



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN MEDIDOR TIPO VERTEDERO PARA
EL ESTUDIO DE FLUJO DE FLUIDOS EN CANALES ABIERTOS**

Juan Diego Velásquez López

Asesorado por el Ing. Jorge Emilio Godínez Lemus

Guatemala, noviembre de 2016

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN MEDIDOR TIPO VERTEDERO PARA
EL ESTUDIO DE FLUJO DE FLUIDOS EN CANALES ABIERTOS**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

JUAN DIEGO VELÁSQUEZ LÓPEZ

ASESORADO POR EL ING. JORGE EMILIO GODÍNEZ LEMUS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2016

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Ángel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Raúl Eduardo Ticún Córdova
VOCAL V	Br. Henry Fernando Duarte García
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Manuel Gilberto Galván Estrada
EXAMINADORA	Inga. Hilda Piedad Palma Ramos
EXAMINADORA	Inga. Adela María Marroquín Ramírez
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN MEDIDOR TIPO VERTEDERO PARA EL ESTUDIO DE FLUJO DE FLUIDOS EN CANALES ABIERTOS

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 23 de febrero de 2016.



Juan Diego Velásquez López



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Edificio T-5, Ciudad Universitaria, Zona 12, Guatemala, Centroamérica

Guatemala 08 de agosto de 2016

Ingeniero
Carlos Salvador Wong Davi
Director
Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería
Presente

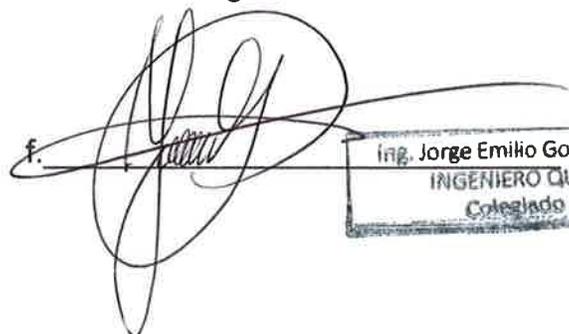
Estimado Ing. Wong

El motivo de la presente es para indicar la aprobación del informe final de Trabajo de Graduación titulado **“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN MEDIDOR TIPO VERTEDERO PARA EL ESTUDIO DE FLUJO DE FLUIDOS EN CANALES ABIERTOS”** el cual fue desarrollado por el estudiante **JUAN DIEGO VELÁSQUEZ LÓPEZ** con número de carné **200815473** en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Escuela de Ingeniería Química, para que sea presentado y defendido ante la terna evaluadora asignada.

Sin otro particular reciba un cordial saludo.

Atentamente:

Ing. Qco. Jorge Emilio Godínez Lemus
Colegiado No. 874

f. 

Ing. Jorge Emilio Godínez Lemus INGENIERO QUÍMICO Colegiado 874



Guatemala, 07 de septiembre de 2016.
Ref. EIQ.TG-IF.049.2016.

Ingeniero
Carlos Salvador Wong Davi
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Wong:

Como consta en el registro de evaluación del informe final EIQ-PRO-REG-007 correlativo **105-2015** le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADUACIÓN

Solicitado por el estudiante universitario: **Juan Diego Velásquez López**.
Identificado con número de carné: **2008-15473**.
Previo a optar al título de **INGENIERO QUÍMICO**.

Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN MEDIDOR TIPO VERTEDERO PARA EL ESTUDIO DE FLUJO DE FLUIDOS EN CANALES ABIERTO

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por el Ingeniero Químico: **Jorge Emilio Godínez Lemus**.

Habiendo encontrado el referido informe final del trabajo de graduación **SATISFACTORIO**, se autoriza al estudiante, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a las normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"

Ing. Pablo Enrique Morales Paniagua
COORDINADOR DE TERNA
Tribunal de Revisión
Trabajo de Graduación



C.c.: archivo



Ref.EIQ.TG.063.2016

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el Informe del Trabajo de Graduación de la estudiante, **JUAN DIEGO VELÁSQUEZ LÓPEZ** titulado: **“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN MEDIDOR TIPO VERTEDERO PARA EL ESTUDIO DE FLUJO DE FLUIDOS EN CANALES ABIERTOS”**. Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.

“Id y Enseñad a Todos”



Ing. Carlos Salvador Wong Davi
Director
Escuela de Ingeniería Química

Guatemala, octubre 2016

Cc: Archivo
CSWD/ale

Universidad de San Carlos
De Guatemala

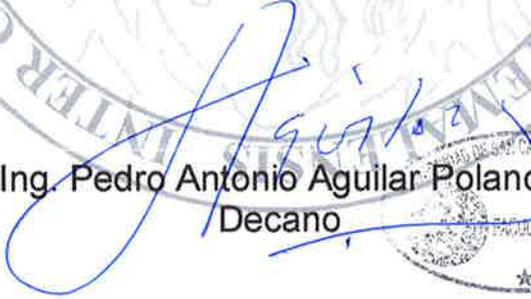


Facultad de Ingeniería
Decanato

Ref. DTG.538-2016

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al trabajo de graduación titulado: **DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN MEDIDOR TIPO VERTEDERO PARA EL ESTUDIO DE FLUJO DE FLUIDOS EN CANALES ABIERTOS**, presentado por el estudiante universitario: **Juan Diego Velásquez López**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano



Guatemala, noviembre de 2016

/cc

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por cada día que nos brinda, la sabiduría y el entendimiento, la salud, la familia y por ser parte fundamental para culminar esta etapa de mi vida.
- Mis padres** Gumercindo Velásquez y Delmy López de Velásquez por su paciencia e insistencia, porque nunca dejaron de creer en mí y me dieron las herramientas para culminar esta meta, les doy las gracias. Los amo.
- Mis hermanos** José Antonio y Sergio Pablo por su comprensión, paciencia y apoyo incondicional en todo el tiempo que estuve estudiando.
- Mi familia en general** Por estar siempre pendientes de mí durante el tiempo que estuve estudiando y elaborando este trabajo de graduación. Este éxito también es para ustedes.
- Mis padrinos** Carlos Meléndez e Irma de Meléndez por estar siempre pendientes de mí y por su cariño y afecto desde niño.

Mis amigos

A ustedes gracias por compartir grandes momentos y estar en las buenas y en las malas durante el tiempo que estuvimos juntos y principalmente por su amistad.

AGRADECIMIENTOS A:

- Dios** Por darme la sabiduría y la oportunidad de culminar esta meta además de ser parte fundamental en mi vida y mi guía.
- Mis padres** Gumercindo Velásquez y Delmy López de Velásquez por ser un ejemplo cada día, por ser tan amorosos y comprensivos. Por estar siempre insistiéndome en finalizar mi carrera ya que sin sus enseñanzas y consejos no estaría hoy aquí finalizando esta etapa de mi vida, los amo. Gracias.
- Mis hermanos** José Antonio y Sergio Pablo por su paciencia, apoyo incondicional durante toda mi vida estudiantil. Los quiero también.
- Mi familia** Por ser parte fundamental de mi formación como persona, por todas las experiencias y convivencia que ayudaron a ser quien soy ahora.
- Mis padrinos** Carlos Meléndez e Irma de Meléndez por ser unas grandes personas en mi vida, por estar siempre pendiente de mí desde antes de comenzar la universidad.

Mis amigos de la carrera

Por todos los momentos compartidos, por el apoyo incondicional tanto dentro como fuera de la universidad y por su gran amistad.

Ing. Jorge Godínez

Por su ayuda, asesoramiento y comentarios constructivos para finalizar este trabajo de graduación, y también por su paciencia. Gracias.

Ing. Williams Álvarez

Por ser un catedrático que me brindó su apoyo en cuanto los comentarios sobre este trabajo desde su comienzo.

La Facultad de Ingeniería

Por ser de tan alto prestigio y haberme proporcionado tantos conocimientos y experiencia para culminar mi carrera profesional.

La Universidad de San Carlos de Guatemala

Por ser una casa de estudios distinguida a nivel nacional y haberme brindado la oportunidad de cursar una carrera y alcanzar una nueva meta más.

Al pueblo de Guatemala

Gracias por ayudar a sostener mi carrera como a todos los que egresamos de esta casa de estudios.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTADO DE SÍMBOLOS.....	VII
GLOSARIO.....	XIII
RESUMEN.....	XV
OBJETIVOS.....	XVII
INTRODUCCIÓN.....	XIX
1. ANTECEDENTES.....	1
1.1 Justificación.....	3
1.2 Determinación del problema.....	4
1.2.1 Definición.....	4
1.2.2 Delimitación.....	4
2. MARCO TEÓRICO.....	5
2.1 Flujo de fluidos.....	5
2.1.1. Definición de fluido.....	5
2.1.2. Presión.....	6
2.1.3. Densidad, gravedad específica y peso específico.....	8
2.1.4. Tensión superficial.....	10
2.2. Hidrostática o estática de fluidos.....	10
2.2.1. Principios de Arquímedes y Pascal.....	10
2.3. Hidrodinámica o dinámica de fluidos.....	11

2.3.1.	Balance general de energía y ecuación de continuidad	11
2.3.2.	Ecuación de Bernoulli (Interpretación y restricciones)	14
2.3.3.	Número de Reynolds.....	16
2.4.	Vertederos.....	17
2.4.1.	Flujo en canales abiertos.....	19
2.4.1.1.	Radio hidráulico	19
2.4.1.2.	Carga hidráulica y espejo de agua.....	21
2.4.1.3.	Tipos de flujo.....	25
2.5.	Geometrías de compuerta.....	27
2.6.	Clasificación de los vertederos.....	28
2.6.1.	Vertederos de pared delgada	29
2.6.2.	Vertederos de pared gruesa	30
2.7.	Clasificación de los vertederos de pared delgada.....	31
2.7.1.	Ecuaciones para el cálculo de caudal para diferentes secciones geométricas de vertederos.....	32
2.7.2.	Vertedero rectangular	32
2.7.3.	Vertedero contraído.....	34
2.7.4.	Vertedero triangular.....	35
2.7.5.	Vertedero trapezoidal o Cipolletti.....	37
2.7.6.	Vertedero circular	38
2.8.	Análisis dimensional.....	39
3.	DISEÑO METODOLÓGICO.....	45
3.1.	Variables	45
3.2.	Delimitación del campo de estudio.....	46
3.3.	Recursos humanos disponibles	47
3.4.	Recursos materiales disponibles.....	47

3.5.	Técnica cualitativa	48
3.6.	Recolección y ordenamiento de la información	49
3.7.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información	50
3.8.	Análisis estadístico	51
3.8.1.	Dato promedio	51
3.8.2.	Desviación estándar	52
3.9.	Plan de análisis de resultados	52
3.9.1.	Programas a utilizar para el análisis de datos.....	53
4.	RESULTADOS	55
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	65
	CONCLUSIONES	69
	RECOMENDACIONES	71
	BIBLIOGRAFÍA.....	73
	APÉNDICES	77
	ANEXOS	127

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1. Ecuación de continuidad	13
2. Unidad de vertedero.....	19
3. Radio hidráulico y perímetro mojado.....	21
4. Carga hidráulica y espejo de agua de un canal triangular	22
5. Carga hidráulica y espejo de agua de un canal trapezoidal	24
6. Geometrías de canales abiertos más comunes	28
7. Vertedero rectangular de cresta delgada	30
8. Clasificación de vertederos según espesor.....	31
9. Napa del vertedero sin contracciones	33
10. Vertederos: (a) horizontal con contracciones de extremo y (b) vertedero de ranura en V	37
11. Montaje final del vertedero	55
12. Diagrama de flujo – vertedero	56
13. Soporte de vertedero	57
14. Vertedero rectangular.....	58
15. Vertedero triangular	59
16. Vertedero trapezoidal o Cipolletti	60
17. Vertedero rectangular en fibra de vidrio	61
18. Vertedero triangular en fibra de vidrio	61
19. Vertedero trapezoidal (o Cipolletti) en fibra de vidrio	62

TABLAS

I.	Grupos adimensionales	41
II.	Nomenclatura de símbolos – grupos adimensionales.....	42
III.	Tipos de variables.....	46
IV.	Gastos económicos	63
V.	Tiempo aproximado en la realización del trabajo de graduación	64

LISTADO DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
°C	grado Celsius
A	velocidad acústica en el fluido
A	ancho del canal
A _s	área de la sección transversal
A _p	área proyectada de la partícula
Atm	atmósfera
Av	ancho del canal de acceso al vertedero
Bar	bar (unidad de presión)
C	constante que depende de la carga "h" en un vertedero triangular
C _p	calor específico a presión constante
cm/s ²	centímetro por segundo cuadrado
D	diámetro de la sección circular
D _v	diámetro del círculo en la compuerta circular; difusividad de masa
dF	diferencia infinitesimal de fuerza
dA _s	diferencia infinitesimal del área de sección transversal
E	error estimado
E ₁ y E ₂	energías en los puntos 1 y 2 respectivamente
EC	energía cinética

EF	energía de flujo
EP	energía potencial
\vec{F}	fuerza
F_D	fuerza de rozamiento total
Fr	número de Froude
G	aceleración de la gravedad (9.8 m/s ² en el SI)
g/cm ³	gramo sobre centímetro cúbico
G	velocidad másica
h_f	altura de fluido
H	altura variable
H	coeficiente de transferencia de calor individual o de superficie
H	altura alcanzada por el agua a partir de la cresta del vertedero, carga
H_C	altura de la cresta sobre el fondo del canal
H_{min}, H_{max}	carga mínima; carga máxima
K	conductividad térmica
k_c	coeficiente individual de transferencia de materia
kg/m ³	kilogramo sobre metro cúbico
kg/s	kilogramo por segundo
L	largo del canal; longitud
lb/pie ³	libra sobre pie cúbico
M	Valor medio del peso molecular
m_f	masa
m/s ²	metro por segundo cuadrado
m ³ /s	metro cúbico por segundo

\dot{m}	flujo másico
N	número de tratamientos o repeticiones
NE, NW	vistas isométricas noreste y noroeste
N	número de datos en la muestra
N/s	Newton por segundo
P	presión
pie/s^2	pie por segundo cuadrado
Pe	probabilidad de éxito
Pa	Pascal (unidad de presión)
P_{abs}	presión absoluta
P_{atm}	presión atmosférica
PM	perímetro mojado
P_{man}	presión manométrica
P_0	presión en la superficie
Δp_s	caída de presión por la fricción de superficie
Psi	libra sobre pulgada cuadrada (<i>pounds force square inch</i>)
\dot{Q}	flujo volumétrico o caudal
Q	probabilidad de fracaso
Re	número de Reynolds
R	distancia radial o radio
r_m	radio del cilindro sólido o esfera
R_h	radio hidráulico
S	mitad del espesor del bloque
S	desviación estándar
SE, SW	vistas isométricas sureste y suroeste
SI	sistema internacional
T	tiempo

T	ancho de la superficie
ΔT	caída de la temperatura
Torr	Torricelli
u_0	velocidad de la corriente que se aproxima
USAC	Universidad de San Carlos de Guatemala
V	volumen de fluido
V_x	velocidad media del fluido en la dirección x
$v_f (v_i), u$	velocidad del fluido; velocidad del componente i
v_1 y v_2	velocidad del fluido en los puntos 1 y 2 respectivamente
w_f	peso de fluido
\dot{w}	flujo en peso
X	longitud del borde horizontal en un vertedero o cresta
X	longitud desconocida que se desea despejar
X_i	dato conocido
\bar{X}	media de la muestra
Y_h	altura o profundidad hidráulica
Z	posición de referencia
$Z_{\alpha/2}$	grado de confiabilidad (95 %)

Símbolos griegos

α	Difusividad térmica, $k/\rho C_p$
B	coeficiente de expansión volumétrica
Γ	peso específico
Θ	ángulo de ranura en v de un vertedero triangular
M	viscosidad absoluta
μ_w	viscosidad absoluta para la temperatura de la pared
Σ	tensión en la superficie de contacto
Π	pi (3.1416...)
P	densidad del fluido
Σ	sumatoria

GLOSARIO

	Conducto por donde circula un determinado fluido.
Cresta	Parte más alta por dónde atraviesa un flujo en un canal abierto.
Compuerta	Abertura que puede ser de diferentes geometrías por las cual atraviesa un fluido.
Cuenta galones	Accesorio que se utiliza en un tramo de tubería recto para visualizar la cantidad y/o el flujo de agua que atraviesa dicho segmento.
Espejo de agua	Superficie encerrada por las fronteras de un cuerpo de agua.
Fibra de vidrio	Material hecho con fibras de vidrio el cual es utilizado para distintos propósitos con la ventaja de poseer cierta resistencia y durabilidad comparada con otros materiales.
Flexitubo	Material utilizado para proteger tramos eléctricos en una instalación donde pueda existir riesgo de daño.

Flujo de fluidos	Rama de las operaciones unitarias que estudia los fluidos de manera estática como dinámica.
Hidroneumático(a)	Es un equipo, en este caso una bomba, que funciona mediante un líquido, generalmente el agua, y un gas comprimido.
Montaje	Colocación de las piezas de un aparato, máquina, o instalación de algún equipo en el sitio adecuado.
Napa	Chorro o cascada que se forma cuando el flujo varía con rapidez cuando pasa sobre el vertedero.
Número de Froude (Fr)	Grupo adimensional que muestra la relación de las fuerzas inerciales entre las fuerzas gravitacionales.
Número de Reynolds (Re)	Grupo adimensional que relaciona las fuerzas de inercia respecto de las fuerzas viscosas.
Pila	Recipiente con determinadas dimensiones utilizado para recibir un líquido (por ejemplo: agua).
Vertedero	Equipo que consta de un canal y una compuerta por la cual atraviesa un fluido dado con el objeto de medir el caudal del mismo.

RESUMEN

El estudio de flujo de fluidos es la rama de la física que estudia los fluidos, en particular los líquidos y los fenómenos de los cuales son participes. El presente trabajo de graduación se llevó a cabo con el propósito de diseñar y construir un equipo que será útil para el uso didáctico y de investigación para la formación académica de los estudiantes sobre el estudio flujo de fluidos en canales abiertos en la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Por esa razón el equipo que se diseñó es una unidad de vertedero para el cual se utilizarán tres tipos de compuertas (rectangular, triangular y trapezoidal) con las que se podrán evaluar las diferencias en las medidas de caudal para determinados flujos al compararlos con la teoría expuesta en la literatura. Se construyó un equipo de vertedero con las diferentes formas de compuertas mencionadas anteriormente con base en el diseño propuesto por el investigador con ayuda del respectivo asesor.

Se redactó un breve instructivo el cual contiene los objetivos generales de una práctica propuesta de laboratorio como también una guía de uso y del mantenimiento adecuado del equipo con el propósito de dejar una herramienta útil con un ciclo de vida largo como prototipo para futuras instalaciones por parte de los estudiantes y/o del catedrático en turno.

OBJETIVOS

General

Diseñar e implementar un equipo didáctico de tipo vertedero para el estudio de flujo de fluidos en canales abiertos con tres distintas formas de geometría de compuerta.

Específicos

1. Diseñar un equipo de vertedero tomando en cuenta todas las variables necesarias para su futuro funcionamiento como herramienta para uso didáctico.
2. Construir el equipo respectivo para el estudio de flujo de fluidos en canales abiertos con las formas de geometría especificadas en el diseño realizado del vertedero.
3. Evaluar las diferentes geometrías de compuertas para una unidad de vertedero para la medición de caudales.
4. Evaluar las tendencias obtenidas con el respectivo análisis dimensional para el estudio del flujo de fluidos en una unidad de vertedero.
5. Elaborar un instructivo que contenga una práctica de laboratorio con los objetivos de la práctica, la operación y el mantenimiento del equipo por parte de los estudiantes.

INTRODUCCIÓN

El estudio del flujo de fluidos es un aspecto clave para poder comprender y complementar con los demás fenómenos en los cuales esta juega un papel importante como ocurre en la transferencia de calor y masa.

Con base en el diseño de una unidad de vertedero se busca construir un sistema que sirva como instrumento didáctico y de investigación por parte del instructor para la medición correcta de los flujos en un sistema de tubería al utilizar diferentes formas de compuerta – rectangular, trapezoidal y triangular – en un vertedero y el uso adecuado del análisis dimensional para estimar resultados con base en las variables que participen en el sistema mencionado.

Se enfocará en un grado cualitativo como cuantitativo. El enfoque cualitativo se verá desde el cambio que ocurre con el régimen de flujo, y como varía el espejo de agua y la altura de la cresta en el vertedero en un determinado instante. Desde el punto de vista cuantitativo se observará como se distingue un flujo de una compuerta a otra y se evaluarán dichos resultados observando sus respectivas tendencias al variar el flujo de agua.

1. ANTECEDENTES

El desarrollo de una unidad de vertedero sobre el flujo en canales abiertos surge debido a la necesidad de ampliar el conocimiento del tema del flujo de fluidos en el Laboratorio de Ingeniería Química. Debido a la falta de dicho equipo en años anteriores, se ha venido trabajando con el mismo vertedero con compuerta de ranura, el cual no ofrece más trabajo de laboratorio al estudiante puesto que no se puede comparar con otras geometrías de compuerta.

En algunas universidades (nacionales como internacionales) incluyendo la USAC, en particular en la Facultad de Ingeniería, se han implementado como trabajo de graduación en la Escuela de Ingeniería Química prácticas de laboratorio para uso didáctico y/o de investigación pero ninguna que tenga relación con el estudio del flujo de fluidos en canales abiertos empleando medidores de vertedero, como se demuestra en el listado de antecedentes descritos a continuación:

- *Trabajo experimental sobre la implementación en el diseño y montaje de un evaporador de película ascendente* en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Escuela de Ingeniería Química de la USAC. El trabajo de graduación fue presentado por Héctor Garrido en el año 1991.
- *Guía teórica y práctica sobre hidráulica de canales* en la Escuela de Ingeniería Civil de la USAC presentado por Miguel Antonio Reyes Ventura como trabajo de graduación en el año 1997.

- *Propuesta de una práctica experimental de control automático del proceso de transferencia de calor en el intercambiador de calor de tubos concéntricos* del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Escuela de Ingeniería Química de la USAC. Trabajo de graduación presentado por David Cerezo en el año 2005.
- *Aplicación del diseño experimental en el desarrollo de las prácticas internas en el Área de Operaciones Unitarias* presentado como trabajo de graduación por Menphis Reyes de la Universidad de San Carlos de Guatemala en el año 2009.
- *Medidores de flujo en canales abiertos* presentado como trabajo de graduación por Manuel Lux Monroy de la Escuela de Ingeniería Civil como aporte a los cursos de Hidráulica e Hidráulica de Canales, USAC 2010.
- *Diseño experimental para la operación de un sistema de evaporación doble efecto* ubicado en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Escuela de Ingeniería Química de la USAC presentado como trabajo de graduación por Carlos Eduardo Morales Chávez en el 2012.
- *Diseño y construcción de un canal hidráulico de pendiente variable para uso didáctico e investigación* presentado como trabajo de graduación de ingeniería Mecánica por: Carlos Marín C., Máximo Menjívar L. y José Miguel Zavaleta L., de la Universidad de El Salvador, Centro América.

Se puede notar que, los tres trabajos de graduación que se relacionan al estudio de canales abiertos son los presentados por el Ing. Miguel Antonio Reyes Ventura y el Ing. Manuel Lux Monroy de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad de San Carlos de Guatemala presentando una guía teórica y práctica sobre hidráulica de canales y medidores de flujo en canales abiertos, y el presentado por Carlos Marín, Máximo Menjívar y José Miguel Zavaleta de la Universidad de El Salvador; sin embargo, hasta la fecha no se han presentado trabajos similares o relativos al tema del flujo de fluidos en canales abiertos y muchos menos en la Escuela de Ingeniería Química de la USAC.

1.1 Justificación

Un equipo o unidad de vertedero diseñado para el uso didáctico y de enseñanza del flujo de fluidos es indispensable en el estudio de canales abiertos, debido a que solo se cuenta con uno de compuerta rectangular resulta trivial, puesto que el tipo de flujo no varía considerablemente al igual que el espejo de agua.

Cabe resaltar también la importancia de estos canales puesto que se utilizan en varias industrias para el manejo de residuos y aguas servidas, drenajes, materia prima, productos intermedios y productos finales los cuales pueden ser medidos si se conocen bien los fundamentos básicos del tema de flujo de fluidos en canales abiertos.

1.2 Determinación del problema

1.2.1 Definición

La falta de un equipo de medición de flujos de canal abierto adicional limita las posibilidades de estudiar el fenómeno del flujo de fluidos en estos debido a que solamente se consta de un solo tipo de compuerta en el que resulta trivial la medición del caudal así mismo el espejo de agua que atraviesa el mismo.

1.2.2 Delimitación

El diseño y la construcción de la unidad de vertedero para el estudio del flujo de fluidos en canales se compondrá por cuatro diferentes tipos de compuerta (rectangular, triangular, trapezoidal o Cipolletti y circular) y se utilizará agua como fluido de trabajo. El montaje e implementación del equipo se llevará a cabo en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Escuela de Ingeniería Química, limitando su uso a estudiantes y profesores titulares del curso mencionado.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Flujo de fluidos

El flujo de fluidos es una rama de la física que estudia los fluidos, en particular los líquidos los cuales se consideran incompresibles en condiciones normales en comparación con los gases que se clasifican como compresibles¹. El flujo de fluidos juega un papel muy importante en la transferencia de calor y masa, en este caso se tomará el enfoque de medición de flujos que se verá más adelante.

Con el propósito de adentrar al estudiante en el estudio de flujo de fluidos es necesario que el mismo posea ciertos conocimientos y principios además de comprender algunos conceptos de importancia que tienen relación con el equipo a implementar.

2.1.1. Definición de fluido

Es una sustancia o medio continuo que no resiste en forma permanente la distorsión², se caracteriza por: la posición de sus moléculas puede cambiar constantemente, se consideran incompresibles y su viscosidad (en la mayoría de casos) se considera función de la temperatura.

¹ Estos no se tomarán en cuenta en el estudio de flujo de fluidos de canales abiertos puesto que se supone que el único gas es el aire que se encuentra en la atmósfera.

² MCCABE, Warren; SMITH, Julian; HARRIOT, Peter. *Operaciones unitarias en ingeniería química*. p. 35.

2.1.2. Presión

Se define como la fuerza por unidad de área en términos más generales. En intervalos pequeños, se define la fuerza infinitesimal por área infinitesimal, la fuerza siempre es perpendicular al área sobre la cual se aplica. La ecuación que define la presión es la siguiente:

$$P = \frac{dF}{dA_S} \text{ (forma infinitesimal)}$$

Ecuación N.º 1³

$$P = \frac{F}{A_S}$$

Donde:

P = presión

F = fuerza

A_S = área de la sección

La presión en un recipiente actúa bajo dos principios denominados principios o leyes de Pascal:

- La presión actúa de modo uniforme en todas las direcciones de un volumen pequeño de fluido.
- En un fluido confinado por fronteras sólidas, la presión actúa de manera perpendicular a la pared.

³ MOTT, Robert. *Mecánica de fluidos*. p. 52.

Un término relacionado con la presión es la cabeza de presión, que se da en función de una columna de líquido que asciende cuando la superficie está expuesta al aire. La ecuación que define esta relación es la siguiente:

Ecuación N.º 2⁴

$$P = P_0 + \rho gh$$

Cuando el recipiente que contiene el líquido está expuesto a la atmósfera, P_0 será igual a cero y la altura de la columna de fluido se calcula como:

Ecuación N.º 3⁵

$$h = \frac{P}{\rho g}$$

Otros dos conceptos importantes referentes a la presión son la presión atmosférica y la presión manométrica. La primera se refiere a la presión ejercida por la atmósfera de la tierra. En la mayoría de los casos se toma como 1 atm o 1 bar. La segunda es la presión relacionada con un fluido, sea líquido o gaseoso, es la presión de importancia en los fluidos. La suma de las presiones manométrica y atmosférica se calcula como:

Ecuación N.º 4⁶

$$P_{\text{abs}} = P_{\text{man}} + P_{\text{atm}}$$

Donde P_{abs} es la presión absoluta y es la suma de la presión manométrica y atmosférica. En el caso del sistema inglés se maneja la unidad de “psi” que se

⁴ FELDER, Richard; ROUSSEAU, Ronald. *Principios elementales de los procesos químicos*. p. 55.

⁵ *Ibíd.*

⁶ MOTT, Robert. *Mecánica de fluidos*. p. 53.

define como una libra sobre pulgada cuadrada, en el caso de la presión atmosférica esta tiene un valor de 14, 696 psi o lb/pulg².

Los instrumentos para medir la presión son el manómetro y el barómetro, este último sirve para medir la presión atmosférica. Algunos manómetros, son: el manómetro en tubo en U para medir diferencias de presión utilizando dos fluidos que no se mezclan (por ejemplo: agua y mercurio); el manómetro de tubo en U inclinado para medir pequeñas diferencias de presión que también utiliza dos fluidos inmiscibles; el manómetro de tubo de Bourdon es otro ampliamente utilizado en instalaciones industriales y normalmente da las medidas en psi o lb/pulgada cuadrada. Existe el vacuómetro el cual mide presiones de vacío, ideal para procesos en los cuales se quiere mantener la pureza de algunos productos al no exponerlos a altas temperaturas y altas presiones (por ejemplo: industria del azúcar).

También hay otros instrumentos para medir la presión, los transductores de presión, pero en esta investigación no se abordará la explicación de estos y queda a criterio del estudiante consultar la bibliografía referente al tema.

2.1.3. Densidad, gravedad específica y peso específico

La densidad es la relación entre la masa de un fluido por la unidad de volumen del mismo. Sus unidades en el SI son kilogramo por metro cúbico (kg/m^3) y en el sistema inglés y americano de ingeniería son libra por pie cúbico (lb/pie^3). La ecuación que define la densidad de un fluido se escribe como:

Ecuación N.º 5⁷

$$\rho = \frac{\text{masa de fluido}}{\text{volumen}} = \frac{m_f}{V_f}$$

La gravedad específica es la relación de la densidad de una sustancia respecto a la densidad de una sustancia de referencia a la cual se le conoce previamente su densidad. En la mayoría de casos por conveniencia se utiliza la densidad del agua a 4°C (1.00 g/cm³ o 1000 kg/m³).

El peso específico al igual que la densidad es una razón y esta se define como el peso de fluido por unidad de volumen. El peso específico se escribe como:

Ecuación N.º 6⁸

$$\gamma = \frac{\text{peso de fluido}}{\text{volumen}} = \frac{w_f}{V}$$

También se escribe como:

Ecuación N.º 7⁹

$$\gamma = \text{densidad} \times \text{gravedad} = \rho g$$

Donde g es el valor de la aceleración de la gravedad: 9,8 m/s², 980 cm/s² y 32,2 pie/s².

⁷ MOTT, Robert. *Mecánica de fluidos*. p.14.

⁸ *Ibíd.* p.15.

⁹ *Ibíd.* p.16.

2.1.4. Tensión superficial

Se define como la energía requerida para aumentar el área superficial de un líquido en una unidad de área¹⁰. Sus unidades son N/m en el SI. La tensión superficial actúa como una película en la interfaz entre la superficie de un líquido y el aire sobre ella. En la mayoría se trata de líquidos polares debido a que estos poseen momentos dipolares diferentes de cero. Las sustancias que disminuyen la tensión superficial se denominan tensoactivos o surfactantes, tales como los jabones y detergentes.

La tensión superficial también es la causa por la cual las gotas (de agua) adopten una forma casi esférica. La tensión superficial determina si existirá acción capilar por parte del líquido en las cuales predominan las fuerzas de cohesión y/o adhesión.

2.2. Hidrostática o estática de fluidos

La hidrostática es una subárea del flujo de fluidos que estudia los fluidos en estado de reposo y sus variables asociadas. En la hidrostática influyen dos principios fundamentales: principio de Arquímedes y principio de Pascal.

2.2.1. Principios de Arquímedes y Pascal

La definición del principio de Arquímedes afirma que un cuerpo en un fluido, ya sea que flote o esté sumergido, experimenta una fuerza hacia arriba igual al peso del fluido que desplaza¹¹. Dicho objeto no es necesario que esté

¹⁰ BROWN, Theodore; LEMAY, Eugene; BURSTEN, Bruce; BURDGE, Julia. *Química la ciencia central*. p. 419.

¹¹ MOTT, Robert. *Mecánica de fluidos*. p.124.

totalmente sumergido en el fluido y debido a que la fuerza de empuje es mayor que el peso aparente del objeto, este flotará de forma parcial sobre la superficie.

Por otro lado, el principio de Pascal es una ley enunciada por el físico y matemático francés Blaise Pascal (1623 – 1662) la cual establece que al aumentar la presión sobre una superficie de un fluido incompresible (líquido) contenido en un recipiente de forma definida se transmite con el mismo valor a cada una de las partes del mismo. Es decir, que si en el interior de un líquido se crea una presión, esta será de igual magnitud en todas direcciones y sentidos de manera perpendicular. En el SI la unidad de presión es el Pascal (Pa); sin embargo, se utilizan otras unidades como la atmósfera (atm), bar, lb/pulg² (psi), torr, entre otras que se encuentran en la literatura sobre la materia.

2.3. Hidrodinámica o dinámica de fluidos

Al igual que la hidrostática, la hidrodinámica es una subárea del flujo de fluidos pero la diferencia radica en que esta estudia los fenómenos de los cuerpos o fluidos se encuentran en movimiento.

2.3.1. Balance general de energía y ecuación de continuidad

En la dinámica de fluidos se manejan tres formas de expresar el gasto o caudal a través de tuberías o tubos, entre estos se pueden mencionar:

- El flujo volumétrico o caudal (\dot{Q}) el cual es el volumen de fluido que atraviesa un conducto por unidad de tiempo.
- El flujo en peso (\dot{W}) es la razón entre el peso de fluido por unidad de tiempo.
- El flujo másico (\dot{m}) es la relación entre la masa de fluido por unidad de tiempo.

Las unidades de estos son m^3/s , N/s y kg/s en el SI, respectivamente.

Al igual que en las reacciones químicas, en el flujo de fluidos debe establecerse una igualdad tanto en la materia como en energía. La ecuación de continuidad representa un balance de masa en un sistema de fluido mientras que la ecuación de Bernoulli representa el balance de energía para dicho sistema. Dichas expresiones se muestran a continuación:

Ecuación N.º 8¹²

$$Q_1 = Q_2$$

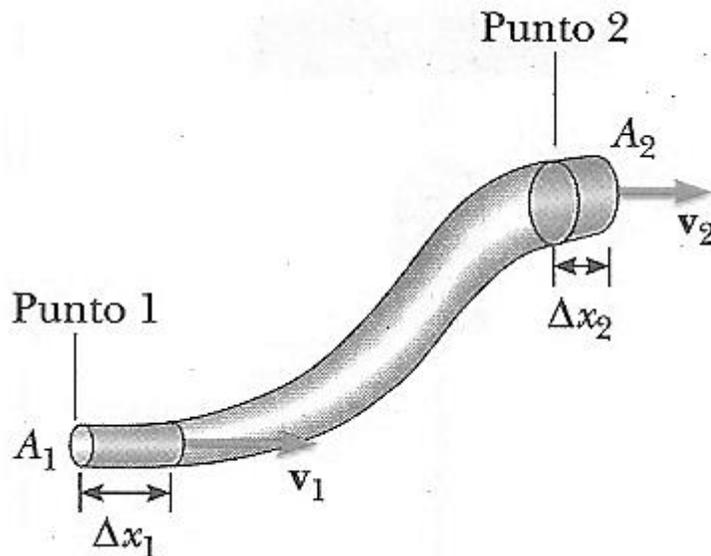
Ecuación N.º 9¹³

$$v_1 A_1 = v_2 A_2$$

¹² MOTT, Robert. *Mecánica de fluidos*. p.157.

¹³ *Ibíd.*

Figura 1. **Ecuación de continuidad**



Fuente: VALDÉZ, Katy. *Ecuación de continuidad*.

<http://colegioribambakatyvaldez.blogspot.com/2013/07/ecuacion-de-continuidad-aerodinamica.html>. Consulta: 10 de septiembre de 2015.

Las expresiones anteriores, ecuaciones 8 y 9, se les denomina ecuación de continuidad donde “v” es la velocidad de fluido y “A” es el área de sección transversal de tubería. Si los diámetros son iguales, la velocidad permanece constante.

Por otro lado, el balance de energía, al igual que el balance de materiales, es una parte importante del sistema que se esté estudiando.

Para un sistema de flujo, el balance energético se da por la ecuación de Bernoulli al igualar los estados de energía al inicio con el estado final como sigue:

$$E_1 = E_2$$

$$(EF + EP + EC)_1 = (EF + EP + EC)_2$$

$$\left(\frac{w_f p}{\gamma} + w_f z + \frac{w_f v^2}{2g} \right)_1 = \left(\frac{w_f p}{\gamma} + w_f z + \frac{w_f v^2}{2g} \right)_2$$

Ecuación N.º 10¹⁴

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

Dónde EF, EP y EC son la energía de fluido, energía potencial gravitacional y energía cinética, respectivamente. Al reducir estas y simplificar se convierte en la ecuación de Bernoulli. Cada uno de los términos de la ecuación de Bernoulli es un término de energía expresado como carga.

2.3.2. Ecuación de Bernoulli (Interpretación y restricciones)

La ecuación de Bernoulli expuesta en el apartado anterior es una expresión del balance de energía en un sistema de flujo pero para aplicarla se deben conocer sus limitaciones, la interpretación y las situaciones en las cuales se pueden utilizar dicha ecuación.

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

Cada término de la ecuación de Bernoulli se suele interpretar de manera separada. Como se dijo antes, cada término es una forma de energía que

¹⁴ MOTT, Robert. *Mecánica de fluidos*. p. 167.

posee el fluido por unidad de peso de fluido que se mueve en el sistema. La ecuación de Bernoulli se puede subdividir e interpretar como:

$$\frac{p}{\gamma} \quad \text{carga de presión}$$
$$z \quad \text{carga de elevación}$$
$$\frac{v^2}{2g} \quad \text{carga de velocidad}$$

En la ecuación de Bernoulli se hace la suposición de que no existen pérdidas por fricción o no se añade energía o remueve esta entre dos puntos por lo que la carga permanece constante y solo se consideran los tres términos antes explicados.

En el texto *Mecánica de fluidos* establece que la ecuación de Bernoulli se aplica en las siguientes situaciones:

- Es válida sólo para fluidos incompresibles debido a que se supone que el peso específico es constante en los dos puntos de interés.
- No puede haber dispositivos mecánicos que agreguen o retiren energía del sistema entre las dos secciones de interés debido a que la ecuación establece que la energía en el fluido es constante.
- No puede haber transferencia de calor hacia el fluido o fuera de este.
- No puede haber pérdida de energía debido a la fricción.¹⁵

En la vida real, ningún sistema de flujo satisface dichas condiciones; sin embargo, hay algunos sistemas donde se puede aplicar dicha ecuación

¹⁵ MOTT, Robert. *Mecánica de fluidos*. p. 169.

obteniendo errores mínimos la cual utiliza para hacer una estimación rápida del resultado cuando se suponen verdaderas las demás condiciones.

2.3.3. Número de Reynolds

El comportamiento de un fluido en particular es una gran parte del estudio del flujo de fluidos, referente al tipo de flujo, este puede ser laminar, turbulento o de transición por lo tanto, es necesario especificar un conjunto de variables que indiquen al lector el comportamiento del líquido que se está estudiando sin observarlo y determinar a qué régimen corresponde. Debido a que los experimentos son un poco costosos, el conjunto de variables que se necesita está determinado por el número de Reynolds (en honor a Osborne Reynolds) el cual está definido por la siguiente expresión:

Ecuación N.º 11¹⁶

$$\text{Re} = \frac{Dv_f\rho}{\mu}$$

Donde:

D = el diámetro del conducto, en caso de que no sea circular, este se reemplaza por el diámetro hidráulico.

v_f = la velocidad del fluido.

ρ = la densidad del fluido.

μ = la viscosidad absoluta o dinámica del mismo.

¹⁶ MOTT, Robert. *Mecánica de fluidos*. p. 230.

Para que se cumpla la condición de ser un grupo adimensional, las unidades deben ser dimensionalmente homogéneas y pertenecer al mismo sistema. El Re también establece la relación entre las fuerzas de inercia respecto a las fuerzas viscosas.

El número de Reynolds establece el régimen del flujo, para ello existen rangos para los cuales el flujo es laminar, turbulento o de transición. En la literatura los valores varían en pequeñas proporciones, en el presente trabajo se manejarán los siguientes rangos de Re ¹⁷:

- $Re < 2000$, se tiene flujo laminar
- $2000 < Re < 4000$, se tiene flujo de transición
- $Re > 4000$, se tiene flujo turbulento

2.4. Vertederos

Un canal abierto es un sistema de flujo en el que la superficie superior del fluido está expuesta a la atmósfera. Algunos ejemplos de canales abiertos pueden ser:

- Sistemas de suministro de agua a las comunidades.
- Drenar el agua de las tormentas y eliminarla en forma segura.
- Ríos y corrientes.
- Canaletas pluviales en los edificios y los costados de las calles conducen agua pluvial.
- Los colectores pluviales reúnen la corriente de las calles y la conducen a una corriente o a un canal más grande.

¹⁷ Estos valores para el número de Reynolds corresponden a flujos en tuberías cerradas ya sean circulares o de forma diferente.

- En la industria, empleados para conducir el agua de enfriamiento o los refrigerantes de los intercambiadores de calor y llevarla lejos de la sala de máquinas.

Los vertederos son parte de los canales abiertos, estos se pueden definir como simples aberturas sobre las cuales fluye un líquido dado. Es decir, son orificios con diferentes formas geométricas sin incluir el borde superior y ofrecen ciertas ventajas en la medición del flujo:

- Se logra una buena precisión en los aforos.
- La construcción es sencilla.
- No son obstruidos por materiales que flotan en el líquido (por ejemplo: agua).
- La duración del dispositivo es relativamente larga.

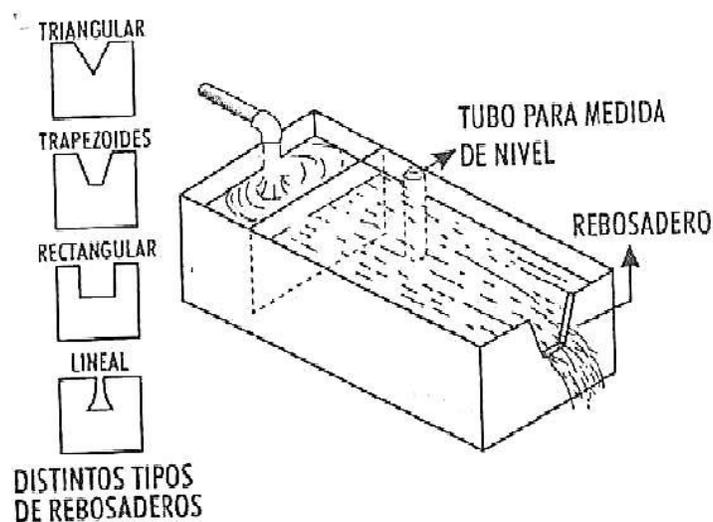
Los vertederos son utilizados de manera intensiva en la medición de caudales pequeños y conductos libres como el control del flujo en galerías y canales los cuales el estudio de estos es de gran importancia.

La terminología utilizada en el diseño y construcción de un vertedero para la medición de flujo es la siguiente:

- Cresta (X): se le llama así al borde horizontal.
- Contracción: en un vertedero, la constituyen los bordes o caras verticales.
- Carga (H): se le llama así a la altura alcanzada por el agua a partir de la cresta del vertedero. Debido a la depresión de la lámina vertiente junto al vertedero, la carga H debe ser medida aguas arriba, a una distancia aproximadamente igual o superior a cuatro veces la altura.

- Ancho (A): es el ancho del canal de acceso al vertedero, es decir, a la compuerta donde atraviesa el fluido.

Figura 2. Unidad de vertedero



Fuente: Lección 5: aforo de aguas residuales.

http://datateca.unad.edu.co/contenidos/301332/EXE_301332/leccin_5_aforo_de_aguas_residuales.html. Consulta: 14 de septiembre de 2015.

2.4.1. Flujo en canales abiertos

2.4.1.1. Radio hidráulico

La dimensión característica es una de las variables que se encuentra a menudo en los números adimensionales como es el caso del número de Reynolds. En este número, la dimensión característica es el diámetro cuando se trata de tuberías circulares en flujos rodeados de fronteras definidas. Cuando se toma en cuenta el flujo en canales abiertos, el diámetro de la tubería se

reemplaza con el radio hidráulico del canal y este depende de la geometría que se esté estudiando.

El radio hidráulico está definido por la relación entre el área de la sección transversal y el perímetro mojado por el líquido que se encuentra en el canal.

Ecuación N.º 12¹⁸

$$R_h = \frac{A_s}{PM}$$

Donde:

A_s = área de la sección transversal del canal.

PM = perímetro mojado por el líquido contenido en el canal.

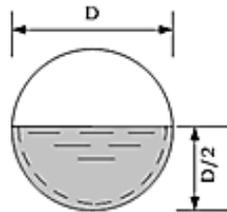
Algunos tipos de canales abiertos que se encuentran son los constituidos por: a) una tubería circular medio llena, b) un canal rectangular, c) un canal trapezoidal, d) un canal triangular y e) un canal natural.

Como se mencionó antes, el número de Reynolds para conductos circulares o no circulares cerrados varía respecto al de canales abiertos y por lo tanto los rangos para flujos laminares y turbulentos serán distintos. En el flujo de canales abiertos, el régimen es laminar cuando Re es menor a 500 y turbulento cuando es mayor a 2000. La región de transición se encuentra entre estos dos valores.

¹⁸ MOTT, Robert. *Mecánica de fluidos*. p. 446.

Figura 3. **Radio hidráulico y perímetro mojado**

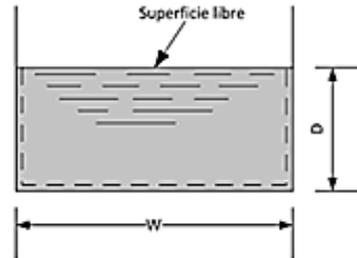
a) Canal de tubería circular medio llena:



$$\text{Área} = \pi * D^2/8$$

$$\text{PM} = \pi * D/2$$

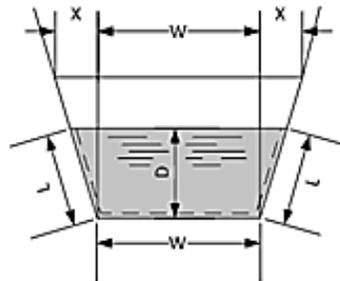
b) Canal rectangular:



$$\text{Área} = W * D$$

$$\text{PM} = W + 2 * D$$

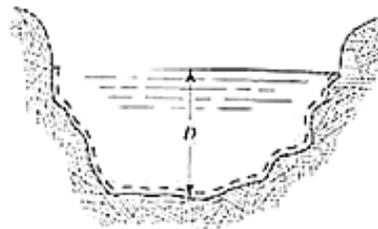
c) Canal trapezoidal:



$$\text{Área} = W * D + X * D$$

$$\text{PM} = W + 2 * L$$

d) Canal irregular:



Área y PM irregulares

Fuente: MOTT, Robert. *Mecánica de fluidos*. p. 444

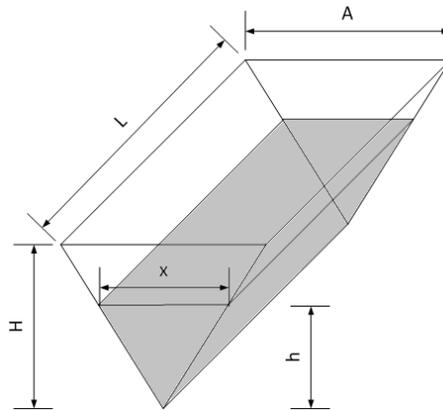
2.4.1.2. Carga hidráulica y espejo de agua

La carga hidráulica es la altura de agua hasta donde asciende en un canal abierto a la atmósfera o en un vertedero pero solo se podrá saber su valor conociendo como varía el espejo de agua en dicho canal o vertedero el cual dependerá principalmente de la geometría que se tenga.

En la mayoría de los casos el área del espejo de agua tiende a ser rectangular y lo que varía es el ancho de dicho canal pero esto solo ocurre con canales que tienen forma triangular o trapezoidal y no así en los rectangulares donde el espejo de agua se mantiene constante e igual al producto de su largo por su ancho respectivamente.

Si se toma en cuenta un canal triangular, la relación entre el espejo de agua y la carga hidráulica se obtiene lo siguiente:

Figura 4. **Carga hidráulica y espejo de agua de un canal triangular**



Fuente: elaboración propia utilizando Microsoft® Visio 2010.

De la figura anterior se puede deducir una relación utilizando la herramienta de triángulos semejantes relacionando el espejo de agua con la carga hidráulica como se mencionó anteriormente. Sea x el ancho del espejo de agua, L el largo del canal, h la carga hidráulica y A el ancho del canal, se obtiene:

$$\frac{x}{A} = \frac{h}{H}$$

Como se conocen los valores de A y H, se puede calcular h para luego determinar x y el espejo de agua, por lo tanto:

$$x = \left(\frac{A}{H}\right)h$$

Puesto que el espejo de agua es un rectángulo de largo L y ancho x, se puede calcular este en función de la carga hidráulica como:

$$\text{Área} = \text{largo} \times \text{ancho}$$

Ecuación N.º 13¹⁹

$$\text{Área} = (L) \left(\frac{A}{H}\right)h$$

Donde L, A y H son constantes y h se puede obtener experimentalmente.

Para el caso de que se trate de un canal (o vertedero rectangular), el área del espejo de agua sólo se calcula como:

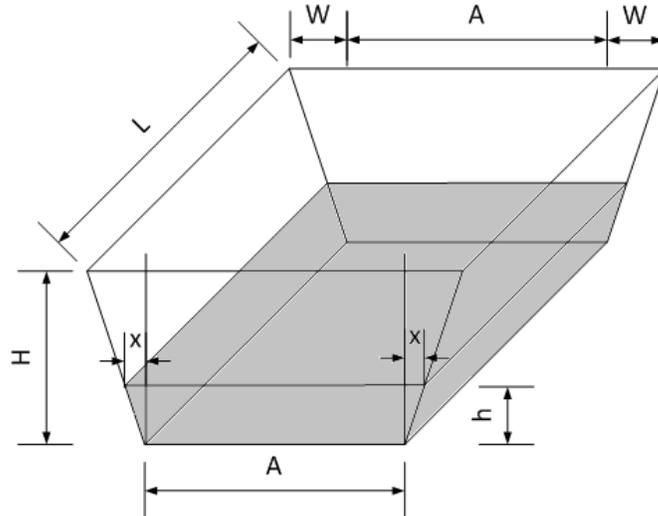
$$\text{Área} = \text{largo} \times \text{ancho}$$

$$\text{Área} = (L)h$$

En el caso de un canal (o vertedero) trapezoidal, el procedimiento es similar al triangular al momento de calcular una expresión para el espejo de agua.

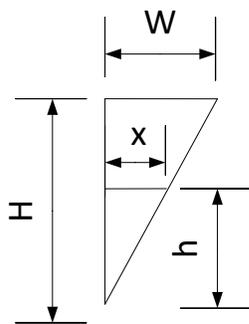
¹⁹ Ecuación deducida por el tesista.

Figura 5. **Carga hidráulica y espejo de agua de un canal trapezoidal**



Fuente: elaboración propia utilizando Microsoft® Visio 2010.

Realizando una semejanza entre triángulos se obtiene:



$$\frac{x}{W} = \frac{h}{H}$$

$$x = \left(\frac{W}{H}\right) h$$

Área = largo \times ancho

$$\text{Área} = \frac{1}{2} (L) \left(\frac{W}{H}\right) h$$

En la expresión anterior para el área del espejo de agua, se debe multiplicar por dos, debido a que se encuentran dos mitades de triángulo en dicho canal.

$$\text{Área} = (L) \left(\frac{W}{H} \right) h$$

Por lo tanto, el área del espejo total para un canal trapezoidal regular sería la suma del espejo de agua de un canal triangular junto con un rectangular, así:

Ecuación N.º 14²⁰

$$\text{Área} = (L) \left(\frac{W}{H} \right) h + LA$$

Dónde L, W, H y A son valores constantes y h se puede determinar experimentalmente. (Si h = 0, entonces el área del espejo de agua simplemente es largo por ancho inferior del canal).

2.4.1.3. Tipos de flujo

El flujo en canales abiertos se puede clasificar en función de la profundidad del líquido contenido en dicho canal.

- Flujo estable uniforme: se da cuando el flujo volumétrico (o descarga) se mantiene constante en la sección de interés y la profundidad del fluido no cambia. Para lograrlo, la sección transversal (o sección de interés) no debe cambiar a lo largo de su longitud. Un canal así recibe el nombre de prismático.
- Flujo estable variado: este ocurre cuando la descarga permanece constante pero la profundidad del fluido varía a lo largo de la sección de interés. Esto sucede si el canal no es prismático.

²⁰ Ecuación deducida por el tesista.

- Flujo inestable variado: tiene lugar cuando la descarga cambia con el tiempo originando modificaciones en la profundidad del líquido a lo largo de la sección de interés.
- Flujo variado con rapidez o flujo que varía en forma gradual: la diferencia entre estos se basa en la tasa de cambio de la profundidad según el lugar del canal.

Al igual que en el flujo en tuberías y conductos cerrados existe un número de Reynolds, hechos experimentales concluyen que en canales abiertos, los rangos son los siguientes:

- Flujo laminar $Re < 500$
- Flujo de transición $500 < Re < 2\ 000$
- Flujo turbulento $Re > 2000$

Este incluye a su vez estar relacionado con otro número adimensional denominado número de Froude (Fr) el cual también es útil en canales abiertos:

Ecuación N.º 15²¹

$$Fr = \frac{v_f}{\sqrt{g * Y_h}}$$

Donde:

v_f = velocidad de flujo.

g = aceleración de la gravedad.

Y_h = altura o profundidad hidráulica ($Y_h = A_s/T$, T = ancho de la superficie. en la parte superior del canal, A_s = área de la sección transversal).

²¹ MOTT, Robert. *Mecánica de fluidos*. p. 447.

Cuando Fr es igual a 1,0 el flujo se denomina flujo crítico; cuando Fr es menor a 1,0 es subcrítico; y cuando Fr es mayor a 1,0 el flujo se denomina supercrítico. Entonces se pueden listar algunas combinaciones de Fr con Re para dar los siguientes flujos o regímenes de flujo.

- Subcrítico – laminar: Re menor a 500 y Fr menor a 1,0
- Subcrítico – turbulento: Re mayor a 2000 y Fr menor a 1,0
- Supercrítico – turbulento: Re mayor a 2000 y Fr mayor a 1,0
- Supercrítico – laminar: Re menor a 500 y Fr mayor a 1,0

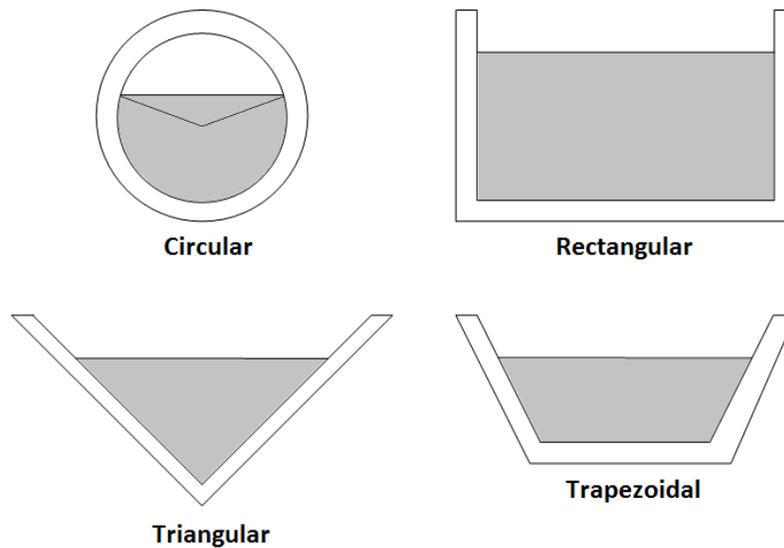
2.5. Geometrías de compuerta

El flujo en canales puede ser de diferentes formas como se mencionó anteriormente pero cabe resaltar que para calcular el espejo de agua como se indicó antes, la geometría del canal (o vertedero) juega un papel muy importante por lo que aquí se consideran las más utilizadas en diseños de vertederos.

Las formas más usadas en vertederos son la circular, rectangular, trapezoidal (Cipolletti) y triangular.

Existen otros tipos de geometrías pero estas son poco comunes: a) rectángulo con esquinas redondeadas, b) triángulo con fondo redondo y c) parábola. Las geometrías son parecidas pero el cálculo del espejo de agua como del flujo varía muy poco con sus semejantes para esquinas cuadradas.

Figura 6. **Geometrías de canales abiertos más comunes**



Fuente: elaboración propia utilizando Microsoft® Visio 2010.

2.6. Clasificación de los vertederos

Los vertederos se presentan en diferentes formas y su clasificación depende de factores tales como: espesor, forma geométrica e inclusive la longitud de la cresta. Según estos factores, la clasificación es la siguiente:

- Forma:
 - Simples: rectangulares, triangulares, circulares, entre otros.
 - Compuestos: secciones combinadas como los trapezoidales.

- Por el espesor de su pared:
 - Pared delgada: fabricados con placas de madera o biselada.

- Pared gruesa: fabricados con un espesor mayor a 0.66 veces la carga (0,66H)
- Por la longitud de la cresta:
 - Sin contracciones laterales: $X = A$
 - Con contracciones: $X < A$

2.6.1. Vertederos de pared delgada

Un vertedero es una obstrucción en el canal que hace que el líquido se represe detrás de él y fluya sobre este²². Son vertederos de cresta delgada o pared aguda. Estos son fabricados de una hoja de metal, o algún otro material de espesor pequeño o de madera biselada de modo que el agua atraviese con libertad conforme deja la cara aguas arriba del vertedero.

Para este tipo de vertederos debe existir una poza que amortigüe cualquier turbulencia y hace que el flujo sea de tipo laminar al momento de que se acerque al vertedero. Este debe tener un extremo delgado aguas arriba para que el flujo fluya libremente.

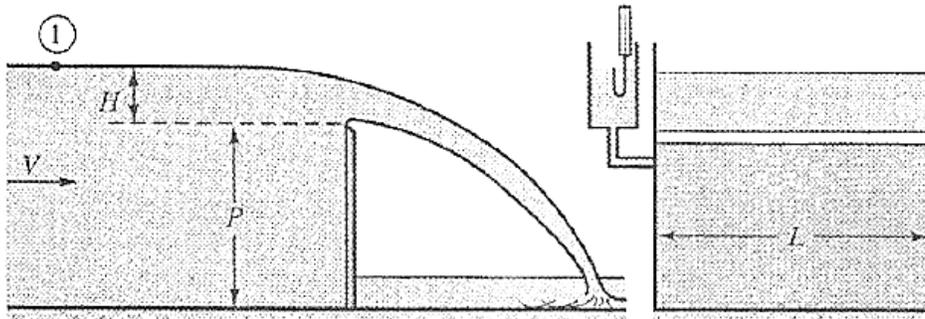
Al medir la altura de la superficie líquida aguas arriba, se puede determinar el flujo volumétrico del líquido en cuestión. Estos artefactos son construidos a partir de una lámina de metal u otro material (de preferencia que no se oxide en un corto tiempo y que no se descomponga al contacto con el líquido), de tal manera que el chorro o napa²³, salte libremente cuando deje la cara de aguas arriba. A estos se les conoce como vertederos de cresta

²² STREETER, Victor; WYLIE, Benjamin; BEDFORD, Keith. *Mecánica de fluidos*. p. 480.

²³ De ahora en adelante se escribirá el término napa para acostumbrar al lector a la terminología empleada en el flujo de canales abiertos.

delgada. Otro tipo son los vertederos de pared gruesa o cresta ancha, los cuales soportan el flujo en dirección longitudinal.²⁴

Figura 7. **Vertedero rectangular de cresta delgada**



Fuente: STREETER, Victor; WYLIE, Benjamin; BEDFORD, Keith. *Mecánica de fluidos*. p. 480.

2.6.2. Vertederos de pared gruesa

También llamados vertederos de cresta ancha. Este tipo de vertederos es utilizado principalmente para el control de niveles en los ríos o canales, pero pueden ser también calibrados y usados como estructuras de medición de caudal. Son estructuras fuertes que no son dañadas fácilmente y pueden manejar grandes caudales. Algunos tipos de vertederos de borde ancho son: vertedero de bordes redondeados, triangular y rectangular. Estas formas no son de compuertas.

El vertedero horizontal de bordes redondeados y el triangular, pueden utilizarse para un amplio rango de descarga y operan eficazmente aún con flujo con carga de sedimentos. El vertedero rectangular es un buen elemento de investigación para medición del flujo de agua libre de sedimentos.

²⁴ Estos no se estudiarán en el presente informe. Para consultar sobre estos revise su bibliografía sobre flujo en vertederos de pared ancha.

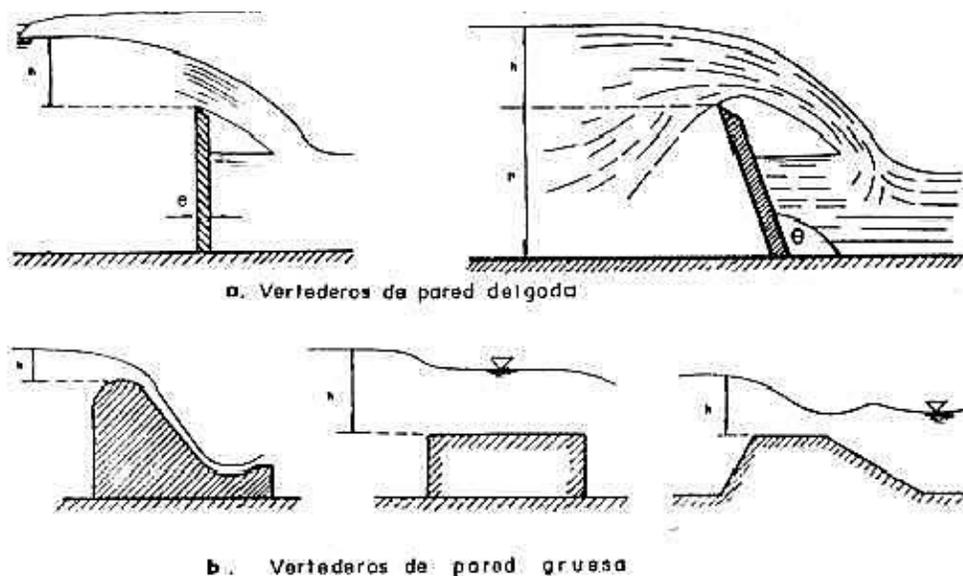
Es fácil de construir, pero su rango de descarga es más restringido que el de otros tipos.

2.7. Clasificación de los vertederos de pared delgada

En función del espesor de pared, en la figura 7 se mostraron los dos tipos: vertederos de pared delgada y de pared gruesa. Los más utilizados y de mayor importancia son los de pared delgada y entre estos se pueden mencionar los siguientes:

- Rectangular
- Circular
- Trapezoidal (también llamado vertedero de Cipolletti)
- Triangular (con forma de "V")

Figura 8. Clasificación de vertederos según espesor



Fuente: TORRES, Pablo. *Vertederos de pared delgada*.

<http://fluidos.eia.edu.co/hidraulica/articulos/es/medidores/vertpareddelg/vertpareddelg.html>.

Consulta: 15 de septiembre de 2015.

2.7.1. Ecuaciones para el cálculo de caudal para diferentes secciones geométricas de vertederos

Debido a la importancia de determinar los caudales o flujos volumétricos para un medidor dado, es necesario recurrir al uso de deducciones con el propósito de obtener ecuaciones en función de variables que puedan obtenerse empíricamente en la práctica. Para los vertederos de pared delgada se pueden obtener distintas ecuaciones para las diferentes geometrías de compuerta antes mencionadas.

2.7.2. Vertedero rectangular

El vertedero rectangular o vertedero suprimido tiene una cresta de longitud L que se extiende a todo el ancho del canal en el que se halla instalado. El diseño estándar requiere lo siguiente:

La altura de la cresta sobre el fondo del canal es $H_c \geq 3H_{max}$

La carga mínima sobre la cresta es $H_{min} > 0,2$ pie

La carga máxima sobre la cresta es $H_{max} < L/3$

Para un vertedero rectangular, la medición del caudal se da por:

Ecuación N.º 16²⁵

$$\dot{Q} = 3.33LH^{3/2}$$

Dónde L y H están en pies y \dot{Q} en pies³/s.

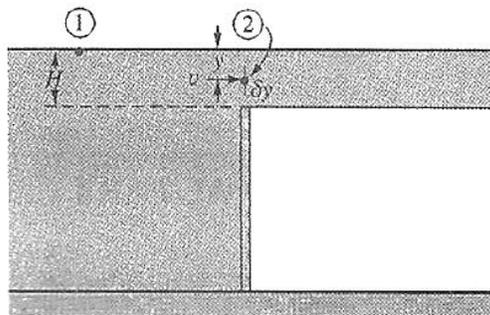
²⁵ MOTT, Robert. *Mecánica de fluidos*. p. 463.

El vertedero rectangular de pared delgada posee una cresta horizontal. La napa se contrae en la parte de arriba y en la parte de abajo como se muestra (figura 6). Si se desprecian las contracciones se puede deducir una ecuación para el caudal de modo que el flujo aparece como se muestra en la figura 8. En esta la napa tiene líneas de corriente paralelas y presión atmosférica a través de ella.

La ecuación de Bernoulli aplicada en los puntos 1 y 2 respectivamente, es:

$$H + 0 + 0 = \frac{v^2}{2g} + H - y + 0$$

Figura 9. **Napa del vertedero sin contracciones**



Fuente: STREETER, Víctor; WYLIE, Benjamin; BEDFORD, Keith. *Mecánica de fluidos*.
p. 480.

Reordenando y despejando v se obtiene:

$$v = \sqrt{2gy}$$

El caudal teórico Q_1 es:

$$Q_1 = \int v \, dA = \int_0^H vL \, dy = \sqrt{2gL} \int_0^H y^{1/2} \, dy$$

Ecuación N.º 17²⁶

$$\dot{Q}_1 = \frac{2}{3} \sqrt{2gL} H^{3/2}$$

En donde L es el ancho del vertedero. Los experimentos muestran que el exponente de H es correcto pero el coeficiente es demasiado grande. Las contracciones y las pérdidas reducen el caudal real alrededor del 62% del caudal teórico.

Ecuación N.º 18²⁷

$$\dot{Q}_1 = 3.33LH^{3/2} \quad (\text{unidades USC}^{28})$$

$$\dot{Q}_1 = 1.84LH^{3/2} \quad (\text{unidades SI})$$

Como se puede notar, la ecuación para las unidades USC es la misma que aparece como ecuación N.º 16.

2.7.3. Vertedero contraído

Un vertedero contraído es un tipo de vertedero rectangular que tiene sus lados extendidos hacia adentro por los lados del canal en una distancia de al menos $2H_{\max}$. La corriente del fluido debe entonces contraerse conforme el líquido fluye por los lados del vertedero, disminuyendo ligeramente la longitud efectiva del vertedero. Los diseños estándar de este tipo requieren:

²⁶ STREETER, Víctor; WYLIE, Benjamin; BEDFORD, Keith. *Mecánica de fluidos*. p. 480.

²⁷ *Ibíd.*

²⁸ Sistema libra-pie-segundo o sistema común US (USC, por sus siglas en inglés).

- La altura de la cresta sobre la plantilla del canal es $H_c \geq 2H_{max}$
- La carga mínima sobre la cresta es $H_{min} > 0.2 \text{ pie}$
- La carga máxima sobre la cresta es $H_{max} < L/3$

Para un vertedero contraído, la medición del caudal se da por:

$$\text{Ecuación N.º 19}^{29}$$

$$\dot{Q} = 3.33(L - 0.2H)H^{3/2}$$

Donde L y H están en pies y \dot{Q} en pies³/s.

2.7.4. Vertedero triangular

El vertedero triangular se emplea sobre todo para bajos flujos volumétricos porque la ranura en forma de V produce una carga H más grande que puede obtenerse con una ranura rectangular. El ángulo de la ranura en V es un factor en la ecuación de descarga. Se prefieren ángulos entre 35° y 120°, pero los que se usan con mayor frecuencia son los de 60° y 90°. Para la medición del caudal teórico de un vertedero triangular se usa la ecuación siguiente:

$$\text{Ecuación N.º 20}^{30}$$

$$\dot{Q} = \frac{8}{15} C \sqrt{2g} * \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) H^{5/2}$$

Dónde θ es el ángulo total incluido entre los lados de la ranura. Una simplificación adicional de la ecuación anterior es:

²⁹ MOTT, Robert. *Mecánica de fluidos*. p. 463.

³⁰ *Ibíd.* p. 464.

Ecuación N.º 21³¹

$$\dot{Q} = 4.28C * \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) H^{5/2}$$

El valor de C depende de la carga H pero un valor nominal de 0.58. Con este valor de C y los ángulos de 60° y 90° se obtiene:

Ecuación N.º 22³²

$$\dot{Q} = 1.43H^{5/2}(60^\circ \text{ ranura})$$

Ecuación N.º 23³³

$$\dot{Q} = 2.48H^{5/2}(90^\circ \text{ ranura})$$

Existen otras ecuaciones que son muy parecidas y válidas a las que se muestran y se encuentran en la literatura sobre la materia³⁴.

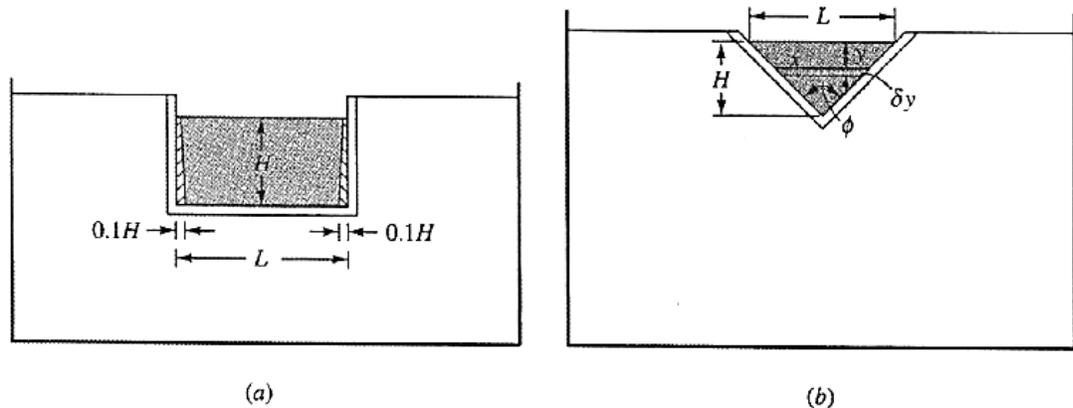
³¹ MOTT, Robert. *Mecánica de fluidos*. p. 464.

³² *Ibíd.*

³³ *Ibíd.*

³⁴ STREETER, Victor; WYLIE, Benjamin; BEDFORD, Keith. *Mecánica de fluidos*. p. 480 a 483.

Figura 10. **Vertederos: (a) horizontal con contracciones de extremo y (b) vertedero de ranura en V**



Fuente: STREETER, Victor; WYLIE, Benjamin; BEDFORD, Keith. *Mecánica de fluidos*. p. 480 a 483.

2.7.5. Vertedero trapezoidal o Cipolletti

El vertedero Cipolletti es uno similar al anterior porque es contraído respecto de los lados de la corriente, en una distancia de al menos $2H_{max}$ y tiene sus lados con pendiente hacia afuera. Se aplican los mismos requerimientos para un vertedero rectangular contraído. La ecuación para este tipo para la medición del caudal es:

Ecuación N.º 24³⁵

$$\dot{Q} = 3.367LH^{3/2}$$

Donde L y H están en pies y \dot{Q} en pies³/s.

³⁵ MOTT, Robert. *Mecánica de fluidos*. p. 463.

El ajuste de la longitud que se incluye para el vertedero rectangular contraído no se aplica en este caso porque los lados en pendiente tienden a compensarse.

2.7.6. Vertedero circular

Este es el menos común entre los anteriores; pero sin embargo, en el presente estudio y en el diseño de la unidad de vertedero a construir se tomará en cuenta dicha geometría.

Algunas de las ventajas de este es la facilidad en su construcción y el de no requerir algún tipo de nivelamiento de su cresta debido a la forma geométrica que presenta.

Para este tipo de vertederos, Azevedo y Acosta en su *Manual sobre hidráulica*, presenta la siguiente ecuación en unidades SI dando los resultados en m³/s.³⁶

$$\text{Ecuación N.º 25}^{37}$$
$$Q = 1.518D^{0.693}H^{1.807}$$

En caso de unidades de l/s se puede utilizar la siguiente expresión:

$$\text{Ecuación N.º 26}^{38}$$
$$Q = 0.01518D^{0.693}H^{1.807}$$

³⁶ LUX MONROY, Manuel. *Medidores de flujo en canales abiertos*. p. 18.

³⁷ DE AZEVEDO, J.; ACOSTA Guillermo. *Manual de hidráulica*. p. 96.

³⁸ *Ibíd.*

2.8. Análisis dimensional

Muchos problemas de ingeniería no pueden resolverse de manera completa por fundamentos teóricos. Los problemas de este tipo son muy frecuentes y se presentan en operaciones de flujo de fluidos, transferencia de calor y de masa y debido a esto se recurre a la experimentación empírica.

Para este caso existe un método intermedio entre el desarrollo matemático y laborioso y los resultados empíricos. Este se basa en el hecho de que si existe una ecuación teórica entre las variables que afectan a un fenómeno físico dado, dicha ecuación debe ser dimensionalmente homogénea. Dicho método se denomina *análisis dimensional* el cual es un análisis algebraico de los símbolos para unidades consideradas independiente de la magnitud. El análisis dimensional es una herramienta muy útil puesto que mezcla conocimientos teóricos con resultados empíricos para formular relaciones que expliquen el comportamiento de un fenómeno dado.

El teorema π (pi) de Vaschy-Buckingham es el teorema fundamental del análisis dimensional el cual establece que dada una relación física que puede expresarse mediante una ecuación en la que están involucradas “n” magnitudes físicas o variables y dichas magnitudes se expresan en función de “k” cantidades físicas dimensionalmente independientes, entonces la ecuación original puede escribirse como una ecuación con una serie “n-k” números adimensionales contruidos con las variables originales.

En el texto *Principios de operaciones unitarias* de Alan S. Foust y colaboradores se expone el método Rayleigh, método muy similar al de Vaschy-Buckingham, con la particularidad de que cualquier ecuación para ser completa deberá formarse de variables y constantes de proporcionalidad en la forma de

dos términos: uno derecho y uno izquierdo de modo que ambos sean dimensionalmente homogéneos de ambos lados.

Dos grupos adimensionales que se presentan en el estudio del flujo de fluidos en canales abiertos comprenden el número de Reynolds (Re) y el número de Froude (Fr), los cuales son de gran importancia para caracterizar el tipo de régimen que se encuentran en dichos canales. En la siguiente tabla se muestran algunos otros grupos adimensionales que se utilizan en la mecánica de fluidos, la transferencia de calor y en la transferencia de materia.

Tabla I. Grupos adimensionales

No.	Símbolo	Nombre	Definición
1	Bi	Número de Biot	$\frac{hs}{k} \frac{hr_m}{k}$
2	C_D	Coefficiente de arrastre	$\frac{F_D/A_p}{\rho u_0^2/2}$
3	Fo	Número de Fourier	$\frac{\alpha t}{r^2}$
4	Fr	Número de Froude	$\frac{u^2}{gL}$
5	f	Factor de fricción de Fanning	$\frac{\Delta p_s D}{2L\rho\bar{V}^2}$
6	Gr	Número de Grashof	$\frac{L^3 \rho^2 \beta g \Delta T}{\mu^2}$
7	Gz	Número de Graetz	$\frac{\dot{m} C_p}{kL}$
8	Gz'	Número de Graetz para transferencia de materia	$\frac{\dot{m}}{\rho D_v L}$
9	j_H	Factor de transferencia de calor	$\frac{h}{c_p G} \left(\frac{c_p \mu}{k}\right)^{2/3} \left(\frac{\mu_w}{\mu}\right)^{0.14}$
10	j_M	Factor de transferencia de materia	$\frac{k \bar{M}}{G} \left(\frac{\mu}{D_v \rho}\right)^{2/3}$
11	Ma	Número de Mach	$\frac{u}{a}$
12	Nu	Número de Nusselt	$\frac{hD}{k}$
13	Pe	Número de Peclet	$\frac{D\bar{V}}{\alpha} \quad o \quad \frac{Du_0}{D_v}$
14	Pr	Número de Prandtl	$\frac{c_p \mu}{k}$
15	Re	Número de Reynolds	$\frac{DG}{\mu} \quad o \quad \frac{Dv\rho}{\mu}$
16	Sc	Número de Schmidt	$\frac{\mu}{D_v \rho}$

Continuación Tabla I.

17	Sh	Número de Sherwood	$\frac{k_c D}{D_v}$
18	St	Número de Stanton	$\frac{h}{c_p G}$
19	We	Número de Weber	$\frac{D \rho \bar{V}^2}{\sigma}$

Fuente: MCCABE, Warren; SMITH, Julian; HARRIOTT, Peter. *Operaciones unitarias en ingeniería química*. p. 1142 y 1143.

Tabla II. **Nomenclatura de símbolos – grupos adimensionales**

Símbolo	Definición	Símbolo	Definición
h	Coeficiente de transferencia de calor individual o de superficie	g	Aceleración gravitacional
s	Mitad del espesor del bloque	L	Longitud
r_m	Radio del cilindro sólido o esfera	Δp_s	Caída de presión por la fricción de superficie
k	Conductividad térmica	D	Diámetro
F_D	Fuerza de rozamiento total	\bar{V}	Velocidad media del fluido en la dirección x
A_p	Área proyectada de la partícula	β	Coeficiente de expansión volumétrica
ρ	Densidad del fluido	ΔT	Caída de temperatura
u_0	Velocidad de la corriente que se aproxima	μ	Viscosidad absoluta
α	Difusividad térmica, $k/\rho c_p$	\dot{m}	Velocidad de flujo másico
t	Tiempo	c_p	Calor específico a presión constante
r	Distancia radial o radio	D_v	Difusividad de masa
u	Velocidad del fluido o partícula	G	Velocidad másica

Continuación Tabla II.

μ_w	Valor de la viscosidad absoluta para la temperatura de la pared	\bar{M}	Valor medio del peso molecular
a	Velocidad acústica en el fluido	k_c	Coefficiente individual de transferencia de materia
σ	Tensión en la superficie de contacto		

Fuente: elaboración propia.

3. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1. Variables

El estudio de las variables que se ven involucradas en el flujo de fluidos son de dos tipos: a) en función de los factores del equipo y b) factores perturbadores o que afectan al sistema pero no pertenecen al mismo.

En función de los factores del equipo se pueden mencionar las componentes materiales que integrarán el equipo armado: altura de la cresta, las dimensiones del equipo, el tipo de bomba que se utilizará para bombear el fluido, el material del cual se fabricará dicho equipo y los tipos de compuerta que se utilizarán.

Entre los factores perturbadores ajenos al equipo se pueden tener: la temperatura y la presión, la mano de obra, el tiempo, la precisión en la fabricación del equipo (es decir, el corte de las piezas para la construcción del equipo), entre otras que se puedan considerar y que puedan afectar al investigador.

Tabla III. Tipos de variables

En función de los factores del equipo	Factores perturbadores
<ul style="list-style-type: none"> • Dimensiones del equipo <ul style="list-style-type: none"> ○ Dimensiones del canal, pila, depósito de agua, ○ Dimensiones del esqueleto metálico • Materiales del equipo <ul style="list-style-type: none"> ○ Acero, hierro, etc. ○ PVC ○ Plexiglás ○ Plástico • Tipo de bomba a utilizar • Tipos y/o formas geométricas de compuerta a utilizar 	<ul style="list-style-type: none"> • Precisión en los cálculos de diseño • Mano de obra para el montaje del equipo • Precisión en la calibración del equipo • Fabricación de las compuertas a utilizar

Fuente: elaboración propia.

3.2. Delimitación del campo de estudio

El estudio del flujo de fluidos en canales abiertos se limita principalmente al sistema armado de vertedero con sus compuertas y lo que engloba a este, el cual se centra en el Laboratorio de Ingeniería Química.

3.3. Recursos humanos disponibles

Entre los recursos humanos disponibles se encuentran:

- * Investigador: Juan Diego Velásquez López
- * Asesor: Ing. Qco. Jorge Emilio Godínez Lemus
- * Otro: Auxiliar (mano de obra: herrería, soldadura, montaje, electricidad, entre otras).

3.4. Recursos materiales disponibles

En la siguiente tabla se muestra una lista de materiales que se utilizaron para implementar el equipo didáctico de flujo de fluidos en canales abiertos.

- Materiales de oficina (lapiceros, lápices, borradores, papel, folders, sobres).
- Libros de texto de la materia y otros auxiliares.
- Computadora.
- Impresora.
- Conexión a Internet.
- Materiales y herramientas para la construcción del equipo:
 - Láminas de metal 3/16 para la construcción de la estructura/soporte.
 - Bomba hidroneumática ½ Hp con sus respectivos accesorios.
 - Tubería de PVC de ¾" para todo el sistema.
 - Accesorios de PVC de ¾" excepto en algunas uniones de la bomba.
 - Tornillos varios tamaños.
 - Contador de galones.
 - Fibra de vidrio (piezas fabricadas según diseño especificado, grosor 5 mm).
 - Foamy (como empaque).

- Canicas o cincos de 1" de diámetro.
- Dos válvulas: Una de compuerta y una de bola.
- Manguera hidráulica con abrazaderas.
- Tres metros de cable TSJ calibre 12 junto con tres metros de "flexitubo" para la protección del mismo.
- Abrazaderas tipo omega para sujetar el flexitubo a la estructura.
- Una botonera para accionar la bomba.

3.5. Técnica cualitativa

El estudio del flujo de fluidos en canales abiertos se centra principalmente en el diseño y construcción de equipo didáctico para el estudio de medidores tipo vertedero para el cual se construyó un equipo el cual consistió en una caja rectangular cual se le fueron añadiendo diferentes tipos de compuerta (rectangular, triangular y trapezoidal). El análisis del proyecto se basó en el estudio de las variables involucradas según el análisis dimensional para el estudio del flujo de fluidos en canales abiertos.

Para poder afirmar el funcionamiento del equipo, se realizaron pruebas de la unidad de vertedero al utilizar los tipos de compuerta especificados en el marco teórico con el propósito de descartar imperfecciones y fugas en el mismo para ir arreglando cualquier anomalía en el sistema hidráulico como lo es en la instalación eléctrica de la bomba.

Como se mencionó en apartados anteriores, al presente trabajo se le dieron dos tipos de enfoque: cualitativo y cuantitativo. El enfoque cualitativo se relaciona directamente con la interpretación de los resultados con base en el equipo construido, sus características físicas y de las variables involucradas.

También cabe especificar el manual como herramienta adicional al equipo para su óptimo funcionamiento.

El enfoque cuantitativo se verá reflejado por los resultados obtenidos en cuanto a cálculos de diseño y rediseño del equipo en su forma global así como en el nivel detallado de cada una de las piezas que integran el sistema.

3.6. Recolección y ordenamiento de la información

Para la recolección de datos del funcionamiento del equipo, no fueron necesarias datos numéricos puesto que solamente se trata de un diseño e implementación de un equipo de flujo de fluidos en canales abiertos; solo se consideraron aspectos de diseño en cuanto a tamaño de los componentes del sistema. Se deja que los estudiantes realicen las pruebas necesarias en cuanto a diseño de investigación en los grupos de laboratorio.

Del diseño de investigación propuesto por el investigador cabe resaltar el número de corridas necesarias para determinar la masa, tiempo y altura de agua para cada tipo de compuerta del equipo a probar, para lo cual fue necesario definir el número de tratamientos y repeticiones a realizar a partir de la siguiente expresión.

Ecuación N.º 27³⁹

$$N = \frac{Z_{\alpha/2}^2 PQ}{E^2}$$

³⁹ WALPOLE, Ronald; MYERS, Raymond; MYERS, Sharon; YE, Keying. *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias*. p. 277.

Donde:

N = número de tratamientos y repeticiones

$Z_{\alpha/2}$ = grado de confiabilidad (95 %)

P = probabilidad de éxito

Q = probabilidad de fracaso

E = error estimado

Para un nivel de confianza de 95 % ($Z_{\alpha/2} = 1,96$), P = 0,95, Q = 0,05 y un error estimado del 20 % se puede obtener lo siguiente:

$$N = \frac{(1.96)^2(0.95)(0.05)}{(0.20)^2}$$

$$N = 4.5619 \cong 5$$

Con el resultado anterior se puede afirmar que es necesario realizar cinco tratamientos y cinco repeticiones para poder establecer un modelo matemático para determinar el caudal para cada tipo de compuerta al variar el flujo de agua.

3.7. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

Puesto que la información que se calculó solamente es con base en el diseño de equipo, la información recolectada es simplemente la encontrada en la literatura tomando parámetros de diseño necesarios para elaborar el equipo que se implementa.

3.8. Análisis estadístico

El análisis estadístico necesario para el análisis de los resultados del estudio del flujo de fluidos en canales abiertos se limita solamente al cálculo de las medidas de tendencia central tales como la media o promedio, mediana y desviación estándar y la varianza además de tener en cuenta la incertidumbre absoluta. También se debe considerar algunas pruebas tales como la t-Student como la Q de Dixon o en algunos casos un análisis de ANOVA; todo dependerá del diseño de investigación y/o informe de preparación por parte de los estudiantes que conforman los grupos de laboratorio.

3.8.1. Dato promedio

El promedio o media permite obtener un valor representativo para cada una de las variables de medición tomando en cuenta así los factores perturbadores que pudieron afectar al sistema en su funcionamiento.

Ecuación N.º 28⁴⁰

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

Donde:

\bar{X} = media de la muestra

x_i = dato conocido

n = número de datos en la muestra

⁴⁰ WALPOLE, Ronald; MYERS, Raymond; MYERS, Sharon; YE, Keying. *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias*. p. 11.

3.8.2. Desviación estándar

La desviación estándar permite calcular la dispersión o aleatoriedad de los valores de las variables respecto de sus valores significativos el cual representó los errores aleatorios causados por varios factores incluyendo los perturbadores.

Ecuación N.º 29⁴¹

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2}{n - 1}}$$

Donde:

S = desviación estándar

x_i = dato conocido

3.9. Plan de análisis de resultados

En el plan de análisis de los resultados no se incluirá un análisis muy riguroso puesto que no se trata específicamente de una investigación de carácter experimental sino de la implementación de un equipo para el flujo de fluidos en canales abiertos para el cual se realizarán futuras experimentaciones por parte de los estudiantes de la Escuela de Ingeniería Química siguiendo el manual del equipo

⁴¹ WALPOLE, Ronald; MYERS, Raymond; MYERS, Sharon; YE, Keying. *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias*. p. 15.

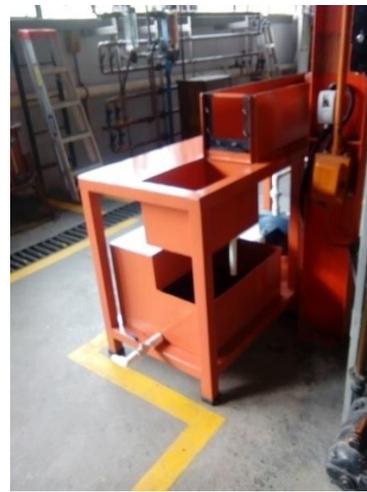
3.9.1. Programas a utilizar para el análisis de datos

El programa a utilizar para el análisis de datos será Microsoft Excel por la sencillez y facilidad de manejo de datos estadísticos.

4. RESULTADOS

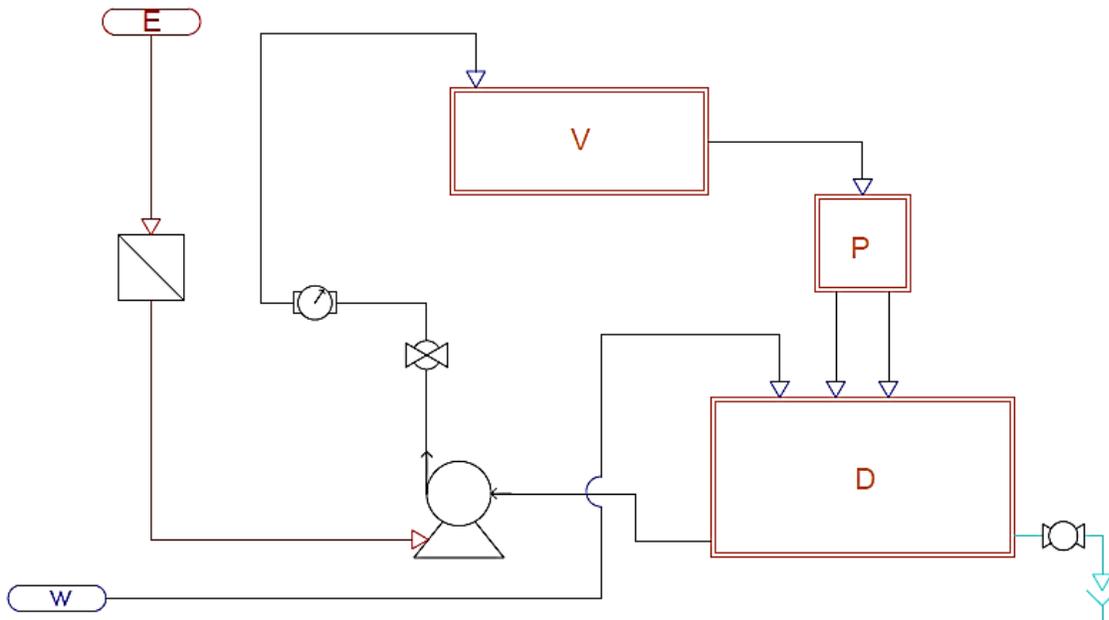
En esta sección se presentan los resultados finales obtenidos a partir de los diseños elaborados en etapas preliminares.

Figura 11. **Montaje final del vertedero**



Fuente: elaboración propia, Laboratorio de Operaciones Unitarias, Facultad de Ingeniería.

Figura 12. Diagrama de flujo – vertedero

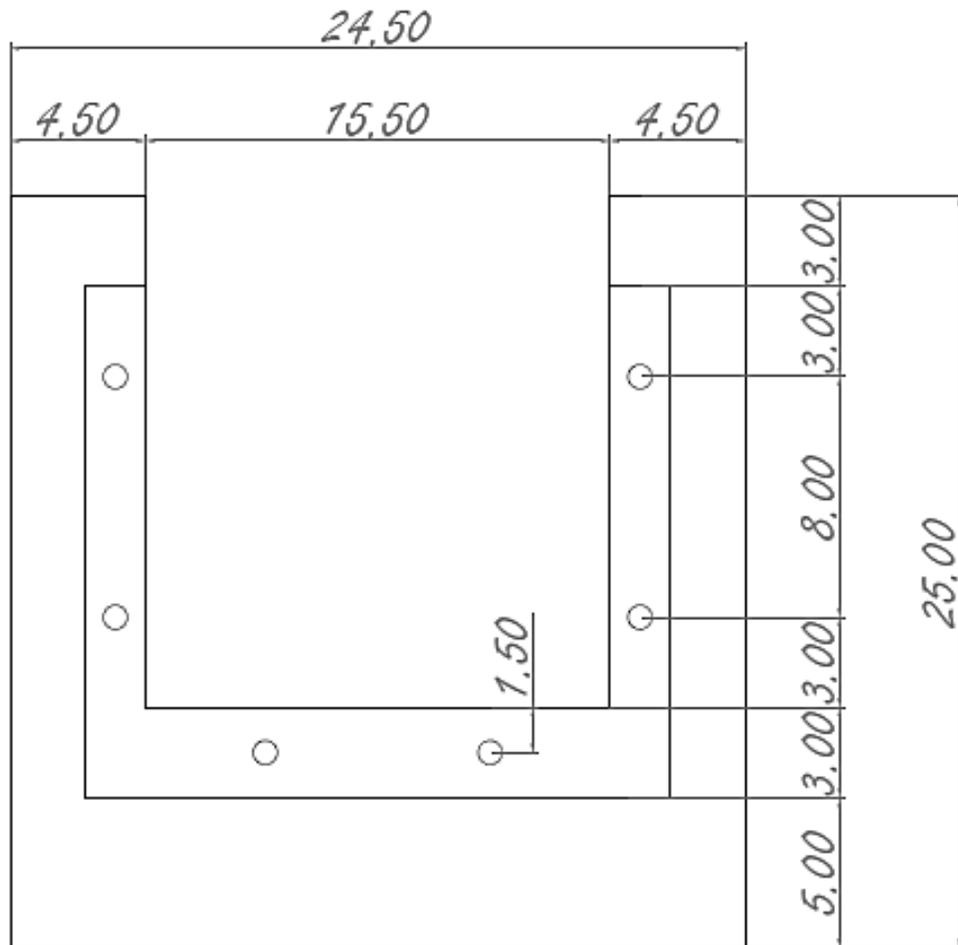


NOMENCLATURA		
No.	SIGNIFICADO	SÍMBOLO
1	Canal + Vertedero	V
2	Pila	P
3	Depósito	D
4	Bomba periférica	
5	Válvula de compuerta	
6	Válvula de bola	
7	Cuenta galones	

NOMENCLATURA		
No.	SIGNIFICADO	SÍMBOLO
8	Switch de encendido/apagado	
9	Drenaje	
10	Línea eléctrica	
11	Agua	
12	Línea de electricidad	
13	Línea de agua	
14	Línea de drenaje	

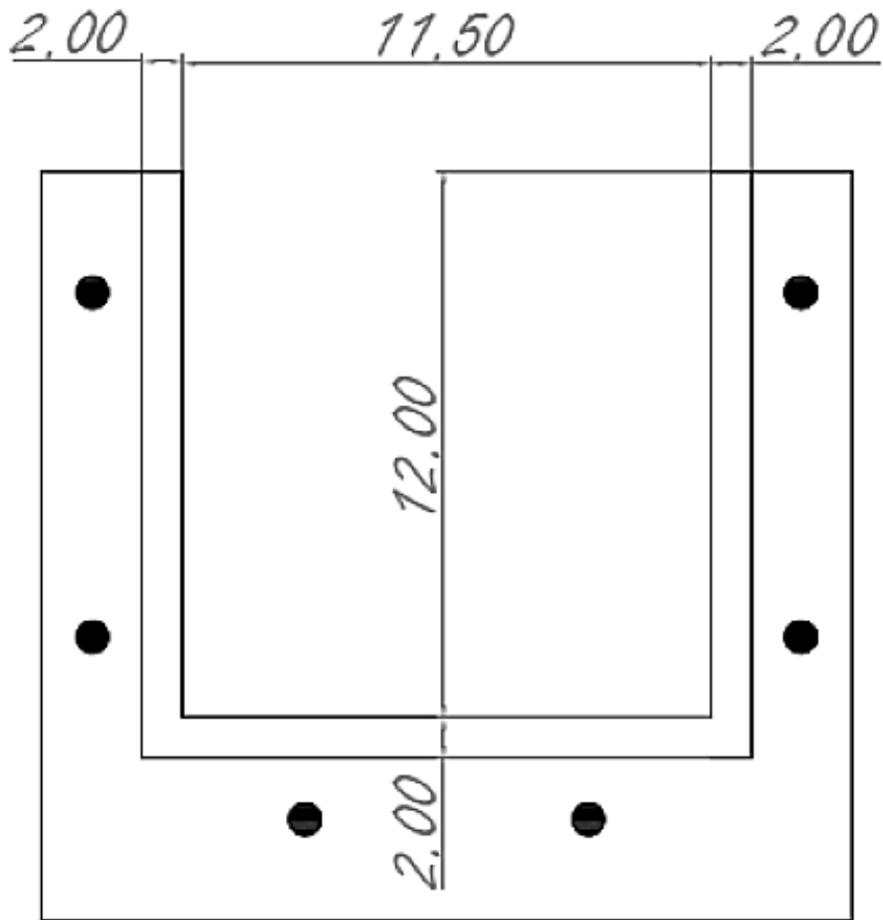
Fuente: elaboración propia, Laboratorio de Operaciones Unitarias, Facultad de Ingeniería.

Figura 13. **Soporte de vertedero**



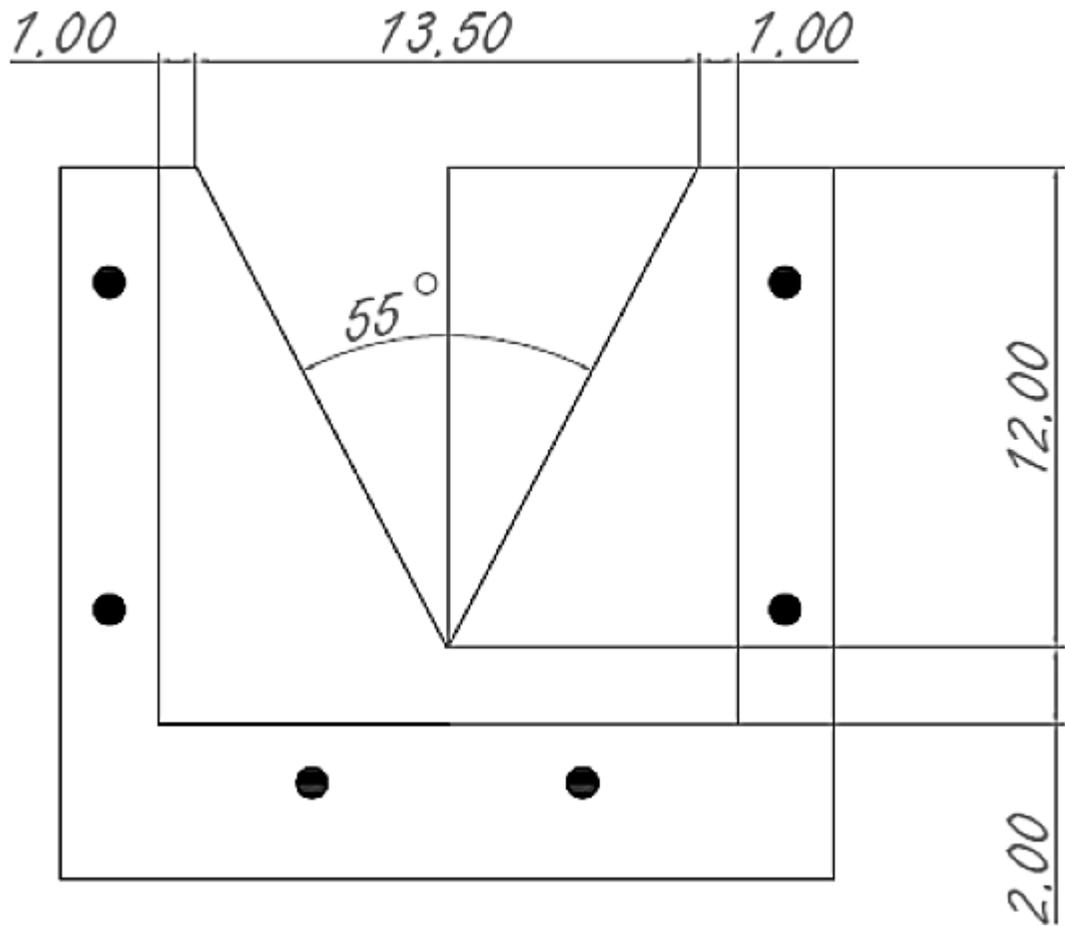
Fuente: elaboración propia, Laboratorio de Operaciones Unitarias, Facultad de Ingeniería.

Figura 14. **Vertedero rectangular**



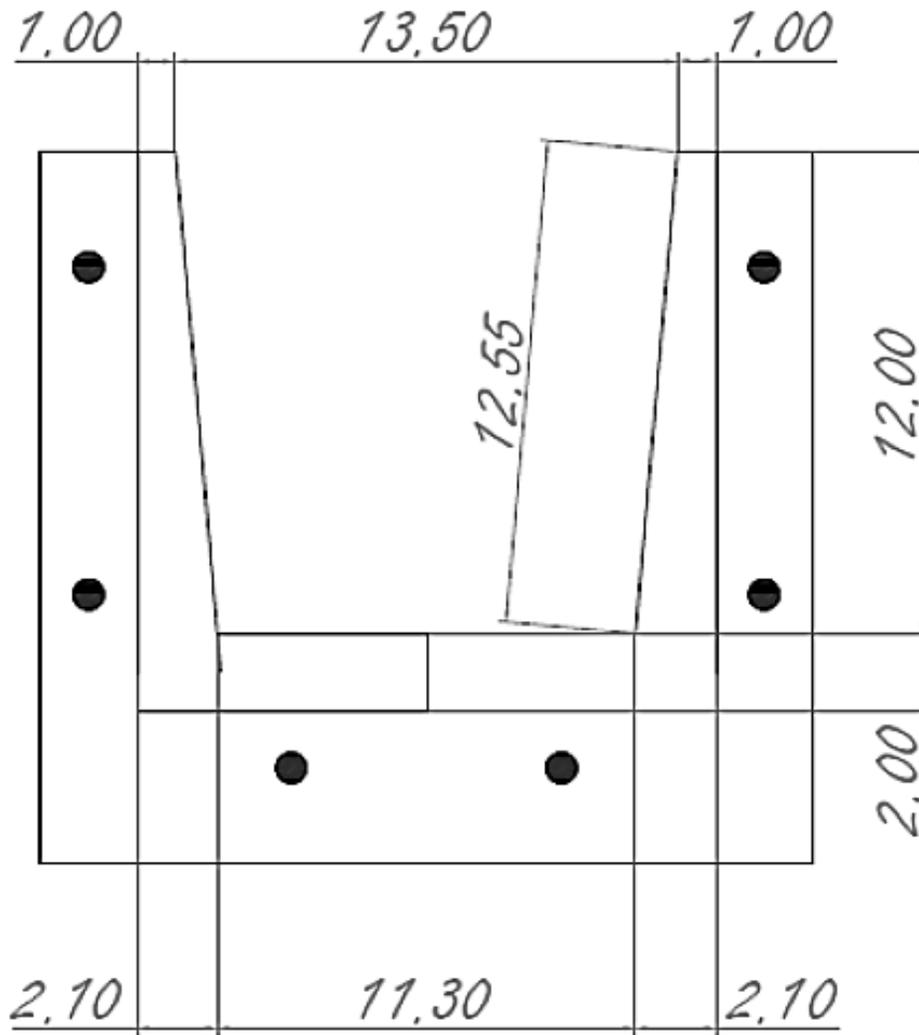
Fuente: elaboración propia, Laboratorio de Operaciones Unitarias, Facultad de Ingeniería.

Figura 15. **Vertedero triangular**



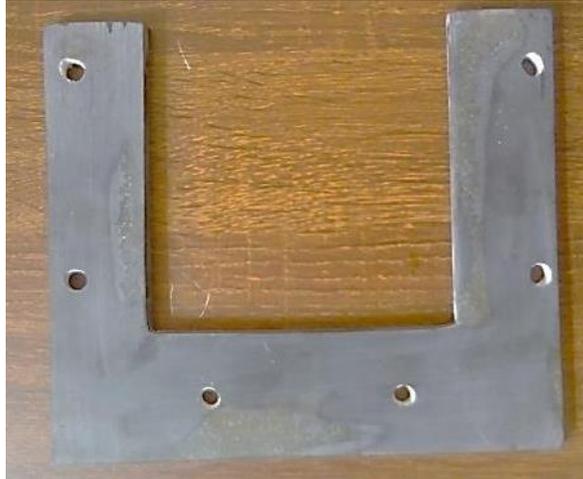
Fuente: elaboración propia, Laboratorio de Operaciones Unitarias, Facultad de Ingeniería.

Figura 16. **Vertedero trapezoidal o Cipolletti**



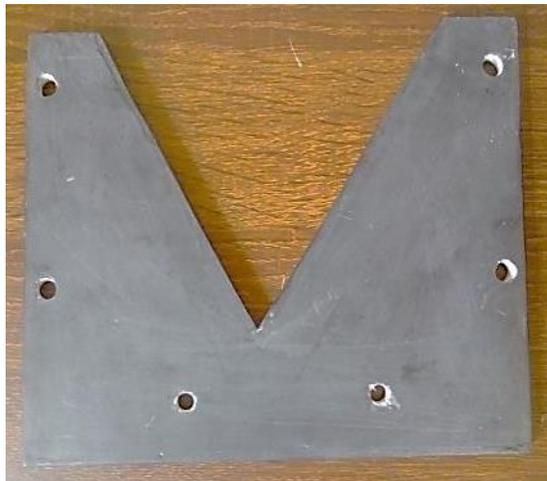
Fuente: elaboración propia, Laboratorio de Operaciones Unitarias, Facultad de Ingeniería.

Figura 17. **Vertedero rectangular en fibra de vidrio**



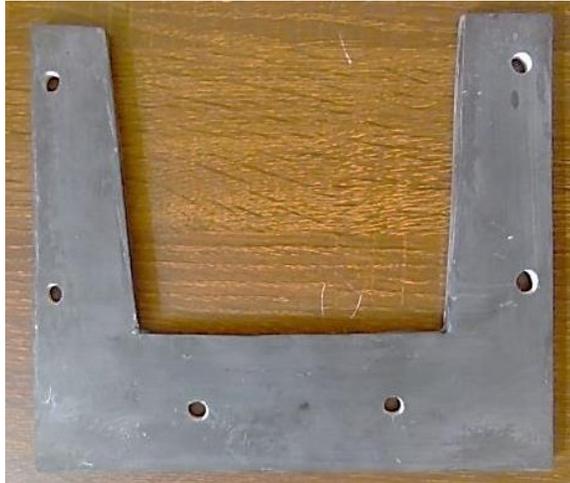
Fuente: elaboración propia.

Figura 18. **Vertedero triangular en fibra de vidrio**



Fuente: elaboración propia.

Figura 19. **Vertedero trapezoidal (o Cipolletti) en fibra de vidrio**



Fuente: elaboración propia.

En las siguientes fotografías se podrán observar los resultados finales del montaje realizado en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Escuela de Ingeniería Química de la USAC con la colaboración del Ing. Qco. Jorge Godínez.

En el apéndice se muestra el instructivo el cual consiste en una propuesta para una práctica a realizar en el banco hidráulico.

Cabe destacar también los resultados desde el punto de vista económico, el tiempo utilizado para la elaboración del diseño y el montaje del equipo de vertedero, el trabajo de graduación en conjunto debido a que no se trató sólo de un diseño sino también de su implementación dentro del Laboratorio de Ingeniería Química. Se presentan parte de los gastos realizados y el tiempo invertido en la elaboración del banco hidráulico el cual no incluye el

costo de la bomba y del cuenta galones los cuales fueron recibidos por parte del asesor.

Tabla IV. **Gastos económicos**

No.	Descripción	Costo (Q)
1	Materiales y fabricación del soporte metálico para el banco hidráulico	4000,00
2	Lista de materiales y accesorios	179,00
3	1 Switch de sobreponer 2x32 A, 125/250 V	115,25
4	Accesorios varios (abrazaderas, cables, brocas para taladro, sierra, tornillos, etc.)	200,00
5	Combustible del vehículo	500,00
6	Fibra de vidrio	525,00
7	Impresiones en blanco y negro	
	* Diseño de Investigación	150,00
	* Diseños y otros	50,00
	* Informe final	300,00
8	Varios (comida, parqueo, gasto de materiales de prueba)	300,00
Total		6319,25

Fuente: elaboración propia.

Tabla V. **Tiempo aproximado en la realización del trabajo de graduación**

Persona encargada	Parte del proyecto realizado	Tiempo utilizado (en horas)
Tesista	Diseño del equipo	2 horas/semana 6 semanas Total = 12 horas
Asesor	Revisión del diseño del equipo	Total = 3 horas
Tesista	Fabricación de algunas piezas del equipo (ej. Soporte de banco hidráulico)	1 semana (a partir del aprobación del diseño del soporte del banco) Total = 14 horas
Tesista	Montaje del equipo	4 semanas, 3 días/semana, 4 horas/día Total = 48 horas
Asesor	Supervisión del montaje del equipo	semanas, 3 días/semana, 4 horas/día Total = 48 horas
Tesista	Pruebas de funcionamiento	4 semanas, 3 días/semana, 4 horas/día Total = 48 horas
Asesor	Revisión y supervisión de pruebas de funcionamiento	4 semanas, 3 días/semana, 4 horas/día Total = 48 horas
Tesista	Elaboración del informe final	1 semana, 5 días/semana, 2 horas/día Total = 10 horas
Tesista	Elaboración del instructivo del usuario como del mantenimiento del equipo	2 semanas, 5 días/semana, 0.5 horas/día Total = 5 horas
Tesista	Elaboración de artículos del informe final	4 días, 1 hora/día Total = 4 horas
Asesor	Revisión de documentos de informe final	1 semana, 1 hora/día Total = 7 horas
Tesista	Corrección de documentos de informe final	1 semana, 2 horas/día Total = 14 horas
Total		261 horas

Fuente: elaboración propia.

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

De acuerdo a las fotografías, se pudo implementar un sistema hidráulico que consiste en un banco hidráulico de pruebas para la medición de caudales por parte de los estudiantes con el propósito de estudiar el flujo de fluidos en canales abiertos. Se tomó como base un prototipo al cual le serán añadidos algunos otros accesorios con el fin de mejorar el sistema. El propósito particular en este caso es la medición de caudales al compararlo con el contador de galones el cual se encuentra instalado en el sistema descrito.

Es indispensable que el estudiante conozca el fundamento teórico que involucra el flujo en canales abiertos como también su relación con el análisis dimensional; es decir, con las variables que se toman en cuenta en el sistema en estudio. Cuando se habla de las variables que tienen relación con el sistema, también cabe destacar los números adimensionales: el número de Reynolds (Re) y el número de Froude (Fr), los cuales son importantes en el desarrollo de un sistema de flujo de fluidos.

Además del fundamento teórico, también deben conocerse las características del equipo las cuales se encuentran descritas en el instructivo que se proporcionó junto con el sistema. Dicho instructivo contiene una práctica sobre el uso del banco hidráulico diseñado e implementado por el tesista con ayuda de su asesor en el Laboratorio de Ingeniería Química de la Facultad de Ingeniería de la USAC; como también otros puntos que se detallan en el siguiente párrafo.

Este instructivo trata varios puntos:

1. Los objetivos de la práctica, es decir, la parte teórica como la parte práctica que el estudiante debe saber al finalizar el procedimiento de la medición de caudales.
2. La parte teórica, en resumen, la cual puede el estudiante complementar con su propia bibliografía.
3. El procedimiento detallado del uso del banco hidráulico. Se incluye un diagrama de flujo para un mejor entendimiento de lo que se quiere lograr al finalizar la práctica.
4. Como reportar los resultados luego de realizar cada uno de los pasos descritos en el tercer punto.
5. El mantenimiento del banco hidráulico con el propósito de brindar a los estudiantes un equipo en buen estado para futuras modificaciones.
6. Posibles sugerencias al estudiante en cuanto a futuras modificaciones que se le pudieran realizar al banco hidráulico con el propósito de mejorar la enseñanza en el curso de Operaciones Unitarias I de la carrera de Ingeniería Química.
7. Bibliografía utilizada y recomendada tanto para la sección teórica como para el informe de realización de la práctica descrita.
8. Anexos: en esta sección se incluye el diagrama de flujo del sistema con su respectiva nomenclatura.

Con estos puntos se puede afirmar si el estudiante conoce los fundamentos básicos en el estudio de flujo de fluidos en la medición de caudales en un banco hidráulico. De lo anterior también se puede tener constancia que al conocer con profundidad el sistema y tener una visión ingenieril, se le podrán realizar futuras modificaciones al banco hidráulico con el propósito de mejorar la práctica que se propone o agregar alguna otra

relacionada con el flujo en canales abiertos teniendo ya un prototipo establecido.

De la tabla N.º IV sobre los gastos económicos solamente se puede afirmar que a pesar del costo aproximado realizado (Q. 6 319,25), resulta una buena inversión debido a que no sólo se deja cualquier equipo sino una herramienta que puede servir como objeto de enseñanza y como prototipo para futuras instalaciones por parte del catedrático y de los estudiantes.

En la tabla N.º V se muestra un detalle del tiempo invertido en el diseño y montaje del equipo. El tiempo considera al invertido por el tesista y por su respectivo asesor. Cabe destacar que este solo es un tiempo aproximado y se puede resaltar el número total de horas invertidas (261 horas) en el sistema desde el diseño del mismo hasta la realización de las pruebas de funcionamiento con el fin de dejar un equipo en buen funcionamiento. En este también se incluye un tiempo aproximado en la elaboración del informe final con toda la documentación requerida la cual se encuentra especificada en el apéndice 5: tabla de requisitos académicos, como también el tiempo invertido en la elaboración del instructivo de la práctica como de la guía de mantenimiento del equipo.

CONCLUSIONES

1. El diseño y montaje final de un sistema de vertedero consistió en un banco hidráulico al cual se le fueron añadiendo tres diferentes tipos de compuerta fabricadas con lámina de acrílico con el fin de estudiar el flujo de fluidos en canales abiertos.
2. Se evaluaron las tres diferentes formas de geometría (rectangular, triangular y trapezoidal) de compuerta, las cuales representaron un flujo uniforme debido a la adición de los cincos colocados en el canal para regular el régimen de flujo de agua circulante en el canal y mantener así un flujo laminar.
3. El costo total para la elaboración del proyecto (diseño y montaje del equipo, pruebas de funcionamiento, informe final, documentación y otros gastos) asciende a Q. 6 319,25, sin incluir el costo de la bomba instalada y el del cuenta galones entregados por el asesor.
4. El tiempo aproximado invertido en el diseño y montaje del equipo como de la elaboración del informe final con toda su documentación necesaria fue de un aproximado de 261 horas de trabajo.
5. Se elaboró un instructivo que detalla una práctica de laboratorio y las acciones recomendadas por parte del tesista para el mantenimiento del equipo.

RECOMENDACIONES

1. Se exhorta al estudiante de Ingeniería Química adentrarse en el ámbito y/o estudio del flujo de fluidos tanto a nivel general como en el del flujo de fluidos en canales abiertos puesto que existe una amplia utilización de estos en la industria a nivel general.
2. Exigir al estudiante adentrarse en el diseño de equipos tanto a nivel laboratorio como a nivel planta piloto con el objeto de hacer mejoras en los equipos ya existentes como en la creación de nuevos equipos que puedan utilizarse para asuntos más específicos.
3. Es necesario el desarrollo de un curso paralelo de diseño a cada uno de los cursos de Flujo de fluidos, Transferencia de calor y Transferencia de masa (este contenido en el Laboratorio de Ingeniería Química 2) como complemento al curso de Diseño de equipo (décimo semestre) con el objetivo de que los estudiantes posean las herramientas útiles con las cuales puedan al final de la carrera diseñar cualquier equipo presente en la industria teniendo las condiciones necesarias para hacerlo.

BIBLIOGRAFÍA

1. BROWN, Theodore et. al. *Química: la ciencia central*. Escalona y G., Héctor; Escalona G., Roberto (Trad.) 9ª. ed. México: Pearson Educación, 2004. 1152 p.
2. *Clasificación de vertederos*. [en línea]. <http://fluidos.eia.edu.co/hidraulica/articulos/medidores/vertpareddelg/vertpareddelg.html> [Consulta: 15 de sep-tiembre de 2015].
3. DE AZEVEDO, J., ACOSTA, Guillermo. *Manual de hidráulica*. 6ª ed. México: Harla, 1976. 578 p.
4. DEVORE, Jay L. *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias*. Frago S., Francisco (Trad.) 6ª. ed. México: Thomson, 2005. 794 p.
5. *Física: ecuación de continuidad (hidrodinámica)* [en línea].<http://colegioriobambakatyvaldez.blogspot.com/2013/07/ecuacion-de-continuidad-aerodinamica.html> [Consulta: 10 de septiembre de 2015].
6. FOUST, Alan; WENZEL, L. A.; CLUMP, C. W.; MAUS, Louis; ANDERSEN, L. B. *Principios de operaciones unitarias*. Dr. Lanuza E., J. A. (Trad.) 7ª. impresión. México: Compañía Editorial Continental, 1961. 704 p.

7. HERNÁNDEZ S., Roberto et. al. *Metodología de la investigación*. 4^a. ed. México: McGraw-Hill, 2006. 850 p.
8. *Lección 5: Aforo de aguas residuales*. [en línea].http://datateca.unad.edu.co/contenidos/301332/EXE_301332/leccin_5_aforo_de_aguas_residuales.html [Consulta: 14 de septiembre de 2015].
9. LUX MONROY, Manuel A. *Medidores de Flujo en Canales Abiertos*. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Civil, 2010. 109 p.
10. *Mantenimiento de fibra de vidrio* [en línea].<http://www.afibra.com/es/servicios/mantenimiento-fibra-vidrio.html> [Consulta: 7 de agosto de 2016].
11. McCABE, Warren L.; SMITH, Julian; HARRIOTT, Peter. *Operaciones unitarias en ingeniería química*. Piombo H., Alejandro (Trad.). 7^a. ed. México: McGraw-Hill Interamericana, 2007. 1189 p.
12. MOTT, Robert L. *Mecánica de fluidos*. 6^a. ed. México: Pearson Educación, 2006. 626 p.
13. PERRY, Robert H.; GREEN, Dow W. *Manual del ingeniero químico*. 7^a. ed. España: McGraw-Hill, 2001. Vol. I-IV.
14. STREETER, Víctor L.; WYLIE, Benjamin; BEDFORD, Keith.. *Mecánica de fluidos*. Saldarriaga, Juan G. (Trad.) 9^a.ed. Colombia: McGraw-Hill, 1998. 740 p.

15. TIPPENS, Paul E. *Física: conceptos y aplicaciones*. González R., Ángel C. (Trad.) 6ª. ed. México: McGraw-Hill, 2001. 943 p.

16. WALPOLE, Ronald E.; MYERS, Raymond; MYERS, Sharon; YE, Keying. *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias*. Brito, Javier E.; Flores, Victoria A. (Trad.) 8ª.ed. México: Pearson Educación, 2007 840 p.

APÉNDICES

Apéndice 1. **Instructivo de Laboratorio**

Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química
Área de Operaciones Unitarias
Laboratorio de Operaciones Unitarias I
Cat. Ing. Qco. Jorge E. Godínez
Aux.: (Nombre del auxiliar)



INSTRUCTIVO DE LABORATORIO PRÁCTICA NO. XX: MEDICIÓN DE CAUDALES EN CANALES ABIERTOS

GUATEMALA, XXXX SEMESTRE 2016

Continuación de apéndice 1

PRÁCTICA NO. XX: MEDICIÓN DE CAUDALES EN CANALES ABIERTOS⁴²

Objetivos

1. Estudiar y conocer el fundamento teórico que rige el estudio de flujo de fluidos en canales abiertos.
2. Determinar las variables que se ven involucradas en el sistema de un banco hidráulico como en el estudio de flujo de fluidos en canales abiertos en general.
3. Estimar los caudales variando el tipo de compuerta (rectangular, triangular o trapezoidal) como el número de vueltas al variar el flujo de agua en un banco hidráulico comparando estos con el fundamento teórico que el estudiante ya aprendió en cursos anteriores siguiendo el procedimiento establecido en este instructivo.
4. Realizar varias gráficas que muestren el comportamiento del flujo de acuerdo a las variables según al tipo de compuerta y al número de vueltas que se utilice al variar el flujo de agua en el sistema.
5. Determinar matemáticamente el número de Reynolds y el número de Froude y su significado dentro del sistema de acuerdo a un análisis dimensional.
6. Determinar la existencia del espejo de agua en el sistema y su significado físico conforme aumenta la altura de fluido en el canal.
7. Sugerir, conforme a una visión ingenieril, algunas futuras modificaciones que se le podrían realizar al banco hidráulico con el propósito de mejorar el aprendizaje en el campo de los canales abiertos.

⁴² El fundamento teórico se presenta en el instructivo de la práctica.

Procedimiento

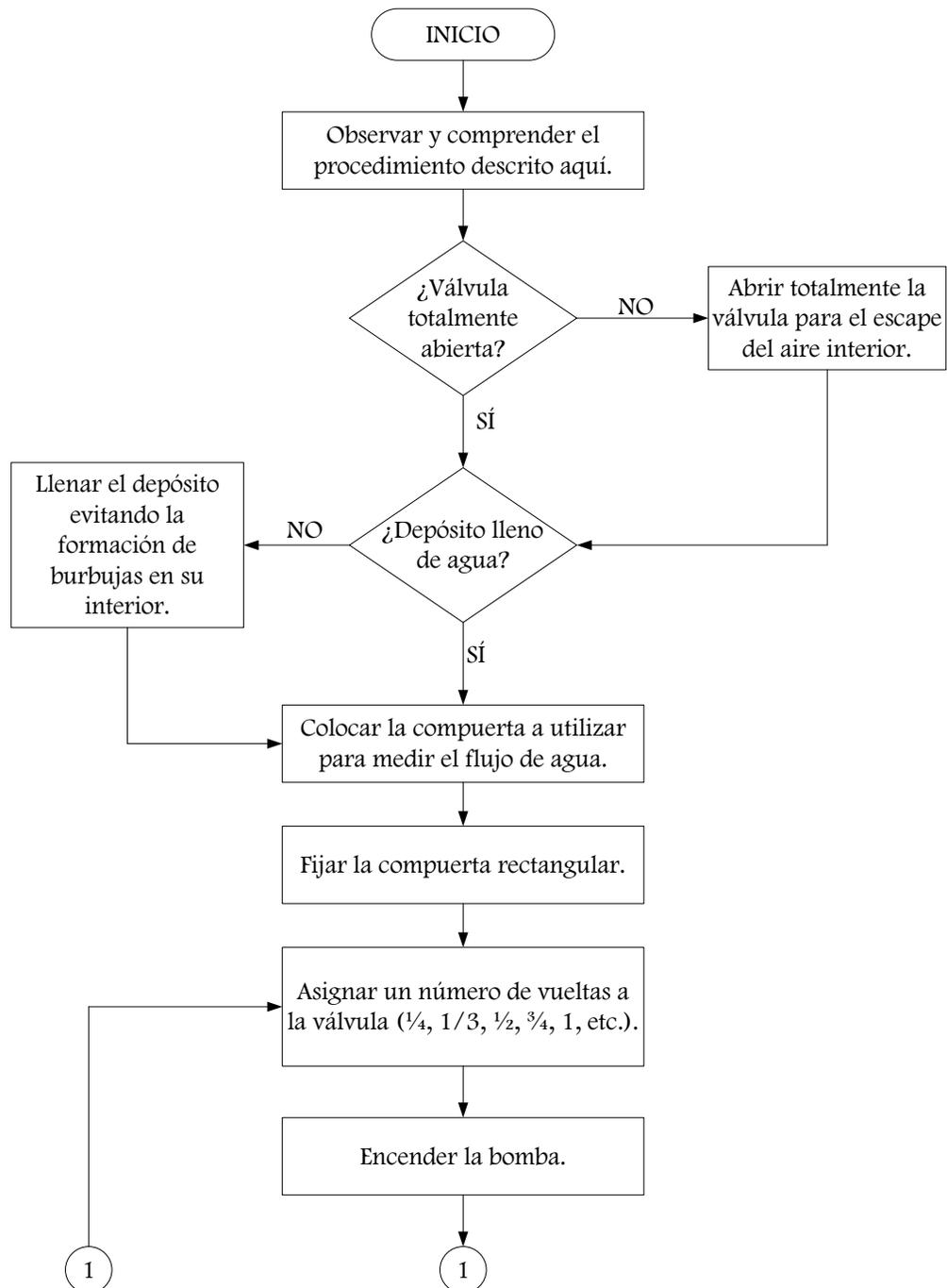
1. Observar los procedimientos mostrados en el diagrama de flujo: el mostrado aquí y el mostrado en el equipo, hasta comprenderlo en su totalidad.
2. Verificar que la válvula de control de flujo se encuentre totalmente abierta para que se escape el aire en todo el sistema.
3. Verificar que el depósito de agua se encuentre lleno de agua por encima de la mitad del mismo, de lo contrario, se debe llenar evitando la formación de burbujas de aire en la superficie.
4. Colocar la compuerta a utilizar para medir el caudal: a) rectangular, b) triangular y c) trapezoidal. Se debe asegurar que se encuentren bien fijadas para evitar fugas. Se debe comenzar con la compuerta rectangular fijándola con las mariposas.
5. Asignar el número de vueltas a la válvula (1/4, 1/2, 3/4, etc.) para regular el flujo de agua que se estará suministrando al canal.
6. Encender la bomba.
7. Medir el tiempo y la altura de la cresta como también la masa de agua que cae por la compuerta del vertedero con la ayuda de una cubeta pequeña para el vertedero rectangular.
8. Anotar el valor que aparece en el contador de galones.
9. Variar el flujo de agua utilizando la válvula de compuerta cambiando el número de vueltas.
10. Repetir los pasos 7 y 8 para un nuevo número de vueltas.
11. Apagar la bomba.
12. Cambiar el tipo de compuerta a una de tipo triangular.

Continuación de apéndice 1

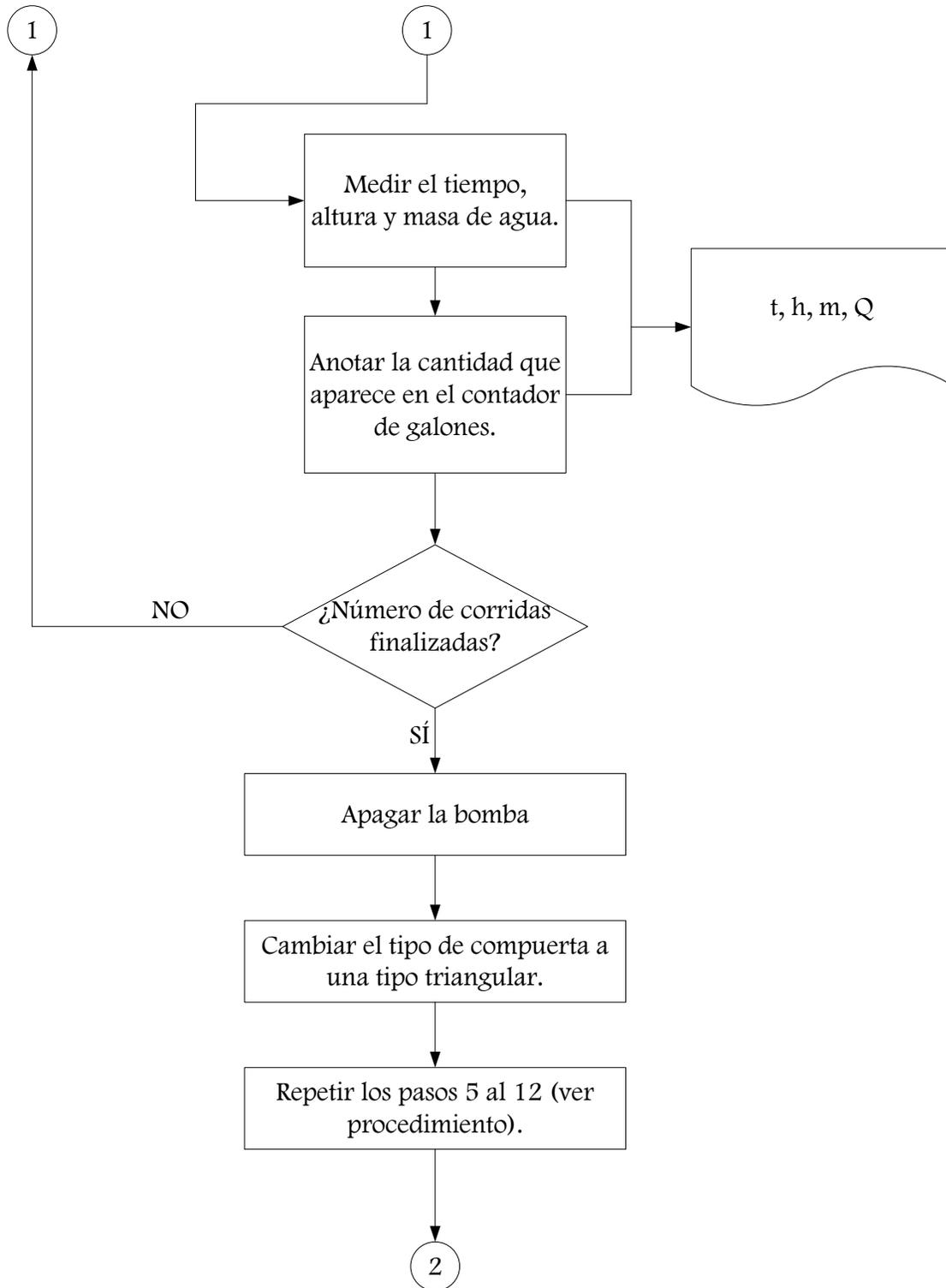
13. Repetir los pasos 5 al 12 hasta realizar todas las corridas para cada una de las compuertas restantes.
14. Apagar la bomba.
15. Vaciar el depósito hasta que no quede nada de humedad dentro. En caso necesario realizar el mantenimiento del mismo.
16. Dejar el área de trabajo totalmente limpia.
17. Fin.

Continuación de apéndice 1

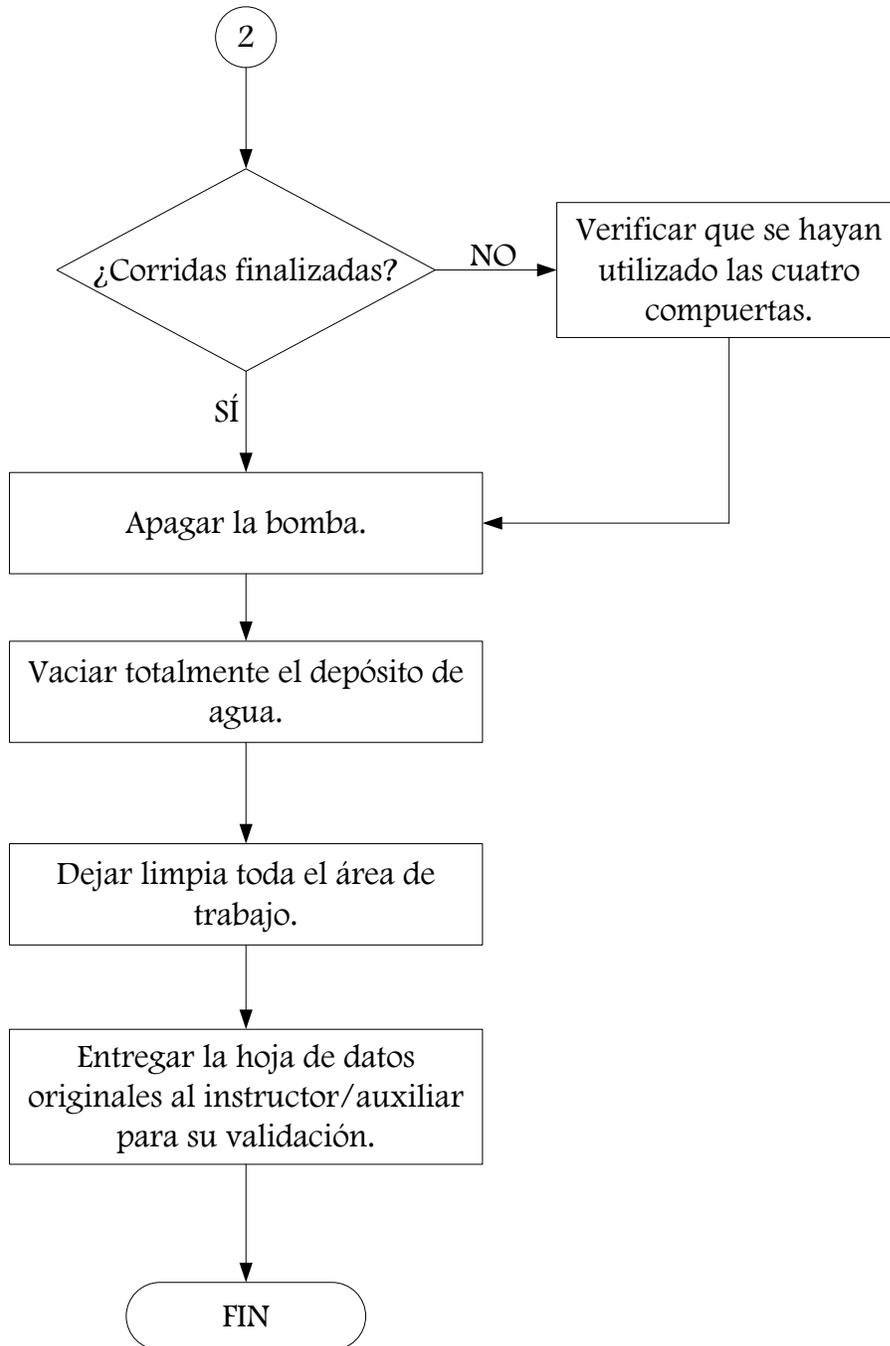
Figura A- 1 **Diagrama de flujo – procedimiento de práctica de laboratorio**



Continuación de apéndice 1



Continuación de apéndice 1



Fuente: elaboración propia empleando programa Microsoft® Visio 2010.

Continuación de apéndice 1

Tabla A- 1 **Plantilla – hoja de datos originales para la práctica de laboratorio**

TIPO DE COMPUERTA			XXX		
No. vueltas	Corrida N.º	Tiempo (s)	Altura (mm)	Masa (lb)	Lectura contador
n1	1	t1	h1	m1	LC1
	2	t2	h2	m2	LC2
	3	t3	h3	m3	LC3
	4	t4	h4	m4	LC4
	5	t5	h5	m5	LC5
n2	1	t1	h1	m1	LC1
	2	t2	h2	m2	LC2
	3	t3	h3	m3	LC3
	4	t4	h4	m4	LC4
	5	t5	h5	m5	LC5
n3	1	t1	h1	m1	LC1
	2	t2	h2	m2	LC2
	3	t3	h3	m3	LC3
	4	t4	h4	m4	LC4
	5	t5	h5	m5	LC5
n4	1	t1	h1	m1	LC1
	2	t2	h2	m2	LC2
	3	t3	h3	m3	LC3
	4	t4	h4	m4	LC4
	5	t5	h5	m5	LC5

Fuente: elaboración propia

Continuación de apéndice 1

Medidas de mantenimiento y prevención del equipo

El mantenimiento de un equipo o sistema es importante para garantizar su ciclo de vida. Su falta de este puede ocasionar el desgaste por varias razones; en el caso de que se trate de equipos que consideren el flujo de agua o de algún otro fluido líquido, puede existir la presencia de corrosión o la presencia de sales en el fondo al tratarse de un depósito que con dicho fluido.

En el equipo descrito en este instructivo, se utiliza el agua como fluido de trabajo por lo que no se puede descartar la presencia de óxidos que se puedan formar; inclusive se recomienda que se tenga un revestimiento anticorrosivo que impida la corrosión como también al permanecer humedad en dicho sistema, también la formación de sales y en algunos casos la formación de hongos o algas en algunas partes del depósito. Como bien se explica en unos de los pasos finales del procedimiento (ver diagrama de flujo), el vaciado del depósito al final de la práctica es indispensable para evitar estas consecuencias y alargar la vida del equipo.

El mantenimiento de este depósito es muy sencillo. Se puede comenzar por dejar vacío el mismo tomando una esponja grande tratando de absorber la mayor cantidad de agua luego de haber vaciado el agua abriendo la válvula de salida del tanque. Al vaciar casi todo, se utiliza la esponja y se realiza lo que se explicó al principio de este párrafo. Luego, con un trapo seco, pasarlo por las esquinas para que elimine cualquier remanente de agua para que no crezca ninguna clase de hongo o alga o inclusive para evitar la corrosión. Si se desea lavar el tanque puede utilizarse algún jabón líquido o en polvo formando

Continuación de apéndice 1

espuma para su limpieza. En el caso de utilizarse jabón, evitar que la bomba succione jabón y/o espuma por lo que se debe verificar antes de que la bomba no se encuentre encendida.

Para finalizar, se debe vaciar el depósito, recordando que no debe quedar ningún residuo de jabón en partes específicas del depósito; es decir, no deben existir trazas de jabón o espuma en las esquinas o en alguna otra sección.

En el caso de las compuertas de fibra de vidrio hay que recalcar que la fibra de vidrio es un mantenimiento de larga durabilidad, al igual que otros materiales, se le debe realizar un mantenimiento preventivo con el fin de alargar la vida útil de dicho material. La fibra de vidrio es un material que no requiere mantenimiento antes de los 5 años de uso pero el cual puede verse afectado por accidente o en dado caso por un mal uso. Por otra parte, es importante resaltar que este material a diferencia de otros, no se pudre, no se oxida, no sufre de abolladuras, sino que es un material perdurable, resistente, reparable o reemplazable al cien por ciento.

El mantenimiento de este material consiste en renovar la pintura, corregir ralladuras o ligeras fisuras como en revisar anclajes o uniones⁴³ para prevenir desprendimientos por daños. El proceso consiste en reparar la superficie y recrear de nuevo la textura de manera que esta coincida con la ya existente en la pieza o sustituir piezas que igualen en caso de fatiga. La parte difícil radica en mantener la imagen de la fibra de vidrio de modo que el conjunto sea igual al diseñado por el cliente anteriormente.

⁴³ Este último no se aplica aquí pero es necesario mencionarlo.

Continuación de apéndice 1

El usuario de estas piezas tendrá la obligación de realizar el mantenimiento preventivo el cual sólo consiste en limpiar la pieza con agua, de ser necesario, una revisión en caso de rayones, alguna fisura o algún accidente que se tenga con la fibra de vidrio. Las fisuras, rompimientos o desprendimiento de pintura pueden ser signos de daño en el material debido a la flexión en las piezas por lo que deben corregirse o en dado caso reemplazarse. Como la fibra de vidrio es un material muy noble que otorga un amplio margen de maniobra entre su deterioro y su rompimiento, la cantidad de accidentes por el material es muy baja en la industria, además de que generalmente por su bajo peso no representará un peligro serio para los usuarios⁴⁴.

⁴⁴ AFIBRA.. *Mantenimiento de fibra de vidrio*, <http://www.afibra.com/es/servicios/mantenimiento-fibra-vidrio.html>. Consulta: 7 de agosto de 2016.

Continuación de apéndice 1

Bibliografía recomendada

1. McCABE, Warren L. et. al. *Operaciones unitarias en ingeniería química*. Piombo H., Alejandro C. (Trad.). 7^a. ed. México: McGraw-Hill, 2007. 1189 p.
2. MOTT, Robert L. *Mecánica de Fluidos*. 6^a. ed. México: Pearson Educación, 2006. 626 p.
3. PERRY, Robert H. y GREEN, Dow W. *Manual del ingeniero químico*. 7^a. ed. España: McGraw-Hill, 2001. Vol. I-IV.
4. TIPPENS, Paul E. *Física; conceptos y aplicaciones*. González R., Ángel C. (Trad.) 6^a. ed. México: McGraw-Hill, 2001. 943 p.

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. Metodología de cálculo para el diseño del vertedero

En el presente apéndice se muestran los diseños finales y respectivos cálculos los cuales están detallados en esta sección para determinar las dimensiones de cada parte del equipo para el estudio de flujo de fluidos en canales abiertos en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Escuela de Ingeniería Química de la Facultad de Ingeniería ubicada en la Universidad de San Carlos de Guatemala.

La siguiente sección se ordena de acuerdo como sigue:

- Cálculos para la estructura del canal del vertedero.
- Cálculos para determinar el volumen de la pila que acompaña al vertedero.
- Cálculos para determinar las dimensiones de cada una de las compuertas a utilizar:

rectangular

triangular

trapezoidal o Cipolletti.

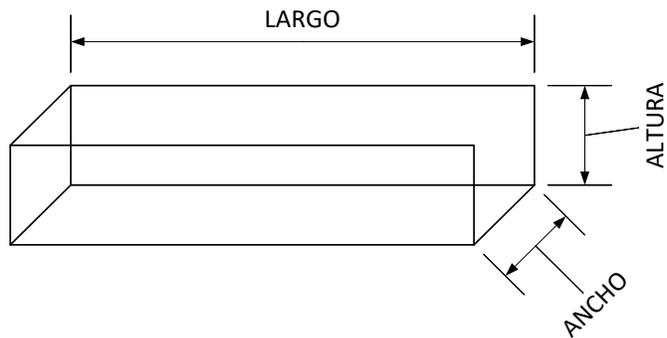
- Cálculos para determinar el volumen del depósito que contendrá el agua de suministro.
- Cálculos para determinar el tamaño y los componentes que constituyen la base o soporte del equipo.
- Cálculo de la tubería a utilizar⁴⁵.

⁴⁵Todas las unidades de los diseños están expresadas en cm a menos que se indique lo contrario, como es el caso del espesor de las láminas las cuales están expresadas en pulgadas según lo especifica el fabricante (e.g. 1/16" = 1/16 de pulgada).

Continuación de apéndice 2

- Cálculos para la estructura del canal del vertedero.

Figura A- 2. **Bosquejo de canal hidráulico**



Fuente: elaboración propia.

Para el canal se tomaron medidas arbitrarias por el estudiante basadas en equipos similares los cuales son fabricados por las empresas G.U.N.T® y Armfield®⁴⁶ las cuales fueron recomendadas por el asesor del presente informe de tesis.

Las medidas utilizadas fueron:

Largo = 1.00 m (100 cm), ancho = 0.27 m (27 cm) y altura = 0.25 (25 cm)

$$\text{Volumen} = (1.00 \text{ m})(0.27 \text{ m})(0.25 \text{ m}) = 0.0675 \text{ m}^3$$

⁴⁶G.U.N.T. es una empresa alemana que fabrica equipos de ingeniería con propósito educacional para estudiantes de pregrado y de posgrado. Armfield es una empresa británica que también se dedica al desarrollo de equipo didáctico de ingeniería como en la investigación y desarrollo industrial. Para más información consultar los sitios web:

G.U.N.T.: http://www.gunt.de/static/s1_1.php

Armfield: <http://armfieldonline.com/es>

Continuación de apéndice 2

$$0.0675 \text{ m}^3 \times \frac{(100 \text{ cm})^3}{(1.00 \text{ m})^3} = 67,500 \text{ cm}^3 = 67,500 \text{ ml}$$

Continuación de apéndice 2

$$67,500 \text{ ml} \times \frac{1 \text{ L}}{1000 \text{ ml}} = 67.5 \text{ L}$$

$$67.5 \text{ L} \times \frac{1.00 \text{ gal}}{3.785 \text{ L}} = 17.83 \text{ gal}$$

Tabla A- 3. **Cálculos de volumen en el canal del vertedero**

Canal del vertedero			
Volumen en m ³	Volumen en cm ³	Volumen en L	Volumen en gal
0,0675	67 500	67,5	17,83

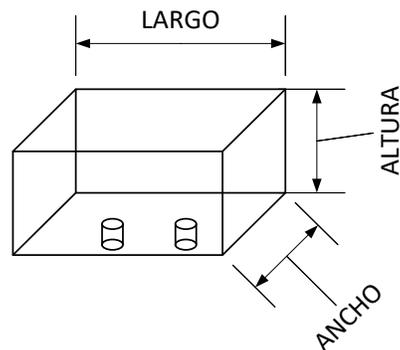
Fuente: elaboración propia.

Cabe destacar que el cálculo del volumen puede variar debido al grosor de la lámina que componen al canal (grosor: 1/16" = 0.20 mm), sin embargo se puede despreciar este cambio de volumen en esta estructura como en la pila y el depósito que contendrá el agua.

Continuación de apéndice 2

- Cálculos para determinar el volumen de la pila que acompaña al vertedero

Figura A- 3. **Bosquejo de la pila que conecta al canal del vertedero**



Fuente: elaboración propia.

Al igual que para el canal, las medidas se tomaron por el estudiante siguiendo medidas similares en los equipos fabricados por las empresas antes mencionadas. Las medidas que se tomaron fueron las siguientes:

Largo = 0.40 m (40 cm), ancho = 0.27 m (27 cm) y altura = 0.25 m (25 cm)

$$\text{Volumen} = (0.40 \text{ m})(0.27 \text{ m})(0.25 \text{ m}) = 0.0270 \text{ m}^3$$

$$0.0270 \text{ m}^3 \times \frac{(100 \text{ cm})^3}{(1.00 \text{ m})^3} = 27,000 \text{ cm}^3 = 27,000 \text{ ml}$$

$$27,000 \text{ ml} \times \frac{1 \text{ L}}{1000 \text{ ml}} = 27.0 \text{ L}$$

$$27.0 \text{ L} \times \frac{1.00 \text{ gal}}{3.785 \text{ L}} = 17.83 \text{ gal}$$

Continuación de apéndice 2

Tabla A- 4. **Cálculos de volumen en la pila del vertedero**

Pila del vertedero			
Volumen en m ³	Volumen en cm ³	Volumen en L	Volumen en gal
0,0270	27 000	27,0	7,13

Fuente: elaboración propia.

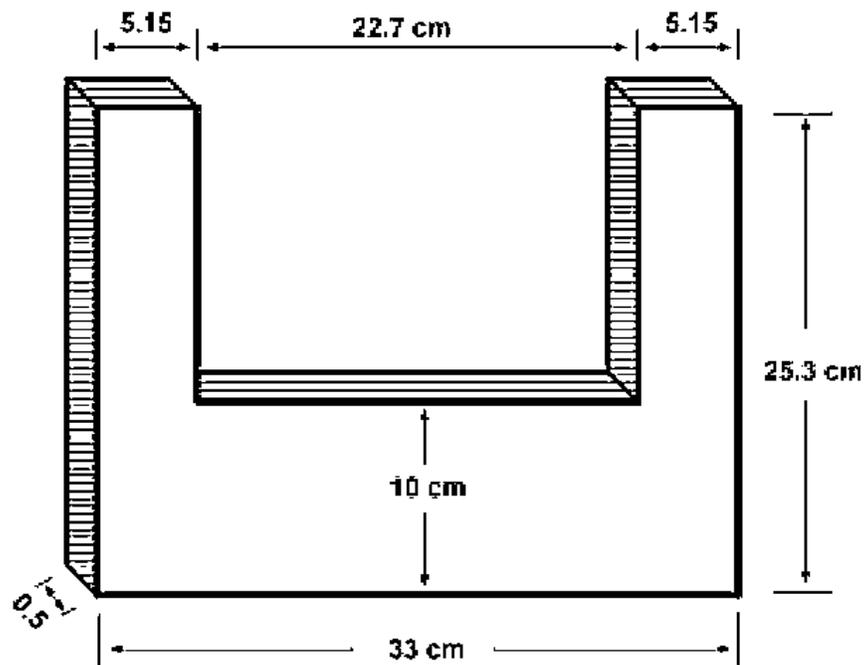
- Cálculos para determinar las dimensiones de cada una de las compuertas a utilizar.

En el caso de las compuertas a utilizar, se tuvo la necesidad de tomar referencia el trabajo realizado por el Ing. Manuel A. Monroy de la Escuela de Ingeniería Civil de la USAC el cual está titulado *Medidores de flujo en canales abiertos* elaborado en septiembre de 2010, debido a que no se encuentra información sobre el diseño de las respectivas compuertas para la medición de flujo sino únicamente las formas más convencionales de los canales; por lo tanto, las compuertas aquí expuestas y las fabricadas por el estudiante tesista se realizaron por medio de proporciones respecto de las que se exponen en el trabajo anteriormente mencionado.

Continuación de apéndice 2

- Soporte de compuerta o vertedero

Figura A- 4. **Compuerta rectangular de referencia**



Fuente: MONROY, Manuel. *Medidores de flujo en canales abiertos*. p. 37.

Realizando las proporciones necesarias se obtiene lo siguiente:

$$\frac{\text{Ancho de compuerta}}{\text{Ancho de abertura}} = \frac{A_C}{A_A} = \frac{33}{22.7} = 1.45$$
$$\frac{\text{Altura de compuerta}}{\text{Altura de abertura}} = \frac{H_C}{H_A} = \frac{25.3}{15.3} = 1.65$$

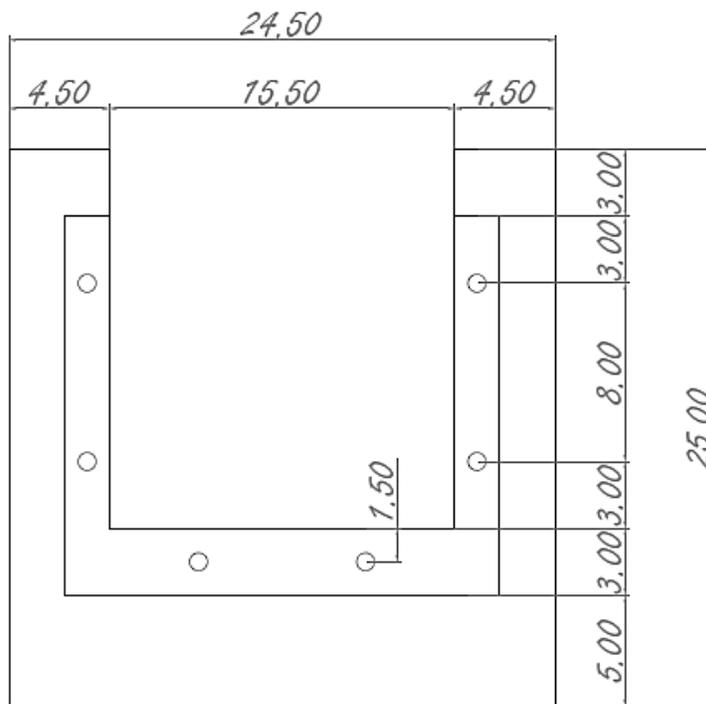
Continuación de apéndice 2

Si la nueva compuerta tendrá un ancho en la abertura de 15.5 cm y una altura de la abertura de 14 cm, entonces las nuevas dimensiones para la compuerta de acrílico será de:

$$\frac{A_C}{A_A} = \frac{A_C}{15.5} = 1.45 \rightarrow A_C = (15.5 \text{ cm})(1.45) = 22.48 \text{ cm} = 24.50 \text{ cm}$$

$$\frac{H_C}{H_A} = \frac{H_C}{14 \text{ cm}} = 1.65 \rightarrow H_C = (14 \text{ cm})(1.65) = 23.10 = 25.0 \text{ cm}$$

Figura A- 5. **Compuerta rectangular**



Fuente: elaboración propia empleando programa Autodesk® Autocad 2016.

La figura corresponde al soporte donde irá colocada la compuerta o vertedero de fibra de vidrio el cual tendrá un grosor de 5 mm (0.5 cm) con el

Continuación de apéndice 2

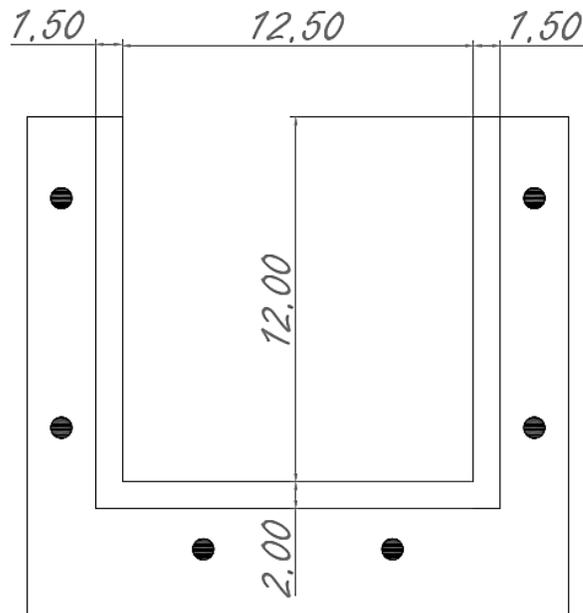
objeto de evitar que se rompa fácilmente. Para ello se realizaron nuevos cálculos para compuertas más pequeñas con un espesor de 2 mm como lo indica el fabricante.

- Compuerta/Vertedero rectangular

Para el caso de la compuerta rectangular, se tomó un valor de referencia en torno al soporte del vertedero y al tamaño que se disponía en el canal. En la figura A-4 se puede observar que en ambos extremos hay un ancho de 2.00 cm, por lo tanto, se le añadirá un centímetro y medio hacia adentro de la abertura de ambos lados con el propósito de dejar un margen entre el vertedero y la lámina de metal la cual estará adherido a la fibra de vidrio. Al igual que para los lados, se dejará un margen horizontal inferior de 3.00 cm y una adición hacia arriba de 2.00 cm para la abertura del vertedero.

Continuación de apéndice 2

Figura A- 6. **Vertedero rectangular**



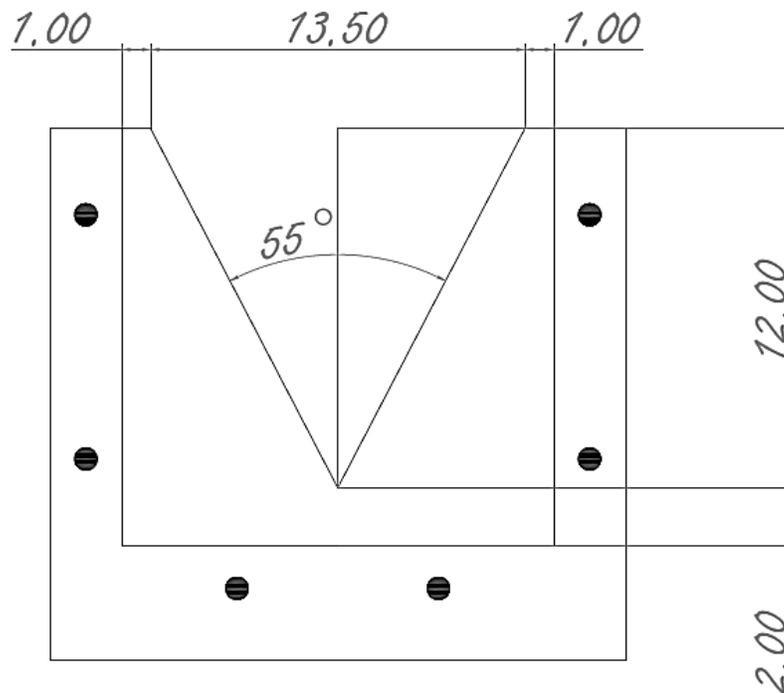
Fuente: elaboración propia.

- Compuerta/Vertedero triangular

En el caso de la compuerta triangular, se utilizó un ángulo distinto al utilizado en la tesis de referencia (90°), utilizando un ángulo de 55° . El cálculo difiere del anterior debido a que se utilizan aquí bases de geometría para encontrar las medidas para dicha compuerta. Haciendo la suposición que al igual que el anterior, se usa el margen de 2.00 cm en cada extremo en donde irá amarrada la compuerta a la lámina de metal. Se utiliza un ángulo diferente a 60° o 90° puesto que son ángulos comunes muy utilizados; además, a medida que aumenta el ángulo, el margen entre el soporte y la abertura disminuye; por lo tanto, para dejar una distancia apreciable se utiliza un ángulo de 55° .

Continuación de apéndice 2

Figura A- 7. **Compuerta triangular**



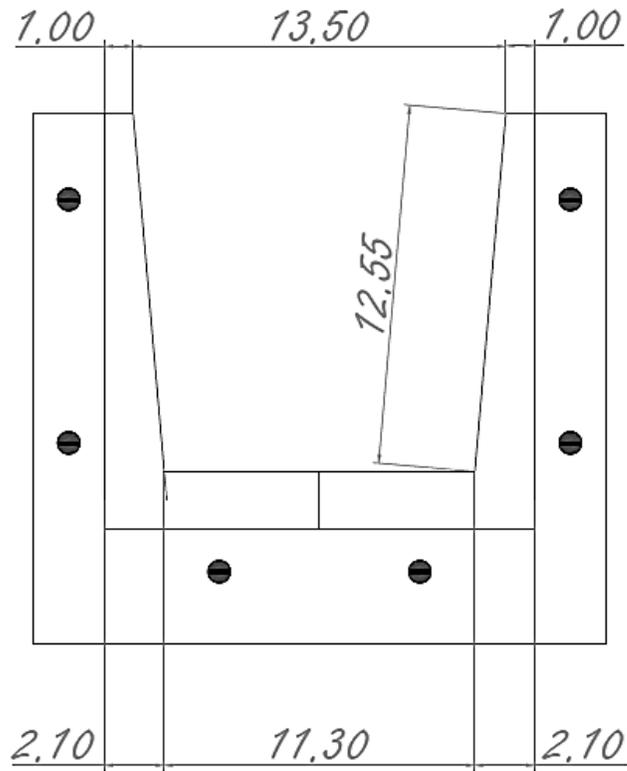
Fuente: elaboración propia empleando programa Autodesk® Autocad 2016.

- **Compuerta trapezoidal o Cipolletti**

La compuerta trapezoidal (o Cipolletti) es parecida a la rectangular pero se diferencia en la inclinación que se tiene en ambos extremos de los bordes. Al igual que en las dos anteriores, se hace la suposición de dejar un margen de 2.00 cm para ajustar el vertedero a la lámina metálica. También se establece un margen adicional de 1.00 cm para evitar que quede al filo de la lámina de metal.

Continuación de apéndice 2

Figura A- 8. **Compuerta trapezoidal o Cipolletti**

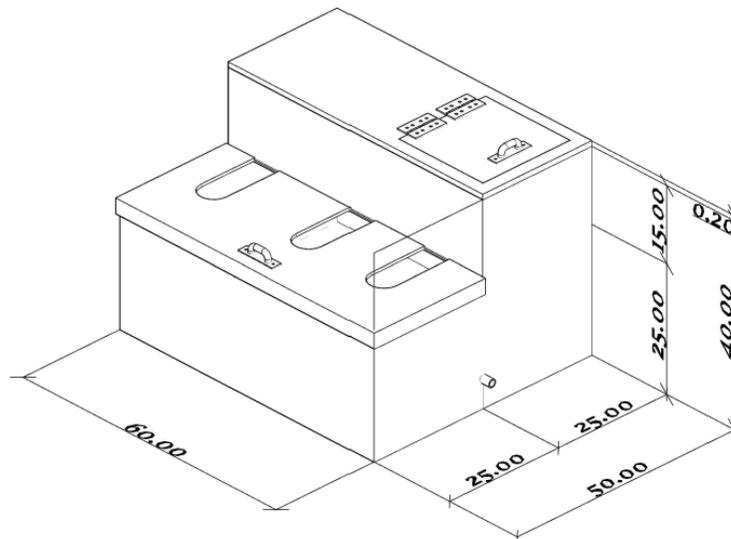


Fuente: elaboración propia empleando programa Autodesk® Autocad 2016.

Continuación de apéndice 2

- Cálculos para determinar el volumen del depósito que contendrá el agua de suministro.

Figura A- 9. **Diseño final del depósito con sus respectivas dimensiones**



Fuente: elaboración propia empleando programa Autodesk® Autocad 2016.

El volumen del depósito para el agua de suministro de la bomba está dividido en dos partes. La primera está limitada por las siguientes dimensiones: largo = 0,60 m (60 cm), ancho = 0,25 m (25 cm) y altura = 0,25 m (25 cm). La segunda sección posee las dimensiones: largo = 0,60 m (60 cm), ancho = 0,25 m (25 cm) y altura = 0,40 m (40 cm). El cálculo del volumen para todo el depósito es el siguiente:

Continuación de apéndice 2

$$\begin{aligned}
 \text{Volumen del depósito} &= (V_{S1}) + (V_{S2}) \\
 \text{Volumen del depósito} \\
 &= [(0.60 \text{ m})(0.25 \text{ m})(0.25 \text{ m})] + [(0.60 \text{ m})(0.25 \text{ m})(0.40 \text{ m})] \\
 &= 0.0975 \text{ m}^3 \\
 0.0975 \text{ m}^3 &\times \frac{(100 \text{ cm})^3}{(1.00 \text{ m})^3} = 97,500 \text{ cm}^3 = 97,500 \text{ ml} \\
 97,500 \text{ ml} &\times \frac{1 \text{ L}}{1000 \text{ ml}} = 97.5 \text{ L} \\
 97.5 \text{ L} &\times \frac{1.00 \text{ gal}}{3.785 \text{ L}} = 25.76 \text{ gal}
 \end{aligned}$$

Tabla A- 5. **Volumen de agua contenido en el depósito**

Depósito			
Volumen en m ³	Volumen en cm ³	Volumen en L	Volumen en gal
0,0975	97 500	97,5	25,76

Fuente: elaboración propia.

Cálculos para determinar el tamaño y los componentes que constituyen la base o soporte del equipo.

Los cálculos para determinar las dimensiones del soporte se basaron en los resultados obtenidos para el canal, la pila y el depósito. Se puede notar que el espacio físico destinado para el conjunto del canal y la pila constituyen 1.40 m (140 cm) de largo por 0.27 m (27 cm) de ancho elaborado con una lámina de 1/16" resistente a la corrosión. Además se le aplicó pintura a dicha estructura.

En la siguiente tabla se muestran la lista de materiales de la estructura metálica.

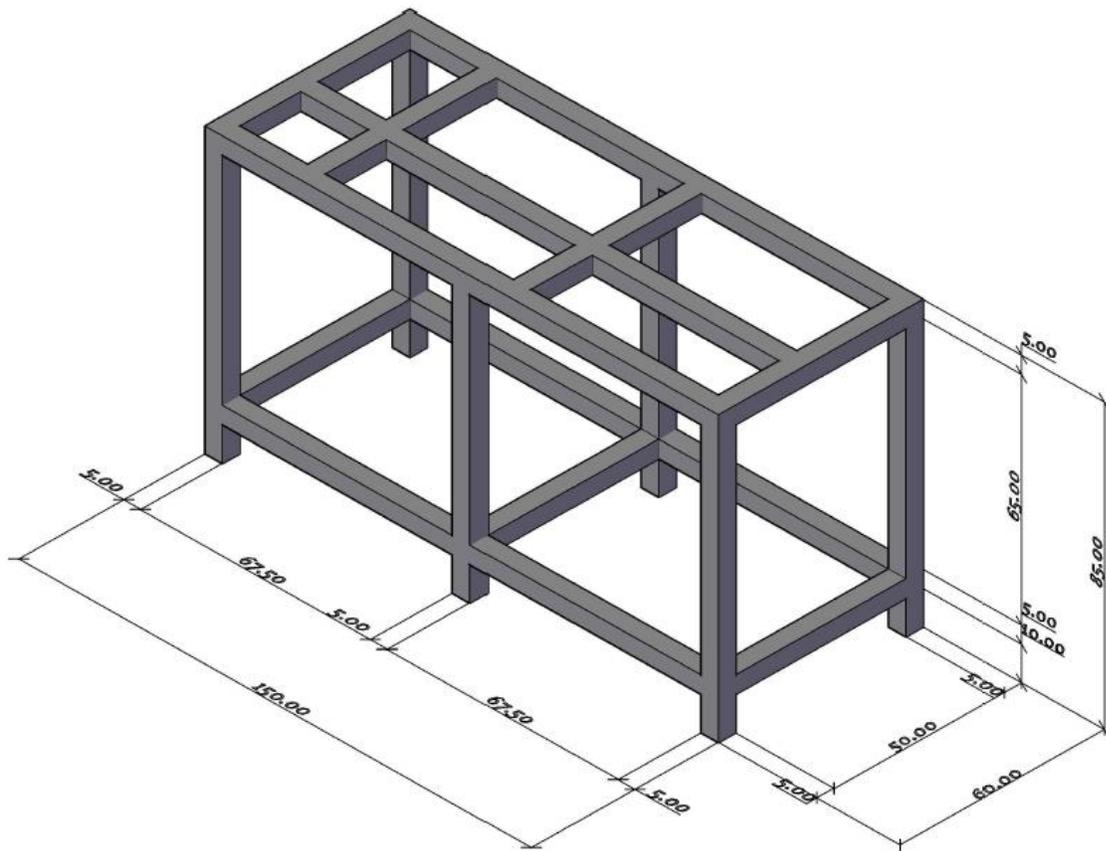
Tabla A- 6. **Lista de materiales – estructura metálica**

N.º	Componente	Cantidad	Dimensiones		Material de fabricación
1	Gomas	6	Dimensiones según el fabricante		Según el fabricante
2	Patas del soporte metálico	6	Sección transversal = 5 cm x 5 cm Espesor = 1/16"	Altura = 10 cm	Acero
3	Barras horizontales largas	4		Largo superior = 150 cm Largo inferior = 140 cm	
4	Barras horizontales cortas	4		Largo superior = 60 cm Largo inferior = 50 cm	
5	Barras horizontales intermedias	3		Largo = 50 cm	
6		1		Largo = 20 cm	
7		2		Largo = 55 cm	
8		Soportes verticales		6	

Fuente: elaboración propia

Continuación de apéndice 2

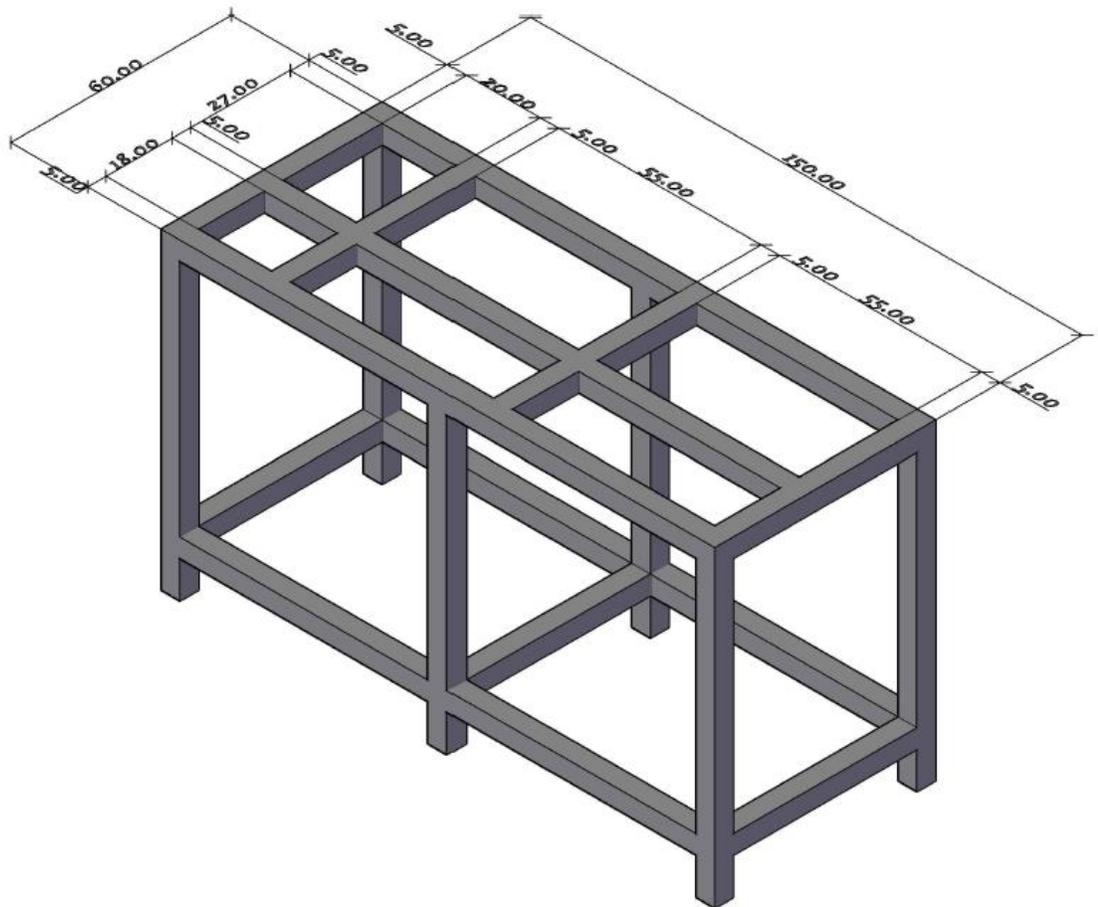
Figura A- 10. Estructura del soporte metálico – medidas inferiores



Fuente: elaboración propia empleando programa Autodesk® Autocad 2016.

Continuación de apéndice 2

Figura A- 11. **Estructura del soporte metálico – medidas inferiores**

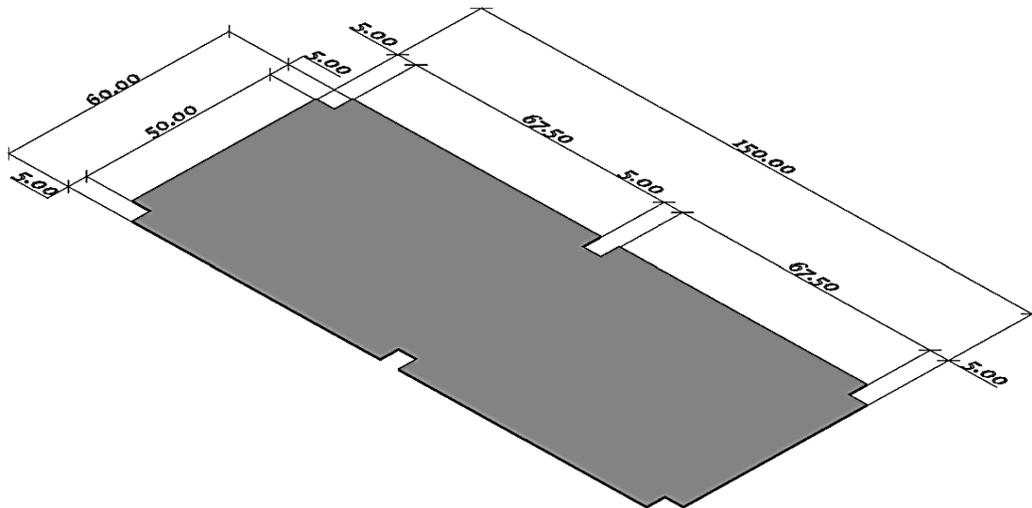


Fuente: elaboración propia empleando programa Autodesk® Autocad 2016.

En las figuras siguientes se muestran las dimensiones para las láminas que van unidas a la estructura mostrada arriba.

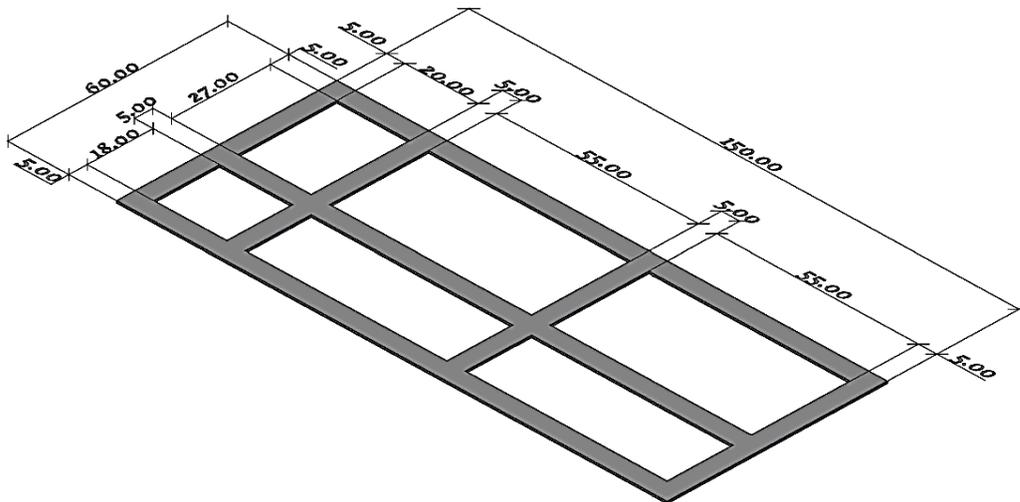
Continuación de apéndice 2

Figura A- 12. Lámina inferior



Fuente: elaboración propia empleando programa Autodesk® Autocad 2016.

Figura A- 13. Lámina superior



Fuente: elaboración propia empleando programa Autodesk® Autocad 2016.

Continuación de apéndice 2

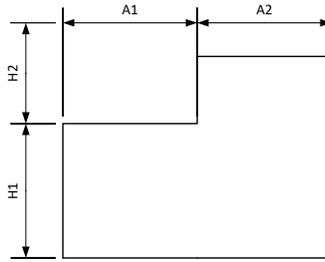
A continuación se muestra una tabla detallada de los materiales utilizados para elaborar el canal, la pila y el depósito del sistema.

Tabla A- 7. **Lista de materiales – canal, pila y depósito**

Canal					
N.º	Componente	Cantidad	Dimensiones		Material de fabricación
1	Lámina transversal	1	Espesor = 1/16"	Ancho = 27 cm Altura = 25 cm	Acero
2	Lámina longitudinal	2		Largo = 100 cm Altura = 25 cm	
3	Lámina de fondo	1		Largo = 100 cm Ancho = 27 cm	
4	Lámina del carril	4		Ancho = 2.50 cm Altura = 25 cm	
Pila					
1	Láminas laterales	2	Espesor = 1/16"	Ancho = 27 cm Altura = 25 cm	Acero
2	Láminas laterales longitudinales	2		Largo = 40 cm Altura = 25 cm	
3	Lámina de fondo	1		Largo = 40 cm Ancho = 27 cm	
4	Niples adaptadores	2	Para conexión de tubería de PVC de 3/4"		Según fabricante

Continuación de apéndice 2

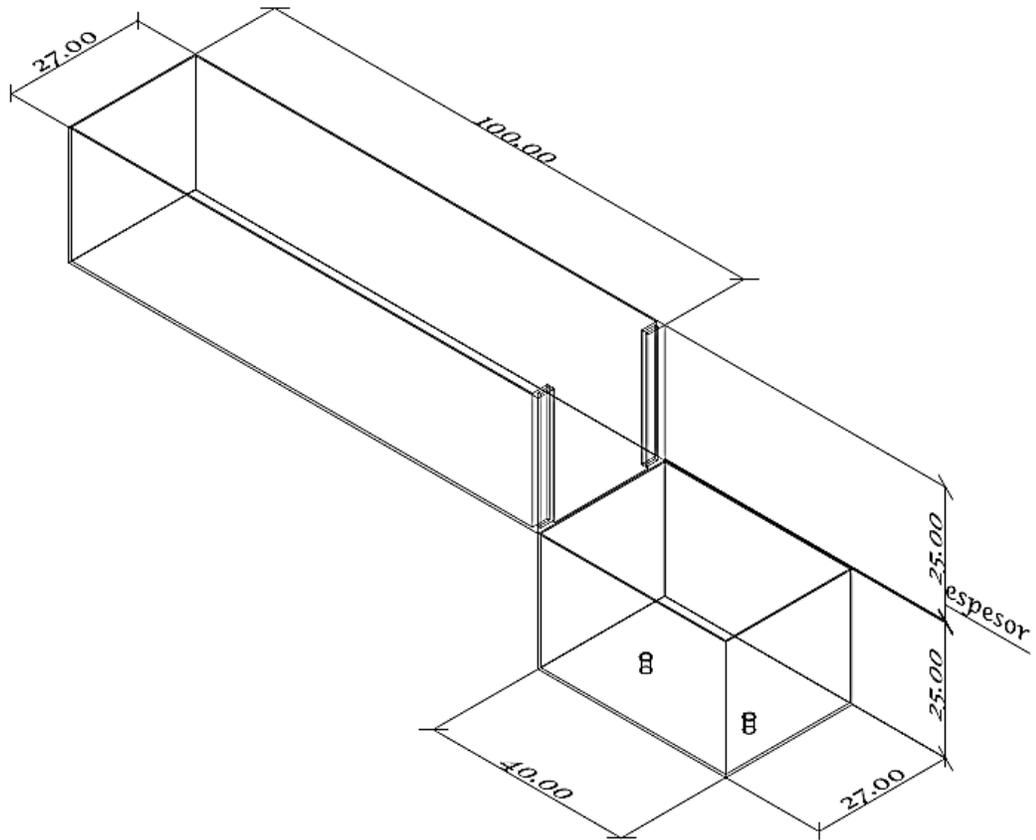
Continuación tabla A-7.

Depósito				
N.º	Componente	Cantidad	Dimensiones	Material de fabricación
1	Lámina sección frontal y trasera	2	 <p>A1 = A2 = 25 cm H1 = 25 cm, H2 = 15 cm</p>	Acero
2	Lámina longitudinal inferior	1	<p>Largo = 60 cm Altura = 25 cm</p>	
3	Lámina longitudinal intermedia	1	<p>Largo = 60 cm Ancho = 15 cm</p>	
4	Lámina longitudinal lateral	1	<p>Largo = 60 cm Altura = 40 cm</p>	
5	Lámina de fondo	1	<p>Largo = 60 cm Ancho = 50 cm</p>	
6	Tapadera	1	<p>Largo = 60.4 cm Ancho = 25.3 cm Altura = 3 cm</p>	

Fuente: elaboración propia.

Continuación de apéndice 2

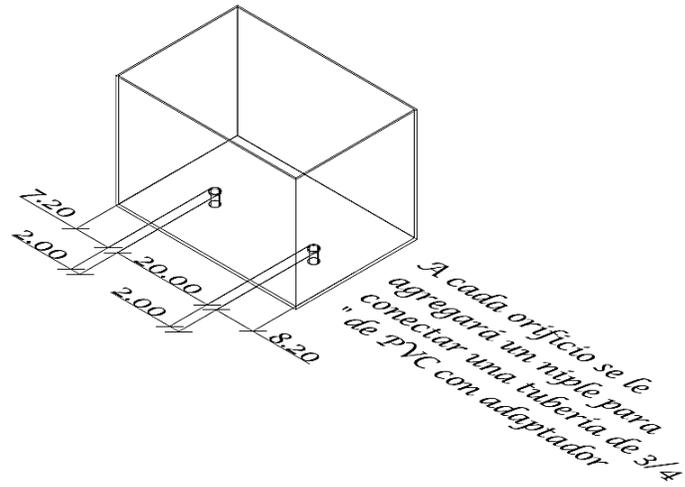
Figura A- 14. **Sistema de canal abierto**



Fuente: elaboración propia empleando programa Autodesk® Autocad 2016.

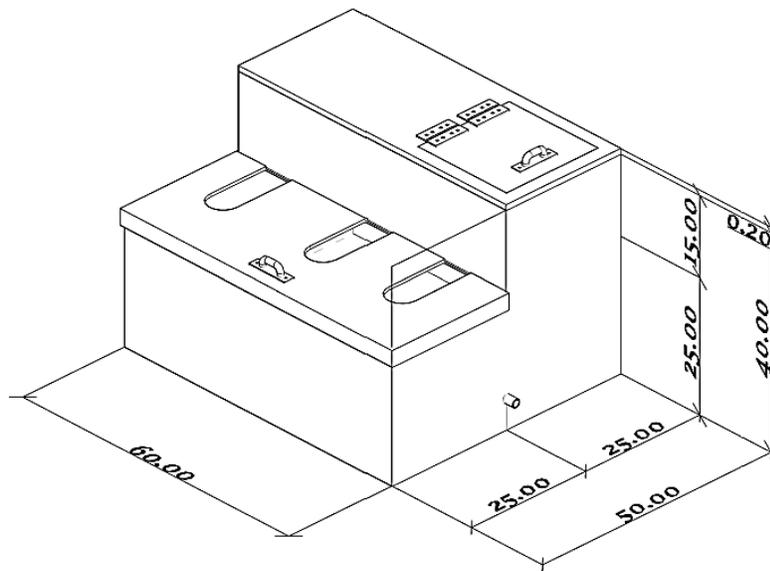
Continuación de apéndice 2

Figura A- 15. Diagrama de pila



Fuente: elaboración propia empleando programa Autodesk® Autocad 2016.

Figura A- 16. Diagrama de depósito



Fuente: Elaboración propia empleando programa Autodesk® Autocad 2016

Continuación de apéndice 2

Tabla A- 8. **Lista de componentes del sistema**

N.º	Equipo/Accesorio	Características
1	Bomba centrífuga/periférica	Caballaje: 0.5 Hp 115/230 V 60 Hz
2	Codo de 90°	Cantidad: cuatro (4) Material: PVC Tamaño: ¾" ⁴⁸
3	Adaptador macho	Cantidad: cinco (5) Material: PVC Tamaño: ¾"
4	Adaptador hembra	Cantidad: uno (1) Material: PVC Tamaño: ¾"
5	Reductor 1- ¾" Reductor 1 ¼ - ¾"	Cantidad: uno (1) c/u Material: PVC
6	Unión universal	Cantidad: dos (2) Material: PVC Tamaño: ¾"
7	Abrazaderas circulares	Cantidad: dos (2) Material: aluminio Tamaño: 1"
8	Alambre TSJ (3 hilos) calibre 12	Cantidad: tres (3) metros Material: según fabricante Tamaño: calibre 12
9	Flexitubo	Cantidad: tres (3) metros Material: según fabricante Tamaño: ½"
10	Tubería	Cantidad: según lo utilizado Material: PVC Tamaño: ¾"
11	Manguera reforzada	Cantidad: dos (2) metros Material: según fabricante Tamaño: 1"

⁴⁸ El tamaño ya sea de la tubería, accesorio, válvula o algún otro equipo conectado a un tramo de tubería se refiere al tamaño de la misma.

Continuación de apéndice 2

Continuación tabla A-8.

12	Empaque, canicas o cincos	Cantidad: trescientos cincuenta (350) Material: según fabricante Tamaño: 1"
13	Válvula de compuerta	Cantidad: una (1) Material: bronce Tamaño: ¾"
14	Válvula de bola	Cantidad: una (1) Material: bronce Tamaño: ¾"
15	Cuenta galones	Cantidad: una (1) Material: según fabricante Tamaño: ¾"
16	Plexiglás®	Cantidad: 4 hojas Material: acrílico Tamaño: 20.3 cm x 25.4 cm x 2 mm
17	Fibra de Vidrio	Cantidad: 3 piezas Material: fibra de vidrio Tamaño: según diseño establecido Grosor: 5 mm (0.5 cm)

Fuente: elaboración propia.

A continuación se muestran algunas fotografías correspondientes a las etapas que se llevaron a cabo para el montaje del equipo.

Continuación de apéndice 2

Figura A- 17 **Estructura del banco hidráulico**



Fuente: elaboración propia, Laboratorio de Operaciones Unitarias, Facultad de Ingeniería.

Figura A- 18 **Instalación física de la bomba periférica**



Fuente: elaboración propia, Laboratorio de Operaciones Unitarias, Facultad de Ingeniería.

Continuación de apéndice 2

Figura A- 19 **Instalación física de la tubería (parte I)**



Fuente: elaboración propia, Laboratorio de Operaciones Unitarias, Facultad de Ingeniería.

Continuación de apéndice 2

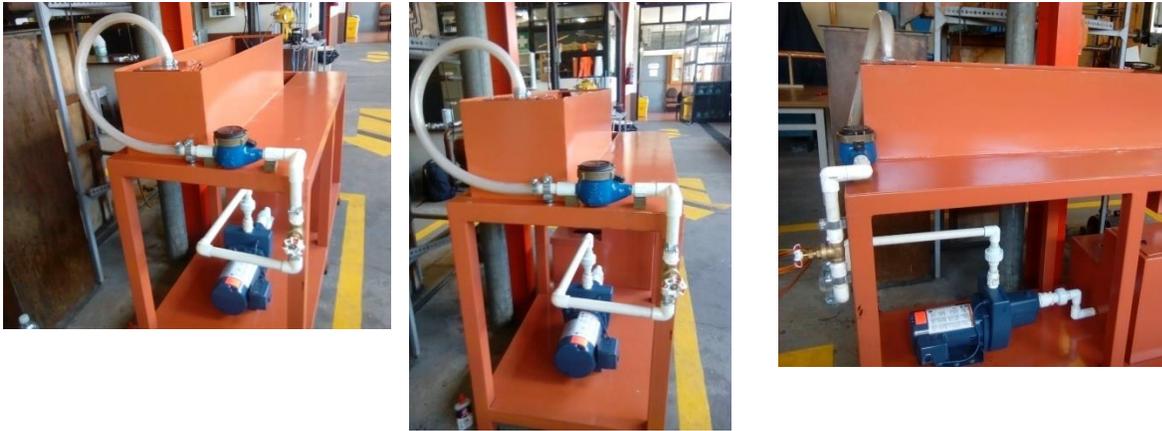
Figura A- 20 Instalación física de la tubería (parte II)



Fuente: elaboración propia, Laboratorio de Operaciones Unitarias, Facultad de Ingeniería.

Continuación de apéndice 2

Continuación figura A-20.



Fuente: elaboración propia, Laboratorio de Operaciones Unitarias, Facultad de Ingeniería.

Figura A- 21 Colocación del empaque – cincos



Fuente: elaboración propia, Laboratorio de Operaciones Unitarias, Facultad de Ingeniería.

Continuación de apéndice 2

Figura A- 22 Prueba de fugas del sistema



Continuación de apéndice 2

Continuación figura A-22



Fuente: elaboración propia, Laboratorio de Operaciones Unitarias, Facultad de Ingeniería.

Continuación de apéndice 2

Figura A- 23 Instalación eléctrica de la bomba



Continuación de apéndice 2

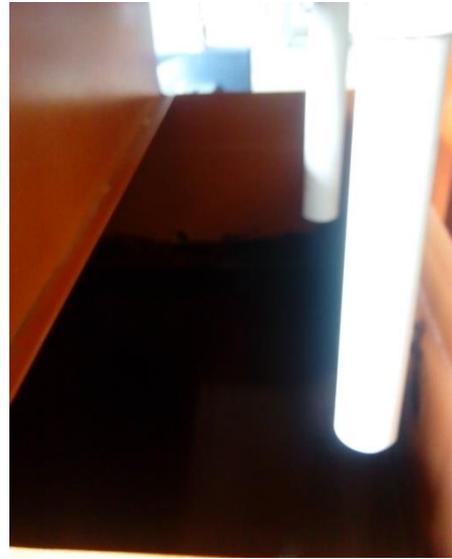
Continuación figura A-23.



Fuente: elaboración propia, Laboratorio de Operaciones Unitarias, Facultad de Ingeniería.

Continuación de apéndice 2

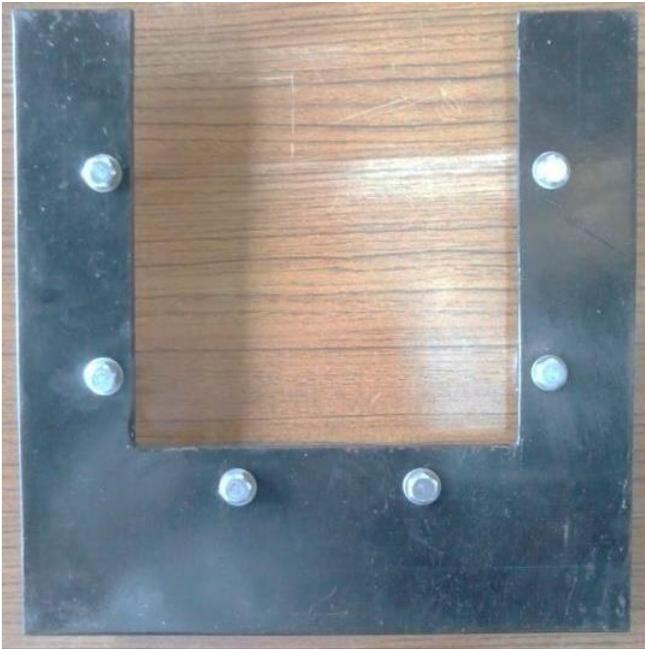
Figura A- 24 **Arreglo de fugas del depósito en algunas secciones**



Fuente: elaboración propia, Laboratorio de Operaciones Unitarias, Facultad de Ingeniería.

Continuación de apéndice 2

Figura A- 25 **Arreglo del soporte fijo para la compuerta/vertedero**



Fuente: elaboración propia, Laboratorio de Operaciones Unitarias, Facultad de Ingeniería.

Continuación de apéndice 2

Figura A- 26 **Elaboración de nuevas compuertas a partir de fibra de vidrio**



Fuente: elaboración propia, Laboratorio de Operaciones Unitarias, Facultad de Ingeniería.

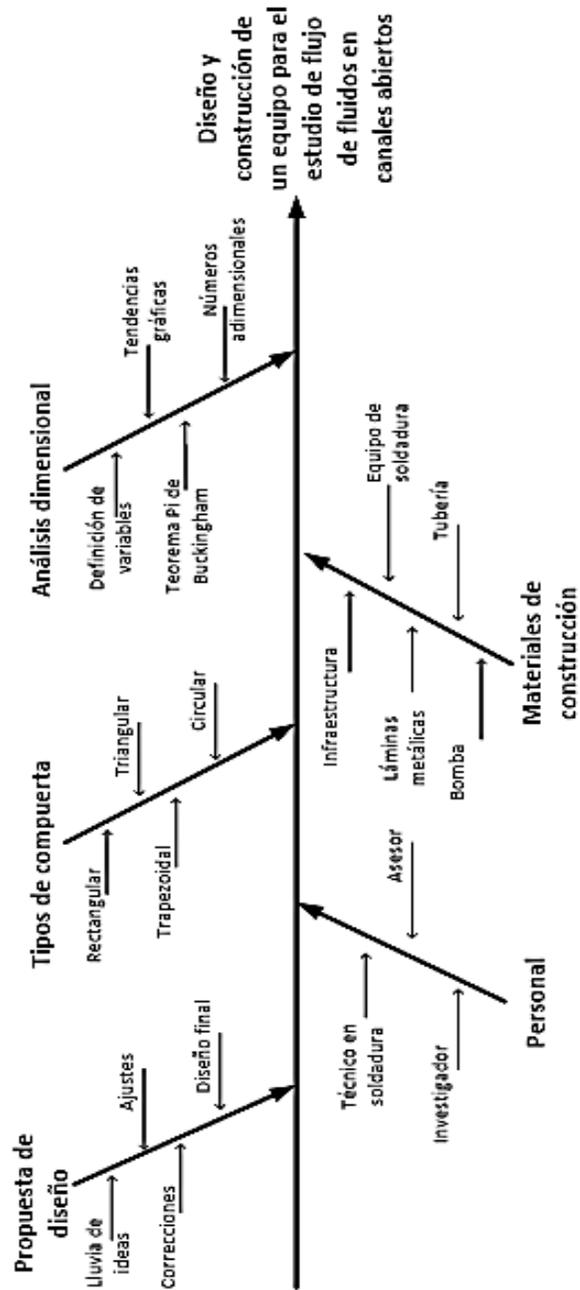
Apéndice 3. Requisitos académicos

Tabla A- 9 **Requisitos académicos**

1.	Solicitud escrita, dirigida al Director de Escuela solicitando fecha de presentación y defensa del informe final de Trabajo de Graduación e indicando el nombre del Ingeniero Químico que lo va a asesora.	X
2.	Carta del asesor dirigida al Director de la Escuela, donde especifica que aprobó el Informe Final de Trabajo de Graduación.	X
3.	Copia de Aprobación del Diseño de Investigación de Trabajos de Graduación.	X
4.	Constancia de aprobación del examen general privado.	X
5.	Artículos en español e inglés con el visto bueno del asesor (firmado en la última hoja).	X
6.	Registros de seguimiento de estudiantes y egresados EIQD-REG-SG-001 y EIQD-REG-SG-004, con foto tamaño cédula y contestado en su totalidad.	X

Fuente: registro de recepción de informe final del trabajo de graduación
EIQD-REG-TG-006.

Figura A- 27 Diagrama de Ishikawa



Fuente: elaboración propia, diseño de investigación, año 2015.

ANEXOS

Anexo 1. Compra de accesorios

**FERRETERÍA
TIKAL**

LUIS HUMBERTO NORIEGA GOMEZ
NIT: 106470-4
Hierro de Construcción, Lámina Acanalada,
Tela Metálica, Malla, Pinturas y Ferrería en General

**FACTURA
SERIE "A"**

Nº 326565

Calzada San Juan 8-00 Zona 7,
Guatemala, Guatemala
Tels: 2471-8538 / 2471-3385 y 86
ferreteria.tikal2@gmail.com

Guatemala,	Dia 14	Mes 05	Año 2016	Nit: 6939605-1
Nombre: <u>José Velázquez</u>				
Dirección:				
CANTIDAD	DESCRIPCION	VALOR		
1	pagamento PUC	16.50		
2	teflon 42	41.00		
1	rodeteer 1x3/4	1.60		
1	rod. 1 1/4 x 3/4	2.90		
2	unions 3/4 uniloxed	19.50		
1	ventilador 3/4	68.00		
4	caños 3/4	5.20		
2	machos 3/4	2.20		
1	hombros 3/4	1.35		
2	abraz. 1 1/2	3.00		
3	mt. codo TSJ	48.00		
3	mt. flex 1/4 60	6.75		
		179.00		
CANCELADO				/
REGIMEN PAGO TRIMESTRAL				TOTAL Q
ROBERTO ARGUETA NIT: 309933-1 Versor: 04-12-2017 Revisión: 2015-6-09-315 del 305-997 al 334-996 del 04-12-2016				179.00

Fuente: factura obtenida de Ferretería Tikal II por compra de accesorios.

Anexo 3. Cotización para soporte metálico

CONSTRUCCIONES METALICAS
"GUZMAN"
HERRERIA EN GENERAL
FELICITO GUZMAN
8a. Avenida 4-07 Zona 7
Colonia Quinta Sarayoa
Tels.: 4142-3415, 4148-3720
Guatemala, Guatemala

COTIZACION

Nº 000265

Señor: <u>Juan Diego Velásquez</u>	Presupuesto:
Dirección: <u>ciudad.</u>	Fecha: <u>16/4/2016</u>
Tel.:	Número:

NOS ES GRATO PRESENTAR A UD. (S) NUESTRA COTIZACIÓN DE LO SIGUIENTE

CANTIDAD	DESCRIPCION	VALOR
1	<p>Estructura metálica - con las siguientes medidas ancho - 1.50 mts alto - 0.75 cm fondo 0.60 cm</p> <p>El presente trabajo se efectuara según diseño materiales Estructura- tubo de 2" x 2" chapa 16 Placa superior placa inferior lamina de 1/16 Grosor</p> <p>Valor del presente trabajo ----- Q 2400.00 fecha de entrega 8 días hábiles a partir de su autorización</p>	2400.00
<p>Dos mil cuatrocientos Quetzales exactos Q 2400.00 -</p>		200.00 DESC
<p>Anticipo - Q 100.00</p>		Q 2,300.00

FORMA DE PAGO

VENDEDOR

[Firma]

ACEPTADO CLIENTE

TIEMPO DE ENTREGA

Fuente: cotización obtenida por elaboración de soporte del equipo.

