



UNAP



FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA

TESIS

**CONSTRUCCIÓN E INSTALACIÓN DE UN EQUIPO MODULAR
PARA EL ESTUDIO DEL CAUDAL EN FUNCIÓN DEL NIVEL
DE LÍQUIDO EN VERTEDEROS TRIANGULARES**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO QUÍMICO**

PRESENTADO POR:

**JOLVER JOSSEL DÍAZ FERNÁNDEZ
OSCAR ALEXIS OWEN RAMÍREZ GRIMALDO**

ASESOR:

Ing. FERNANDO JAVIER SALAS BARRERA, MSc.

IQUITOS, PERÚ

2022



UNAP

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA AMAZONIA PERUANA
Facultad de Ingeniería Química

UNIVERSIDAD
LICENCIADA
RESOLUCIÓN N° 012-2019-SUNEDUC



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS N° 005-CGT-FIQ-UNAP

En Iquitos, a los tres días del mes de mayo del dos mil veinte y dos, a horas Diez y seis horas, se dio inicio a la sustentación pública de la Tesis titulada: "CONSTRUCCIÓN E INSTALACIÓN DE UN EQUIPO MODULAR PARA EL ESTUDIO DEL CAUDAL EN FUNCIÓN DEL NIVEL DE LÍQUIDO EN VERTEDEROS TRIANGULARES", aprobado con Resolución Decanal N° 101-2022-FIQ-UNAP, presentado por los Bachilleres: **Jolver Jossel Díaz Fernández y Oscar Alexis Owen Ramírez Grimaldo**, para optar el título profesional de Ingeniero Químico, que otorga la Universidad de acuerdo Ley y Estatuto.

El jurado calificador y dictaminador designado mediante R. D. N° 088-2022-FIQ-UNAP está integrado por:

Ing. HUGO EMERSON FLORES BERNUY, Dr.	Presidente
Ing. ROBINSON SALDAÑA RAMÍREZ, Mtro.	Miembro
Ing. ALCIDES ARMANDO DELGADO CESPEDES, Mgr.	Miembro

Luego de haber escuchado con atención y formulado las preguntas necesarias, las cuales fueron respondidas: SATISFACTORIAMENTE

El jurado después de las deliberaciones correspondientes, llegó a las siguientes conclusiones:

La sustentación pública y la tesis ha sido: APROBADA con la calificación BUN D, estando los bachilleres aptos para obtener el Título Profesional de Ingeniero Químico. Siendo las Diez y seis horas se dio por terminado el acto de SUSTENTACIÓN.


Ing. HUGO EMERSON FLORES BERNUY, Dr.
Presidente de Jurado


Ing. ROBINSON SALDAÑA RAMÍREZ, Mtro.
Miembro


Ing. ALCIDES ARMANDO DELGADO CESPEDES, Mgr.
Miembro


Ing. FERNANDO JAVIER SALAS BARRERA, MSc.
Asesor

JURADO Y ASESOR



.....
Ing. HUGO EMERSON FLORES BERNUY, Dr.
Presidente de Jurado



.....
Ing. ROBINSON SALDAÑA RAMÍREZ, Mtro.
Miembro



.....
Ing. ALCIDES ARMANDO DELGADO CESPEDES, Mgr.
Miembro



.....
Ing. FERNANDO JAVIER SALAS BARRERA, MSc.
Asesor

DEDICATORIA

Dedico esta tesis a mis padres Julio y Flor, quienes me apoyaron para poder cumplir mis metas y llegar a estas instancias de mi vida académica, ya que ellos siempre me mostraron su apoyo incondicional para poder superarme cada día.

También quiero dedicarle esto a mi pequeña hija Danae, que es mi inspiración y fortaleza en cada momento y a mi esposa por brindarme su apoyo en este recorrido de la vida que tengo junto a ella.

Y como olvidarme de mis amigos, que me dieron la oportunidad de aprender junto a ellos las enseñanzas que cada profesor nos dio para ser grandes profesionales.

Jolver Jossel Díaz Fernández

Dedico esta tesis que es el producto de mis años de estudio; en especial a mi mamá Melizza y abuela Sadith que ya no se encuentra en vida, también a mi padrastro, mi pareja, a mis hermanos, mis profesores, mis amigos que han estado conmigo apoyándome en cada derrorta, en cada desvelo, cada pequeño triunfo, han sido 5 maravillosos años aprendiendo con cada uno de mis docentes, resaltando a 2 excelentes educadores como el Ing. Jorge Vásquez y el que en vida fue Ing. Gabriel Gilabert, a todos ellos les muestro este trabajo como el fruto de mi esfuerzo, el fruto de sus apoyo y enseñanza.

Oscar Alexis Owen Ramírez Grimaldo

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mi institución y a mis formadores por sus esfuerzos ya que me ayudaron a obtener este grado como profesional.

También agradezco a mis familiares ya que ellos también forman parte de este logro académico.

Por último, agradecer a todos mis compañeros de la universidad ya que gracias al compañerismo, amistad y apoyo moral han aportado mucho en esta etapa de mi carrera profesional.

.

Jolver Jossel Díaz Fernández

Agradezco a mis padres, abuelos, amigos, pareja y docentes por habernos apoyado durante todo este camino en nuestra querida casa de estudios, desde el fondo de mi corazón agradezco que hayan estado alentándome, apoyándome en cada derrota, cada tropiezo, obstáculo que me puso la vida, que con esfuerzo y dedicación he superado, también agradecer a nuestro asesor que nos apoyó desde el inicio, haber egresado fue una victoria y consecuencia de nuestras acciones, fue el inicio del camino de nuestra vida profesional, ahora en este trabajo plasmamos lo mejor de nosotros para lograr el objetivo de ser profesionales titulados.

Oscar Alexis Owen Ramírez Grimaldo

ÍNDICE DE CONTENIDO

	Pág.
PORTADA	i
ACTA DE SUSTENTACIÓN	ii
JURADO Y ASESOR	iii
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTO	v
ÍNDICE DE CONTENIDO	vi
ÍNDICE DE TABLAS	viii
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
RESUMEN	x
ABSTRACT	xi
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO	3
1.1. Antecedentes	3
1.2. Bases teóricas	5
1.2.1. Ecuación de continuidad	6
1.2.2. Ecuación de Bernoulli	7
1.2.3. Teorema de Torricelli	9
1.2.4. Medición de flujo en canales abiertos	10
1.2.5. Vertederos	11
1.2.6. Vertedero triangular	12
1.2.7. Deducción de la fórmula para calcular el caudal teórico en un vertedero triangular	12
1.3. Definición de términos básicos	14
1.3.1. Caudal teórico	14
1.3.2. Nivel de líquido	14
1.3.3. Ángulo del vertedero triangular	14
1.3.4. Coeficiente de descarga	14
1.3.5. Caudal real	15
CAPÍTULO II: HIPÓTESIS Y VARIABLES	16
2.1. Formulación de la hipótesis	16
2.2. Variables y su operacionalización	16
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA	18
3.1. Tipo y diseño	18
3.2. Diseño muestral	19

3.3. Procedimientos de recolección de datos	20
3.4. Procesamiento y análisis de datos	20
3.5. Aspectos éticos	21
3.6. Descripción del diseño, construcción e instalación del equipo modular	21
3.6.1. Tanque reservorio	21
3.6.2. Línea de distribución	21
3.6.3. Canal abierto	22
3.6.4. Vertederos triangulares	22
CAPÍTULO IV: RESULTADOS	31
CAPÍTULO V: DISCUSIÓN	40
CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES	41
CAPÍTULO VII: RECOMENDACIONES	42
CAPÍTULO VIII: FUENTES DE INFORMACIÓN	43
ANEXOS	45
Anexo 1. Matriz de consistencia	46
Anexo 2. Especificaciones técnicas de los componentes principales del equipo modular	47
Anexo 3. Hoja de cálculo para el vertedero triangular de 30°	48
Anexo 4. Hoja de cálculo para el vertedero triangular de 45°	49
Anexo 5. Hoja de cálculo para el vertedero triangular de 60°	50
Anexo 6. Guía de práctica del equipo modular	51

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Operacionalización de las variables	17
Tabla 2. Volumen medido en las pruebas con el vertedero triangular de 30°	31
Tabla 3. Resultados de las pruebas realizadas con el vertedero triangular de 30°	31
Tabla 4. Datos para obtener el coeficiente de descarga en el vertedero triangular de 30°	32
Tabla 5. Resultados del caudal ajustado en el vertedero triangular de 30°	34
Tabla 6. Volumen medido en las pruebas con el vertedero triangular de 45°	34
Tabla 7. Resultados de las pruebas realizadas con el vertedero triangular de 45°	35
Tabla 8. Datos para obtener el coeficiente de descarga en el vertedero triangular de 45°	35
Tabla 9. Resultados del caudal ajustado en el vertedero triangular de 45°.	36
Tabla 10. Volumen medido en las pruebas con el vertedero triangular de 60°.	37
Tabla 11. Resultados de las pruebas realizadas con el vertedero triangular de 60°	37
Tabla 12. Datos para obtener el coeficiente de descarga en el vertedero triangular de 60°	37
Tabla 13. Resultados del caudal ajustado en el vertedero triangular de 60°	39

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Esquema que representa la ecuación de continuidad	6
Figura 2. Formas de energía de la ecuación de Bernoulli	7
Figura 3. Esquema que representa el teorema de Torricelli	9
Figura 4. Movimiento de un fluido en un canal abierto	10
Figura 5. Vista lateral y frontal de un vertedero con cresta afilada	11
Figura 6. Vista frontal de un vertedero triangular	12
Figura 7. Vertedero triangular de pared delgada	13
Figura 8. Representación gráfica del caudal real versus el caudal teórico	15
Figura 9. Esquema del diseño de investigación	18
Figura 10. Diseño del equipo modular	23
Figura 11. Diseño del tanque reservorio	24
Figura 12. Diseño del canal abierto	24
Figura 13. Diseño del vertedero triangular de 30°	25
Figura 14. Diseño del vertedero triangular de 45°	26
Figura 15. Diseño del vertedero triangular de 60°	27
Figura 16. Equipo modular construido e instalado	28
Figura 17. Prueba de funcionamiento del equipo modular	29
Figura 18. Vertedero triangular de 60° instalado en el canal abierto	29
Figura 19. Vertederos triangulares de 45° y 30°	30
Figura 20. Vista del contador de volumen	30
Figura 21. Representación gráfica de Q_R versus Q_T en el vertedero triangular de 30°	33
Figura 22. Representación gráfica de Q_R versus Q_T en el vertedero triangular de 45°	35
Figura 23. Representación gráfica de Q_R versus Q_T en el vertedero triangular de 60°	38

RESUMEN

El objetivo principal del presente trabajo de tesis fue: construir e instalar un equipo modular para el estudio del caudal en función del nivel de líquido en vertederos triangulares. La presente investigación es del tipo aplicada, con **enfoque cuantitativo**, nivel de profundización **explicativo** y **diseño correlacional**. En la presente investigación, primeramente, se hizo una revisión bibliográfica sobre las ecuaciones fundamentales del flujo de fluidos. Posteriormente, se diseñó, construyó e instaló cada uno de los componentes que conforman el equipo modular. Los vertederos triangulares utilizados en las pruebas del equipo modular tuvieron los siguientes ángulos: 30°, 45° y 60°. Por último, se realizaron en el equipo modular, cuatro (4) pruebas para cada uno de los tres (3) vertederos triangulares. Los resultados indican que los valores mínimos y máximos del nivel de líquido, que se obtuvieron al realizar las pruebas del equipo modular con los vertederos triangulares de 30°, 45° y 60°, son: (6 a 7.7) cm, (5.2 a 6.4) cm y (4.6 a 6) cm, respectivamente. Posteriormente, se ha determinado los coeficientes de descarga para los vertederos triangulares de 30°, 45° y 60°, estos son: 0.5852, 0.5952 y 0.5961, respectivamente. Por último, se ha determinado las relaciones entre el caudal (ajustado) con el nivel de líquido para los vertederos triangulares de 30°, 45° y 60°, respectivamente, estas son: $Q_A = 0.3704h^{5/2}$, $Q_A = 0.5824h^{5/2}$ y $Q_A = 0.813h^{5/2}$. Donde h debe estar en m, para obtener Q_A en m^3/s . De esta forma se está probando la hipótesis general y cumpliendo con el objetivo general.

Palabras claves: nivel de líquido, caudal, coeficiente de descarga, vertederos triangulares.

ABSTRACT SUMMARY

The main objective of the present work of thesis was: constructing and installing a modular equipment for the study of the flow in terms of the level of liquid in triangular drains. The present investigation is somewhat diligent, with **quantitative focus**, **explanatory** level of deepening **and I design correlational**. In the present investigation, firstly, a bibliographic revision on the fundamental equations of the flow of fluids was done. At a later time, one laid plans, he constructed and he installed each one of the components that conform the modular equipment. Finally, they came true in the modular team, four (4) you try for each one of the three (3) triangular drains. Results indicate that the minimal and maximum values of the level of liquid, that they obtained themselves when accomplishing the proofs of the modular team with the triangular drains of 30°, 45° and 60°, they are: (6 a 7.7) cm, (5.2 a 6.4)cm y (4.6 a 6)cm, respectively. At a later time, the discharge coefficients for the triangular drains have been determined of 30°, 45° and 60°, these are: 0.5851, 0.5952 y 0.5961, respectively. Finally, the relations between the flow (fitting) with the level of liquid for the triangular drains have been determined of 30°, 45° and 60°, respectively, these are: $Q_A = 0.3704h^{5/2}$, $Q_A = 0.5824h^{5/2}$ and $Q_A = 0.813h^{5/2}$. Where it should be in m, in order to obtain Q_A in m^3/s . In this way he is trying on his general hypothesis and being responsible with the realistic general.

Keywords: level of liquid, flow, discharge coefficient, triangular drains.

INTRODUCCIÓN

En el año 2010 en la Facultad de Ingeniería Química (FIQ) de la Universidad Nacional de la Amazonía Peruana (UNAP), realizaron el trabajo de tesis titulado: Diseño, construcción e instalación de un sistema de medición de flujo en canal abierto con placas intercambiables, para el Laboratorio de Procesos y Operaciones Unitarias. A la fecha este sistema se encuentra deteriorado e inservible, lo cual hace que sea imposible realizar prácticas del curso de **mecánica de fluidos**, específicamente en lo que se refiere a medición de caudal en canales abiertos, lo que genera una deficiencia con respecto a la formación académica del estudiante de la FIQ-UNAP; pues no estaría desarrollando todas las competencias que se requiere que tenga al haber aprobado el mencionado curso y no esté al mismo nivel académico de estudiantes de otras universidades del Perú.

El curso de mecánica de fluidos, cumple una función muy importante en la formación de todo ingeniero químico, pues proporciona los fundamentos necesarios para realizar el diseño de equipos que se requieren en la industria de procesos, en el control ambiental y generación de energía. Por ejemplo, en las empresas que se dedican a potabilizar el agua, es necesario determinar el caudal que ingresa a la planta a través de un canal abierto, esto con el fin de conocer la cantidad de insumos a utilizarse en dicho tratamiento.

De esta manera, es que, en el presente trabajo de tesis, se plantea el siguiente problema general: “**¿es posible construir e instalar un equipo modular para estudiar el caudal en función del nivel de líquido en vertederos triangulares?**”.

Los problemas específicos que se formulan en la presente investigación son:

Problemas específicos

- ¿Es posible determinar una ecuación que relaciona el caudal en función del nivel de líquido en vertederos triangulares?
- ¿Es posible elaborar una guía de práctica para el equipo modular?

Entonces, el objetivo general y los objetivos específicos de la presente investigación, son:

Objetivo general

Construir e instalar un equipo modular para el estudio del caudal en función del nivel de líquido en vertederos triangulares.

Objetivos específicos

- Determinar una ecuación que relaciona el caudal en función del nivel de líquido en vertederos triangulares.
- Elaborar una guía de práctica para el equipo modular.

El presente trabajo de tesis es importante, porque contribuirá a la implementación del Laboratorio de Procesos y Operaciones Unitarias de la FIQ-UNAP, haciendo posible de este modo que los estudiantes de los últimos años de la mencionada facultad, puedan realizar prácticas del curso de mecánica de fluidos.

La población en el presente trabajo de tesis, lo representan las múltiples pruebas que se pueden realizar en el equipo modular, lo cual indica que dicha población es infinita. Entonces, a criterio de los investigadores, el tipo de muestreo es el no probabilístico. Se utilizan tres (3) vertederos triangulares con los siguientes ángulos: $\theta_1 = 30^\circ$, $\theta_2 = 45^\circ$ y $\theta_3 = 60^\circ$. Para cada vertedero se realizan cuatro (4) pruebas. Entonces el número de total de pruebas es igual a doce (12), lo cual representa el tamaño total de la muestra.

La estructura de la tesis, está formada por los siguientes capítulos:

- Capítulo I: Marco teórico
- Capítulo II: Hipótesis y variables
- Capítulo III: Metodología
- Capítulo IV: Resultados
- Capítulo V: Discusión
- Capítulo VI: Conclusiones
- Capítulo VII: Recomendaciones
- Capítulo VIII: Fuentes de información

CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO

1.1. Antecedentes

- Leño (2021, pp. 15, 170-187), realizó la tesis titulada para obtener el título profesional de ingeniera civil: “Diseño de vertederos hidráulicos triangulares, rectangulares y combinados en el entorno rural del sector Quives, km 40 Lima – Canta, año 2021”. En esta tesis realizaron un diseño no experimental, descriptivo y transversal, de la cual la muestra fue el canal de riego en el entorno rural del sector Quives, km 40 Lima – Canta. Para la recolección de datos utilizaron la técnica de observación y los instrumentos empleados fueron la guía y ficha de registro de observación. Para el análisis de datos aplicaron la estadística descriptiva mediante el cálculo de medidas de tendencia central, lo cual también sirvió para saber el diseño de vertederos hidráulicos triangulares, rectangulares y combinados en el canal de riego del entorno rural. Las pruebas de laboratorio indicaron que el vertedero triangular de 90° y de material acrílico, tuvo mayor coeficiente de descarga (0.4526) a comparación del resto de vertederos, lo cual generó menor pérdida de energía y es por eso que fue seleccionado para aplicar en el canal de riego.
- Ávila (2019, pp. xiii, 77), realizó el trabajo de tesis titulada: “Análisis y diseño de estructuras hidráulicas de control móviles, tanques repartidores de caudal y tanques rompe presión”. En este trabajo de tesis, dan a conocer la importancia del diseño de los componentes de un sistema de abastecimiento de agua como son: la captación, la conducción y red de distribución; asimismo, reconocen como elementos de control a los tanques de almacenamiento, vertederos, orificios y compuertas, etc. También hacen mención de los modelos hidráulicos tradicionales, los cuales se pueden aplicar al diseño de prototipos para validar los métodos de cálculo. Los resultados que obtuvieron al medir el caudal en los vertederos rectangular y triangular fueron los siguientes: 0.49 L/s y 0.805 L/s, respectivamente; para esto utilizaron un tanque de 0.57 m de diámetro y 0.50 m de altura, el cual permitió la determinación del volumen y tiempo de llenado del recipiente, dando como resultado los mencionados caudales.

- Riojas (2018, pp. xvi, 121-133), desarrolló la tesis titulada para obtener el título profesional de ingeniero civil: “Análisis del coeficiente de descarga para diferente carga hidráulica en dos vertederos de pared gruesa tipo cimacio del río Chonta Cajamarca”. Esta investigación tuvo como objetivo analizar el coeficiente de descarga para diferente carga hidráulica en dos vertederos de pared gruesa tipo cimacio del río Chonta Cajamarca, para lo cual realizaron el modelamiento hidráulico de estos, teniendo en cuenta escalas de traslación (geométricas, cinemáticas y dinámicas) del modelo al prototipo y a la inversa. Como parte del modelamiento, primeramente, realizaron el levantamiento topográfico de las dos estructuras para determinar la forma de la cresta (escala geométrica) y también de tres aforos con correntómetro y tres medidas de la carga hidráulica al mismo tiempo (escala cinemática y dinámica), todo esto trasladado al canal de pendiente variable en el laboratorio de hidráulica de la Universidad Privada del Norte.
- Salazar y Cedillo (2017, pp. vii, 31-56), realizaron el proyecto de investigación y desarrollo, cuyo título es: “Validación Computacional de Vertederos Rectangulares y Triangulares para generar un Modelo Nuevo Triangular Asimétrico que facilitaría la medición de las Cargas en Estructuras Hidráulicas”. Este proyecto tuvo como objetivo principal determinar la relación entre el nivel de agua y caudal en un vertedero asimétrico de pared delgada de forma triangular, mediante un modelo de simulación computacional que facilite su diseño y construcción en sistemas hidráulicos de Ecuador. Para la simulación del modelo nuevo de vertedero triangular asimétrico de pared delgada, tuvieron en cuenta el modelo geométrico y las condiciones iniciales de contorno. El análisis de los resultados que obtuvieron de la simulación computacional del modelo nuevo de vertedero triangular, les sirvió para determinar la fórmula del caudal en función del nivel de agua.
- Alegría y Cok (2010, p. xiii), realizaron el trabajo de tesis titulada: “Diseño, construcción e instalación de un sistema de medición de flujo en canal abierto con placas intercambiables, para el Laboratorio de Procesos y Operaciones Unitarias de la Facultad de Ingeniería Química (FIQ) de la Universidad Nacional de la Amazonía Peruana (UNAP)”. Para el desarrollo de este trabajo hicieron una revisión bibliográfica muy detallada sobre la operación de transporte de fluidos en

canales abiertos y posteriormente realizaron el diseño del sistema. En el diseño del mencionado sistema, dedujeron paso a paso lo siguiente: un modelo matemático para la evaluación del perfil de superficie libre del líquido en el canal y las ecuaciones que rigen el comportamiento de las variables de operación. Las variables de operación, son aquellas que se miden cuando se realizan los diferentes experimentos en el sistema. Posteriormente, determinaron las variables de construcción, esto con el fin de conocer la cantidad de material a utilizarse en la construcción del sistema. Seguidamente procedieron a construir el sistema y luego hicieron las pruebas de funcionamiento, verificando que el sistema funcione de acuerdo a como lo habían diseñado. Por último, hicieron las pruebas de funcionamiento, de lo cual obtuvieron datos experimentales que luego fueron procesados haciendo uso del modelo matemático mencionado, las ecuaciones deducidas y las hojas de cálculo de Microsoft Excel.

1.2. Bases teóricas

1.2.1. Ecuación de continuidad

En la figura 1, se muestra un esquema que representa la ecuación de continuidad, la cual establece que el flujo másico del fluido que entra por la sección de área A_1 , debe ser igual al que sale por la sección de área A_2 (Mott, 2006, p. 156; Flores, López y Menéndez, 2012, p. 3; García y Navarro, 2004, pp. 1-2), es decir:

$$\hat{m}_1 = \hat{m}_2. \quad (1)$$

Donde \hat{m}_1 y \hat{m}_2 representan al flujo másico en las secciones de área A_1 y A_2 , respectivamente.

En Mott (2006, p. 156), se menciona que el flujo másico de un fluido, es el producto del caudal por la densidad del mismo, es decir:

$$\hat{m} = \rho Q. \quad (2)$$

Donde \hat{m} es el flujo másico en kg/s, ρ es la densidad en kg/m³ y Q es el caudal en m³/s.

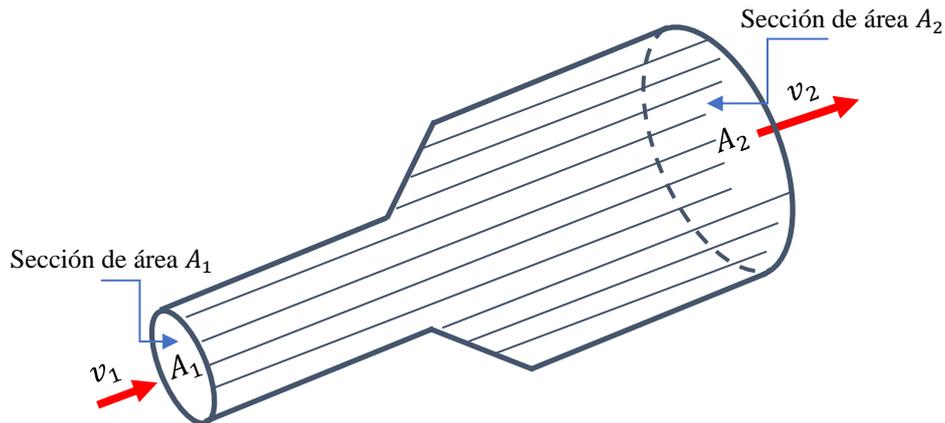


Figura 1. Esquema que representa la ecuación de continuidad.

Fuente: Modificado de Mott, 2006, p. 156.

Entonces, si se tiene en cuenta lo mencionado en la ecuación (2), la ecuación (1) se puede expresar como:

$$\rho_1 Q_1 = \rho_2 Q_2. \quad (3)$$

El caudal en una sección, es igual al producto de la velocidad del fluido con el área en esa sección, entonces la ecuación (3) queda:

$$\rho_1 v_1 A_1 = \rho_2 v_2 A_2. \quad (4)$$

Donde v_1 y v_2 están m/s y representan a la velocidad del fluido en las secciones de área A_1 y A_2 , respectivamente.

Si el fluido es incompresible, es decir, si se trata de un líquido, la densidad en dichas secciones es la misma, es decir: $\rho_1 = \rho_2$. Entonces, la ecuación (4), se reduce a la siguiente ecuación:

$$v_1 A_1 = v_2 A_2. \quad (5)$$

Las cantidades A_1 y A_2 deben estar en m^2 . La ecuación (5), es la ecuación de continuidad para los líquidos y enuncia que, para un flujo estable, el flujo volumétrico es igual en cualquier sección (Mott, 2006, p. 157).

1.2.2. Ecuación de Bernoulli

En referencia a la figura 2, se puede decir que la cantidad de energía total en la sección 1, es igual a la cantidad de energía total en la sección 2. La cantidad de energía total en una sección, es igual a estas tres formas de energía (Mott, 2006, p. 167):

$$E_T = E_{\text{Presión}} + E_{\text{Potencial}} + E_{\text{Cinética}}. \quad (6)$$

Donde E_T , $E_{\text{Presión}}$, $E_{\text{Potencial}}$ y $E_{\text{Cinética}}$, representan a la energía total, energía por presión, energía potencial y energía cinética, respectivamente, las cuales están en J.

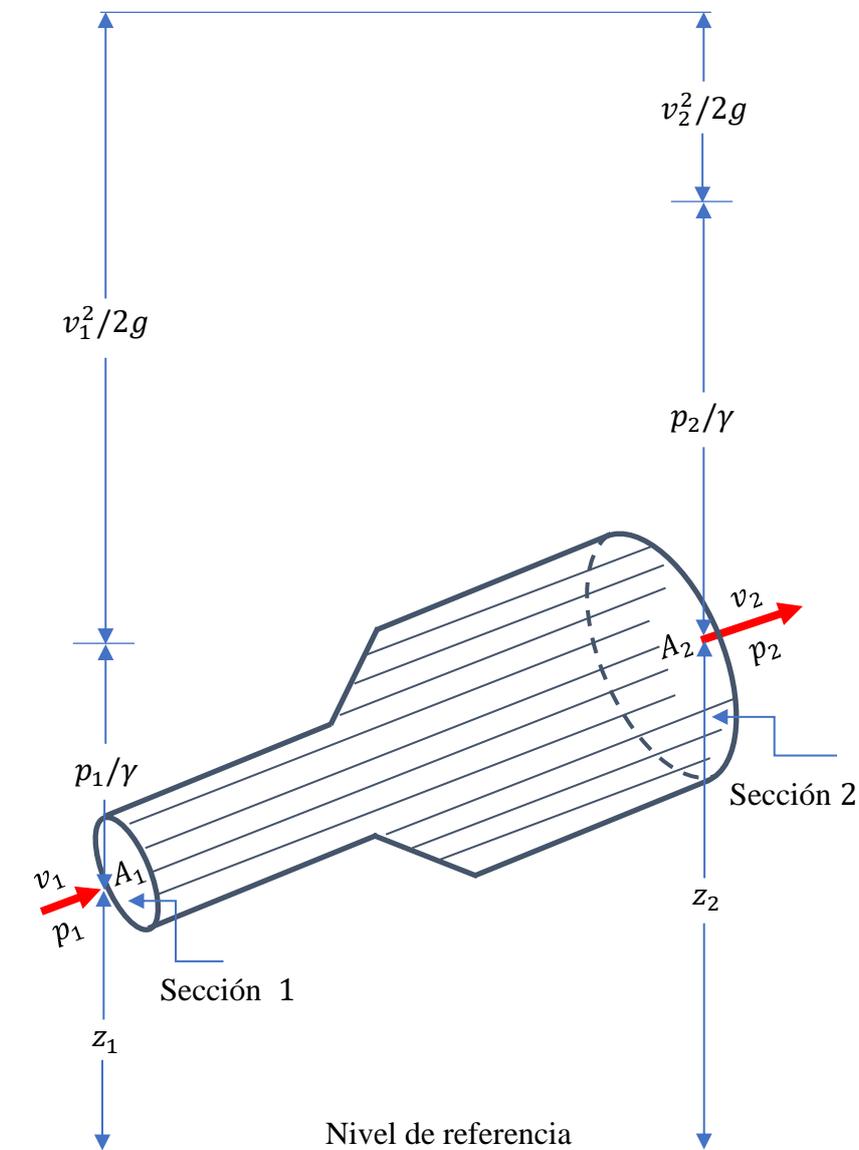


Figura 2. Formas de energía de la ecuación de Bernoulli.

Fuente: Modificado de Mott, 2006, p. 168.

Entonces, la energía total en las secciones 1 y 2, se puede expresar mediante las ecuaciones siguientes:

$$E_{T1} = \frac{mp_1}{\rho} + mgz_1 + \frac{mv_1^2}{2}. \quad (6)$$

$$E_{T2} = \frac{mp_2}{\rho} + mgz_2 + \frac{mv_2^2}{2}. \quad (7)$$

Donde p_1 y p_2 , son las presiones en las secciones 1 y 2, respectivamente, las cuales están en Pa. Las cantidades z_1 y z_2 , están en m y representan a las posiciones de las secciones 1 y 2, respectivamente. El término m representa a la masa del fluido, la cual debe estar en kg. Entonces al igualar las ecuaciones (6) y (7), se tiene:

$$\frac{mp_1}{\rho} + mgz_1 + \frac{mv_1^2}{2} = \frac{mp_2}{\rho} + mgz_2 + \frac{mv_2^2}{2}. \quad (8)$$

Si se divide la ecuación (8) entre el peso del fluido (mg), se obtiene la siguiente ecuación:

$$\frac{p_1}{\rho g} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\rho g} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g}. \quad (9)$$

El peso específico del fluido (γ), es el producto de la densidad (ρ) con la aceleración de la gravedad (g), es decir: $\gamma = \rho g$. Entonces la ecuación (9) queda:

$$\frac{p_1}{\gamma} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\gamma} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g}. \quad (10)$$

La ecuación (10) se conoce como la ecuación de Bernoulli, en la que cada término es una forma de la energía por unidad de peso del fluido que se mueve por el sistema.

Normalmente en el análisis de flujo de fluidos, los términos se expresan por lo común como altura, en alusión a una altura sobre un nivel de referencia, tal como se indica

en la figura 2. A dicha altura también se le denomina carga de energía y para el caso en específico se tiene:

p/γ : carga de presión.

z : carga de elevación.

$v^2/2g$: carga de velocidad.

1.2.3. Teorema de Torricelli

En la figura 3, se tiene una aplicación clásica de la ecuación de Bernoulli. Se puede observar en esta figura, que el fluido sale por un lado del tanque, a través de un orificio redondo. Entonces, al aplicar la ecuación de Bernoulli entre los puntos 1 y 2 de dicha figura, se tiene:

$$\frac{p_1}{\gamma} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\gamma} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g}.$$

Como las presiones en los puntos 1 y 2, son iguales a la presión atmosférica y la velocidad en el punto 1 es aproximadamente igual a cero, es decir: $p_1 = p_2$ y $v_1 \approx 0$, la ecuación resulta:

$$z_1 = \frac{p_2}{\gamma} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g}. \quad (11)$$

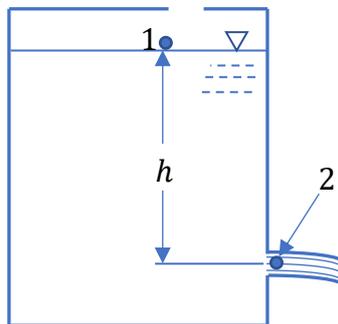


Figura 3. Esquema que representa el teorema de Torricelli.

Fuente: Modificado de Mott, 2006, p. 179.

Despejando v_2 de la ecuación (11), se obtiene:

$$v_2 = \sqrt{2g(z_1 - z_2)}. \quad (12)$$

Si se reemplaza $h = z_1 - z_2$, la ecuación (12) queda:

$$v_2 = \sqrt{2gh}. \quad (13)$$

La ecuación (13), se le denomina teorema de Torricelli, en honor de Evangelista Torricelli, quien la descubrió en 1645 aproximadamente. Dicha ecuación relaciona a la velocidad del fluido con la diferencia de altura entre la superficie libre del fluido y la salida a través de un orificio.

1.2.4. Medición de flujo en canales abiertos

Un canal abierto es aquel cuya superficie superior está abierta a la atmósfera, algunos ejemplos son las corrientes naturales, los drenajes parcialmente llenos y los sistemas de tratamiento de aguas residuales (Mott, 2006, p. 462; Potter y Wiggert, 2002, p. 435). Los dispositivos que se utilizan para medir el flujo en canales abiertos son los vertederos, estos dispositivos hacen que el área de la corriente cambie, lo que a su vez modifica el nivel de la superficie de fluido. El nivel que resulta, relativo a alguna característica del vertedero se relaciona con el caudal (Mott, 2006, p. 462).

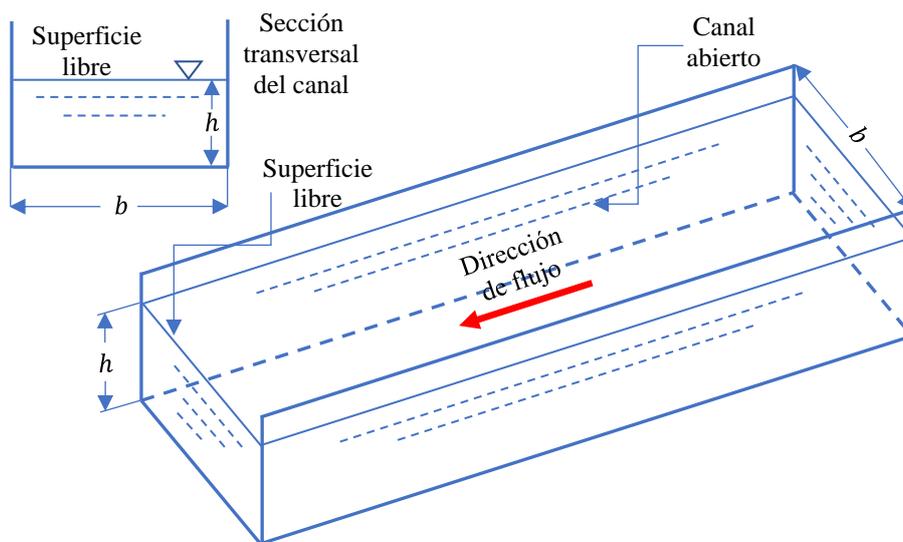


Figura 4. Movimiento de un fluido en un canal abierto.

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 4 se puede observar un canal abierto cuya superficie transversal a la dirección de flujo es rectangular. El ancho y el nivel de líquido en dicho canal son b y h , respectivamente.

1.2.5. Vertederos

Un vertedero es una barrera de forma especial que se instala en un canal abierto, a través de la cual el fluido pasa como chorro libre al otro lado de ella (Mott, 2006, p. 462; Potter y Wiggert, 2002, p. 435). La figura 5, muestra la vista lateral de un vertedero con cresta afilada. La superficie superior de la base se corta con ángulo agudo en el lado de aguas abajo para asegurar que el fluido salte como chorro libre.

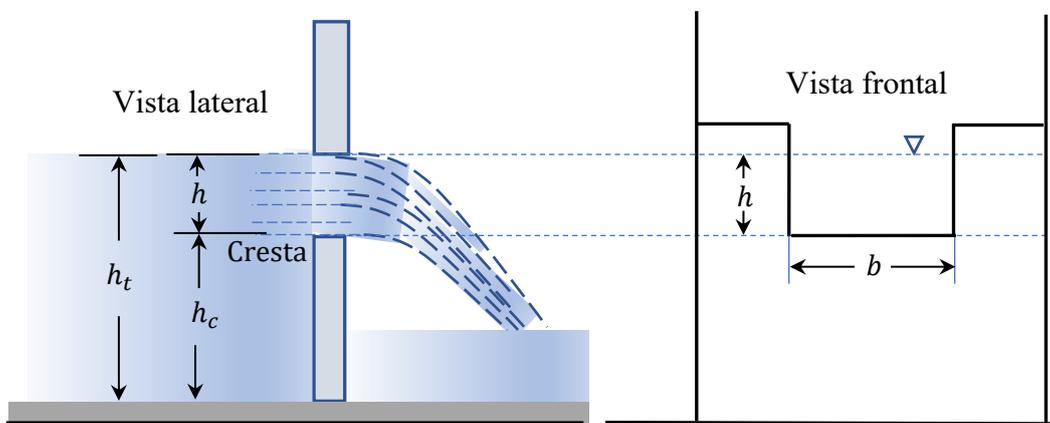


Figura 5. Vista lateral y frontal de un vertedero con cresta afilada.

Fuente: Elaboración propia; Mott, 2006, p. 462; Leño, 2021, p. 53.

Los términos h , h_c y h_t , representan la altura del fluido sobre la cresta, la altura de la cresta sobre fondo del canal y la altura del fluido sobre el fondo del canal, respectivamente.

Según Lux (2010, p. 5), los vertederos pueden ser definidos como simples aberturas, sobre los cuales un líquido fluye y son utilizados intensiva y satisfactoriamente en la medición del caudal de pequeños cursos de agua y conductos libres, así como en el control del flujo en canales, razón por la cual su estudio es de gran importancia.

Algunas de las ventajas de los vertederos en la medición del caudal de agua son:

- La construcción de la estructura es sencilla.

- No son obstruidos por materiales que flotan en el agua.
- La duración del dispositivo es relativamente larga.

1.2.6. Vertedero triangular

El vertedero triangular es aquel que tiene una ranura en forma de V, la cual produce un valor de h más grande que otros vertederos. El ángulo de la ranura en V es un factor en la ecuación de descarga, los ángulos más comúnmente usados son los de 30° , 45° , 60° y 90° (Mott, 2006, p. 464; Potter y Wiggert, 2002, p. 437). En la figura 6, se muestra una vista frontal de un vertedero triangular, donde θ es el ángulo de la ranura en forma de V.

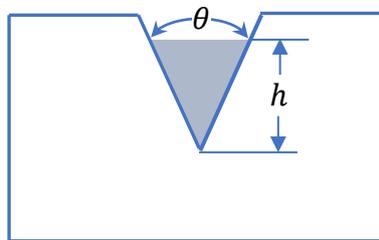


Figura 6. Vista frontal de un vertedero triangular.

Fuente: Elaboración propia; Mott, 2006, p. 463; Leño, 2021, p. 54.

1.2.7. Dedución de la fórmula para calcular el caudal teórico en un vertedero triangular

Para deducir la fórmula para calcular el caudal teórico en un vertedero triangular, se aplica la ecuación de Bernoulli entre los puntos 1 y 2 de la figura 7.

$$\frac{p_1}{\gamma} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\gamma} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g}.$$

Considerando que la presión entre los puntos 1 y 2, es igual a presión atmosférica y que la carga de velocidad en el punto 1 es aproximadamente igual a cero, entonces la ecuación de Bernoulli queda:

$$z_1 = z_2 + \frac{v_2^2}{2g} \Rightarrow \frac{v_2^2}{2g} = z_1 - z_2 = z.$$

$$v_2 = \sqrt{2gz}. \quad (14)$$

Aplicando la ecuación de continuidad al elemento diferencial de la figura 7, cuya área es $x \cdot dz$, se tiene:

$$dQ_T = v_2 \cdot x \cdot dz. \quad (15)$$

Reemplazando la ecuación (14) en la ecuación (15), se obtiene:

$$dQ_T = \sqrt{2gz} \cdot x \cdot dz. \quad (16)$$

Por definición de la tangente de un ángulo, se tiene:

$$\tan(\theta/2) = \frac{x}{2(h-z)}. \quad (17)$$

Despejando x de la ecuación (17) y reemplazando en la ecuación (16), se obtiene:

$$dQ_T = 2(h-z) \cdot \tan(\theta/2) \cdot \sqrt{2gz} dz. \quad (18)$$

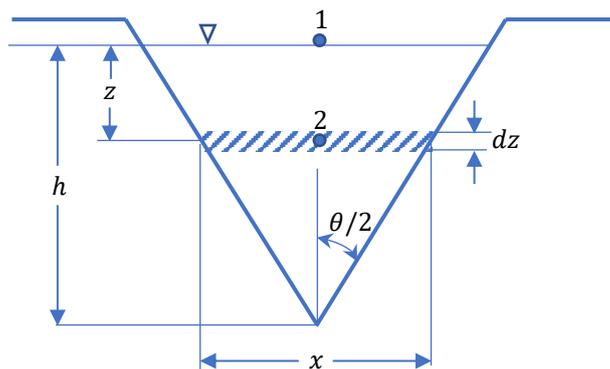


Figura 7. Vertedero triangular de pared delgada.

Fuente: Elaboración propia; Lux, 2010, p. 12.

Integrando la ecuación (18):

$$\int dQ_T = 2\sqrt{2g} \cdot \tan(\theta/2) \cdot \int_0^h (h-z)z^{1/2} dz$$

$$Q_T = 2\sqrt{2g} \cdot \tan(\theta/2) \cdot \int_0^h (h \cdot z^{1/2} - z^{3/2}) dz = 2\sqrt{2g} \cdot \tan(\theta/2) \cdot \left(\frac{2h \cdot z^{3/2}}{3} - \frac{2}{5} z^{5/2} \right) \Big|_0^h$$

$$Q_T = 2\sqrt{2g} \cdot \tan(\theta/2) \cdot \left(\frac{2h^{5/2}}{3} - \frac{2}{5} h^{5/2} \right) = 2\sqrt{2g} \cdot \tan(\theta/2) \cdot \left(\frac{4}{15} h^{5/2} \right)$$

$$Q_T = \frac{8}{15} \sqrt{2g} \cdot \tan(\theta/2) \cdot h^{5/2}. \quad (19)$$

Donde Q_T es el caudal teórico del líquido que fluye a través del vertedero triangular en m^3/s , h es el nivel de líquido en el vertedero triangular en m, θ es el ángulo de dicho vertedero y g es la aceleración de la gravedad cuyo valor es $9.81 m/s^2$.

1.3. Definición de términos básicos

1.3.1. Caudal teórico

Es el volumen teórico que fluye a través del vertedero triangular por unidad de tiempo. Se denota como Q_T y sus unidades son: L/s, L/min, m^3/s , etc. (Mott, 2006, pp. 154, 462-463; Potter y Wiggert, 2002, p. 437; Felder y Rousseau, 2004, p. 47).

1.3.2. Nivel de líquido

Es la altura del fluido sobre la cresta del vertedero triangular, se representa como h y sus unidades son: cm, m, etc. (Mott, 2006, p. 462; Potter y Wiggert, 2002, p. 437).

1.3.3. Ángulo del vertedero triangular

Es el ángulo de la ranura en forma de V (véase la figura 6), se simboliza como θ y se mide en grados sexagesimales (Mott, 2006, p. 462; Lux, 2010, p. 12).

1.3.4. Coeficiente de descarga

Relaciona el caudal real con el caudal teórico a través del vertedero triangular, su notación es C_d (Potter y Wiggert, 2002, p. 436-437).

1.3.5. Caudal real

Es el volumen real que fluye a través del vertedero triangular por unidad de tiempo. Se denota como Q_R y sus unidades son: L/s, L/min, m^3/s , etc. (Mott, 2006, p. 462; Lux, 2010, p. 13).

El caudal ajustado (Q_A), se relaciona con el caudal teórico (Q_T) y el coeficiente de descarga (C_d), mediante la siguiente ecuación:

$$Q_A = C_d \cdot Q_T. \quad (20)$$

La representación gráfica del caudal real versus el caudal teórico, se muestra en la figura 8.

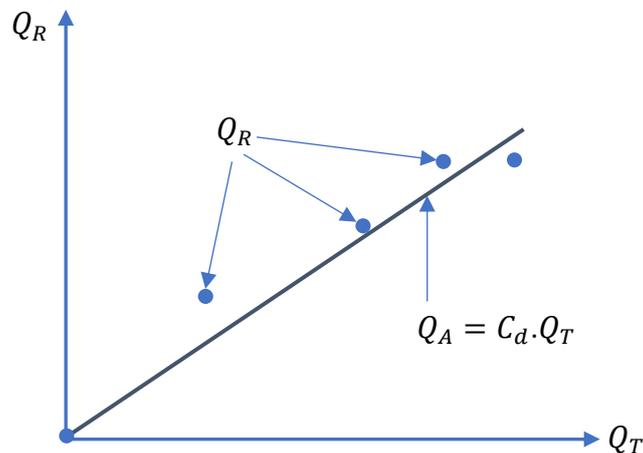


Figura 8. Representación gráfica del caudal real versus el caudal teórico.

Fuente: Elaboración propia.

La figura 8, indica que los puntos dispersos están formados por los valores del caudal teórico (Q_T) con el caudal real (Q_R) y están próximos a una línea recta, la cual tiene como pendiente al coeficiente de descarga (C_d). Los puntos de la línea recta están formados por los valores del caudal teórico (Q_T) con el caudal ajustado Q_A .

Entonces, la ecuación que relaciona el caudal ajustado (Q_A) con el nivel de líquido (h), en cada uno de los tres (3) vertederos triangulares, queda:

$$Q_A = \frac{8}{15} \cdot C_d \sqrt{2g} \cdot \tan(\theta/2) \cdot h^{5/2}. \quad (21)$$

CAPÍTULO II: HIPÓTESIS Y VARIABLES

2.1. Formulación de la hipótesis

a. Hipótesis general

Sí, es posible construir e instalar un equipo modular para estudiar el caudal en función del nivel de líquido en vertederos triangulares.

b. Hipótesis específicas

- Sí, es posible determinar una ecuación que relaciona el caudal en función del nivel de líquido en vertederos triangulares.
- Sí, es posible elaborar una guía de práctica para el equipo modular.

2.2. Variables y su operacionalización

Variable independiente: nivel de líquido.

Variable dependiente: caudal.

Tabla 1. Operacionalización de las variables.

Variables	Notación	Definición	Tipo por su naturaleza	Indicadores	Escala de medición	Medios de verificación
Independiente						
Nivel de líquido	h	Es la altura del fluido sobre la cresta del vertedero triangular (Mott, 2008, p. 462; Potter y Wiggert, 2002, p. 437).	Cuantitativa continua	cm m	Razón	Hojas de cálculo de Excel.
Dependiente						
Caudal	Q	Es el volumen que fluye a través del vertedero triangular por unidad de tiempo (Mott, 2008, pp. 154, 462-463; Potter y Wiggert, 2002, p. 437; Felder y Rousseau, 2004, p. 47).	Cuantitativa continua	m^3/s $\frac{L}{min}$ $\frac{L}{s}$	Razón	Hojas de cálculo de Excel.

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA

3.1. Tipo y diseño

En la presente investigación, primeramente, se hizo una revisión bibliográfica sobre las ecuaciones fundamentales del flujo de fluidos: ecuación de continuidad, ecuación de Bernoulli y ecuación de Torricelli. Todas estas ecuaciones se aplicaron para poder determinar la ecuación que relaciona el caudal teórico con el nivel de líquido en un vertedero triangular. Posteriormente se diseñó y construyó cada uno de los componentes que conforman el equipo modular. Por último, se realizaron en el equipo modular, cuatro (4) pruebas para cada vertedero triangular, esto permitió determinar el coeficiente de descarga y la ecuación que relaciona el caudal (ajustado) con el nivel de líquido en cada uno de los tres (3) vertederos triangulares. Por lo tanto, la investigación es del tipo aplicada, con **enfoque cuantitativo**, nivel de profundización **explicativo** y **diseño correlacional**. El esquema del diseño de investigación, se muestra en la figura 9.

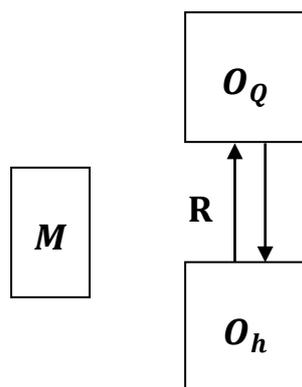


Figura 9. Esquema del diseño de investigación.

Fuente: *Elaboración propia.*

Donde:

O_Q y O_h son las observaciones obtenidas en cada una de las dos variables (Q y h , respectivamente), distintas de la muestra.

h : nivel de líquido (variable independiente).

Q : caudal (variable dependiente).

M : muestra.

R : relación entre las variables.

3.2. Diseño muestral

Se puede realizar múltiples pruebas en el equipo modular, esto indicaría que nuestra población es infinita. Entonces, a criterio de los investigadores, el tipo de muestreo fue el no probabilístico. Se utilizaron tres (3) vertederos triangulares con los siguientes ángulos: $\theta_1 = 30^\circ$, $\theta_2 = 45^\circ$ y $\theta_3 = 60^\circ$. Para cada vertedero se realizaron cuatro (4) pruebas. Entonces el número de total de pruebas fue igual a doce (12), lo cual representa el tamaño total de la muestra (véase las figuras 10 y 16).

Prueba 1.

Ángulo de vertedero $\theta_1 = 30^\circ$, V1 abierta al 100 % y V2 abierta al 100 %.

Prueba 2.

Ángulo de vertedero $\theta_1 = 30^\circ$, V1 abierta al 50 % y V2 abierta al 50 %.

Prueba 3.

Ángulo de vertedero $\theta_1 = 30^\circ$, V1 abierta al 100 % y V2 abierta al 50 %.

Prueba 4.

Ángulo de vertedero $\theta_1 = 30^\circ$, V1 abierta al 100 % y V2 cerrada al 100 %.

Prueba 5.

Ángulo de vertedero $\theta_2 = 45^\circ$, V1 abierta al 100 % y V2 abierta al 100 %.

Prueba 6.

Ángulo de vertedero $\theta_2 = 45^\circ$, V1 abierta al 50 % y V2 abierta al 50 %.

Prueba 7.

Ángulo de vertedero $\theta_2 = 45^\circ$, V1 abierta al 100 % y V2 abierta al 50 %.

Prueba 8.

Ángulo de vertedero $\theta_2 = 45^\circ$, V1 abierta al 100 % y V2 cerrada al 100 %.

Prueba 9.

Ángulo de vertedero $\theta_3 = 60^\circ$, V1 abierta al 100 % y V2 abierta al 100 %.

Prueba 10.

Ángulo de vertedero $\theta_3 = 60^\circ$, V1 abierta al 50 % y V2 abierta al 50 %.

Prueba 11.

Ángulo de vertedero $\theta_3 = 60^\circ$, V1 abierta al 100 % y V2 abierta al 50 %.

Prueba 12.

Ángulo de vertedero $\theta_3 = 60^\circ$, V1 abierta al 100 % y V2 cerrada al 100 %.

3.3. Procedimientos de recolección de datos

El procedimiento de recolección de datos, estuvo basado en la medida del valor del nivel de líquido, el cálculo del caudal teórico y la medición del caudal real, cuando se llevaron a cabo las pruebas con los tres (3) vertederos triangulares en el quipo modular.

Para medir el nivel de líquido en cada uno de los tres (3) vertederos, se utilizó como instrumento una regla graduada de 20 cm.

Para calcular el caudal teórico en cada uno de los tres (3) vertederos, se hizo uso de la ecuación (19), midiendo previamente el nivel de líquido.

Para la medición del caudal real, se utilizó un contador de volumen. Mediante la relación entre volumen y tiempo, se determinó el caudal real.

3.4. Procesamiento y análisis de datos

El procesamiento y análisis de datos, estuvo basado en la regresión de los datos del caudal teórico y el caudal real, mediante lo cual se determinó el coeficiente de descarga y la ecuación que relaciona el caudal (ajustado) con el nivel de líquido en cada uno de los tres (3) vertederos triangulares, para esto se hizo uso del programa Microsoft Excel 2019.

3.5. Aspectos éticos

Como tesistas y egresados de la Facultad de Ingeniería Química (FIQ) de la Universidad Nacional de la Amazonía Peruana (UNAP), declaramos que en nuestro trabajo de investigación no existe plagio de ningún tipo de otro trabajo de tesis, informe, proyecto de investigación o artículo científico. Así mismo, nos comprometemos a respetar la veracidad de los resultados que se obtengan de las doce (12) pruebas a realizarse en el equipo modular.

3.6. Descripción del diseño, construcción e instalación del equipo modular

En la figura 10, se puede observar en detalle, el diseño del equipo modular. Como se puede observar en dicha figura, el equipo modular tiene una serie de componentes, los cuales cumplen una función específica y se detallan a continuación:

3.6.1. Tanque reservorio

La función de este componente, es la de almacenar y recepcionar el agua que sale del canal a través de los vertederos triangulares (véase las figuras 10 y 11).

3.6.2. Línea de distribución

Es el componente más complejo del equipo modular, pues está conformado por otros subcomponentes que se detallan a continuación:

Línea de succión

Está conformado por el tramo AB, el cual consta de una válvula check de 1", tres (3) tramos de tubería recta de 1", un codo de 90° de 1" y una unión universal de 1". Por medio de este tramo la electrobomba succiona el agua del tanque reservorio y la distribuye a través de los tramos BD y C1C2.

Electrobomba

La función principal de este componente, es bombear el agua desde el tanque reservorio (punto A) hasta el canal abierto (punto D) y en algunos casos hacer que el agua retorne al tanque reservorio (punto C2) (véase la figura 10). Otra función de la electrobomba, es mantener el caudal constante en el canal.

Línea de descarga

La función de este componente es transportar el agua desde el punto B hasta el punto D, a través de los tramos BC1 y C1D, los cuales se detallan a continuación:

El tramo BC1, está conformado por tres (3) adaptadores de 1" , cinco (5) tramos de tubería recta de 1" de diámetro, un codo de 90° de 1", dos (2) uniones universales de 1", dos (2) adaptadores de 1", una válvula de compuerta (V1) de 1" y una te de 1" (punto C1).

El tramo C1D, está conformado por cuatro (4) tramos de tubería recta de 1" de diámetro, tres (3) codos de 90° de 1", dos (2) uniones universales de 1" y el contador de volumen (con entrada y salida de 1").

Línea de retorno

Está conformado por el tramo C1C2 y su función principal es hacer que el caudal que produce la electrobomba se distribuya, retornando una parte del agua al tanque reservorio. De esta forma el caudal que entra al canal será menor que el caudal que produce la electrobomba.

La línea de retorno está conformada por una te (punto C1), una reducción de 1 a 1/2", cinco (5) tramos de tubería recta de 1/2" de diámetro, dos (2) adaptadores de 1/2", dos (2) uniones universales de 1/2", una válvula de compuerta (V2) de 1/2" y dos (2) codos de 90° de 1/2".

3.6.3. Canal abierto

Se puede considerar al canal abierto, como el principal componente del equipo modular, pues es aquí donde se instalan los vertederos triangulares para realizar el estudio del caudal en función del nivel de líquido (véase las figuras 10 y 12).

3.6.4. Vertederos triangulares

Sirven para medir el caudal (teórico) de agua en el canal y son colocados a la salida del mismo (véase las figuras 10, 12, 13, 14, 15 y 18).

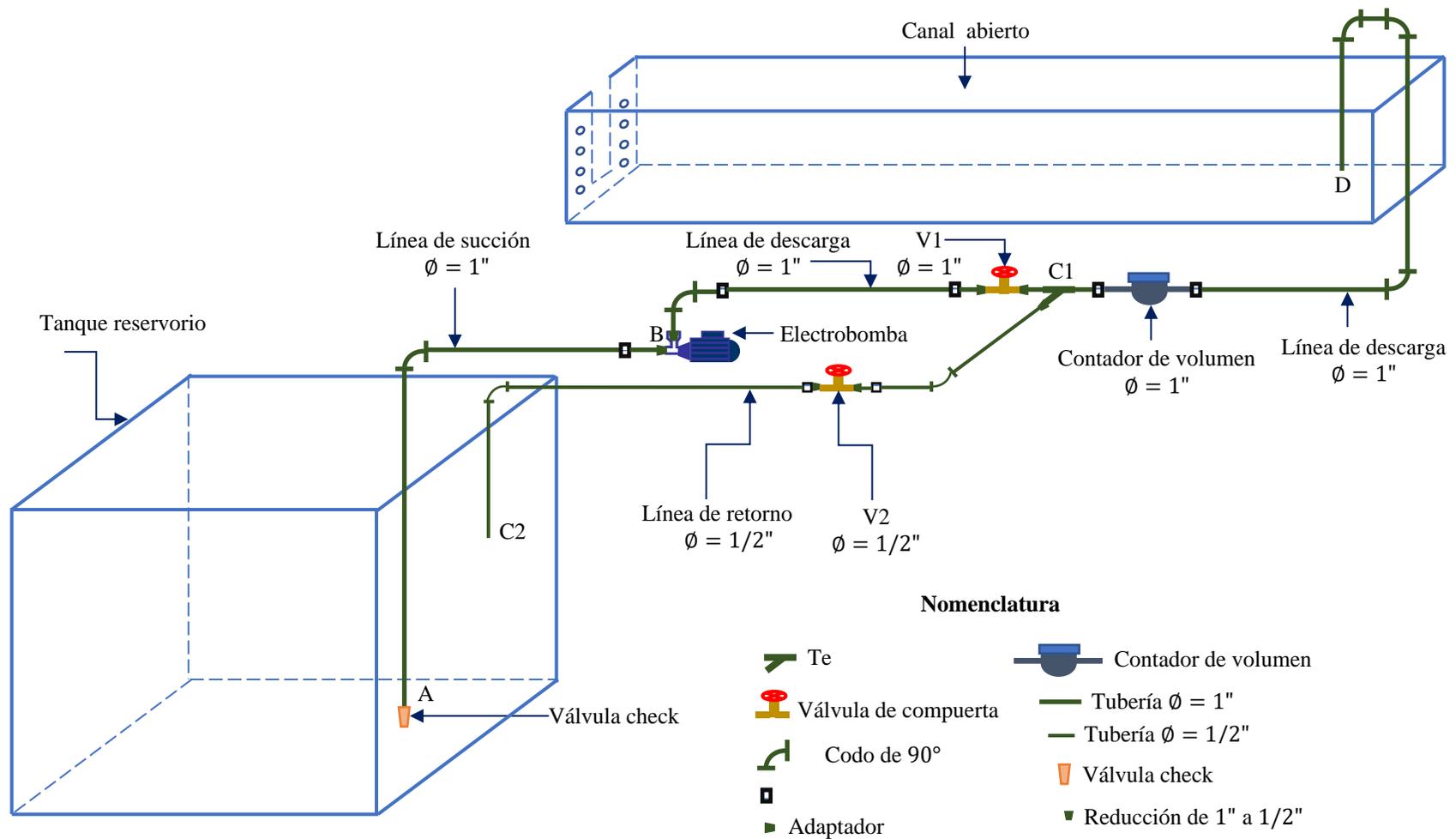


Figura 10. Diseño del equipo modular.

Fuente: Elaboración propia.

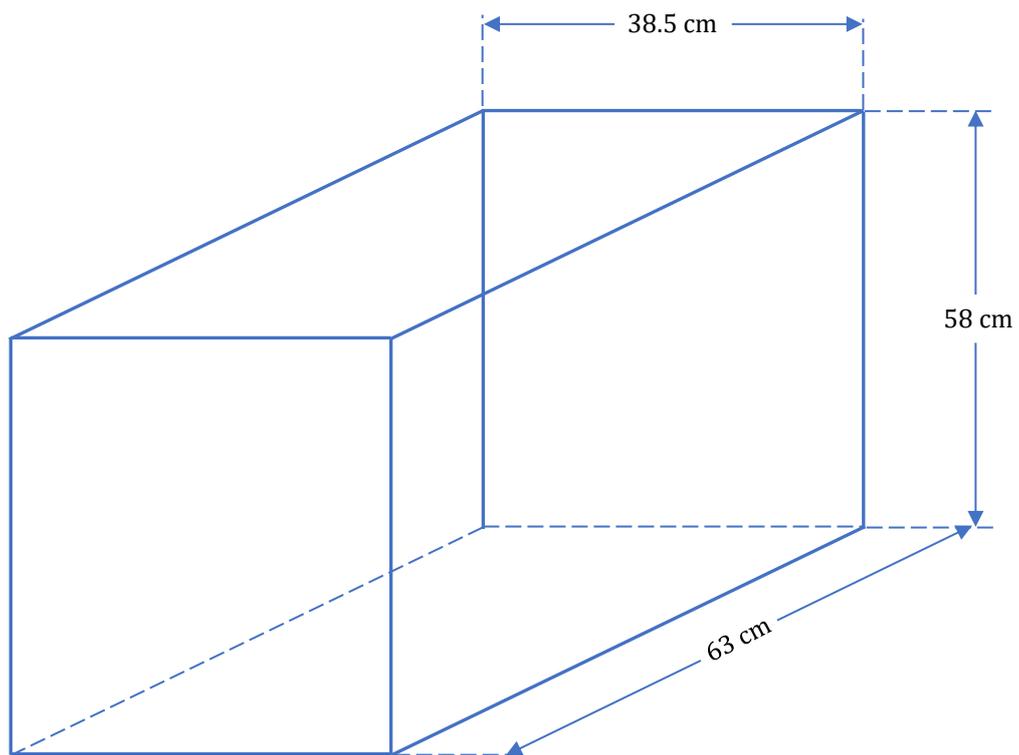


Figura 11. Diseño del tanque reservorio.

Fuente: Elaboración propia.

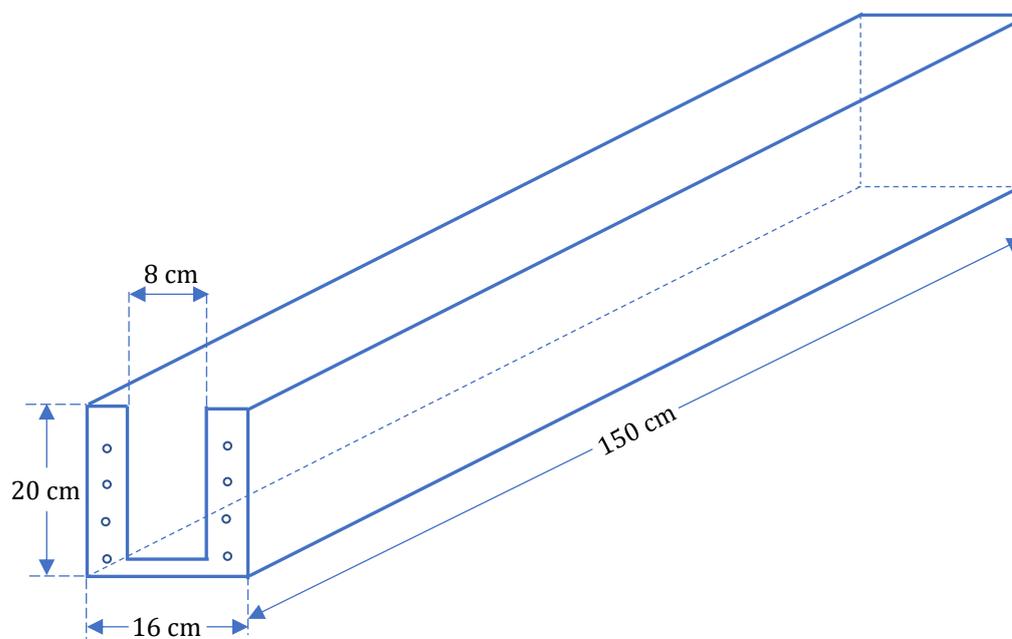


Figura 12. Diseño del canal abierto.

Fuente: Elaboración propia.

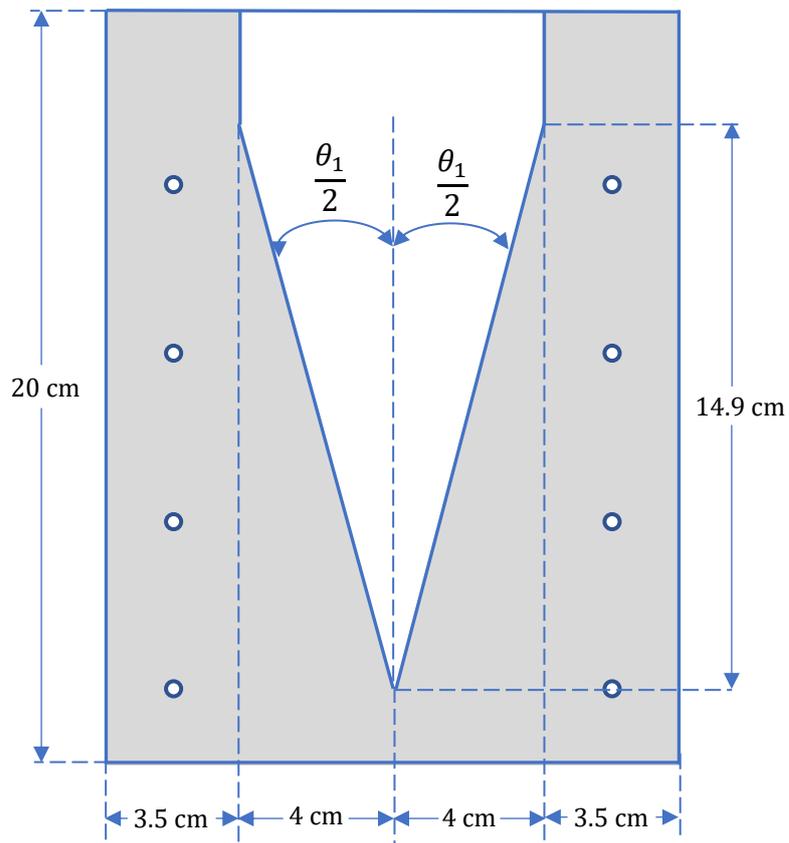


Figura 13. Diseño del vertedero triangular de 30° .

Fuente: Elaboración propia.

$$\frac{\theta_1}{2} = \arctan\left(\frac{4}{14.9}\right) = 15^\circ$$

$$\theta_1 = 30^\circ.$$

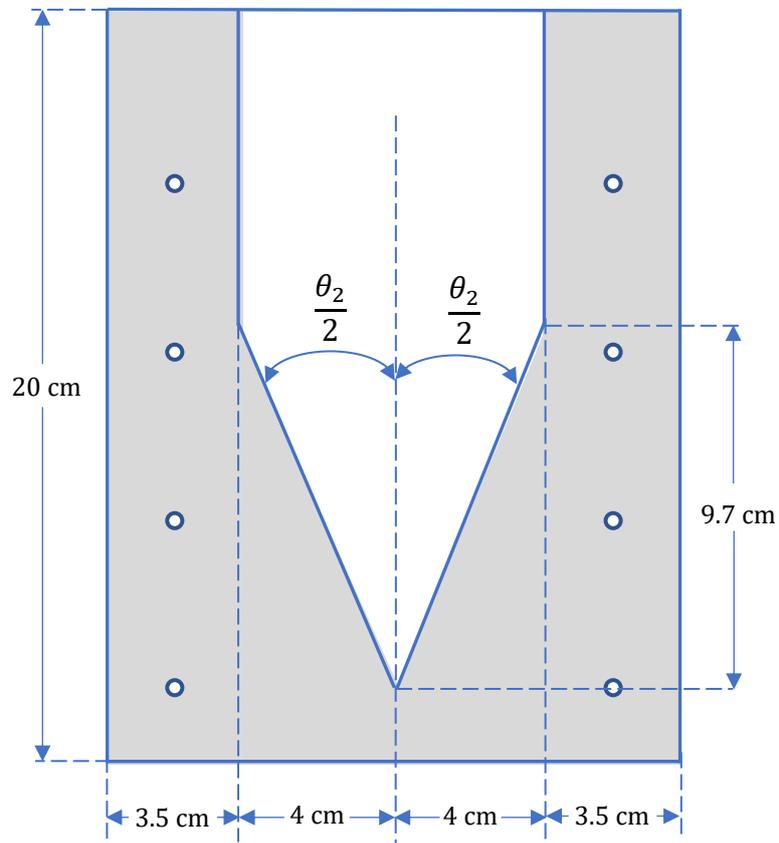


Figura 14. Diseño del vertedero triangular de 45° .

Fuente: Elaboración propia.

$$\frac{\theta_2}{2} = \arctan\left(\frac{4}{9.7}\right) = 22.5^\circ$$

$$\theta_2 = 45^\circ.$$

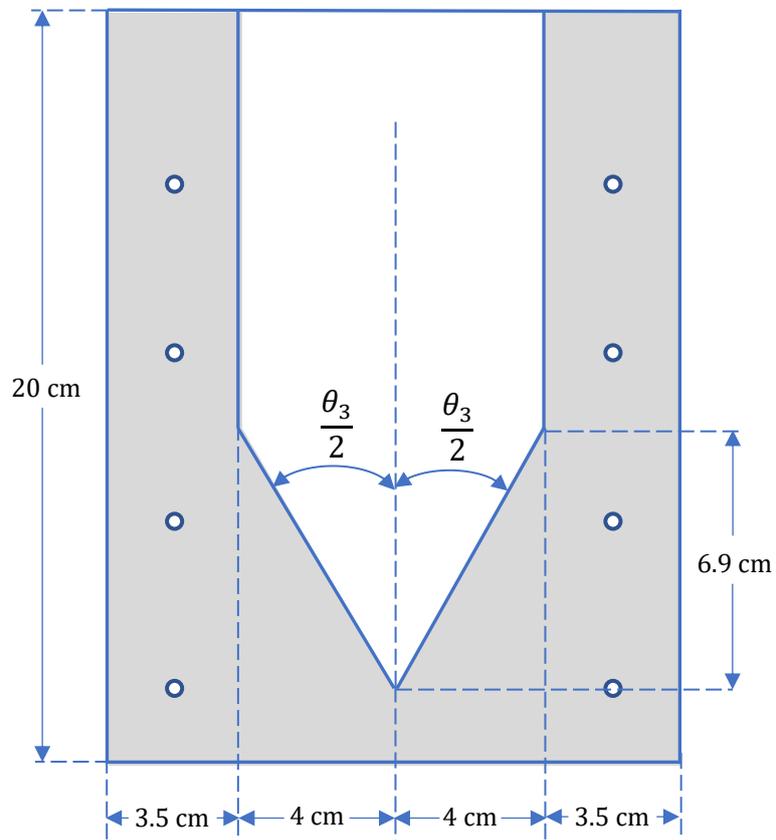


Figura 15. Diseño del vertedero triangular de 60°.

Fuente: Elaboración propia.

$$\frac{\theta_3}{2} = \arctan\left(\frac{4}{6.9}\right) = 30^\circ$$

$$\theta_3 = 60^\circ.$$



Figura 17. Prueba de funcionamiento del equipo modular.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 18. Vertedero triangular de 60° instalado en el canal abierto.

Fuente: Elaboración propia.

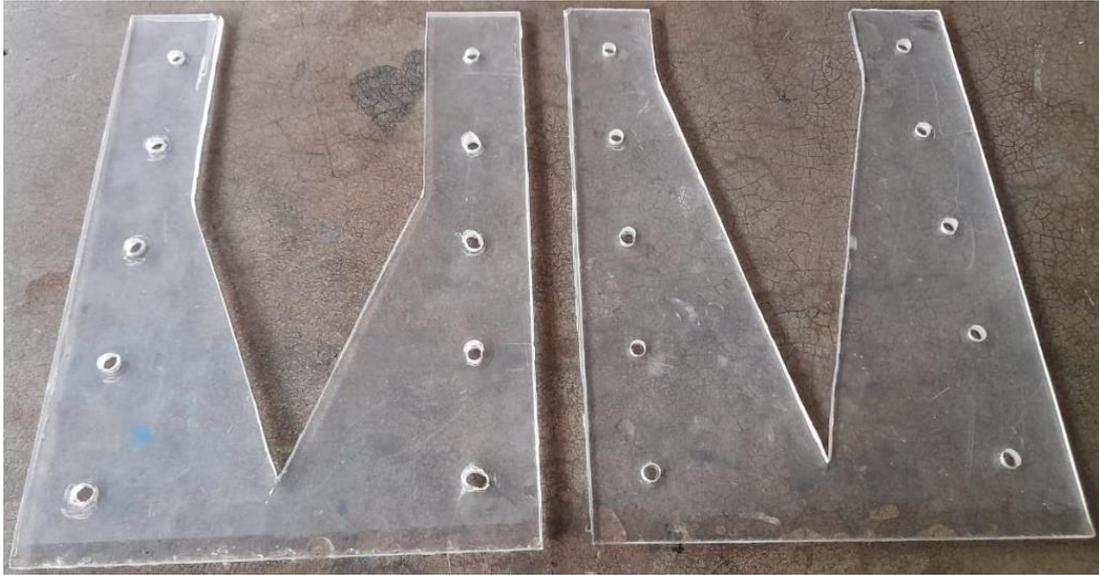


Figura 19. Vertederos triangulares de 45° y 30°.

Fuente: Elaboración propia.

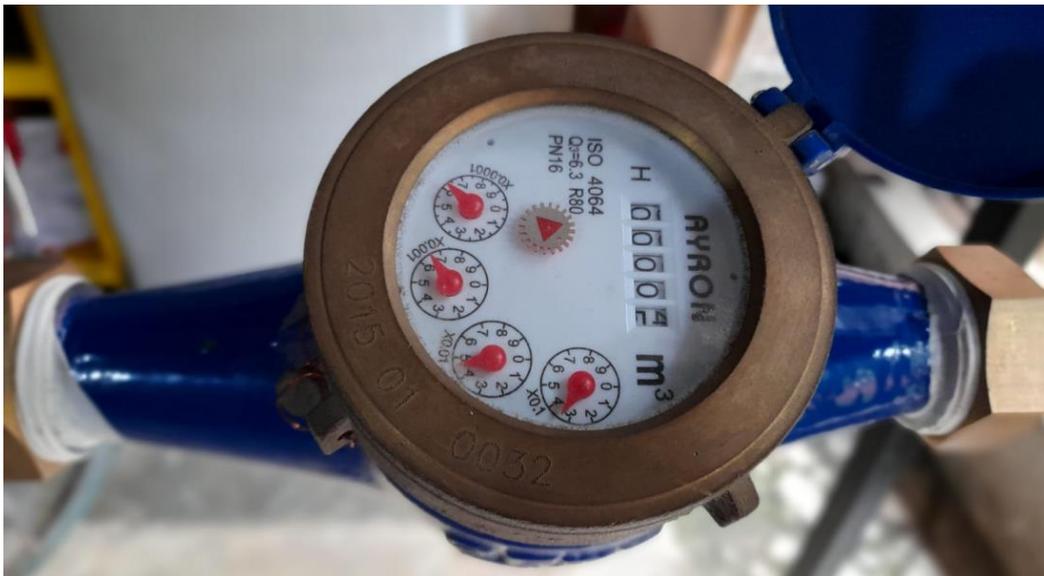


Figura 20. Vista del contador de volumen.

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO IV: RESULTADOS

Tabla 2. Volumen medido en las pruebas con el vertedero triangular de 30°.

	<i>t</i>	<i>V_{MC}</i>
Pruebas	Min	L
1	5	111.5
2	5	125.5
3	5	141.3
4	5	174.0

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3. Resultados de las pruebas realizadas con el vertedero triangular de 30°.

	<i>h</i>		<i>θ₁</i>	<i>g</i>	<i>Q_T</i>		<i>Q_R</i>
Pruebas	cm	m	°	m/s ²	m ³ /s	L/min	L/min
1	6	0.06	30	9.81	0.00056	33.49	22.30
2	6.5	0.065	30		0.00068	40.91	25.09
3	7	0.07	30		0.00082	49.24	28.26
4	7.7	0.077	30		0.00104	62.49	34.80

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 2, se muestra el volumen medido con el contador cuando se realizaron las pruebas con el vertedero triangular de 30° en el equipo modular. Mediante la relación de este volumen con el tiempo, se determinó el caudal real correspondiente.

Por ejemplo, para determinar el valor del caudal real ($Q_R = 22.30$ L/min), se realizó el siguiente cálculo:

$$Q_R = \frac{V_{MC}}{t} = \frac{111.5 \text{ L}}{5 \text{ min}} = 22.30 \text{ L/min.}$$

De esta forma se determinaron los demás valores del caudal real para las demás pruebas que se realizaron con el vertedero triangular de 30° y con los otros dos vertederos triangulares (45° y 60°).

En la tabla 3, se puede observar los resultados de las pruebas realizadas con el vertedero triangular de 30°. Estos resultados indican el valor del caudal teórico y caudal real para un determinado valor del nivel de líquido.

Por ejemplo, para calcular el caudal teórico para un nivel de líquido igual a ($h = 6.5$ cm), se utilizó la ecuación (19), tal como se indica a continuación:

$$Q_T = \frac{8}{15} \sqrt{2g} \cdot \tan(\theta/2) \cdot h^{5/2} = \frac{8}{15} \sqrt{2(9.81)} \cdot \tan(30^\circ/2) \cdot (0.065)^{5/2} = 0.00068 \text{ m}^3/\text{s}.$$

Cabe aclarar que el valor del nivel de líquido en la ecuación (19), se debe reemplazar en m, para que el caudal teórico resulte en m³/s.

De esta manera, también se determinaron los valores del caudal teórico para las demás pruebas que se realizaron con el vertedero triangular de 30° y con los otros dos vertederos triangulares (45° y 60°).

Tabla 4. Datos para obtener el coeficiente de descarga en el vertedero triangular de 30°.

Q_T	Q_R
L/min	L/min
0.00	0.00
33.49	22.30
40.91	25.09
49.24	28.26
62.49	34.80

Fuente: Elaboración propia.

Los datos que se muestran en la tabla 4, se representan gráficamente (véase la figura 21) para luego hacer una regresión lineal y determinar el coeficiente de descarga, el cual representa a la pendiente de la recta. Para este caso el coeficiente de descarga resultó: $C_d = 0.5852$. Entonces, se puede aplicar la ecuación (21) y determinar la ecuación que relaciona el caudal (ajustado) con el nivel de líquido para el vertedero

triangular de 30°, esto es:

$$Q_A = \frac{8}{15} \cdot (0.5852) \sqrt{2(9.81)} \cdot \tan(30^\circ/2) \cdot h^{5/2}$$

$$Q_A = 0.3704h^{5/2}. \quad (22)$$

La ecuación (22), representa a la relación entre el caudal (ajustado) con el nivel de líquido para el vertedero triangular de 30°. Donde h debe estar en m, para obtener Q_A en m^3/s .

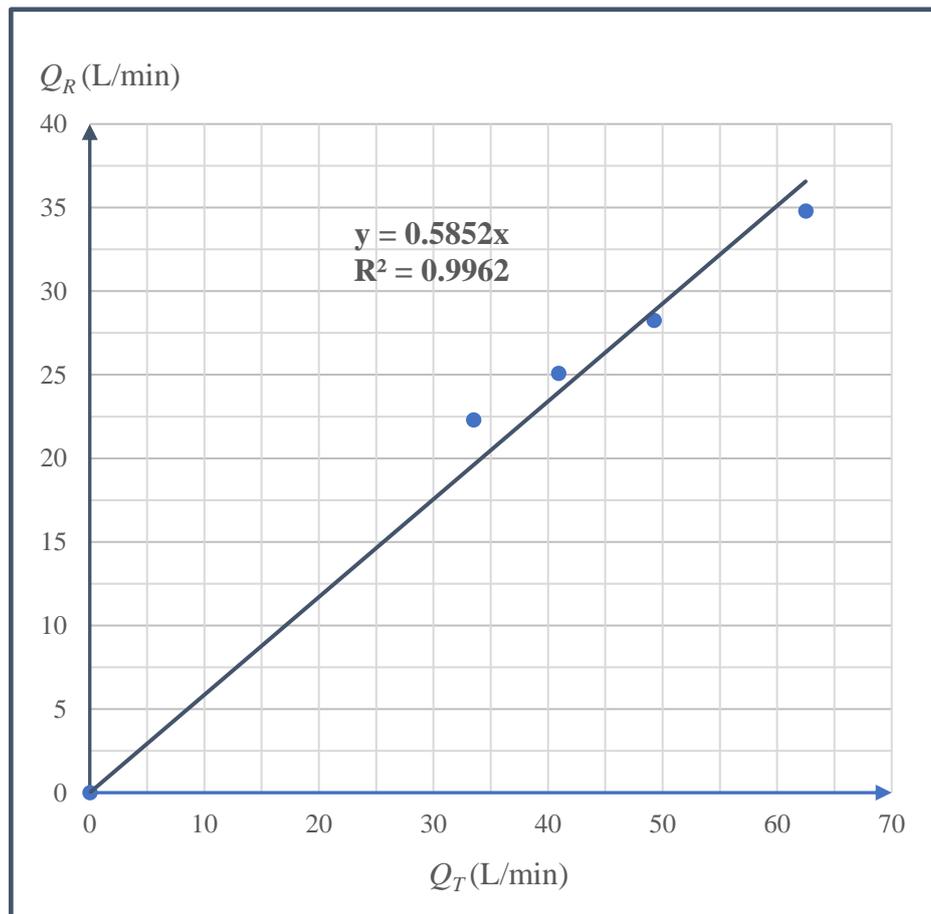


Figura 21. Representación gráfica de Q_R versus Q_T en el vertedero triangular de 30°.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5. Resultados del caudal ajustado en el vertedero triangular de 30°.

<i>h</i>		Q_A		
cm	m	m ³ /s	L/min	% Error
0	0	0.000000	0.00	0.00%
6	0.06	0.000327	19.60	12.12%
6.5	0.065	0.000399	23.94	4.63%
7	0.07	0.000480	28.81	1.95%
7.7	0.077	0.000609	36.56	5.07%
				4.75%

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 5, se muestra los resultados del caudal ajustado para el vertedero triangular de 30°, dichos valores se han obtenido haciendo uso de la ecuación (22). Por ejemplo, para calcular el valor del caudal ajustado, correspondiente al nivel de líquido ($h = 0.065 \text{ m} = 6.5 \text{ cm}$), el cálculo es el siguiente:

$$Q_A = 0.3704h^{5/2} = 0.3704(0.065)^{5/2} = 0.000399 \text{ m}^3/\text{s} = 23.94 \text{ L/min.}$$

De esta forma, también se determinaron los demás valores del caudal ajustado para el vertedero triangular de 30° y de los otros dos vertederos triangulares (45° y 60°).

Tabla 6. Volumen medido en las pruebas con el vertedero triangular de 45°.

	<i>t</i>	V_{MC}
Pruebas	min	L
5	5	122.5
6	5	131.5
7	5	148.0
8	5	172.3

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 7. Resultados de las pruebas realizadas con el vertedero triangular de 45°.

Pruebas	h		θ_2	g	Q_T		Q_R
	cm	m	°	m/s ²	m ³ /s	L/min	L/min
5	5.2	0.052	45	9.81	0.00060	36.20	24.50
6	5.5	0.055	45		0.00069	41.65	26.30
7	6	0.06	45		0.00086	51.77	29.60
8	6.4	0.064	45		0.00101	60.84	34.46

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 8. Datos para obtener el coeficiente de descarga en el vertedero triangular de 45°.

Q_T	Q_R
L/min	L/min
0.00	0.00
36.20	24.50
41.65	26.30
51.77	29.60
60.84	34.46

Fuente: Elaboración propia.

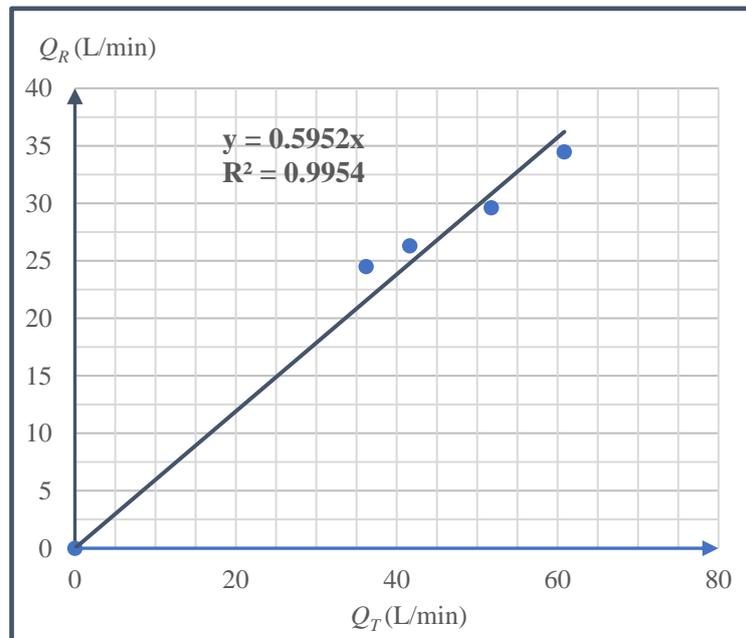


Figura 22. Representación gráfica de Q_R versus Q_T en el vertedero triangular de 45°.

Fuente: Elaboración propia.

Los valores del caudal teórico para un determinado nivel de líquido, que se muestran en la tabla 7, se determinaron haciendo uso de la ecuación (19). Por ejemplo, para determinar el caudal teórico para un nivel de líquido igual a ($h = 5.5$ cm), se realizó el siguiente cálculo:

$$Q_T = \frac{8}{15} \sqrt{2g} \cdot \tan(\theta/2) \cdot h^{5/2} = \frac{8}{15} \sqrt{2(9.81)} \cdot \tan(45^\circ/2) \cdot (0.055)^{5/2} = 0.00069 \text{ m}^3/\text{s}.$$

De la figura 22, se puede observar que la pendiente de la recta $y = 0.5952x$ es $C_d = 0.5952$, lo cual es igual al coeficiente de descarga del vertedero triangular de 45° .

Entonces, de igual manera que para el vertedero triangular de 30° , se hace uso de la ecuación (21) para determinar la ecuación que relaciona el caudal (ajustado) con el nivel de líquido para el vertedero triangular de 45° , esto es:

$$Q_A = \frac{8}{15} \cdot (0.5952) \cdot \sqrt{2(9.81)} \cdot \tan(45^\circ/2) \cdot h^{5/2}$$

$$Q_A = 0.5824h^{5/2}. \tag{23}$$

La ecuación (23), representa a la relación entre el caudal (ajustado) con el nivel de líquido para el vertedero triangular de 45° . Donde h debe estar en m, para obtener Q_A en m^3/s .

Tabla 9. Resultados del caudal ajustado en el vertedero triangular de 45° .

h		Q_A		
cm	m	m^3/s	L/min	% Error
0	0	0.000000	0.00	0.00%
5.2	0.052	0.000359	21.55	12.05%
5.5	0.055	0.000413	24.79	5.74%
6	0.06	0.000514	30.81	4.10%
6.4	0.064	0.000603	36.21	5.08%
				5.39%

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 9, se muestra los resultados del caudal ajustado para el vertedero triangular de 45°, dichos valores se han obtenido haciendo uso de la ecuación (23). Por ejemplo, para calcular el valor del caudal ajustado, correspondiente al nivel de líquido ($h = 0.055 \text{ m} = 5.5 \text{ cm}$), el cálculo es el siguiente:

$$Q_A = 0.5824h^{5/2} = 0.5824(0.055)^{5/2} = 0.000413 \text{ m}^3/\text{s} = 24.79 \text{ L/min.}$$

Tabla 10. Volumen medido en las pruebas con el vertedero triangular de 60°.

	t	V_{MC}
Pruebas	min	L
9	5	142.3
10	5	153.4
11	5	173.6
12	5	190.3

Fuente: Elaboración propia.

i

Tabla 11. Resultados de las pruebas realizadas con el vertedero triangular de 60°.

Pruebas	h		θ_3	g	Q_T		Q_R
	cm	m			°	m/s ²	m ³ /s
9	4.6	0.046	60	9.81	0.00062	37.14	28.46
10	5.2	0.052	60		0.00084	50.46	30.68
11	5.4	0.054	60		0.00092	55.45	34.72
12	6	0.06	60		0.00120	72.16	38.06

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 12. Datos para obtener el coeficiente de descarga en el vertedero triangular de 60°.

Q_T	Q_R
L/min	L/min
0.00	0.00
37.14	28.46
50.46	30.68
55.45	34.72
72.16	38.06

Fuente: Elaboración propia.

Los valores del caudal teórico para un determinado nivel de líquido, que se muestran en la tabla 11, se determinaron haciendo uso de la ecuación (19). Por ejemplo, para determinar el caudal teórico para un nivel de líquido igual a ($h = 5.4$ cm), el cálculo es el siguiente:

$$Q_T = \frac{8}{15} \sqrt{2g} \cdot \tan(\theta/2) \cdot h^{5/2} = \frac{8}{15} \sqrt{2(9.81)} \cdot \tan(60^\circ/2) \cdot (0.054)^{5/2} = 0.00092 \text{ m}^3/\text{s}.$$

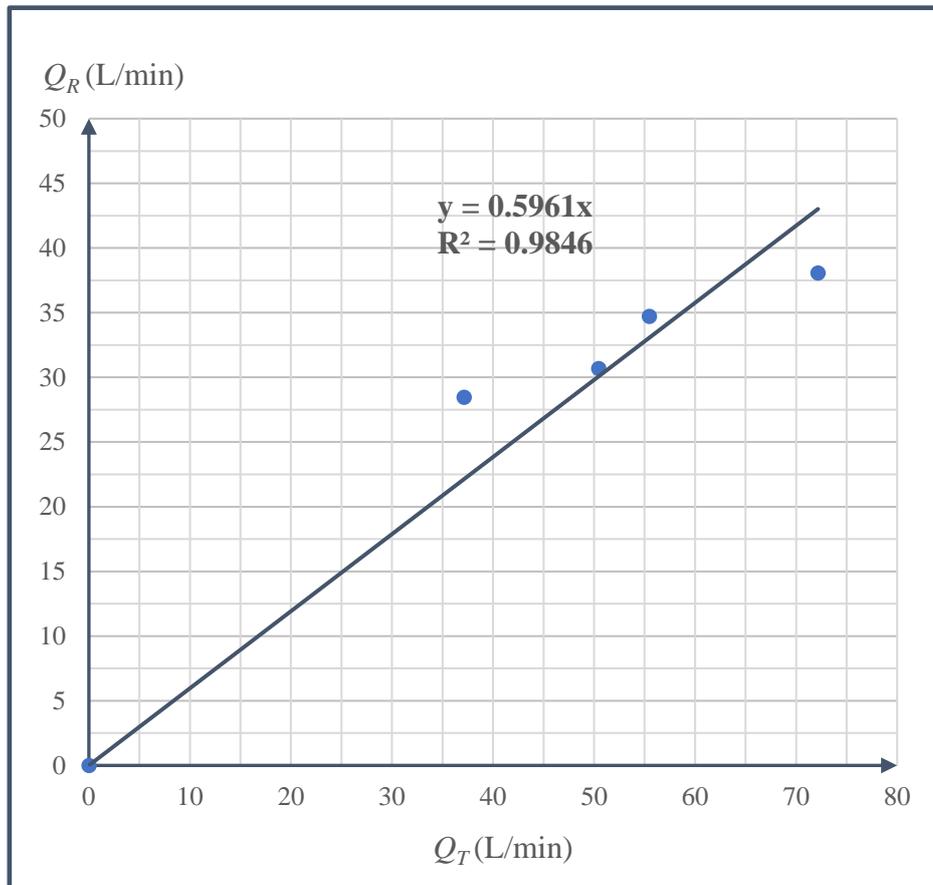


Figura 23. Representación gráfica de Q_R versus Q_T en el vertedero triangular de 60° .

Fuente: Elaboración propia.

La figura 23, es una representación gráfica de los datos que se muestran en la tabla 12. En dicha figura se puede observar que los datos se ajustan a una línea recta, cuya ecuación y pendiente son: $y = 0.5961x$ y 0.5961. Entonces, el coeficiente de descarga del vertedero triangular de 60° es: $C_d = 0.5961$.

Haciendo uso de la ecuación (21) para determinar la ecuación que relaciona el caudal (ajustado) con el nivel de líquido para el vertedero triangular de 60°, esto es:

$$Q_A = \frac{8}{15} \cdot (0.5961) \sqrt{2(9.81)} \cdot \tan(60^\circ/2) \cdot h^{5/2}$$

$$Q_A = 0.813h^{5/2}. \tag{24}$$

La ecuación (24), representa a la relación entre el caudal (ajustado) con el nivel de líquido para el vertedero triangular de 60°. Donde h debe estar en m, para obtener Q_A en m³/s.

Tabla 13. Resultados del caudal ajustado en el vertedero triangular de 60°.

h		Q_A		
cm	m	m ³ /s	L/min	% Error
0	0	0.000000	0.00	0.00%
4.6	0.046	0.000369	22.14	0.00%
5.2	0.052	0.000501	30.08	1.96%
5.4	0.054	0.000551	33.05	4.80%
6	0.06	0.000717	43.01	13.02%
				3.96%

En la tabla 13, se muestra los resultados del caudal ajustado para el vertedero triangular de 60°, dichos valores se han obtenido haciendo uso de la ecuación (23). Por ejemplo, para calcular el valor del caudal ajustado, correspondiente al nivel de líquido ($h = 0.052 \text{ m} = 5.2 \text{ cm}$), el cálculo es el siguiente:

$$Q_A = 0.813h^{5/2} = 0.813(0.052)^{5/2} = 0.000501 \text{ m}^3/\text{s} = 30.08 \text{ L/min.}$$

CAPÍTULO V: DISCUSIÓN

Las tablas 3, 7 y 11, muestran que los mínimos valores del nivel de líquido, que se obtuvieron al realizar las pruebas del equipo modular con los vertederos triangulares de 30°, 45° y 60°, son: 6 cm, 5.2 cm y 4.6 cm, respectivamente.

También las tablas 3, 7 y 11, muestran que los máximos valores del nivel de líquido, que se obtuvieron al realizar las pruebas del equipo modular con los vertederos triangulares de 30°, 45° y 60°, son: 7.7 cm, 6.4 cm y 6 cm, respectivamente.

Las figuras 21, 22 y 23, indican que los datos del caudal real y caudal teórico, para los vertederos triangulares de 30°, 45° y 60°, se ajustan de forma casi perfecta a líneas rectas, estas son:

$$y = 0.5852x, R^2 = 0.9962, \text{ vertedero triangular de } 30^\circ.$$

$$y = 0.5952x, R^2 = 0.9954, \text{ vertedero triangular de } 45^\circ.$$

$$y = 0.5961x, R^2 = 0.9846, \text{ vertedero triangular de } 60^\circ.$$

Donde y representa al caudal ajustado y x al caudal teórico.

También, las figuras 21, 22 y 23, indican que los coeficientes de descarga para los vertederos triangulares de 30°, 45° y 60°, son: 0.5852, 0.5952 y 0.5961, respectivamente. Amado, Chara y López (2020, p. 34) y Mott (2006, p. 464), mencionan que el coeficiente de descarga de vertederos triangulares es aproximadamente igual a 0.6. Esto indica, que los resultados del coeficiente de descarga, que se han obtenido para los vertederos triangulares de 30°, 45° y 60, son correctos.

Las ecuaciones (22), (23) y (24), representan a las relaciones entre el caudal (ajustado) con el nivel de líquido para los vertederos triangulares de 30°, 45° y 60°, respectivamente, estas son: $Q_A = 0.3704h^{5/2}$, $Q_A = 0.5824h^{5/2}$ y $Q_A = 0.813h^{5/2}$. Donde h debe estar en m, para obtener Q_A en m^3/s .

Las tablas 5, 9 y 13, indican que los porcentajes de error promedio para los vertederos triangulares de 30°, 45° y 60°, son: 4.75 %, 5.39 % y 3.96 %.

CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES

- Se ha determinado los coeficientes de descarga para los vertederos triangulares de 30°, 45° y 60°, estos son: 0.5852, 0.5952 y 0.5961, respectivamente.
- Los resultados que se obtuvieron al realizar las doce (12) pruebas en el equipo modular, indican que el nivel de líquido disminuye a medida que aumenta el ángulo del vertedero triangular.
- Los resultados que se obtuvieron al realizar las doce (12) pruebas en el equipo modular, indican que el menor porcentaje de error promedio al medir el caudal en los tres vertederos triangulares, le corresponde al que tiene el ángulo de 60°.
- Se han determinado las ecuaciones que relacionan el caudal en función del nivel de líquido para cada uno de los vertederos triangulares (30°, 45° y 60°), dichas ecuaciones son: $Q_A = 0.3704h^{5/2}$, $Q_A = 0.5824h^{5/2}$ y $Q_A = 0.813h^{5/2}$, respectivamente. Donde h debe estar en m, para obtener Q_A en m³/s. Esto prueba la primera hipótesis específica y a su vez se está cumpliendo con el primer objetivo específico.
- Se ha elaborado una guía de práctica para el equipo modular, la cual se utilizará como material didáctico en el dictado del curso de mecánica de fluidos en la Facultad de Ingeniería Química (FIQ) de la Universidad Nacional de la Amazonía Peruana (UNAP). De esta forma se prueba la segunda hipótesis específica y a su vez se está cumpliendo con el segundo objetivo específico.
- En las doce (12) pruebas que se realizaron en el equipo modular, se ha podido observar en forma detallada como se utilizan los vertederos triangulares para medir el flujo (caudal) en canales abiertos. De esta manera, se concluye el presente trabajo de tesis, en el cual se ha diseñado, construido e instalado un equipo modular para estudiar el caudal en función del nivel de líquido en vertederos triangulares; probando de esta forma cada una de las hipótesis específicas y la hipótesis general y al mismo tiempo se está cumpliendo con cada uno de los objetivos específicos y el objetivo general.

CAPÍTULO VII: RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar otros estudios en el equipo modular, utilizando el vertedero triangular de 90° y vertederos de otras geometrías como los rectangulares, trapezoidales y semicirculares.
- Se recomienda utilizar los valores del coeficiente de descarga 0.5852, 0.5952 y 0.5961, respectivamente para los vertederos triangulares de 30° , 45° y 60° .
- Para determinar el caudal ajustado en los vertederos triangulares de 30° , 45° y 60° , se recomienda utilizar las siguientes ecuaciones: $Q_A = 0.3704h^{5/2}$, $Q_A = 0.5824h^{5/2}$ y $Q_A = 0.813h^{5/2}$, respectivamente.
- Se recomienda instalar al equipo modular una electrobomba de mayor potencia, de esta forma se podría trabajar con un mayor rango de caudal y realizar más pruebas con cada vertedero.
- Se recomienda que cuando se instale el equipo modular en el Laboratorio de Operaciones y Procesos Unitarios de la Facultad de Ingeniería Química (FIQ) de la Universidad Nacional de la Amazonía Peruana (UNAP), se debe tener un tomacorriente que sea específicamente para la electrobomba, el cual debe estar muy cerca a esta.
- Se recomienda leer la guía de práctica del equipo modular, de esta forma se podrá conocer en detalle a cada uno de sus componentes.
- Se recomienda fomentar que estos tipos de trabajos, se sigan realizando entre los alumnos, egresados y docentes de la Facultad de Ingeniería Química (FIQ) de la Universidad Nacional de la Amazonía Peruana (UNAP), ya sea como trabajos de tesis o proyectos de investigación, pues de esta de esta forma se estaría contribuyendo a la implementación del Laboratorio de Operaciones y Procesos Unitarios de la mencionada facultad y haciendo posible de esta manera que los estudiantes de los últimos años puedan realizar prácticas del curso de mecánica de fluidos.

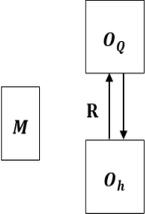
CAPÍTULO VIII: FUENTES DE INFORMACIÓN

- ALEGRÍA, Junior y COK, Michael. “Diseño, construcción e instalación de un sistema de medición de flujo en canal abierto con placas intercambiables, para el Laboratorio de Procesos y Operaciones Unitarias de la Facultad de Ingeniería Química (FIQ) de la Universidad Nacional de la Amazonía Peruana (UNAP)”. Tesis para optar el título de ingeniero químico. Iquitos, Perú: Universidad Nacional de la Amazonía Peruana, Facultad de Ingeniería Química, 2015. xiii pp.
- AMADO Jineth, CHARA, Maira y LÓPEZ, Breiner. “Calibración de los sistemas de aforo del banco de tuberías de la Universidad Cooperativa de Colombia”. Villavicencio, Colombia: Universidad Cooperativa de Colombia, Facultad de Ingenierías, Programa de Ingeniería Civil, 2020. 34 p.
- ÁVILA, Álvaro. “Análisis y diseño de estructuras hidráulicas de control móviles, tanques repartidores de caudal y tanques rompe presión”. Trabajo de investigación previo a la obtención del título de ingeniero civil. Cuenca, Ecuador: Universidad Católica de Cuenca; Unidad Académica de Ingeniería, Industria y Construcción; Carrera de Ingeniería Civil, 2019. pp. xiii, 77.
- FELDER, Richard y ROUSSEAU, Ronald. Principios elementales de los procesos químicos. 3a. ed. México: Limusa Wiley, 2004. 47 p.
ISBN: 968-18-6169-8.
- FLORES, David; LÓPEZ, Rossmery y MENÉNDEZ, Karen. “Diseño, construcción e instalación de un equipo para el control automático del drenaje de líquidos en tanques cónicos”. Tesis para optar el título de ingeniero químico. Iquitos, Perú: Universidad Nacional de la Amazonía Peruana, Facultad de Ingeniería Química, 2015. 3 p.
- GARCÍA, Ronnie y NAVARRO, Víctor. “Diseño, construcción e instalación de un sistema de flujo para el control automático del drenaje de líquidos”. Tesis para optar el título de ingeniero químico. Iquitos, Perú: Universidad Nacional de la Amazonía Peruana, Facultad de Ingeniería Química, 2015. pp. 1-2.

- LUX, Manuel. “Medidores de flujo en canales abiertos”. Trabajo de graduación presentado a la Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Civil, 2010. pp. 5, 12-13.
- MOTT, Robert L. Mecánica de fluidos. 6a. ed. México: Pearson Educación, S.A, de C.V., 2006. pp. 154, 156-157, 167-168, 179, 462-464.
ISBN: 970-26-0805-8.
- POTTER, Merle y WIGGERT, David. Mecánica de fluidos. 3a. ed. México: Thomson Editores, S.A, de C.V., 2002. pp. 435-437
ISBN: 970-686-205-6.
- LEAÑO, Milagros. “Diseño de vertederos hidráulicos triangulares, rectangulares y combinados en el entorno rural del sector Quives, km 40 Lima – Canta, año 2021”. Tesis para optar el título de Ingeniera Civil. Lima, Perú: Universidad Privada del Norte, Facultad de Ingeniería, Carrera de Ingeniería Civil, 2021. pp. 15, 53-54, 170-187.
- RIOJAS, Claudia. “Análisis del coeficiente de descarga para diferente carga hidráulica en dos vertederos de pared gruesa tipo cimacio del río Chonta Cajamarca”. Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Civil. Lima, Perú: Universidad Privada del Norte, Facultad de Ingeniería, Carrera de Ingeniería Civil, 2018. pp. xvi, 121-133.
- SALAZAR, Eduardo y CEDILLO, Manuel. “Validación Computacional de Vertederos Rectangulares y Triangulares para generar un Modelo Nuevo Triangular Asimétrico que facilitaría la medición de las Cargas en Estructuras Hidráulicas”. Proyecto de Investigación y desarrollo previa a la obtención del Grado de Magister en Métodos Matemáticos y Simulación Numérica en Ingeniería. Cuenca, Ecuador: Universidad Politécnica Salesiana, Unidad de Postgrados, Maestría en Métodos Matemáticos y Simulación Numérica en Ingeniería, 2017. pp. vii, 31-56.

ANEXOS

Anexo 1. Matriz de consistencia.

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	INDICADORES	METODOLOGÍA
<p>Problema general</p> <p>¿Es posible construir e instalar un equipo modular para estudiar el caudal en función del nivel de líquido en vertederos triangulares?</p> <p>Problemas específicos</p> <ul style="list-style-type: none"> • ¿Es posible determinar una ecuación que relaciona el caudal en función del nivel de líquido en vertederos triangulares? • ¿Es posible elaborar una guía de práctica para el equipo modular? 	<p>Objetivo general</p> <p>Construir e instalar un equipo modular para estudiar el caudal en función del nivel de líquido en vertederos triangulares.</p> <p>Objetivos específicos</p> <ul style="list-style-type: none"> • Determinar una ecuación que relaciona el caudal en función del nivel de líquido en vertederos triangulares. • Elaborar una guía de práctica para el equipo modular. 	<p>Hipótesis general</p> <p>Sí, es posible construir e instalar un equipo modular para estudiar el caudal en función del nivel de líquido en vertederos triangulares.</p> <p>Hipótesis específicas</p> <ul style="list-style-type: none"> • Sí, es posible determinar una ecuación que relaciona el caudal en función del nivel de líquido en vertederos triangulares. • Sí, es posible elaborar una guía de práctica para el equipo modular. 	<p>Variable independiente</p> <p>h: nivel de líquido</p>	<p>cm</p> <p>m</p>	<p>Tipo de investigación</p> <p>La presente investigación es del tipo aplicada, con enfoque cuantitativo, nivel de profundización explicativo y diseño correlacional.</p>  <p>Figura 9. Esquema del diseño de investigación.</p> <p>Población</p> <p>Lo representan las múltiples pruebas que se pueden hacer en el equipo modular.</p> <p>Muestra</p> <p>El tamaño de muestra es igual a las doce (12) pruebas que se realizaron en el equipo modular.</p>
			<p>Variable dependiente</p> <p>Q: caudal</p>	<p>m^3/s</p> <p>$\frac{L}{min}$</p> <p>$\frac{L}{s}$</p>	

Anexo 2. Especificaciones técnicas de los componentes principales del equipo modular.

Tanque reservorio

Material: vidrio.

Ancho: 38.5 cm.

Largo: 63 cm

Profundidad: 58 cm.

Espesor: 5 mm.

Canal abierto

Material: acrílico.

Ancho: 16 cm.

Largo: 150 cm

Profundidad: 20 cm.

Espesor: 4 mm.

Vertederos triangulares

Material: acrílico.

Ancho: 15 cm.

Alto: 20 cm

Espesor: 4 mm.

Electrobomba

Marca: Leo.

Voltaje: 220 V.

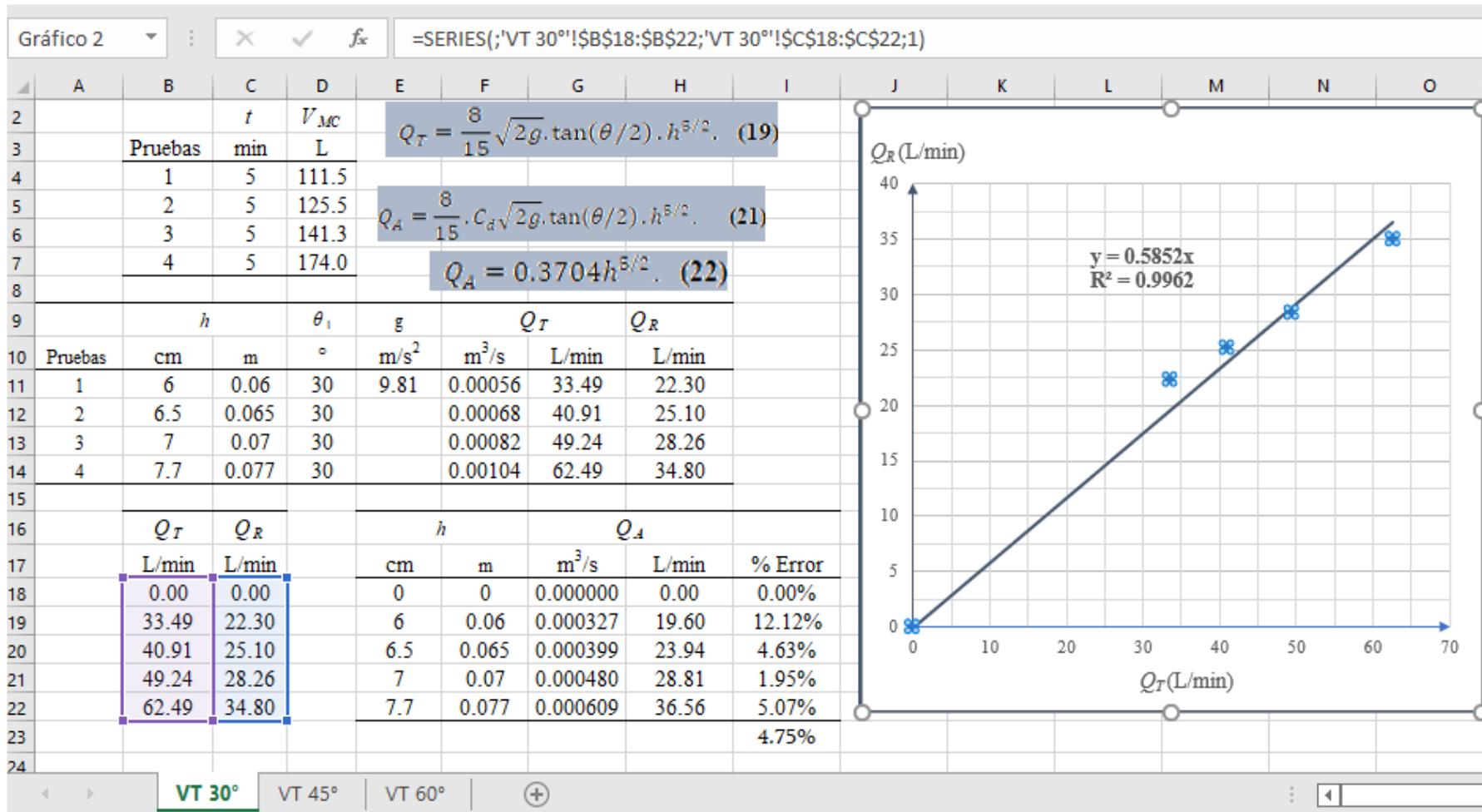
Potencia: 0.37 kW.

Caudal: 5 – 35 L/min.

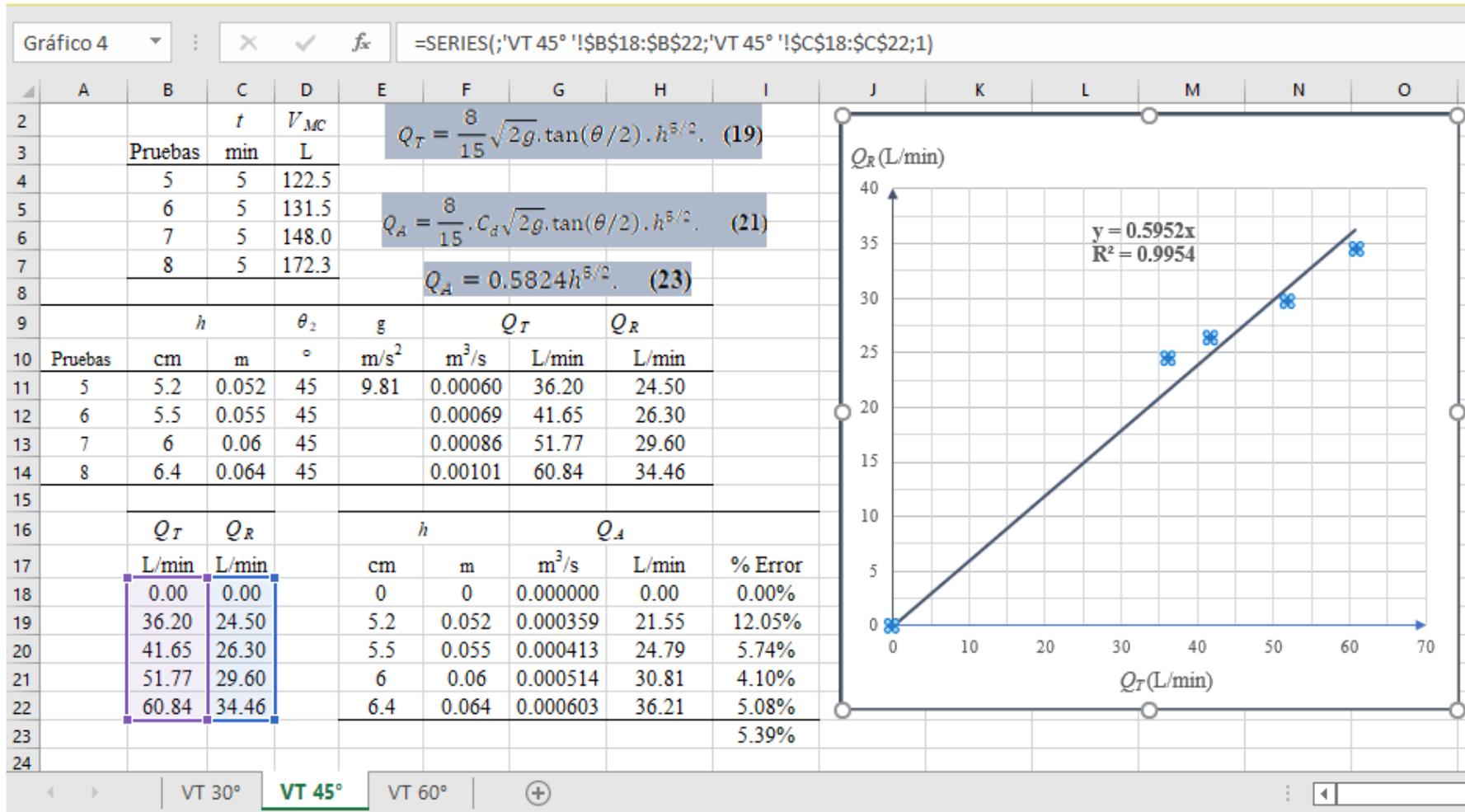
Altura dinámica: 5 – 40 m.

Frecuencia: 60 Hz.

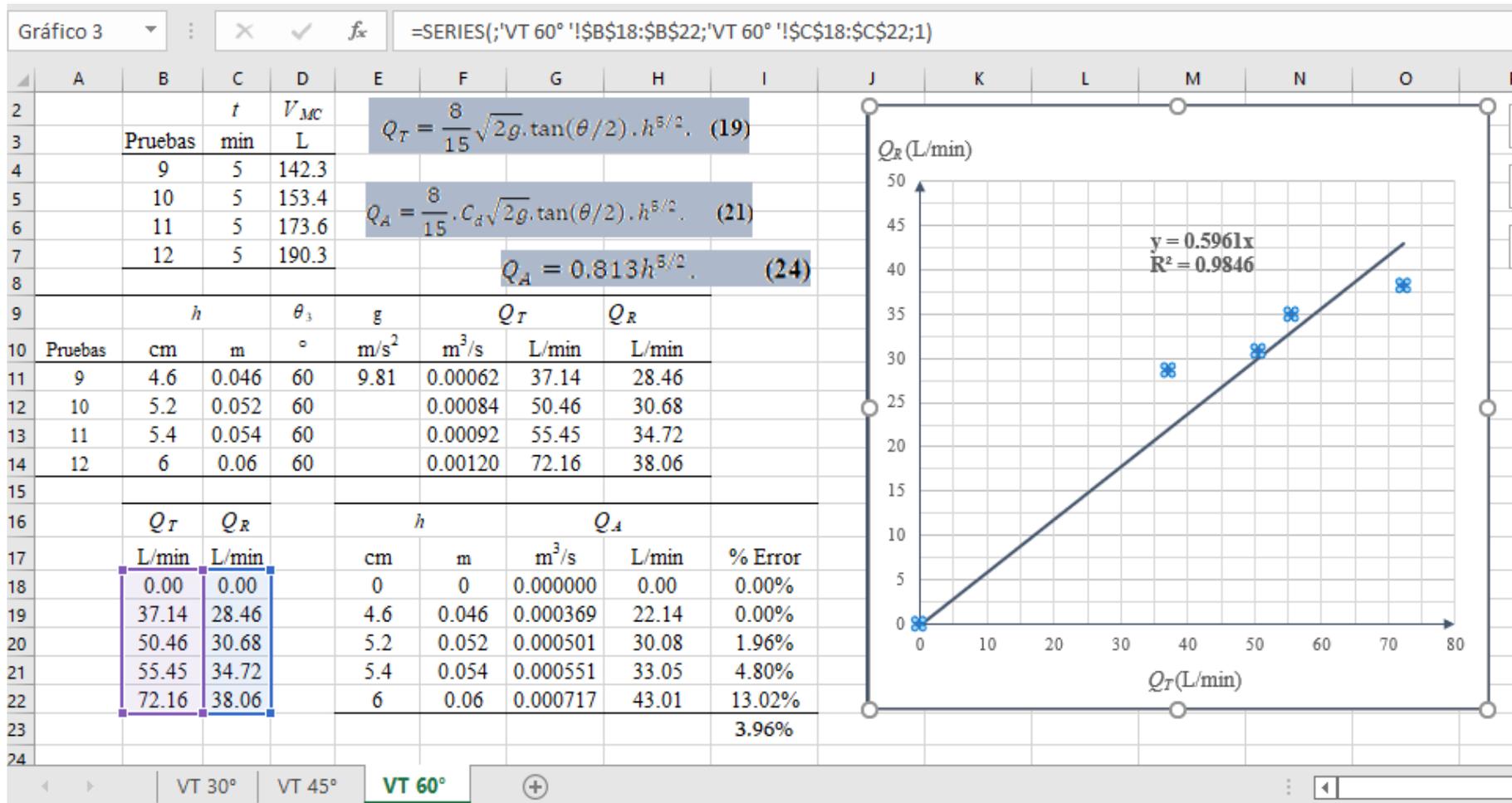
Anexo 3. Hoja de cálculo para el vertedero triangular de 30°.



Anexo 4. Hoja de cálculo para el vertedero triangular de 45°.



Anexo 5. Hoja de cálculo para el vertedero triangular de 60°.



Anexo 6. Guía de práctica del equipo modular.

**ESTUDIO DEL CAUDAL EN FUNCIÓN DEL NIVEL DE LÍQUIDO EN
VERTEDEROS TRIANGULARES**

1. FUNDAMENTO TEÓRICO

1.1. Medición de flujo en canales abiertos

Un canal abierto es aquel cuya superficie superior está abierta a la atmósfera, algunos ejemplos son las corrientes naturales, los drenajes parcialmente llenos y los sistemas de tratamiento de aguas residuales (Mott, 2006, p. 462; Potter y Wiggert, 2002, p. 435). Los dispositivos que se utilizan para medir el flujo en canales abiertos son los vertederos, estos dispositivos hacen que el área de la corriente cambie, lo que a su vez modifica el nivel de la superficie de fluido. El nivel que resulta, relativo a alguna característica del vertedero se relaciona con el caudal (Mott, 2006, p. 462).

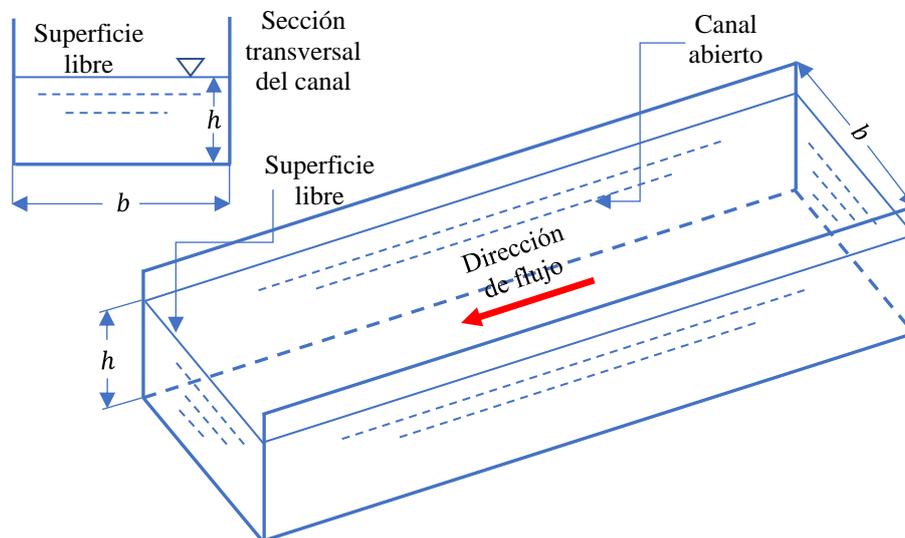


Figura 1. Movimiento de un fluido en un canal abierto.

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 1 se puede observar un canal abierto cuya superficie transversal a la dirección de flujo es rectangular. El ancho y el nivel de líquido en dicho canal son b y h , respectivamente.

1.2. Vertederos

Un vertedero es una barrera de forma especial que se instala en un canal abierto, a través de la cual el fluido pasa como chorro libre al otro lado de ella (Mott, 2006, p. 462; Potter y Wiggert, 2002, p. 435). La figura 2, muestra la vista lateral de un vertedero con cresta afilada. La superficie superior de la base se corta con ángulo agudo en el lado de aguas abajo para asegurar que el fluido salte como chorro libre.

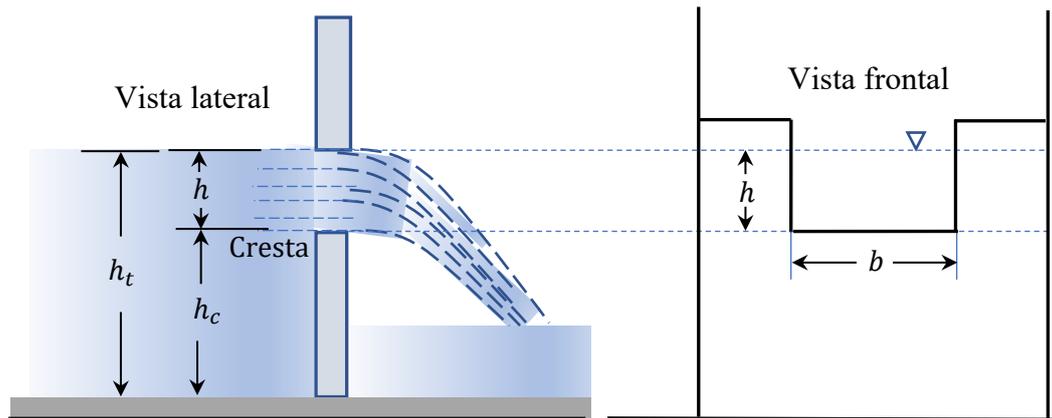


Figura 2. Vista lateral y frontal de un vertedero con cresta afilada.

Fuente: Elaboración propia; Mott, 2006, p. 462; Leño 2021, p. 53.

Los términos h , h_c y h_t , representan la altura del fluido sobre la cresta, la altura de la cresta sobre fondo del canal y la altura del fluido sobre el fondo del canal, respectivamente.

Según Lux (2010, p. 5), los vertederos pueden ser definidos como simples aberturas, sobre los cuales un líquido fluye y son utilizados intensiva y satisfactoriamente en la medición del caudal de pequeños cursos de agua y conductos libres, así como en el control del flujo en canales, razón por la cual su estudio es de gran importancia.

Algunas de las ventajas de los vertederos en la medición del caudal de agua son:

- La construcción de la estructura es sencilla.
- No son obstruidos por materiales que flotan en el agua.
- La duración del dispositivo es relativamente larga.

1.3. Vertedero triangular

El vertedero triangular es aquel que tiene una ranura en forma de V, la cual produce un valor de h más grande que otros vertederos. El ángulo de la ranura en V es un factor en la ecuación de descarga, los ángulos más comúnmente usados son los de 30° , 45° , 60° y 90° (Mott, 2006, p. 464; Potter y Wiggert, 2002, p. 437). En la figura 3, se muestra una vista frontal de un vertedero triangular, donde θ es el ángulo de la ranura en forma de V.

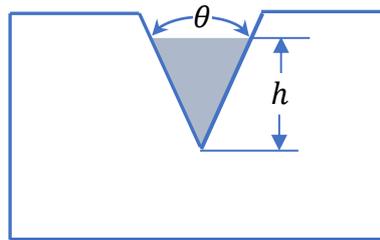


Figura 3. Vista frontal de un vertedero triangular.

Fuente: Elaboración propia; Mott, 2006, p. 463; Leño 2021, p. 54.

1.4. Deducción de la fórmula para calcular el caudal teórico en un vertedero triangular

Para deducir la fórmula para calcular el caudal teórico en un vertedero triangular, se aplica la ecuación de Bernoulli entre los puntos 1 y 2 de la figura 4.

$$\frac{p_1}{\gamma} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\gamma} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g}.$$

Considerando que la presión entre los puntos 1 y 2, es igual a presión atmosférica y que la carga de velocidad en el punto 1 es aproximadamente igual a cero, entonces la ecuación de Bernoulli queda:

$$z_1 = z_2 + \frac{v_2^2}{2g} \Rightarrow \frac{v_2^2}{2g} = z_1 - z_2 = z.$$

$$v_2 = \sqrt{2gz}. \quad (1)$$

Aplicando la ecuación de continuidad al elemento diferencial de la figura 4, cuya área es $x \cdot dz$, se tiene:

$$dQ_T = v_2 \cdot x \cdot dz. \quad (2)$$

Reemplazando la ecuación (1) en la ecuación (2), se obtiene:

$$dQ_T = \sqrt{2gz} \cdot x \cdot dz. \quad (3)$$

Por definición de la tangente de un ángulo, se tiene:

$$\tan(\theta/2) = \frac{x}{2(h-z)}. \quad (4)$$

Despejando x de la ecuación (4) y reemplazando en la ecuación (3), se obtiene:

$$dQ_T = 2(h-z) \cdot \tan(\theta/2) \cdot \sqrt{2gz} dz. \quad (5)$$

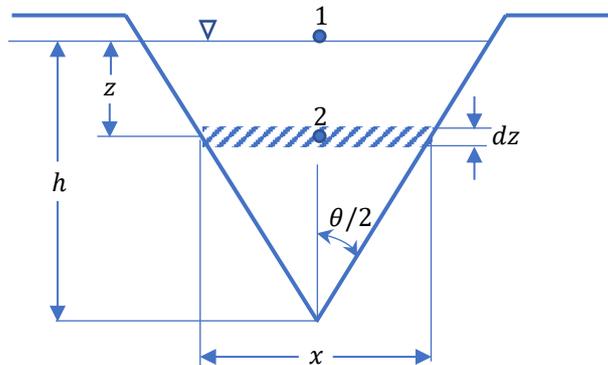


Figura 4. Vertedero triangular de pared delgada.

Fuente: Elaboración propia; Lux 2010, p. 12.

Integrando la ecuación (5):

$$\int dQ_T = 2\sqrt{2g} \cdot \tan(\theta/2) \cdot \int_0^h (h-z)z^{1/2} dz$$

$$Q_T = 2\sqrt{2g} \cdot \tan(\theta/2) \cdot \int_0^h (h \cdot z^{1/2} - z^{3/2}) dz = 2\sqrt{2g} \cdot \tan(\theta/2) \cdot \left(\frac{2h \cdot z^{3/2}}{3} - \frac{2}{5} z^{5/2} \right) \Big|_0^h$$

$$Q_T = 2\sqrt{2g} \cdot \tan(\theta/2) \cdot \left(\frac{2h^{5/2}}{3} - \frac{2}{5} h^{5/2} \right) = 2\sqrt{2g} \cdot \tan(\theta/2) \cdot \left(\frac{4}{15} h^{5/2} \right)$$

$$Q_T = \frac{8}{15} \sqrt{2g} \cdot \tan(\theta/2) \cdot h^{5/2}. \quad (6)$$

Donde Q_T es el caudal teórico del líquido que fluye a través del vertedero triangular en m^3/s , h es el nivel de líquido en el vertedero triangular en m, θ es el ángulo de dicho vertedero y g es la aceleración de la gravedad cuyo valor es 9.81 m/s^2 .

1.5. Definición de términos básicos

1.5.1. Caudal teórico

Es el volumen teórico que fluye a través del vertedero triangular por unidad de tiempo. Se denota como Q_T y sus unidades son: L/s, L/min, m^3/s , etc. (Mott, 2006, pp. 154, 462-463; Potter y Wiggert, 2002, p. 437; Felder y Rousseau, 2004, p. 47).

1.5.2. Nivel de líquido

Es la altura del fluido sobre la cresta del vertedero triangular, se representa como h y sus unidades son: cm, m, etc. (Mott, 2006, p. 462; Potter y Wiggert, 2002, p. 437).

1.5.3. Ángulo del vertedero triangular

Es el ángulo de la ranura en forma de V (véase la figura 3), se simboliza como θ y se mide en grados sexagesimales (Mott, 2006, p. 462; Lux 2010, p. 12).

1.5.4. Coeficiente de descarga

Relaciona el caudal real con el caudal teórico a través del vertedero triangular, su notación es C_d (Potter y Wiggert, 2002, p. 436-437).

1.5.5. Caudal real

Es el volumen real que fluye a través del vertedero triangular por unidad de tiempo. Se denota como Q_R y sus unidades son: L/s, L/min, m^3/s , etc. (Mott, 2006, p. 462; Lux 2010, p. 13).

El caudal ajustado (Q_A), se relaciona con el caudal teórico (Q_T) y el coeficiente de descarga (C_d), mediante la siguiente ecuación:

$$Q_A = C_d \cdot Q_T. \quad (7)$$

La representación gráfica del caudal real versus el caudal teórico, se muestra en la figura 5.

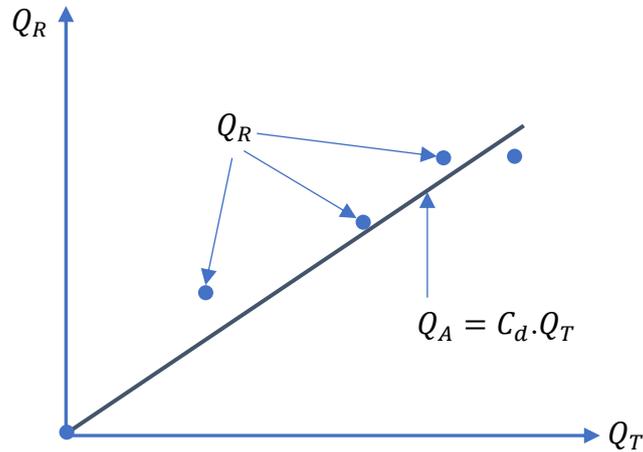


Figura 5. Representación gráfica del caudal real versus el caudal teórico.

Fuente: Elaboración propia.

La figura 5, indica que los puntos dispersos están formados por los valores del caudal teórico (Q_T) con el caudal real (Q_R) y están próximos a una línea recta, la cual tiene como pendiente al coeficiente de descarga (C_d). Los puntos de la línea recta están formados por los valores del caudal teórico (Q_T) con el caudal ajustado Q_A .

Entonces, la ecuación que relaciona el caudal ajustado (Q_A) con el nivel de líquido (h), en cada uno de los tres (3) vertederos triangulares, queda:

$$Q_A = \frac{8}{15} \cdot C_d \sqrt{2g} \cdot \tan(\theta/2) \cdot h^{5/2}. \quad (8)$$

3.7. Descripción de los componentes principales del equipo modular

En la figura 6, se puede observar en detalle, el diseño del equipo modular. Como se puede observar en dicha figura, el equipo modular tiene una serie de componentes, los cuales cumplen una función específica.

3.7.1. Tanque reservorio

La función de este componente, es la de almacenar y recepcionar el agua que sale del canal a través de los vertederos triangulares (véase las figuras 6 y 7).

3.7.2. Línea de distribución

Es el componente más complejo del equipo modular, pues está conformado por otros subcomponentes que se detallan a continuación:

Línea de succión

Está conformado por el tramo AB, el cual consta de una válvula check de 1", tres (3) tramos de tubería recta de 1", un codo de 90° y una unión universal. Por medio de este tramo la electrobomba succiona el agua del tanque reservorio y la distribuye a través de los tramos BD y C1C2.

Electrobomba

La función principal de este componente, es bombear el agua desde el tanque reservorio (punto A) hasta el canal abierto (punto D) y en algunos casos hacer que el agua retorne al tanque reservorio (punto C2) (véase la figura 6).

Otra función de la electrobomba, es mantener el caudal constante en el canal.

Línea de descarga

La función de este componente es transportar el agua desde el punto B hasta el punto D, a través de los tramos BC1 y C1D, los cuales se detallan a continuación:

El tramo BC1, está conformado por tres (3) adaptadores de 1" , cinco (5) tramos de tubería recta de 1" de diámetro, un codo de 90° de 1", dos (2) uniones universales de 1", dos (2) adaptadores de 1", una válvula de compuerta (V1) de 1" y una te de 1" (punto C1).

El tramo C1D, está conformado por cuatro (4) tramos de tubería recta de 1" de diámetro, tres (3) codos de 90° de 1", dos (2) uniones universales de 1" y el contador de volumen (con entrada y salida de 1").

Línea de retorno

Está conformado por el tramo C1C2 y su función principal es hacer que el caudal que produce la electrobomba se distribuya, retornando una parte del agua al tanque reservorio. De esta forma el caudal que entra al canal será menor que el caudal que produce la electrobomba.

La línea de retorno está conformada por una te (punto C1), una reducción de 1 a 1/2", cinco (5) tramos de tubería recta de 1/2" de diámetro, dos (2) adaptadores de 1/2", dos (2) uniones universales de 1/2", una válvula de compuerta (V2) de 1/2" y dos (2) codos de 90° de 1/2".

3.7.3. Canal abierto

Se puede considerar al canal abierto, como el principal componente del equipo modular, pues es aquí donde se instalan los vertederos triangulares para realizar el estudio del caudal en función del nivel de líquido (véase la figura 8).

3.7.4. Vertederos triangulares

Sirven para medir el caudal (teórico) de agua en el canal y son colocados a la salida del mismo (véase las figuras 9, 10, 11, 13 y 14).

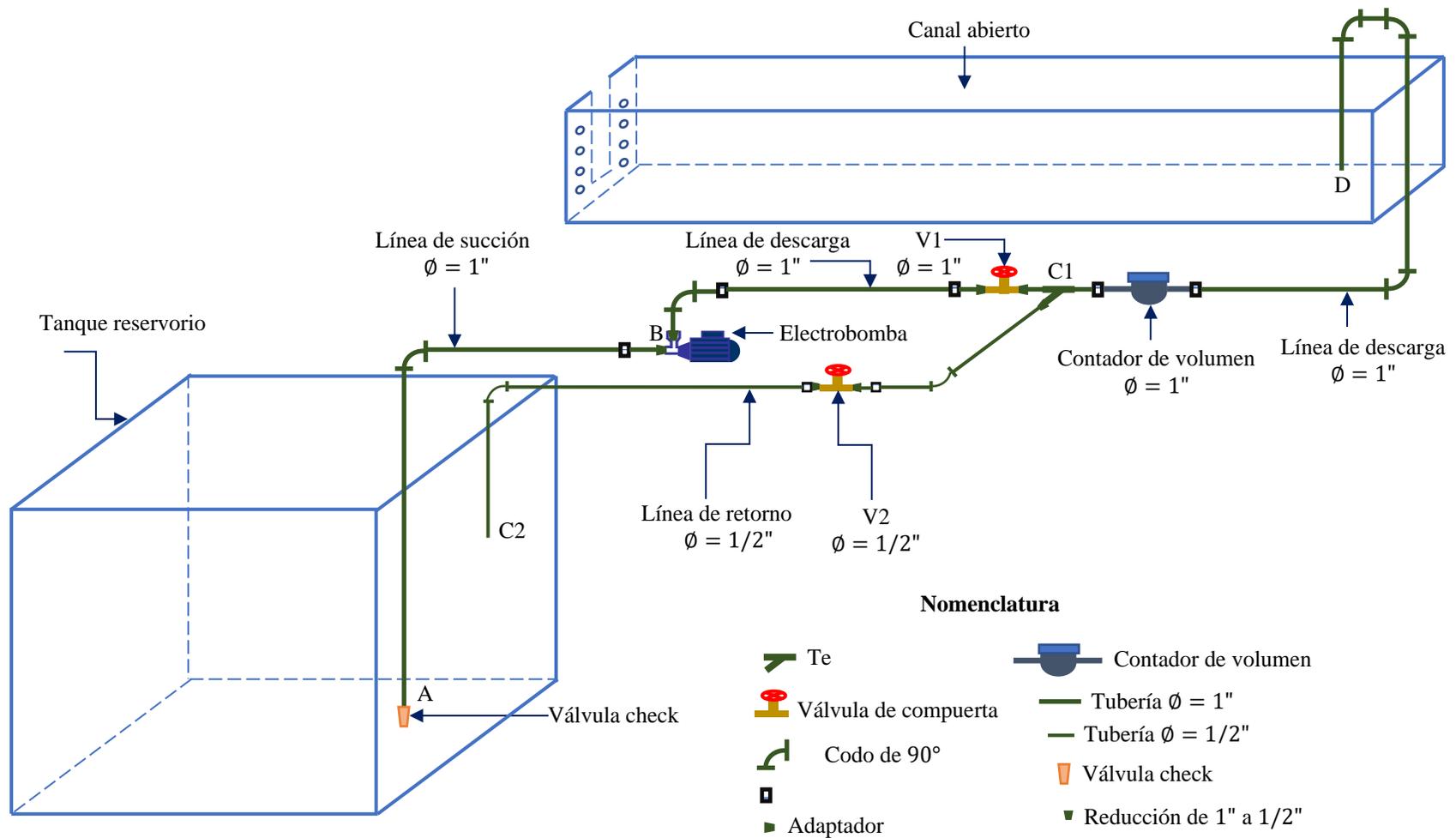


Figura 6. Diseño del equipo modular.

Fuente: Elaboración propia.

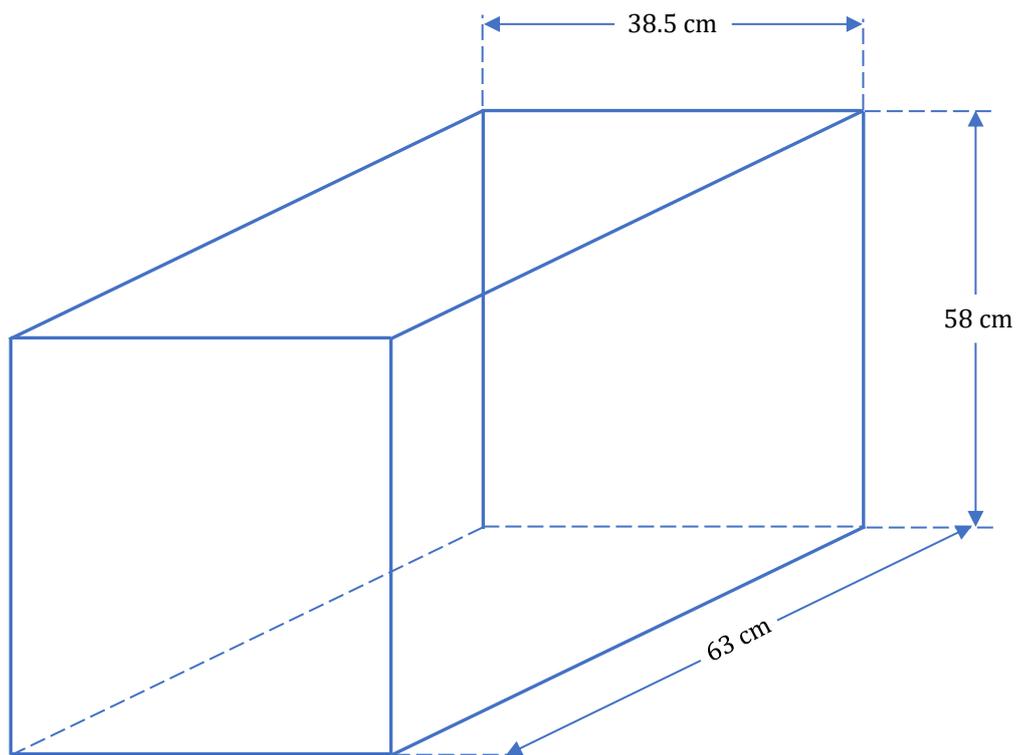


Figura 7. Diseño del tanque reservorio.

Fuente: Elaboración propia.

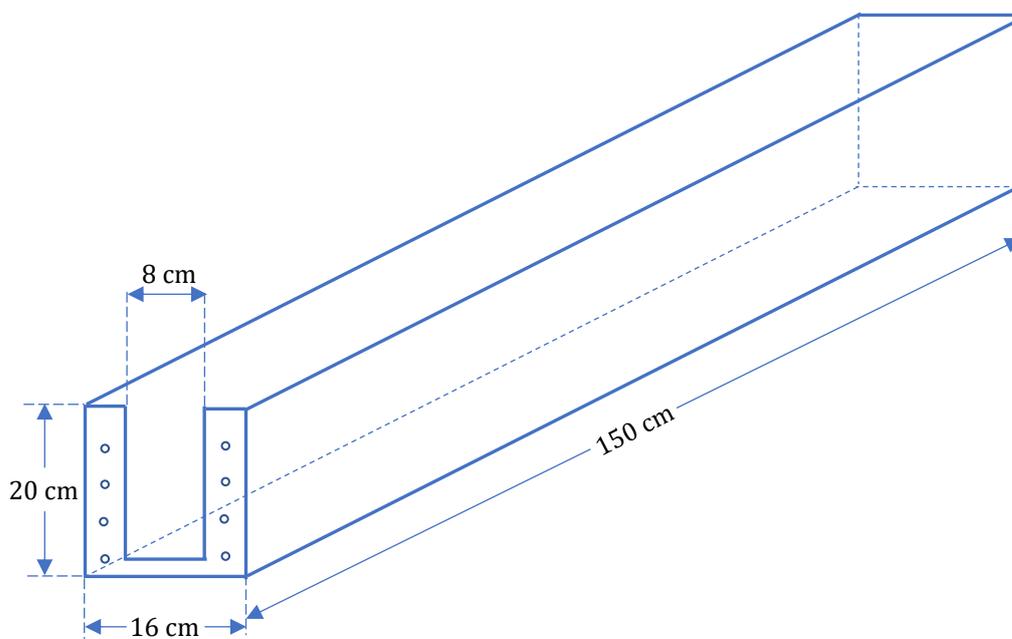


Figura 8. Diseño del canal abierto.

Fuente: Elaboración propia.

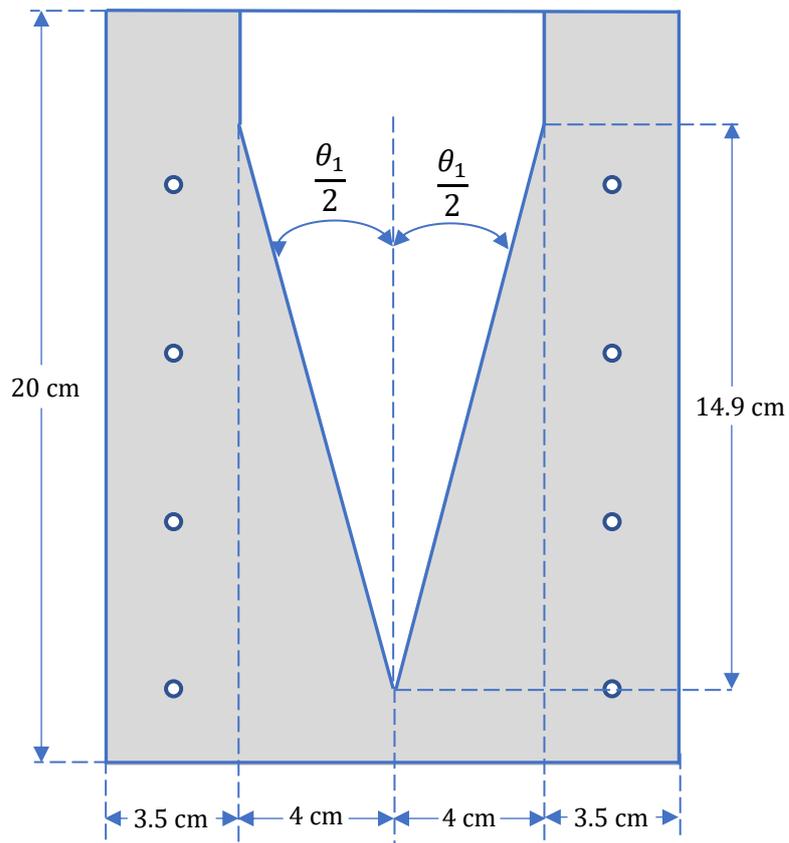


Figura 9. Diseño del vertedero triangular de 30° .

Fuente: Elaboración propia.

$$\frac{\theta_1}{2} = \arctan\left(\frac{4}{14.9}\right) = 15^\circ$$

$$\theta_1 = 30^\circ.$$

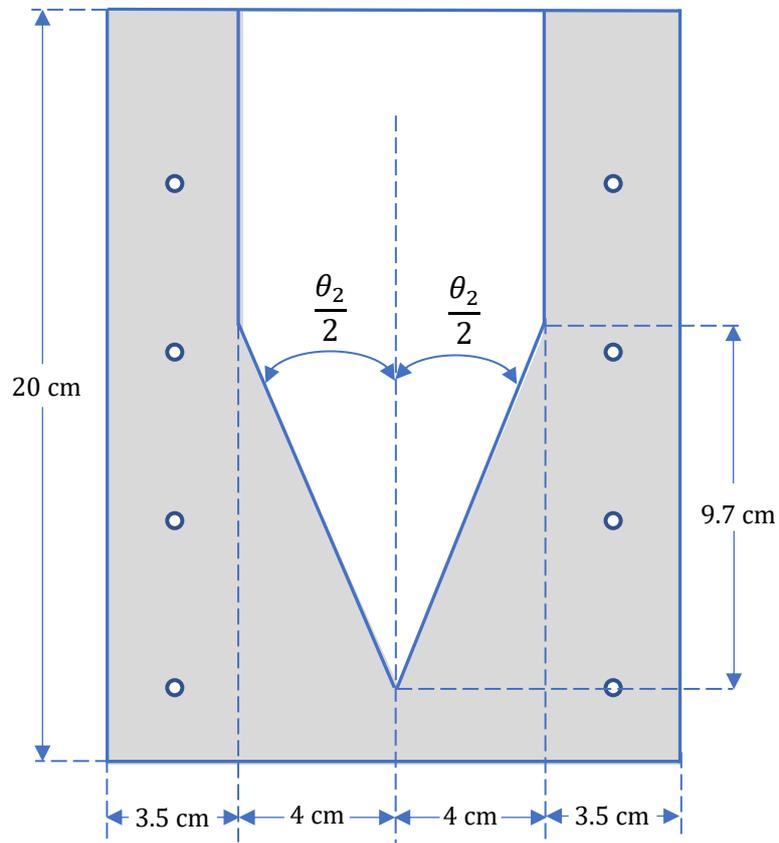


Figura 10. Diseño del vertedero triangular de 45° .

Fuente: Elaboración propia.

$$\frac{\theta_2}{2} = \arctan\left(\frac{4}{9.7}\right) = 22.5^\circ$$

$$\theta_2 = 45^\circ.$$

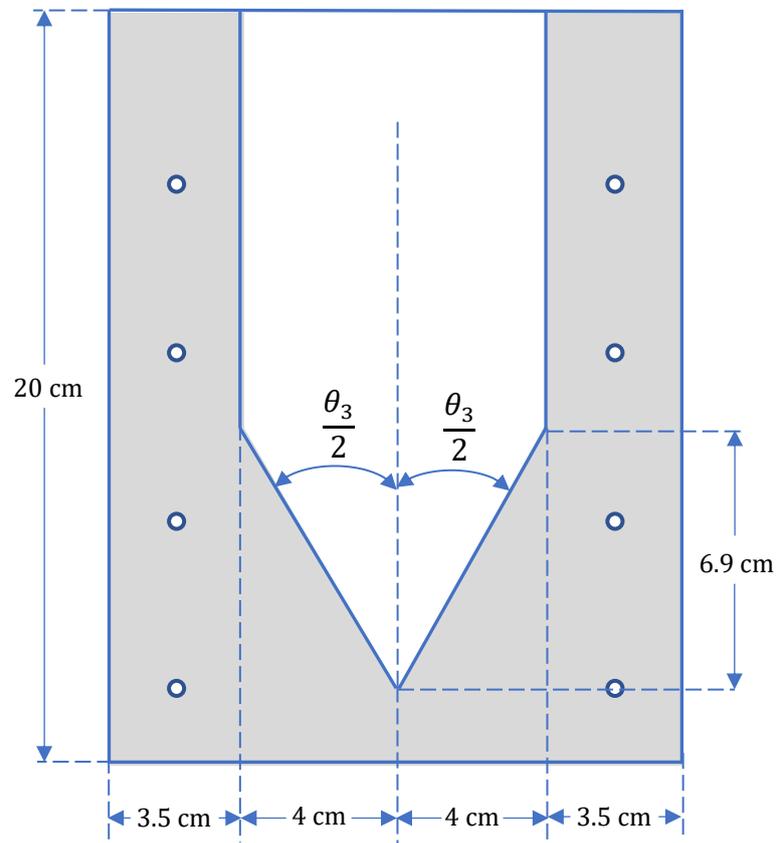


Figura 11. Diseño del vertedero triangular de 60° .

Fuente: Elaboración propia.

$$\frac{\theta_3}{2} = \arctan\left(\frac{4}{6.9}\right) = 30^\circ$$

$$\theta_3 = 60^\circ.$$

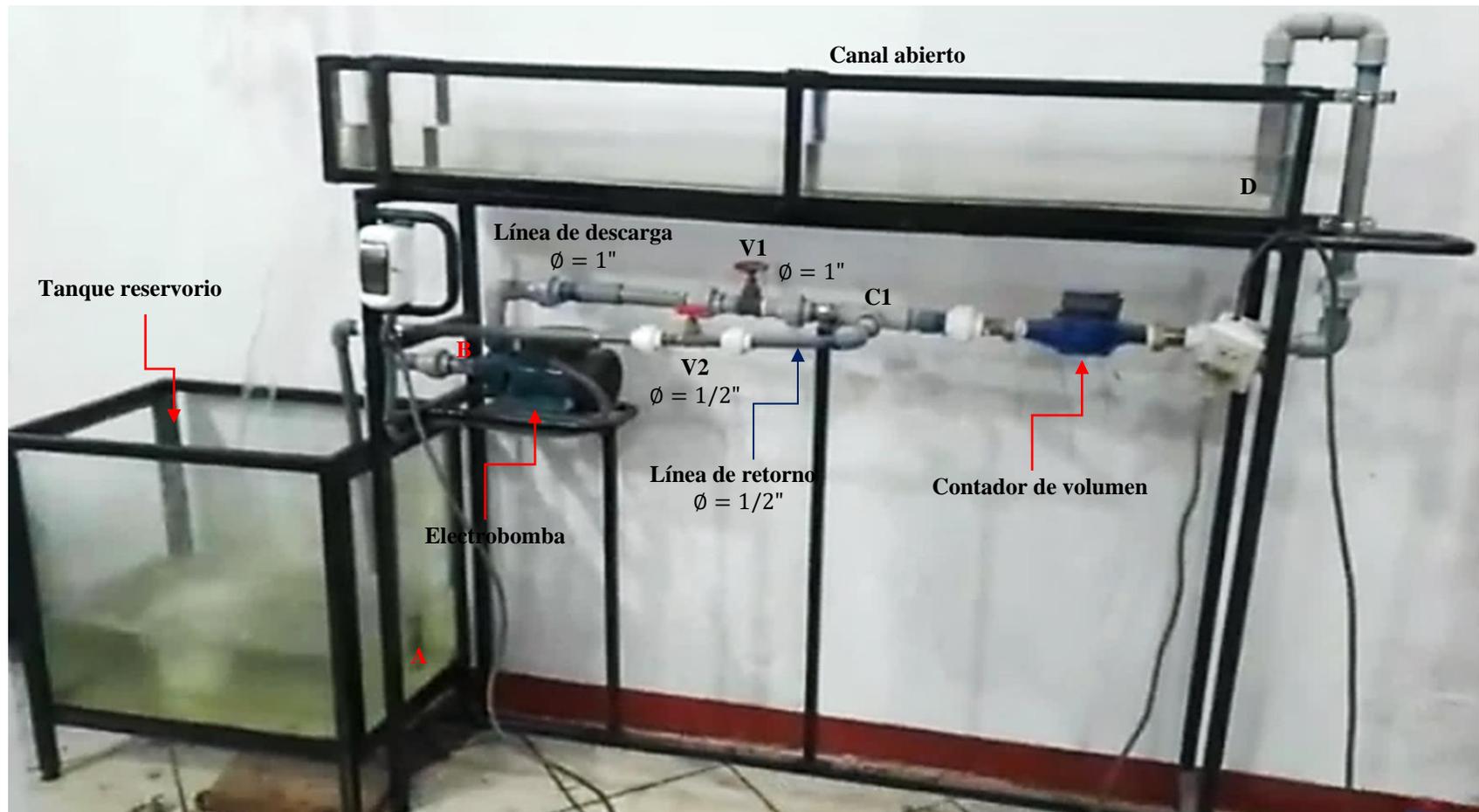


Figura 12. Equipo modular construido e instalado.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 13. Vertedero triangular de 60° instalado en el canal abierto.

Fuente: Elaboración propia.

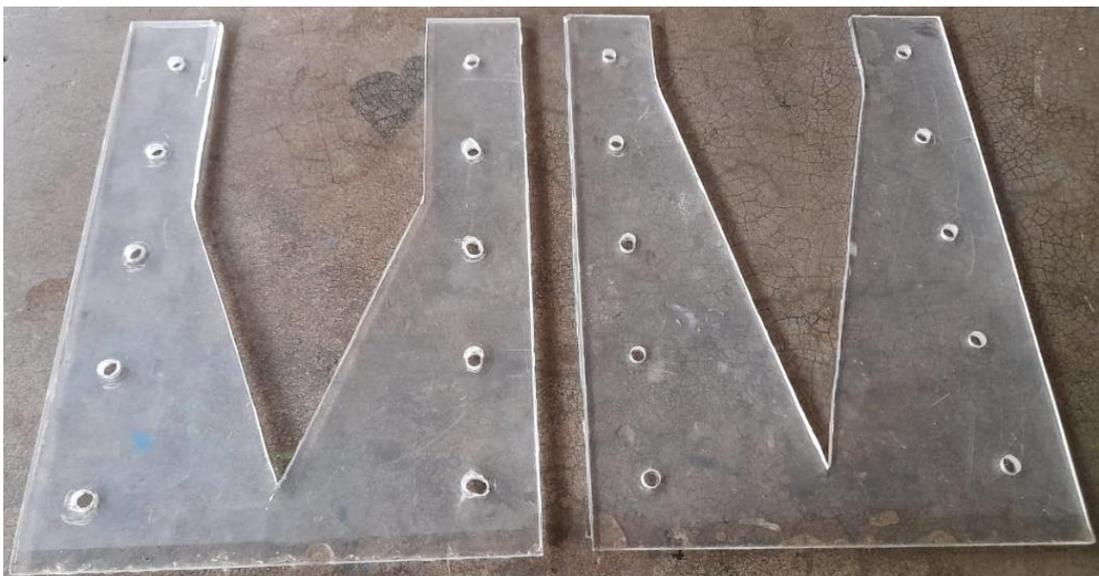


Figura 14. Vertederos triangulares de 45° y 30° .

Fuente: Elaboración propia.

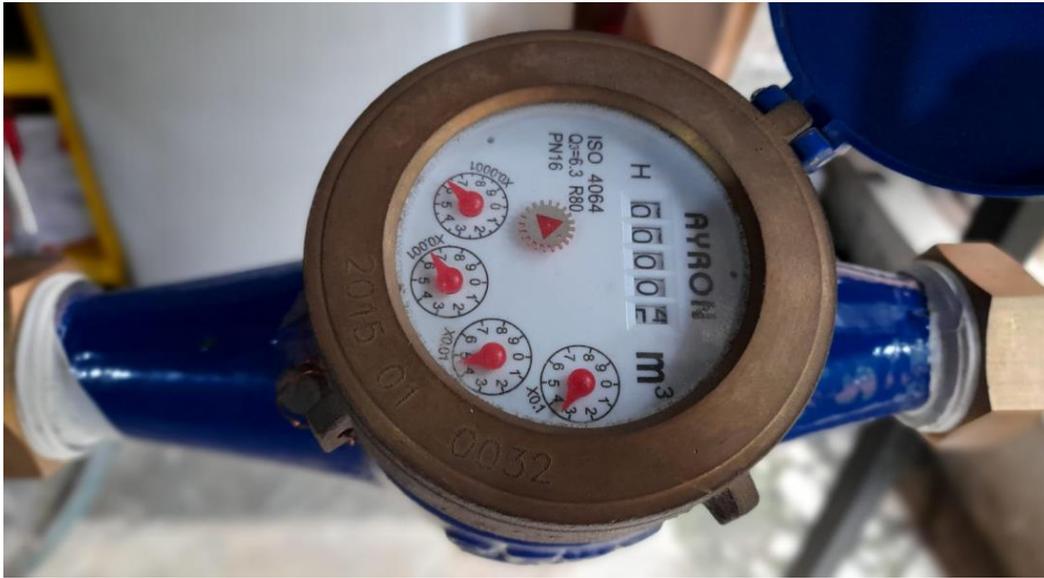


Figura 15. Vista del contador de volumen.

Fuente: Elaboración propia.

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

2.1. Pruebas a realizarse en el equipo modular

Para cada vertedero se deben realizar cuatro (4) pruebas, las cuales se detallan a continuación (véase las figuras 6 y 12).

Prueba 1.

Ángulo de vertedero $\theta_1 = 30^\circ$, V1 abierta al 100 % y V2 abierta al 100 %.

Prueba 2.

Ángulo de vertedero $\theta_1 = 30^\circ$, V1 abierta al 50 % y V2 abierta al 50 %.

Prueba 3.

Ángulo de vertedero $\theta_1 = 30^\circ$, V1 abierta al 100 % y V2 abierta al 50 %.

Prueba 4.

Ángulo de vertedero $\theta_1 = 30^\circ$, V1 abierta al 100 % y V2 cerrada al 100 %.

Prueba 5.

Ángulo de vertedero $\theta_2 = 45^\circ$, V1 abierta al 100 % y V2 abierta al 100 %.

Prueba 6.

Ángulo de vertedero $\theta_2 = 45^\circ$, V1 abierta al 50 % y V2 abierta al 50 %.

Prueba 7.

Ángulo de vertedero $\theta_2 = 45^\circ$, V1 abierta al 100 % y V2 abierta al 50 %.

Prueba 8.

Ángulo de vertedero $\theta_2 = 45^\circ$, V1 abierta al 100 % y V2 cerrada al 100 %.

Prueba 9.

Ángulo de vertedero $\theta_3 = 60^\circ$, V1 abierta al 100 % y V2 abierta al 100 %.

Prueba 10.

Ángulo de vertedero $\theta_3 = 60^\circ$, V1 abierta al 50 % y V2 abierta al 50 %.

Prueba 11.

Ángulo de vertedero $\theta_3 = 60^\circ$, V1 abierta al 100 % y V2 abierta al 50 %.

Prueba 12.

Ángulo de vertedero $\theta_3 = 60^\circ$, V1 abierta al 100 % y V2 cerrada al 100 %.

2.2. Procedimientos de recolección de datos

El procedimiento de recolección de datos, se debe basar en la medida del valor del nivel de líquido, el cálculo del caudal teórico y la medición del caudal real, cuando se llevan a cabo las pruebas con los tres (3) vertederos triangulares en el quipo modular.

Para medir el nivel de líquido en cada uno de los tres (3) vertederos, se debe utilizar como instrumento una regla graduada de 20 cm.

Para calcular el caudal teórico en cada uno de los tres (3) vertederos, se debe hacer

uso de la ecuación (6), midiendo previamente el nivel de líquido.

Para la medición del caudal real, se debe utilizar el contador de volumen (véase la figura 15). Mediante la relación entre volumen y tiempo, se debe determinar el caudal real.

2.3. Procesamiento y análisis de datos

El procesamiento y análisis de datos, se debe basar en la regresión de los datos del caudal teórico y el caudal real, mediante lo cual se determina el coeficiente de descarga y la ecuación que relaciona el caudal (ajustado) con el nivel de líquido en cada uno de los tres (3) vertederos triangulares, para esto se puede hacer uso del programa Microsoft Excel 2019.

3. RESULTADOS

Los resultados se deben presentar en tablas, para cada uno de los tres (3) vertederos, tal como se indican a continuación:

Tabla 1. Volumen medido en las pruebas con el vertedero triangular.

	t	V_{MC}
Pruebas	min	L

Tabla 2. Resultados de las pruebas realizadas con el vertedero triangular de 30°.

	h	θ	g	Q_T	Q_R	
Pruebas	cm	m	°	m ³ /s	L/min	L/min

Tabla 3. Datos para obtener el coeficiente de descarga en el vertedero triangular.

Q_T	Q_R
L/min	L/min

Tabla 4. Resultados del caudal ajustado en el vertedero triangular.

h		Q_A		
cm	m	m ³ /s	L/min	% Error

4. CONCLUSIONES

5. RECOMENDACIONES

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- FELDER, Richard y ROUSSEAU, Ronald. Principios elementales de los procesos químicos. 3a. ed. México: Limusa Wiley, 2004. 47 p. ISBN: 968-18-6169-8.
- LUX, Manuel. “Medidores de flujo en canales abiertos”. Trabajo de graduación presentado a la Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Civil, 2010. pp. 5, 12-13.

- MOTT, Robert L. Mecánica de fluidos. 6a. ed. México: Pearson Educación, S.A, de C.V., 2006. pp. 154, 462-464.
ISBN: 970-26-0805-8.
- POTTER, Merle y WIGGERT, David. Mecánica de fluidos. 3a. ed. México: Thomson Editores, S.A, de C.V., 2002. pp. 435-437
ISBN: 970-686-205-6.
- LEAÑO, Milagros. “Diseño de vertederos hidráulicos triangulares, rectangulares y combinados en el entorno rural del sector Quives, km 40 Lima – Canta, año 2021”. Tesis para optar el título de Ingeniera Civil. Lima, Perú: Universidad Privada del Norte, Facultad de Ingeniería, Carrera de Ingeniería Civil, 2021. pp. 53-54.