



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

**DISEÑO DE CANAL PARA LA CALIBRACIÓN DEL MOLINETE EN LAS INSTALACIONES
DEL INSTITUTO NACIONAL DE SISMOLOGÍA, VULCANOLOGÍA, METEOROLOGÍA E
HIDROLOGÍA DE GUATEMALA (INSIVUMEH)**

Héctor Werner Valdez Urizar

Asesorado por la Inga. Karla Giovanna Judith Pérez Loarca

Guatemala, marzo de 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE CANAL PARA LA CALIBRACIÓN DEL MOLINETE EN LAS INSTALACIONES
DEL INSTITUTO NACIONAL DE SISMOLOGÍA, VULCANOLOGÍA, METEOROLOGÍA E
HIDROLOGÍA DE GUATEMALA (INSIVUMEH)**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

HÉCTOR WERNER VALDEZ URIZAR

ASESORADO POR LA INGA. KARLA GIOVANNA JUDITH PÉREZ LOARCA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, MARZO DE 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Luis Diego Aguilar Ralón
VOCAL V	Br. Christian Daniel Estrada Santizo
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Francisco Javier Quiñónez de la Cruz
EXAMINADOR	Ing. Carlos Salvador Gordillo García
EXAMINADOR	Ing. Crecencio Benjamín Cifuentes Velásquez
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

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 DE CANAL PARA LA CALIBRACIÓN DEL MOLINETE EN LAS INSTALACIONES DEL INSTITUTO NACIONAL DE SISMOLOGÍA, VULCANOLOGÍA, METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA DE GUATEMALA (INSIVUMEH)

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha 3 de noviembre de 2016.



Héctor Werner Valdez Urizar

Guatemala, 15 de noviembre de 2018

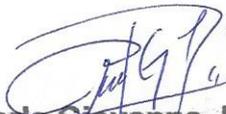
Ingeniero civil
Luis Manuel Sandoval Mendoza
Escuela de Ingeniería civil
Área de Hidráulica
Facultad de Ingeniería, USAC

Ingeniero Sandoval:

Por medio de la presente me dirijo a usted, para hacer de su conocimiento que como asesora del estudiante universitario, Héctor Werner Valdez Urizar, con numero de carné: 200924434, he tenido a la vista el trabajo de graduación titulado: "DISEÑO DE CANAL PARA LA CALIBRACIÓN DEL MOLINETE EN LAS INSTALACIONES DEL INSTITUTO NACIONAL DE SISMOLOGÍA, VULCANOLOGÍA, METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA DE GUATEMALA, (INSIVUMEH) el cual encuentro satisfecho.

En tal virtud, LO DOY POR APROBADO, solicitándole darle el trámite respectivo.

Sin otro particular, me es grato suscribirme.



K. Giovanna J. Pérez Loarca
Msc. ING. CIVIL
COL. No. 7718

Ingeniera civil **Karla Giovanna Judith Pérez Loarca**

Número Colegiado: 7718



Guatemala, 11 de Febrero de 2019

Ingeniero
Hugo Leonel Montenegro Franco
Director Escuela de Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero

Le informo que he revisado el trabajo de graduación titulado “DISEÑO DE CANAL PARA LA CALIBRACION DEL MOLINETE EN LAS INSTALACIONES DEL INSTITUTO NACIONAL DE SISMOLOGÍA, VULCANOLOGÍA, METEROLOGÍA E HIDROLOGÍA, (INSIVUMEH)”, desarrollado por el estudiante de ingeniería civil Héctor Werner Valdez Urizar, quien contó con la asesoría de la ingeniera Karla Giovanna Judith Pérez Loarca.

Considero que este trabajo está bien desarrollado y habiendo cumplido con los objetivos doy mi aprobación al mismo, solicitando darle el tramite respectivo.

Sin otro particular, me despido atentamente.



FACULTAD DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO
DE
HIDRAULICA
USAC

Dr C. Ing. Luis Mahuel Sandoval Mendoza
Jefe del Departamento de Hidráulica





USAC

TRICENTENARIA

Universidad de San Carlos de Guatemala
FACULTAD DE INGENIERÍA

<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL



El director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen de la Asesora Inga. Karla Giovanna Judith Pérez Loarca y del Coordinador del Departamento de Hidráulica Ing. Luis Manuel Sandoval Mendoza, al trabajo de graduación del estudiante Héctor Werner Valdez Urizar DISEÑO DE CANAL PARA LA CALIBRACIÓN DEL MOLINETE EN LAS INSTALACIONES DEL INSTITUTO NACIONAL DE SISMOLOGÍA, VULCANOLOGÍA, METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA DE GUATEMALA (INSIVUMEH) da por este medio su aprobación a dicho trabajo.


Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco



Guatemala, marzo 2019

/mmm.

Más de 138 años de Trabajo y Mejora Continua





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 Civil del trabajo de graduación titulado: **“DISEÑO DEL CANAL PARA LA CALIBRACIÓN DEL MOLINETE EN LAS INSTALACIONES DEL INSTITUTO NACIONAL DE SISMOLOGÍA, VOULCANOLOGÍA, METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA DE GUATEMALA (INSIVUMEH)”** presentado por el estudiante universitario: **Héctor Werner Valdéz Urizar**, 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, Marzo de 2019

/echm

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por todas las bendiciones que me ha dado, por llenarme de sabiduría para poder luchar y alcanzar mis metas, por la vida que me ha regalado al lado de mi familia y mis amigos; en cada momento de felicidad y tristeza siempre ha estado a mi lado.
- Mis padres** Juan Alvaro Valdez Quezada e Iria del Rosario Urizar Loarca, por apoyarme y creer siempre en mí; por enseñarme valores con su ejemplo, por su amor incondicional y por ser ejemplo de superación, de quienes me siento orgulloso.
- Mis hermanos** Esau, Douglas y Osman Valdez.
- Mi familia** Que con ansias ha esperado este momento.
- Inga. Anabela Córdova** Por sus consejos y apoyo en toda la etapa universitaria.

AGRADECIMIENTOS A:

Dios	Por ser amoroso, sin Él nada soy, dándome el valor y la perseverancia para llegar a este momento.
Mis padres	Juan Valdez e Iria Urizar, quienes siempre han estado a mi lado; estaré eternamente agradecido por brindarme su apoyo incondicional y guiarme por el camino.
Mis amigos	Raúl Ticún, Pablo Urizar, Edgar Morales, Rodrigo Chacón, José Galindo, Stephanie Molina y demás, por el apoyo y fraternidad en el desarrollo profesional.
Universidad de San Carlos de Guatemala	En especial a la Facultad de Ingeniería; gracias por ser la fuente de saber y brindarme las herramientas que me forjaron como profesional.
Mis catedráticos	Por brindarme sus conocimientos y orientación profesional.
Mi asesora	Por el apoyo en esta etapa profesional, por sus consejos y enseñanzas.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN.....	XIII
OBJETIVOS.....	XV
INTRODUCCIÓN.....	XVII
1. TIPOS DE FLUJO EN CANALES HIDRÁULICOS	1
1.1. Principios fundamentales de los canales.....	1
1.1.1. Descripción general de los canales hidráulicos	1
1.1.2. Tipos de flujo en canales abiertos	2
1.1.3. Flujo permanente y flujo no permanente	2
1.1.4. Flujo uniforme y flujo variado	3
1.1.5. Estados de flujo	4
1.1.6. Clases de canales abiertos.....	6
1.2. Flujo en canales abiertos y sus propiedades.....	7
1.2.1. Geometría de un canal	7
1.2.2. Elementos geométricos de una sección de canal.....	8
1.2.3. Distribución de velocidades en una sección de canal.....	11
1.2.4. Distribución de presión en una sección de canal....	13
1.2.5. Efecto de la pendiente en la distribución de presiones	15
1.3. Medición de flujos en canales.....	17
1.3.1. Flujo sobre vertederos de pared delgada	17

1.3.2.	Objetivo de los vertederos.....	21
1.3.3.	Vertederos según su geometría	22
1.4.	Diseño de canales con flujo uniforme.....	24
1.5.	Materiales y revestimientos no erosionables.....	24
1.6.	Velocidad mínima permisible	25
1.7.	Pendientes del canal	25
1.8.	Tipos de bombas.....	26
1.8.1.	Bomba centrífuga	27
2.	MOLINETE.....	29
2.1.	Generalidades	29
2.2.	Partes del molinete.....	33
2.3.	Funcionamiento del molinete	36
2.3.1.	Funcionamiento interno del ciclo computador	38
2.4.	Molinete tipo taza cónica.....	40
2.5.	Molinete tipo hélice.....	41
3.	MÉTODOS DE CALIBRACIÓN.....	43
3.1.	Generalidades.....	43
3.2.	Según su casa comercial	43
3.3.	Calibración por canal rectangular con corriente constante.....	45
3.4.	Tanque de calibración OTT	50
4.	DISEÑO HIDRÁULICO	53
4.1.	Componentes canal de calibración	53
4.2.	Geometría del canal.....	63
4.3.	Diseño de borde libre	64
4.4.	Determinación de características de flujo y físicas del canal ...	66
4.5.	Dimensión del canal.....	68

4.6.	Determinación de la pendiente crítica	70
4.6.1.	Iteraciones para puntos de pendiente crítica	71
4.6.2.	Comprobación de la profundidad crítica	74
4.7.	Profundidad normal	74
4.8.	Inclinación del canal	77
4.9.	Cálculo de la carga dinámica de la bomba	78
4.10.	Cálculo de potencia de la bomba	86
4.11.	Selección de la bomba	87
4.12.	Diseño de tanques.....	87
4.12.1.	Tanque principal (TP)	88
4.12.2.	Tanque volumétrico (TV)	89
4.12.3.	Tanque de almacenamiento (TA)	90
CONCLUSIONES		93
RECOMENDACIONES.....		95
BIBLIOGRAFÍA.....		97
APÉNDICES		99

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Comparación entre flujo en tuberías y flujo en canales abiertos	2
2.	Diferentes tipos de flujo en canales abiertos: flujo gradualmente variado (GVF) y flujo rápidamente variado (RVF)	4
3.	Parámetros de la sección transversal	9
4.	Elementos geométricos de una sección circular	11
5.	Distribución de velocidades en un canal rectangular	12
6.	Velocidad en diferentes secciones de canal	12
7.	Efecto de la rugosidad en la distribución de velocidades en un canal abierto.....	13
8.	Distribución de presiones en canales rectos y curvos con pendientes bajas u horizontales, en la sección bajo consideración	14
9.	Distribución de presiones en un flujo paralelo en canales de pendiente alta.....	16
10.	Vertederos de pared delgada (a) y vertederos de pared gruesa (b)	17
11.	Vertedero libre (a) y vertedero sumergido (b)	18
12.	Diferentes tipos de vertederos según su forma geométrica	19
13.	Principios básicos de análisis de vertederos.....	20
14.	Perfiles de rebose de vertederos	23
15.	Medición con molinete.....	30
16.	Relación lineal típica, entre la velocidad de la corriente y la velocidad de giro de los dos molinetes.....	31
17.	Sección transversal en el punto de aforo	32
18.	Sensor.....	33

19.	Imán.....	34
20.	Ciclo computador.....	35
21.	Hélice.....	36
22.	Sensor inductivo.....	39
23.	Molinete tipo taza cónica.....	40
24.	Molinete tipo hélice o de eje horizontal.....	42
25.	Curvas de calibración de cuatro molinetes diferentes.....	45
26.	Gráfica relación entre la velocidad de giro (N) y la velocidad del flujo (V).....	46
27.	Calibración del molinete en canal con flujo en movimiento.....	47
28.	Canal recto calibración de molinete.....	48
29.	Tanque circular del IMTA para calibración de molinetes.....	50
30.	Vista planta sistema propuesto.....	53
31.	Detalle estructura del canal.....	57
32.	Vista en 3D del canal propuesto (A).....	61
33.	Vista en 3D del canal propuesto (B).....	62
34.	Representación del borde libre (BL).....	65
35.	Definición esquemática de las variables para la ecuación de Chezy....	67
36.	Dimensiones canal.....	69
37.	Gráfica, pendiente crítica vrs caudal crítico.....	72
38.	Cálculo, pendiente del canal.....	77
39.	Detalle, componentes del sistema.....	79
40.	Diagrama de Moody.....	85
41.	Vista ubicación de tanques.....	88
42.	Vista isométrica, sistema propuesto.....	91

TABLAS

I.	Elementos geométricos de secciones de canal	7
II.	Coordenadas características de chorro libre (napa $P>H$)	21
III.	Pendientes laterales apropiadas para canales construidos en diferentes clases de materiales	26
IV.	Ecuaciones de calibración para algunos modelos de molinetes	44
V.	Propiedades físicas y mecánicas del acrílico	55
VI.	Especificaciones mínimas del equipo (<i>tricket</i> o gato hidráulico) para cambio de pendiente del canal.....	59
VII.	Elementos geométricos de la sección del canal.....	64
VIII.	Características físicas del canal.....	67
IX.	Iteraciones, cálculo del caudal crítico y la pendiente crítica	72
X.	Resultados, iteraciones, cálculo de Y_n	76
XI.	Dimensiones del canal hidráulico de la pendiente variable	78
XII.	Propiedades físicas del agua	80
XIII.	Diámetros internos de tubería PVC.....	80
XIV.	Cálculo, pérdidas secundarias	83
XV.	Volumen tanque de almacenamiento	90

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
B	Ancho del canal
A	Área
BL	Borde libre
Q	Caudal que pasa por una sección del canal
cm	Centímetros
d	Día
IMTA	Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
h	Hora
m	Metro
P	Perímetro mojado
%	Porcentaje
y	Profundidad del flujo
rps	Revoluciones por segundo
Σ	Sumatoria
TA	Tanque de almacenamiento
TP	Tanque principal
TV	Tanque volumétrico
T	Tiempo
U	Unidad

GLOSARIO

Aforo	Conjunto de operaciones realizadas con el propósito de medir el caudal de una corriente superficial para un nivel determinado. Uno de los principales objetivos que se tiene al realizar un aforo es correlacionar los datos obtenidos de niveles y caudales mediante una curva de calibración.
Contador de revoluciones	Instrumento que permite determinar el número de revoluciones dadas por la hélice de un molinete.
Impermeabilidad	Propiedad de la unión de dos cuerpos para impedir el paso de líquidos a través de estos.
Limnómetro	Instrumento que consta de una mira graduada en centímetros la cual permite el registro puntual de los niveles de agua presentados por una corriente. Requiere de un observador que haga las lecturas a unas horas determinadas con base en los requerimientos de información.
Modelo hidráulico	Estructura diseñada con el objetivo de usos hidráulicos.

Napas freáticas	Son capas de agua subterránea ubicadas a diferentes alturas en el perfil del subsuelo. Estas son susceptibles de ser alcanzadas por contaminantes de diversa naturaleza: orgánica, inorgánica, mala ubicación y/o construcción de pozos ciegos, vertido de aguas residuales.
Número de Froude	Valor adimensional que representa la relación entre la energía potencial y la energía cinética de un flujo.
Número de Reynolds	Valor adimensional que representa los efectos de la viscosidad del fluido en relación a su inercia.
Proyecto de construcción	Conjunto de cálculos y dibujos que se hacen para planificar y ejecutar lo que ha de ser una obra de arquitectura o de ingeniería.
Resalto hidráulico	Cambio rápido en la superficie del flujo de un nivel bajo a un nivel alto producido por un obstáculo que lo desacelera.

RESUMEN

El Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología de Guatemala (INSIVUMEH) es una institución técnicocientífica que contribuye a la optimización de actividades del sector productivo de la República de Guatemala asociadas a las ciencias atmosféricas, geofísicas e hidrológicas; actúa como asesor técnico del gobierno en caso de eventos naturales que provocan desastres.

Para el desarrollo de estudios hidrológicos, es de suma importancia la obtención de información relacionada con la variación del caudal que fluye por una determinada sección de un cauce natural.

Para medir estos caudales es necesario el uso de equipos desarrollados para este fin, tales como, los molinetes. El principio básico de los molinetes es determinar la velocidad de una corriente. Con el uso, estos aparatos tienden a descalibrarse, lo que hace necesario tener que calibrarlos cada cierto tiempo de servicio.

El presente trabajo describe el diseño de un canal hidráulico de sección rectangular y de pendiente variable para calibrar molinetes a diferentes velocidades; para ser construido en las instalaciones del Insivumeh para realizar ellos mismos la calibración de sus aparatos o prestar este servicio a los interesados.

Se tuvo especial cuidado en que la información que se presenta, tenga una utilidad práctica para el estudiante y profesional de la ingeniería civil, para que pueda ser aplicado en los diferentes proyectos relacionados.

OBJETIVOS

General

Diseñar un canal para la calibración de molinetes en las instalaciones del Insivumeh.

Específicos

1. Conocer el funcionamiento de un canal para la calibración de molinetes.
2. Diseñar un canal abierto para la calibración de molinetes a velocidades constantes.
3. Promover el desarrollo de obras de infraestructura, que faciliten la calibración de los aparatos en forma más precisa para el cálculo de diferentes rangos de velocidad.
4. Indicar las ventajas y desventajas de tener un canal para la calibración del molinete.

INTRODUCCIÓN

Obtener información del caudal que fluye por una determinada sección de un cauce natural o artificial es de suma importancia en los estudios hidrológicos. Existen diferentes métodos para aforar los cuerpos de agua, dependiendo de su profundidad y ancho, de la magnitud de las velocidades a medir y del grado de accesibilidad.

Los molinetes cumplen la función de determinar el valor de la velocidad a diferentes profundidades en una serie de verticales a distancias definidas en la misma sección de un curso de agua, para obtener su velocidad media y caudal total.

El capítulo uno presenta los tipos de flujos en canales hidráulicos, incluyendo los principios fundamentales de los canales, flujo en canales abiertos y su medición, diseño y materiales de canales, tipos de bombas, otros. En el capítulo dos se desarrolla el tema de los tipos de molinetes: partes, funcionamiento y tipos, entre otros.

Los métodos de calibración de molinetes y sus aspectos generales de los mismos se discuten en el capítulo tres. El capítulo cuatro incluye el diseño hidráulico del canal propuesto y sus diferentes componentes. Por último, se presentan las conclusiones y recomendaciones del trabajo.

1. TIPOS DE FLUJO EN CANALES HIDRÁULICOS

1.1. Principios fundamentales de los canales

A continuación, se describen los principios fundamentales de los canales hidráulicos.

1.1.1. Descripción general de los canales hidráulicos

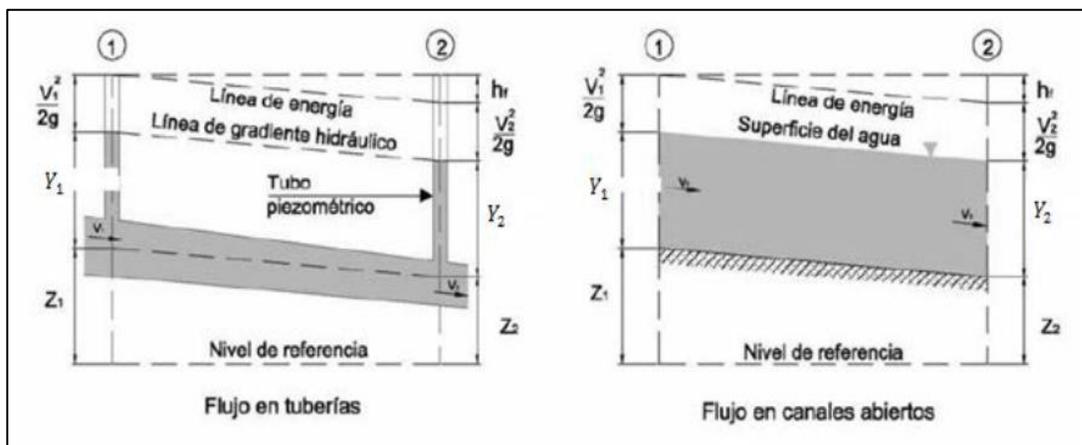
El flujo de agua en un conducto puede ser flujo en canal abierto o flujo en tubería, los que son similares en muchos aspectos pero se diferencian en un aspecto muy importante. El flujo en un canal abierto debe tener una superficie libre, en tanto que el flujo en tubería no la tiene, debido a que en este caso el agua debe llenar completamente el conducto. La superficie de un canal generalmente está sometida a la presión atmosférica.

A pesar de la similitud que existe entre estos dos tipos de flujo, es mucho más difícil resolver problemas de flujo de canales abiertos que en tuberías a presión. Las condiciones de flujo en canales abiertos se complican por el hecho de que la posición de la superficie libre puede cambiar con el tiempo y con el espacio; también, por el de que la profundidad de flujo, caudal y las pendientes del fondo del canal de la superficie son interdependientes.

La superficie varía desde metales pulidos utilizados en canales de prueba hasta lechos rugosos e irregulares en ríos.

El flujo en un conducto cerrado no es necesariamente flujo en tubería. Si se tiene una superficie libre, puede clasificarse como flujo en canal abierto; por ejemplo, un alcantarillado se diseña para operar como canal abierto.

Figura 1. **Comparación entre flujo en tuberías y flujo en canales abiertos**



Fuente: RODRÍGUEZ RUIZ, Pedro. *Hidráulica de canales*. p. 7.

1.1.2. Tipos de flujo en canales abiertos

La clasificación del flujo que se presenta a continuación, se hace de acuerdo con el cambio en la profundidad de flujo con respecto al tiempo y al espacio.

1.1.3. Flujo permanente y flujo no permanente

Se dice que el flujo en un canal abierto es permanente, si la profundidad de flujo no cambia o puede suponerse constante durante un intervalo de tiempo en consideración.

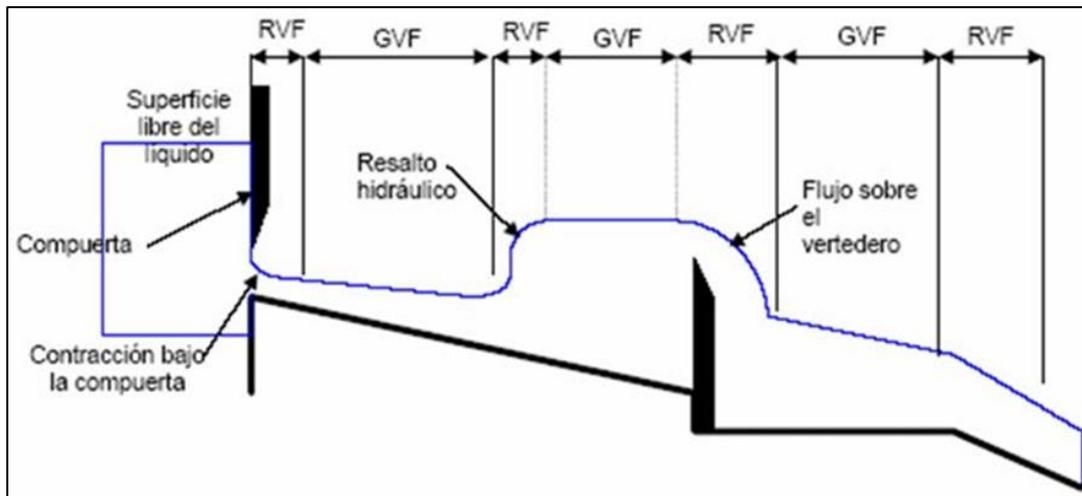
El flujo no permanente se presenta si la profundidad de flujo cambia con respecto al tiempo en consideración.

1.1.4. Flujo uniforme y flujo variado

El flujo en canales abiertos es uniforme, si la profundidad de flujo es la misma en cada sección del canal. Un flujo uniforme puede ser permanente o no permanente, según cambie o no la profundidad con respecto al tiempo.

- Flujo uniforme permanente: es el tipo de flujo fundamental que se considera en la hidráulica de canales abiertos. La profundidad de flujo no cambia durante el intervalo de tiempo bajo consideración.
- Flujo uniforme no permanente: requiere que la superficie del agua fluctúe de un tiempo a otro pero permaneciendo paralela al fondo del canal.
- Variado: si la profundidad de flujo cambia a lo largo del canal, puede ser clasificado también como:
 - Flujo rápidamente variado o gradualmente variado: si la profundidad del agua cambia de manera abrupta en distancias comparativamente cortas, sino de otro modo se comporta gradualmente variado.

Figura 2. **Diferentes tipos de flujo en canales abiertos: flujo gradualmente variado (GVF) y flujo rápidamente variado (RVF)**



Fuente: RODRÍGUEZ RUIZ, Pedro. *Hidráulica de canales*. p. 11.

1.1.5. Estados de flujo

El estado o comportamiento del flujo en canales abiertos está gobernando básicamente por los efectos de la viscosidad y gravedad en relación con las fuerzas inerciales del flujo.

- Efecto de la viscosidad: el flujo puede ser laminar, turbulento o transicional según el efecto de la viscosidad en relación con la inercia.
 - El flujo es laminar: si las fuerzas viscosas son muy fuertes en relación con las fuerzas inerciales, de tal manera que la viscosidad juega un papel importante para determinar el comportamiento de flujo.

- El flujo es turbulento: si las fuerzas son débiles en relación con las fuerzas inerciales.
- El efecto de la viscosidad en relación con la inercia pueden representarse mediante el número de Reynolds definido por:

$$R = \frac{vL}{\nu}$$

Donde:

- v: velocidad de flujo en pies/s
- L: longitud, en pies.
- ν : viscosidad cinemática, en pies²/s

Nota: como el flujo en la mayor parte de los canales es turbulento, un modelo empleado para simular un canal prototipo debe ser diseñado de tal manera que el número de Reynolds en el canal modelo este en el rango turbulento.

- Efecto de la gravedad: el efecto de la gravedad sobre el estado de flujo se representa por la relación entre las fuerzas inerciales y las fuerzas gravitacionales. La relación está dada por el número de Froude, el cual se representa como:

$$F = \frac{V}{\sqrt{g * Y}}$$

Donde:

- V: velocidad de flujo m/s
- g: aceleración de la gravedad m/s^2
- \bar{Y} : tirante hidráulico m

Nota: debido a que el flujo en la mayor parte de los canales está controlado por efectos gravitacionales, un modelo utilizado para simular un canal prototipo con propósitos de prueba debe ser diseñado teniendo en cuenta este efecto; es decir, el número de Froude del flujo en el canal modelo debe ser igual al número de Froude del flujo en el canal prototipo, en el caso que se cuente con uno disponible.

1.1.6. Clases de canales abiertos

Los canales se pueden clasificar de diferente forma, de acuerdo al criterio que se utilice; según su origen un canal puede ser natural o artificial.

- Los canales naturales: incluyen todos los cursos de agua que existen de manera natural en la tierra, los cuales varían en tamaño desde pequeños arroyos en zonas montañosas, hasta quebradas, arroyos, ríos pequeños y grandes, entre otros.
- Los canales artificiales: son aquellos construidos o desarrollados mediante el esfuerzo humano, como canales de vegetación, canales de centrales hidroeléctricas, canales de irrigación, cunetas de drenajes, vertederos, canales de desborde, canales de madera, otros. Así como canales de modelos construidos en el laboratorio con propósitos experimentales.

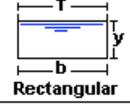
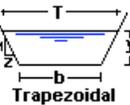
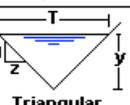
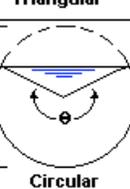
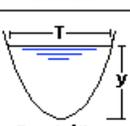
1.2. Flujo en canales abiertos y sus propiedades

El flujo en canal abierto debe tener una superficie libre, en tanto que el flujo en tubería no la tiene, debido a que en este caso el agua debe llenar completamente el conducto.

1.2.1. Geometría de un canal

Un canal construido con una sección transversal invariable y una pendiente de fondo constante se conoce como canal prismático. En la siguiente tabla se presentan las 7 formas geométricas utilizadas comúnmente.

Tabla I. Elementos geométricos de secciones de canal

Tipo de sección	Área A (m ²)	Perímetro mojado P (m)	Radio hidráulico Rh (m)	Espejo de agua T (m)
 Rectangular	by	$b+2y$	$\frac{by}{b+2y}$	b
 Trapezoidal	$(b+zy)y$	$b+2y\sqrt{1+z^2}$	$\frac{(b+zy)y}{b+2y\sqrt{1+z^2}}$	$b+2zy$
 Triangular	zy^2	$2y\sqrt{1+z^2}$	$\frac{zy}{2\sqrt{1+z^2}}$	$2zy$
 Circular	$\frac{(\theta-\text{sen}\theta)D^2}{8}$	$\frac{\theta D}{2}$	$(1-\frac{\text{sen}\theta}{\theta})\frac{D}{4}$	$\frac{(\text{sen}\frac{\theta}{2})D}{2\sqrt{y(D-y)}}$
 Parabólica	$2/3 Ty$	$T + \frac{8y^2}{3T}$	$\frac{2T^2y}{3T+8y^2}$	$\frac{3A}{2y}$

Fuente: RODRÍGUEZ RUIZ, Pedro. *Hidráulica de canales*. p. 22.

1.2.2. Elementos geométricos de una sección de canal

Los elementos geométricos son propiedades de una sección de canal, pueden ser definidos por completo por la geometría de la sección y la profundidad de flujo.

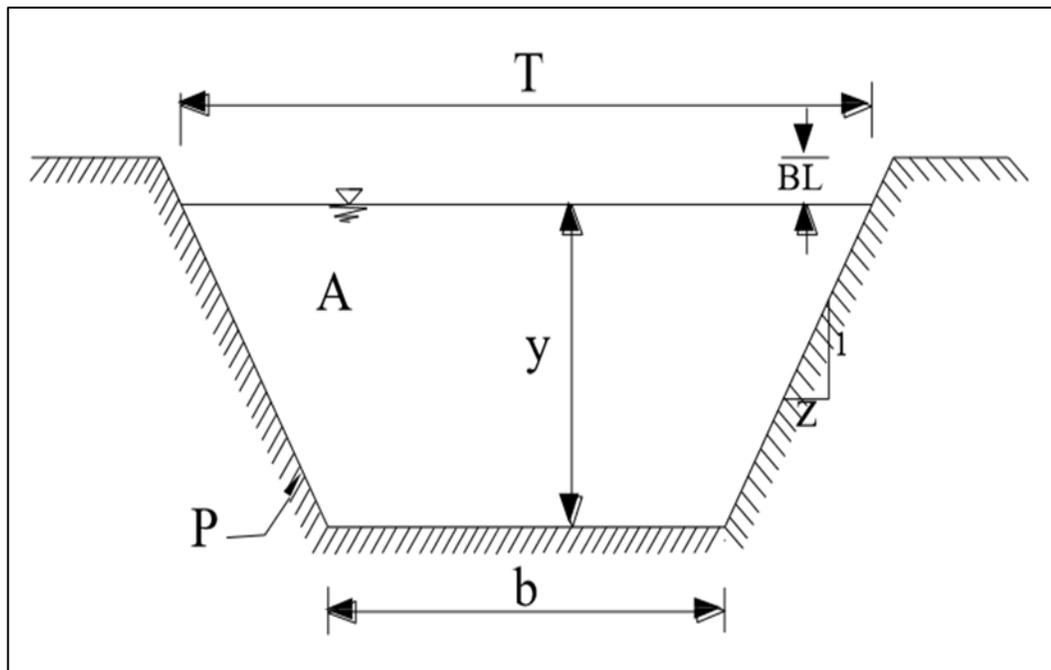
Para secciones regulares y simples, los elementos geométricos pueden expresarse matemáticamente en términos de la profundidad de flujo y de otras dimensiones de la sección; pero para secciones complicadas y secciones de corrientes naturales, no se pueden preparar curvas que representen la relación entre estos elementos y la profundidad de flujo para uso en cálculos hidráulicos.

A continuación se dan las definiciones de varios elementos geométricos de importancia básica.

- Profundidad de flujo o tirante (y): es la distancia vertical desde el punto más bajo de una sección del canal hasta la superficie libre, la profundidad de flujo de la sección es la profundidad de flujo perpendicular a la dirección de este, o la altura del canal que contiene el agua.
- El nivel: es la elevación o distancia vertical desde un nivel de referencia o *datum* hasta la superficie libre; no obstante, si el punto más bajo de la sección de canal se escoge como nivel de referencia, el nivel es idéntico a la profundidad de flujo.
- Ancho superficial (T): es el ancho de la sección del canal en la superficie libre.

- Área mojada (A): es el área de la sección transversal del flujo perpendicular a la dirección de flujo.
- Perímetro mojado (P): es la longitud de la línea de intersección de la superficie de canal y de un plano transversal perpendicular a la dirección de flujo.
- Borde libre (BL): es la distancia vertical desde la parte superior del canal hasta la superficie del agua en la condición de diseño.

Figura 3. **Parámetros de la sección transversal**



Fuente: ESTRADA GUTIÉRREZ, Guadalupe. *Laboratorio de Hidráulica de Canales*.
www.fing.uach.mx/licenciaturas/IC/2013/02/05/Manual_de_Hidraulica_de_Canales.pdf.

Consulta: 25 de febrero de 2018.

- Radio hidráulico (R): es la relación del área mojada con respecto a su perímetro mojado.

$$R = \frac{A}{P}$$

- Profundidad hidráulica o tirante hidráulico (D): es la relación entre el área mojada y el ancho en la superficie.

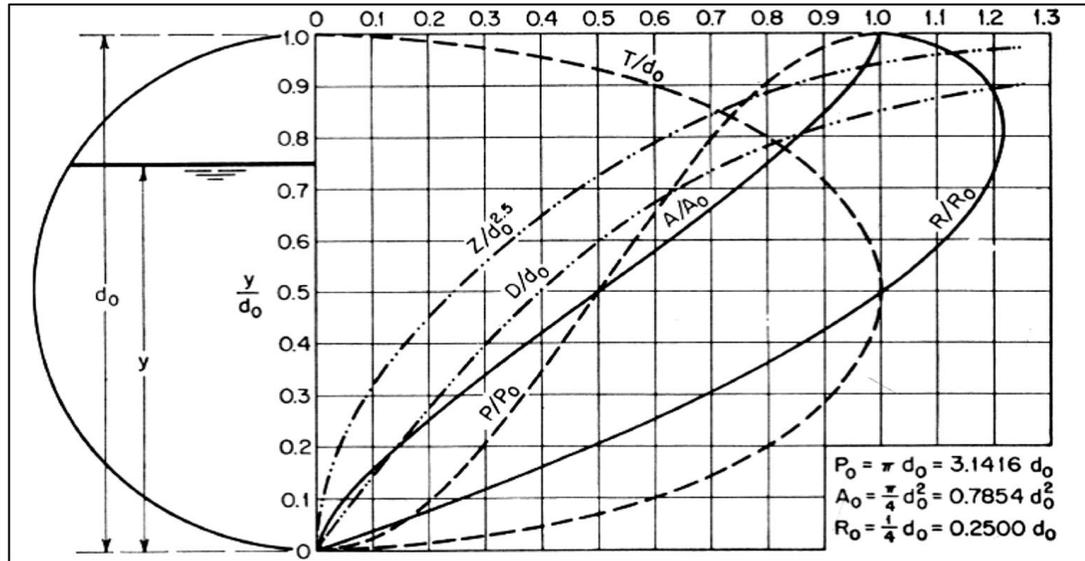
$$D = \frac{A}{T}$$

- Factor de sección para el cálculo de flujo crítico (Z): es el producto del área mojada y la raíz cuadrada de la profundidad hidráulica.

$$Z = A\sqrt{D} = A\sqrt{A/T}$$

- Factor de sección para el cálculo de flujo uniforme ($AR^{(2/3)}$): es el producto del área mojada y el radio hidráulico elevado a la potencia 2/3.
- Talud, z: es la inclinación de las paredes de la sección transversal y corresponde a la distancia horizontal z recorrida desde un punto sobre la pared, para ascender la unidad de longitud a otro punto sobre la misma, generalmente se expresa 1: z.

Figura 4. Elementos geométricos de una sección circular



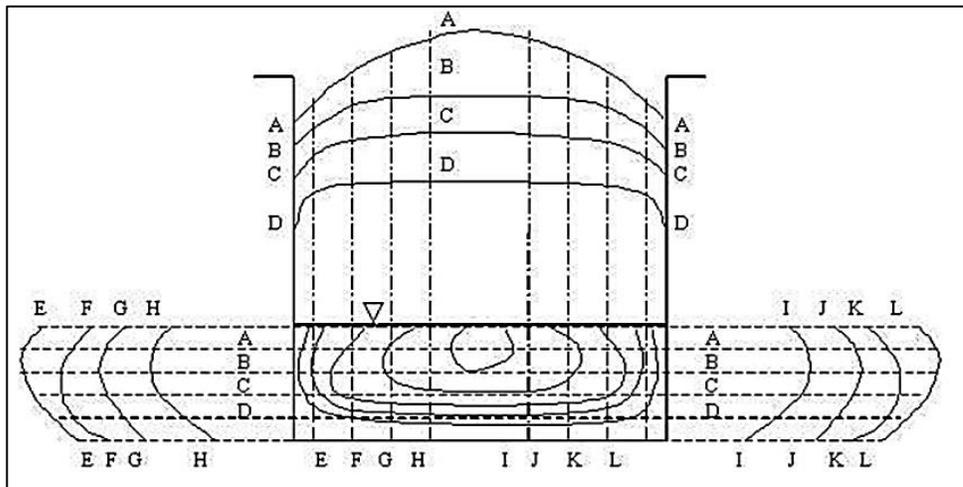
Fuente: ROCHA FELICES, Arturo. *Hidráulica de canales y tuberías*. p. 301.

1.2.3. Distribución de velocidades en una sección de canal

Debido a la presencia de la superficie libre y a la fricción a lo largo de las paredes del canal, las velocidades en un canal no están uniformemente distribuidas en su sección. La máxima velocidad medida en canales normales a menudo ocurre por debajo de la superficie libre a una distancia de 0,05 m a 0,025 m de la profundidad.

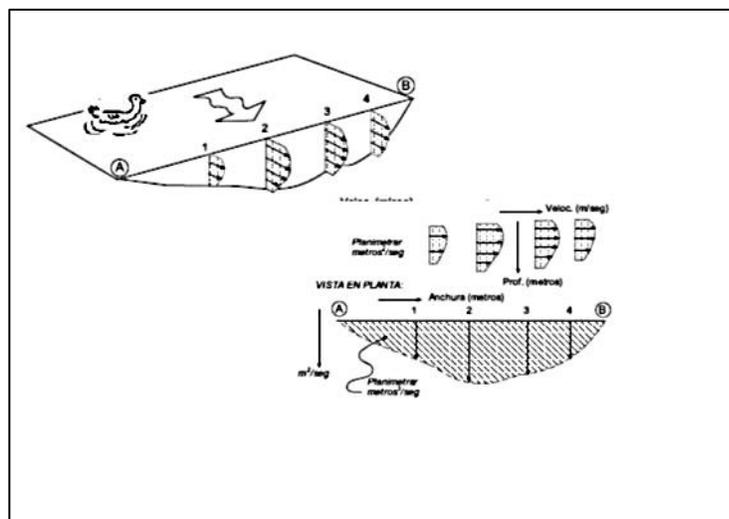
A continuación, en las figuras 5 y 6, se presenta un modelo de la distribución de velocidades para varias secciones horizontales y verticales en un canal con sección rectangular y las curvas de igual de sección transversal, como también otras secciones.

Figura 5. **Distribución de velocidades en un canal rectangular**



Fuente: GUTIÉRREZ ACEVEDO, Franklin Hernand. *Secuencia 1*.
https://repository.eafit.edu.co/bitstream/handle/10784/5432/GutierrezAcevedo_FranklinHernand.o_2011.pdf?sequence=1. Consulta: 10 de septiembre de 2018.

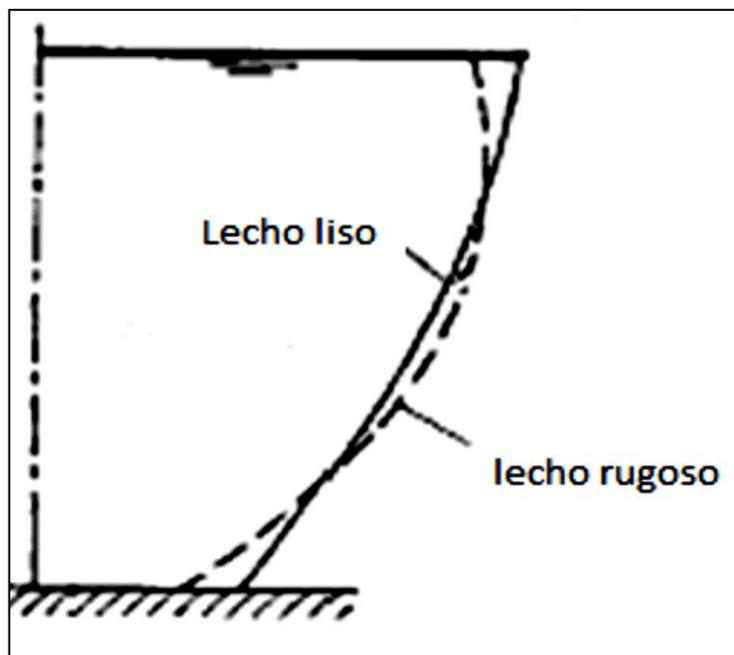
Figura 6. **Velocidad en diferentes secciones de canal**



Fuente: SANDOVAL, Luis. *Manual de laboratorio de hidráulica de canales*. p. 3.

La distribución de velocidades en una sección de canal depende también de otros factores, como una forma inusual de la sección, la rugosidad del canal y la presencia de curvas.

Figura 7. **Efecto de la rugosidad en la distribución de velocidades en un canal abierto**



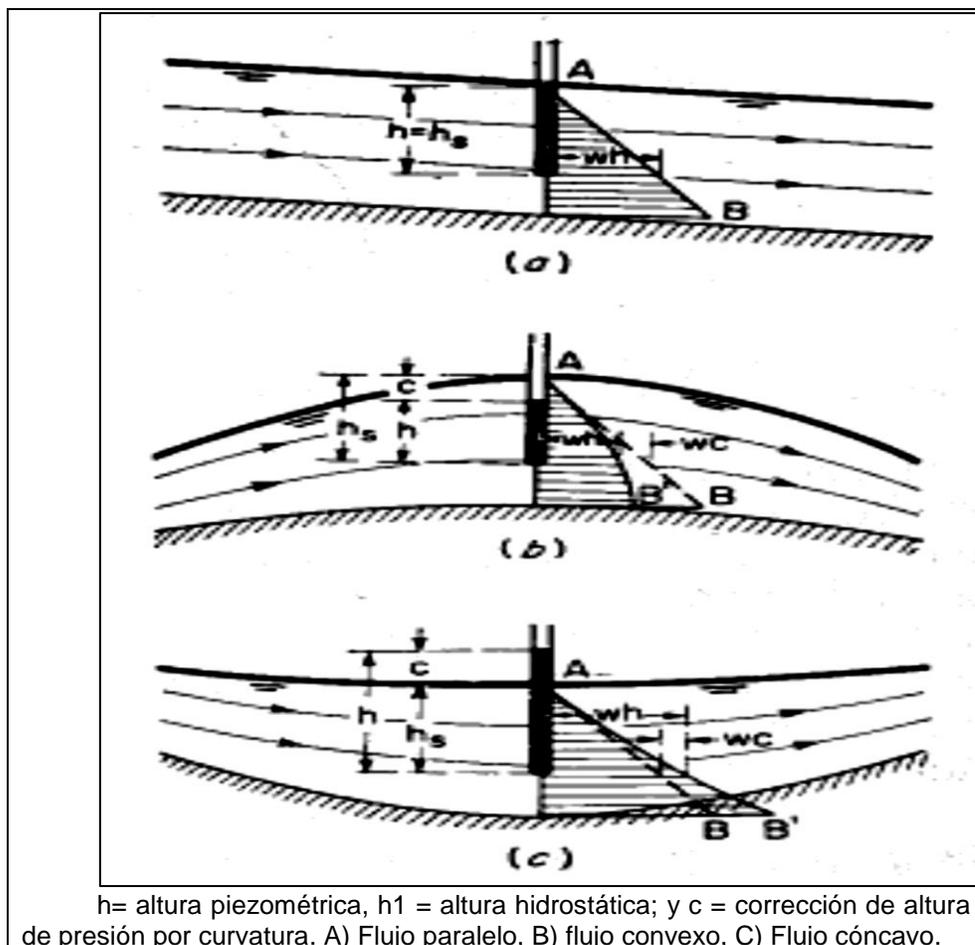
Fuente: RODRÍGUEZ RUIZ, Pedro. *Hidráulica de canales*. p. 27.

1.2.4. **Distribución de presión en una sección de canal**

La presión en cualquier punto de la sección transversal del flujo de un canal con pendiente baja, puede medirse por medio de la altura de la columna de agua en un tubo piezómetro instalado en un punto cualquiera. Al no considerar las pequeñas perturbaciones debidas a la turbulencia, es claro que el agua en

esta columna debe subir desde el punto de medición hasta la línea de gradiente hidráulico o superficie libre.

Figura 8. **Distribución de presiones en canales rectos y curvos con pendientes bajas u horizontales, en la sección bajo consideración**



Fuente: ROCHA FELICES, Arturo. *Hidráulica de canales y tuberías*. p. 205.

Entonces, la presión en cualquier punto de la sección es directamente proporcional a la profundidad de flujo por debajo de la superficie libre e igual a

la presión hidrostática correspondiente a esta profundidad; dicho de otra manera, la distribución de presiones a lo largo de la sección transversal del canal es igual a la distribución hidrostática de presiones, es decir, la distribución es lineal y puede representarse mediante una recta.

1.2.5. Efecto de la pendiente en la distribución de presiones

Con referencia a un canal inclinado recto de ancho unitario y ángulo de pendiente θ (ver figura 9), el peso del elemento de agua sombreado de longitud dL es igual a:

$$w * y * \cos(\theta) * dl$$

Donde:

- w peso franja unitaria
- $y \cos \theta$ profundidad media perpendicular desde la superficie

La presión debida a este peso es $w y \cos^2 \theta dL$, y la presión unitaria es por consiguiente igual a $w * y * \cos(\theta)^2$, y la altura es:

- $h = y \cos^2 \theta$
- $h = d \cos \theta$

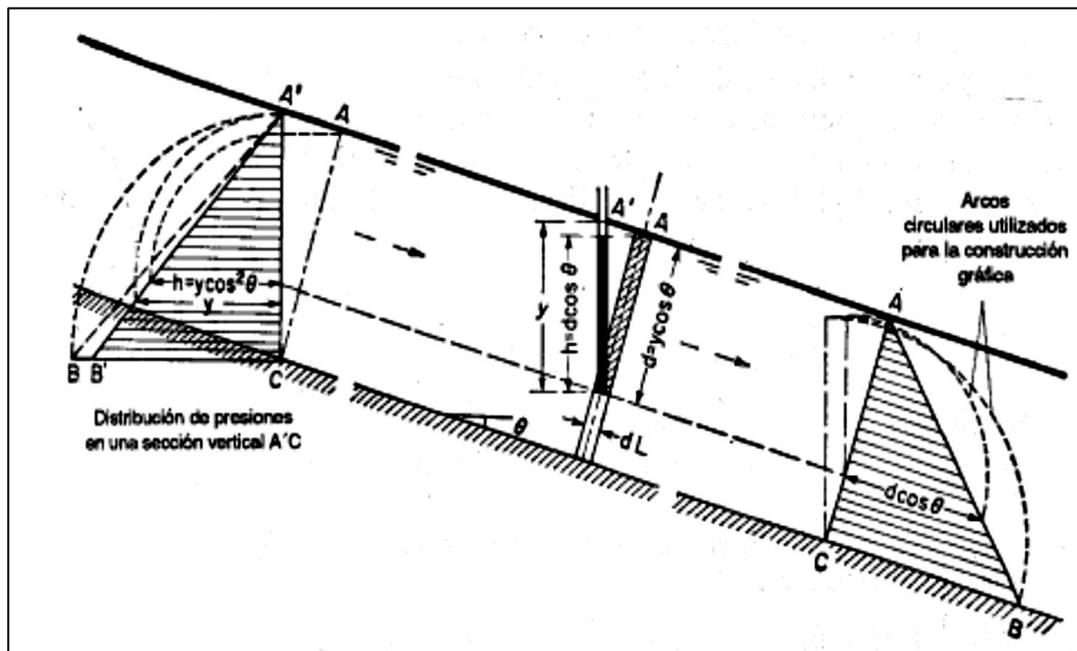
Donde:

- $d = y \cos \theta$: la profundidad media perpendicular desde la superficie

De las fórmulas anteriores si θ es menor que 6° la altura de presión tiende a disminuir en una cantidad inferior del 1 %, de la pendiente de los canales normales es mucho menor que 1 en 10. La corrección por defecto de la pendiente a menudo puede ignorarse con seguridad, sin embargo, cuando la pendiente del canal es grande y sus efectos se vuelven apreciables, debe hacerse la corrección si se desean cálculos precisos. De lo anterior se concluye lo siguiente:

- Canal de pendiente baja: $1^\circ < \theta < 10^\circ$
- Canal de pendiente alta: $\theta > 10^\circ$

Figura 9. **Distribución de presiones en un flujo paralelo en canales de pendiente alta**



Fuente: ROCHA FELICES, Arturo. *Hidráulica de canales y tuberías*. p. 325.

1.3. Medición de flujos en canales

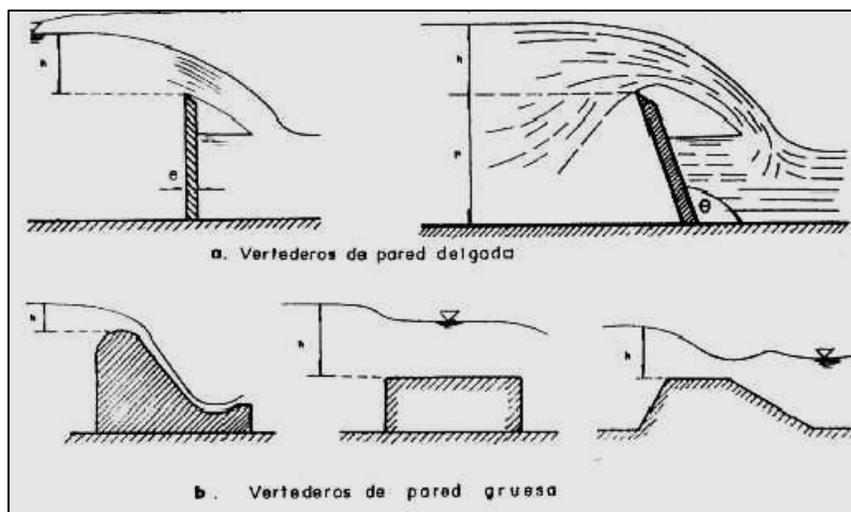
Es útil en aplicaciones donde los tradicionales medidores de flujo que miden en tuberías llenas no son adecuados.

1.3.1. Flujo sobre vertederos de pared delgada

El término vertedero se define, de manera sencilla, como una abertura que se realiza en la pared que puede ser un depósito o una retención (barrera) colocada en un canal o río.

Los vertederos de paredes delgadas son vertederos hidráulicos, generalmente usados para medir caudales. Para obtener resultados fiables en la medición con el vertedero de pared delgada.

Figura 10. Vertederos de pared delgada (a) y vertederos de pared gruesa (b)

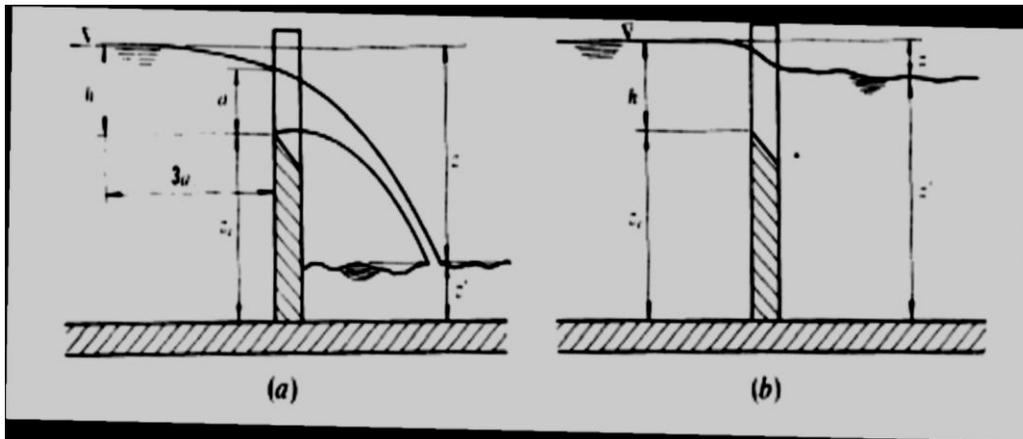


Fuente: ROCHA FELICES, Arturo. *Hidráulica de canales y tuberías*. p. 456.

Los vertederos se pueden clasificar de varias maneras, de acuerdo al criterio que se utilice.

- Por el tipo de cresta: pueden ser de pared delgada o pared gruesa
- Niveles de aguas abajo: vertedero libre o vertedero sumergido

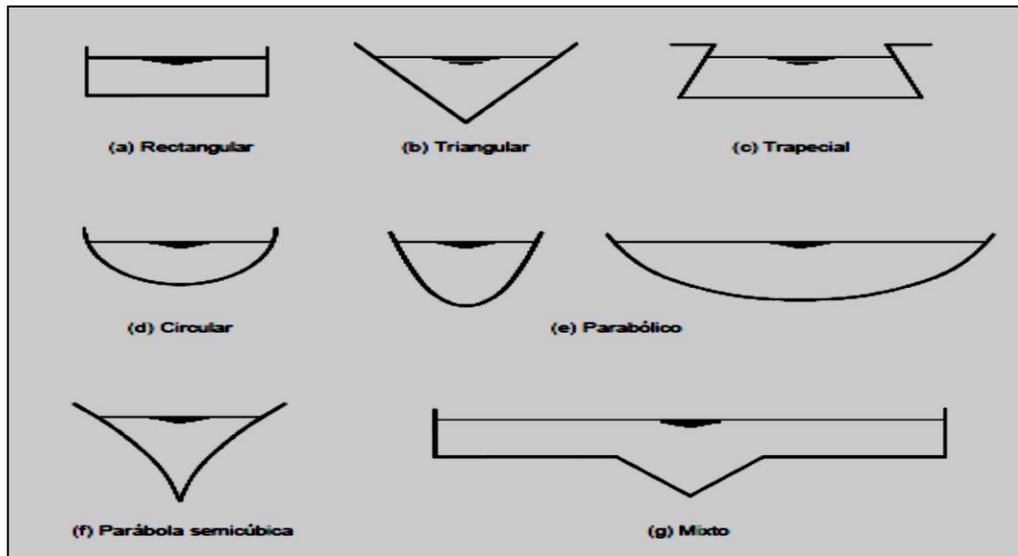
Figura 11. **Vertedero libre (a) y vertedero sumergido (b)**



Fuente: ROCHA FELICES, Arturo. *Hidráulica de canales y tuberías*. p. 461.

- Por su forma: rectangulares, triangulares, trapeciales, circulares, parabólicos.

Figura 12. **Diferentes tipos de vertederos según su forma geométrica**

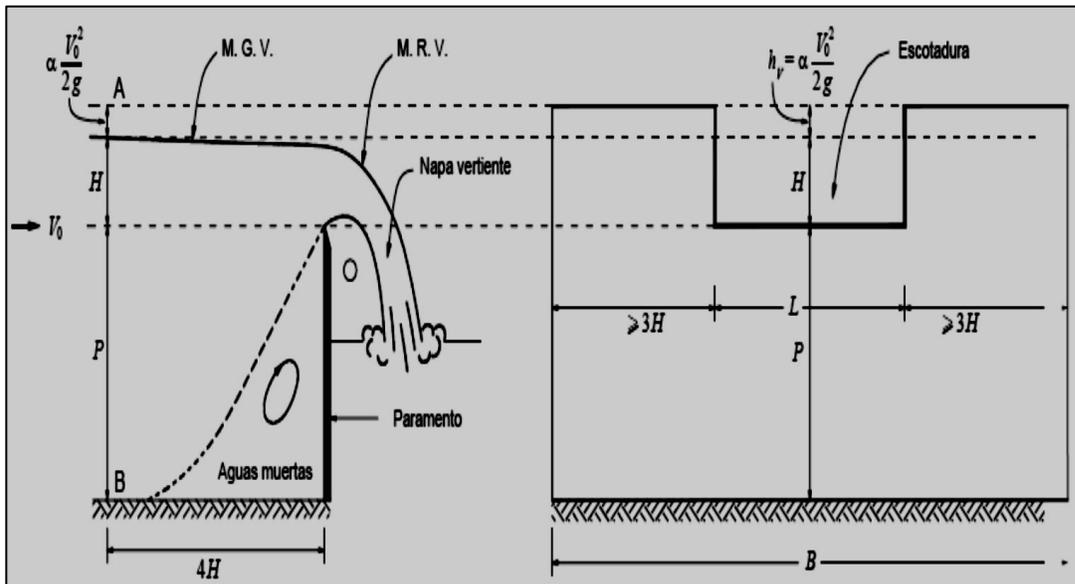


Fuente: ROCHA FELICES, Arturo. *Hidráulica de canales y tuberías*. p. 463.

En todo vertedero se desarrolla un chorro de características regulares, dicho fenómeno también se conoce como napa vertiente (cortina de agua o lámina de agua); esto origina un movimiento rápidamente variable a sus alrededores o dicho de otra manera se forma un remanso de presión; esto sucede por el cambio de energía potencial a energía cinética.

También, es preciso mencionar que existe el parámetro del vertedero (umbral), que no es más que la distancia que existe entre el fondo y la cresta del vertedero y otros elementos básicos y fundamentales de los vertederos que lo caracterizan completamente.

Figura 13. Principios básicos de análisis de vertederos



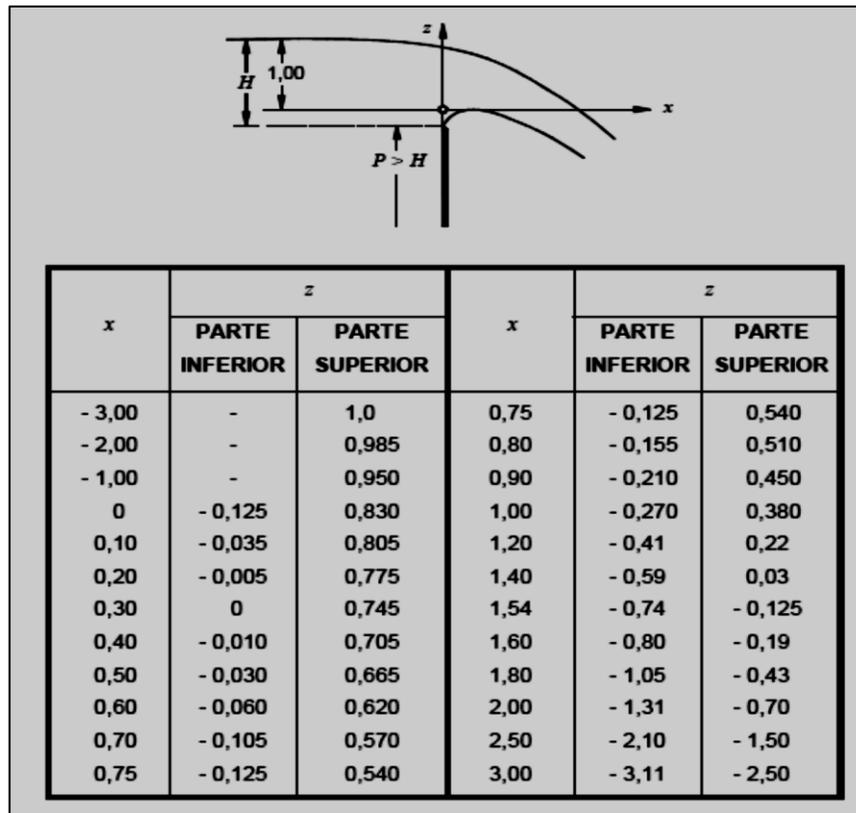
Fuente: ROCHA FELICES, Arturo. *Hidráulica de canales y tuberías*. p. 456.

De la figura anterior se tiene lo siguiente:

- P: umbral de aproximación
- B: ancho del canal
- α : coeficiente de Coriolis
- V_0 : velocidad de aproximación
- L: longitud del vertedero
- g: constante de la gravedad

Normalmente se cumple en los vertederos que las coordenadas típicas de un chorro libre son $P > H$; para el caso de que el vertedero se vaya a utilizar para mediciones es necesario asegurarse, que exista un tubo de ventilación que conecte directamente, con la atmosfera y la parte inferior del chorro.

Tabla II. **Coordenadas características de chorro libre (napa $P > H$)**



Fuente: ROCHA FELICES, Arturo. *Hidráulica de canales y tuberías*. p. 458.

1.3.2. **Objetivo de los vertederos**

De acuerdo a sus características, los principales objetivos de los vertederos son:

- Medir caudal de un flujo.
- Permitir el reboce de un líquido contenido en un depósito o la circulación de un líquido que se desplaza en un canal o río.

1.3.3. Vertederos según su geometría

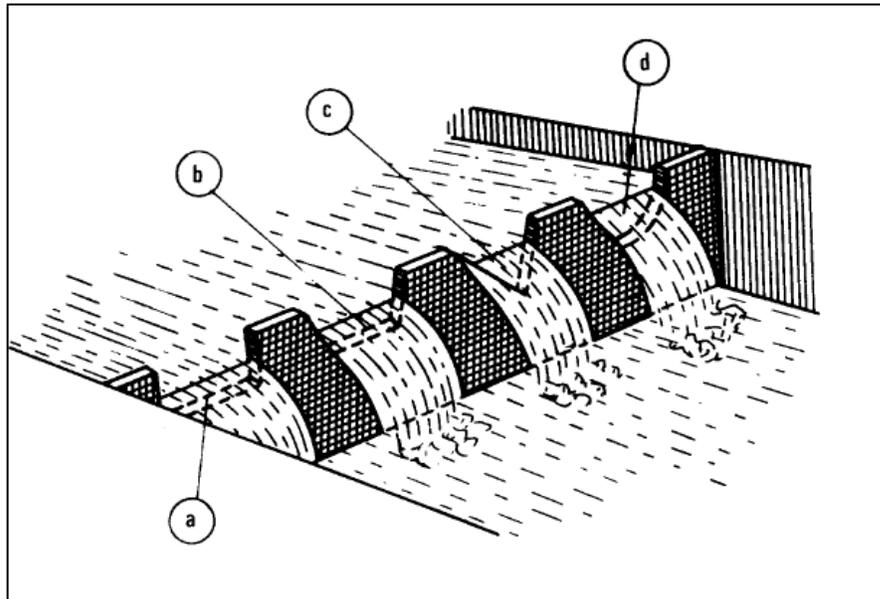
Los vertederos de pared delgada son los más utilizados para la medición de caudales, ya que se pueden construir diversas formas. Para considerar un vertedero como pared delgada se debe cumplir que el espesor de la pared no debe ser mayor de $2H/3$.

A continuación (ver figura 14), se presentan diferentes formas de vertederos:

- a: vertedero rectangular
- b: vertedero trapecial
- c: vertedero triangular
- d: vertedero circular

El perfil del vertedero de rebose se determina según la superficie de forma inferior de la napa. La forma de la superficie superior de la napa se puede interpretar con el principio de tiro parabólico; en concordancia con esto se puede decir que la componente horizontal de velocidad constante y la única fuerza que actúa sobre la napa es la gravedad.

Figura 14. **Perfiles de rebose de vertederos**



Fuente: ROCHA FELICES, Arturo. *Hidráulica de canales y tuberías*. p. 460.

Un parámetro de vertederos importante es la velocidad de aproximación, esta no es más que la velocidad media del fluido cuando está por pasar por la arista del vertedero; y esta se denota V_o , la expresión que caracteriza este parámetro es:

$$V_o = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{B(P + H)}$$

Donde:

- B: es el ancho del canal
- Pero si $P > H$

- Entonces $V_0 = 0$ se puede considerar despreciable. Es claro si se ha dado una expresión para velocidad existe entonces, energía cinética la cual se expresa como:

$$h_v = \alpha \frac{V_0^2}{2g}$$

1.4. Diseño de canales con flujo uniforme

La mayor parte de los canales artificiales revestidos y construidos pueden resistir la erosión de manera satisfactoria y, por consiguiente, se consideran canales no erosionables.

En el diseño de canales no erosionables, factores como la velocidad permisible máxima y la fuerza atractiva permisible no son parte del criterio que debe ser considerado; por esta razón, no serán tomados en cuenta en el presente trabajo de graduación.

1.5. Materiales y revestimientos no erosionables

Los materiales no erosionables para formar el revestimiento de un canal, ya sea este fijo o desarmable, incluyen concreto, mampostería, acero, hierro fundido, madera, vidrio, y plástico, entre otros. La selección del material dependerá de su disponibilidad y costo, método de construcción del canal y su propósito.

En canales hidráulicos artificiales revestidos, la velocidad máxima que no causara erosión, es decir, la velocidad máxima permitida, puede no considerarse siempre y cuando el agua lleve arena, grava o piedras.

1.6. Velocidad mínima permisible

Esta es la menor velocidad que no permite el inicio de sedimentos y que impide el crecimiento de musgo o de plantas acuáticas. Este valor no es encontrado con facilidad, además de ser un valor incierto.

Para aguas que no tengan limos o para flujos previamente decantados, este factor es prácticamente despreciable, excepto por su efecto en el crecimiento de plantas. En general, se recomienda adoptar los siguientes valores:

- Una velocidad mínima de 0,6 a 0,9 m/s cuando la presencia de finos es pequeña.
- Una velocidad no menor a 0,75 m/s evitará el crecimiento de vegetación.

1.7. Pendientes del canal

La pendiente longitudinal del fondo de un canal está dada por la topografía o por la altura de energía requerida para el flujo de agua; depende en muchos casos del propósito del canal. Por ejemplo, los canales para presas hidroeléctricas requieren un alto nivel en el punto de entrega; entonces, para este caso es recomendable una pendiente pequeña, para mantener en el mínimo posible las pérdidas en elevación. Las pendientes laterales dependen principalmente de la clase del material.

Tabla III. **Pendientes laterales apropiadas para canales construidos en diferentes clases de materiales**

Material	Pendiente lateral
Roca	Aproximadamente vertical
Estiércol y suelos de turba	$\frac{1}{4} : 1$
Arcilla rígida o tierra con recubrimiento de concreto	$\frac{1}{2} : 1$ a $1:1$
Tierra con recubrimiento de piedras o tierra en canales grandes	$1 : 1$
Arcilla firme o tierra en canales pequeños	$1 \frac{1}{2} : 1$
Tierra arenosa suelta	$2 : 1$
Marga arenosa o arcilla porosa	$3 : 1$

Fuente: TELLO SÁNCHEZ, Pedro Andres y SÁNCHEZ AYALA, Franco Enrique. *Estudio hidrológico y diseño hidráulico de obras de captación y conducción para la implementación de un nuevo sistema de riego en una tierra de cultivo para palta en el distrito de Luricocha de la provincia de Huanta.* p. 45.

Esta tabla aplica a los canales no erosionables, otros factores a considerarse para la determinación de las pendientes laterales son el método de construcción, la condición de pérdidas por infiltración, los cambios climáticos, el tamaño del canal, entre otros.

En general, estas pendientes deben ser tan empinadas como sea factible y debe diseñarse de acuerdo a una alta eficiencia y a estabilidad hidráulica.

1.8. Tipos de bombas

Las bombas representan un elemento importante para el funcionamiento de un canal, ya que tienen la función de darle un movimiento al flujo del agua que estará circulando constantemente del tanque principal hacia el canal de

calibración de molinete, con descarga en el tanque de almacenamiento, repitiéndose el ciclo.

1.8.1. Bomba centrífuga

- Las bombas centrífugas convierten la energía en velocidad y luego en energía de presión; están formadas por un impulsor que gira en unas carcasa.
- Las bombas centrífugas están formadas por la capacidad de fluido descargado en un tiempo determinado, la potencia y el aumento de presión.

El objetivo principal de las bombas centrífugas es mover gran volumen de líquido por dos niveles diferentes, transformando algo mecánico en algo hidráulico. Los principales componentes de una bomba son: una tubería de aspiración, la voluta y un rodete. Las bombas centrífugas, también llamadas generadoras, se usan para hacer mover el fluido en contra a la presión, para que el fluido se mueva donde menos hay presión no es necesario utilizar energía.

2. MOLINETE

2.1. Generalidades

Los molinetes son dispositivos con los que es posible medir la velocidad del agua en una conducción abierta; su uso en hidrometría hace necesario su mantenimiento y calibración.

El molinete es un instrumento que tiene una hélice o rueda de cazoletas, que giran al introducirla en una corriente de agua; el de tipo de taza cónica gira sobre un eje vertical y el de tipo hélice gira sobre un eje horizontal. En ambos casos, la velocidad de rotación es proporcional a la velocidad de corriente; se cuenta el número de revoluciones en un tiempo dado.

El empleo del molinete debe efectuarse de acuerdo con las instrucciones del fabricante, pueden ir montados en soportes o suspendidos de cables. Antes de ser usados en campo deben ser calibrados por el fabricante para determinar la relación entre la velocidad de rotación de la hélice y la velocidad del agua. La sección elegida para la medida con el molinete debe estar situada en un tramo recto de una sección lo más homogénea posible a lo largo de dicho tramo.

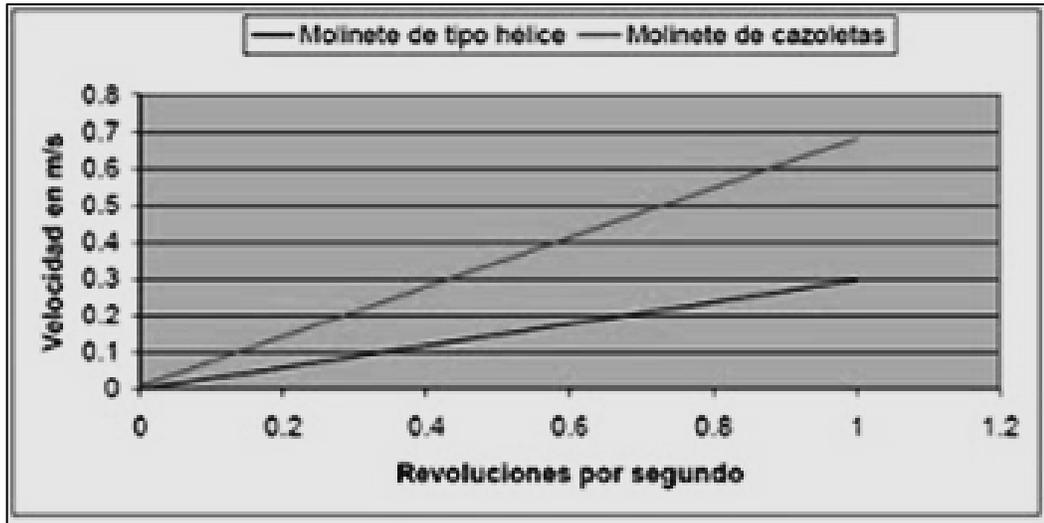
Figura 15. **Medición con molinete**



Fuente: Gobierno de Perú, Ministerio de Agricultura. *Instructivo técnico de calibración de estructuras hidráulicas de medición*. p. 23.

Para medir la velocidad de una corriente, el molinete se instala por debajo del espejo de agua, a 0,6 y 0,8 del tirante (medido desde la superficie); las revoluciones se cuentan en un intervalo de tiempo previamente establecido (usualmente cuarenta segundos).

Figura 16. **Relación lineal típica, entre la velocidad de la corriente y la velocidad de giro de los dos molinetes**



Fuente: Gobierno de Perú, Ministerio de Agricultura. *Instructivo técnico de calibración de estructuras hidráulicas de medición*. p. 30.

Las revoluciones del impulsor, dadas por el intervalo de tiempo, pueden ser contadas visualmente en una corriente superficial de agua clara y tranquila; sin embargo, en corrientes de agua turbia y caudalosa es necesario un contador eléctrico o análogo para registrarlas.

La sección definida se divide en tramos iguales, cada vertical tiene su respectiva área de influencia (sombreada en la figura 25), la cual se determina de la siguiente manera.

Una vez se definen el tirante inicial y_i , y el final y_{i+1} del área de influencia A_i , se determina el tirante promedio:

$$\bar{y} = \frac{y_i + y_{i+1}}{2}$$

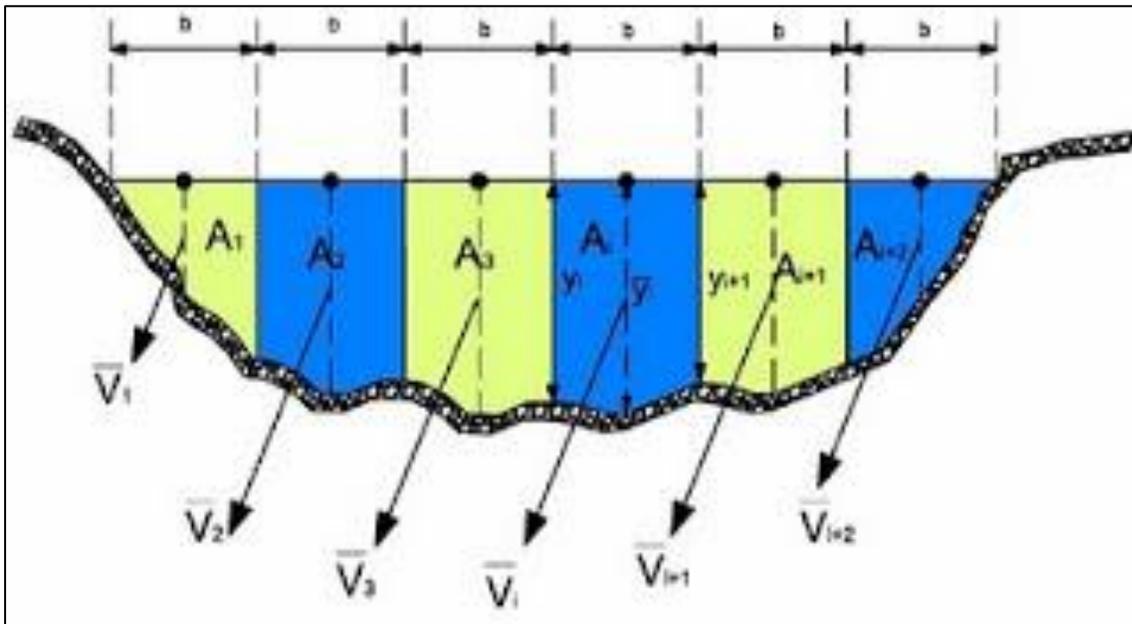
Luego se calcula el área de influencia A_i , mediante la siguiente fórmula:

$$A_i = \bar{y}_i \cdot b$$

Donde:

- b = ancho del área de influencia

Figura 17. **Sección transversal en el punto de aforo**



Fuente: Gobierno de Perú, Ministerio de Agricultura. *Instructivo técnico de calibración de estructuras hidráulicas de medición*. p. 28.

2.2. Partes del molinete

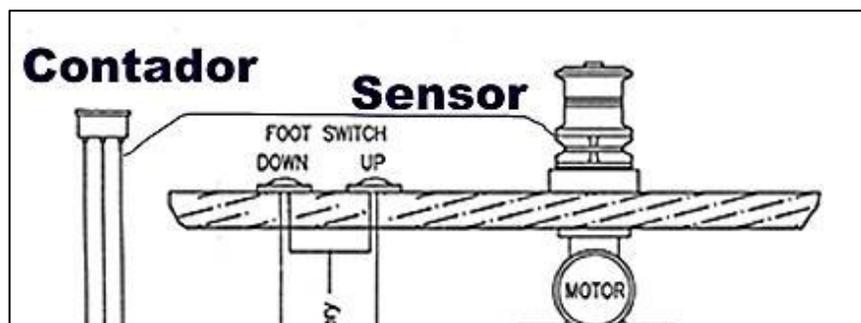
A continuación se presentan las partes principales que componen un molinete típico.

- Sensor o captor

Es un dispositivo que está capacitado para detectar acciones o estímulos externos y responder en consecuencia. Estos aparatos pueden transformar las magnitudes físicas o químicas en magnitudes eléctricas y que tengan la capacidad de cuantificar y manipular.

Los sensores pueden dividirse en sensores de contacto, sensores por ultrasonidos, sensores de movimiento, sensores de deslizamiento, sensores de velocidad y sensores de aceleración.

Figura 18. **Sensor**



Fuente: Gobierno de Perú, Ministerio de Agricultura. *Instructivo técnico de calibración de estructuras hidráulicas de medición.* p. 29.

- **Imán:**

Es un material que tiene la capacidad de producir un campo magnético en su exterior, el que es capaz de atraer al hierro, así como también al níquel y el cobalto. Existen imanes de origen natural y otros fabricados de forma artificial. Generalmente, aquellos que son naturales manifiestan sus propiedades en forma permanente, como es el caso de la magnética o Fe 304. Los imanes artificiales se pueden crear a partir de la mezcla o aleación de diferentes metales. Otra forma de generar el magnetismo es mediante el principio que opera en los electroimanes.

En un imán la capacidad de atracción es mayor en sus extremos o polos, los que se denominan norte y sur, debido a que tienden a originarse según los polos geográficos de la Tierra, que es un gigantesco imán natural.

Figura 19. **Imán**



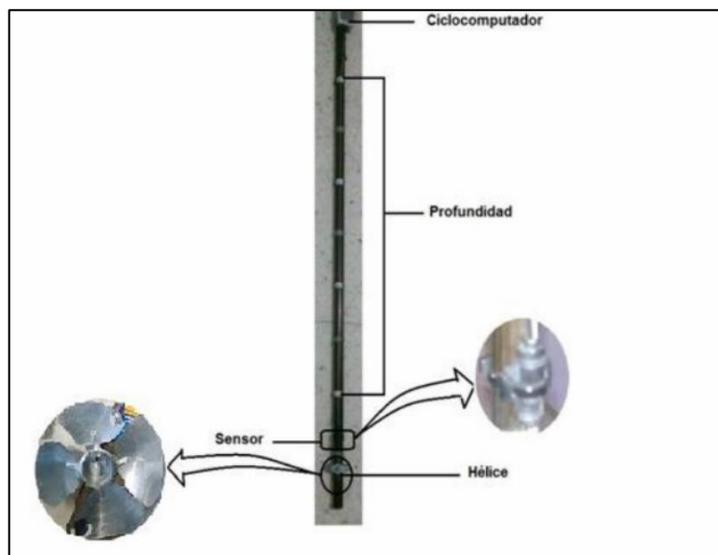
Fuente: Gobierno de Perú, Ministerio de Agricultura. *Instructivo técnico de calibración de estructuras hidráulicas de medición*. p. 39.

- **Ciclo computador**

Es un dispositivo que mide la velocidad, distancia, tiempo y otras medidas opcionales que dependen del modelo de ciclo computador.

Tiene más o menos el formato de un reloj de pulsera y se coloca en un soporte en el manillar. En los modelos con cable, del soporte sale un cable hasta la horquilla que sujeta la hélice, que acaba en un sensor que capta el paso de un imán colocado en la hélice, normalmente en un radio. En los modelos sin cable o inalámbricos la transmisión de la información entre el sensor y el ciclo computador se realiza por señales de radio

Figura 20. **Ciclo computador**

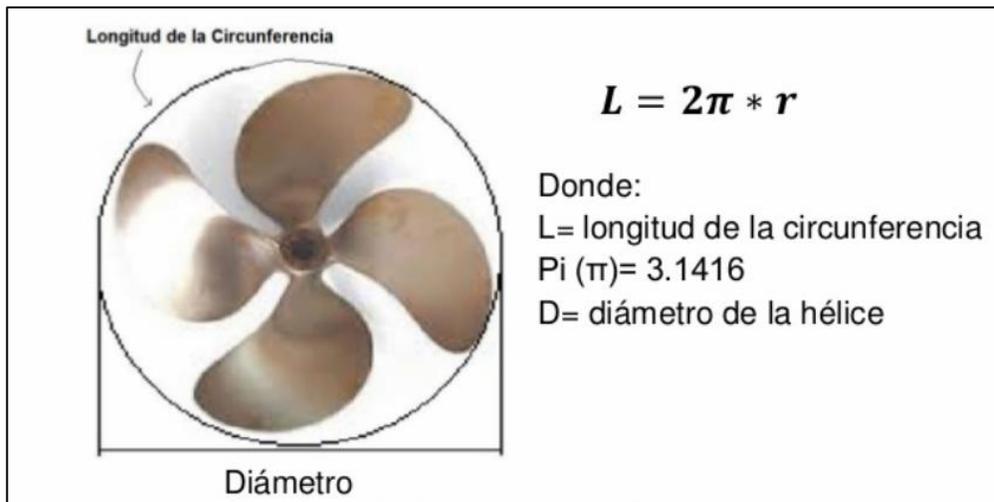


Fuente: Gobierno de Perú, Ministerio de Agricultura. *Instructivo técnico de calibración de estructuras hidráulicas de medición*. p. 39.

- Hélice

Es un dispositivo mecánico formado por un conjunto de elementos denominados palas o álabes, montados de forma concéntrica y solidarios de un eje que, al girar, las palas trazan un movimiento rotativo en un plano. Las palas no son placas planas, sino que tienen una forma curva, sobresale del plano en el que giran, y obtiene así en cada lado una diferencia de distancia entre el principio y el fin de la pala. Provocan una diferencia de velocidades entre el fluido de una cara y de otra.

Figura 21. Hélice



Fuente: Gobierno de Perú, Ministerio de Agricultura. *Instructivo técnico de calibración de estructuras hidráulicas de medición*. p. 40.

2.3. Funcionamiento del molinete

El funcionamiento se basa en hacer girar la hélice mediante un fluido en movimiento, donde se encuentra ubicado un pequeño imán en una de las aspas

que guarda una distancia mínima frente al sensor. El número de giros se transmite al sensor y con una previa calibración de la longitud de la circunferencia correspondiente, visualiza la velocidad en la pantalla digital. Para hallar la longitud de la circunferencia se utiliza la siguiente ecuación:

$$L = 2\pi * r$$

Donde:

- L = longitud de la circunferencia
- Pi (π) = 3,1416
- r = radio de la hélice

La medición del caudal en este tipo de aparatos se logra con base en la proporcionalidad que existe entre el número de revoluciones o vueltas que dan las aspas del dispositivo y la velocidad del fluido que es transportado a través del canal. El ciclo computador relaciona el número de vueltas de la hélice con la velocidad del flujo y al contar con el diámetro de la hélice se aplica la siguiente ecuación que relaciona la velocidad angular con la velocidad lineal.

$$V = w * r$$

Donde:

- V = velocidad lineal
- W = velocidad angular
- r = radio de la hélice

Se observa que la velocidad es directamente proporcional a la velocidad angular; la constante de proporcionalidad es el radio de giro. En un movimiento circular uniforme, dado que una revolución completa representa 2π radianes, se tiene:

$$W = 2 \pi * f$$

Donde:

- W = velocidad angular
- π (π) = 3,1416
- f = frecuencia

De igual manera, la frecuencia es directamente proporcional a la velocidad angular y mide la cantidad de vueltas que se dan en un periodo de tiempo.

$$f = \frac{n}{t}$$

De esta manera la ecuación de la velocidad lineal queda:

$$V = 2 \pi * f * r$$

Como se observa la frecuencia es proporcional a la velocidad y a su vez al número de vueltas.

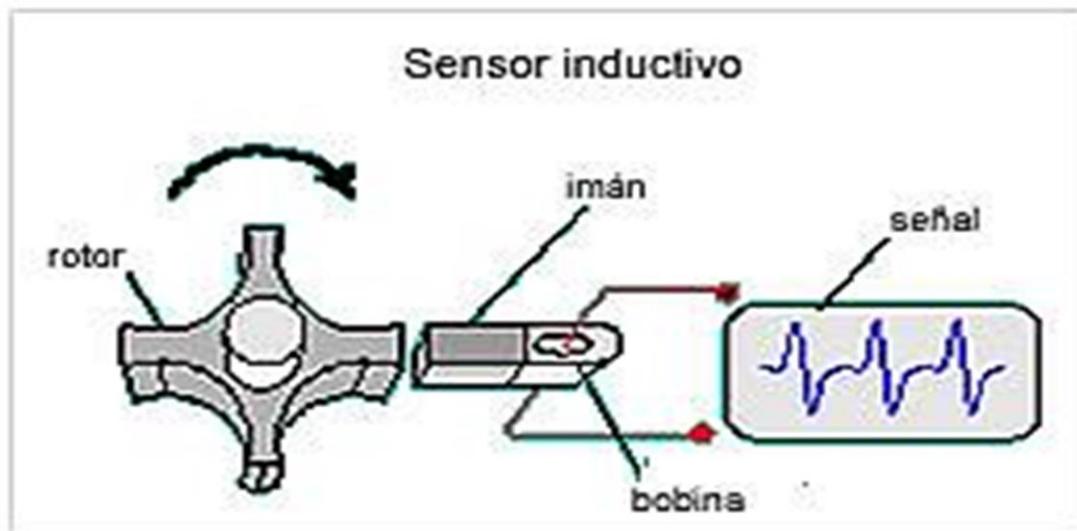
2.3.1. Funcionamiento interno del ciclo computador

El ciclo computador es una pieza esencial para el funcionamiento del molinete, tiene la finalidad de marcar la velocidad en un determinado flujo. Está

compuesto por un sensor adaptado a un tablero digital (marcado de velocidad), el sensor capta la variación de un flujo magnético generado por el imán ubicado en la parte externa de una aleta de la hélice; dicha variación posee un sistema de embobinado magnético de polaridad opuesta al imán, el cual le permite percibir la variación.

Para mayor captación, el imán y el sensor deben estar a una distancia de dos milímetros; el efecto de llevar el sensor a la proximidad del imán produce cambio en la posición de las líneas de flujo del imán permanente.

Figura 22. **Sensor inductivo**



Fuente: Gobierno de Perú, Ministerio de Agricultura. *Instructivo técnico de calibración de estructuras hidráulicas de medición*. p. 41.

En condiciones estáticas no hay ningún movimiento en las líneas de flujo y, por consiguiente, no se induce ninguna corriente en la bobina. Sin embargo, cuando el imán colocado en la hélice penetra o abandona el campo del imán

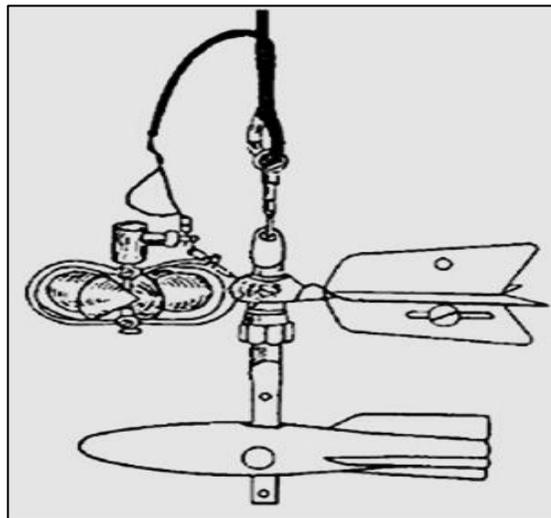
permanente, el cambio resultante en las líneas de flujo induce a un impulsor de corriente, cuya amplitud y forma son proporcionales a la velocidad de cambio de flujo.

2.4. Molinete tipo taza cónica

Existen dos tipos de molinetes, el de cazoletas y el de hélice, los cuales pueden ser montados sobre una varilla para el aforo de corrientes superficiales o suspendidos desde un cable durante el aforo de ríos, diques profundos, otros.

Los molinetes tipo taza cónica son aparatos constituidos de paletas o conchas móviles, las cuales, impulsadas por el líquido, dan un número de revoluciones proporcional a la velocidad de la corriente.

Figura 23. Molinete tipo taza cónica



Fuente: Gobierno de Perú, Ministerio de Agricultura. *Instructivo técnico de calibración de estructuras hidráulicas de medición*. p. 26.

2.5. Molinete tipo hélice

En este tipo de molinete se tienen las siguientes condiciones:

- Debido a la simetría axial con la dirección del flujo, el rotor perturba el flujo menos que los de eje vertical.
- Por la forma del rotor es menos probable que se enrede con los desechos que arrastre la corriente.
- También es conocido como molinete universal o tipo OTT.

Funciona de la siguiente forma: la corriente hace girar la hélice del molinete, un imán gira con la hélice, acciona, una vez por vuelta el contacto *reed* integrado en el equipo.

La secuencia de contacto es casi proporcional a la velocidad del agua en el punto de medición, esta secuencia se registra con un contador y, partiendo de ella y con la ecuación del molinete, se calcula la velocidad del fluido en el punto de medición. La relación entre las vueltas de la hélice y la velocidad del fluido se determinan con la siguiente fórmula:

$$V = k * n + \Delta$$

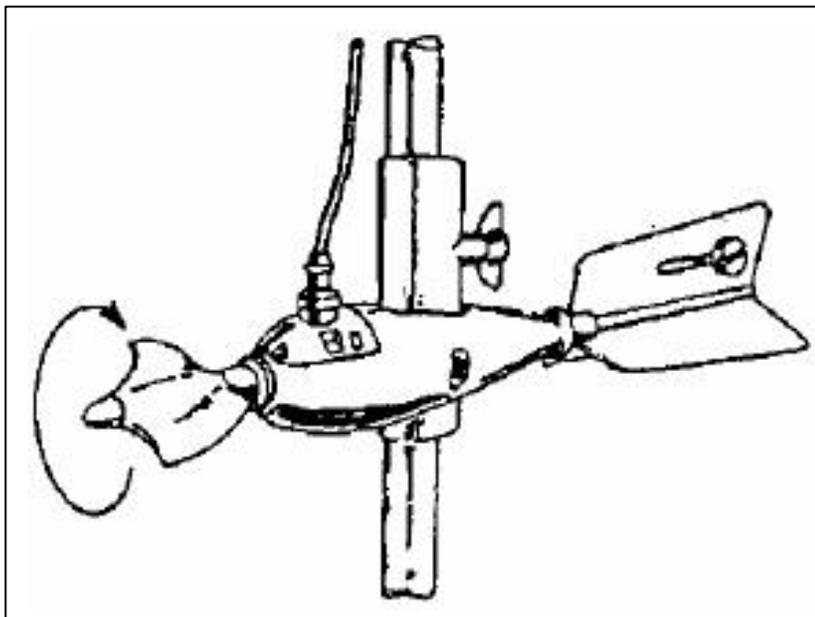
Donde:

- k = paso hidráulico de la hélice del molinete (m/r) determinado mediante ensayos hidrodinámicos en el canal de medición.
- n = vueltas de la hélice por segundo (rps).

- Δ = constante del molinete (m/s) determinada mediante ensayos hidrodinámicos en el canal de medición.

Dado que entre los distintos molinetes se tienen diferencias mecánicas en las hélices y en los cojinetes debido a las tolerancias de fabricación, las constantes k y Δ se determinan con exactitud individualmente para cada molinete en el canal de calibración

Figura 24. **Molinete tipo hélice o de eje horizontal**



Fuente: Gobierno de Perú, Ministerio de Agricultura. *Instructivo técnico de calibración de estructuras hidráulicas de medición*. p. 28

3. MÉTODOS DE CALIBRACIÓN

3.1. Generalidades

El molinete cumple la función de determinar el valor de la velocidad a diferentes profundidades y sobre diferentes verticales en la misma sección; al colocarlo en una corriente de agua y contando el número de revoluciones de su rotor durante un periodo de tiempo conocido, se puede determinar la velocidad del agua en el punto de medición.

Ello permite conocer los perfiles de velocidad necesarios para determinar la velocidad media en una o varias verticales de una misma sección, y para obtener la velocidad media de un curso de agua y su caudal total. Según su técnica de fabricación permiten medir velocidades altas, medias y bajas.

Los molinetes se deben calibrar para saber qué velocidad corresponde a un cierto número de giros de la rueda de copas; la calibración es indispensable dado que cada molinete es diferente, cada uno tiene diferente resistencia al giro por el empuje del agua del agua y cada uno se usa de distinta manera.

3.2. Según su casa comercial

Cada molinete debe tener un certificado de calibración de fábrica, en el que figura la fórmula necesaria para calcular la velocidad del agua sabiendo el número de vueltas o revoluciones de la hélice por segundo; los molinetes se calibran en laboratorios de hidráulica.

El número de revoluciones por intervalo de tiempo se transforma a velocidad de la corriente consultando la tabla del instrumento o su ecuación respectiva. En la siguiente tabla se presentan las ecuaciones de calibración para algunos molinetes

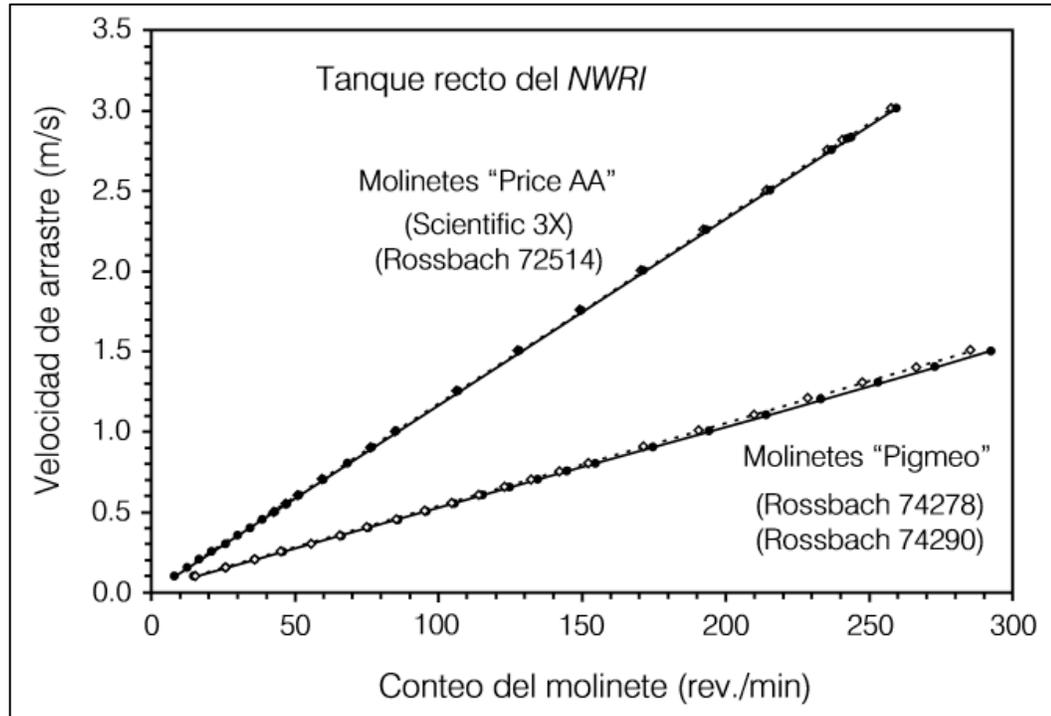
Tabla IV. **Ecuaciones de calibración para algunos modelos de molinetes**

Modelo de molinete	Ecuación de calibración
Molinete de cazoletas	
Gurley – 622	$v = 0,690904 \text{ rps} + 0,014694$
SIW – 017	$v = 0,658 \text{ rps} + 0,0090$
Price – 622	$v = 0,735 \text{ rps} + 0,0091$
Molinete tipo hélice	
Medidor Hoff	$v = 0,735 \text{ rps}$

Fuente: ÁLVAREZ-BRETÓN, Ricardo. *Evaluación de un tanque anular con brazos giratorios para calibrar molinetes*. p. 4.

El medidor Price es el molinete adoptado oficialmente por la División de Recursos Hidráulicos del Departamento de Geología de Estados Unidos, para el aforo de corrientes; el molinete Gurley es muy usado en los estudios hidrométricos realizados en diferentes países. A continuación, se presentan las curvas de calibración de cuatro molinetes diferentes.

Figura 25. **Curvas de calibración de cuatro molinetes diferentes**



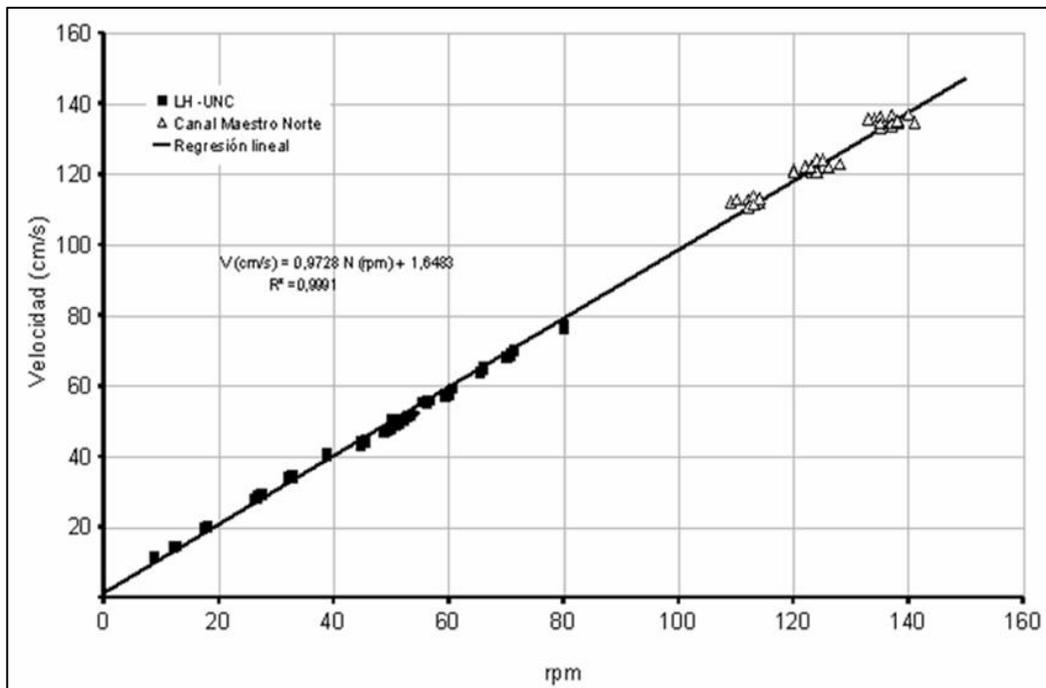
Fuente: ÁLVAREZ-BRETÓN, Ricardo. *Evaluación de un tanque anular con brazos giratorios para calibrar molinetes*. p. 5.

3.3. Calibración por canal rectangular con corriente constante

Un canal abierto es un sistema de flujo donde la superficie superior del fluido está expuesta a la atmósfera; su dimensión característica es el radio hidráulico; tienen diferentes usos en un laboratorio de hidráulica. El uso de un canal rectangular para calibrar molinetes, consiste en determinar una relación entre la velocidad de giro y la velocidad de flujo, mediante tareas experimentales bajo condiciones y rango de velocidades distintos.

Cuando una sección esta calibrada significa que se conoce la variación de la altura del nivel del agua y el caudal. Para ello la sección debe ser constante, no tener erosiones o sedimentaciones, no estar afectada por resaltos o remansos.

Figura 26. **Gráfica relación entre la velocidad de giro (N) y la velocidad del flujo (V)**



Fuente: WEBER, Juan Francisco; FARCHETTO, Sergio; CARRARA, Sergio; OLMEDO, Sergio y GONZÁLEZ, Gustavo. *Desempeño hidráulico de un molinete hidrométrico de bajo costo*.

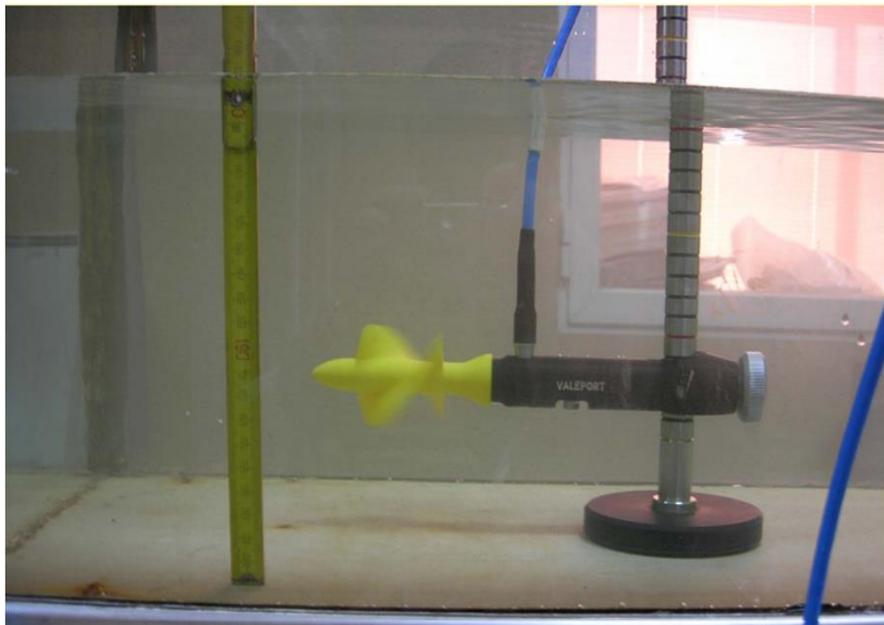
p. 10.

Es necesario utilizar una barra de montaje, esta debe permitir la fijación del molinete a diferentes alturas respecto del fondo (profundidad). Para realizar la estimación de la relación entre velocidad de giro y velocidad del flujo, se deben medir un número suficiente de pares de valores (velocidad de giro N;

velocidad de la corriente V) que permita establecer una relación funcional de la forma $V = f(N)$. En este sentido, se destacan dos métodos experimentales:

- Canal con aparato quieto y aguas en movimiento: es el método más común, requiere contar con un canal experimental equipado de un sistema de bombeo que permita recircular el caudal necesario. Puede ser un canal de pendiente nula, longitud variable, ancho y alto adecuados para la actividad; pueden tener paredes transparentes.

Figura 27. **Calibración del molinete en canal con flujo en movimiento**



Fuente: ORDÓÑEZ ARIAS, José A. *Proyecto de hidráulica de canales abiertos. Curva de calibración (Canal Bogotá)*. <http://www.monografias.com/trabajos36/hidraulica-canal-bogota/hidraulica-canal-bogota.shtml#ixzz59BFrv1xk>. Consulta: 26 de marzo de 2018.

- Canal de aguas quietas y aparato en movimiento: es el método más confiable, requiere una infraestructura experimental consistente en un

canal en donde el agua está en reposo y lo que se mueve es el molinete. Este se desplaza de un extremo a otro del canal a una serie de velocidades constantes. De esta manera, se obtiene una relación entre el conteo del molinete (N) y la velocidad patrón a la cual está siendo arrastrado (V).

Figura 28. **Canal recto calibración de molinete**



Fuente: Universidad Nacional de Colombia. *Laboratorios de hidráulica*. <https://sites.google.com/a/unal.edu.co/dica/laboratorios/hidraulica>. Consulta: 26 de marzo de 2018.

Debido a que su longitud es finita, un tanque recto solo puede usarse para generar altas velocidades de arrastre (> 2 m/s) durante un corto tiempo. El

molinete se desplaza a velocidad conocida, debiendo variar dicha velocidad; para la calibración de molinetes se puede utilizar un canal recto.

Sin embargo el canal puede tener una trayectoria que describe un círculo, en este caso el molinete se monta en un brazo giratorio y de esta manera puede desplazarse ininterrumpidamente, el tanque anular puede ser visto como un tanque recto de longitud infinita. Los brazos giratorios son el soporte para colocar los molinetes en el agua, son movidos por un motor. El canal puede tener placas (pantallas) que evitan el movimiento del agua por arrastre del paso del molinete y la barra que lo sujeta.

En el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) se ha construido un tanque anular con dos brazos giratorios. Este dispositivo puede simular distintas velocidades del agua durante un tiempo a priori infinito, siempre y cuando el agua en el tanque permanezca razonablemente quieta. Para tal efecto, el tanque cuenta con placas para aquietar el agua inmediatamente después del paso de un brazo con un molinete sujeto a calibración.¹

Las dimensiones del tanque del IMTA son: diámetro 12 m, ancho 0,8 m y profundidad de 1,4 m, y consta de dos brazos giratorios de 6 m de largo, que pueden usarse para arrastrar uno o dos molinetes dentro del tanque. El diámetro del tanque se eligió de tal forma que el perímetro del tanque (≈ 38 m) fuera aproximadamente igual a la longitud de los tanques rectos más pequeños que se utilizan en otros países para calibrar molinetes a una velocidad de hasta 3 m/s. El tanque anular del IMTA puede usarse para calibrar molinetes con una precisión razonable.

El sistema de calibración consiste en un detector de la velocidad de giro de los brazos, otro detector del número de giros de la rueda de copas del molinete y un programa de cómputo que controla todo el proceso.

¹ ÁLVAREZ-BRETÓN, Ricardo. *Evaluación de un tanque anular con brazos giratorios para calibrar molinetes*. p. 10.

Figura 29. **Tanque circular del IMTA para calibración de molinetes**



Fuente: Instituto Mexicano de Tecnología del agua. *El molinete, importancia, fundamentos y buenas prácticas*. https://www.imta.gob.mx/biblioteca/libros_html/molinete/files/assets/basic-html/page66.html. Consulta: 26 de marzo de 2018.

3.4. Tanque de calibración OTT

La empresa OTT MESSTECHNIK GmbH & Co. KG., OTT mantiene una reputación internacional desde el siglo XIX en el campo de hidrometría; es el más grande productor de sistemas completos de hidrometría. El primer instrumento de medición de corriente de OTT fue fabricado en el año 1875, los molinetes OTT se utilizan en todo el mundo desde hace décadas.

Entre los distintos tipos de molinetes existen diferencias mecánicas en las hélices y en los cojinetes debido a las tolerancias en la fabricación, las

constantes del molinete k (paso hidráulico de la hélice en m/r) y ΔK (constante del molinete en m/s); se determinan con exactitud individualmente para cada molinete en un canal de calibración OTT mediante ensayos hidrodinámicos.

OTT entrega a pedido, el certificado de calibración individual para cada hélice, siguiendo la norma ISO 3455 *Medición de caudales líquidos en cauces abiertos – Calibración de molinetes con elementos rotativos en depósitos abiertos rectos*, en el canal de medición propio de OTT de 50 metros, al final de la calibración los molinetes tienen una precisión de ± 3 mm/s.

La calibración se efectúa mediante la medición de 8 diferentes velocidades; el carro-remolque tira el molinete en el canal de medición pasando por el agua estancada. La relación entre las revoluciones del molinete y la velocidad del carro está calculado como una o más ecuaciones de forma $v = k_0 n + a$, donde v es la velocidad, n es el número de revoluciones de la hélice y k y a son constantes que dependen del molinete, de la hélice y de la forma de sujetación.

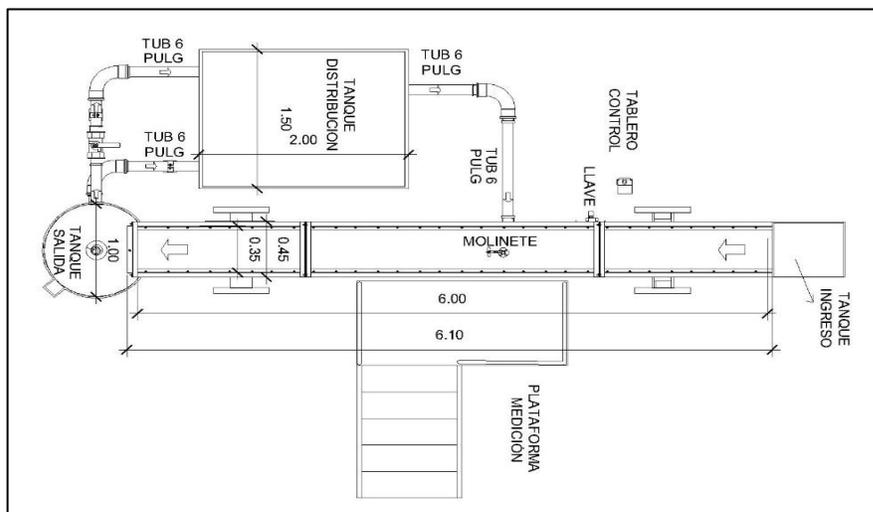
4. DISEÑO HIDRÁULICO

4.1. Componentes canal de calibración

Los canales pueden tener diferentes componentes de acuerdo al tipo y condiciones de servicio, para propósitos de este trabajo se diseñará un canal recto con forma rectangular y pendiente variable para calibración de molinetes, utilizando las fórmulas de diseño de canales necesarias.

Un canal de calibración de molinetes requiere tener un largo suficiente, en el cual el flujo logre desarrollarse y alcanzar una condición de normalidad, antes de llegar a la zona donde se quiere realizar la calibración.

Figura 30. Vista planta sistema propuesto



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2013.

Los principales componentes del canal propuesto son los siguientes (ver figura 31):

- Tanque principal (TP): su función es recibir el agua elevada por la bomba y entregarla al canal en forma regulada, aplacando la agitación en el flujo producida por la impulsión.
- Canal principal abierto, de paredes de acrílico (espesor 10 mm), este material no se ve afectado en su composición química al estar en contacto con el agua; puede estar expuesto a ella por largos períodos de tiempo y a variadas temperaturas sin ser afectado (ver tabla VIII).
 - El acrílico se puede cortar como la madera, por lo que es un material versátil para construir piezas con diferentes formas; los valores de resistencia del acrílico lo hacen el adecuado para los requerimientos del canal.
 - El peso máximo del acrílico y el agua considerando un canal lleno es de aproximadamente 1 500 kg en total, por lo tanto este peso distribuido en un canal de 55 x 35 x 600 cm, es un requerimiento inferior a la capacidad resistente del material.
 - Volumen canal $V_c = 0,55 \cdot 0,35 \cdot 6,0 = 1,16 \text{ m}^3$
 - Peso agua canal $W_{ac} = 11\,307,9 \text{ N} = 2\,541,1 \text{ lb} = 1\,115,0 \text{ kg}$
 - Las uniones entre las paredes y el fondo del canal se deben traslapar para no generar una zona frágil que provoque problemas estructurales.

- El material necesario para el canal es dimensionado de acuerdo al diseño y solicitado a empresa especializada, quienes deben entregar armado e instalado el equipo; cada sección del canal debe ser pegada verificando la perpendicularidad entre las piezas mediante escuadras.
- Se debe considerar el uso de una goma impermeable por el contorno de cada pieza, para evitar las filtraciones en las uniones entre el canal y las piezas. Para evitar filtraciones en las uniones, se debe aplicar silicona en ellas para sellarlas.

Tabla V. **Propiedades físicas y mecánicas del acrílico**

Propiedades técnicas a 20°C			
Propiedades		Valor	Unidad
Físicas	Peso específico	1,19	kg/cm ³
	Peso referencial (e = 10 mm)	12	kg/m ²
	Coefficiente de absorción de agua	0,3 - 0,4	% (en volumen)
Mecánicas	Resistencia al choque	2-3	kg cm/cm ²
	Resistencia a la tracción	600	kg/cm ²
	Resistencia a la compresión	700	kg/cm ²
	Resistencia a la flexión	1 000	kg/cm ²
	Módulo de elasticidad a la flexión (E)	30 000	kg/cm ²
Térmicas	Coefficiente de dilatación térmica	0,08	mm/m °C
	Temperatura de deformación	130-140	°C (según espesor)
Ópticas	Transparencia en el espectro visible	92	%

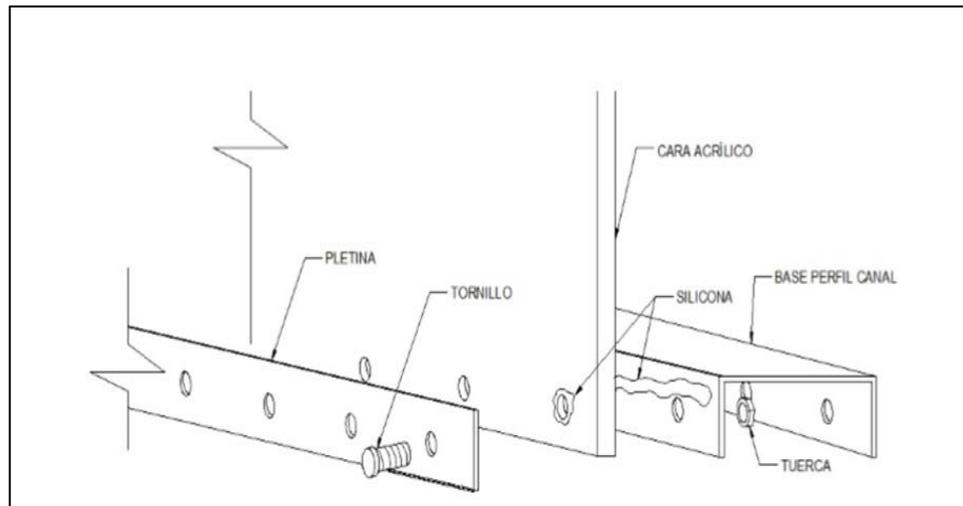
Fuente: BRAVO CORANTE, Eduardo Andrés. *Diseño y construcción de un canal hidráulico con vertedero lateral para el Laboratorio de Hidráulica*. p. 48.

- Base metálica: se propone el uso de un perfil de acero inoxidable como base del canal unido por medio de tornillos y tuercas a las paredes de acrílico del canal; reforzado por medio de platinas de acero, le dan rigidez a la unión. Todas las uniones se sellarían con silicona de tal forma de evitar filtraciones; cuando sea necesario se debe usar una

goma impermeable para evitar las filtraciones por las uniones del canal. Los materiales necesarios para la construcción de la base se presentan a continuación:

- Perfil rectangular de acero inoxidable de $e = 3$ mm.
- Platinas de acero inoxidable de 50×1700 [mm], $e = 2$ mm.
- Acrílico para caras laterales del canal, $e = 10$ mm.
- Estructura metálica de soporte, perfiles cuadrados de 20×20 mm, $e = 2$ mm.
- Pintura antioxidante e impermeabilizante.
- Tornillos y tuercas para fijar las piezas.
- Sellante silicona.
- Válvulas

Figura 31. **Detalle estructura del canal**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2013.

- Estructuras metálicas: son necesarias varias estructuras metálicas para soportar el canal y para elevar el estanque volumétrico y el tanque principal, las que se describen a continuación.
 - Estructura para variar la pendiente del canal

Se utilizará *trickets* o gato hidráulico, con el cual se puede variar la altura de la estructura; el diseño consiste en dos piezas construidas con perfiles metálicos: la estructura superior y la estructura inferior; entre ambas se ubica el gato tipo tijera que las une y conforman en total esta estructura.

Debido a que el gato es muy esbelto en la dirección longitudinal al canal, son necesarios dos soportes que rigidicen y estabilicen la zona de unión de la estructura necesaria, en la dirección transversal al canal. Los soportes están constituidos cada uno por un perfil metálico de 30 x 30 mm y de 30 cm de largo

y dos tubos de 27 mm de diámetro y 15 cm de largo, aproximadamente, que pueden introducirse dentro del perfil metálico.

Los perfiles van soldados, uno a cada lado de la estructura superior mientras que los tubos van soldados a la misma base que el gato y pasan por el interior de los perfiles.

- La estructura de soporte del canal de altura fija

Este apoyo actúa como un punto pivote del canal al variar la altura de la estructura anterior. Al aumentar la altura de la estructura el canal aumenta su inclinación, es decir, aumenta la pendiente de fondo del canal.

Son necesarios apoyos tipo pasador para el canal, estos se ubican sobre las estructuras, el material para su diseño es hierro negro de espesor 5 mm, unidos mediante soldadura a las estructuras y con perforaciones a través de las cuales poder pasar dos pernos que sostengan el canal y lo mantengan unido a los apoyos.

- Estructuras tipo plataformas ubicadas bajo el tanque principal y el tanque volumétrico

Su función es dar a cada tanque una mayor altura, de tal forma de asegurar que el caudal de entrada caiga siempre dentro del canal; y que el caudal de salida del canal caiga siempre dentro del estanque volumétrico.

- Sistema para el cambio de pendiente de canal (*tricket* o gato hidráulico)

De acuerdo con la demanda máxima por peso sobre la estructura (1 500 kg), la capacidad disponible del gato es suficiente para las condiciones de servicio (ver tabla IX).

Es necesario soldar el gato y sus soportes a la estructura de acuerdo al diseño; las estructuras soldadas es necesario pintarlas con una capa de pintura anticorrosiva negra y dos capas de pintura de esmalte sintético.

Para medir la pendiente se propone el uso de una regla calibrada que demarca la variación en porcentaje de la pendiente con una precisión de 0,05 %, y una pieza móvil que marca sobre la regla el porcentaje de pendiente que se le da al canal.

Tabla VI. **Especificaciones mínimas del equipo (*tricket* o gato hidráulico) para cambio de pendiente del canal**

Largo (mm)	445
Ancho (mm)	160
Altura máxima (mm)	380
Altura mínima (mm)	125
Capacidad disponible (Ton)	4,0

Fuente: elaboración propia.

- Tanque volumétrico (TV): recibe el caudal de salida del canal, debe contar con accesorios: un cronometro, una tabla conociendo el volumen del taque y un nivel para saber la altura en la cual el líquido sube para para medir el caudal de salida del canal.
- Tanque de almacenamiento (TA): cumple la función de recibir el agua vertida por el canal de manera óptima. Su capacidad debe ser superior a

la necesaria para almacenar toda el agua del sistema: la capacidad total de los tanques principal y volumétrico, la capacidad total del canal, más un volumen de seguridad que proteja a la bomba de sufrir daños por cavitación en caso de ocurrir algún accidente

- Sistema de bombeo circulación del agua: para el funcionamiento continuo del canal se requiere de un equipo de recirculación que cumpla la función de elevar el agua desde el tanque de almacenamiento hasta el tanque principal.
- Sistema de drenajes: para el mantenimiento del equipo y cambiar el agua de manera periódica, el sistema requiere de un desagüe que permita evacuar toda el agua del sistema; para esto se diseñó con una válvula de salida ubicada cerca del fondo del estanque, que se podrá conectar a una bomba, y así bombear el agua del tanque de almacenamiento.
- Tuberías y accesorios: el sistema incluye dos tramos de tuberías y accesorios:
 - El primero desde el tanque volumétrico al tanque de almacenamiento.
 - El segundo desde el tanque de almacenamiento al tanque principal.
- Válvulas: se consideró el uso de varias válvulas para un mejor manejo y control del sistema propuesto.
- Instalaciones especiales

- Instalaciones eléctricas: para hacer funcionar el equipo es necesario realizar la conexión eléctrica; estos funcionan en sistema monofásico; la bomba funciona directamente a 220 voltios.
- Tablero de control: necesario para controlar las operaciones del sistema.

Figura 32. **Vista en 3D del canal propuesto (A)**



Continuación de la figura 32.



Fuente: elaboración propia.

Figura 33. **Vista en 3D del canal propuesto (B)**



Continuación de la figura 33.



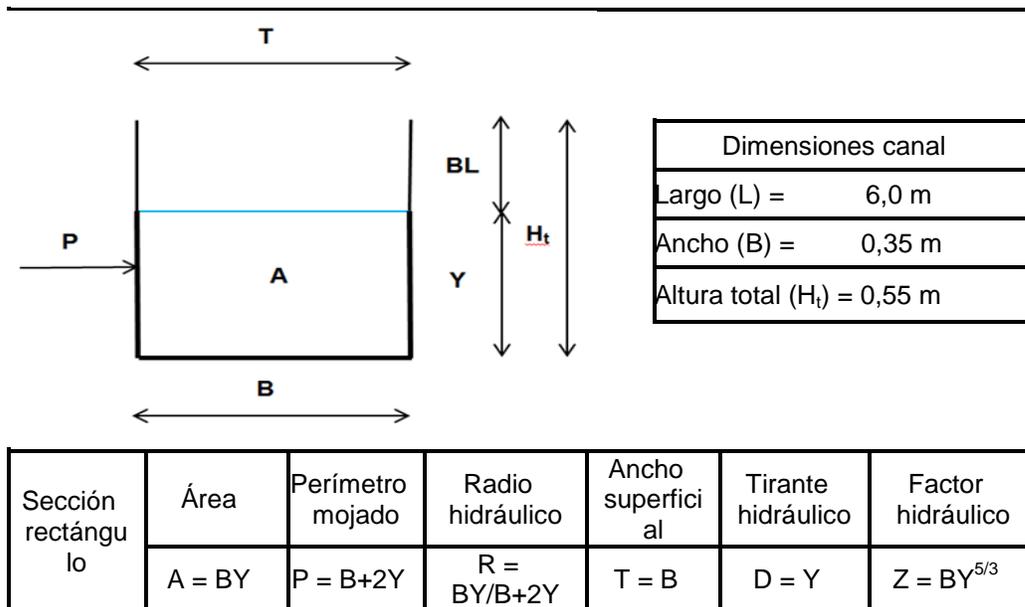
Fuente: elaboración propia.

4.2. Geometría del canal

Los elementos geométricos son propiedades de la sección del canal; pueden ser definidos por completo por la geometría de la sección y la profundidad de flujo.

Los canales tienen ciertas características que deben considerarse para entender la dinámica del fluido que contienen, una de estas es el borde libre que permite (entre otras condiciones), que las ondas de agua oscilen sin salirse del canal; otra característica importante en el diseño de canales, es la pendiente longitudinal del fondo del canal necesaria para el flujo del agua.

Tabla VII. Elementos geométricos de la sección del canal



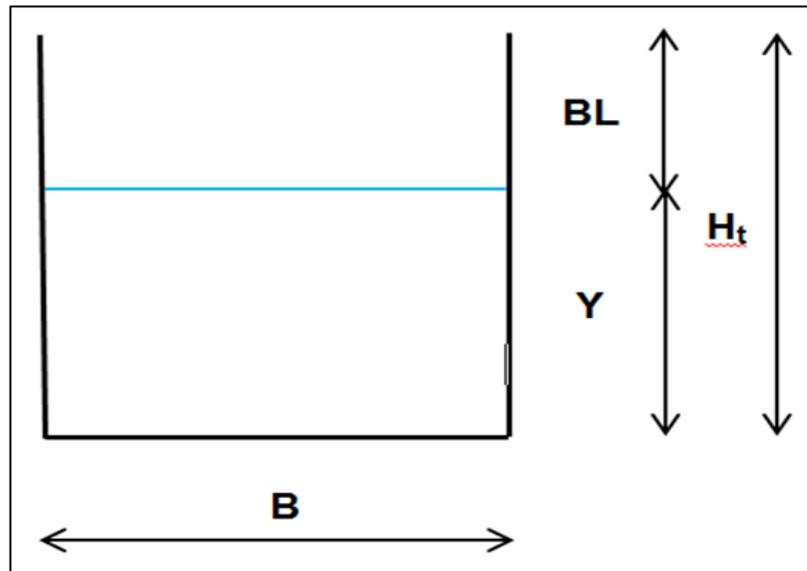
Fuente: elaboración propia.

4.3. Diseño de borde libre

Borde libre (BL) es la distancia vertical desde la parte superior del canal hasta la superficie del agua en la condición de diseño; no existe una regla para su cálculo, sin embargo para su diseño es común el uso de bordes libres que varían desde menos del 5 % o más del 30 % de la profundidad de flujo.

De acuerdo a las condiciones de operación del canal, no se esperan flujos turbulentos ni fluctuaciones superficiales significativas; el caudal máximo de funcionamiento del canal está de acuerdo a los valores de operación de molinetes.

Figura 34. Representación del borde libre (BL)



H_t = altura total del canal

Y = profundidad hidráulica

Fuente: elaboración propia.

De acuerdo con la figura anterior, con una altura total del canal de 0,55 m, se puede deducir lo siguiente:

100 % 0,55 m

30 %

$$BL = (0,3 \cdot 0,55) / 1 = 0,165 \text{ m}$$

$$H_t = BL + Y$$

$$Y = 0,55 - 0,165 = 0,385 \text{ m}$$

4.4. Determinación de características de flujo y físicas del canal

En la ingeniería civil se deben planificar, diseñar y construir estructuras hidráulicas en ambientes complejos. A continuación, se describen y calculan las variables hidráulicas con base en la geometría del canal, las condiciones y los tipos de flujo en el canal.

Para el diseño del canal de calibración, se consideraron los criterios:

- La pendiente del canal es uniforme y el caudal que entra o sale induce solo pequeñas curvaturas en el perfil del flujo y las líneas de corriente casi paralelas.
- La distribución de la velocidad se mantiene igual en cada sección del canal.
- El coeficiente de rugosidad es independiente del tirante del flujo y constante en el tramo del canal considerado.

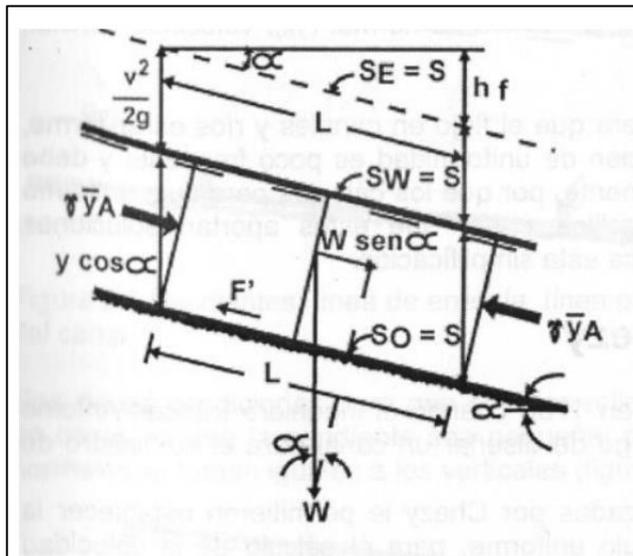
A continuación, se presentan los valores de las características físicas del canal propuesto, de acuerdo a las fórmulas aplicables.

Tabla VIII. **Características físicas del canal**

Característica	Valor
Largo L m	6,0
Ancho B m	0,35
Altura total (Ht) m	0,55
Profundidad de flujo (Y) m	0,385
Borde libre (BL) m	0,165
Área (A) m ²	0,135
Perímetro mojado (P) m	1,12
Radio hidráulico (R) m	0,17
Factor de sección (Z) m	0,071
Coefficiente de rugosidad acrílico η (adimensional)	0,010

Fuente: elaboración propia.

Figura 35. **Definición esquemática de las variables para la ecuación de Chezy**



Fuente: SANDOVAL, Luis. *Manuela de hidráulica de canales*. p. 238.

4.5. Dimensión del canal

Para determinar las dimensiones del canal de calibración, se debe considerar que un canal de laboratorio requiere tener un largo suficiente en el cual el flujo logre desarrollarse y alcanzar una condición de normalidad, antes de llegar a la zona donde se quiere estudiar el comportamiento hidráulico.

Para definir el tamaño y la ubicación del canal, se analizaron aspectos económicos, el espacio disponible, de preferencia acceso a ambos costados del canal. Los canales adicionalmente tienen ciertas características que deben considerarse para entender la dinámica del fluido que contienen.

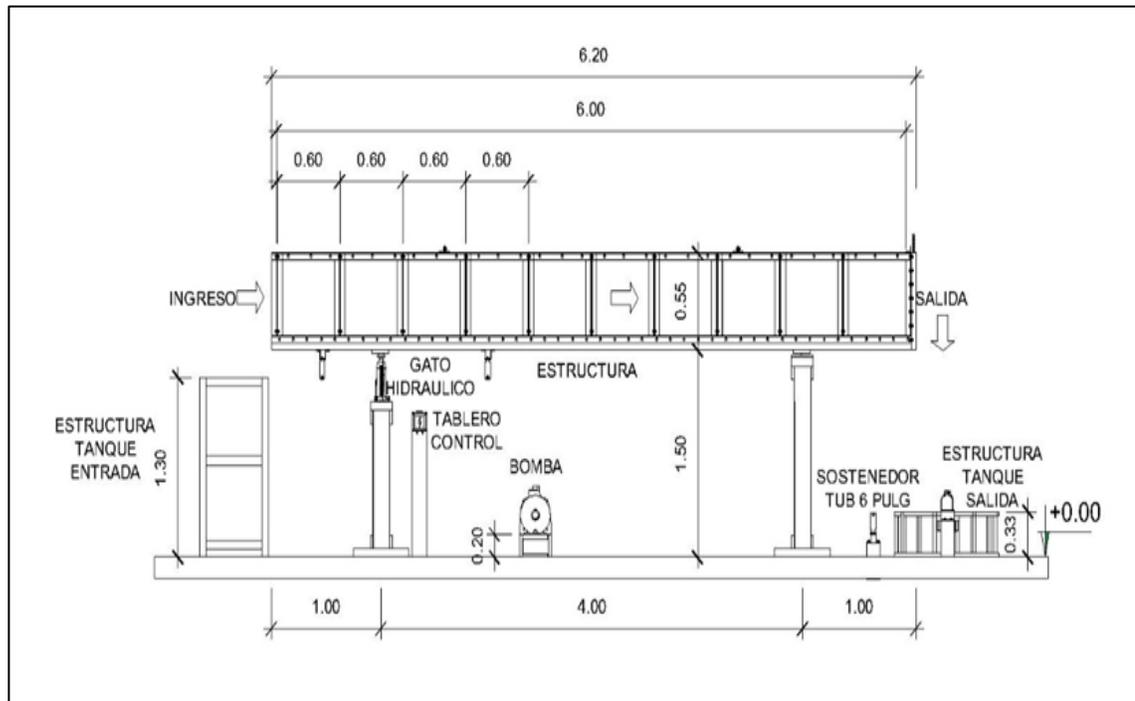
Los criterios que se consideraron para determinar las dimensiones del canal propuesto fueron los siguientes:

- Disponibilidad de área
- Disponibilidad de recursos económicos
- Facilidades de construcción
- Funcionalidad

Las dimensiones que se proponen para el canal recto de sección rectangular, para uso en calibración de molinetes, son las siguientes:

- Largo 6,0 m
- Ancho 0,35 m
- Alto 0,55 m

Figura 36. Dimensiones canal



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2013.

Con las dimensiones del canal recto propuesto, se calcularon las siguientes características (ver tabla XI):

- Área
- Perímetro mojado
- Radio hidráulico
- Factor de sección Z

4.6. Determinación de la pendiente crítica

Cuando se trabaja con canales artificiales, la pendiente muchas veces depende del propósito del canal. Para el valor de la pendiente crítica del canal, se deben considerar las características, las condiciones de flujo y el uso que tendrá el canal; para este caso, el fondo del canal es plano de pendiente variable. De acuerdo con la ecuación de Manning y según el número de Froude.

$$FR = 1 = \frac{v}{\sqrt{g * y}} = \frac{Q}{b * y \sqrt{g * y}}$$

$$V = \frac{R^{\frac{2}{3}} * S^{\frac{1}{2}}}{c}$$

$$Q = V * A$$

Sustituyendo el valor de V y despejando Q, queda:

$$Q = \frac{A * R^{\frac{2}{3}} * S^{\frac{1}{2}}}{c}$$

$$Y = \left(\frac{Q}{g^{1/2} * b} \right)^{2/3}$$

Donde:

- Radio hidráulico (R) m
- Pendiente del canal (S) adimensional
- Coeficiente de rugosidad (η) adimensional
- Área transversal del canal (A) m²

- Radio hidráulico (R) mm
- Velocidad del agua al interior del canal (V) m/s
- Valor de la gravedad (g) 9,81 m/s²
- C coeficiente de rugosidad 0,010

El factor de sección se puede expresar de la siguiente manera:

$$Z = \frac{Q}{\sqrt{g}}$$

$$Z = BY^{1,5}$$

Igualando y despejando Q:

- $Q = BY^{1,5} * \sqrt{g} = 0,35 * Y^{1,5} * \sqrt{9,81}$
- $Q = 1,10 * Y^{1,5}$

4.6.1. Iteraciones para puntos de pendiente crítica

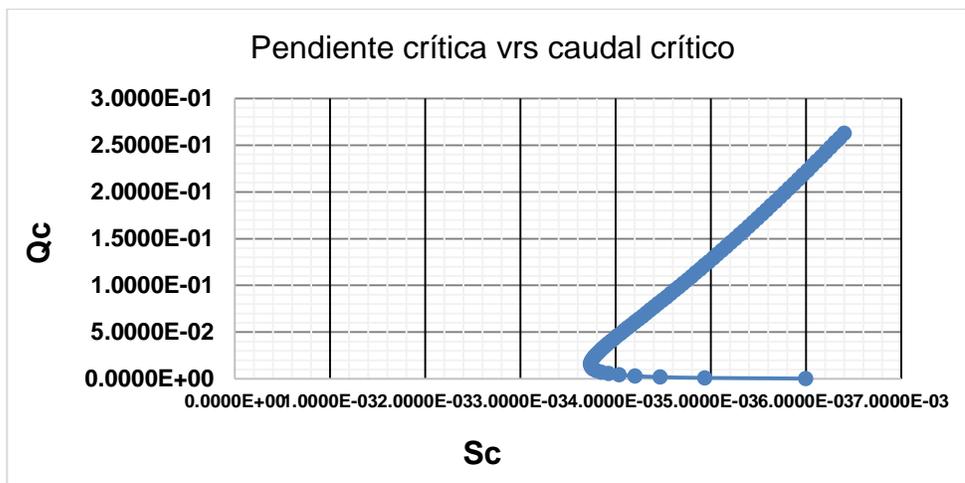
Se calculan los valores de caudal en la fórmula 2 con los diferentes valores de Y, luego se sustituye el valor de Q y se calcula Sc en la fórmula 1. Al realizar las iteraciones (fórmulas 1 y 2), y graficar el caudal crítico vrs la pendiente crítica, se observa que existe una parte de la gráfica terminada en punta con forma de nariz; en el cambio de pendientes sobre la curva es donde se ubica el caudal de operación máxima del canal.

Tabla IX. Iteraciones, cálculo del caudal crítico y la pendiente crítica

Profundidad Y_c (m)	Caudal crítico Q_c (m ³ /s)	$Q_c \times 10^{-3}$ (m ³ /s)	Pendiente crítica S_c (adimensional)	$S_c \times 10^{-3}$ (adimensional)
0,005	0,000388909	3,8891E-04	0,00599752	5,9975E-03
0,010	0,001100000	1,1000E-03	0,00493735	4,9374E-03
0,015	0,002020829	2,0208E-03	0,00446930	4,4693E-03
0,020	0,003111270	3,1113E-03	0,00420373	4,2037E-03
0,025	0,004348132	4,3481E-03	0,00403638	4,0364E-03
0,030	0,005715768	5,7158E-03	0,00392551	3,9255E-03
0,035	0,007202690	7,2027E-03	0,00385066	3,8507E-03
0,040	0,008800000	8,8000E-03	0,00380040	3,8004E-03
0,045	0,010500536	1,0501E-02	0,00376783	3,7678E-03
0,050	0,012298374	1,2298E-02	0,00374845	3,7485E-03
0,055	0,014188508	1,4189E-02	0,00373922	3,7392E-03
0,060	0,016166632	1,6167E-02	0,00373799	3,7380E-03
0,065	0,018228995	1,8229E-02	0,00374319	3,7432E-03
0,070	0,020372285	2,0372E-02	0,00375365	3,7537E-03
0,075	0,022593555	2,2594E-02	0,00376847	3,7685E-03
0,080	0,024890159	2,4890E-02	0,00378694	3,7869E-03
0,085	0,027259700	2,7260E-02	0,00380852	3,8085E-03
0,090	0,029700000	2,9700E-02	0,00383277	3,8328E-03
0,095	0,032209063	3,2209E-02	0,00385930	3,8593E-03
0,100	0,034785054	3,4785E-02	0,00388784	3,8878E-03

Fuente: elaboración propia.

Figura 37. Gráfica, pendiente crítica vrs caudal crítico



Fuente: elaboración propia.

Como se ve en la figura y tabla anteriores, se obtienen los siguientes valores:

- Profundidad crítica $Y_c = 0,065 \text{ m}$
- Pendiente crítica $Sc = 0,00374319$
- Caudal crítico $Q_c = 0,018228995 \text{ m}^3/\text{s}$

Por lo tanto, el caudal de operación (Q_{op}) para $Y_{max} = 0,385 \text{ cm}$, por regla de tres su valor es:

- Q_c Y_c
- Q_{op} Y_{max}
- $Y_{max} = 0,385 \text{ m}$
- $Y_c = 0,065 \text{ m}$
- $Q_c = 0,01823 \text{ m}^3/\text{s}$
- $Sc = 0,00375$

$$Q_{op} = \frac{Q_c * Y_{max}}{Y_c} = \frac{0,01823 * 0,385}{0,065}$$

$$Q_{op} = 0,1080 \text{ m}^3/\text{s} = 108,0 \text{ l/s}$$

Para calcular la velocidad de operación del canal se usa la ecuación de continuidad:

$$Q_{op} = A_{op} * V_{op}$$

$$V_{op} = \frac{Q_{op}}{A_{op}} = \frac{0,1080}{0,35 * 0,385} = 0,1188 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

4.6.2. Comprobación de la profundidad crítica

Determinado el valor del caudal y la velocidad de operación en el canal de pendiente variable, se debe corregir el valor de profundidad, caudal y velocidad críticas, usando las siguientes fórmulas:

$$Y_{c_c} = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{g * B^2}} = \sqrt[3]{\frac{0,1080^2}{9,81 * 0,35^2}} = 0,213 \text{ m}$$

$$V_{c_c} = \sqrt{\frac{Q * g}{B}} = \sqrt{\frac{0,1080 * 9,81}{0,35}} = 1,74 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$Q_{c_c} = A_{c_c} * V_{c_c} = (0,213 * 0,35) * 1,74 = 0,130 \text{ m}^3/\text{s}$$

4.7. Profundidad normal

Al variar la pendiente del canal hasta cierto valor, es posible cambiar la profundidad normal y hacer que el flujo uniforme ocurra en un estado crítico para el caudal y la rugosidad determinados.

La pendiente que se obtiene es la pendiente crítica, y la profundidad normal correspondiente es igual a la profundidad crítica. Para el cálculo de la profundidad normal, se hacen iteraciones con las siguientes fórmulas²:

$$A = C * P^{\frac{2}{5}} = B * Y_n$$
$$P = B + 2Y$$

² STREETER, V.L., BENJAMIN, E. y KEITH W. *Mecánica de fluidos*. p. 508.

$$C = \left[\frac{Q_{op} * \eta}{S^{\frac{1}{2}}} \right]^{\frac{3}{5}}$$

Donde:

- Área del canal (A)
- Perímetro mojado (P)
- Profundidad hidráulica (Y)
- Profundidad normal (Y_n)
- Coeficiente de rugosidad η (adimensional)
- Pendiente del canal S (adimensional)
- Coeficiente (C)

$$C = \left[\frac{0,1080 * 0,010}{0,00374319^{\frac{1}{2}}} \right]^{\frac{3}{5}} = \left[\frac{0,00108}{0,0177} \right]^{\frac{3}{5}} = 0,0887$$

Igualando las ecuaciones de áreas y sustituyendo los valores de C y P, se obtiene la siguiente ecuación; luego, por medio de iteraciones se encuentra el valor de la profundidad normal.

$$A = C * P^{\frac{2}{5}} = B * Y_n$$

$$0,0887 * (B * 2Y_n)^{\frac{2}{5}} = B * Y_n$$

$$0,0887 * (0,35 + 2Y_n)^{\frac{2}{5}} = 0,35 * Y_n$$

Tabla X. **Resultados, iteraciones, cálculo de Yn**

Valor de Yn (m)	Valor fórmula 1 ($0,0887 \cdot (0,35 + 2 \cdot Y_n)^{2/5}$)	Valor fórmula 2 ($0,35 \cdot Y_n$)	Diferencia 1 - 2
0,225	0,081125916	0,07875	0,002375916
0,226	0,081206981	0,07910	0,002106981
0,227	0,081287925	0,07945	0,001837925
0,228	0,081368749	0,07980	0,001568749
0,229	0,081449452	0,08015	0,001299452
0,230	0,081530035	0,08050	0,001030035
0,231	0,081610499	0,08085	0,000760499
0,232	0,081690844	0,08120	0,000490844
0,233	0,081771071	0,08155	0,000221071
0,234	0,081851179	0,08190	4,88207E-05
0,235	0,081931171	0,08225	0,000318829
0,236	0,082011045	0,08260	0,000588955
0,237	0,082090803	0,08295	0,000859197
0,238	0,082170445	0,08330	0,001129555
0,239	0,082249971	0,08365	0,001400029
0,240	0,082329382	0,08400	0,001670618

Fuente: elaboración propia.

Después de realizar el proceso de iteración se compara la profundidad crítica con la profundidad normal, de acuerdo a los siguientes valores:

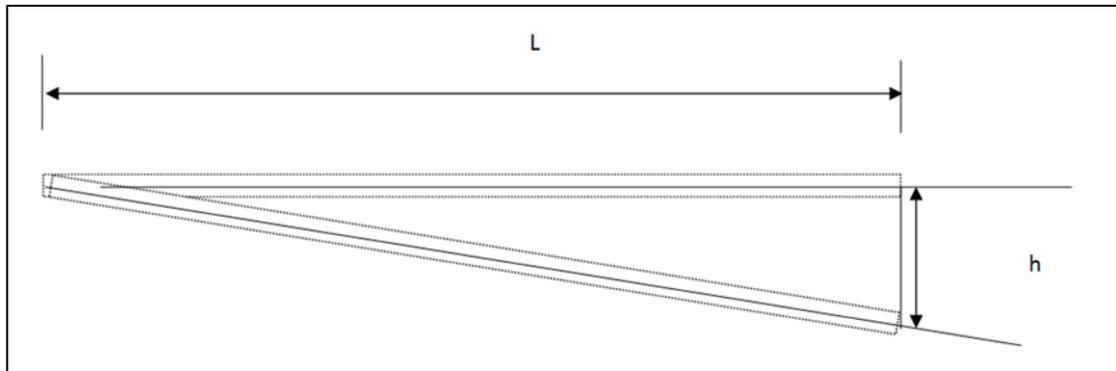
- $Y_n = 0,234$ m
- $Y_{C_c} = 0,213$ m
- $Y_{max} = 0,385$ m
- $Y_{max} > Y_n > Y_{C_c}$

El perfil del flujo puede cambiar con el valor del caudal utilizado; esto indica que en el mismo canal se pueden obtener diversos tipos de flujo: subcrítico, crítico y supercrítico.

4.8. Inclinación del canal

La inclinación del canal se calcula usando el teorema de Pitágoras, teniendo en cuenta que el ángulo será de $\theta = 1^\circ$ y la longitud del canal $L = 6$ m, como se muestra en la siguiente figura.

Figura 38. Cálculo, pendiente del canal



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2013.

Donde:

$$\tan\theta = \frac{h}{L}$$

$$H = \tan \Theta * L = \tan (1^\circ)*6,0 = 0,1047 \text{ m}$$

Después del análisis realizado, las dimensiones del canal hidráulico de pendiente variable quedan de la siguiente manera:

Tabla XI. **Dimensiones del canal hidráulico de la pendiente variable**

Característica	Valor
Largo	6,0 m
Ancho	0,35
Altura total	0,55
Pendiente crítica	$S_{c_{max}} = 0,00375$
Ángulo máximo de inclinación	1°
Rango de operación del caudal	0 - 0,1080 m ³ /s
Variación de velocidad en el canal	0 - 0,119 m/s
Variación del nivel del agua	0 - 0,385 m
Variación de pendiente del canal	0 - 0,00375 $0^{\circ} - 1^{\circ}$

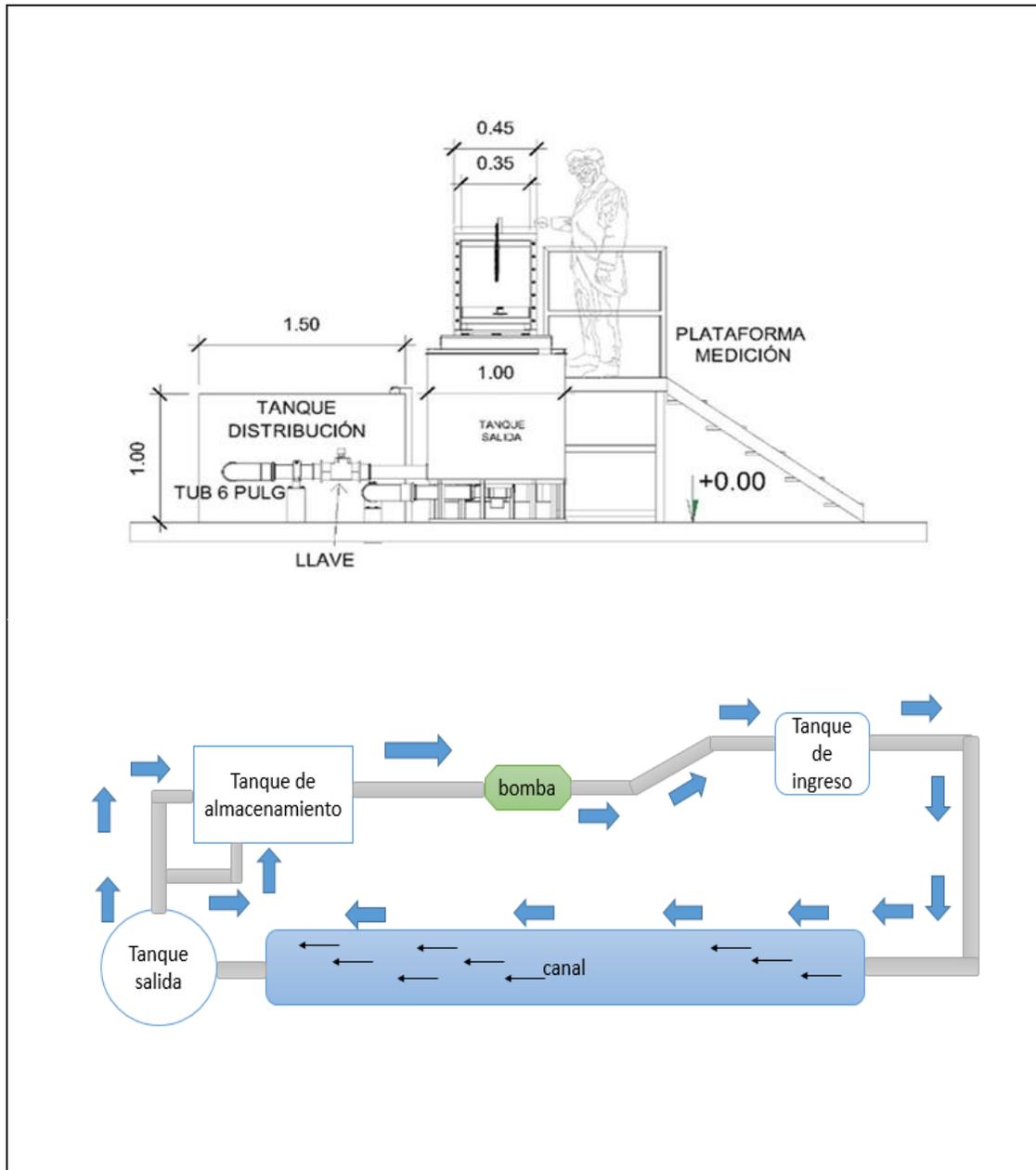
Fuente: elaboración propia.

4.9. **Cálculo de la carga dinámica de la bomba**

Conocer el valor de las pérdidas hidráulicas es importante tratándose de tuberías cortas, además es de utilidad para calcular la potencia de la bomba. El sistema consta de un circuito de tuberías de P.V.C. de 6" de diámetro, en el cual se ubican los accesorios. La carga de velocidad es la misma en todo el sistema debido a que la sección de la tubería es la misma.

Se tienen pérdidas primarias y secundarias originadas por el roce del agua con la tubería, accesorios y otros elementos por los que circula, como se muestra en la siguiente figura.

Figura 39. Detalle, componentes del sistema



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2013.

Para las condiciones de operación del canal, se consideran los siguientes criterios:

Tabla XII. **Propiedades físicas del agua**

Propiedad	Valor
Temperatura operación T_{ope}	20 - 25°C
Peso específico γ	9 778 kgf/m ³
Densidad ρ	997,1 kg/m ³
Viscosidad μ	0,894 N.S/m ²
Viscosidad cinemática ν	0,897x10 ⁻⁶ m ² /s

Fuente: elaboración propia.

A continuación, se presentan los datos necesarios para calcular las pérdidas de energía de acuerdo a cada caso:

- Tubería de Φ 6" PVC 250 psi
- La tubería de PVC 250 psi con un diámetro nominal de 152,4 mm (6")
- Diámetro interno de la tubería 148,5 mm (5,845")
- $Q_{op} = 0,1080 \text{ m}^3/\text{s} = 108,0 \text{ l/s}$
- Longitud tubería 8 m
- Área = $\pi/4 * d^2$

Tabla XIII. **Diámetros internos de tubería PVC**

Diámetro comercial (pulgadas)	Diámetro interior (pulgadas) 100 psi	Diámetro interior (pulgadas) 125 psi	Diámetro interior (pulgadas) 160 psi	Diámetro interior (pulgadas) 250 psi	Diámetro interior (pulgadas) 375 psi
½					0,716
¾				0,926	
1			1,195	1,161	
1 ¼			1,532	1,464	
1 ½			1,754	1,676	
2			2,193	2,095	
2 ½			2,655	2,537	

Continuación de la tabla XIII.

3		3,284	3,230	3,088	
4	4,280	4,224,	4,154	3,970	
6	6,301	6,217	6,115	5,845	
8	8,205	8,095	7,961	7,609	

Fuente: elaboración propia.

A continuación, se presenta la metodología para el cálculo de las pérdidas del sistema:

- Carga dinámica o altura manométrica total: 2 m
- El tramo desde TA hasta TP, haciendo Bernoulli se tiene:

$$\frac{P_{TA}}{\rho_{TA}} + \frac{V_{TP}^2}{2 * g} + Z_{TP} + \Sigma F_{TA-TP}$$

De acuerdo con las condiciones de diseño, los tanques estarán expuestos a la atmósfera (las presiones se anulan) y la velocidad de entrada de los tanques será constante, se tiene:

$$H_B = Z_c + \Sigma F_{TA-TP}$$

Donde:

- HB: altura de la bomba
- Zc: altura geodésica del punto descarga (m)
- ΣF_{TA-TP} sumatoria de pérdidas primarias y secundarias

- Pérdidas (por los accesorios): el valor de K depende de la geometría del accesorio y del coeficiente de fricción f ; por lo que la pérdida de carga para los accesorios se evalúa en forma individual, por medio de tablas y gráficas. Es importante considerar las pérdidas accesorios tratándose de tuberías cortas, las pérdidas de cargas accidentales se determinan en función de $V^2/2g$.

$$\Sigma H_f = \Sigma K \left(\frac{V^2}{2g} \right)$$

Donde:

- Coeficiente de fricción de la tubería (f)
 - Velocidad promedio en la tubería (V)
 - Longitud equivalente (L)
 - Diámetro de la tubería (D)
 - Coeficiente de fricción de accesorios (K)
- De acuerdo con la ecuación, al sustituir las variables y las pérdidas respectivas se tiene:

$$H_b = Z_2 + \left(\frac{V^2}{2g} \right) \left[f \left(\frac{L}{D} \right) + \Sigma K \right]$$

Tabla XIV. **Cálculo, pérdidas secundarias**

Tipo accesorio	Cantidad	Longitud equivalente (m)		K accesorios	
		Unidad	Total	K unidad	K total accesorios
Codo PVC de 90°	3	4,3	12,9	0,51	1,53
Codos PVC de 45°	3	2,1	6,3	0,27	0,81
Válvulas de compuerta	2	0,9	1,8	0,14	0,28
Entrada y salida de tanque	2	1	2	0,9	1,8
		Total ΣL_e	23,0	Total ΣK	4,42

Fuente: elaboración propia.

- Con los siguientes datos para tubería de PVC 6", 250 psi, se usa el diagrama de Moody.

Velocidad en la tubería

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{0,108}{\frac{\pi}{4} * (5,845 * 0,0254)^2} = 5,92 \text{ m/s}$$

Carga de velocidad

$$\frac{V^2}{2g} = \frac{5,92^2}{2 * 9,81} = 1,786 \text{ m}$$

Número de Reynolds

$$Re = \frac{VD}{\nu} = \frac{13,7 * 0,10}{0,897 * 10^{-6}} = 1,1 \text{ E} + 6$$

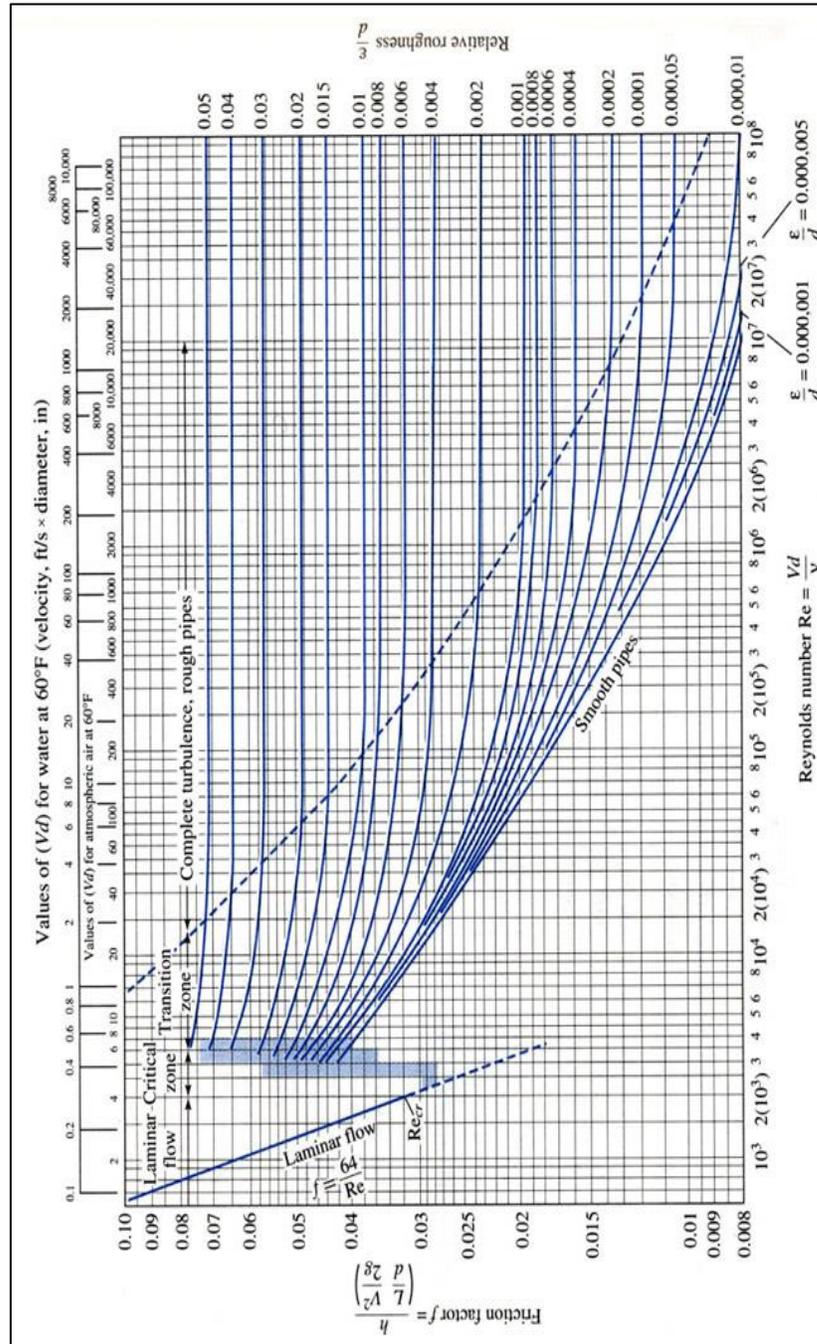
- $v = \text{m/s}$
- $D = \text{m}$
- $\nu = \text{viscosidad cinemática m}^2/\text{s}$

Rugosidad relativa

$$\varepsilon = \frac{k}{D} = \frac{0,02}{100,1} = 0,0000131$$

- $k = \text{rugosidad absoluta (tablas)}$
- $D = \text{diámetro interno de la tubería}$
 - Localizar el N_R sobre la abscisa del diagrama de Moody.
 - Proyectar verticalmente hasta que se alcance la curva correspondiente al valor de e/D .
 - Se proyecta horizontalmente hacia la izquierda, donde se lee el valor de f .
 - De acuerdo con el diagrama de Moody y los cálculos anteriores, se obtiene un valor de $f = 0,012$.

Figura 40. Diagrama de Moody



Fuente: STREETER, Víctor L. *Mecánica de los fluidos*. p. 184.

- Con el valor de f y con la ecuación 3, se sustituyen datos

$$L_{\text{total}} = L_{\text{real}} + L_{\text{equiv}}$$

$$L_{\text{equiv}} = 23,0 \text{ m}$$

$$L_{\text{total}} = L_{\text{real}} + L_{\text{equiv}} = 8 + 23,0 = 31,0 \text{ m}$$

$$H_b = 2,0 + \left[0,012 \left(\frac{31,0}{0,10} \right) + 4,42 \right] = 10,14 \text{ m}$$

4.10. Cálculo de potencia de la bomba

Para el funcionamiento continuo del canal es necesario un equipo de recirculación que cumpla la función de elevar el agua desde el tanque de almacenamiento hasta el tanque principal y de ahí al canal y tanque volumétrico.

Con base en lo anterior se calcula la potencia de la bomba necesaria en el sistema, con la ecuación siguiente.

$$\text{Pot}_{\text{bomba}} = \frac{\rho * Q * H_b}{76}$$

Donde:

- Densidad del agua $\rho = 997,1 \text{ kg/m}^3$
- Q caudal = $0,108 \text{ m}^3/\text{s}$
- H_b pérdidas del sistema m

$$Pot_{bomba} = \frac{997,1 * 0,108 \frac{m^3}{s} * 10,14}{76} = 14,4 \text{ Hp}$$

4.11. Selección de la bomba

Para la decisión de la compra de una bomba se debe considerar no solamente el coste inicial de la bomba; también, los costes de operación (mantenimiento, reparaciones y costes energéticos) que tendrá esta durante su vida útil.

Debido a las condiciones de operación se requiere un equipo versátil en su capacidad de elevación y en el rango de caudal que puede conducir. Por lo tanto, se propone una bomba de 25 hp la cual puede ser una centrífuga trifásica, modelo MT3ME2500, marca EVANS, con característica especial de 2 polos de alta eficiencia, trabajo continuo, alto flujo y alta presión.

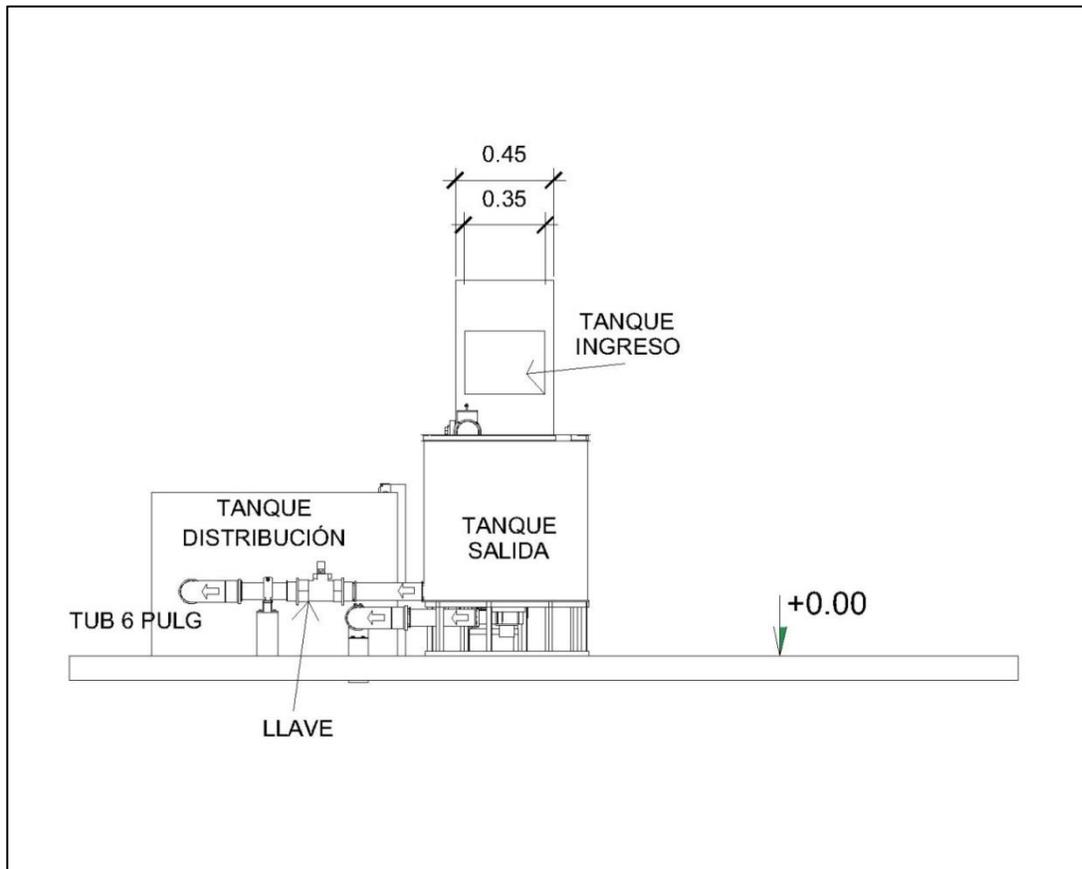
4.12. Diseño de tanques

De acuerdo con la metodología aplicada y el uso del canal, se incluyen en el sistema propuesto el uso de tres tanques principal (TP), volumétrico (TV) y almacenamiento (TA).

El canal hidráulico es un circuito cerrado, inicia con una bomba que toma el fluido del tanque de almacenamiento, que a su vez, es enviado por una tubería al TP; luego, recorre el canal y el agua se recolecta en el TV y se descarga en el TA, manteniendo de esta manera el ciclo de pruebas.

Los tanques estarán expuestos a la atmósfera y la velocidad de entrada de los tanques será constante.

Figura 41. Vista ubicación de tanques



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2013.

4.12.1. Tanque principal (TP)

Su función es recibir el agua elevada por la bomba y entregarla al canal en forma regulada, aplacando la agitación en el flujo producida por la impulsión. Se propone un tanque cuadrado de material acrílico de espesor $e = 10$ mm, con una capacidad de $0,9 \text{ m}^3$, de forma rectangular con las siguientes dimensiones:

- Largo: 1,30 m
- Ancho: 0,70 m
- Altura: 1,00 m

De acuerdo al material de construcción, el tanque debe ser revestido con pintura anticorrosiva para proteger las superficies interna y externa.

4.12.2. Tanque volumétrico (TV)

Su función es recibir el caudal de salida del canal, debe contar con instalaciones para medir el caudal y permitir observar el nivel del agua acumulada dentro del tanque. Se propone un tanque de metal o con material acrílico de espesor $e = 10$ mm, de forma cónica, con paredes de fibra de vidrio y base metálica, con una capacidad de $0,5 \text{ m}^3$.

El diseño del tanque volumétrico consideró una forma cilíndrica, con las siguientes dimensiones:

- Altura: 1,00 m
- Diámetro: 1,00 m

Debe ser posible asociar un cambio en el nivel de agua dentro del tanque a un volumen de agua, y si se mide el tiempo que demora en ocurrir la acumulación de este volumen es posible calcular el caudal que está saliendo por el canal.

De acuerdo al material de construcción, el tanque debe ser revestido con pintura anticorrosiva para proteger las superficies interna y externa.

4.12.3. Tanque de almacenamiento (TA)

Su función es recibir y almacenar el agua vertida por el canal de manera óptima; se propone un tanque de metal con una capacidad de $3,0 \text{ m}^3$, de forma rectangular con las siguientes dimensiones:

- Largo: 2,00 m
- Ancho: 1,50 m
- Altura: 1,00 m

El volumen del TA es superior al necesario para almacenar toda el agua del sistema, la capacidad total del tanque principal y el tanque volumétrico, la capacidad total del canal, más un volumen de seguridad que proteja a la bomba de sufrir daños por cavitación en caso de ocurrir algún accidente, ya que la vida útil del equipo puede verse disminuida en caso de ocurrir cavitación.

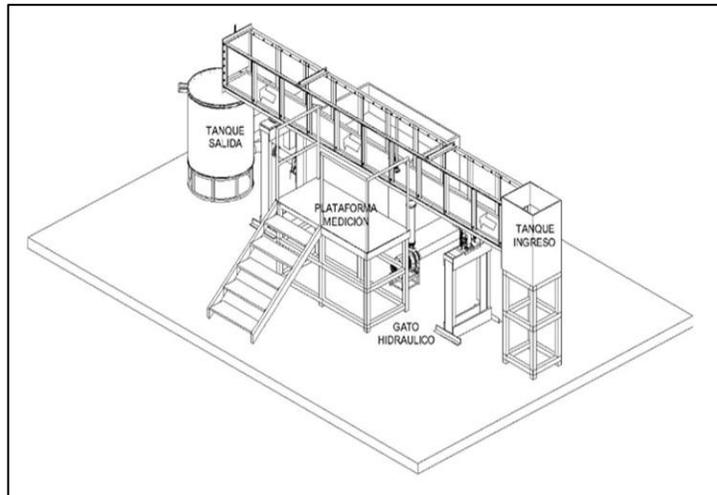
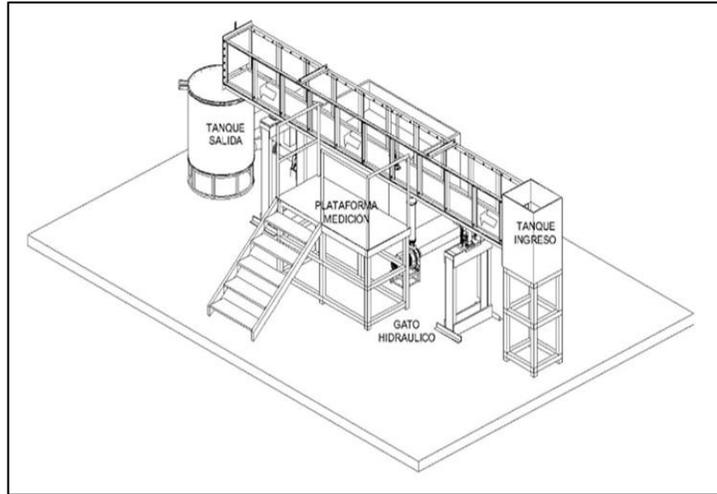
Tabla XV. **Volumen tanque de almacenamiento**

Cálculo volumen tanque de almacenamiento	
Volumen tanque principal	0,900 m ³
Volumen tanque volumétrico	0,500 m ³
Volumen canal	1,470 m ³
Volumen emergencias	0,130 m ³
Volumen total	3,000 m ³

Fuente: elaboración propia.

Para realizar mantenimiento al equipo y cambiar el agua de manera periódica, el tanque requiere de un desagüe que permita evacuar toda el agua del sistema. El tanque de almacenamiento cuenta con una salida del tanque de 6" que va conectada a la bomba recirculadora.

Figura 42. **Vista isométrica, sistema propuesto**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2013.

CONCLUSIONES

1. Se realizó el diseño de canal con forma rectangular y pendiente variable lo que ofrece manejar diferentes velocidades de flujo, sus dimensiones permiten que se puedan desarrollar con facilidad las actividades de calibración de molinetes (longitud 6,0 m, alto 0,55 m y base 0,35 m).
2. Se identificaron dos tipos de metodologías para calibrar molinetes en laboratorio: aguas quietas y aparato en movimiento, y aparato quieto y aguas en movimiento.
3. De acuerdo a las características geométricas e hidráulicas del canal, se pueden generar distintos tipos de flujo: subcrítico, críticos y supercríticos.
4. La calibración es indispensable dado que cada molinete es diferente, cada uno tiene diferente resistencia al giro por el empuje del agua y cada uno se usa de distinta manera.
5. La existencia de un canal de estas características permitiría al INSIVUHME realizar investigaciones en el área de hidráulica.
6. El costo del sistema propuesto de acuerdo a los objetivos del estudio, es de Q 122 206,00.

RECOMENDACIONES

1. A las autoridades del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología de Guatemala (INSIVUMEH), divulgar a las instituciones y profesionales de la hidrología; la propuesta del canal para diseño de molinetes y los servicios asociados (mantenimiento y calibración de molinetes).
2. Capacitar al personal responsable del uso y calibración de molinetes del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología de Guatemala (INSIVUMEH), antes de iniciar su trabajo y luego de manera programada.
3. A la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, continuar con las investigaciones sobre el tema del uso y calibración de molinetes.
4. Implementar un programa de mantenimiento preventivo del canal, a efecto de obtener medidas precisas y confiables.

BIBLIOGRAFÍA

1. AGUIRRE PE, Julián. *Hidráulica de canales*. Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela: Cidiat, 1974. 46 p.
2. ÁLVAREZ-BRETÓN, Ricardo. *Evaluación de un tanque anular con brazos giratorios para calibrar molinetes*. México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2008. 111 p.
3. APARICIO MIJARES, Francisco J. *Fundamentos de hidrología superficial*. México: Limusa, 1989. 152 p.
4. CASTELLANOS, Hermes E.; COLLAZOS, Carlos A.; FARFAN, Javier C. y MELÉNDEZ-PERTUZ, Farid. *Diseño y construcción de un canal hidráulico de pendiente variable*. [En línea]. <<http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642017000600012>>. [Consulta: 28 de mayo de 2017].
5. CHANSON, Hubert. *Hidráulica del flujo en canales abiertos*. Colombia: McGraw-Hill, 2002. 551 p.
6. FILIPO V., B. y ABRAMOV, G. *Canales con fines hidráulicos*. 2a ed. Bulgaria: Técnica Sofía, 1972. 215 p.
7. FRENCH, Richard H. *Hidráulica de canales abiertos*. 2a ed. México: McGraw-Hill, 1990. 740 p.

8. Gobierno de Perú, Ministerio de Agricultura. *Instructivo técnico de calibración de estructuras hidráulicas de medición*. Perú: Ministerio de Agricultura, 2004. 126 p.
9. MARIN CÓRDOVA, Carlos Alberto; MENJIVAR LEONARDO, Máximo Jerónimo. *Diseño y construcción de un canal hidráulico de pendiente variable para uso didáctico e investigación*. El Salvador: Universidad de El Salvador, 2012. 265 p.
10. MOTT, Robert L. *Mecánica de fluidos*. 6a ed. México: Pearson Educación, 2006. 627 p.
11. PEDROZA GONZÁLEZ, Edmundo. *El molinete, importancia, fundamentos y buenas prácticas*. México: IMTA México, 2017. 108 p.
12. ROCHA FELICES, Arturo. *Hidráulica de canales y tuberías*. Perú: Universidad Nacional de Ingeniería, 2007. 471 p.
13. STREETER, Víctor L.; WYLIE, E. Benjamin; BEDFORD, KEITH W. *Mecánica de Fluidos*. 9a ed. México: McGraw-Hill, 2000. 508 p.

APÉNDICES

Apéndice 1. Resultados, aforo volumétrico, canal, Laboratorio de Hidráulica, Usac

Datos:

- Tirante en el canal = 0,20 m
- Pendiente = 0°
- Área 0,06 m² (0,30 x 0,20 m)

Aforo volumétrico							
Caudal (m ³ /s)	Núm.	Tiempo (s)	Altura piezómetro (m)	Volumen (L)	Caudal (L/s)	Área (m ²)	Velocidad (m/s)
0,01606814	1	27,88	0,277	447,98	16,06814921	0,06	0,26780248
0,01617351	2	29,22	0,31	472,59	16,17351129	0,06	0,26955852
0,01614504	3	30,06	0,327	485,32	16,14504325	0,06	0,26908405
0,01612890	Caudal promedio				Velocidad promedio		0,26881502

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. Resultados, aforo con molinete, tipo hélice, canal, Laboratorio de Hidráulica, Usac

Datos:

- Tirante en el canal = 0,20 m
- Pendiente = 0°
- Área 0,06 m² (0,30 x 0,20 m)
- $V = 0,0193 + 0,3117n$

Continuación del apéndice 2.

Molinete tipo hélice									
n			N+um. lectura	Núm. vueltas	Tiempo (s)	Altura		Velocidad m/s	Caudal m ³ /s
						Yo	Y1		
0,9	0,2805300	0,0193	1	27	30	8	12	0,2998300	0,01798980
0,9	0,2805300	0,0193	2	27	30	8	12	0,2998300	0,01798980
0,875	0,2727375	0,0193	3	35	40	8	12	0,2920375	0,01752225
0,875	0,2727375	0,0193	4	35	40	8	12	0,2920375	0,01752225
0,9	0,2805300	0,0193	5	54	60	8	12	0,2998300	0,01798980
0,9	0,2805300	0,0193	6	54	60	8	12	0,2998300	0,01798980
Promedio								0,2972325	0,01783395

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. Resultados, aforo con molinete, tipo copas Gurley, canal, Laboratorio de Hidráulica, Usac

Datos:

- Tirante en el canal = 0,20 m
- Pendiente = 0°
- Área 0,06 m² (0,30 x 0,20 m)
- $V=0,662 \cdot rps+0,006$

Molinete tipo copas Gurley						
Núm. lectura	Núm. vueltas (rpm)	Tiempo (s)	Altura		Velocidad m/s	Caudal m ³ /s
			Yo	Y1		
1	20	44,3	8	12	0,3048713	0,0182922
2	20	44,1	8	12	0,3062267	0,0183736
3	20	48,1	8	12	0,2812598	0,0168755
4	27	60,1	8	12	0,3034043	0,0182042
5	30	66,5	8	12	0,3046466	0,0182787
6	18	41,0	8	12	0,2966341	0,0177980
Velocidad promedio					0,2991982	0,0179518

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. Resultados, aforo con molinete, tipo hélice, canal, Laboratorio de Hidráulica, Usac

Datos:

- Tirante en el canal = 0,20 m
- Pendiente = 0°
- Área 0,06 m² (0,30 x 0,20 m)
- $V = 0,0193 + 0,3117n$

Molinete tipo hélice									
n			Núm. lectura	Núm. de vueltas	Tiempo (s)	Altura		Velocidad	Caudal
						Yo	Y1	m/s	m ³ /s
1,325	0,4130025	0,0193	1	53	40	6	8	0.432302	0.0259381
1,3	0,405210	0,0193	2	52	40	6	8	0.424510	0.0254706
1,31666	0,410405	0,0193	3	79	60	6	8	0.429705	0.0257823
1,31666	0,410405	0,0193	4	79	60	6	8	0.429705	0.0257823
Promedio								0,429056	0,0257433

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 5. Resultados, aforo con molinete, tipo copas Gurley, canal, Laboratorio de Hidráulica, Usac

Datos:

- Tirante en el canal = 0,20 m
- Pendiente = 0°
- Área 0,06 m² (0,30 x 0,20 m)
- $V=0,662*rps+0,006$

Continuación del apéndice 5.

Molinete tipo copas Gurley						
Núm. lectura	Núm. vueltas	Tiempo (s)	Altura		Velocidad m/s	Caudal m ³ /s
			Yo	Y1		
1	30	47,8	6	8	0,42148117	0,02528887
2	30	48,7	6	8	0,41380287	0,024828172
3	25	41,0	6	8	0,40965854	0,024579512
4	25	40,8	6	8	0,41163725	0,024698235
Promedio					0,41414496	0,024848670

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 6. **Cuadro resumen: resultados, aforos, canal, Laboratorio de Hidráulica, Usac**

Método aforo	Valor velocidad promedio (m/s)	Caudal promedio (m ³ /s)
Aforo volumétrico	0,268815021	0.016128901
Aforo con molinete tipo hélice (8, 12)	0,297232500	0,017833950
Aforo con molinete tipo copas Gurley (8, 12)	0,299198200	0,017951800
Aforo con molinete tipo hélice (6, 8)	0,429056000	0,025743300
Aforo con molinete tipo copas Gurley (6, 8)	0,414144960	0,02484867

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 7. Archivo fotográfico: aforo, canal, Laboratorio de hidráulica, Usac



Canal Laboratorio de Hidráulica, Usac



Molinete aforo canal

Registro de lecturas aforo canal

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 8. Presupuesto instalaciones del sistema

ITEM	Descripción	Cantidad	Unidad de medida	Precio unitario (Q)	Precio total (Q)
1	Estructura metálica				
1.1	Suministro e instalación de estructuras metálicas.	1	Global	35 000,00	35 000,00
2	Bomba hidráulica				
2.1	Suministro e instalación de una bomba.	1	Unidad	50 500,00	50 500,00
3	Estructura acrílica				
3.1	Suministro e instalación de canal de acrílico con las siguientes dimensiones 6 m largo, 0,35 de ancho y 0,55 de alto	1	Global	21 000,00	21 000,00
4	Accesorios y tubería PVC				
4.1	Tablero eléctrico y accesorios	1	Global	8 750	8 750,00
4.1	Codo PVC de 90°	3	Unidad	350,00	1 050,00
4.2	Codo PVC de 45°	3	Unidad	462,00	1 386,00
4.3	Válvulas de compuerta	2	Unidad	660,00	1 320,00
4.4	Tubería PVC de 250 psi de 6"	2	Unidad	1 600,00	3 200,00
				Costo total	Q 122 206,00

Fuente: elaboración propia.