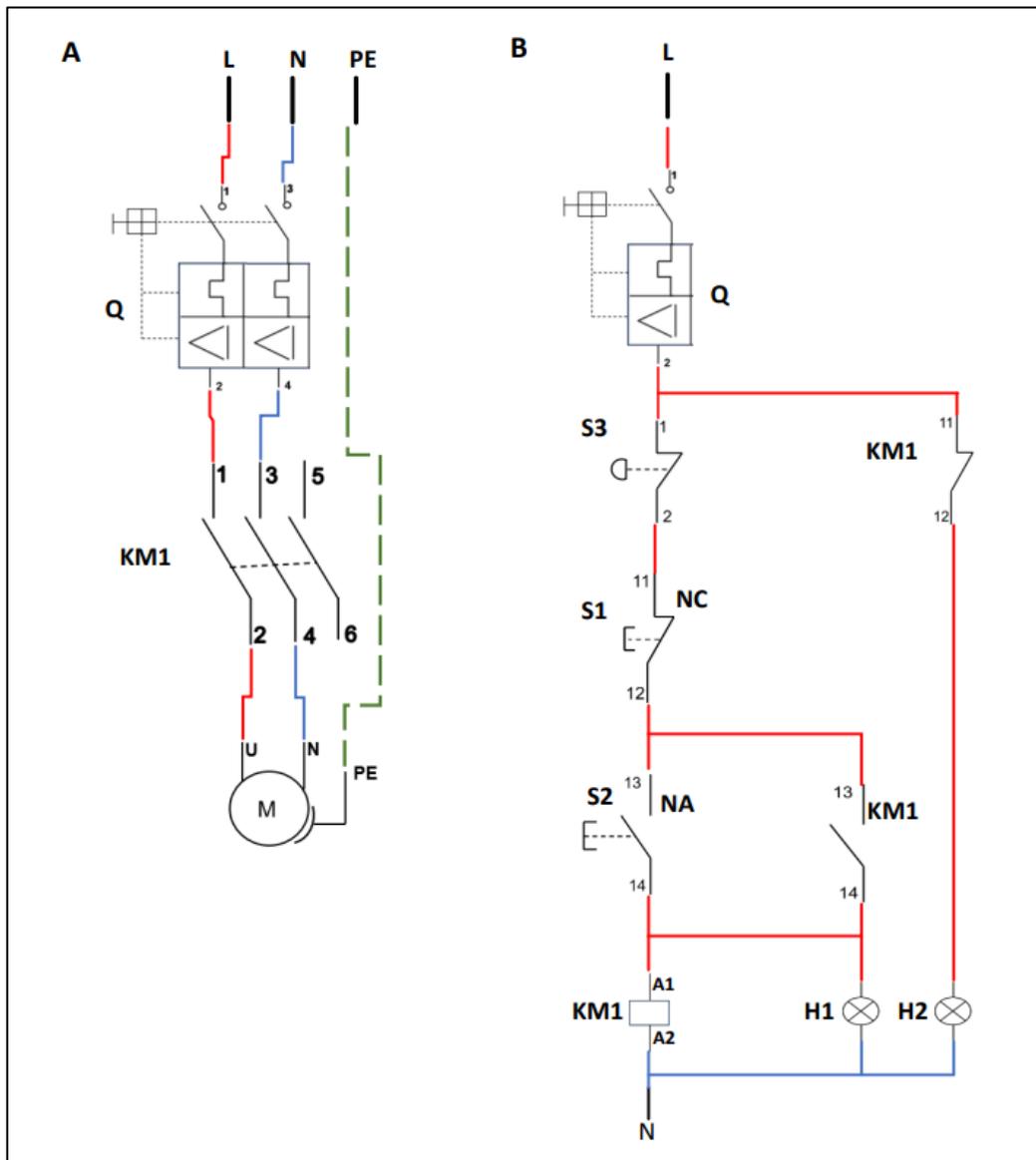
Los planos de estas vistas con más detalles se encuentran en el anexo D.

4.2.3. Plano eléctrico

En el tablero de control cuenta con una llave termomagnética, un contactor, luces piloto, el pulsador y la parada de emergencia. Los cuales se realizaron las conexiones para el encendido de la bomba, en la siguiente figura 42 se podrá observar las conexiones que tiene el tablero instalado.

Figura 42

Instalaciones eléctricas A) Circuito de fuerza, B) Circuito de mando



Nota. Esta figura muestra las instalaciones eléctricas. Donde la llave termomagnética es *Q*, el contactor es *KM1*, el pulsador normalmente cerrado es *S1*, el pulsador normalmente abierto es *S2*, la parada de emergencia es *S3*, la luz piloto verde es *H1* y la luz piloto naranja es *H2*.

4.3. ETAPA DE CONSTRUCCIÓN

En esta etapa se realiza la construcción de los tres medidores de flujo con los diseños y el montaje del módulo de medidores de fluido.

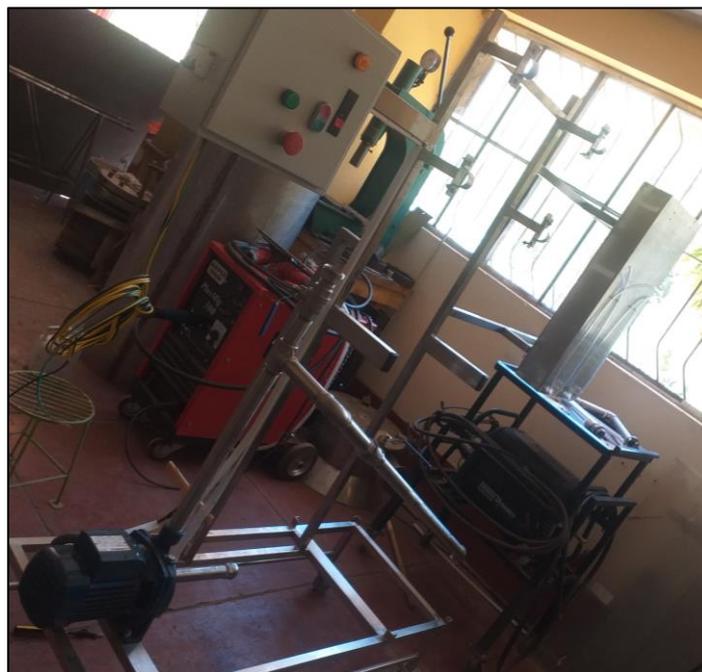
4.3.1. Construcción de cada elemento del módulo de medidores de flujo

- **Estructura de soporte del módulo de medidores de flujo**

En la figura 43 se muestra la estructura de soporte del módulo se emplea tubo cuadrado de 1x1 pulgada y un tubo rectangular de 1x2 pulgadas de acero inoxidable, donde la estructura tiene una altura de 1,85 m y 0,50 m de ancho.

Figura 43

Estructura de soporte del módulo de fluidos



- **Tuberías de conexión**

Una vez diseñado el módulo se obtiene las medidas de cada tubería y medidores y sus respectivas posiciones por lo cual se realiza los cortes de cada tubería con respectivas medidas. Para las tuberías se emplea del acero inoxidable de 1 pulgada teniendo niples de diferentes medidas las cuales se muestran en la tabla 12.

Figura 44

Cortes de las tuberías



- **Medidor de tubo de Venturi**

Para el medidor se emplea el material tubo acrílico con la finalidad de poder observar el recorrido del fluido a través del tubo de Venturi construido con las dimensiones mencionadas en la figura 25.

Figura 45

Medidor de tubo Venturi construido



El cual para el ensamblado se realizó por medio de empaques para evitar la fuga del fluido y bridas para mejor agarre del medidor con las tuberías.

- **Medidor de placa de orificio**

El medidor de placa de orificio se construyó del material de acero inoxidable con las dimensiones de la figura 26, el cual posteriormente se conecta con las tuberías de forma firme para evitar cualquier tipo de fuga.

Figura 46

Medidor de placa de orificio construido



- **Medidor de vertedero**

Para la construcción del medidor de vertederos se usa una plancha de 2,5 mm de espesor de acero inoxidable con un largo de 85 cm y un ancho de 20 cm con una altura de 20 cm para el canal de vertedero, también se usa la misma plancha para las compuertas para el vertedero que será de forma triangular y rectangular.

Figura 47

Medidor de vertedero triangular y rectangular construido



- **Tanque de almacenamiento de agua**

Para el tanque de almacenamiento se emplea una plancha de 2,5 mm de espesor con una altura de 0,69 m, ancho de 0,31 m y con un largo de 0,51 m el cual tiene una capacidad de 100 L, este volumen se determina a partir de las pruebas realizadas donde se observó un volumen de 60 L a 70 L se descarga rápidamente porque en el sistema hay una retención del fluido por ello se determina el volumen de 100 L para el buen funcionamiento del módulo.

Figura 48

Tanque de almacenamiento de agua construido

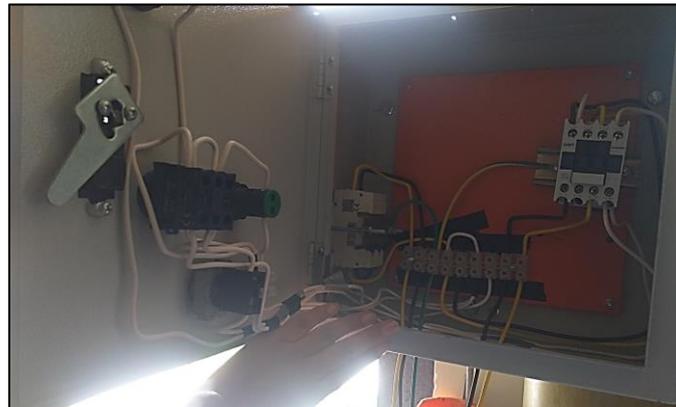


- **Conexiones del tablero de control**

Para las conexiones en el tablero de control se emplean cables de numero 12 los cuales se conectan con los componentes como el pulsador, parada de emergencia, luces piloto, etc.

Figura 49

Conexiones en el tablero de control



4.3.2. Montaje de las unidades en el módulo de medidores de flujo

Para el montaje del módulo de medidores de flujo de fluidos se unen los complementos construidos y se ubican en la estructura de soporte.

Figura 50

Montaje del medidor de flujo de fluidos



CAPÍTULO V

PUESTA EN MARCHA Y EVALUACIÓN

En esta etapa se verifica el correcto funcionamiento del módulo de medidores de flujo, verificando las posibles fugas que podría presentar el módulo en las tuberías para realizar los ajustes necesarios para su posterior evaluación.

5.1. PRUEBAS ELÉCTRICAS DEL TABLERO DE CONTROL

Las pruebas eléctricas se realizan con el fin de reducir los posibles problemas que pueda presentar las conexiones realizadas.

- Se abrió el tablero de control y se verifica que los cables estén en sus respectivos lugares de forma correcta, se verificó que los cables se encuentren en buen estado libre de cables pelados o quebrados.
- se verificó que los cables no estén sueltos en cada conexión en los componentes del tablero como en la llave termomagnética, la parada de emergencia, el pulsador, los pilotos verde y naranja, en las borneras y el contactor, donde deben estar correctamente empalmadas y ajustadas.
- Posteriormente luego de la verificación de la correcta conexión se procede a conectar a una fuente de alimentación de 220 V.
- Se procedió a energizar el sistema al activar la llave termomagnética el cual enciende el piloto naranja indicando que el módulo esta energizado.
- Se activa el pulsador verde por lo cual el piloto verde se enciende indicando la puesta en marcha del módulo de medidores de flujo.

- Si se encuentra algún problema con las conexiones se procede a parar la puesta en marcha para posteriormente desactivar la llave termomagnética y por último desconectar de la fuente de alimentación para solucionar los problemas que se pueden ver presentados en el tablero.
- Una vez solucionados los problemas se procede a realizar los mismos pasos para verificar el correcto funcionamiento del tablero.

5.2. PRUEBAS HIDRÁULICAS

Las pruebas de fuga en las tuberías se realizan una vez ensamblado el módulo de medidores de flujo para verificar si existe alguna fuga de agua por alguna de las tuberías instaladas por lo que se realizó los siguientes pasos:

- Se procede a llenar el tanque de almacenamiento de agua con 100 litros de agua aproximadamente y al encendido de la bomba.
- Se abre la válvula 1 del bypass, la válvula 2 en un 50 % y la válvula 3 en un 20 % aproximadamente.
- Se energiza el sistema al encender la llave termomagnética.
- Se acciona en el pulsador para el inicio de la puesta en marcha del módulo de medidores de fluido.
- Se revisa las conexiones en cada accesorio instalado verificando si existe algunas fugas realizando anotaciones en cuales existen las fugas para realizar las correcciones.
- Se procede a detener la puesta en marcha con el pulsador y se desactiva la llave magnética para corregir las fugas.
- Una vez solucionadas las fugas se procede a realizar los mismos pasos mencionados para corroborar que ya no existan fugas.

5.3. DESCRIPCIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DEL MÓDULO DE MEDIDORES DE FLUJO

El agua se llenará en el tanque de almacenamiento donde se tomará el dato de la temperatura, una vez tomado el dato se abre la válvula 01 en su totalidad, la válvula 2 con una 30 % aproximadamente de abertura, por último, la válvula 03 con una abertura del 70 % aproximadamente. Se prosigue a encender la bomba con el pulsador para que el agua realice su recorrido por las tuberías pasando por los medidores en los cuales se tomarán los datos de los manómetros diferenciales para

el medidor de Venturi y orificio, para el caso del vertedero se toma el dato de la carga, donde la salida se descarga en el tanque de almacenamiento de agua y se recircula por el módulo.

En el funcionamiento del módulo se realizará para diferentes caudales para realizar los respectivos cálculos para determinar los caudales en cada medidor.

5.4. CALIBRACIÓN DE LOS MEDIDORES

Para realizar la calibración de los medidores se tomarán caudales de 10 L/min a 80 L/min.

5.4.1. Calibración del rotámetro

La ecuación de calibración para el medidor de rotámetro se expresa como:

$$Q = k(Q_{Erot})^n \quad Ec. (45)$$

Donde:

Q : Caudal.

k, n : Constantes de calibración.

Q_{Erot} : Caudal leído en el rotámetro.

El cual esta ecuación exponencial lo llevamos a una ecuación lineal.

$$\ln(Q) = \ln(k) + n\ln(Q_{Erot}) \quad Ec. (46)$$

Los resultados se grafican convenientemente para obtener la pendiente n y el valor de la constante k . con las cuales se definirá la ecuación de calibración para el rotámetro.

5.4.2. Calibración del medidor de tubo Venturi

En la calibración del medidor del tubo de Venturi se toman los datos experimentales realizados, para la calibración tenemos la siguiente ecuación

$$Q = k(\Delta h_V)^n \quad Ec. (47)$$

Donde:

Q : Caudal

k, n : Constantes de calibración

Δh_V : Diferencia de los manómetros diferenciales

Para la calibración se realiza evaluaciones en los cuales se toman los datos de diferencia de presión y el caudal con los cuales se obtendrá la ecuación de calibración al llevarlo a una ecuación lineal.

$$\ln(Q) = \ln(k) + n\ln(\Delta h_V) \quad \text{Ec. (48)}$$

5.4.3. Calibración de medidor de placa de orificio

Para el caso del medidor de orificio se realiza igual al caso del medidor de Venturi, debido a que es un medidor de presión diferencial al igual que el Venturi, por lo que tenemos que seguir los mismos pasos para calibrar el medidor de orificio.

5.4.4. Calibración de vertedero

La calibración de vertederos se realiza con las cargas leídas en las pruebas en marcha para así comparar con el método volumétrico.

Donde la ecuación es:

$$Q = k(\Delta h_{VR-T})^n \quad \text{Ec. (49)}$$

Donde:

Q : Caudal

k, n : Constantes de calibración

Δh_{VR-T} : Carga para el vertedero rectangular-triangular.

El cual es una ecuación exponencial y lo llevamos a una ecuación lineal:

$$\ln(Q) = \ln(K) + n\ln(\Delta h_{VR-T}) \quad \text{Ec. (50)}$$

Donde los resultados de la calibración se grafican convenientemente para obtener la pendiente n y el valor de la constante k .

5.5. PUESTA EN MARCHA

Al momento de iniciar la puesta en marcha se tiene que tener en cuentas los siguientes pasos:

- Se estudia la ubicación de todas las válvulas para iniciar su funcionamiento del módulo de medidores de flujo.
- Se verifica que la llave termomagnética este apagado.
- Se verifico que todas las conexiones; previamente, se llenó el tanque de almacenamiento de agua aproximadamente con 100 L.
- Se conecta el módulo de medidores de flujo a la fuente de alimentación de 220 V.
- Posteriormente se prendió la bomba con ayuda del pulsador y se regula la válvula 2 para un caudal del 10 L/min para el inicio de la puesta en marcha.
- Se elimina las burbujas de aire que se puedan encontrar en los manómetros diferenciales.
- Una vez regulado el caudal y verificado la expulsión de las burbujas de aire se da inicio la puesta en marcha para los caudales de 15 L/min a 75 L/min, el cual durante la puesta en marcha se tomaron los datos para determinar el caudal en cada medidor.

CAPÍTULO VI

RESULTADOS Y DISCUSIONES

En este capítulo se muestra los resultados de la etapa de la evaluación y las discusiones del módulo de medidores de flujo.

6.1. RESULTADOS DE CALIBRACIÓN DE LOS MEDIDORES

6.1.1. Datos experimentales para la calibración de los medidores de rotámetro, Venturi y orificio

Datos experimentales:

Tabla 13

Datos experimentales para los medidores de rotámetro, Venturi y orificio

$Q_{Erot} \left(\frac{L}{min} \right)$	<i>Medición (Exp.)</i>		<i>Venturi</i>		<i>Orificio</i>	
	<i>V (mL)</i>	<i>t (s)</i>	<i>h_{v1} (mm)</i>	<i>h_{v2} (mm)</i>	<i>h_{o1} (mm)</i>	<i>h_{o2} (mm)</i>
10	290	1,57				
	255	1,48	112,5	115,20	112,5	115
	215	1,17				
20	575	1,62				
	680	1,88	109,7	120,00	109,7	120
	775	2,09				
30	654	1,38				
	724	1,46	106,5	128,00	106,5	128
	639	1,1				

	870	1,23				
40	840	1,17	103,5	140,00	103,5	140
	965	1,45				
	650	0,72				
50	690	0,86	100,5	155,30	100,5	155
	740	0,93				
	680	0,69				
60	740	0,75	96,5	173,50	96,5	174
	725	0,7				
	770	0,48				
70	695	0,76	83,5	188,00	83,5	188
	710	0,69				
	700	0,57				
80	750	0,59	77,5	214,50	77,5	215
	800	0,51				

Determinamos el caudal experimental

Para determinar el caudal experimental con el método volumétrico a diferentes lecturas del rotámetro.

Cálculos para un caudal de 10 L/min

- Cálculo del caudal para cada tiempo

$$Q = \frac{V(m^3)}{t(s)}$$

- Cálculo del caudal promedio

$$Q_{prom} = \frac{Q_1 + Q_2 + Q_3}{3} = 1,803 * 10^{-4} \frac{m^3}{s} = 10,82 \text{ L/min}$$

De esta forma se calcula los demás caudales y se muestran en la tabla 14.

Tabla 14*Resultados de caudales experimentales*

$Q_{Erot} \left(\frac{L}{min} \right)$	Medición (Exp.)		$Q_{Exp} \left(\frac{m^3}{s} \right)$	$\sigma \left(\frac{m^3}{s} \right)$	$Q_{prom} \left(\frac{m^3}{s} \right)$	$Q_{prom} \left(\frac{L}{min} \right)$
	V (mL)	t (s)				
10	290	1,57	$1,847 * 10^{-4}$	$5,64 * 10^{-6}$	$1,803 * 10^{-4}$	10,82
	255	1,48	$1,723 * 10^{-4}$			
	215	1,17	$1,838 * 10^{-4}$			
20	575	1,62	$3,549 * 10^{-4}$	$6,50 * 10^{-6}$	$3,625 * 10^{-4}$	21,75
	680	1,88	$3,617 * 10^{-4}$			
	775	2,09	$3,708 * 10^{-4}$			
30	654	1,38	$4,739 * 10^{-4}$	$4,61 * 10^{-5}$	$5,169 * 10^{-4}$	31,01
	724	1,46	$4,959 * 10^{-4}$			
	639	1,1	$5,809 * 10^{-4}$			
40	870	1,23	$7,073 * 10^{-4}$	$2,26 * 10^{-5}$	$6,969 * 10^{-4}$	41,82
	840	1,17	$7,179 * 10^{-4}$			
	965	1,45	$6,655 * 10^{-4}$			
50	650	0,72	$9,028 * 10^{-4}$	$4,90 * 10^{-5}$	$8,336 * 10^{-4}$	50,02
	690	0,86	$8,023 * 10^{-4}$			
	740	0,93	$7,957 * 10^{-4}$			
60	680	0,69	$9,855 * 10^{-4}$	$2,34 * 10^{-5}$	$1,003 * 10^{-3}$	60,16
	740	0,75	$9,867 * 10^{-4}$			
	725	0,7	$1,036 * 10^{-3}$			
70	770	0,48	$1,604 * 10^{-3}$	$3,02 * 10^{-4}$	$1,183 * 10^{-3}$	70,95
	695	0,76	$9,145 * 10^{-4}$			
	710	0,69	$1,029 * 10^{-3}$			
80	700	0,57	$1,228 * 10^{-3}$	$1,51 * 10^{-4}$	$1,356 * 10^{-3}$	81,36
	750	0,59	$1,271 * 10^{-3}$			
	800	0,51	$1,569 * 10^{-3}$			

En la tabla 14 se determina la desviación estándar (σ) para poder analizar los datos experimentales para la calibración, donde se aprecia los resultados para 10 L/min se obtiene un caudal experimental (Q_{Exp}) de $1,803 * 10^{-4} \text{ (m}^3/\text{s)} = 10,82 \text{ L/min}$ y su desviación estándar es $5,64 * 10^{-6} \text{ (m}^3/\text{s)} = 0,3384 \text{ L/min}$ que resulta un valor pequeño dando a entender que los datos tienen una dispersión pequeña, $10,82 \text{ L/min} \pm 0,3384 \text{ L/min}$.

6.1.1.1. Calibración del rotámetro

Para la calibración del rotámetro se tomaron los datos del caudal experimental promedio y las lecturas graduadas en el rotámetro y se empleara la ecuación (45). Los resultados se grafican convenientemente para obtener la pendiente n y el valor de la constante k.

Tabla 15

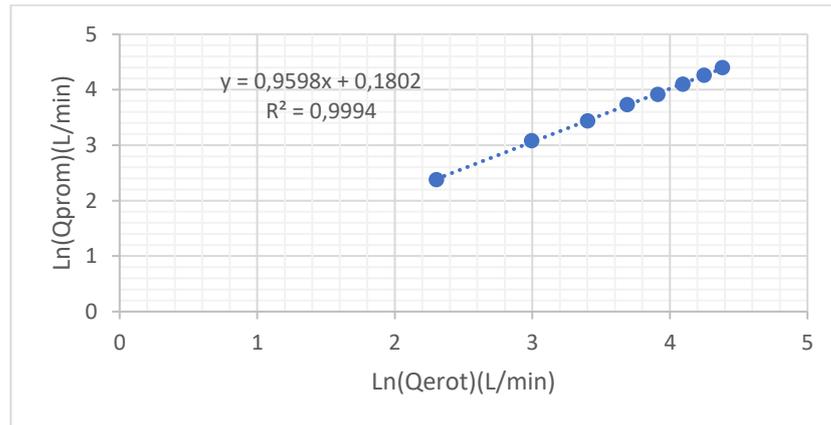
Datos experimentales para la calibración de rotámetro

$Q_{Erot} \left(\frac{L}{min} \right)$	$Q_{prom} \left(\frac{L}{min} \right)$	$Ln(Q_{Erot})$	$Ln(Q_{prom})$	%Error
10	10,8154	2,3026	2,3810	7,54
20	21,7491	2,9957	3,0796	8,04
30	31,0143	3,4012	3,4344	3,27
40	41,8157	3,6889	3,7333	4,34
50	50,0160	3,9120	3,9123	0,03
60	60,1578	4,0943	4,0970	0,26
70	70,9525	4,2485	4,2620	1,34
80	81,3577	4,3820	4,3989	1,67

Graficando estos datos se obtiene la siguiente figura 51.

Figura 51

Ln(Q_{Erot}) vs. Ln(Q_{.prom}) para el medidor de rotámetro



Realizando la regresión lineal a los datos graficados se obtiene la ecuación de la figura 51 es:

$$y = 0,9598x + 0,1802 \quad \text{Ec. (51)}$$

La regresión lineal es buena, ya que el valor de $R^2 = 0,9994$ que es cercano a 1, es decir, el 99,94 % de la varianza del caudal promedio se debe a los valores establecidos en el rotámetro los cuales son similares, donde el valor de n corresponde a la pendiente y la constante k se despeja de la ecuación lineal.

$$n = 0,9598$$

$$\ln(k) = 0,1802$$

$$k = 1,1975$$

Reemplazando en la ecuación (45), se obtuvo la ecuación de calibración para determinar el caudal.

$$Q = 1,1975(Q_{Erot})^{0,9598} \quad Ec. (52)$$

Con la ecuación (52) se calcula los caudales calibrados en función a la lectura directa del rotámetro. (Véase en el Anexo H)

6.1.1.2. Calibración del medidor de tubo Venturi

Para la calibración se realiza evaluaciones en los cuales se toman los datos de diferencia de presión y el caudal experimental promedio y se reemplazan en la ecuación (47), los datos se muestran en la tabla 16.

Tabla 16

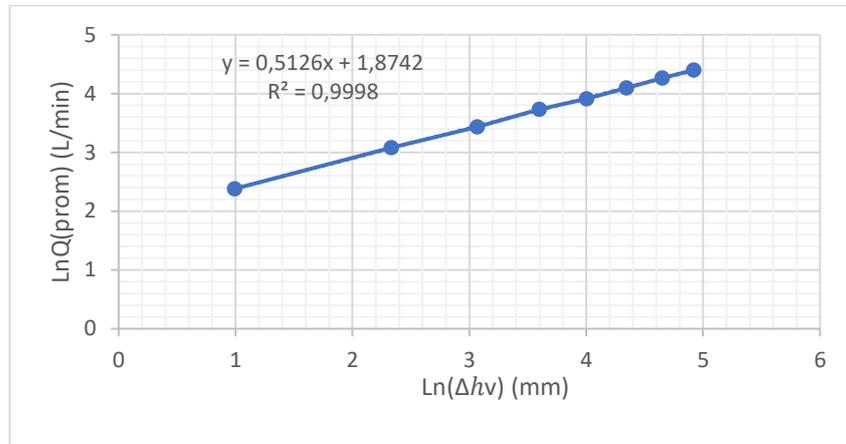
Datos experimentales para la calibración del tubo de Venturi

$Q_{prom}(\frac{L}{min})$	$\Delta h_V(mm)$	$\ln(\Delta h_V)$	$\ln(Q_{prom})$
10,82	2,7	0,9933	2,3810
21,75	10,3	2,3321	3,0796
31,01	21,5	3,0681	3,4344
41,82	36,5	3,5973	3,7333
50,02	54,8	4,0037	3,9123
60,16	77,0	4,3438	4,0970
70,95	104,5	4,6492	4,2620
81,36	137,0	4,9200	4,3989

Para determinar los valores de k y n se realiza una gráfica de $\ln(Q)$ versus $\ln(\Delta h_V)$ en el cual se obtiene una ecuación lineal del cual se determina los valores de los coeficientes.

Figura 52

Ln(Q) promedio vs. Ln(Δh_V) para el medidor de Venturi



Realizando la regresión lineal a los datos graficados se obtuvo la ecuación de la figura 52 es:

$$y = 0,5126x + 1,8742 \quad \text{Ec. (53)}$$

La regresión lineal es buena, ya que el valor de $R^2 = 0,9998$ que es cercano a 1, es decir, el 99,98 % de la varianza del caudal promedio se debe a los valores establecidos de los datos de la diferencia de presión en el Venturi. Donde el valor de n corresponde a la pendiente y la constante k se despeja de la ecuación lineal.

$$n = 0,5126$$

$$\text{Ln}(k) = 1,8742$$

$$k = 6,5156$$

Reemplazando en la ecuación (47), se obtuvo la ecuación de calibración para determinar el caudal en el medidor de Venturi.

$$Q = 6,5156(\Delta h_V)^{0,5126} \quad \text{Ec. (54)}$$

Con la ecuación (54) se calcula los caudales calibrados en función a la lectura de la diferencia de presión. (Véase en el Anexo H)

6.1.1.3. Calibración del medidor de placa de orificio

Aplicando la misma ecuación que el medidor de Venturi se toma los datos para realizar la calibración.

Tabla 17

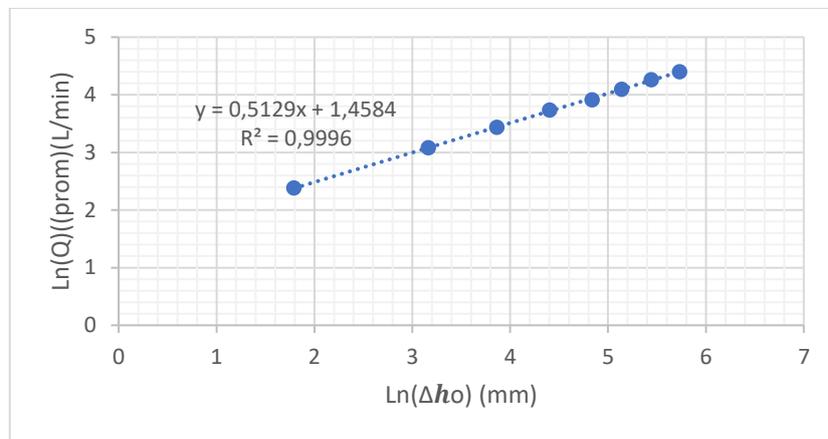
Datos experimentales para la calibración de medidor de orificio

$Q_{prom} \left(\frac{L}{min} \right)$	$\Delta h_o (mm)$	$Ln(\Delta h_o)$	$Ln(Q_{prom})$
10,82	6	1,7918	2,3810
21,75	23,8	3,1697	3,0796
31,01	46,5	3,8395	3,4344
41,82	81	4,3944	3,7333
50,02	127	4,8442	3,9123
60,16	171	5,1417	4,0970
70,95	233,5	5,4532	4,2620
81,36	308,7	5,7324	4,3989

Con estos datos experimentales se procede a realizar la gráfica

Figura 53

Ln(Q) promedio vs. Ln(Δh_o) para el medidor de orificio



Realizando la regresión lineal a los datos graficados se obtuvo la ecuación de la figura 53 es:

$$y = 0,5119x + 1,4633 \quad Ec. (55)$$

La regresión lineal es buena, ya que el valor de $R^2 = 0,9996$ que es cercano a 1, es decir, el 99,96 % de la varianza del caudal promedio se debe a datos tomados de la

diferencia de presión del orificio. Donde el valor de n corresponde a la pendiente y la constante k se despeja de la ecuación lineal.

$$n = 0,5119$$

$$\ln(k) = 1,4633$$

$$k = 4,3201$$

Reemplazando en la ecuación (47) se obtuvo la ecuación de calibración del orificio para determinar el caudal.

$$Q = 4,3201(\Delta h_o)^{0,5119} \quad \text{Ec. (56)}$$

Con la ecuación (56) se calcula los caudales calibrados en función a la lectura de la diferencia de presión. (Véase en el Anexo H)

6.1.2. Datos experimentales para la calibración del vertedero rectangular

Los datos experimentales tomados para el vertedero rectangular se muestran en la tabla 18.

Tabla 18

Datos experimentales para el vertedero rectangular

$Q_{\text{Erot}} \left(\frac{L}{\text{min}} \right)$	Medición (Exp.)		Carga ($\Delta h_{VR}(\text{cm})$)
	V (mL)	t (s)	
10	275	1,59	6,8
	305	1,63	
	289	1,54	
20	525	1,29	7,3
	430	1,27	
	355	1,24	
30	740	1,45	7,7
	730	1,35	
	590	1,29	
40	830	1,2	8
	649	1,04	
	910	1,24	
50	607	0,72	8,4
	785	0,97	
	780	0,87	

	678	0,69	
60	645	0,68	8,7
	615	0,57	
	605	0,48	
70	680	0,61	9
	525	0,46	
	480	0,42	
80	660	0,48	9,3
	555	0,37	

Determinación del caudal experimental

El cálculo de caudal experimental se realiza por el método volumétrico

Cálculo para un caudal de 10 L/min

- Cálculo del caudal para cada tiempo

$$Q = \frac{V(m^3)}{t(s)}$$

- Ahora cálculo del caudal promedio

$$Q_{prom} = \frac{Q_1 + Q_2 + Q_3}{3} = 1,83 * 10^{-4} \frac{m^3}{s} \cong 10,95 \text{ L/min}$$

De esta forma se realiza los demás cálculos para las demás pruebas y los resultados se muestran en la tabla 19.

Tabla 19

Resultados de los caudales experimentales para el vertedero rectangular

Q_{Erot} $\left(\frac{L}{min}\right)$	<i>Medición (Exp.)</i>		Q_{Exp} $\left(\frac{m^3}{s}\right)$	σ $\left(\frac{m^3}{s}\right)$	$Q_{prom.}$ $\left(\frac{m^3}{s}\right)$	Q_{prom} $\left(\frac{L}{min}\right)$
	V (m^3)	t (s)				
10	$2,75 * 10^{-4}$	1,59	$1,73 * 10^{-4}$	$6,81 * 10^{-6}$	$1,83 * 10^{-4}$	10,95
	$3,05 * 10^{-4}$	1,63	$1,87 * 10^{-4}$			
	$2,89 * 10^{-4}$	1,54	$1,88 * 10^{-4}$			
20	$5,25 * 10^{-4}$	1,29	$4,07 * 10^{-4}$	$4,94 * 10^{-5}$	$3,44 * 10^{-4}$	20,64
	$4,30 * 10^{-4}$	1,27	$3,39 * 10^{-4}$			
	$3,55 * 10^{-4}$	1,24	$2,86 * 10^{-4}$			
30	$7,40 * 10^{-4}$	1,45	$5,10 * 10^{-4}$	$3,54 * 10^{-5}$	$5,03 * 10^{-4}$	30,17
	$7,30 * 10^{-4}$	1,35	$5,41 * 10^{-4}$			
	$5,90 * 10^{-4}$	1,29	$4,57 * 10^{-4}$			

	8,30*10 ⁻⁴	1,2	6,92*10 ⁻⁴			
40	6,49*10 ⁻⁴	1,04	6,24*10 ⁻⁴	4,52*10 ⁻⁵	6,83*10 ⁻⁴	40,99
	9,10*10 ⁻⁴	1,24	7,34*10 ⁻⁴			
	6,07*10 ⁻⁴	0,72	8,43*10 ⁻⁴			
50	7,85*10 ⁻⁴	0,97	8,09*10 ⁻⁴	3,59*10 ⁻⁵	8,50*10 ⁻⁴	50,98
	7,80*10 ⁻⁴	0,87	8,97*10 ⁻⁴			
	6,78*10 ⁻⁴	0,69	9,83*10 ⁻⁴			
60	6,45*10 ⁻⁴	0,68	9,49*10 ⁻⁴	5,52*10 ⁻⁵	1,00*10 ⁻³	60,20
	6,15*10 ⁻⁴	0,57	1,08*10 ⁻³			
	6,05*10 ⁻⁴	0,48	1,26*10 ⁻³			
70	6,80*10 ⁻⁴	0,61	1,11*10 ⁻³	6,33*10 ⁻⁵	1,17*10 ⁻³	70,33
	5,25*10 ⁻⁴	0,46	1,14*10 ⁻³			
	4,80*10 ⁻⁴	0,42	1,14*10 ⁻³			
80	6,60*10 ⁻⁴	0,48	1,38*10 ⁻³	1,48*10 ⁻⁴	1,34*10 ⁻³	80,36
	5,55*10 ⁻⁴	0,37	1,50*10 ⁻³			

En la tabla 19 se determina la desviación estándar (σ) para poder analizar los datos experimentales para la calibración, donde se aprecia los resultados para 10 L/min se obtiene un caudal experimental (Q_{Exp}) de $1,83*10^{-4} (m^3/s) = 10,98 \text{ L/min}$ y su desviación estándar es $6,81*10^{-6} (m^3/s) = 0,4 \text{ L/min}$ que resulta un valor pequeño dando a entender que los datos tienen una dispersión pequeña, $10,98 \text{ L/min} \pm 0,4 \text{ L/min}$.

6.1.2.1. Calibración del vertedero rectangular

Con la ecuación (49) de calibración para vertederos donde se tomaron datos de la carga del vertedero.

Tabla 20

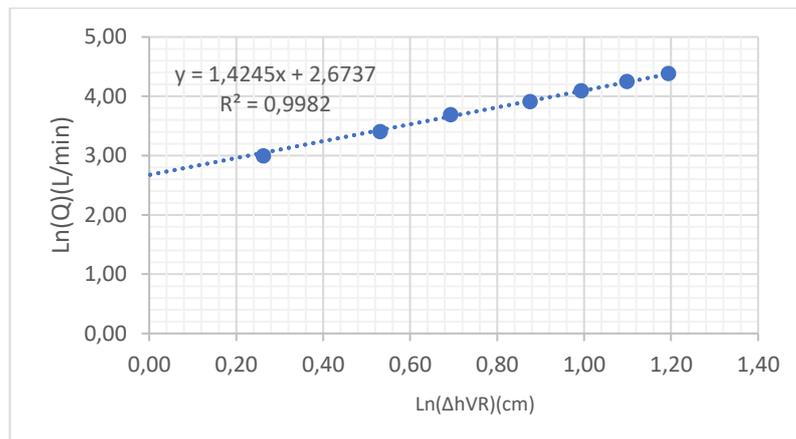
Datos experimentales para la calibración del vertedero rectangular

$Q_{prom} \left(\frac{L}{min} \right)$	$\Delta h_{VR} (cm)$	$Ln(Q_{prom})$	$Ln(\Delta h_{VR})$
10,9547	0,9	2,3938	0,1054
20,6370	1,3	2,9957	0,2624
30,1690	1,7	3,4012	0,5306
40,9915	2,0	3,6889	0,6931
50,9777	2,4	3,9120	0,8755
60,2017	2,7	4,0943	0,9933
70,3295	3,0	4,2485	1,0986
80,3571	3,3	4,3820	1,1939

Con estos datos experimentales tomados durante la evaluación del módulo graficamos $\ln(Q_{prom})$ versus $\ln(\Delta h_{VR})$ para obtener la ecuación de calibración.

Figura 54

$\ln(Q)$ promedio vs. $\ln(\Delta h_{VR})$ para el medidor de vertedero con compuerta rectangular



Realizando la regresión lineal a los datos graficados se obtiene la ecuación de la figura 54 es:

$$y = 1,4245x + 2,6737 \quad \text{Ec. (57)}$$

La regresión lineal es buena, ya que el valor de $R^2 = 0,9982$ que es cercano a 1, es decir, el 99,82 % de la varianza del caudal promedio se debe a los valores de la diferencia de carga. Donde el valor de n corresponde a la pendiente y la constante k se despeja de la ecuación lineal de primer grado.

$$n = 1,4245$$

$$\ln(K) = 2,6737$$

$$K = 14,4935$$

Reemplazando en la ecuación (49) resulta:

$$Q = 14,4935(\Delta h_{VR})^{1,4245} \quad \text{Ec. (58)}$$

Con el cual se puede obtener los caudales de acuerdo a las lecturas a las cargas del vertedero los resultados se pueden ver en el anexo H.

6.1.3. Datos experimentales para la calibración del vertedero triangular

Datos experimentales para el vertedero triangular en la tabla 21

Tabla 21

Datos experimentales para el vertedero triangular

$Q_{E_{rot}}$ $\left(\frac{L}{min}\right)$	<i>Medición (Exp.)</i>		<i>Carga</i> ($\Delta h_{VT}(cm)$)
	<i>V (mL)</i>	<i>t (s)</i>	
10	480	2,49	10
	400	2,35	
	305	1,64	
20	565	1,77	11
	520	1,52	
	640	1,88	
30	710	1,28	11,9
	645	1,23	
	640	1,36	
40	620	0,92	12,6
	664	0,94	
	540	0,84	
50	580	0,76	13,2
	630	0,77	
	780	0,81	
60	645	0,73	13,7
	710	0,74	
	679	0,58	
70	775	0,56	14,2
	785	0,63	
	815	0,78	
80	950	0,66	14,7
	1030	0,78	
	1100	0,88	

Determinamos el caudal experimental

Para determinar el caudal experimental con el método volumétrico a diferentes lecturas del rotámetro.

Cálculos para un caudal de 10 L/min

- Cálculo del caudal para cada tiempo

$$Q = \frac{V(m^3)}{t(s)}$$

- Ahora cálculo del caudal promedio

$$Q_{prom} = \frac{Q_1 + Q_2 + Q_3}{3} = 1,83 * 10^{-4} \frac{m^3}{s} \cong 10,98 L/min$$

De esta forma se calcula los demás caudales, los resultados se muestran en la tabla 22.

Tabla 22

Resultados de caudales para el vertedero triangular

Q_{Erot} $\left(\frac{L}{min}\right)$	<i>Medición (Exp.)</i>		Q_{Exp} $\left(\frac{m^3}{s}\right)$	σ $\left(\frac{m^3}{s}\right)$	$Q_{prom.}$ $\left(\frac{m^3}{s}\right)$	Q_{prom} $\left(\frac{L}{min}\right)$
	V (m^3)	t (s)				
10	$4,80 * 10^{-4}$	2,49	$1,93 * 10^{-4}$	$9,45 * 10^{-6}$	$1,83 * 10^{-4}$	10,98
	$4,00 * 10^{-4}$	2,35	$1,70 * 10^{-4}$			
	$3,05 * 10^{-4}$	1,64	$1,86 * 10^{-4}$			
20	$5,65 * 10^{-4}$	1,77	$3,19 * 10^{-4}$	$1,04 * 10^{-5}$	$3,34 * 10^{-4}$	20,03
	$5,20 * 10^{-4}$	1,52	$3,42 * 10^{-4}$			
	$6,40 * 10^{-4}$	1,88	$3,40 * 10^{-4}$			
30	$7,10 * 10^{-4}$	1,28	$5,55 * 10^{-4}$	$3,48 * 10^{-5}$	$5,17 * 10^{-4}$	30,99
	$6,45 * 10^{-4}$	1,23	$5,24 * 10^{-4}$			
	$6,40 * 10^{-4}$	1,36	$4,71 * 10^{-4}$			
40	$6,20 * 10^{-4}$	0,92	$6,74 * 10^{-4}$	$2,59 * 10^{-5}$	$6,74 * 10^{-4}$	40,46
	$6,64 * 10^{-4}$	0,94	$7,06 * 10^{-4}$			
	$6,50 * 10^{-4}$	0,79	$8,23 * 10^{-4}$			
50	$5,80 * 10^{-4}$	0,76	$7,63 * 10^{-4}$	$8,43 * 10^{-5}$	$8,48 * 10^{-4}$	50,89
	$6,30 * 10^{-4}$	0,77	$8,18 * 10^{-4}$			
	$7,80 * 10^{-4}$	0,81	$9,63 * 10^{-4}$			
60	$6,45 * 10^{-4}$	0,73	$8,84 * 10^{-4}$	$1,21 * 10^{-4}$	$1,00 * 10^{-3}$	60,27
	$7,10 * 10^{-4}$	0,74	$9,59 * 10^{-4}$			
	$6,79 * 10^{-4}$	0,58	$1,17 * 10^{-3}$			
70	$7,75 * 10^{-4}$	0,56	$1,38 * 10^{-3}$	$1,48 * 10^{-4}$	$1,18 * 10^{-3}$	70,55
	$6,40 * 10^{-4}$	0,61	$1,05 * 10^{-3}$			
	$8,10 * 10^{-4}$	0,74	$1,09 * 10^{-3}$			
80	$9,50 * 10^{-4}$	0,66	$1,44 * 10^{-3}$	$7,82 * 10^{-5}$	$1,34 * 10^{-3}$	80,20
	$1,03 * 10^{-3}$	0,78	$1,32 * 10^{-3}$			
	$1,10 * 10^{-3}$	0,88	$1,25 * 10^{-3}$			

En la tabla 22 se determina la desviación estándar (σ) para poder analizar los datos experimentales para la calibración, donde se aprecia los resultados para 10 L/min se obtiene un caudal experimental (Q_{Exp}) de $1,803 \cdot 10^{-4} \text{ (m}^3/\text{s)} = 10,818 \text{ L/min}$ y su desviación estándar es $9,64 \cdot 10^{-6} \text{ (m}^3/\text{s)} = 0,578 \text{ L/min}$ que resulta un valor pequeño, concluyendo que los datos tienen una dispersión pequeña, con $10,82 \text{ L/min} \pm 0,6 \text{ L/min}$.

6.1.3.1. Calibración del vertedero triangular

Con la ecuación (49) de calibración para vertederos donde se tomaron datos de la carga del vertedero.

Tabla 23

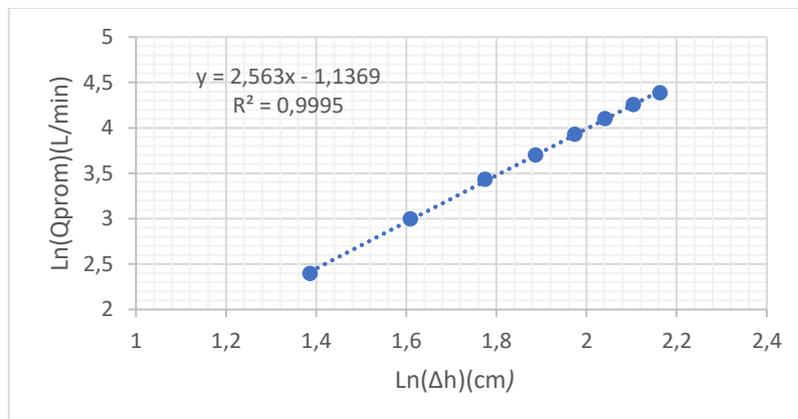
Datos experimentales para la calibración del vertedero triangular

$Q_{prom} \left(\frac{L}{min} \right)$	$\Delta h_{VT} \text{ (cm)}$	$Ln(Q_{prom})$	$Ln(\Delta h_{VT})$
10,9792	4,0	2,3960	1,3863
20,0348	5,0	2,9975	1,6094
30,9933	5,9	3,4338	1,7750
40,4631	6,6	3,7004	1,8871
50,8861	7,2	3,9296	1,9741
60,2742	7,7	4,0989	2,0412
70,5541	8,2	4,2564	2,1041
80,1981	8,7	4,3845	2,1633

Con estos datos experimentales se grafica para determinar las constantes.

Figura 55

$Ln(Q_{prom})$ vs. $Ln(\Delta h)$ para el vertedero con compuerta rectangular



Realizando la regresión lineal a los datos graficados se obtiene la ecuación de la figura 55 es:

$$y = 2,563x - 1,1369 \quad \text{Ec. (59)}$$

La regresión lineal es buena, ya que el valor de $R^2 = 0,9995$ que es cercano a 1, es decir, el 99,95 % de la varianza del caudal promedio se debe a los valores tomados de la diferencia de carga. Donde el valor de n corresponde a la pendiente y la constante k se despeja de la ecuación lineal de primer grado.

$$n = 2,563$$

$$\ln(K) = -1,1369$$

$$K = 0,3208$$

Reemplazando en la ecuación (49) resulta:

$$Q = 0,3208(\Delta h_{VT})^{2,563} \quad \text{Ec. (60)}$$

Con el cual se puede obtener los caudales de acuerdo a las lecturas a las cargas del vertedero obteniendo los caudales con la ecuación (60), los resultados se muestran en el anexo H.

6.2. RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN

En este capítulo se presenta los resultados experimentales de la evaluación.

6.2.1. Datos generales de los fluidos

Los siguientes datos fueron tomados del anexo A.

- Temperatura $T^\circ = 20^\circ\text{C}$
- Densidad de agua $\rho_w = 998 \text{ kg/m}^3$
- Viscosidad del agua $\mu = 1,001005 \frac{\text{kg}}{\text{m.s}}$
- Densidad de mercurio $\rho_{Hg} = 13550 \text{ kg/m}^3$
- Gravedad $g = 9,81 \text{ m/s}^2$
- Diámetro interior de la tubería $D_i = 0,0273\text{m}$
- Área del interior de la tubería $A_i = 0,0002177 \text{ m}^2$

6.2.2. Datos generales de los medidores de flujo (Rotámetro, Venturi, orificio, vertedero)

Datos del medidor de rotámetro

El rotámetro presente una escala de 10 a 110 L/min.

Datos del medidor de Venturi

- Coeficiente de Venturi $C_v = 0,95.$
- Diámetro de la garganta del Venturi $D_v = 0,01665 \text{ m}.$
- Área de la garganta del Venturi $A_v = 0,0005853 \text{ m}^2$

Datos del medidor de orificio

- Coeficiente del orificio $C_o = 0,62$
- Diámetro del orificio $D_o = 0,01665 \text{ m}$
- Área del orificio $A_o = 0,0005853 \text{ m}^2$

Datos del vertedero

Canal de vertedero

- Largo del canal $L = 0,65 \text{ m}.$
- Altura del canal $H = 0,20 \text{ m}.$

Tabla 24

Datos del vertedero rectangular y triangular

	Compuerta rectangular (m)	Compuerta triangular $\theta = 45^\circ$ (m)
Ancho del canal (B)	0,20	0,20
Altura del umbral (w)	0,06	0,06
Carga (h)	0,12	0,12
Ancho del vertedero (b)	0,12	0,116

6.2.3. Cálculos de la evaluación del medidor de Venturi

Los datos experimentales tomados durante la evaluación.

Tabla 25

Datos experimentales del medidor de Venturi

Q_{Erot} $\left(\frac{L}{min}\right)$	1era Evaluación				2da Evaluación				h_{V1prom} (mm)	h_{V2prom} (mm)
	Medición (Exp.)		Tomas diferenciales		Medición (Exp.)		Tomas diferenciales			
	V (mL)	t (s)	h_{V1} (mm)	h_{V2} (mm)	V (mL)	t (s)	h_{V1} (mm)	h_{V2} (mm)		
15	295	1,04			438	1,7			111,75	117,5
	365	1,2	111,5	118,00	357	1,35	112	117		
	380	1,53			379	1,59				
25	550	1,16			485	1,13			109,25	123,25
	605	1,5	109	123,00	545	1,46	109,5	123,50		
	630	1,57			555	1,17				
35	720	1,16			620	1,05			105,75	134,5
	840	1,43	105,5	135,00	775	1,21	106	134		
	810	1,31			555	1,01				
45	797	1,01			800	1,08			102,75	147,75
	805	1,09	102,5	146,50	740	0,95	103	149		
	750	1,06			790	1,03				
55	810	0,97			990	1,07			99,75	164,75
	740	0,76	99,5	164,50	1030	1,12	100	165		
	800	0,85			1055	1,18				
65	520	0,51			595	0,58			90,75	181,75
	540	0,45	90,5	181,50	725	0,59	91	182		
	610	0,6			775	0,75				
75	580	0,41			710	0,5			79,75	202,5
	600	0,5	79,5	205,00	720	0,67	80	200		
	645	0,53			750	0,59				

6.2.3.1. Determinamos el caudal experimental

Para determinar el caudal experimental con el método volumétrico a diferentes lecturas del rotámetro

Cálculos para el caudal de 15 L/min

- Cálculo del caudal para cada tiempo

$$Q = \frac{V(m^3)}{t(s)}$$

- Ahora cálculo del caudal promedio

$$Q_{1.prom} = \frac{Q_1 + Q_2 + Q_3}{3} = 2,79 * 10^{-4} \frac{m^3}{s} \cong 16,72 \text{ L/min}$$

De esta forma se calcula los demás caudales y los resultados se muestran en la tabla 26.

Tabla 26

Resultados de los caudales experimentales para el Venturi y orificio

Q_{Erot} $\left(\frac{L}{min}\right)$	Primera evaluación					Segunda evaluación					Q_{prom} $\left(\frac{m^3}{s}\right)$
	Medición (Exp.)		Q_{Exp} $\left(\frac{m^3}{s}\right)$	σ $\left(\frac{m^3}{s}\right)$	$Q_{1.prom}$ $\left(\frac{m^3}{s}\right)$	Medición (Exp.)		Q_{Exp} $\left(\frac{m^3}{s}\right)$	σ $\left(\frac{m^3}{s}\right)$	$Q_{2.prom}$ $\left(\frac{m^3}{s}\right)$	
	V (mL)	t (s)				V (mL)	t (s)				
15	295	1,04	$2,84 * 10^{-4}$			438	1,7	$2,58 * 10^{-4}$			
	365	1,2	$3,04 * 10^{-4}$	$2,30 * 10^{-5}$	$2,79 * 10^{-4}$	357	1,35	$2,64 * 10^{-4}$	$1,10 * 10^{-5}$	$2,53 * 10^{-4}$	$2,66 * 10^{-4}$
	380	1,53	$2,48 * 10^{-4}$			379	1,59	$2,38 * 10^{-4}$			
25	550	1,16	$4,74 * 10^{-4}$			485	1,13	$4,29 * 10^{-4}$			
	605	1,5	$4,03 * 10^{-4}$	$3,39 * 10^{-5}$	$4,26 * 10^{-4}$	545	1,46	$3,73 * 10^{-4}$	$4,13 * 10^{-5}$	$4,26 * 10^{-4}$	$4,26 * 10^{-4}$
	630	1,57	$4,01 * 10^{-4}$			555	1,17	$4,74 * 10^{-4}$			
35	720	1,16	$6,21 * 10^{-4}$			620	1,05	$5,90 * 10^{-4}$			
	840	1,43	$5,87 * 10^{-4}$	$1,52 * 10^{-5}$	$6,09 * 10^{-4}$	775	1,21	$6,40 * 10^{-4}$	$3,72 * 10^{-5}$	$5,93 * 10^{-4}$	$6,01 * 10^{-4}$
	810	1,31	$6,18 * 10^{-4}$			555	1,01	$5,50 * 10^{-4}$			
45	797	1,01	$7,89 * 10^{-4}$			800	1,08	$7,41 * 10^{-4}$			
	805	1,09	$7,39 * 10^{-4}$	$3,36 * 10^{-5}$	$7,45 * 10^{-4}$	740	0,95	$7,79 * 10^{-4}$	$1,59 * 10^{-5}$	$7,62 * 10^{-4}$	$7,54 * 10^{-4}$
	750	1,06	$7,08 * 10^{-4}$			790	1,03	$7,67 * 10^{-4}$			
55	810	0,97	$8,35 * 10^{-4}$			990	1,07	$9,25 * 10^{-4}$			
	740	0,76	$9,74 * 10^{-4}$	$5,92 * 10^{-5}$	$9,17 * 10^{-4}$	1030	1,12	$9,20 * 10^{-4}$	$1,35 * 10^{-5}$	$9,13 * 10^{-4}$	$9,15 * 10^{-4}$
	800	0,85	$9,41 * 10^{-4}$			1055	1,18	$8,94 * 10^{-4}$			
65	520	0,51	$1,02 * 10^{-3}$			595	0,58	$1,03 * 10^{-3}$			
	540	0,45	$1,20 * 10^{-3}$	$8,57 * 10^{-5}$	$1,08 * 10^{-3}$	725	0,59	$1,23 * 10^{-3}$	$9,39 * 10^{-5}$	$1,10 * 10^{-3}$	$1,09 * 10^{-3}$
	610	0,6	$1,02 * 10^{-3}$			775	0,75	$1,03 * 10^{-3}$			
75	580	0,41	$1,42 * 10^{-3}$			710	0,5	$1,42 * 10^{-3}$			
	600	0,5	$1,20 * 10^{-3}$	$9,74 * 10^{-5}$	$1,28 * 10^{-3}$	720	0,67	$1,07 * 10^{-3}$	$1,41 * 10^{-4}$	$1,26 * 10^{-3}$	$1,27 * 10^{-3}$
	645	0,53	$1,22 * 10^{-3}$			750	0,59	$1,27 * 10^{-3}$			

En la tabla 26 se determina la desviación estándar (σ) para poder analizar los datos experimentales donde se aprecia los resultados para 15 L/min se obtiene un caudal experimental (Q_{Exp}) de $2,79 \times 10^{-4} \text{ (m}^3/\text{s)} = 16,74 \text{ L/min}$ y su desviación estándar es $2,30 \times 10^{-5} \text{ (m}^3/\text{s)} = 1,38 \text{ L/min}$ que resulta un valor pequeño, concluyendo que los datos tienen una dispersión pequeña, $16,74 \text{ L/min} \pm 1,38 \text{ L/min}$.

6.2.3.2. Calculamos el caudal ideal y real

Cálculo del caudal ideal

$$Q(ideal) = \frac{A_2}{\sqrt{(1 - (\frac{A_2}{A_1})^2)}} \times \sqrt{\frac{2 * (g * \Delta h(\rho_{Hg} - \rho_w))}{\rho_w}} = 2,794 * 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$$

Cálculo caudal real del medidor de Venturi con la ecuación

$$Q(real) = \frac{A_2 * Cv}{\sqrt{(1 - (\frac{A_2}{A_1})^2)}} * \sqrt{\frac{2 * (g * \Delta h(\rho_{Hg} - \rho_w))}{\rho_w}} = 2,654 * 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$$

Determinación el porcentaje de error

$$\%Error = \left| \frac{Q_{prom} - Q_{real}}{Q_{prom}} \right| \times 100 = \left| \frac{2,66 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s} - 2,654 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}}{2,66 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}} \right| \times 100$$

$$\%Error = 0,26 \%$$

Del mismo modo se calcula los otros datos y los resultados se muestran en la tabla 27.

Tabla 27

Resultados del caudal del medidor de Venturi y su porcentaje de error

Q_{Erot} $\left(\frac{L}{min}\right)$	Q_{prom} $\left(\frac{m^3}{s}\right)$	h_{v1} (mm)	h_{v2} (mm)	Δh_v (m)	Q_{ideal} $\left(\frac{m^3}{s}\right)$	Q_{real} $\left(\frac{m^3}{s}\right)$	%Error
15	$2,661 \cdot 10^{-4}$	111,75	117,5	0,00575	$2,794 \cdot 10^{-4}$	$2,654 \cdot 10^{-4}$	0,26
25	$4,259 \cdot 10^{-4}$	109,25	123,25	0,014	$4,360 \cdot 10^{-4}$	$4,142 \cdot 10^{-4}$	2,76
35	$6,011 \cdot 10^{-4}$	105,75	134,5	0,02875	$6,247 \cdot 10^{-4}$	$5,935 \cdot 10^{-4}$	1,27
45	$7,536 \cdot 10^{-4}$	102,75	147,75	0,045	$7,816 \cdot 10^{-4}$	$7,425 \cdot 10^{-4}$	1,48
55	$9,148 \cdot 10^{-4}$	99,75	164,75	0,065	$9,394 \cdot 10^{-4}$	$8,924 \cdot 10^{-4}$	2,45
65	$1,087 \cdot 10^{-3}$	90,75	181,75	0,091	$1,111 \cdot 10^{-3}$	$1,056 \cdot 10^{-3}$	2,89
75	$1,266 \cdot 10^{-3}$	79,75	202,5	0,12275	$1,291 \cdot 10^{-3}$	$1,226 \cdot 10^{-3}$	3,15

6.2.3.3. Determinamos el coeficiente de descarga para el Venturi (C_v)

Cálculo para 15 L/min

$$C_v = \frac{Q_{prom}}{Q_{ideal}} = \frac{2,661 \cdot 10^{-4} \frac{m^3}{s}}{2,654 \cdot 10^{-4} \frac{m^3}{s}} = 0,9524$$

Cálculo del porcentaje de error de C_v

$$\% Error = \left| \frac{C_{v_{teórico}} - C_{v_{experimental}}}{C_{v_{teórico}}} \right| * 100 = \left| \frac{0,95 - 0,9524}{0,95} \right| * 100$$

$$\% Error = 0,26\%$$

6.2.3.4. Cálculo de velocidad

A un caudal es 15 L/min se calcula la velocidad en la contracción.

$$v_2 = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2\right)}} \times \sqrt{\frac{2 * (g * \Delta h(\rho_{Hg} - \rho_w))}{\rho_w}} = 1,2833 \frac{m}{s}$$

6.2.3.5. Cálculo del número de Reynolds

Para el cálculo del número de Reynolds se emplea la velocidad en la contracción. Por lo tanto, el diámetro es de garganta del Venturi.

$$Re = \frac{\rho * v_2 * d_v}{\mu} = \frac{998 \text{ kg/m}^3 \times 0,2833 \frac{\text{m}}{\text{s}} \times 0,01665 \text{ m}}{0,001005 \text{ kg/m. s}} = 21217$$

Tabla 28

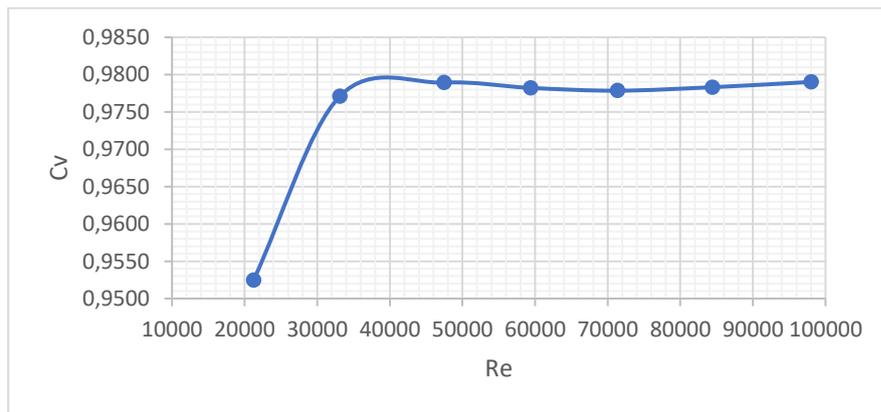
Resultados del coeficiente de descarga del Venturi y el número de Reynolds

$\frac{Q_{Erot}}{\left(\frac{L}{min}\right)}$	$Q_{prom} \left(\frac{m^3}{s}\right)$	$Q_{ideal} \left(\frac{m^3}{s}\right)$	$Q_{real} \left(\frac{m^3}{s}\right)$	Cv_{Exp}	%Error	$v_2 \left(\frac{m}{s^2}\right)$	Re
15	$2,661 * 10^{-4}$	$2,794 * 10^{-4}$	$2,654 * 10^{-4}$	0,9524	0,26	1,2833	21217
25	$4,259 * 10^{-4}$	$4,360 * 10^{-4}$	$4,142 * 10^{-4}$	0,9771	2,84	2,0024	33107
35	$6,011 * 10^{-4}$	$6,247 * 10^{-4}$	$5,935 * 10^{-4}$	0,9789	3,04	2,8694	47443
45	$7,536 * 10^{-4}$	$7,816 * 10^{-4}$	$7,425 * 10^{-4}$	0,9782	2,97	3,5899	59356
55	$9,148 * 10^{-4}$	$9,394 * 10^{-4}$	$8,924 * 10^{-4}$	0,9778	2,93	4,3145	71337
65	$1,087 * 10^{-3}$	$1,111 * 10^{-3}$	$1,056 * 10^{-3}$	0,9783	2,98	5,1050	84407
75	$1,266 * 10^{-3}$	$1,291 * 10^{-3}$	$1,226 * 10^{-3}$	0,9790	3,25	5,9291	98032

Con los datos de la tabla 28 graficamos el coeficiente de descarga de Venturi versus el número de Reynolds.

Figura 56

Coeficiente de descarga del medidor de Venturi vs. número de Reynolds



En la figura 56 podemos observar la curva del coeficiente de descarga de Venturi versus el número de Reynolds en la contracción el cual es semejante la figura 9 de las fuentes bibliográficas. Para el medidor de Venturi el coeficiente de descarga varía de 0,95 a 0,97.

6.2.4. Cálculos de la evaluación del medidor de orificio

En la tabla 29 se muestra los datos experimentales tomadas durante la evaluación.

Tabla 29

Datos experimentales para el medidor de orificio

Q_{Erot} $\left(\frac{L}{min}\right)$	1era Evaluación				2da Evaluación				h_{o1prom} (mm)	h_{o2prom} (mm)
	Medición (Exp.)		Tomas diferenciales		Medición (Exp.)		Tomas diferenciales			
	V (mL)	t (s)	h_{o1} (mm)	h_{o2} (mm)	V (mL)	t (s)	h_{o1} (mm)	h_{o2} (mm)		
15	295	1,04			438	1,7			116,5	129,5
	365	1,2	116	129	357	1,35	117	130		
	380	1,53			379	1,59				
25	550	1,16			485	1,13			109,5	142,25
	605	1,5	109	141	545	1,46	110	144		
	630	1,57			555	1,17				
35	720	1,16			620	1,05			101,5	166,25
	840	1,43	101	166	775	1,21	102	167		
	810	1,31			555	1,01				
45	797	1,01			800	1,08			96,5	190,5
	805	1,09	96	189	740	0,95	97	196		
	750	1,06			790	1,03				
55	810	0,97			990	1,07			82,5	228
	740	0,76	82	226	1030	1,12	83	230		
	800	0,85			1055	1,18				
65	520	0,51			595	0,58			68,5	267,5
	540	0,45	68	265	725	0,59	69	270		
	610	0,6			775	0,75				
75	580	0,41			710	0,5			57,5	335,35
	600	0,5	57	335	720	0,67	58	335,7		
	645	0,53			750	0,59				

6.2.4.1. Determinamos el caudal experimental

El caudal experimental es el mismo que para el caso del medidor de Venturi por lo que los resultados que se muestran en la tabla 26 es para ambos medidores.

6.2.4.2. Calculamos el caudal ideal y real

Cálculo del caudal ideal del medidor

$$Q(ideal) = \frac{A_2}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}} \times \sqrt{\frac{2 * (g * \Delta h(\rho_{Hg} - \rho_w))}{\rho_w}} = 4,201 * 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$$

Cálculo del caudal real del medidor

$$Q(real) = \frac{A_2 * C_o}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}} * \sqrt{\frac{2 * (g * \Delta h(\rho_{Hg} - \rho_w))}{\rho_w}} = 2,605 * 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$$

Determinación el porcentaje de error

$$\%Error = \left| \frac{Q_{prom} - Q_{real}}{Q_{prom}} \right| \times 100 = \left| \frac{2,66 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s} - 2,605 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}}{2,66 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}} \right| \times 100$$

$$\%Error = 2,12\%$$

De la siguiente forma se realiza los siguientes cálculos que se muestran en la tabla 30.

Tabla 30

Resultados del caudal del medidor de orificio y su porcentaje de error

Q_{Erot} $\left(\frac{L}{min}\right)$	Q_{prom} $\left(\frac{m^3}{s}\right)$	h_{o1} (mm)	h_{o2} (mm)	Δh_o (m)	Q_{ideal} $\left(\frac{m^3}{s}\right)$	Q_{real} $\left(\frac{m^3}{s}\right)$	%Error
15	$2,661 * 10^{-4}$	116,5	129,5	0,013	$4,201 * 10^{-4}$	$2,605 * 10^{-4}$	2,12
25	$4,259 * 10^{-4}$	109,5	142,25	0,03275	$6,668 * 10^{-4}$	$4,134 * 10^{-4}$	2,94
35	$6,011 * 10^{-4}$	101,5	166,25	0,06475	$9,376 * 10^{-4}$	$5,813 * 10^{-4}$	3,30
45	$7,536 * 10^{-4}$	96,5	190,5	0,094	$1,136 * 10^{-3}$	$7,041 * 10^{-4}$	6,57
55	$9,148 * 10^{-4}$	82,5	228	0,1455	$1,405 * 10^{-3}$	$8,714 * 10^{-4}$	4,75
65	$1,087 * 10^{-3}$	68,5	267,5	0,199	$1,660 * 10^{-3}$	$1,029 * 10^{-3}$	5,35
75	$1,266 * 10^{-3}$	57,5	335,35	0,27785	$1,942 * 10^{-3}$	$1,204 * 10^{-3}$	4,90

6.2.4.3. Determinamos el coeficiente de descarga para el orificio (C_o)

Cálculo para un caudal de 15 L/min

$$C_o = \frac{Q_{prom}}{Q_{ideal}} = \frac{2,66 * 10^{-4} \frac{m^3}{s}}{4,201 * 10^{-4} m^3/s} = 0,6334$$

Cálculo del porcentaje de error de C_o

$$\%Error = \left| \frac{C_{o_{teórico}} - C_{o_{experimental}}}{C_{o_{teórico}}} \right| * 100 = \left| \frac{0,62 - 0,6334}{0,62} \right| * 100$$

$$\%Error = 2,17 \%$$

6.2.4.4. Cálculo de velocidad

A un caudal de 15 L/min se calculó la velocidad en la contracción.

$$v_2 = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}} \times \sqrt{\frac{2 * (g * \Delta h (\rho_{Hg} - \rho_w))}{\rho_w}} = 1,9295 \frac{m}{s}$$

6.2.4.5. Cálculo del número de Reynolds

Para el cálculo del número de Reynolds se emplea la velocidad en la contracción.

Por lo tanto, el diámetro es de contracción.

$$Re = \frac{\rho * v_2 * d_0}{\mu} = \frac{998 \text{ kg/m}^3 * 1,9295 \frac{m}{s} * 0,01665 \text{ m}}{0,001005 \text{ kg/m.s}} = 31903$$

De este modo se cálculos los demás datos y los resultados se muestran en la tabla 31.

Tabla 31

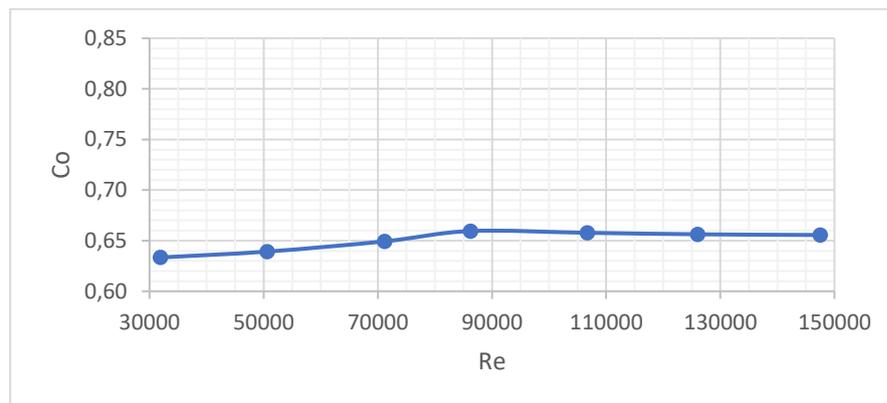
Resultados del coeficiente de descarga del orificio y el número de Reynolds

$\left(\frac{Q_{Erot}}{L}\right)_{min}$	$Q_{prom} \left(\frac{m^3}{s}\right)$	$Q_{ideal} \left(\frac{m^3}{s}\right)$	$Q_{real} \left(\frac{m^3}{s}\right)$	Co_{Exp}	%Error	$v_2 \left(\frac{m}{s^2}\right)$	Re
15	$2,661 \cdot 10^{-4}$	$4,201 \cdot 10^{-4}$	$2,605 \cdot 10^{-4}$	0,6334	2,17	1,9295	31903
25	$4,259 \cdot 10^{-4}$	$6,668 \cdot 10^{-4}$	$4,134 \cdot 10^{-4}$	0,6393	3,03	3,0625	50636
35	$6,011 \cdot 10^{-4}$	$9,376 \cdot 10^{-4}$	$5,813 \cdot 10^{-4}$	0,6493	3,42	4,3062	71199
45	$7,536 \cdot 10^{-4}$	$1,136 \cdot 10^{-3}$	$7,041 \cdot 10^{-4}$	0,6595	6,37	5,2160	86242
55	$9,148 \cdot 10^{-4}$	$1,405 \cdot 10^{-3}$	$8,714 \cdot 10^{-4}$	0,6578	4,98	6,4552	106730
65	$1,087 \cdot 10^{-3}$	$1,660 \cdot 10^{-3}$	$1,029 \cdot 10^{-3}$	0,6563	5,65	7,6247	126068
75	$1,266 \cdot 10^{-3}$	$1,942 \cdot 10^{-3}$	$1,204 \cdot 10^{-3}$	0,6556	5,16	8,9204	147490

Con los datos de la tabla 31 graficamos el coeficiente de descarga de orificio versus el número de Reynolds.

Figura 57

Coeficiente de orificio vs. número de Reynolds



En la figura 57 podemos observar la línea del coeficiente de orificio versus el número de Reynolds en la contracción el cual es semejante la figura 12 de las fuentes bibliográficas. El coeficiente de Venturi varía de un 0,63 a 0,65. Esto es debido a que la parte de los bordes de la contracción cuanto más afilado del orificio será al valor de 0,61 a 0,62. Mientras que cuanto más cuadrado son los valores de 0,65 se llega a esta conclusión de acuerdo a los trabajos en el taller electromecánico en este tipo de medidores.

6.2.5. Cálculo de la evaluación del vertedero rectangular

Los datos experimentales tomados se muestran en la tabla 32.

Tabla 32

Datos experimentales para el vertedero rectangular

Q_{Erot} $\left(\frac{L}{min}\right)$	Primera evaluación			Segunda evaluación			$\Delta h_{VR.prom.}$ (cm)
	Medición (Exp.)		Δh_{VR1} (cm)	Medición (Exp.)		Δh_{VR2} (cm)	
	V (mL)	t(s)		V (mL)	t(s)		
15	250	1,02	7	330	1,31	7	7
	275	1,05		335	1,41		
	382	1,35		405	1,5		
25	490	1,17	7,5	500	1,18	7,5	7,5
	555	1,28		510	1,2		
	534	1,24		520	1,22		
35	880	1,44	7,8	590	0,92	7,9	7,9
	680	1,21		630	1,01		
	660	1,1		500	0,91		
45	640	0,92	8,2	630	0,92	8,2	8,2
	780	0,94		770	0,93		
	795	1,06		740	0,94		
55	830	0,94	8,5	720	0,73	8,5	8,5
	730	0,73		740	0,8		
	765	0,87		800	0,95		
65	595	0,54	8,8	590	0,62	8,8	8,8
	575	0,53		760	0,69		
	690	0,63		780	0,64		
75	535	0,41	9,1	800	0,62	9,1	9,1
	595	0,46		700	0,58		
	685	0,59		630	0,49		

6.2.5.1. Determinación del caudal experimental

Determinamos el caudal experimental para 15 L/min

Cálculo del caudal

$$Q = \frac{V(m^3)}{t(s)}$$

Cálculo del caudal promedio

$$Q_{1.prom} = \frac{Q_1 + Q_2 + Q_3}{3} = 2,53 * 10^{-4} \frac{m^3}{s} \cong 15,80 \text{ L/min}$$

De esta forma se realiza los mismos cálculos, los resultados muestran en la tabla 33.

Tabla 33

Resultados de los caudales experimentales para el vertedero rectangular

Q_{Erot} $\left(\frac{L}{min}\right)$	Primera evaluación					Segunda evaluación					Q_{prom} $\left(\frac{m^3}{s}\right)$
	Medición (Exp.)		Q_{Exp} $\left(\frac{m^3}{s}\right)$	σ $\left(\frac{m^3}{s}\right)$	$Q_{1.prom}$ $\left(\frac{m^3}{s}\right)$	Medición (Exp.)		Q_{Exp} $\left(\frac{m^3}{s}\right)$	σ $\left(\frac{m^3}{s}\right)$	$Q_{2.prom}$ $\left(\frac{m^3}{s}\right)$	
	V (mL)	t (s)				V (mL)	t (s)				
15	250	1,02	$2,52 \cdot 10^{-4}$			330	1,31	$2,52 \cdot 10^{-4}$			
	275	1,05	$2,38 \cdot 10^{-4}$	$1,33 \cdot 10^{-5}$	$2,53 \cdot 10^{-4}$	335	1,41	$2,38 \cdot 10^{-4}$	$1,33 \cdot 10^{-5}$	$2,53 \cdot 10^{-4}$	$2,53 \cdot 10^{-4}$
	382	1,35	$2,70 \cdot 10^{-4}$			405	1,5	$2,70 \cdot 10^{-4}$			
25	490	1,17	$4,24 \cdot 10^{-4}$			500	1,18	$4,24 \cdot 10^{-4}$			
	555	1,28	$4,25 \cdot 10^{-4}$	$1,02 \cdot 10^{-6}$	$4,25 \cdot 10^{-4}$	510	1,2	$4,25 \cdot 10^{-4}$	$1,02 \cdot 10^{-6}$	$4,25 \cdot 10^{-4}$	$4,25 \cdot 10^{-4}$
	534	1,24	$4,26 \cdot 10^{-4}$			520	1,22	$4,26 \cdot 10^{-4}$			
35	880	1,44	$6,41 \cdot 10^{-4}$			590	0,92	$6,41 \cdot 10^{-4}$			
	680	1,21	$6,24 \cdot 10^{-4}$	$3,98 \cdot 10^{-5}$	$6,05 \cdot 10^{-4}$	630	1,01	$6,24 \cdot 10^{-4}$	$3,98 \cdot 10^{-5}$	$6,05 \cdot 10^{-4}$	$6,05 \cdot 10^{-4}$
	660	1,1	$5,49 \cdot 10^{-4}$			500	0,91	$5,49 \cdot 10^{-4}$			
45	640	0,92	$6,85 \cdot 10^{-4}$			630	0,92	$6,85 \cdot 10^{-4}$			
	780	0,94	$8,28 \cdot 10^{-4}$	$6,02 \cdot 10^{-5}$	$7,67 \cdot 10^{-4}$	770	0,93	$8,28 \cdot 10^{-4}$	$6,02 \cdot 10^{-5}$	$7,67 \cdot 10^{-4}$	$7,67 \cdot 10^{-4}$
	795	1,06	$7,87 \cdot 10^{-4}$			740	0,94	$7,87 \cdot 10^{-4}$			
55	830	0,94	$9,86 \cdot 10^{-4}$			720	0,73	$9,86 \cdot 10^{-4}$			
	730	0,73	$9,25 \cdot 10^{-4}$	$5,91 \cdot 10^{-5}$	$9,18 \cdot 10^{-4}$	740	0,8	$9,25 \cdot 10^{-4}$	$5,91 \cdot 10^{-5}$	$9,18 \cdot 10^{-4}$	$9,18 \cdot 10^{-4}$
	765	0,87	$8,42 \cdot 10^{-4}$			800	0,95	$8,42 \cdot 10^{-4}$			
65	595	0,54	$9,52 \cdot 10^{-4}$			590	0,62	$9,52 \cdot 10^{-4}$			
	575	0,53	$1,10 \cdot 10^{-3}$	$1,09 \cdot 10^{-4}$	$1,09 \cdot 10^{-3}$	760	0,69	$1,10 \cdot 10^{-3}$	$1,09 \cdot 10^{-4}$	$1,09 \cdot 10^{-3}$	$1,09 \cdot 10^{-3}$
	690	0,63	$1,22 \cdot 10^{-3}$			780	0,64	$1,22 \cdot 10^{-3}$			
75	535	0,41	$1,29 \cdot 10^{-3}$			800	0,62	$1,29 \cdot 10^{-3}$			
	595	0,46	$1,21 \cdot 10^{-3}$	$3,83 \cdot 10^{-5}$	$1,26 \cdot 10^{-3}$	700	0,58	$1,21 \cdot 10^{-3}$	$3,83 \cdot 10^{-5}$	$1,26 \cdot 10^{-3}$	$1,26 \cdot 10^{-3}$
	685	0,59	$1,29 \cdot 10^{-3}$			630	0,49	$1,29 \cdot 10^{-3}$			

En la tabla 33 se determina la desviación estándar (σ) para poder analizar los datos experimentales donde se aprecia los resultados para 15 L/min se obtiene un caudal experimental (Q_{Exp}) de $2,53 \cdot 10^{-4} (m^3/s) = 15,18$ L/min en la primera evaluación y su desviación estándar es $1,33 \cdot 10^{-5} (m^3/s) = 0,798$ L/min que resulta un valor pequeño, concluyendo que los datos tienen una dispersión pequeña. $15,18$ L/min \pm 0,8 L/min.

6.2.5.2. Cálculo del caudal

Para el vertedero rectangular se empleó la fórmula de Kindsvater-Carter, que es una de las fórmulas que se emplean para vertederos con contracciones y sin ellas la ecuación (43). Con esta ecuación se calcula el caudal en el módulo de fluidos para el vertedero rectangular.

Para un caudal de 15 L/min

Cálculo del caudal teórico

$$Q = 0,2192(0,01 \text{ m} + 0,001 \text{ m})^{\frac{3}{2}} = 2,53 * 10^{-4} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Cálculo del porcentaje de error del caudal

$$\%Error = \left| \frac{Q_{teórico} - Q_{prom.}}{Q_{teórico}} \right| * 100 = \left| \frac{2,53 * 10^{-4} - 2,53 * 10^{-4}}{2,53 * 10^{-4}} \right| * 100$$

$$\% Error = 0,11\%$$

De esta forma se calcula los demás caudales que se muestran en la tabla 34.

Tabla 34

Resultados de caudales para el vertedero rectangular

$\frac{Q_{Erot}}{\left(\frac{L}{min}\right)}$	$Q_{prom} \left(\frac{m^3}{s}\right)$	Carga (Δh_{VR}) (cm)	Carga (Δh_{VR}) (m)	$Q_{teórico} \left(\frac{m^3}{s}\right)$	%Error
15	$2,53 * 10^{-4}$	1	0,01	$2,53 * 10^{-4}$	0,11
25	$4,25 * 10^{-4}$	1,5	0,015	$4,44 * 10^{-4}$	4,20
35	$6,05 * 10^{-4}$	1,9	0,019	$6,20 * 10^{-4}$	2,44
45	$7,67 * 10^{-4}$	2,2	0,022	$7,65 * 10^{-4}$	0,27
55	$9,18 * 10^{-4}$	2,5	0,025	$9,19 * 10^{-4}$	0,13
65	$1,09 * 10^{-3}$	2,8	0,028	$1,08 * 10^{-3}$	0,75
75	$1,26 * 10^{-3}$	3,1	0,031	$1,25 * 10^{-3}$	0,49

6.2.6. Cálculos de la evaluación del vertedero triangular

Los datos experimentales para el vertedero triangular se muestran en la tabla 35.

Tabla 35

Datos experimentales para el vertedero triangular

$\frac{Q_{Erot}}{\left(\frac{L}{min}\right)}$	Primera evaluación			Segunda evaluación			$\Delta h_{VT.prom.}$ (cm)
	Medición (Exp.)		Δh_{VT1} (cm)	Medición (Exp.)		Δh_{VT2} (cm)	
	V (mL)	t(s)		V (mL)	t(s)		
15	365	1,36	10,5	440	1,82	10,4	10,45
	405	1,48		390	1,56		
	387	1,51		410	1,58		
25	665	1,56	11,4	410	1,08	11,5	11,45
	640	1,47		500	1,11		
	670	1,49		520	1,13		

	715	1,23		550	1,02		
35	650	1,11	12,2	540	0,93	12,3	12,25
	660	1,13		725	1,13		
	390	0,61		530	0,78		
45	580	0,7	12,9	840	1,02	12,9	12,9
	650	0,79		760	1		
	750	0,69		740	0,81		
55	570	0,71	13,5	705	0,75	13,5	13,5
	790	0,88		820	0,87		
	650	0,57		720	0,61		
65	640	0,61	14	870	0,83	14	14
	810	0,74		780	0,73		
	735	0,67		805	0,65		
75	730	0,56	14,5	780	0,64	14,4	14,45
	980	0,72		898	0,68		

6.2.6.1. Determinación del caudal experimental

Determinamos el caudal experimental para 15 L/min.

Cálculo del caudal

$$Q = \frac{V(m^3)}{t(s)}$$

Cálculo del caudal promedio

$$Q_{1,prom} = \frac{Q_1 + Q_2 + Q_3}{3} = 2,66 * 10^{-4} \frac{m^3}{s} \cong 15,97 \text{ L/min}$$

De esta forma se calcula los demás caudales para la primera y la segunda evaluación, los resultados se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 36

Resultados de los caudales experimentales para el vertedero triangular

Q_{Erot} $\left(\frac{L}{min}\right)$	Primera evaluación					Segunda evaluación					Q_{prom} $\left(\frac{m^3}{s}\right)$
	Medición (Exp.)		Q_{Exp} $\left(\frac{m^3}{s}\right)$	σ $\left(\frac{m^3}{s}\right)$	$Q_{1.prom}$ $\left(\frac{m^3}{s}\right)$	Medición (Exp.)		Q_{Exp} $\left(\frac{m^3}{s}\right)$	σ $\left(\frac{m^3}{s}\right)$	$Q_{2.prom}$ $\left(\frac{m^3}{s}\right)$	
	V (mL)	t(s)				V (mL)	t(s)				
15	365	1,36	$2,68*10^{-4}$			440	1,82	$2,42*10^{-4}$			
	405	1,48	$2,74*10^{-4}$	$7,27*10^{-6}$	$2,66*10^{-4}$	390	1,56	$2,50*10^{-4}$	$7,25*10^{-6}$	$2,50*10^{-4}$	
	387	1,51	$2,56*10^{-4}$			410	1,58	$2,60*10^{-4}$			
25	665	1,56	$4,26*10^{-4}$			410	1,08	$3,80*10^{-4}$			
	640	1,47	$4,35*10^{-4}$	$9,62*10^{-6}$	$4,37*10^{-4}$	500	1,11	$4,51*10^{-4}$	$3,59*10^{-5}$	$4,30*10^{-4}$	
	670	1,49	$4,50*10^{-4}$			520	1,13	$4,60*10^{-4}$			
35	715	1,23	$5,81*10^{-4}$			550	1,02	$5,39*10^{-4}$			
	650	1,11	$5,86*10^{-4}$	$1,77*10^{-6}$	$5,84*10^{-4}$	540	0,93	$5,81*10^{-4}$	$4,20*10^{-5}$	$5,87*10^{-4}$	
	660	1,13	$5,84*10^{-4}$			725	1,13	$6,42*10^{-4}$			
45	390	0,61	$6,39*10^{-4}$			530	0,78	$6,80*10^{-4}$			
	580	0,7	$8,29*10^{-4}$	$8,79*10^{-5}$	$7,64*10^{-4}$	840	1,02	$8,24*10^{-4}$	$5,89*10^{-5}$	$7,54*10^{-4}$	
	650	0,79	$8,23*10^{-4}$			760	1	$7,60*10^{-4}$			
55	750	0,69	$1,09*10^{-3}$			740	0,81	$9,14*10^{-4}$			
	570	0,71	$8,03*10^{-4}$	$1,18*10^{-4}$	$9,29*10^{-4}$	705	0,75	$9,40*10^{-4}$	$1,31*10^{-5}$	$9,32*10^{-4}$	
	790	0,88	$8,98*10^{-4}$			820	0,87	$9,43*10^{-4}$			
65	650	0,57	$1,14*10^{-3}$			720	0,61	$1,18*10^{-3}$			
	640	0,61	$1,05*10^{-3}$	$3,72*10^{-5}$	$1,09*10^{-3}$	870	0,83	$1,05*10^{-3}$	$5,81*10^{-5}$	$1,10*10^{-3}$	
	810	0,74	$1,09*10^{-3}$			780	0,73	$1,07*10^{-3}$			
75	735	0,67	$1,10*10^{-3}$			805	0,65	$1,24*10^{-3}$			
	730	0,56	$1,30*10^{-3}$	$1,13*10^{-4}$	$1,25*10^{-3}$	780	0,64	$1,22*10^{-3}$	$4,41*10^{-5}$	$1,26*10^{-3}$	
	980	0,72	$1,36*10^{-3}$			898	0,68	$1,32*10^{-3}$			

En la tabla 36 se determina la desviación estándar (σ) para poder analizar los datos experimentales donde se aprecia los resultados para 15 L/min se obtiene un caudal experimental (Q_{Exp}) de $2,66*10^{-4} (m^3/s) = 15,96$ L/min en la primera evaluación y su desviación estándar es $7,27*10^{-6} (m^3/s) = 0,436$ L/min que resulta un valor pequeño, concluyendo que los datos tienen una dispersión pequeña, con $15,96$ L/min $\pm 0,436$ L/min.

6.2.6.2. Cálculo del caudal

Para el vertedero triangular se empleó la fórmula de la Universidad de la Católica de Chile el cual es la ecuación (44). Con esta ecuación se calcula el caudal en el módulo de fluidos para el vertedero triangular.

Para un caudal teórico de 15 L/min

Cálculo de caudal teórico

$$Q = 0,61(0,0445)^{\frac{5}{2}} = 2,55 * 10^{-4} \frac{m^3}{s}$$

Cálculo del porcentaje de error del caudal

$$\%Error = \left| \frac{Q_{teórico} - Q_{prom}}{Q_{teórico}} \right| * 100 = \left| \frac{2,55 * 10^{-4} - 2,58 * 10^{-4}}{2,55 * 10^{-4}} \right| * 100$$

$$\% Error = 1,35\%$$

De esta forma se calcula los demás caudales que se muestran en la tabla 37.

Tabla 37

Resultados de caudales para el vertedero triangular

$Q_{Erot} \left(\frac{L}{min} \right)$	$Q_{prom} \left(\frac{m^3}{s} \right)$	(Δh_{VT1}) (cm)	(Δh_{VT2}) (m)	$Q_{teórico} \left(\frac{m^3}{s} \right)$	%Error
15	$2,58 * 10^{-4}$	4,45	0,0445	$2,55 * 10^{-4}$	1,35
25	$4,34 * 10^{-4}$	5,45	0,0545	$4,23 * 10^{-4}$	5,51
35	$5,85 * 10^{-4}$	6,25	0,0625	$5,96 * 10^{-4}$	1,73
45	$7,59 * 10^{-4}$	6,90	0,0690	$7,63 * 10^{-4}$	0,51
55	$9,31 * 10^{-4}$	7,50	0,0750	$9,40 * 10^{-4}$	0,97
65	$1,10 * 10^{-3}$	8,00	0,0800	$1,10 * 10^{-3}$	0,67
75	$1,26 * 10^{-3}$	8,45	0,0845	$1,27 * 10^{-3}$	0,75

6.3. EVALUACIÓN DEL EQUIPO QUE SE ENCUENTRA EN EL LABORATORIO DE MECÁNICA DE FLUIDOS

6.3.1. Datos generales

Los siguientes datos fueron tomados del anexo A.

- Temperatura $T^{\circ} = 20^{\circ}C$
- Densidad de agua $\rho_w = 998 \text{ kg}/m^3$
- Viscosidad del agua $\mu = 1,001005 \frac{kg}{m.s}$
- Gravedad $g = 9,81 \text{ m}/s^2$

Datos del medidor de Venturi

- Coeficiente de Venturi $C_v = 0,95$.
- Diámetro de la tubería $D_1 = 0,026$ m.
- Área de la tubería $A_1 = 0,0005309$ m²
- Diámetro de la garganta del Venturi $D_v = 0,016$ m.
- Área de la garganta del Venturi $A_v = 0,0002011$ m²

Datos del medidor de orificio

- Coeficiente del orificio $C_0 = 0,61$
- Diámetro de la tubería $D_1 = 0,0425$ m.
- Área de la tubería $A_1 = 0,0014186$ m²
- Diámetro del orificio $D_o = 0,020$ m
- Área del orificio $A_o = 0,0003142$ m²

Datos del medidor de rotámetro

- El rotámetro presente una escala de 0 - 34 L/min.

6.3.2. Resultados de los cálculos de la evaluación

Se realizó la toma de datos para su posterior evaluación

Tabla 38

Datos experimentales del Venturi y orificio

$Q_{Erat} \left(\frac{L}{min} \right)$	<i>Medición (Exp.)</i>		<i>Venturi</i>		<i>Orificio</i>	
	<i>V (mL)</i>	<i>t (s)</i>	<i>h_{v1} (mm)</i>	<i>h_{v2} (mm)</i>	<i>h_{o1} (mm)</i>	<i>h_{o2} (mm)</i>
0	130	3,04				
	170	4,08	11	10	130	127
	205	4,27				
2	160	1,73				
	200	2,45	25	18	149	140
	238	3,24				
4	218	1,58				
	299	1,85	42	28	173	158
	250	2,38				
6	250	1,5				
	330	1,86	72	44	218	187
	338	2,12				

	275	1,01				
8	429	1,53	100	58	260	214
	460	1,66				
	256	1,09				
10	380	1,14	127	69	303	239
	410	1,40				

Cálculo para el medidor de Venturi

Los cálculos se pueden observar en el anexo K.

Tabla 39

Resultados del caudal del medidor de Venturi y su porcentaje de error

$\frac{Q_{Erot}}{\left(\frac{L}{min}\right)}$	$Q_{exp} \left(\frac{m^3}{s}\right)$	h_{V1} (mm)	h_{V2} (mm)	Δh_V (m)	$Q_{ideal} \left(\frac{m^3}{s}\right)$	$Q_{real} \left(\frac{m^3}{s}\right)$	%Error
0	$4,41 \cdot 10^{-5}$	11	10	0,001	$3,04 \cdot 10^{-5}$	$2,89 \cdot 10^{-5}$	34,52
2	$8,25 \cdot 10^{-5}$	25	18	0,007	$8,05 \cdot 10^{-5}$	$7,65 \cdot 10^{-5}$	7,32
4	$1,35 \cdot 10^{-4}$	42	28	0,014	$1,14 \cdot 10^{-4}$	$1,08 \cdot 10^{-4}$	19,81
6	$1,68 \cdot 10^{-4}$	72	44	0,028	$1,61 \cdot 10^{-4}$	$1,53 \cdot 10^{-4}$	8,86
8	$3,10 \cdot 10^{-4}$	100	58	0,042	$1,97 \cdot 10^{-4}$	$1,87 \cdot 10^{-4}$	39,49
10	$2,87 \cdot 10^{-4}$	127	69	0,058	$2,320 \cdot 10^{-4}$	$2,20 \cdot 10^{-4}$	23,30

En la tabla 39 se tiene porcentajes de error de 7,39 % a 39,49 % de error en los caudales para el medidor de Venturi en una escala de 0 L/min a 10 L/min.

Tabla 40

Resultados del coeficiente de descarga del Venturi y el número de Reynolds

$\frac{Q_{Erot}}{\left(\frac{L}{min}\right)}$	$Q_{exp} \left(\frac{m^3}{s}\right)$	$Q_{ideal} \left(\frac{m^3}{s}\right)$	$Q_{real} \left(\frac{m^3}{s}\right)$	Cv_{Exp}	%Error	$v_2 \left(\frac{m}{s^2}\right)$	Re
0	$4,41 \cdot 10^{-5}$	$3,04 \cdot 10^{-5}$	$2,89 \cdot 10^{-5}$	1,4508	52,71	0,1513	2405
2	$8,25 \cdot 10^{-5}$	$8,05 \cdot 10^{-5}$	$7,65 \cdot 10^{-5}$	1,0250	7,90	0,4004	6363
4	$1,35 \cdot 10^{-4}$	$1,14 \cdot 10^{-4}$	$1,08 \cdot 10^{-4}$	1,1846	24,70	0,5663	8999
6	$1,68 \cdot 10^{-4}$	$1,61 \cdot 10^{-4}$	$1,53 \cdot 10^{-4}$	1,0424	9,72	0,8008	12727
8	$3,10 \cdot 10^{-4}$	$1,97 \cdot 10^{-4}$	$1,87 \cdot 10^{-4}$	1,5699	65,25	0,9808	15587
10	$2,87 \cdot 10^{-4}$	$2,320 \cdot 10^{-4}$	$2,20 \cdot 10^{-4}$	1,2385	30,37	1,1526	18317

En la tabla 40 se tiene porcentajes de error de 7,90 % a 65,25 % de error en los coeficientes de descarga para el medidor de Venturi en una escala de 0 L/min a 10 L/min.

Cálculo para el medidor de orificio

Los cálculos para el medidor de orificio se pueden observar en el anexo K.

Tabla 41

Resultados del caudal del medidor de orificio y su porcentaje de error

Q_{Erot} $\left(\frac{L}{min}\right)$	Q_{exp} $\left(\frac{m^3}{s}\right)$	h_{01} (mm)	h_{02} (mm)	Δh_0 (m)	Q_{ideal} $\left(\frac{m^3}{s}\right)$	Q_{real} $\left(\frac{m^3}{s}\right)$	%Error
0	$4,41 \cdot 10^{-5}$	130	127	0,003	$7,82 \cdot 10^{-5}$	$4,77 \cdot 10^{-5}$	7,80
2	$8,25 \cdot 10^{-5}$	149	140	0,009	$1,35 \cdot 10^{-5}$	$8,26 \cdot 10^{-5}$	0,06
4	$1,35 \cdot 10^{-4}$	173	158	0,015	$1,75 \cdot 10^{-4}$	$1,07 \cdot 10^{-4}$	20,96
6	$1,68 \cdot 10^{-4}$	218	187	0,031	$2,51 \cdot 10^{-4}$	$1,53 \cdot 10^{-4}$	8,69
8	$3,10 \cdot 10^{-4}$	260	214	0,046	$3,06 \cdot 10^{-4}$	$1,87 \cdot 10^{-4}$	39,70
10	$2,87 \cdot 10^{-4}$	303	239	0,064	$3,61 \cdot 10^{-4}$	$2,20 \cdot 10^{-4}$	23,27

En la tabla 41 se tiene porcentajes de error de 0,06 % a 39,70 % de error en los caudales para el medidor de orificio en una escala de 0 L/min a 10 L/min.

Tabla 42

Resultados del coeficiente de descarga del orificio y el número de Reynolds

Q_{Erot} $\left(\frac{L}{min}\right)$	Q_{exp} $\left(\frac{m^3}{s}\right)$	Q_{ideal} $\left(\frac{m^3}{s}\right)$	Q_{real} $\left(\frac{m^3}{s}\right)$	Co_{Exp}	%Error	v_2 $\left(\frac{m}{s^2}\right)$	Re
0	$4,41 \cdot 10^{-5}$	$7,82 \cdot 10^{-5}$	$4,77 \cdot 10^{-5}$	0,5648	7,41	0,2488	4942
2	$8,25 \cdot 10^{-5}$	$1,35 \cdot 10^{-5}$	$8,26 \cdot 10^{-5}$	0,6096	0,06	0,4309	8560
4	$1,35 \cdot 10^{-4}$	$1,75 \cdot 10^{-4}$	$1,07 \cdot 10^{-4}$	0,7718	26,51	0,5563	11051
6	$1,68 \cdot 10^{-4}$	$2,51 \cdot 10^{-4}$	$1,53 \cdot 10^{-4}$	0,6680	9,51	0,7997	15887
8	$3,10 \cdot 10^{-4}$	$3,06 \cdot 10^{-4}$	$1,87 \cdot 10^{-4}$	1,0115	65,83	0,9742	19352
10	$2,87 \cdot 10^{-4}$	$3,61 \cdot 10^{-4}$	$2,20 \cdot 10^{-4}$	0,7950	30,34	1,1491	22827

En la tabla 42 se tiene porcentajes de error de 0,06 % a 65,83 % de error en el coeficiente de descarga para el medidor de orificio en una escala de 0 L/min a 10 L/min.

Cálculo del vertedero rectangular

Datos tomados para la evaluación del vertedero rectangular

Tabla 43

Datos experimentales para el vertedero rectangular

<i>Medición (Exp.)</i>		<i>Carga ($\Delta h_{VR}(cm)$)</i>
<i>V(mL)</i>	<i>t (s)</i>	
405	4,56	
440	5,08	1,5
425	4,48	
505	2,36	
432	2,07	2,5
548	2,60	
420	1,32	
516	1,63	3
541	1,78	
610	1,24	
670	1,22	4
504	1,08	

Los cálculos correspondientes se pueden observar en el anexo K.

Tabla 44

Resultados experimentales para el vertedero rectangular

$Q_{exp} \left(\frac{m^3}{s} \right)$	<i>Carga (Δh_{VR}) (cm)</i>	<i>Carga (Δh_{VR}) (m)</i>	$Q_{teórico} \left(\frac{m^3}{s} \right)$	%Error
$8,94 \cdot 10^{-5}$	1,5	0,015	$9,93 \cdot 10^{-5}$	9,99
$2,11 \cdot 10^{-4}$	2,5	0,025	$2,14 \cdot 10^{-4}$	1,15
$3,13 \cdot 10^{-4}$	3	0,030	$2,81 \cdot 10^{-4}$	11
$5,03 \cdot 10^{-4}$	4	0,040	$4,32 \cdot 10^{-4}$	16

En la tabla 44 se tiene porcentajes de error de 9,99 % a 16 % de error en los caudales para el vertedero rectangular.

Cálculo del vertedero triangular

Datos tomados para la evaluación del vertedero triangular

Tabla 45

Datos experimentales para el vertedero triangular

<i>Medición (Exp.)</i>		<i>Carga (Δh_{VT} (cm))</i>
<i>V (mL)</i>	<i>t (s)</i>	
249	3,16	2,5
300	3,24	
279	3,14	
375	1,96	3
260	1,80	
330	1,74	
370	1,18	4
465	1,61	
445	1,29	

Los cálculos correspondientes se pueden observar en el anexo K.

Tabla 46

Resultados experimentales para el vertedero triangular

$Q_{exp} \left(\frac{m^3}{s} \right)$	<i>Carga (Δh_{VT}) (cm)</i>	<i>Carga (Δh_{VT}) (m)</i>	$Q_{teórico} \left(\frac{m^3}{s} \right)$	<i>%Error</i>
$8,67 \cdot 10^{-5}$	2,5	0,025	$1,42 \cdot 10^{-4}$	39,08
$1,75 \cdot 10^{-4}$	3	0,030	$2,25 \cdot 10^{-4}$	22,03
$3,36 \cdot 10^{-4}$	4	0,040	$4,61 \cdot 10^{-4}$	27,03

En la tabla 46 se tiene porcentajes de error de 22,03 % a 39,08 % de error en los caudales para el vertedero triangular.

6.4. DISCUSIÓN

- Al dimensionar los medidores de tubo de Venturi y placa de orificio se usan las normas internacionales ISO 5167, en donde se especifican los criterios de diseño. De forma similar, García y Neira (2016) usan las mismas normas para el diseño y construcción de estos medidores diferenciales, concluyendo que el medidor de Venturi es más exacto. Este resultado concuerda con lo que se halló.

Resumen de los resultados los resultados experimentales

Tabla 47

Resumen de los resultados obtenidos para el medidor de Venturi

Medidor de Venturi							
$Q_{Erot} \left(\frac{L}{min} \right)$	15	25	35	45	55	65	75
$Q_{Exp} \left(\frac{L}{min} \right)$	15,97	25,56	36,07	45,22	54,89	65,24	75,97
$Q_{real} \left(\frac{L}{min} \right)$	15,93	24,85	35,61	44,55	53,54	63,35	73,58
$Cv_{teórico}$	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95
Cv_{Exp}	0,9524	0,9771	0,9789	0,9782	0,9778	0,9783	0,9790
% Error caudal	0,26	2,76	1,27	1,48	2,45	2,89	3,15
% Error Cv	0,26	2,84	3,04	2,97	2,93	2,98	3,05

Tabla 48

Resumen de los resultados obtenidos para el medidor de orificio

Medidor de orificio							
$Q_{Erot} \left(\frac{L}{min} \right)$	15	25	35	45	55	65	75
$Q_{Exp} \left(\frac{L}{min} \right)$	15,97	25,56	36,07	45,22	54,89	65,24	75,97
$Q_{real} \left(\frac{L}{min} \right)$	15,63	24,80	34,88	42,25	52,28	61,76	72,25
$Co_{teórico}$	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62
Co_{Exp}	0,6334	0,6393	0,6493	0,6595	0,6588	0,6563	0,6546
% Error caudal	2,12	2,94	3,3	6,57	4,75	5,35	4,9
% Error Co	2,16	3,03	3,42	6,37	6,25	5,85	5,58

- Los caudales del rotámetro experimental y real en la tabla 38 para el medidor de Venturi se asemejan de igual modo en la tabla 39 para el medidor de orificio. De estos medidores el porcentaje de error del medidor de Venturi son menores en comparación del medidor de orificio esto es debido a las pérdidas de carga presentadas por la fricción. Por lo tanto, el medidor de Venturi es más exacto que el medidor de orificio.
- El coeficiente de descarga del medidor de Venturi experimental promedio es 0,97 el cual es semejante al que se calcula teóricamente que es 0,95. El coeficiente de descarga de Venturi se encuentra en el rango que señala Gengel y Cimbala (2012), que “los coeficientes de descargas son altos y que varían entre 0,95 y 0,99”. Para el coeficiente de descarga de orificio Gengel y

Cimbala (2012), señala “los coeficientes de descarga de orificio 0,61 a 0,62 para flujos turbulentos”, el coeficiente de descarga se calculó 0,62 teóricamente que es semejante al coeficiente de descarga experimental promedio de 0,65 este valor está en función al borde del orificio de la placa que tan afilado o cuadrado se construyó el cual si es más agudo más exacto será al valor de 0,61 a 0,62 de acuerdo a los trabajos de construcción de estos medidores en el taller electromecánico. Los porcentajes de error de los coeficientes de descarga son aceptables siendo el máximo error de 3% para el coeficiente descarga de Venturi y 6,5% para el coeficiente descarga de orificio.

Para el vertedero rectangular y triangular tenemos el resumen de las evaluaciones.

Tabla 49

Resumen de los resultados obtenidos para el vertedero rectangular

Vertedero rectangular							
$Q_{Erot} \left(\frac{L}{min} \right)$	15	25	35	45	55	65	75
$Q_{Exp} \left(\frac{L}{min} \right)$	15,19	25,50	36,29	46,00	55,07	65,44	75,66
$Q_{real} \left(\frac{L}{min} \right)$	15,17	26,62	37,20	45,88	55,14	64,95	75,29
C_{VR}	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60
% <i>Error caudal</i>	0,11	4,2	2,44	0,27	0,13	0,75	0,49

Tabla 50

Resumen de los resultados obtenidos para el vertedero triangular

Vertedero triangular							
$Q_{Erot} \left(\frac{L}{min} \right)$	15	25	35	45	55	65	75
$Q_{Exp} \left(\frac{L}{min} \right)$	15,50	26,02	35,12	45,54	55,84	65,81	75,39
$Q_{real} \left(\frac{L}{min} \right)$	15,29	25,38	35,74	45,77	56,38	66,25	75,97
C_{VR}	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61
% <i>Error caudal</i>	1,35	5,51	1,73	0,51	0,97	0,67	0,75

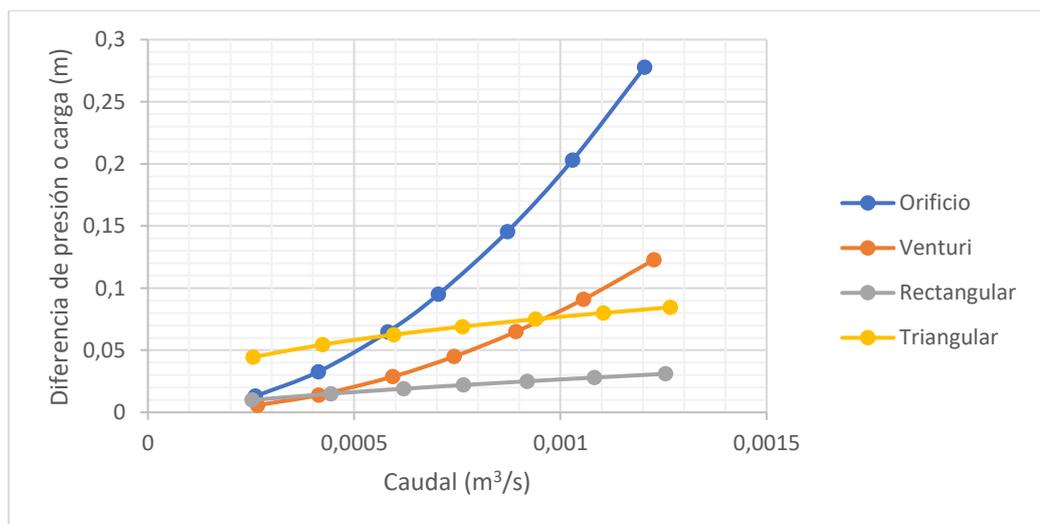
- Al dimensionar los vertederos rectangulares se usó la fórmula de Kindsvater-Carter debido a su mayor confiabilidad y el uso para todo tipo de vertederos rectangulares y para el vertedero triangular se empleó la fórmula de la Universidad Católica de Chile, de los cuales el vertedero triangular es mejor

en casos de caudales pequeños. De forma similar, Alarcon y Gutierrez (2018) concluyeron en su trabajo de investigación que los vertederos rectangulares son más adecuados para grandes flujos y el vertedero triangular para pequeños flujos.

- Los caudales del rotámetro experimental y real en la tabla 40 para el vertedero rectangular se asemejan de igual modo en la tabla 41 para el vertedero triangular. El coeficiente de descarga para el vertedero rectangular es 0,6 y para el vertedero triangular es 0,61. Estos valores están en el rango mencionado por Munson et al (2013), que “los valores característicos del coeficiente de descarga para los vertederos rectangular y triangular están en el intervalo de 0,58 a 0,62”.
- En la figura 58 se muestra que en los medidores de canal cerrado el medidor de orificio tiene mayor pérdida de carga que el medidor de Venturi esto es debido que aguas debajo de la contracción del medidor de orificio es de forma brusca mientras que en el medidor de Venturi es de forma gradual por la zona de convergencia, del mismo modo, los dos medidores de canal abierto el vertedero triangular presenta mayor pérdida de carga en comparación con el vertedero rectangular con contracciones. Esto es debido a que los medidores rectangulares con contracciones tienen una modificación en su estructura que son dos contracciones que ayudan a tener menor pérdida de carga.

Figura 58

Diferencia de presión vs. caudal de los medidores



- Al realizar la calibración de medidores se realiza de 10 L/min a 80 L/min obtiene ecuaciones de calibración el cual al realizar el reemplazo de la diferencia de presión y carga se obtiene de forma directa el caudal. Los resultados se pueden observar en el anexo H para el rotámetro se tiene un porcentaje de error de 0,41 % a 2,37 %, para el medidor de Venturi 0,24 % a 1,50 % de error, medidor de orificio 0,05 % a 3,11 % de error, vertedero rectangular con contracciones 0,91 % a 5,09 % de error y por último para el vertedero triangular 0,04 % a 2,34 % de error.
- La evaluación del equipo que se encuentra en el laboratorio de mecánica de fluidos en el medidor de Venturi tiene 7,39 % a 39,49 % de error con respecto a los caudales como se muestra en la tabla 39, para el medidor de orificio tiene 0,06 % a 65,83 % de error como se puede observar en la tabla 42, el vertedero rectangular tiene 9,99 % a 16 % de error como se indica en la tabla 44 y para el vertedero triangular 22,03 % a 39,08 % como se muestra en la tabla 46. Estos porcentajes de error altos son debido a muchos factores como el tiempo del equipo experimental en operación, las cavitaciones de la bomba por la presencia de burbujas en el tanque, la acumulación de sarro en las tuberías entre otros.

CONCLUSIONES

Después de haber finalizado el trabajo de diseño de medidores de flujo se llega a las siguientes conclusiones

- Se diseñó el módulo de medidores de flujo tipo Venturi, orificio y vertedero para mejorar la exactitud de medición, cumpliendo con las características deseadas que son el coeficiente de Venturi (C_v) es 0,97, el coeficiente de orificio (C_v) es 0,65 y el vertedero con compuerta rectangular y rectangular tiene un coeficiente de 0,6 y 0,61 respectivamente, tomando en cuentas la información bibliográfica para el diseño, la construcción y el montaje en el taller electromecánico Holger K. Hansen.
- El módulo de medidores de flujo de fluidos cumple con las características deseadas como: el diámetro de las tuberías 27,3 mm la relación de diámetros (β) es 0,61. Con estos parámetros mencionados se logró dimensionar cada uno de los medidores de forma satisfactoria para el módulo de fluidos los cuales se plasmaron en planos del módulo de medidores de flujo para visualizar las partes y estructura del módulo.
- Para el módulo de medidores de flujo se seleccionó el material de acero inoxidable para las tuberías, para los soportes, el tanque de almacenamiento de agua y el vertedero para la construcción del módulo por su resistencia a la corrosión y su disponibilidad, también para el medidor de Venturi se seleccionó el material de acrílico para visualizar el flujo de agua al interior del medidor.
- La construcción del módulo de flujo de fluidos se logró para cada uno de los medidores tipo Venturi, orificio y el vertedero, con las dimensiones desarrolladas previamente.
- El comportamiento de caudal en cada uno de los medidores diseñados podemos concluir que para la calibración se tomó rango de 10 L/min a 80 L/min con el método volumétrico donde la presión diferencial se relaciona con la descarga mediante una calibración de cada uno de los medidores donde se obtuvo una ecuación de la curva de presión-descarga, donde las ecuaciones obtenidas son: La ecuación de calibración para el rotámetro es $Q = 1,1975(Q_{Erot})^{0,9598}$, para el medidor de Venturi es $Q = 6,5156(\Delta h_V)^{0,5126}$, para el medidor de orificio es $Q = 4,3201(\Delta h_o)^{0,5119}$, para el vertedero rectangular es $Q = 14,4935(\Delta h_{VR})^{1,4245}$ y para el vertedero triangular es $Q =$

$0,3208(\Delta h_{VT})^{2,563}$. Estas ecuaciones se obtuvieron al realizar una regresión lineal de los datos, el cual con las lecturas de presión diferencial y carga se reemplaza en las ecuaciones se obtienen los caudales.

- Posteriormente se realiza las dos evaluaciones en un rango de 15 L/min a 75 L/min en los cuales se calcula los caudales para el medidor de Venturi con un rango de error de 0 % a 3 % como se muestra en la tabla 27, para el caso de la placa de orificio es de 2 % a 6,5 % de error como se muestra en la tabla 30, de esta forma se comprueba que el medidor diferenciales el medidor de Venturi es más exacto. Consecuentemente, para el vertedero rectangular se obtiene el error de 0 % a 4 % como se observa en la tabla 34, para el caso del vertedero con compuerta triangular teniendo porcentajes de error de 0 % a 6 % de error como se muestra en la tabla 37.

RECOMENDACIONES

- Para la construcción del vertedero se debe tener en cuenta el espesor de la lámina en este caso el espesor seleccionado de 2,5 mm pero para menor deformidad al soldar se recomendaría 3 mm para obtener menor deformación al realizar la soldadura.
- Para los medidores diferenciales tipo Venturi en la construcción en acrílico se debe tener cuidado con que se quiebre por lo que se recomienda el uso de abrazaderas en ambos extremos. Para el caso de orificio la placa tiene un espesor de 2,5 mm pero se puede variar los espesores y el ángulo de inclinación que es de un rango de 30° a 45° el cual se varía hasta obtener el $C_0 = 0,62$.
- Para obtener buenos resultados al momento de evaluar el módulo es recomendable expulsar las burbujas de agua que pueden encontrar en los manómetros diferenciales y en las tomas de los medidores de orificio y Venturi.
- Se recomienda realizar un mantenimiento periódico, para tener una mejor lectura de datos adecuadas para sus respectivos cálculos en las prácticas que se realizan se debe eliminar las burbujas presentes en los manómetros diferenciales y en las conexiones.
- Para el correcto funcionamiento del módulo se debe encontrar en buenas condiciones y tener instalaciones adecuadas, también después de las evaluaciones se debe eliminar el agua de las tuberías para evitar la corrosión.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alarcon, F. y Gutierrez, D. (2018). *Diseño y construcción de un banco de prueba para realización del ensayo de vertederos y de resalto hidráulico, para el laboratorio de hidráulica de la Universidad Piloto de Colombia-Seccional Alto Magdalena* [Tesis de titulación, Universidad Piloto de Colombia]. Repositorio institucional. <http://repository.unipiloto.edu.co/handle/20.500.12277/5748>.
- Alejos zelaya, J. (2018). *Diseño de un banco hidráulico para el estudio experimental de las pérdidas de carga en redes de distribución hidráulica. Laboratorio mecánico de fluido y maquinas térmicas FIME-UNAC* [Tesis de titulación, Universidad Nacional del Callao]. Repositorio institucional. <http://hdl.handle.net/20.500.12952/4580>.
- Amacifuén, J., Dahua, R. y Flores, R. (2010). *Diseño, construcción e instalación de un equipo para la medición de flujo y pérdidas por fricción para el laboratorio de procesos y operaciones unitarias de la FIQ-UNAP* [Tesis de titulación, Universidad Nacional de la Amazonía Peruana]. Repositorio institucional. <http://repositorio.unapiquitos.edu.pe/handle/20.500.12737/3049>.
- Carrasco Díaz S. (2005). *Metodología de investigación científica*. Sello Editorial San Marcos.
- Carrasco Díaz S. (2005). *Metodología de la investigación científica*. Sello Editorial San Marcos.
- Creus-Solé, A. (2010). *Instrumentación industrial* (8.^a ed.). Sello Editorial Alfaomega.
- Darby, R. (2001). *Chemical Engineering Fluid Mechanics*.
- Dulhoste Francois, J. (2015). *Medición de flujo*. Temario universitario, Universidad de los Andes. http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/djean/index_archivos/Documentos/I5_Medicion_de_flujo%20A.pdf
- Flores Solis, Y. (2016). *Diseño y construcción de un prototipo de laboratorio para realizar prácticas en fluidos incompresibles* [Tesis de titulación, Instituto Politécnico Nacional]. Repositorio institucional. <http://tesis.ipn.mx/handle/123456789/21625>.

- Franzini, J. y Finnemire, J. (1999). *Mecánica de fluidos con aplicaciones en ingeniería*. Sello Editorial McGrawHill.
- Garcia, L. y Neira, A. (2016). *Diseño y construcción de un sistema didáctico de medición de flujo mediante el principio diferencial de presión* [Tesis de titulación, Universidad de Guayaquil]. Repositorio institucional. <http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/18849>
- Gengel, Y. y Cimbala, J. (2012). *Mecánico de fluidos* (2.^a ed.). Sello Editorial McGraw-Hill
- Giles, R., Evett, J. y Liu, C. (1994). *Mecánica de los fluidos e hidráulica*. Sello Editorial McGraw-Hill.
- Harriott, P., McCabe, W., y Smith, J. (1991). *Operaciones Básicas de Ingeniería Química*. Editorial McGRAW-HILL.
- López-Cualla, R. (1995). *Elementos de diseño para acueductos y alcantarillados*. Escuela colombiana de ingeniería.
- Mendoza R, C., (2015). *Mecánica de fluidos al diseño de equipos de procesos industriales*. Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga.
- Ministry of Housing and Urban Affairs (2020). *Wáter Meters, Instrumentation & SCADA*.
https://mohua.gov.in/pdf/5efc2893a6f0bAdvisory_on_Water_Meter_Instrumentation_and_SCADA_Final.pdf
- Mott Robert, L. (2006). *Mecánica de fluidos* (6.^a ed.). Sello Editorial Pearson Educación.
- Mott, R. y Untener, J. (2015). *Mecánica de fluidos* (7.^a ed.). Sello Editorial Pearson.
- Munson, B., Young, D. y Okiishi, T. (1999). *Fundamentos de Mecánica de Fluidos*. Sello Editorial Limusa.
- Nevers, N. (2007). *Mecánica de fluidos para ingeniería química* (1.^a ed.). Universidad de Utah.
- Potter, M., y Wiggert, D. (1998). *Mecánica de fluidos*. Sello Editorial Prentice Hall.
- Rocha Felices, A. (s.f). *Hidráulica de tuberías y canales*.

Sotelo Ávila, G. (1997). *Hidráulica general*. Sello Editorial Limusa

Sotelo Ávila, G. (2002). *Hidráulica de canales*. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.

Streeter, V. (1970). *Mecánica de los fluidos*. Editorial McGRAW-HILL.

LISTA DE ABREVIATURAS

Q_{exp} : Caudal experimental.

Q_{ideal} : Caudal ideal.

Q_{prom} : Caudal Promedio.

Q_{real} : Caudal real.

$Cv_{experimental}$: Coeficiente de Venturi experimental

$Co_{experimental}$: Coeficiente de orificio experimental.

$Cv_{teórico}$: Coeficiente de Venturi teórico.

$Co_{teórico}$: Coeficiente de orificio teórico.

ρ_w : Densidad del agua.

ρ_{Hg} : Densidad de mercurio.

Re : Número de Reynolds.

d_v : Diámetro de la garganta de Venturi.

d_o : Diámetro de la contracción de orificio.

Δh_{VR} : Diferencia de la carga para el vertedero rectangular.

Δh_{VT} : Diferencia de carga para el vertedero triangular.

Δh_o : Diferencia de presión para el orificio.

Δh_v : Diferencia de presión para el Venturi.

σ : Desviación estándar.

t : tiempo.

v : velocidad de flujo.

V : Volumen.

D_i : Diámetro interior de la tubería.

GLOSARIO

Fluido	Sustancia que se deforma constantemente cuando está sometido a un esfuerzo cortante.
Caudal	Cantidad de sustancia que circula por un ducto cerrado o abierto por un determinado tiempo.
Tubo de Venturi	Medidor diferencial volumétrico con una disminución gradual (garganta) y una expansión gradual.
Placa de orificio	Es una placa con un orificio los cuales pueden ser concéntricos, excéntricos o segmentado, el cual también es un medidor de presión diferencial volumétrico.
Vertedero	Es un canal abierto con compuertas como la rectangular, triangular, trapezoidal entre otros. Con la finalidad de medir el flujo del fluido.
ISO	International Organization for Standardization (Organización Internacional de Normalización)
ASME	American Society Of Chemical Engineers (Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos)
Niple	Son pequeñas piezas de tuberías.

ANEXOS

ANEXO A. PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS

Tabla A1

Propiedades físicas de los líquidos más comunes (S.I)

Liquid	Temp T (°C)	Density ρ (kg/m ³)	Specific gravity S	Absolute viscosity μ (N s/m ²)	Kinematic viscosity ν (m ² /s)	Surface tension σ (N/m)	Isothermal bulk modulus of elasticity E_p (N/m ²)	Coefficient of thermal expansion α_T (K ⁻¹)
Water	0	1000	1.000	1.79 E-3	1.79 E-6	7.56 E-2	1.99 E9	6.80 E-5
	3.98	1000	1.000	1.57	1.57	—	—	—
	10	1000	1.000	1.31	1.31	7.42	2.12	8.80
	20	998	0.998	1.00	1.00	7.28	2.21	2.07 E-4
	30	996	0.996	7.98 E-4	7.12	2.26	2.94	—
	40	992	0.992	6.53	6.58	6.96	2.29	3.85
	50	988	0.988	5.47	5.48	6.79	2.29	4.58
	60	983	0.983	4.67	4.75	6.62	2.28	5.23
	70	978	0.978	4.04	4.13	6.64	2.24	5.84
	80	972	0.972	3.55	3.65	6.26	2.20	6.41
	90	965	0.965	3.15	3.26	—	2.14	6.96
100	958	0.958	2.82	2.94	5.89	2.07	7.50	
Mercury	0	13600	13.60	1.68 E-3	1.24 E-7	—	2.50 E10	—
	4	13590	13.59	—	—	—	—	—
	20	13550	13.55	1.55	1.14	37.5	2.50 E10	1.82 E-4
	40	13500	13.50	1.45	1.07	—	—	1.82
	60	13450	13.45	1.37	1.02	—	—	1.82
	80	13400	13.40	1.30	9.70 E-8	—	—	1.82
	100	13350	13.35	1.24	9.29	—	—	—
Ethylene glycol	0	—	—	5.70 E-2	—	—	—	—
	20	1110	1.11	1.99	1.79 E-5	—	—	—
	40	1110	1.10	9.13 E-3	8.30 E-6	—	—	—
	60	1090	1.09	4.95	4.54	—	—	—
	80	1070	1.07	3.02	2.82	—	—	—
	100	1060	1.06	1.99	1.88	—	—	—
Methyl alcohol (methanol)	0	810	0.810	8.17 E-4	1.01 E-6	2.45 E-2	9.35 E8	—
	10	801	0.801	—	—	2.26	8.78	—
	20	792	0.792	5.84	7.37 E-7	—	8.23	—
	30	783	0.783	5.10	6.51	—	7.72	—
	40	774	0.774	4.50	5.81	—	7.23	—
	50	765	0.765	3.96	5.18	—	6.78	—
Ethyl alcohol (ethanol)	0	806	0.806	1.77 E-3	2.20 E-6	2.41 E-2	1.02 E9	—
	20	789	0.789	1.20	1.52	—	9.02 E8	—
	40	772	0.772	8.34 E-4	1.08	—	7.89	—
	60	754	0.754	5.92	7.85 E-7	—	6.78	—
Normal octane	0	718	0.718	7.06 E-7	9.83 E-7	—	1.00 E9	—
	16	—	—	5.74	—	—	—	—
	20	702	0.702	5.42	7.72	—	—	—
	25	—	—	—	—	—	8.35 E8	—
Benzene	40	686	0.686	4.33	6.31	—	7.48	—
	0	900	0.900	9.12 E-4	1.01 E-6	3.02 E-2	1.23 E9	—
	20	879	0.879	6.52	7.42 E-7	2.76	1.06	—
	40	858	0.857	5.03	5.86	—	9.10 E8	—
	60	836	0.836	3.92	4.69	—	7.78	—
Kerosene	80	815	0.815	3.29	4.04	—	6.48	—
	-18	841	0.841	7.06 E-3	8.40 E-6	—	—	—
	20	814	0.814	1.9	2.37	2.9 E-2	—	—
Lubricating oil	20	871	0.871	1.31 E-6	1.50 E-9	—	—	—
	40	858	0.858	6.81 E-5	7.94 E-8	—	—	—
	60	845	0.845	4.18	4.95	—	—	—
	80	832	0.832	2.83	3.40	—	—	—
	100	820	0.820	2.00	2.44	—	—	—
	120	809	0.809	1.54	1.90	—	—	—

Nota. Tomado de *Chemical engineering Fluid Mechanics* (p. 490), por Darby, R., 2001.

ANEXO B. RESTRICCIONES Y NORMAS PARA LA INSTALACIÓN DE MEDIDORES DE FLUJO

Tabla B1

Restricciones de instalación para medidores de flujo

Sr. No.	Type	Orientation	Direction	Quoted range of upstream lengths	Quoted range of minimum downstream	Pipe Diameter mm
1.	Orifice	H, VU,VD,I	U,B	5D/80D	2D/8D	6 to 2600
2.	Venturi	H,VU,VD,I	U	0.5D/29D	4D	>6
3.	Variable area	VU	U	0D	0D	2 to 150
4.	Annubar	H, VU,VD,I	U,B	2D/25D	2D/4D	>25
5.	Turbine	H, VU,VD,I	U,B	5D/20D	3D/10D	5 to 600
6.	Insertion turbine	H, VU,VD,I	U,B	10D/80D	5D/10D	>75
7.	Vortex	H, VU,VD,I	U	1D/40D	5D	12 to 400
8.	Insertion Vortex	H, VU,VD,I	U	20D	5D	>200
9.	Electromagnetic	H, VU,VD,I	U,B	0D/10D	0D/5D	2 to 3000
10.	Insertion magnetic	H, VU,VD,I	U,B	25D	5D	>100
11.	Doppler	H, VU,VD,I	U,B	10D	5D	>25
12.	Transit time	H, VU,VD,I	U,B	0D/50D	2D/5D	>4

Legends: H: Horizontal flow; U: Unidirectional flow; VU: Upward vertical flow; B: Bidirectional flow; VD: Downward vertical flow; D: Inner diameter of pipe; I: Inclined flow.

Nota. Tomado de *Water Meters, Instrumentation & SCADA* (p. 35), Por Ministerio de Vivienda y Asuntos Urbanos (2020).

Tabla B2

Reglas de ubicación en tramos rectos de tubería para la instalación del elemento (según ISO-5167)

1º accesorio aguas arriba	Distancia aguas arriba entre el medidor y el primer accesorio (múltiplos Φ tubería)													Distancia aguas abajo 2º accesorio (múltiplos Φ tubería)	Elementos primarios
	$\beta = \Phi$ orificio/ Φ interior tubería													$\beta = \Phi$ orificio/ Φ interior tubería	
	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7	0,75	0,8	0,2 a 0,8	
Curva de 90º o T	10	10	10	12	14	14	14	16	18	22	28	36	46	14	1
			0,5	0,5	0,5	1,0	1,5	2,5	3,0	4,0	4,0	4,5		14	2
Dos o mas curvas de 90º (radio D) en el mismo plano	14	14	16	16	18	18	20	22	26	32	36	42	50	18	1
			1,5	1,5	1,5	1,5	2,5	2,5	3,0	4,5	4,5	4,5		18	2
Dos o mas curvas de 90º (radio D) en diferentes planos	34	34	34	36	36	38	40	44	48	54	62	70	80	31	1
			0,5	0,5	0,5	0,5	8,5	12,5	17,5	23,5	27,5	29,5		31	2
Reductor 2D a D en una longitud de 3D, Venturi 3D a D en 3,5D	5	5	5	5	5	5	6	8	9	11	14	22	30	7	1
				1,5	2,5	4,5	5,5	6,5	8,5	9,5	10,5	11,5		7	2
Expansión 0,5D a D en una longitud de 1,5D, Venturi 0,75D a D en D	16	16	16	16	16	17	18	20	22	25	30	38	54	15	1
			1,5	1,5	1,5	2,5	2,5	3,5	3,5	4,5	5,5	6,5		15	2
Válvula de globo (totalmente abierta)	18	18	18	18	20	20	22	24	26	28	32	36	44	16	1
			2,5	2,5	3,5	3,5	4,5	4,5	4,5	5,5	5,5	6,5		16	2
Válvula de compuerta (totalmente abierta)	12	12	12	12	12	12	12	14	14	16	20	24	30	10	1
			1,5	2,5	2,5	3,5	3,5	4,5	4,5	4,5	5,5	5,5		10	2
Reducción simétrica abrupta de 2D a D	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	15	1
							30	30	30	30	30	30		15	2
Tanque	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	1
			30	30	30	30	30	30	30	30	30	30		30	2

1 - Placa-orificio y tobera / 2 - Tubo Venturi

Nota. Tomado de Instrumentación industrial (p.115), por Creus, 2010, Alfaomega.

ANEXO C. COEFICIENTE DE DESCARGA

Tabla C1

Valores de los parámetros del coeficiente de descarga para la ecuación (41)

Primary device	Discharge coefficient C_{∞} at infinite Reynolds number	Reynolds number term	
		Coefficient b	Exponent n
Venturi			
Machined inlet	0.995	0	0
Rough cast inlet	0.984	0	0
Rough welded sheet-iron inlet	0.985	0	0
Universal venturi tube ^b	0.9797	0	0
Lo-Loss tube ^c	$1.05 - 0.471\beta + 0.564\beta^2 - 0.514\beta^3$	0	0
Nozzle			
ASME long radius	0.9975	$-6.53\beta^{0.5}$	0.5
ISA	$0.9900 - 0.2262\beta^{4.1}$	$1708 - 8936\beta + 19,779\beta^{4.7}$	1.15
Venturi nozzle (ISA inlet)	$0.9858 - 0.195\beta^{4.5}$	0	0
Orifice			
Corner taps	$0.5959 + 0.0312\beta^{2.1} - 0.184\beta^8$	$91.71\beta^{2.5}$	0.75
Flange taps (D in in.) $D \geq 2.3$	$0.5959 + 0.0312\beta^{2.1} - 0.184\beta^8 + 0.09 \frac{\beta^4}{D(1-\beta^4)} - 0.0337 \frac{\beta^3}{D}$	$91.71\beta^{2.5}$	0.75
$2 \leq D \leq 2.3^d$	$0.5959 + 0.0312\beta^{2.1} - 0.184\beta^8 + 0.039 \frac{\beta^4}{1-\beta^4} - 0.0337 \frac{\beta^3}{D}$	$91.71\beta^{2.5}$	0.75
Flange taps (D^* in mm) $D^* \geq 58.4$	$0.5959 + 0.0312\beta^{2.1} - 0.184\beta^8 + 2.286 \frac{\beta^4}{D^*(1-\beta^4)} - 0.856 \frac{\beta^3}{D^*}$	$91.71\beta^{2.5}$	0.75
$50.8 \leq D^* \leq 58.4$	$0.5959 + 0.0312\beta^{2.1} - 0.184\beta^8 + 0.039 \frac{\beta^4}{1-\beta^4} - 0.856 \frac{\beta^3}{D^*}$	$91.71\beta^{2.5}$	0.75
D and $D/2$ taps	$0.5959 + 0.0312\beta^{2.1} - 0.184\beta^8 + 0.039 \frac{\beta^4}{1-\beta^4} - 0.0158\beta^3$	$91.71\beta^{2.5}$	0.75
$2\frac{1}{2}D$ and $8D$ taps ^d	$0.5959 + 0.461\beta^{2.1} + 0.48\beta^8 + 0.039 \frac{\beta^4}{1-\beta^4}$	$91.71\beta^{2.5}$	0.75

^a Detailed Reynolds number, line size, beta ratio, and other limitations are given in Table 10-2.

^b From BIF CALC-440/441; the manufacturer should be consulted for exact coefficient information.

^c Derived from the Badger meter, Inc. Lo-Loss tube coefficient curve; the manufacturer should be consulted for exact coefficient information.

^d From Stolz (1978).

Source: Miller (1983).

Nota. Tomado de *Chemical engineering Fluid Mechanics* (pp. 298-299), por Darby, R., 2001.

Tabla C2

Rango aplicable y precisión de la ecuación (41), con parámetros de la tabla C1

Primary device	Nominal pipe diameter D , in (mm)	Beta ratio β	Pipe Reynolds number N_{ReD} range	Coefficient accuracy, % ^a
Venturi				
Machine inlet	2–10 (50–250)	0.4–0.75	2×10^5 to 10^6	± 1
Rough cast	4–32 (100–800)	0.3–0.75	2×10^5 to 10^6	± 0.7
Rough-welded sheet-iron inlet	8–48 (100–1500)	0.4–0.7	2×10^5 to 10^6	± 1.5
Universal venturi tube ^b	≥ 3 (≥ 75)	0.2–0.75	$> 7.5 \times 10^4$	± 0.5
Lo-Loss ^b	3–120 (75–3000)	0.35–0.85	1.25×10^5 to 3.5×10^6	± 1
Nozzle				
ASME	2–16 (50–400)	0.25–0.75	10^4 to 10^7	± 2.0
ISA	2–20 (50–500)	0.3–0.6	10^5 to 10^6	± 0.8
Venturi nozzle	3–20 (75–500)	0.3–0.75	2×10^5 to 2×10^6	$2\beta - 0.4$ $\pm 1.2 \pm 1.54 \beta^4$
Orifice				
Corner, flange, D and $D/2$	2–36 (50–900)	0.2–0.6	10^4 to 10^7	± 0.6
		0.6–0.75	10^4 to 10^7	$\pm \beta$
		0.2–0.75	2×10^5 to 10^4	$\pm 0.6 \pm \beta$
$2\frac{1}{2}D$ and $8D$ (pipe taps)	2–36 (50–900)	0.2–0.5	10^4 to 10^7	± 0.8
		0.51–0.7		± 1.6
Eccentric				
Flange and vena contracta	4 (100)	0.3–0.75	10^4 to 10^6	± 2
	6–14 (150–350)	0.3–0.75	10^4 to 10^6	± 1.5
Segmental				
Flange and vena contracta	4–14 (150–350)	0.35–0.75	10^4 to 10^6	± 2
Quadrant-edged				
Flange and corner	1–4 (25–100)	0.25–0.6	250 to 6×10^4	$\pm 2 - \pm 2.5$
Conical entrance				
Corner		0.1–0.3	25 to 2×10^4	$\pm 2 - \pm 2.5$

^aISO 5167 (1980) and ASME *Fluid Meters* (1971) show slightly different values for some devices.

^bThe manufacturer should be consulted for recommendations.

Source: Miller (1983).

Nota. La tabla muestra el rango aplicable y precisión de la ecuación (3.4). Tomado de *Chemical engineering Fluid Mechanics* (p. 300), por Darby, R., 2001.

Figura D2 Plano posterior del módulo

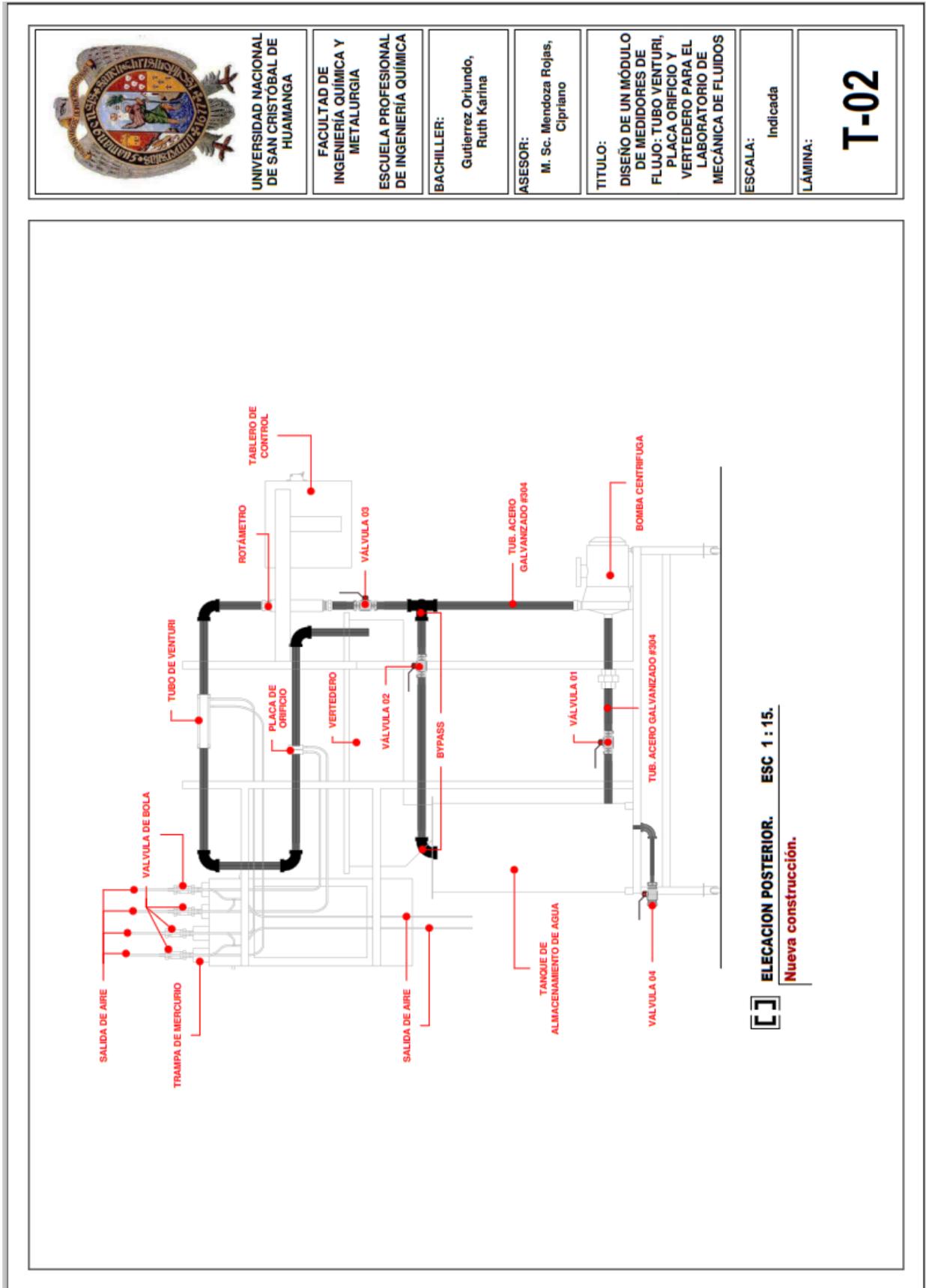


Figura D3 Plano de elevación izquierda del Módulo

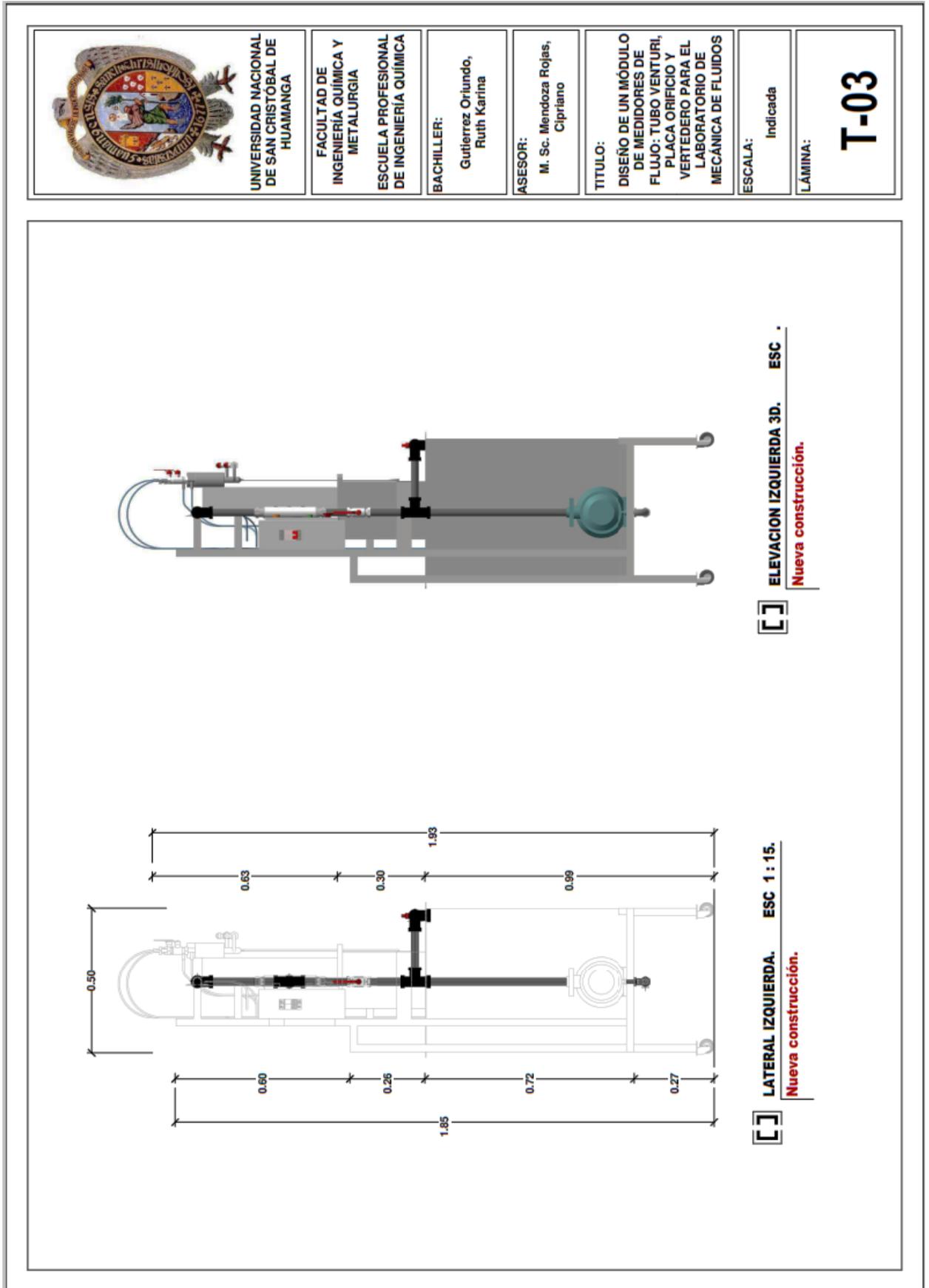


Figura D4 Plano de elevación derecha del módulo

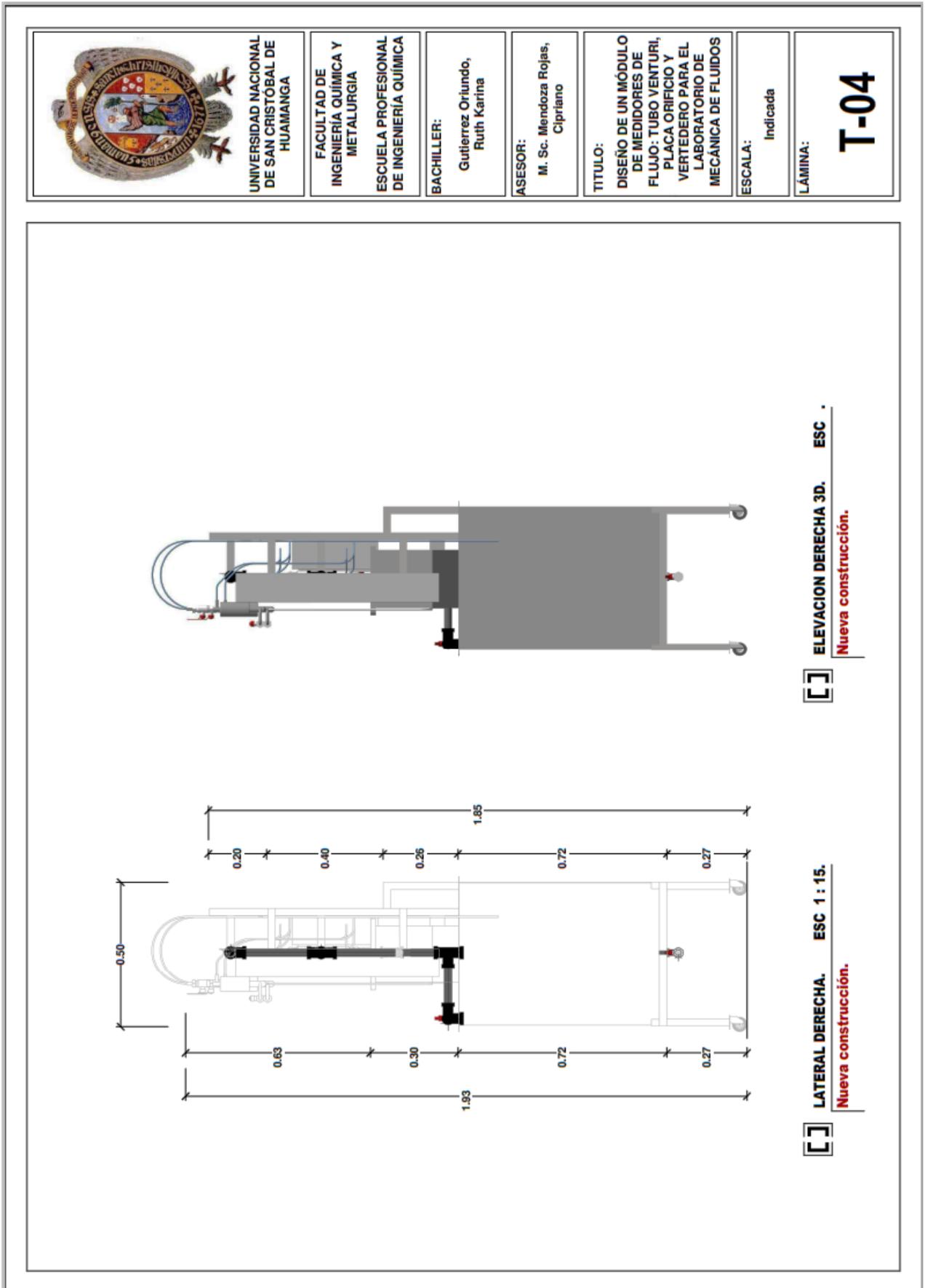


Figura D5 Plano de vista superior del módulo

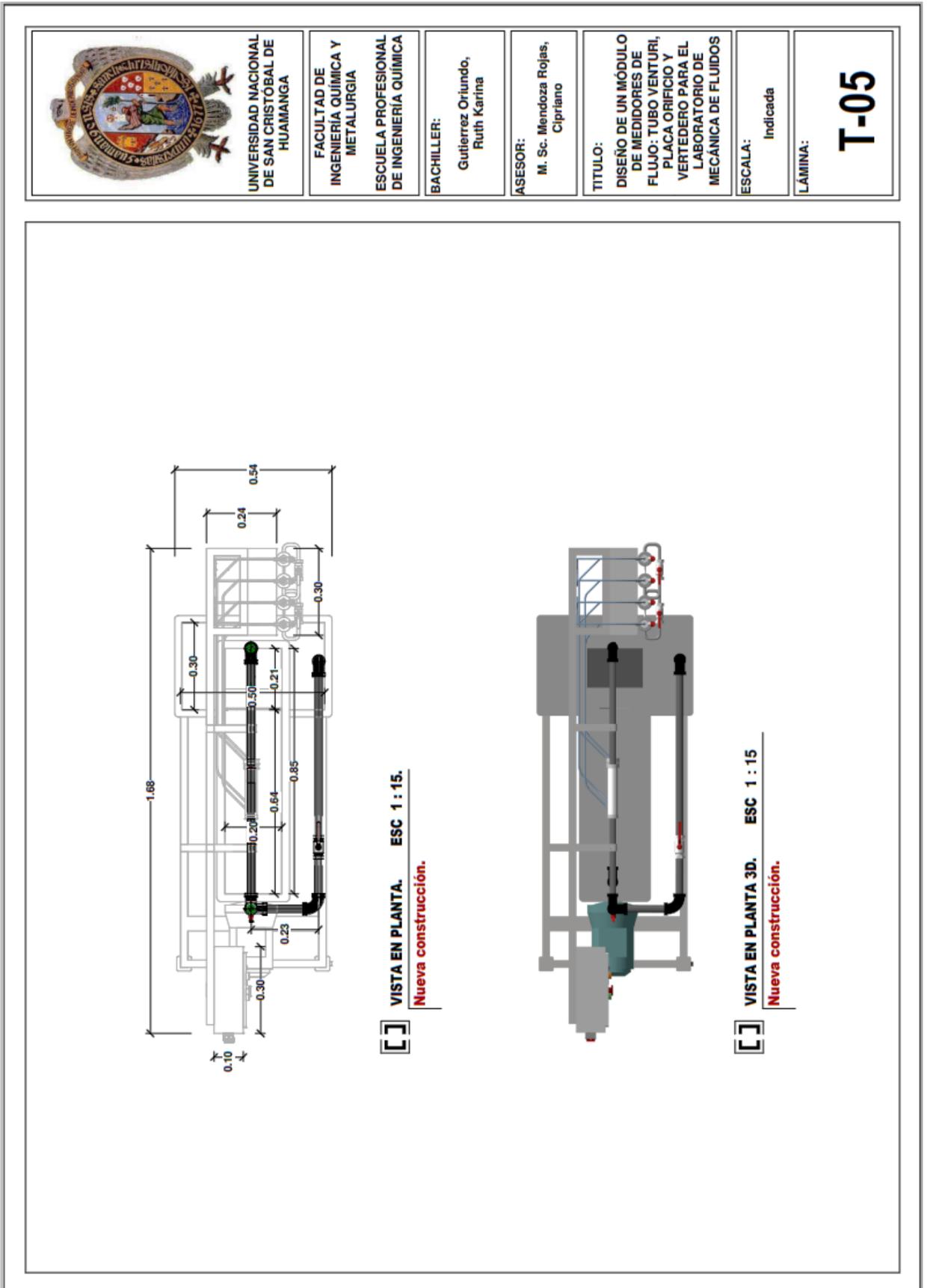


Figura D6 Plano de elevación y frontal en 3D

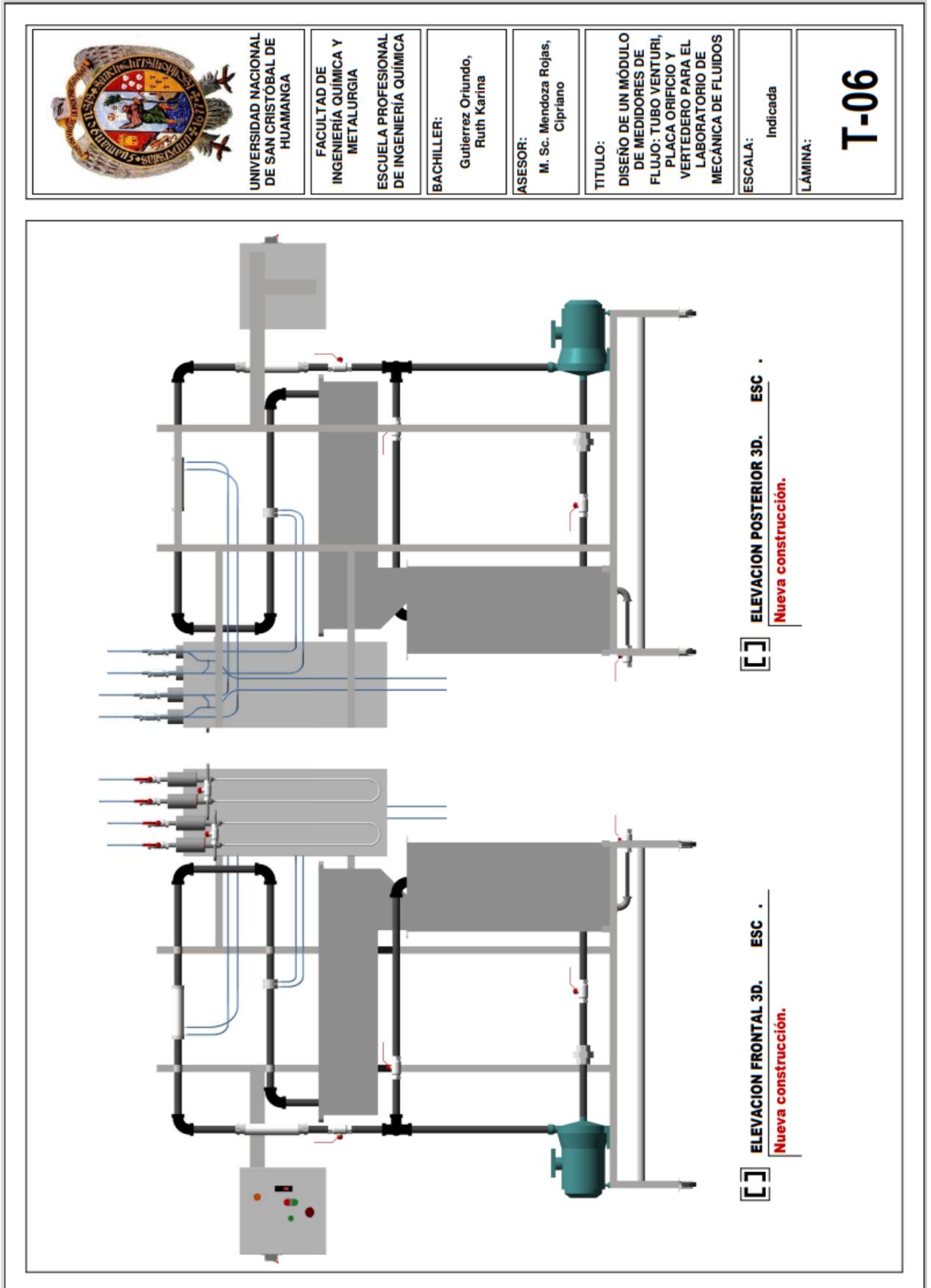
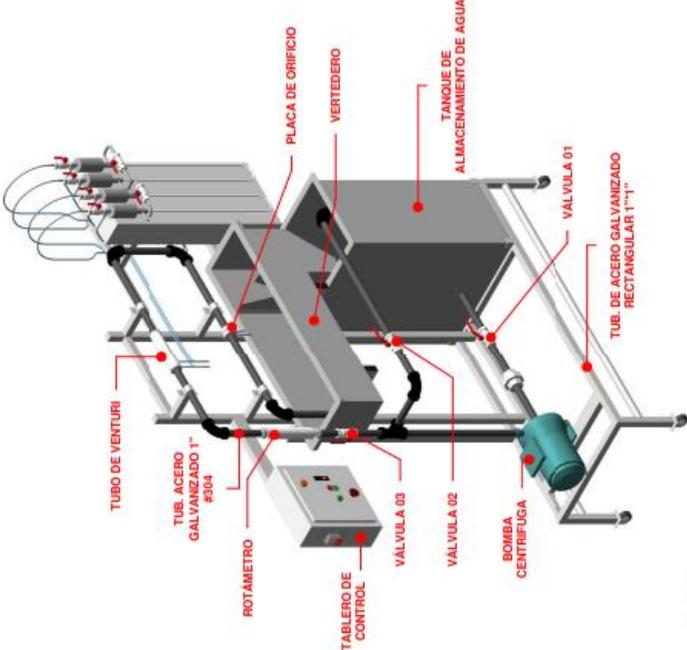
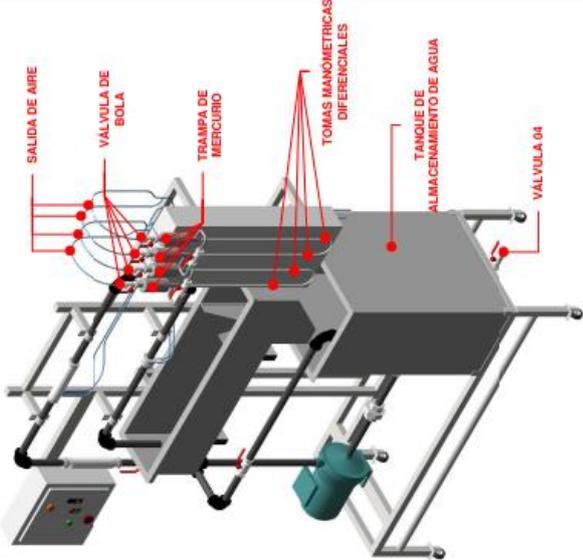


Figura D7 Elevación isométrica en 3D del módulo

	UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA	FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y METALURGIA	ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA	BACHILLER: Gutierrez Oriundo, Ruth Karina	ASESOR: M. Sc. Mendoza Rojas, Cipriano	TÍTULO: DISEÑO DE UN MÓDULO DE MEDIDORES DE FLUJO: TUBO VENTURI, PLACA ORIFICIO Y VERTEDERO PARA EL LABORATORIO DE MECÁNICA DE FLUIDOS	ESCALA: Indicada	LÁMINA: <h1 style="margin: 0;">T-07</h1>
---	--	--	--	--	---	--	----------------------------	--



ISOMETRIA 01. ESC .
Nueva construcción.



ISOMETRIA 02. ESC .
Nueva construcción.

ANEXO E. PANEL FOTOGRÁFICO DEL PROCESO DE CONSTRUCCIÓN

En este anexo se podrán ver las fotografías del proceso de construcción del módulo de fluidos. La figura E1, muestra la construcción del medidor de orificio con la máquina de torno paralelo de alta velocidad.

Figura E1

Construcción del medidor de orificio



La figura E2, muestra la máquina de roscadora donde se realizó las roscas de los diferentes tamaños de las tuberías para el módulo de medidores de flujo de fluidos.

Figura E2

Proceso donde se roscan las tuberías



La figura E3, muestra el proceso de cortes que se realizó con la cizalla para las compuertas del vertedero triangular y rectangular una vez dimensionada en una placa de acero inoxidable de 2,5 mm de espesor.

Figura E3

Planchas de las compuertas para el vertedero



La figura E4, muestra la instalación de los cableados a la bomba y el tablero para el encendido y apagado de la bomba.

Figura E4

Instalación de cableado a la bomba



La figura E5, muestra el montaje del medidor de Venturi al soporte de medidores de flujo.

Figura E5

Instalación del medidor de Venturi



La figura E6, muestra el avance del montaje realizado del módulo de medidores de flujo

Figura E6

Montaje de las tuberías y medidores en el soporte de medidores de flujo



La figura E7, muestra las trampas de mercurio instalados en la parte superior de las tomas de manómetro diferencial del Venturi y orificio en el módulo de medidores de flujo. El cual tiene unas válvulas para la expulsión de aire que se podría encontrar en los manómetros diferenciales.

Figura E7

Instalación de las trampas de mercurio



La figura E8, muestra el tablero de control en las puestas en marcha del módulo. Donde se observa la luz piloto naranja que nos indica que el módulo esta energizado y la luz piloto verde que indica el funcionamiento de la bomba.

Figura E8

Prueba de encendido del módulo



En la figura E9 se muestra el paso del agua por el vertedero rectangular en la puesta en marcha del módulo de medidores de flujo de fluidos, donde a diferentes caudales se lee la carga que es la altura del líquido con ayuda de una regla.

Tabla E9

Paso de flujo a agua por el vertedero rectangular con contracciones



ANEXO F. CÁLCULO PARA SELECCIONAR EL ROTÁMETRO

Para determinar el caudal promedio para la selección de rotámetro seguiremos los siguientes cálculos:

Tabla F1

Velocidades recomendadas en las tuberías

Fluido	Tipo de flujo	Velocidad	
		pie/s	m/s
Líquidos poco viscosos	Flujo por gravedad	0,5 – 1	0,15 – 0,30
	Entrada de bomba	1 – 3	0,3 – 0,9
	Salida de bomba	4 – 10	1,2 – 3
	Línea de conducción	4 – 8	1,2 – 2,4
Líquidos viscosos	Entrada de bomba	0,2 – 0,5	0,06 – 0,15
	Salida de bomba	0,5 – 2	0,15 – 0,6
Vapor de agua		30 – 50	9 – 15
Aire o gas		30 – 100	9 – 30

Nota. Tomado de *Operaciones básicas de Ingeniería Química* (p. 190), por Harriott, et al., 1991.

- La tubería es de 1 pulgada con un diámetro interior de 27,3 mm, seleccionada para facilitar la construcción de los medidores.
- Se escogió trabajar a una velocidad de 1,4 m/s, debido a que la velocidad en la línea de conducción para tubería de acero es (1,2 - 2,4) m/s como se muestra en la tabla F1 para luego calcular el diámetro de la tubería:

$$Q = v * A = v * \frac{\pi D^2}{4}$$

$$D = \sqrt{\frac{4 * Q}{\pi * v}}$$

Suponemos un caudal de 55 L/min = 0,0009167 m³/s, reemplazando en la anterior ecuación.

$$D = \sqrt{\frac{4 * 0,0009167 \frac{m^3}{s}}{\pi * 1,4 \frac{m}{s}}} = 0,0289 \text{ m}$$

La tubería de acero es de 1 pulgada con un diámetro interior de 0,0273 m y el diámetro calculado es 0,0289 m por lo que comprobamos que el diámetro de la tubería con el diámetro calculado es semejante. Por lo tanto, se toma 55 L/min para seleccionar el rotámetro de 10 L/min a 110 L/min.

ANEXO G. CÁLCULO PARA LA SELECCIÓN DE BOMBA

Para la selección de la bomba se realizó el balance de energía mecánica

$$z_1 + \frac{v_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\rho g} + H_B = z_2 + \frac{v_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\rho g} + \sum hf$$

Simplificaciones:

$$v_1 = v_2$$

$$P_1 = P_2$$

$$z_2 - z_1 = 1,11 \text{ m}$$

Luego:

$$H_B = z_2 - z_1 + \sum hf$$

- Cálculo de pérdida friccional en tubería recta

$$hf_{regular} = 4f_F \left(\frac{L}{D}\right) \left(\frac{v^2}{2 * g}\right)$$

Determinamos el factor de fricción por la ecuación de Cheng

Rugosidad acero inoxidable: $\varepsilon = 0,0015 \text{ mm}$

Temperatura: $T = 20^\circ\text{C}$

Densidad: $\rho = 998 \text{ Kg/m}^3$

Viscosidad: $\mu = 0,001 \frac{\text{Kg}}{\text{m*s}}$

Velocidad: $v = 1,5661 \text{ m/s}$

Diámetro: $D = 0,0273 \text{ m}$

Longitud: $L = 7,56 \text{ m}$

Cálculo del número de Reynolds

$$Re = \frac{\rho * v * D}{\mu} = \frac{998 \text{ Kg/m}^3 * 0,001 \frac{\text{Kg}}{\text{m*s}} * 0,0273 \text{ m}}{0,001 \frac{\text{Kg}}{\text{m*s}}} = 42669$$

Cálculo de la relación de la rugosidad y el diámetro

$$\frac{\varepsilon}{D} = \frac{0,0015 \text{ mm}}{27,3 \text{ mm}} = 5,494 * 10^{-5}$$

De la ecuación de Cheng

$$\frac{1}{\sqrt{f_F}} = 4 \log \left\{ \frac{1}{3,7065} \left(\frac{\varepsilon}{D}\right) - \frac{5,0452}{Re} \log \left[\frac{1}{2,8257} \left(\frac{\varepsilon}{D}\right)^{1,1098} + \frac{5,8506}{Re^{0,8981}} \right] \right\}$$

$$\frac{1}{\sqrt{f_F}} = 13,527979$$

$$f_F = 0,005464$$

Reemplazando

$$hf_{regular} = 4f_F \left(\frac{L}{D}\right) \left(\frac{v^2}{2 * g}\right) = 4 * 0,005464 * \left(\frac{7,56 \text{ m}}{0,0273}\right) \left(\frac{(1,5661 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2}{2 * 9,81 \text{ m/s}^2}\right)$$

$$hf_{regular} = 0,7566 \text{ m}$$

- Cálculo de pérdida friccional en accesorios

$$hf_{regular} = \sum K_{acc} * \left(\frac{v^2}{2 * g}\right)$$

$$h_{f_{singular}} = [1K_{entrada} + 1K_{salida} + 1K_T + 6K_{codo\ 90^\circ} + 3K_{unión} + 3K_{válvula\ bola}] \left(\frac{v^2}{2 * g} \right)$$

Los coeficientes de pérdida para los accesorios se toman de la tabla G1.

$$K_{entrada} = 0,5$$

$$K_{salida} = 1$$

$$K_T = 2$$

$$K_{codo\ 90^\circ} = 0,75$$

$$K_{unión} = 0,08$$

$$K_{válvula\ bola} = 0,05$$

Reemplazando

$$h_{f_{singular}} = [1 * 0,5 + 1 * 1 + 1 * 2 + 6 * 0,75 + 3 * 0,08 + 3 * 0,05] \left(\frac{1,5661 \frac{m^2}{s}}{2 * 9,81 \frac{m}{s^2}} \right) = 1,0488\ m$$

- Pérdida de carga por fricción del Venturi

$$Q = 55\ L/min = 0,0009167\ m^3/s$$

Para el cálculo se utiliza:

$$Q = k * A_v \sqrt{2g(h_1 - h_2)}$$

$$h_1 - h_2 = \frac{\left(\frac{Q}{kA_v} \right)^2}{2g}, \text{ donde } k = 0,95$$

Reemplazando:

$$h_1 - h_2 = \frac{\left(\frac{0,0009167 \frac{m^3}{s}}{0,95 * \frac{\pi * (0,01665\ m)^2}{4}} \right)^2}{2 * 9,81 \frac{m}{s^2}} = 1,0012\ m$$

- Pérdida de carga por fricción del orificio

$$Q = 55\ L/min = 0,0009167\ m^3/s$$

Para el cálculo se utiliza:

$$Q = k * A_o \sqrt{2g(h1 - h2)}$$

$$h1 - h2 = \frac{\left(\frac{Q}{kA_o}\right)^2}{2g},$$

Donde $k = 0,62$

Reemplazando:

$$h1 - h2 = \frac{\left(\frac{0,0009167 \frac{m^3}{s}}{0,62 * \frac{\pi * (0,01665 m)^2}{4}}\right)^2}{2 * 9,81 \frac{m}{s^2}} = 2,4281 m$$

Finalmente

$$\sum hf = 0,7566m + 1,0488 m + 1,0012 m + 2,4281 m = 9,4205 m$$

Reemplazando

$$H_B = z_2 - z_1 + \sum hf = 1,11 m + 9,4205 m = 10,5305 m$$

Cálculo de potencia:

$$\eta W_B = H_B * g = 10,5305 m * 9,81 \frac{m}{s^2} = 103,6968 \frac{m^2}{s^2} * \frac{kg}{kg} = 103,6968 \frac{J}{kg}$$

Suponemos una eficiencia del 45%

$$W_B = \frac{56,4868 \frac{J}{kg}}{0,45} = 230,4374 \frac{J}{kg}$$

Potencia:

$$N = W_B * \rho * Q = 230,4374 \frac{J}{kg} * 998 \frac{kg}{m^3} * 0,0009167 \frac{m^3}{s} = 210,8195 \frac{J}{s}$$

$$N = 210,8195 Watt = 0,2827 Hp \cong 0,3 Hp$$

La bomba recomendada es una bomba de ½ Hp, pero debido a que en el taller electromecánico se cuenta con una bomba de 1 Hp centrifuga se selecciona esta ya que no presenta ningún problema al momento de operar el módulo.

Tabla G1

Coefficiente de pérdida para componentes de tuberías

Componente	K	Diagrama
Codos		
Radio corto 90° con bridas o extremo liso	0.3	
Radio corto 90° extremos roscados.	1.5	
Radio largo 90° con bridas o extremo liso	0.2	
Radio largo 90° extremos roscados.	0.7	
Radio largo 45° con bridas.	0.2	
Radio corto 45° extremos roscados.	0.4	
Curvas a 180°		
Curvas a 180° con bridas	0.2	
Curvas a 180° con extremos roscados	1.5	
Tees		
Paso directo con bridas o extremos lisos	0.2	
Paso directo con extremos roscados	0.9	
Salida de lado con bridas o extremos lisos	1.0	
Salida de lado con extremos roscados	2.0	
Union con extremos roscados	0.08	
Válvulas		
Globo totalmente abiertas	10	
Angulo totalmente abiertas	2	
Compuerta totalmente abiertas	0.15	
Compuerta 1/4 cerrada	0.26	
Compuerta 1/2 cerrada	2.1	
Compuerta 3/4 cerrada	17	
Cheque en el sentido del flujo	2	
Bola totalmente abierta	0.05	
Bola 1/3 cerrada	5.5	
Bola 2/3 cerrada	210	

Nota. Tomado de *Fundamentos de mecánica de fluidos* (p. 491), por Munson et al., 1999, (Limusa, S. A.)

ANEXO H. RESULTADOS CAUDAL DE LA CALIBRACIÓN DE LOS MEDIDORES

En la calibración de los medidores se determinó las ecuaciones por regresión lineal, para determina los caudales de calibración ($Q_{calib.}$). Los cuales se muestras en las siguientes tablas.

Tabla H1

Resultados del caudal de calibración del rotámetro

$Q_{Erot} \left(\frac{L}{min} \right)$	$Q_{prom} \left(\frac{L}{min} \right)$	$Q_{calib.} \left(\frac{L}{min} \right)$	%Error
10	10,82	10,92	0,93
20	21,75	21,23	2,37
30	31,01	31,33	1,03
40	41,82	41,30	1,24
50	50,02	51,16	2,29
60	60,16	60,95	1,31
70	70,96	70,66	0,41
80	81,36	80,33	1,27

Tabla H2

Resultados del caudal de calibración del Venturi

$Q_{prom} \left(\frac{L}{min} \right)$	Δh_v (mm)	$Q_{calib.} \left(\frac{L}{min} \right)$	%Error
10,82	2,7	10,84	0,24
21,75	10,3	21,53	0,99
31,01	21,5	31,40	1,25
41,82	36,5	41,19	1,50
50,02	54,8	50,73	1,42
60,16	77	60,39	0,39
70,95	104,5	70,62	0,46
81,36	137	81,14	0,27

Tabla H3*Resultados del caudal de calibración del orificio*

$Q_{prom} \left(\frac{L}{min} \right)$	Δh_0 (mm)	$Q_{calib.} \left(\frac{L}{min} \right)$	%Error
10,82	6	10,81	0,05
21,75	23,8	21,89	0,63
31,01	46,5	30,84	0,57
41,82	81	40,97	2,03
50,02	127	51,57	3,11
60,16	171	60,06	0,17
70,95	233,5	70,44	0,72
81,36	308,7	81,26	0,12

Tabla H4*Resultados del caudal de calibración del vertedero rectangular*

$Q_{prom} \left(\frac{L}{min} \right)$	Δh_{VR} (cm)	$Q_{calib.} \left(\frac{L}{min} \right)$	%Error
10,96	0,8	10,55	3,72
20,64	1,3	21,06	2,06
30,17	1,7	30,86	2,30
40,99	2	38,90	5,09
50,98	2,4	50,44	1,05
60,20	2,7	59,66	0,91
70,33	3	69,32	1,44
80,36	3,3	79,40	1,19

Tabla H5*Resultados del caudal de calibración del vertedero triangular*

$Q_{prom} \left(\frac{L}{min} \right)$	Δh_{VT} (cm)	$Q_{calib.} \left(\frac{L}{min} \right)$	%Error
10,98	10	11,20	2,03
20,03	11	19,85	0,94
30,99	11,9	30,33	2,13
40,46	12,6	40,43	0,08
50,89	13,2	50,53	0,69
60,27	13,7	60,02	0,49
70,55	14,2	70,52	0,04
80,20	14,7	82,08	2,34

ANEXO G. CÁLCULO DEL MEDIDOR DE VENTURI

Procedimiento con más detalle de los cálculos

- **Fórmula para calcular el área 1 y 2 del medidor de Venturi**

$$A = \frac{\pi}{4} * D^2$$

Se determina el área del interior de la tubería en el punto 1

$$A_i = \frac{\pi}{4} * D_i^2 = \frac{\pi}{4} * (0,0273m)_i^2 = 0,0005853 m^2$$

Se determina el área de la garganta del medidor de Venturi que es el punto 2

$$A_V = \frac{\pi}{4} * d_V^2 = \frac{\pi}{4} * (0,01665 m)_V^2 = 0,0002177 m^2$$

- **Cálculo de caudal experimental**

Se cálculo el caudal experimental con el método volumétrico

$$Q = \frac{V(m^3)}{t(s)}$$

Ahora cálculo del caudal promedio de la primera evaluación

$$Q_{1.prom} = \frac{Q_1 + Q_2 + Q_3}{3}$$

$$\begin{aligned} Q_{1.prom} &= \frac{2,837 * 10^{-4} \frac{m^3}{s} + 3,042 * 10^{-4} \frac{m^3}{s} + 2,484 * 10^{-4} \frac{m^3}{s}}{3} \\ &= 2,79 * 10^{-4} \frac{m^3}{s} \end{aligned}$$

Cálculo del caudal promedio de la primera y segunda evaluación

$$Q_{prom} = \frac{Q_{1.prom} + Q_{2.prom}}{2} = \frac{2,79 * 10^{-4} \frac{m^3}{s} + 2,53 * 10^{-4} \frac{m^3}{s}}{2}$$

$$Q_{prom} = 2,66 * 10^{-4} \frac{m^3}{s}$$

- **Cálculos de caudal para el medidor de Venturi**

Se realizaron los cálculos detallados para un caudal de 15 L/min.

Cálculo del caudal ideal

$$\begin{aligned}
 Q(\text{ideal}) &= \frac{A_2}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}} \times \sqrt{\frac{2 * (g * \Delta h(\rho_{Hg} - \rho_w))}{\rho_w}} \\
 &= \frac{0,0002177 \text{ m}^2}{\sqrt{1 - \left(\frac{0,0002177 \text{ m}^2}{0,0005853 \text{ m}^2}\right)^2}} \\
 &\quad \times \sqrt{\frac{2 * \left(9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * 0,00575 \text{ m} * (13550 - 998) \text{ kg/m}^3\right)}{998 \text{ kg/m}^3}} \\
 Q(\text{ideal}) &= 2,794 * 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}
 \end{aligned}$$

Cálculo del caudal real del medidor de Venturi

$$\begin{aligned}
 Q(\text{real}) &= \frac{A_2 * C_v}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}} * \sqrt{\frac{2 * (g * \Delta h(\rho_{Hg} - \rho_w))}{\rho_w}} \\
 &= \frac{0,0002177 \text{ m}^2 * 0,95}{\sqrt{1 - \left(\frac{0,0002177 \text{ m}^2}{0,0005853 \text{ m}^2}\right)^2}} \\
 &\quad * \sqrt{\frac{2 * \left(9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * 0,00575 \text{ m} * (13550 - 998) \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right)}{998 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}} \\
 &= 2,654 * 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}
 \end{aligned}$$

Determinación del porcentaje de error

Donde el caudal promedio es el caudal experimental

$$\%Error = \left| \frac{Q_{prom} - Q_{real}}{Q_{prom}} \right| \times 100 = \left| \frac{2,66 * 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s} - 2,654 * 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}}{2,66 * 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}} \right| \times 100$$

$$\%Error = 0,26 \%$$

- **Determinación del coeficiente de descarga para el Venturi (C_v)**

$$C_v = \frac{Q_{prom}}{Q_{ideal}} = \frac{2,66 * 10^{-4} \frac{m^3}{s}}{2,79 * 10^{-4} m^3/s} = 0,9524$$

Cálculo del porcentaje de error de C_v

$$\%Error = \left| \frac{C_{v_{teórico}} - C_{v_{experimental}}}{C_{v_{teórico}}} \right| * 100 = \left| \frac{0,95 - 0,9524}{0,95} \right| * 100$$

$$\% Error = 0,26 \%$$

- **Cálculo de velocidad**

Para la deducción de la fórmula de velocidad se emplea para el medidor de Venturi y orificio.

Ecuación de continuidad

$$Q_1 = Q_2$$

$$v_1 * A_1 = v_2 * A_2 \dots \dots \dots (1)$$

Despejando la velocidad en el punto 1

$$v_1 = \frac{v_2 * A_2}{A_1} \dots \dots \dots (2)$$

Ecuación de Bernoulli

$$\frac{v_1^2}{2g} + z_1 + \frac{P_1}{\rho g} = \frac{v_2^2}{2g} + z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + h_L \dots \dots \dots (3)$$

Se supone que la pérdida de energía por fricción se ignora ($h_L = 0$) por la distancia corta entre el punto 1 y 2.

Donde

- ($z_1 = z_2$) Mismo plano de referencia

Por lo tanto, la ecuación (3) se simplifica:

$$\frac{v_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\rho g} = \frac{v_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\rho g}$$

$$P_1 - P_2 = \rho \left(\frac{v_2^2 - v_1^2}{2} \right) \dots \dots \dots (4)$$

Reemplazando en la ecuación (2) y ecuación (4)

$$v_2^2 = \frac{2(P_1 - P_2)}{\rho(1 - (\frac{A_2}{A_1})^2)} \dots \dots \dots (5)$$

Donde la diferencia de presión es:

$$P_1 - P_2 = gh(\rho_{Hg} - \rho_w) \dots \dots \dots (6)$$

Reemplazando la ecuación (6) en la ecuación (5) resulta:

$$v_2 = \frac{1}{\sqrt{(1 - (\frac{A_2}{A_1})^2)}} \times \sqrt{\frac{2 * (g * \Delta h(\rho_{Hg} - \rho_w))}{\rho_w}}$$

$$v_2 = \frac{1}{\sqrt{(1 - (\frac{0,0002177 \text{ m}^2}{0,0005853 \text{ m}^2})^2)}} * \sqrt{\frac{2 * (9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * 0,00575 \text{ m} * (13550 - 998) \frac{\text{kg}}{\text{m}^3})}{998 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}}$$

$$= 1,2833 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

- **Cálculo del número de Reynolds**

$$Re = \frac{\rho * v_2 * d_v}{\mu} = \frac{998 \text{ kg/m}^3 \times 1,2833 \frac{\text{m}}{\text{s}} \times 0,01665 \text{ m}}{0,001005 \text{ kg/m.s}} = 21217$$

ANEXO H CÁLCULO DEL MEDIDOR DE ORIFICIO

- **Fórmula para calcular el área 1 y 2 del medidor de orificio**

$$A = \frac{\pi}{4} * D^2$$

Se determino el área del interior de la tubería en el punto 1.

$$A_1 = \frac{\pi}{4} * D_i^2 = \frac{\pi}{4} * (0,0273 \text{ m})^2 = 0,0005853 \text{ m}^2$$

Se determino el área de la contracción del orificio que es el punto 2.

$$A_2 = \frac{\pi}{4} * d_o^2 = \frac{\pi}{4} * (0,01665 \text{ m})^2 = 0,0002177 \text{ m}^2$$

- **Cálculo de caudal experimental**

Se cálculo el caudal experimental con el método volumétrico

$$Q = \frac{V(m^3)}{t(s)}$$

Ahora cálculo del caudal promedio

$$Q_{1,prom} = \frac{Q_1 + Q_2 + Q_3}{3}$$
$$Q_{1,prom} = \frac{2,837 * 10^{-4} \frac{m^3}{s} + 3,042 * 10^{-4} \frac{m^3}{s} + 2,484 * 10^{-4} \frac{m^3}{s}}{3}$$
$$= 2,79 * 10^{-4} \frac{m^3}{s}$$

Cálculo del caudal promedio de la primera y segunda evaluación

$$Q_{prom} = \frac{Q_{1,prom} + Q_{2,prom}}{2} = \frac{2,79 * 10^{-4} \frac{m^3}{s} + 2,53 * 10^{-4} \frac{m^3}{s}}{2}$$
$$Q_{prom} = 2,66 * 10^{-4} \frac{m^3}{s}$$

- **Cálculos de caudal para el medidor de orificio**

Se realizaron los cálculos detallas para un caudal de 15 L/min.

Cálculo del caudal ideal

$$Q(ideal) = \frac{A_2}{\sqrt{(1 - (\frac{A_2}{A_1})^2)}} * \sqrt{\frac{2 * (g * \Delta h(\rho_{Hg} - \rho_w))}{\rho_w}}$$

$$Q(ideal) = \frac{0,0002177 \text{ m}^2}{\sqrt{\left(1 - \left(\frac{0,0002177 \text{ m}^2}{0,0005853 \text{ m}^2}\right)^2\right)}} \times \sqrt{\frac{2 * \left(9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * 0,013\text{m} * (13550 - 998)\text{kg/m}^3\right)}{998 \text{ kg/m}^3}}$$

$$= 4,20 * 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$$

Cálculo del caudal real del medidor de orificio

$$Q(real) = \frac{A_1 * C_o}{\sqrt{\left(\left(\frac{A_1}{A_2}\right)^2 - 1\right)}} * \sqrt{\frac{2 * (g * \Delta h(\rho_{Hg} - \rho_w))}{\rho_w}}$$

$$Q(real) = \frac{0,0002177 \text{ m}^2 * 0,62}{\sqrt{\left(1 - \left(\frac{0,0002177 \text{ m}^2}{0,0005853 \text{ m}^2}\right)^2\right)}} * \sqrt{\frac{2 * \left(9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * 0,013\text{m} * (13550 - 998) \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right)}{998 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}}$$

$$Q(real) = 2,61 * 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$$

Se determino el porcentaje de error

$$\%Error = \left| \frac{Q_{prom} - Q_{real}}{Q_{prom}} \right| * 100 = \left| \frac{2,66 * 10^{-4} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} - 2,61 * 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}}{2,66 * 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}} \right| * 100$$

$$\% Error = 2,12 \%$$

- **Determinación del coeficiente de descarga para el orificio (C_o)**

$$C_o = \frac{Q_{prom}}{Q_{ideal}} = \frac{2,66 * 10^{-4} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{4,20 * 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}} = 0,6334$$

Cálculo del porcentaje de error de C_o

$$\%Error = \left| \frac{C_{o\text{teórico}} - C_{o\text{experimental}}}{C_{o\text{teórico}}} \right| * 100 = \left| \frac{0,62 - 0,6334}{0,62} \right| * 100$$

$$\% Error = 2,17 \%$$

- **Cálculo de velocidad**

La deducción de esta fórmula es similar para el caso del medidor de Venturi.

$$v_2 = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2\right)}} \times \sqrt{\frac{2 * (g * \Delta h(\rho_{Hg} - \rho_w))}{\rho_w}}$$

$$v_2 = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \left(\frac{0,0002177 \text{ m}^2}{0,0005853 \text{ m}^2}\right)^2\right)}} * \sqrt{\frac{2 * \left(9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * 0,013 \text{ m} * (13550 - 998) \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right)}{998 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}}$$

$$= 1,9295 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

- **Cálculo del número de Reynolds**

$$Re = \frac{\rho * v_2 * d_o}{\mu} = \frac{998 \text{ kg/m}^3 * 1,9295 \frac{\text{m}}{\text{s}} * 0,01665 \text{ m}}{0,001005 \text{ kg/m.s}} = 31903$$

ANEXO I CÁLCULO DE LA EVALUACION DEL EQUIPO DEL LABORATORIO DE MECÁNICA DE FLUIDOS

Cálculo para el medidor de Venturi

Determinación del caudal experimental

Cálculos para 2 L/min

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

$$Q_{exp} = \frac{Q_1 + Q_2 + Q_3}{3} = 8,25 * 10^{-5} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

De este modo se calcula el caudal experimental es igual para el medidor de orificio.

Determinación del caudal ideal y real

Cálculos para 2 L/min

$$Q(ideal) = \frac{A_2}{\sqrt{\left(1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2\right)}} \times \sqrt{2 * g(h_{V1} - h_{V2})} = 8,05 * 10^{-5} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$Q(\text{real}) = \frac{A_2 * C_v}{\sqrt{(1 - (\frac{A_2}{A_1})^2)}} \times \sqrt{2 * g(h_{v1} - h_{v2})} = 7,65 * 10^{-5} \frac{m^3}{s}$$

Determinación el porcentaje de error

$$\%Error = \left| \frac{Q_{exp} - Q_{real}}{Q_{exp}} \right| \times 100 = 7,32\%$$

De este modo se calcula para los demás datos, los resultados se muestran en la tabla 39.

Determinación del cálculo del coeficiente de descarga experimental para el Venturi

$$C_v = \frac{Q_{exp}}{Q_{ideal}} = 1,0250$$

Cálculo del porcentaje de error de C_v

$$\% Error = \left| \frac{C_{v\text{teórico}} - C_{v\text{experimental}}}{C_{v\text{teórico}}} \right| * 100$$

$$\% Error = 7,9 \%$$

Cálculo de la velocidad en la contracción

$$v_2 = \frac{1}{\sqrt{(1 - (\frac{A_2}{A_1})^2)}} \times \sqrt{2 * (g * \Delta h)} = 0,4004 \frac{m}{s^2}$$

Cálculo del número de Reynolds

$$Re = \frac{\rho * v_2 * d_v}{\mu} = 6363$$

Los siguientes datos se calculan de la misma forma y los resultados se muestran en la tabla 40.

Cálculo para el medidor de orificio

Determinación del caudal ideal y real

Cálculos para 2 L/min

$$Q(ideal) = \frac{A_2}{\sqrt{(1 - (\frac{A_2}{A_1})^2)}} \times \sqrt{2 * g(h_{o1} - h_{o2})} = 1,35 * 10^{-4} \frac{m^3}{s}$$

$$Q(real) = \frac{A_2 * C_o}{\sqrt{(1 - (\frac{A_2}{A_1})^2)}} \times \sqrt{2 * g(h_{o1} - h_{o2})} = 8,26 * 10^{-5} \frac{m^3}{s}$$

Determinación el porcentaje de error

$$\%Error = \left| \frac{Q_{exp} - Q_{real}}{Q_{exp}} \right| \times 100 = 0,06\%$$

De este modo se calcula para los demás datos, los resultados se muestran en la tabla 41.

Determinación del cálculo del coeficiente de descarga experimental para el orificio

$$C_o = \frac{Q_{exp}}{Q_{ideal}} = 0,6096$$

Cálculo del porcentaje de error de C_o

$$\% Error = \left| \frac{C_{o\text{teórico}} - C_{o\text{experimental}}}{C_{o\text{teórico}}} \right| * 100$$

$$\% Error = 0,06\%$$

Cálculo de la velocidad en la contracción

$$v_2 = \frac{1}{\sqrt{(1 - (\frac{A_2}{A_1})^2)}} \times \sqrt{2 * (g * \Delta h)} = 0,4309 \frac{m}{s^2}$$

Cálculo del número de Reynolds

$$Re = \frac{\rho * v_2 * d_o}{\mu} = 8560$$

Del mismo modo se realiza los siguientes datos y los resultados se muestran en la tabla 42.

Cálculo de vertedero rectangular y triangular

Tabla K1

Datos de las compuertas del vertedero

	Compuerta rectangular (m)	Compuerta triangular $\theta = 90^\circ$ (m)
Ancho del canal (B)	0,25	0,25
Altura del umbral (w)	0,08	0,12
Carga (h)	0,08	0,04
Ancho del vertedero (b)	0,03	0,06

- Para el coeficiente de descarga el manual indica el valor de 0,61 tanto para el vertedero rectangular como triangular.

Cálculo del vertedero rectangular

$$Q_t = Cd * \frac{2}{3} * b * \sqrt{2 * g} (H)^{\frac{3}{2}}$$

Reemplazando:

$$Q_t = 0,61 * \frac{2}{3} * 0,03m * \sqrt{2 * 9,81 \frac{m}{s^2}} (H)^{\frac{3}{2}} = 0,0540 * (H)^{\frac{3}{2}}$$

Reemplazando la carga

$$Q_t = 0,0540 * (0,015m)^{\frac{3}{2}} = 9,93 * 10^{-5} \frac{m^3}{s}$$

Determinamos el porcentaje de error

$$\%Error = \left| \frac{Q_{teórico} - Q_{exp}}{Q_{teórico}} \right| * 100 = 9,99 \%$$

De este modo se calcula los demás datos que se muestran en la tabla 44.

Cálculo del vertedero triangular

$$Q_t = Cd * \frac{8}{15} * \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) * \sqrt{2 * g} (H)^{5/2}$$

Reemplazando:

$$Q_t = 0,61 * \frac{8}{15} * \tan\left(\frac{90}{2}\right) * \sqrt{2 * 9,81 \frac{m}{s^2}} (H)^{\frac{5}{2}} = 1,4410 * (H)^{5/2}$$

Reemplazando la carga

$$Q_t = 1,4410 * (H)^{\frac{5}{2}} = 1,4410 * (0,025m)^{\frac{5}{2}} = 1,42 * 10^{-4} \frac{m^3}{s}$$

Determinamos el porcentaje de error

$$\%Error = \left| \frac{Q_{teórico} - Q_{exp}}{Q_{teórico}} \right| \times 100 = 39,08 \%$$

De este modo se calcula los demás datos que se muestran en la tabla 46.

ANEXO J MANUAL DE OPERACIÓN DEL MÓDULO DE MEDIDORES DE FLUJO

I. FUNDAMENTO TEÓRICO

1.1. Ecuación de calibración

La ecuación de calibración para los medidores de flujo (rotámetro, Venturi, orificio y vertedero) se expresan como:

$$Q = k(\Delta h)^n$$

Donde,

$$\ln(Q) = \ln(k) + n\ln(\Delta h)$$

Los resultados de calibración se grafican convenientemente para obtener la pendiente n y el valor de la constante K.

1.2. Venturimetro

1.2.1. Medición de Caudal

Para el análisis considere el flujo de fluido incompresible a través de la sección convergente/garganta/divergente de un medidor de Venturi. El área transversal en las secciones 1, 2 es A_1 , A_2 . Por otro lado, los tubos de manómetro diferencial en estas secciones registran la carga estática como: h_1 , h_2 . Despreciando las pérdidas por fricción a través del tubo y suponiendo que la velocidad (v) y la carga de manómetro diferencial (h) son constantes para cada sección considerada, la ecuación de Bernoulli se escribe como:

$$\frac{v_1^2}{2} + z_1 + \frac{P_1}{\rho g} = \frac{v_2^2}{2} + z_2 + \frac{P_2}{\rho g}$$

y la ecuación de continuidad aplicada a las mismas secciones considerando un fluido incompresible resulta:

$$v_1 * A_1 = v_2 * A_2$$

Resolviendo para v_2 al igualar las ecuaciones se obtiene:

$$v_2 = \frac{v_1 * A_1}{A_2}$$

Reemplazando se obtiene la velocidad de flujo en la garganta del Venturi

$$v_2 = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}} \times \sqrt{\frac{2 * (g * \Delta h(\rho_{Hg} - \rho_w))}{\rho_w}}$$

Luego el caudal ideal que pasa por el Venturi se expresa como:

$$Q(ideal) = \frac{A_2}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}} \times \sqrt{\frac{2 * (g * \Delta h(\rho_{Hg} - \rho_w))}{\rho_w}}$$

Para tomar en cuenta la pequeña pérdida por fricción se introduce un coeficiente experimental CV, resulta:

$$Q(real) = \frac{A_2 * Cv}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}} * \sqrt{\frac{2 * (g * \Delta h(\rho_{Hg} - \rho_w))}{\rho_w}}$$

El coeficiente de descarga de Venturi, CV, no es constante y depende principalmente del número de Reynolds y de la geometría del tubo. Su valor varía ligeramente de un medidor a otro y oscila en el rango de 0.92 a 0.99. Experimentalmente su valor se calcula como:

$$Cv = \frac{Q_{Exp}}{Q_{ideal}}$$

1.3. Medidor de orificio

1.3.1. Medición de caudal

Al aplicar la ecuación de Bernoulli entre una sección de aguas arriba y una vena contractada, obtenemos un resultado similar al medidor de Venturi:

$$v_2 = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}} \times \sqrt{\frac{2 * (g * \Delta h(\rho_{Hg} - \rho_w))}{\rho_w}}$$

y el caudal ideal de descarga es:

$$Q(ideal) = \frac{A_2}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}} \times \sqrt{\frac{2 * (g * \Delta h(\rho_{Hg} - \rho_w))}{\rho_w}}$$

El caudal real es:

$$Q(real) = \frac{A_2 * C_o}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}} * \sqrt{\frac{2 * (g * \Delta h(\rho_{Hg} - \rho_w))}{\rho_w}}$$

1.4. Rotámetro

Son aparatos en que la caída de presión es constante, o prácticamente constante, mientras que el área a través de la cual circula el fluido varía con la velocidad de flujo. Este es un medidor de flujo que permite que el fluido ascienda a través de la posición de equilibrio del tubo, mediante la compensación de tres fuerzas: 1) El peso del flotador, "fuerza de gravedad". 2) La fuerza de flotación del fluido sobre el flotador. 3) La fuerza del rozamiento sobre el flotador. La fuerza 1 actúa hacia abajo mientras que las fuerzas 2 y 3 lo hacen hacia arriba. En el equilibrio.

1.5. Vertedero

Un vertedero es un dique sobre el cual fluye el líquido.

1.5.1. Vertedero rectangular con contracciones

Para determinar las dimensiones para el vertedero rectangular se emplea la fórmula Kindsvater-Carter

$$Q = 0,2192(h + 0,001 m)^{\frac{3}{2}}$$

1.5.2. Vertedero triangular

El vertedero triangular de pared delgada se empleó del ángulo 45°, Aplicando la fórmula de la Universidad Católica de Chile.

$$Q = 0,61 * (h)^{\frac{5}{2}}$$

II. MÓDULO EXPERIMENTAL

Para el desarrollo de la actividad experimental, el equipo experimental cuenta con los siguientes componentes:

- Tanque de almacenamiento de agua.
- Bomba centrífuga.
- Medidores de flujo (Venturímetro, orificio, rotámetro, vertedero)
- Tubería recta y accesorios de conexión.

Los diferentes dispositivos de medidores de flujo se hallan instalados en serie y el agua circula a través del sistema. Además, la unidad cuenta con dos manómetros diferenciales de mercurio /agua, uno para el Venturi y el otro para el orificio. Para el medidor de Venturi y orificio se tiene ($d_2 = 16,65 \text{ mm}$) se halla instalado en la tubería galvanizada de $d_1 = 1 \text{ pulgadas SCH 40}$ ($D_i = 27,3 \text{ mm}$). El rotámetro presenta una escala de 10 - 110 L/min.

III. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

1. Estudiar la ubicación de todas las válvulas y familiarizarse con el funcionamiento del equipo, en particular, con los manómetros diferenciales de mercurio/ agua.
2. Conectar la alimentación de sistema a la línea de alimentación de 220 V. Posteriormente, subir la llave termomagnética para energizar el sistema (verificar esto con la lampara naranja del tablero).
3. Encender la bomba con el pulsador (verificar esto con la lampara verde del tablero).
4. Eliminar burbujas de aire de la línea de tubería y manómetros diferenciales, de la siguiente manera:
 - Abrir las válvulas V1, V2 y V3 y poner en funcionamiento la bomba, dejando que el agua circule por la red.

5. Para el Venturímetro ajustar la altura de las columnas de mercurio del manómetro diferencial.
6. Calibración de rotámetro: Por volumen y medición de tiempo, a diferentes valores del rotámetro.
7. Determinar los caudales correspondientes a diferentes caídas de presión, procediendo de la siguiente manera:
 - Fijar un caudal mínimo de circulación en el rotámetro.
 - Leer en cada ensayo:
 - Caudal: Rotámetro en la escala de (L/min).
 - Venturi: La lectura manométrica de distribución de presión para diferentes puntos.
 - Orificio: Lectura manométrica.
 - Vertedero: Lectura de la altura de descarga del líquido.
 - Temperatura del fluido.
 - Incrementar el caudal cuidadosamente regulando la válvula V2.
 - Repetir las mediciones y continuar hasta un caudal máximo.

IV. CALCULOS

1.6. Medidor de Venturi

1. Determinar la ecuación de calibración y determinar las constantes n y k.
2. Calcular valores de $(h_1 - h_2)$ de las mediciones experimentales a diferentes caudales de flujo. Graficar $(h_1 - h_2)$ con respecto al caudal Q y determine el valor de la constante K que expresa la calibración del medidor de flujo.
3. Calcular el coeficiente de descarga, C_v , en función del caudal y número de Reynolds (Re) calculado en la garganta. Comparar los resultados con la bibliografía.
4. Determinar los caudales

1.7. Medidor de orificio

1. Calcular la ecuación de calibración y determinar gráficamente la constante K para el medidor de orificio.
2. Calcular el coeficiente de descarga, C_o , en función del caudal y número de Reynolds (Re) calculado en la garganta. Comparar los resultados con la bibliografía.

- Determinar los caudales.

1.8. Vertedero

- Calcular la ecuación de calibración y determinar gráficamente la constante K para el vertedero rectangular y triangular.
- Calcular la variación de la descarga en ambos vertederos.

V. FORMATO RECOMENDADO PARA TOMA DE DATOS Y RESULTADOS

Tabla L1

Datos experimentales para los medidores de rotámetro, Venturi y orificio

$Q_{Erot} \left(\frac{L}{min} \right)$	Medición (Exp.)		Venturi		Orificio	
	V (mL)	t (s)	h_{V1} (mm)	h_{V2} (mm)	h_{O1} (mm)	h_{O2} (mm)

Tabla L2

Resultados del caudal del medidor de Venturi y orificio y su porcentaje de error

$Q_{Erot} \left(\frac{L}{min} \right)$	$Q_{prom} \left(\frac{m^3}{s} \right)$	h_{V1-O1} (mm)	h_{V2-O2} (mm)	Δh_{V-0} (m)	$Q_{ideal} \left(\frac{m^3}{s} \right)$	$Q_{real} \left(\frac{m^3}{s} \right)$	%Error

Tabla L3

Resultados del coeficiente de descarga del Venturi y orificio y el número de Reynolds

$Q_{Erot} \left(\frac{L}{min} \right)$	$Q_{prom} \left(\frac{m^3}{s} \right)$	$Q_{ideal} \left(\frac{m^3}{s} \right)$	$Q_{real} \left(\frac{m^3}{s} \right)$	$(Cv - Co)_{Exp}$	%Error	$\frac{v_1}{s^2}$	Re

Tabla L4*Datos experimentales para el vertedero rectangular y triangular*

$\frac{Q_{Erot}}{\left(\frac{L}{min}\right)}$	<i>Medición (Exp.)</i>	<i>Carga</i> (Δh_{VT-VR} (cm))
	<i>V (mL)</i> <i>t (s)</i>	

Tabla L5*Resultados de caudales para el vertedero rectangular y triangular*

$\frac{Q_{Erot}}{\left(\frac{L}{min}\right)}$	Q_{prom} $\left(\frac{m^3}{s}\right)$	<i>Carga</i> (Δh_{VR}) (cm)	<i>Carga</i> (Δh_{VT-VR}) (m)	$Q_{teórico}$ $\left(\frac{m^3}{s}\right)$	% <i>Error</i>

**ACTA DE SUSTENCIÓN DE LA TESIS PRESENCIAL:**

(Reglamento de grados y títulos, aprobado con RCU N° 314-2021-UNSCH-CU)

“DISEÑO DE UN MODULO DE MEDIDORES DE FLUJO: TUBO VENTURI, PLACA ORIFICIO Y VERTEDERO PARA EL LABORATORIO DE MECANICA DE FLUIDOS”

Expositora: Ruth Karina GUTIERREZ ORIUNDO
Bachiller en Ingeniería Química

Expediente N° 245310

Resolución Decanal N° 062-2024-UNSCH-FIQM/D

Fecha: 07-02-20224

En la Sala de Conferencias “Pedro VILLENA HIDALGO” de la Facultad de Ingeniería Química y Metalurgia, ubicada en la Ciudad Universitaria de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga (H-121), siendo las once de la mañana con cinco minutos del día viernes nueve de febrero del año dos mil veinticuatro, se reunieron la Bachiller en Ingeniería Química **Ruth Karina GUTIERREZ ORIUNDO**, los Docentes Miembros del Jurado de Sustentación Ingenieros: Dr. Alfredo ARIAS JARA, Mg. Abel Nilo JUSCAMAYTA TOMASEVICH y Mg. Jorge Adalberto MALAGA JUAREZ, bajo la Presidencia del Dr. Agustín Julián PORTUGUEZ MAURTUA (Decano de la FIQM), Mg. Cipriano MENDOZA ROJAS (Docente Asesor de la Tesis), el Mg. Fredy Rober PARIONA ESCALANTE (Secretario-Docente) y el público asistente.

Acto seguido, el Presidente del Jurado de Sustentación dispuso que el Secretario Docente dé lectura a los antecedentes tramitados para el presente Acto Público de Sustentación de la Tesis: **“DISEÑO DE UN MODULO DE MEDIDORES DE FLUJO: TUBO VENTURI, PLACA ORIFICIO Y VERTEDERO PARA EL LABORATORIO DE MECANICA DE FLUIDOS”**, presentado por la Bachiller **Ruth Karina GUTIERREZ ORIUNDO**. A continuación, el Secretario-Docente procedió a dar lectura a la Resolución Decanal N° 062-2024-UNSCH-FIQM/D.

Luego, el Presidente del Jurado invitó a la Bachiller **Ruth Karina GUTIERREZ ORIUNDO**, a pasar al estrado y exponer su trabajo de Tesis en un tiempo máximo de cuarenta y cinco minutos.

Terminada la exposición de la Bachiller, el Presidente invitó a los Señores Miembros del Jurado de Sustentación a que formulen sus preguntas y señalen sus observaciones, en el siguiente orden: Mg. Jorge Adalberto MALAGA JUAREZ, Mg. Abel Nilo JUSCAMAYTA TOMASEVICH y Dr. Alfredo ARIAS JARA. Luego el Presidente invitó al Mg. Cipriano MENDOZA ROJAS para que, en su condición de Docente Asesor, se sirva levantar las observaciones del Jurado y efectuar las aclaraciones que considere conveniente.

Concluyó con esta etapa el Dr. Agustín Julián PORTUGUEZ MAURTUA, en su condición de Presidente.

**UNSCH**FACULTAD DE INGENIERÍA
**QUÍMICA Y
METALURGIA****ACTA DE SUSTENCIÓN DE LA TESIS PRESENCIAL:**

(Reglamento de grados y títulos, aprobado con RCU N° 314-2021-UNSCH-CU)

“DISEÑO DE UN MODULO DE MEDIDORES DE FLUJO: TUBO VENTURI, PLACA ORIFICIO Y VERTEDERO PARA EL LABORATORIO DE MECANICA DE FLUIDOS”**Expositora: Ruth Karina GUTIERREZ ORIUNDO
Bachiller en Ingeniería Química**

Expediente N° 245310

Resolución Decanal N° 062-2024-UNSCH-FIQM/D

Fecha: 07-02-20224

Culminada la etapa de preguntas, el Presidente del Jurado invitó a la Sustentante y al público para que se sirvan abandonar la Sala de Conferencias con la finalidad de permitir al Jurado de Sustentación deliberar sobre la evaluación a otorgar. Se alcanzó el siguiente resultado. **APROBADA POR UNANIMIDAD PROMEDIO DIECISIETE (17).**

Finalmente el Presidente del Jurado dispuso que se invite a la Sustentante y al público asistente a que se sirvan ingresar a la Sala de Conferencias, y anunció que la Bachiller **Ruth Karina GUTIERREZ ORIUNDO**, ha resultado **APROBADA POR UNANIMIDAD**, y por lo tanto a partir de la fecha la Universidad y la Facultad cuenta con una flamante **INGENIERA QUIMICA** y le augura éxitos en su desempeño profesional.

Siendo la una de la tarde con veinte minutos se dio por concluido el acto académico de Sustentación de Tesis. En fe de lo cual firmamos:


.....
Dr. Agustín Julián PORTUGUEZ MAURTUA
Presidente
.....
Dr. Alfredo ARIAS JARA
Miembro
.....
Mg. Abel Nilo JUSCAMAYTA TOMASEVICH
Miembro
.....
Mg. Jorge Adalberto MALAGA JUAREZ
Miembro
.....
Mg. Fredy Rober PARIONA ESCALANTE
(Secretario Docente)



UNSCH

FACULTAD DE
INGENIERÍA QUÍMICA Y
METALURGIA

ESCUELA PROFESIONAL DE
INGENIERÍA QUÍMICA

CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD N° 002-2024-UNSCH-FIQM/EPIQ

El que suscribe, Director de la **Escuela Profesional de Ingeniería Química** de la Facultad de Ingeniería Química y Metalurgia de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, emite la siguiente:

CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD

Que, habiendo recibido el requerimiento de Constancia de Originalidad por parte de la Bach. **Ruth Karina GUTIERREZ ORIUNDO**, se procedió a la evaluación y regularización de originalidad del archivo adjunto con el **TURNITIN - UNSCH**, de acuerdo a los criterios establecidos en el **Reglamento de Originalidad de Trabajos de Investigación de la UNSCH**, aprobado con Resolución del Consejo Universitario N° 039-2021-UNSCH-CU; cuyos resultados son:

TESIS : Diseño de un módulo de medidores de flujo: tubo venturi, placa orificio y vertedero para el laboratorio de mecánica de fluidos.

Autor Bach. : Ruth Karina GUTIERREZ ORIUNDO
Identificado : 2315152203
Fecha : 08 de marzo de 2024
Archivo : Tesis

Se expide la presente constancia de originalidad, con reporte del **7 (siete) % de ÍNDICE DE SIMILITUD** realizado con **Depósito de trabajos estándar**, a fin de proseguir con los trámites pertinentes; cabe señalar que, los documentos del procedimiento se archivan en el repositorio documental de la Escuela.

Ayacucho, 08 de marzo de 2024


Mtro. **Abraham Fernando ESPINOZA**
DIRECTOR

Adjunto **Reporte de Índice de Similitud**
cc. archivo

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA
QUÍMICA Av. Independencia S/N –
Ayacucho Telf. 066-312510 Anexo. 152 Correo:
ep.quimica@unsch.edu.pe

Diseño de un módulo de medidores de flujo: tubo venturi, placa orificio y vertedero para el laboratorio de mecánica de fluidos

por Ruth Karina GUTIERREZ ORIUNDO

Fecha de entrega: 08-mar-2024 08:48a.m. (UTC-0500)

Identificador de la entrega: 2315152203

Nombre del archivo: GUTIERREZ_RUTH_TESIS_FINAL_MARZO_2024.pdf (4.81M)

Total de palabras: 29109

Total de caracteres: 123861

Diseño de un módulo de medidores de flujo: tubo venturi, placa orificio y vertedero para el laboratorio de mecánica de fluidos

INFORME DE ORIGINALIDAD

7%

INDICE DE SIMILITUD

7%

FUENTES DE INTERNET

0%

PUBLICACIONES

2%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	www.repositorio.usac.edu.gt Fuente de Internet	1%
2	qdoc.tips Fuente de Internet	1%
3	doku.pub Fuente de Internet	1%
4	s09e85a3b31fd5e07.jimcontent.com Fuente de Internet	1%
5	hdl.handle.net Fuente de Internet	<1%
6	repositorio.unsch.edu.pe Fuente de Internet	<1%
7	www.clubensayos.com Fuente de Internet	<1%
8	www.ptolomeo.unam.mx:8080 Fuente de Internet	<1%

9	archive.org Fuente de Internet	<1 %
10	repositorio.ug.edu.ec Fuente de Internet	<1 %
11	Submitted to Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga Trabajo del estudiante	<1 %
12	www.scribd.com Fuente de Internet	<1 %
13	docplayer.es Fuente de Internet	<1 %
14	m.monografias.com Fuente de Internet	<1 %
15	Submitted to Universidad Nacional Hermilio Valdizan Trabajo del estudiante	<1 %
16	repositorio.unesum.edu.ec Fuente de Internet	<1 %
17	www.vitoria-gasteiz.org Fuente de Internet	<1 %
18	Submitted to Universidad del Atlántico Trabajo del estudiante	<1 %
19	ri2.bib.udo.edu.ve:8080 Fuente de Internet	<1 %

20

Submitted to Universidad de Costa Rica

Trabajo del estudiante

<1 %

21

vsip.info

Fuente de Internet

<1 %

Excluir citas

Activo

Excluir coincidencias < 30 words

Excluir bibliografía

Activo