

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

## **FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL**

**PROPUESTA DE REHABILITACIÓN DEL MODELO FÍSICO DE LA RÁPIDA DE  
DESCARGA EMPLEADA EN EL MODELO HIDRÁULICO REDUCIDO DE LAS  
OBRAS DE DERIVACIÓN Y DESVÍO DE LA QUEBRADA EL BATÁN Y DISEÑO  
DE UN SISTEMA DE CAPTACIÓN DE FONDO CON APROXIMACIÓN  
SUPERCRÍTICA PARA SER IMPLEMENTADO EN LA RÁPIDA DEL  
LABORATORIO DOCENTE DE HIDRÁULICA**

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE CAPTACIÓN DE FONDO CON APROXIMACIÓN  
SUPERCRÍTICA**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO  
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL**

**JHOSELIN GRACIELA CHANALUISA AYALA**

**[jhosselin.chanaluisa@epn.edu.ec](mailto:jhosselin.chanaluisa@epn.edu.ec)**

**DIRECTOR: ING.PATRICIA LORENA HARO RUIZ**

**[patricia.haro@epn.edu.ec](mailto:patricia.haro@epn.edu.ec)**

**DMQ, agosto 2024**

## **CERTIFICACIONES**

Yo, JHOSELIN GRACIELA CHANALUISA AYALA declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

---

Jhosselin Graciela Chanaluisa Ayala

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por JHOSELIN GRACIELA CHANALUISA AYALA, bajo mi supervisión.

---

Ing. Patricia Lorena Haro Ruiz

**DIRECTORA**

## **DECLARACIÓN DE AUTORÍA**

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

Jhosselin Graciela Chanaluisa Ayala

Ing. Patricia Lorena Haro Ruiz

## DEDICATORIA

Este trabajo lo dedico a Dios por ser mi fuente de fortaleza para cumplir con todo lo que siempre me he propuesto.

Con respeto y admiración dedico este trabajo a mis padres que fueron el pilar fundamental para culminar esta etapa académica.

Con un profundo amor y cariño dedico este trabajo a mis hermanos que con su motivación me ayudaron a confiar en mí y a no dejarme vencer ante las adversidades.

*Jhosselin Chanaluísa Ayala*

## AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por la salud, la vida y por cada oportunidad de aprendizaje y crecimiento que me ayudó a vencer cualquier obstáculo.

A mis padres, Jorge y Nancy, por su apoyo a lo largo de toda mi trayectoria académica porque sin Uds no podría haberlo logrado, gracias por demostrarme que todo esfuerzo al final vale la pena, por brindarme todo el cariño y apoyo no sólo económico sino moral, siendo clave de fortaleza para no rendirme fácilmente a pesar de todos los obstáculos que hemos atravesado, por confiar en mí y ayudarme a cumplir una meta más en mi vida. Gracias por permitirme emprender la travesía de estudiar en otra ciudad, porque a pesar de que no los tenía cerca nunca me faltó una llamada suya. Este logro no sólo es mío, también es el de Uds.

A mis hermanos Monserrath y Paul que me han motivado a continuar con mi carrera aún en los días en que pensaba que ya no podía con todo, gracias, hermanos por escucharme y brindarme sus consejos cuando más lo necesitaba.

A mí familia que con sus palabras de aliento me incentivaron a continuar con mis estudios y cumplir con este logro académico.

A la Escuela Politécnica Nacional por haberme brindado la oportunidad de desarrollar mis habilidades en sus aulas, a mis docentes por sus conocimientos para mi formación profesional.

A la Ing. Patricia Haro por la orientación y paciencia que me ha brindado para terminar este trabajo con éxito, gracias por su entrega y profesionalismo.

A mi grupo de amigos, por su amistad, risas, días de estudio, aventuras compartidas, son situaciones que llevaré siempre en mi memoria, mucho éxito en su vida profesional colegas.

A la persona que me acompañó y me brindó su amistad a lo largo de mi carrera universitaria, Viki gracias por todas las situaciones que hemos superado juntas.

A Pame R por su carisma, amistad, compañía y paciencia, gracias por hacer que mi vida de foránea sea una experiencia inolvidable.

A LEMSUR por facilitar los equipos necesarios para el levantamiento de información del LDH.

*Jhosselin Chanaluisa Ayala*

## ÍNDICE DE CONTENIDO

DECLARACIÓN DE AUTORÍA .....	II
DEDICATORIA .....	III
AGRADECIMIENTO .....	IV
INDICE DE ECUACIONES .....	IX
INDICE DE FIGURAS.....	XI
INDICE DE TABLAS.....	XIII
RESUMEN.....	XIV
ABSTRACT .....	XV
1. DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO.....	1
1.1 Objetivo general .....	2
1.2 Objetivos específicos.....	2
1.3 Alcance.....	2
1.4 Marco Teórico.....	3
1.4.1 Flujo a superficie libre .....	3
1.4.2 Tipos de flujo en canales abiertos.....	3
1.4.3 Flujo uniforme .....	4
1.4.3.1 Definición .....	4
1.4.3.2 Ecuación de Manning.....	4
1.4.4 Flujo Gradualmente Variado .....	5
1.4.4.1 Definición .....	5
1.4.4.2 Métodos de cálculo.....	5
1.4.4.3 Tipos de Curvas de Remanso .....	6
1.4.5 Números adimensionales que determinan los estados de flujo en canales .....	7
1.4.5.1 Efecto de la gravedad (Froude) .....	7
1.4.5.2 Efecto de la viscosidad (Reynolds).....	8
1.4.5.3 Inestabilidad del Flujo Uniforme (Número de Vedernikov) .....	9
1.4.6 Generalidades de los canales con régimen supercrítico .....	10
1.4.6.1 Componentes de la Rápida de Descarga .....	10
1.4.6.2 Mezcla de agua-aire .....	11
1.4.7 Sistema de captación de fondo.....	12

1.4.7.1	Clasificación de las rejas de fondo .....	13
1.4.7.2	Tipos de Perfiles sobre la reja de fondo.....	13
1.4.8	Sistema de Captación de Fondo para régimen supercrítico adoptado por Wong .....	15
1.4.8.1	Descripción del modelo .....	15
1.4.8.2	Comportamiento hidráulico del flujo.....	16
1.4.8.3	Criterios estudiados en la experimentación .....	17
1.4.8.3.1	Tipo de Barra .....	17
1.4.8.3.2	Longitud de reja mojada.....	18
1.4.8.3.3	Concentración de aire en la galería.....	19
2.	METODOLOGÍA .....	21
2.1	Levantamiento de información: Descripción del modelo físico de la Rápida del Batán .....	21
2.1.1	Problemática del modelo.....	22
2.1.2	Sistema de bombeo del LDH .....	23
2.1.2.1	Bombas.....	23
2.1.2.2	Motor .....	23
2.1.2.3	Tuberías de impulsión y aspersion .....	24
2.1.2.4	Válvulas.....	25
2.1.2.5	Panel de control .....	26
2.1.2.6	Tanques elevados .....	26
2.1.2.7	Tuberías de distribución .....	27
2.1.2.8	Canal de recirculación .....	27
2.2	Levantamiento topográfico del LDH.....	28
2.3	Consideraciones sobre el Caudal de diseño.....	30
2.4	Calados de la rápida de descarga .....	31
2.4.1	Calado con concentración al 90 % .....	32
2.5	Rugosidad del canal.....	37
2.6	Perfil de aproximación de la rápida.....	37
2.7	Dimensionamiento de los componentes hidráulicos .....	38
2.7.1	Reja de fondo .....	38
2.7.1.1	Longitud de la reja .....	38
2.7.1.2	Índice de huecos .....	39

2.7.1.3	Espaciamiento entre barras .....	40
2.7.1.4	Tipo de Reja .....	41
2.7.1.7	Coeficiente de descarga .....	41
2.7.2	Canal de recolección .....	43
2.7.3	Vórtice de descarga .....	44
2.7.3.1	Definición .....	44
2.7.3.2	Desarrollo del flujo helicoidal .....	45
2.7.3.3	Elementos del vórtice de descarga .....	45
2.7.4	Canal de aproximación .....	46
2.7.5	Cámara de entrada .....	46
2.7.5.1	Sobreelevación .....	48
2.7.6	Tubo de descargador a vórtice .....	50
2.7.6.1	Descripción .....	50
2.7.6.2	Diámetro del tubo vertical .....	50
2.7.6.3	Longitud del tubo vertical .....	51
2.7.7	Cámara de disipación .....	51
2.7.7.1	Descripción .....	51
2.7.8	Canal de entrega .....	54
2.7.9	Tubería de ventilación .....	54
2.7.10	Diseño de Transiciones .....	55
2.8	Consideraciones para el Presupuesto .....	56
2.8.1	Materiales .....	56
2.8.2	Mano de Obra y Consumibles .....	56
2.8.3	Presupuesto .....	57
3.	RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	58
3.1	Resultados .....	58
3.1.1	Cálculo de los calados de la rápida .....	58
3.1.1.1	Calado inicial del canal de entrada .....	58
3.1.1.2	Calado crítico .....	59
3.1.1.3	Calado de la pendiente inclinada .....	59
3.1.1.4	Calado aireado .....	60
3.1.2	Perfil de aproximación de la rápida de descarga .....	61



3.1.3 Alternativas de Diseño del sistema de captación de fondo con aproximación supercrítica .....	63
3.1.3.1 Desarrollo del esquema general.....	64
3.1.3.2 Reja.....	64
3.1.3.3 Canal de recolección .....	67
3.1.3.4 Transición.....	68
3.1.3.5 Vórtice de descarga.....	69
3.1.3.5.1 Canal de aproximación .....	69
3.1.3.5.2 Tubo vertical .....	70
3.1.3.5.3 Cámara de entrada .....	71
3.1.3.5.4 Cámara de disipación .....	72
3.1.3.5 Canal de Salida .....	73
3.1.3.5.1 Alternativa 1 .....	73
3.1.3.5.2 Alternativa 2.....	73
3.1.3.6 Dimensionamiento del elemento complementario a la captación.....	74
3.1.4 Presupuesto.....	74
3.1.5 Análisis de Factibilidad de implementación del sistema propuesto .....	79
3.1.5.1 Alternativa 1 .....	79
3.1.5.2 Alternativa 2 .....	80
3.2 Conclusiones.....	81
3.3 Recomendaciones.....	84
4. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	84
5. ANEXOS.....	86
ANEXO I: Datos para generar el perfil de la rápida de descarga .....	87
ANEXO III: Plano Alternativa 1 .....	92
ANEXO IV: Plano Alternativa 2 .....	94
ANEXO V: Plano del Vórtice .....	96
ANEXO VI: Plano Cámara de Disipación .....	98
ANEXO VII: Cotizaciones .....	100

## INDICE DE ECUACIONES

<b>Ecuación 1.1</b> Ecuación de Manning.....	4
<b>Ecuación 1.2</b> Ecuación dinámica del Flujo gradualmente variado.....	5
<b>Ecuación 1.3</b> Número de Froude .....	7
<b>Ecuación 1.4</b> Número de Reynolds.....	8
<b>Ecuación 1.5</b> Número de Vedernikov.....	9
<b>Ecuación 2.1</b> Calado crítico .....	32
<b>Ecuación 2.2</b> Caudal unitario .....	32
<b>Ecuación 2.3</b> Froude para condición aireada.....	33
<b>Ecuación 2.4</b> Longitud para que aparezca la introducción de aire .....	33
<b>Ecuación 2.5</b> Calado de inicio de autoareación .....	33
<b>Ecuación 2.6</b> Froude para el calado al inicio de la autoaeración.....	34
<b>Ecuación 2.7</b> Rugosidad relativa.....	34
<b>Ecuación 2.8</b> Coeficiente de fricción interna para flujo totalmente aireado.....	35
<b>Ecuación 2.9</b> Calado normal de agua clara .....	36
<b>Ecuación 2.10</b> Profundidad con concentración del 90% de aire.....	36
<b>Ecuación 2.11</b> Ecuación para el método del paso directo.....	38
<b>Ecuación 2.12</b> Longitud del tramo por segmentos .....	38
<b>Ecuación 2.13</b> Ecuación energía específica .....	38
<b>Ecuación 2.14</b> Ecuación de descarga para rejas longitudinales.....	38
<b>Ecuación 2.15</b> Índice de huecos .....	39
<b>Ecuación 2.16</b> Coeficiente de descarga.....	41
<b>Ecuación 2.17</b> Parámetro de flujo.....	41
<b>Ecuación 2.18</b> Coeficiente de descarga para rejas inclinadas .....	42
<b>Ecuación 2.19</b> Número de barras .....	43
<b>Ecuación 2.20</b> Área de la sección trapezoidal.....	43
<b>Ecuación 2.21</b> Perímetro de la sección trapezoidal.....	44
<b>Ecuación 2.22</b> Ecuación del radio hidráulico.....	44
<b>Ecuación 2.23</b> Radios de giro .....	47
<b>Ecuación 2.24</b> Distancia de la pared exterior del canal de aproximación desde el eje ...	48
<b>Ecuación 2.25</b> Excentricidades .....	48
<b>Ecuación 2.26</b> Condiciones de diseño .....	48
<b>Ecuación 2.27</b> Altura de sobreelevación.....	49
<b>Ecuación 2.28</b> Ubicación de la sobreelevación .....	49
<b>Ecuación 2.29</b> Diámetro del tubo vertical.....	50

<b>Ecuación 2.30</b> Longitud del tubo vertical.....	51
<b>Ecuación 2.31</b> Longitud de la cámara de disipación .....	53
<b>Ecuación 2.32</b> Ancho de la cámara de disipación.....	53
<b>Ecuación 2.33</b> Altura de la cámara de disipación.....	53
<b>Ecuación 2.34</b> Distancia desde el eje del tubo vertical hacia la cara de la cámara de disipación.....	53
<b>Ecuación 2.35</b> Longitud de la transición.....	56
<b>Ecuación 2.36</b> Longitud óptima de la transición .....	56

## INDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.1</b> Flujo a presión y en canales.....	3
<b>Figura 1.2</b> Tipos de flujo en canales.....	4
<b>Figura 1.3</b> Perfiles de flujo para FGV .....	7
<b>Figura 1.4</b> Componentes de la rápida de descarga.....	10
<b>Figura 1.5</b> Flujo en la rápida de descarga .....	12
<b>Figura 1.6</b> (a) barras longitudinales (b) barras transversales.....	13
<b>Figura 1.7</b> Perfiles de flujo.....	14
<b>Figura 1.8</b> Esquema del túnel de drenaje occidental de Hong Kong .....	15
<b>Figura 1.9</b> Esquema físico del modelo (b) Modelo construido en el laboratorio.....	16
<b>Figura 1.10</b> Comportamiento hidráulico del modelo .....	16
<b>Figura 1.11</b> Tipos de reja usadas en el modelo físico de Wong .....	17
<b>Figura 1.12</b> Longitudes características para caracterizar el flujo a través de la reja .....	18
<b>Figura 1.13</b> Medición con sonda de conductividad para reja tipo circular .....	20
<b>Figura 1.14</b> Medición con sonda óptica para reja tipo circular .....	20
<b>Figura 2.1</b> Rápida de descarga del Batán .....	22
<b>Figura 2.2</b> Fugas identificadas en la rápida de descarga .....	23
<b>Figura 2.3</b> Características técnicas de las bombas .....	24
<b>Figura 2.4</b> Motores del LDH .....	24
<b>Figura 2.5</b> Tuberías de aspersión e impulsión.....	25
<b>Figura 2.6</b> Válvulas del LDH.....	25
<b>Figura 2.7</b> Panel de control .....	26
<b>Figura 2.8</b> Tanques elevados.....	26
<b>Figura 2.9</b> Tuberías de distribución de caudal a la rápida .....	27
<b>Figura 2.10</b> Canal de recirculación.....	28
<b>Figura 2.11</b> Instrumentos de topografía usados en el levantamiento.....	29
<b>Figura 2.12</b> Planimetría del LDH .....	29
<b>Figura 2.13</b> Vertedero triangular de la rápida .....	30
<b>Figura 2.14</b> Esquema de calados en la rápida de descarga.....	32
<b>Figura 2.15</b> Valores de rugosidad k.....	33
<b>Figura 2.16</b> Concentración media de aire según el ángulo de inclinación del canal .....	34
<b>Figura 2.17</b> Relación de los coeficientes de fricción interna en función de la concentración .....	35
<b>Figura 2.18</b> Diagrama de Moody .....	36

<b>Figura 2.19</b> Esquema para la deducción del método del paso directo.....	37
<b>Figura 2.20</b> Índice de huecos .....	39
<b>Figura 2.21</b> Formación de vórtices en el canal de admisión .....	43
<b>Figura 2.22</b> Implementación del canal de sección trapezoidal en el laboratorio de la UPCT.....	44
<b>Figura 2.23</b> Vórtice de descarga .....	45
<b>Figura 2.24</b> Flujo helicoidal .....	45
<b>Figura 2.25</b> Elementos del vórtice de descarga.....	46
<b>Figura 2.26</b> Canal de aproximación del vórtice de descarga .....	46
<b>Figura 2.27</b> Cámara de entrada tipo espiral .....	47
<b>Figura 2.28</b> Onda estacionaria a lo largo de la pared (a) vista lateral (b) vista transversal .....	49
<b>Figura 2.29</b> Tubo de descargador a vórtice.....	50
<b>Figura 2.30</b> Cámara de disipación.....	52
<b>Figura 2.31</b> Principales objetivos de la cámara de disipación.....	52
<b>Figura 2.32</b> Corte lateral y transversal de la cámara de disipación.....	53
<b>Figura 2.33</b> Canal de entrega.....	54
<b>Figura 2.34</b> Tubería de ventilación .....	54
<b>Figura 2.35</b> Vista isométrica de la transición en un canal.....	55
<b>Figura 2.36</b> Vista en planta de una transición .....	55
<b>Figura 2.37</b> Clases de Presupuesto .....	57
<b>Figura 3.1</b> Perfil de aproximación de la rápida de descarga .....	63
<b>Figura 3.2</b> Esquema general .....	64
<b>Figura 3.3</b> Vista en planta y corte transversal para cada tipo de reja .....	66
<b>Figura 3.4</b> Detalle de las dimensiones adoptadas para el canal de recolección .....	67
<b>Figura 3.5</b> Esquema con dimensiones de transición .....	69
<b>Figura 3.6</b> Dimensionamiento de la cámara de entrada al vórtice de descarga.....	72
<b>Figura 3.7</b> Corte longitudinal y transversal de la cámara de disipación .....	73
<b>Figura 3.8</b> Dimensiones de la placa propuesta.....	74

## INDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.1</b>	Perfiles de flujo en canales prismáticos .....	6
<b>Tabla 1.2</b>	Clasificación del flujo por efecto de la gravedad .....	8
<b>Tabla 1.3</b>	Clasificación del flujo por efecto de la viscosidad.....	9
<b>Tabla 1.4</b>	Estados de flujo de Vedernikov.....	9
<b>Tabla 1.5</b>	Tipos de flujo sobre rejillas de fondo .....	14
<b>Tabla 1.6</b>	Longitudes mojadas y desbordamiento para los tipos de rejilla.....	18
<b>Tabla 2.1</b>	Dimensiones de los tanques elevados.....	27
<b>Tabla 2.2</b>	Caudal circulante por la rápida de descarga con fugas.....	30
<b>Tabla 2.3</b>	Caudales circulantes por la rápida de descarga .....	31
<b>Tabla 2.4</b>	Coefficiente de Manning .....	37
<b>Tabla 2.5</b>	Espaciamiento entre barras .....	40
<b>Tabla 2.6</b>	Ecuaciones del coeficiente de descarga según el tipo de flujo.....	42
<b>Tabla 2.7</b>	Esquema de análisis del presupuesto.....	58
<b>Tabla 3.1</b>	Cálculo del calado inicial del canal de entrada de la rápida .....	58
<b>Tabla 3.2</b>	Cálculo del calado crítico en la sección de control .....	59
<b>Tabla 3.3</b>	Cálculo del calado de la rápida de descarga.....	59
<b>Tabla 3.4</b>	Cálculo del calado con concentración de aire del 90% .....	60
<b>Tabla 3.5</b>	Datos iniciales para determinar el perfil de flujo .....	62
<b>Tabla 3.6</b>	Dimensiones geométricas de las barras .....	65
<b>Tabla 3.7</b>	Dimensiones adoptadas para el canal de recolección .....	68
<b>Tabla 3.8</b>	Longitud de Transición.....	69
<b>Tabla 3.9</b>	Datos del canal de aproximación al vórtice de descarga.....	70
<b>Tabla 3.10</b>	Tubo de caída vertical.....	70
<b>Tabla 3.11</b>	Dimensiones de la cámara de entrada.....	71
<b>Tabla 3.12</b>	Cámara de disipación .....	73
<b>Tabla 3.13</b>	Presupuesto referencial para la Alternativa 1 .....	74
<b>Tabla 3.14</b>	Presupuesto referencial para la Alternativa 2.....	77
<b>Tabla 3.15</b>	Porcentaje de costos de implementación para cada elemento de la Alternativa 1 .....	80
<b>Tabla 3.16</b>	Comparación de costos de las alternativas.....	81

## RESUMEN

El presente estudio se enfoca en diseñar un sistema de captación con reja de fondo y aproximación supercrítica, para ser implementado en la rápida de descarga existente del Laboratorio Docente de Hidráulica (LDH) de la Escuela Politécnica Nacional (EPN).

La propuesta consiste en dimensionar elementos de captación y derivación de caudal, considerando las características geométricas de la rápida, como su pendiente del 100% y longitud de 3.84 metros.

Las hipótesis establecidas para este trabajo fueron: considerar que el flujo es supercrítico antes y después de la intercepción; y que el caudal máximo que circula por la rápida será captado. Estos criterios fueron fundamentales para el diseño de los elementos del sistema de captación.

Los elementos principales del sistema de captación propuesto incluyen una reja de fondo, un canal recolector (galería) y un vórtice de descarga que actúa como disipador de energía.

Se han propuesto dos alternativas de implementación, cada una con el detalle del presupuesto tipo Clase IV y los planos en planta. Para el diseño de las alternativas, se utilizó la información base de estudios previos realizados en el LDH. Para verificar las dimensiones, se llevó a cabo un levantamiento planimétrico.

Finalmente se analiza la factibilidad técnica y económica de la implementación de este sistema de captación en el LDH.

**PALABRAS CLAVE:** reja de fondo, flujo supercrítico, tipos de barra, laboratorio docente, canal de fuerte pendiente.

## ABSTRACT

The present study focuses on the design of an intake system with bottom racks and supercritical approach, to be implemented in the existing steeped channel of the Hydraulics Teaching Laboratory (LDH) of the Escuela Politécnica Nacional (EPN).

The proposal consists of dimensioning intake and diversion elements, considering the geometric characteristics of the steeped channel, such as its 100% slope and length of 3.84 meters.

The hypotheses established for this project were the flow is supercritical before and after the interception, and the maximum flow that circulates through the steeped channel will be collected. These criteria were fundamental for the design of the elements of the intake system.

The main elements of the proposed intake system include a bottom rack, a collection channel (gallery) and a discharge vortex that acts as an energy dissipator.

Two implementation alternatives have been proposed, each with detailed Class IV budget and floor design drawings. For the design of these alternatives, the base information from previous studies carried out at the LDH was used. To verify the dimensions, a planimetric survey was carried out.

Finally, the technical and economic feasibility of implementing this collection system in the LDH is analyzed.

**KEYWORDS:** bottom grid, supercritical flow, bar types, teaching laboratory, steep slope channel.



# 1. DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO

Los sistemas de captación con reja de fondo, se ubican en ríos con pendientes pronunciadas como los ríos de montaña; considerando que poseen una alta capacidad de transporte de material y un lecho irregular.(Krochin, 1986) .La función principal que posee la captación con reja de fondo es la evitar la entrada de material flotante y sedimentos a la galería de captación (García, 2016).

En Ecuador es común el diseño de captaciones con reja de fondo debido a la topografía de la región andina, siendo una de las estructuras hidráulicas consideradas para derivar un caudal de agua destinado al riego de los cultivos o a la generación de energía eléctrica (Haro , 2019).

Las características principales de los ríos de montaña son: presentar pendientes altas, periodos de precipitación cortos, pero con alta intensidad; alta presencia de material flotante con pocos finos.(Bouvard, 1953; Krochin, 1986). Por esta razón se han realizado varias investigaciones de las captaciones con reja de fondo a fin de determinar un diseño óptimo, pero sólo han sido estudiadas bajo la premisa un flujo de aproximación subcrítico (Drobir et al., 1981).

En el año 2009, el Ing. K.C. Wong en su tesis doctoral, analiza la posibilidad de colocar estructuras de intercepción (rejas de fondo) con aproximación supercrítica. Para el desarrollo de su tesis Wong (2009) planteó un modelo físico basado en la problemática de inundaciones que atravesaba Hong Kong, pues se venían presentando eventos de precipitación extremadamente altos que, combinados con la topografía de pendientes pronunciadas de Hong Kong, estaban provocando varios problemas en la ciudad. Como resultado de su investigación determinó un diseño óptimo para un sistema de captación con reja de fondo con aproximación supercrítica.

Actualmente, en Laboratorio Docente de Hidráulica (LDH) de la Escuela Politécnica Nacional, se encuentra construido el modelo físico de la rápida de descarga del Batán. Las rápidas de descarga son canales de fuerte pendiente usadas para descargar caudales desde una cota mayor a una cota menor.(Plua , 2001).

La respuesta del agua a la presencia de diferentes estructuras suele ser difícil de predecir sin contar con experiencias previas o modelos de laboratorio, y mucho más si se trata de flujos rápidos o en régimen supercrítico. Por este motivo el presente trabajo busca aprovechar la estructura existente en el LDH con el propósito de diseñar un sistema de captación con reja de fondo que considere aproximación supercrítica que permita, en un

futuro, a los alumnos de la Carrera de Ingeniería Civil, contar con una herramienta didáctica en la que puedan analizar el comportamiento del flujo con estas características. Para cumplir con este objetivo se cuenta con la información del modelo físico realizado en Hong Kong, que se intentará replicar y adaptar al sistema existente en el LDH.

### **1.1 Objetivo general**

Diseñar un sistema de captación con reja de fondo para aproximación supercrítica que permita su adaptación a la geometría de la rápida de descarga existente en el Laboratorio Docente de Hidráulica de la Escuela Politécnica Nacional, con el fin de determinar la factibilidad técnica, constructiva, y económica para su implementación.

### **1.2 Objetivos específicos**

- Diseñar dos alternativas de implementación del sistema de captación de reja de fondo con aproximación supercrítica que se pueda adaptar a la geometría de la rápida de descarga.
- Dimensionar los componentes hidráulicos del sistema de captación de fondo propuestos como alternativas.
- Realizar los planos de las dos alternativas propuestas.
- Preparar el presupuesto para analizar la factibilidad técnica y económica de la implementación del sistema en el LDH.

### **1.3 Alcance**

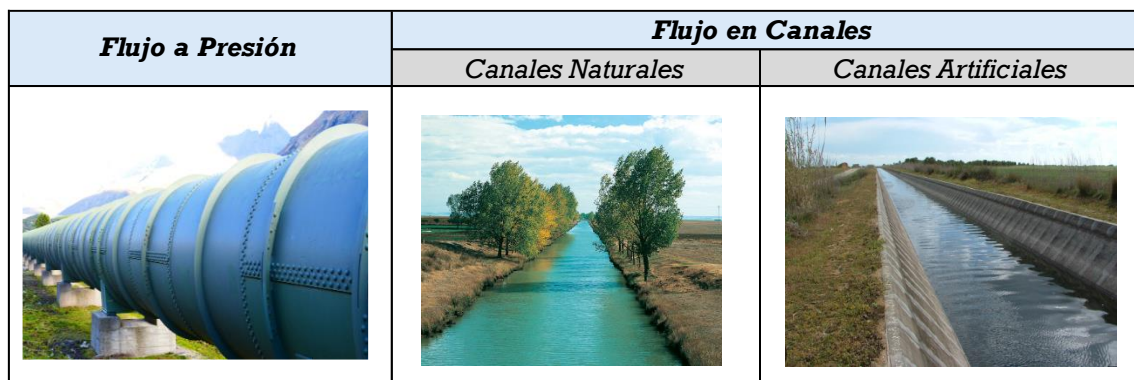
Actualmente la rápida de descarga del LDH mantiene la configuración planteada para el proyecto de la rápida del Batán y con este estudio se plantea diseñar una reja de fondo que pueda ser desmontable, con el fin de aprovechar con fines de docencia, el modelo físico original de la rápida. Se determinará el dimensionamiento geométrico de la reja de fondo conforme a los criterios de diseño establecidos para una aproximación de flujo supercrítico. Una vez definida esta estructura de intercepción del flujo, se procederá a definir las dimensiones de las estructuras complementarias. Como parte del trabajo, se presentarán dos alternativas de estructuras que formarán parte del sistema de captación y se realizarán los planos con el resultado del diseño. Finalmente se efectuará el presupuesto referencial que considere la construcción del modelo; además el análisis sobre la factibilidad de implementación en el LDH.

## 1.4 Marco Teórico

### 1.4.1 Flujo a superficie libre

Este flujo se da en canales abiertos, se diferencia principalmente del flujo a presión porque está en contacto con el ambiente; es decir, a presión atmosférica. Los flujos a superficie libre están regulados principalmente por dos fuerzas, la fuerza de gravedad y tensión superficial. (Chow, 1994)

Existen dos tipos de canales a superficie libre: los canales naturales que presentan una forma irregular y los canales artificiales, que son hechos por el hombre y son de tipo prismático (Chow, 1994). En la Figura 1.1 se evidencia el flujo a presión y el flujo en canales.



**Figura 1.1** Flujo a presión y en canales

**Fuente:**

<https://pixabay.com/es/images/search/tuber%C3%ADa%20de%20agua%20a%20presi%C3%B3n/>

<https://walter24na.blogspot.com/2013/02/canales-naturales.html>

<https://arcux.net/blog/que-es-la-hidraulica-de-canales/>

**Elaborado por:** Jhosselin Chanaluisa

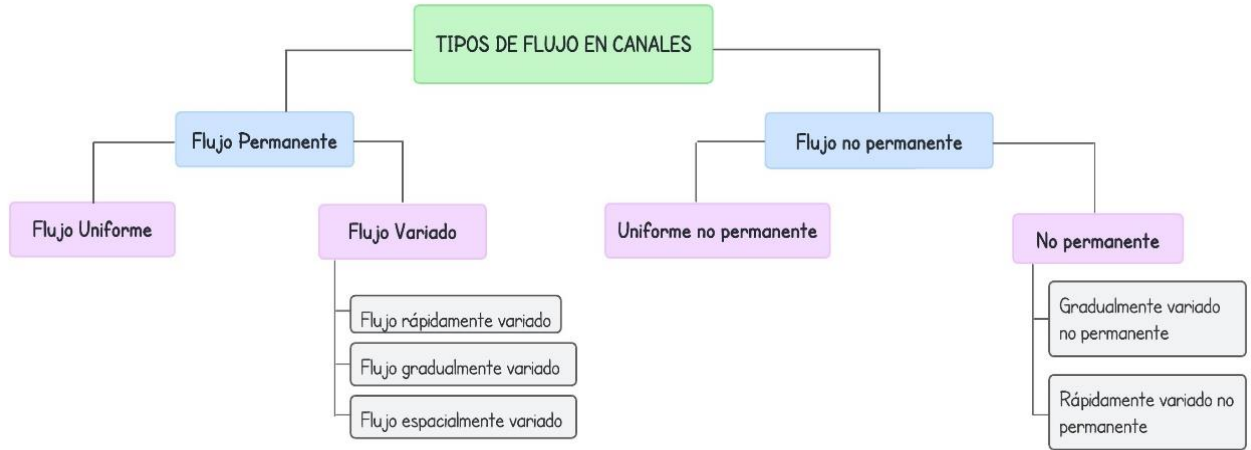
### 1.4.2 Tipos de flujo en canales abiertos

Su clasificación se da por la variación en la profundidad del flujo respecto al tiempo y espacio.

El criterio del tiempo clasifica a los flujos en permanente y no permanente, en el flujo permanente el calado es constante a lo largo del tiempo, por otro lado, en el flujo no permanente la variación del calado es considerable en función del tiempo.

El criterio del espacio clasifica a los flujos en uniforme y variado, en el flujo uniforme el calado es igual en cualquier sección del canal, mientras que en el flujo variado el calado

varía a lo largo del canal (Chow, 1994). En la Figura 1.2 se presenta la clasificación detallada del flujo en canales.



**Figura 1.2** Tipos de flujo en canales

**Fuente:** Sotelo (2002)

**Elaborado por:** Jhosselin Chanaluisa

### 1.4.3 Flujo uniforme

#### 1.4.3.1 Definición

Un flujo es considerado uniforme si cumple con las siguientes características:

- La profundidad, el área de la sección transversal, la velocidad, caudal con constantes a lo largo del canal.
- Las pendientes de la línea de energía, de la superficie del agua y del fondo del canal son iguales ( $S_f = S_w = S_o$ ).

#### 1.4.3.2 Ecuación de Manning

Esta expresión fue propuesta por el ingeniero irlandés Robert Manning y es usada para un flujo uniforme en canales abiertos. (Subramanya, 2009)

$$V = \frac{1}{n} R h^{2/3} S_o^{1/2}$$

**Ecuación 1.1** Ecuación de Manning

Donde:

$V$ : velocidad media

$n$ : coeficiente de Manning

$Rh$ : radio hidráulico

$S_0$ : pendiente del canal

#### 1.4.4 Flujo Gradualmente Variado

##### 1.4.4.1 Definición

Un flujo es gradualmente variado cuando el caudal que transita en el canal prismático es constante, además los tirantes del flujo cambian de manera repentina en pequeños tramos, se puede mencionar como ejemplos las curvas de remanso y la onda creciente (Chow,1994). Por otro lado, también se tiene una variación de velocidades, por consecuencia se tiene una variación de las pendientes, tales como la pendiente del lecho, pendiente de energía, y la pendiente de la superficie del agua. (Subramanya,2009)

$$H = z + d\cos\theta + \alpha \frac{V^2}{2g}$$

##### Ecuación 1.2 Ecuación dinámica del Flujo gradualmente variado

Donde

$H$ : altura total de energía

$z$ : distancia vertical del fondo del canal por encima del nivel de referencia

$d$ : profundidad de la sección de flujo

$\theta$ : ángulo de la pendiente del fondo

$\alpha$ : coeficiente de energía

$V$ : velocidad media del flujo a través de la sección

##### 1.4.4.2 Métodos de cálculo

Los perfiles de flujo se estiman a partir de la solución de la ecuación dinámica del flujo gradualmente variado, en la que se determina la forma del perfil de flujo.(Chow, 1994) Los métodos comúnmente usados son los siguientes:

- Método de integración gráfica
- Método de integración directa
- Método del paso directo
- Método del paso estándar

#### 1.4.4.3 Tipos de Curvas de Remanso

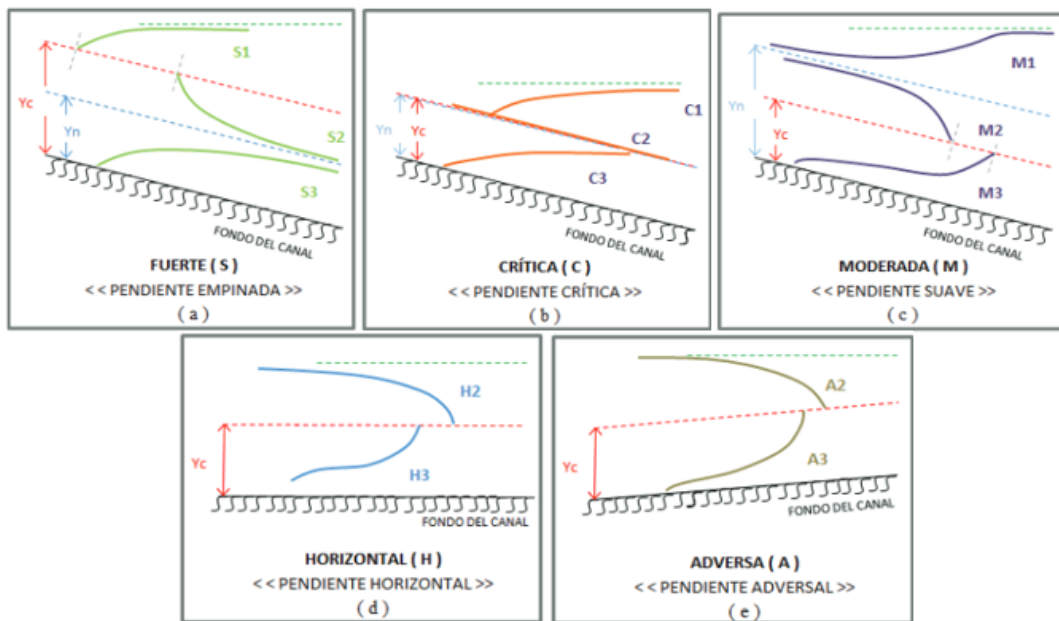
Los diferentes tipos de curvas de remanso se pueden observar en la Tabla 1.1 y en la Figura 1.3

**Tabla 1.1** Perfiles de flujo en canales prismáticos

$l_o$	$l_o, l_c$	$Y, Y_n, Y_c$	Tipo de curva		Zona	Fujo	Gráfica
$l_o > 0$	$l_o > l_c$	$Y > Y_c > Y_n$	(+)	Creciente	S1	Subcrítico	(a)
	$Y_n < Y_c$	$Y_c < Y < Y_n$	(-)	Decreciente	S2	Supercrítico	
	Fuerte	$Y_c > Y_n > Y$	(+)	Creciente	S3	Supercrítico	
	<b>S</b>						
	$l_o = l_c$	$Y > Y_c = Y_n$	(+)	Creciente	C1	Subcrítico	(b)
	$Y_n = Y_c$						
	CRÍTICA	$Y_c = Y_n = Y$	(+)	Creciente	C3	Subcrítico	
	<b>C</b>						
	$l_o < l_c$	$Y > Y_n > Y_c$	(+)	Creciente	M1	Subcrítico	(c)
	$Y_n > Y_c$	$Y_n > Y > Y_c$	(-)	Decreciente	M2	Subcrítico	
MODERADA	$Y_n > Y_c > Y$	(+)	Creciente	M3	Supercrítico		
<b>M</b>							
$l_o = 0$	HORIZONTAL	$Y > Y_c$	(-)	Decreciente	H2	Subcrítico	(d)
	<b>H</b>	$Y < Y_c$	(+)	Creciente	H3	Supercrítico	
$l_o < 0$	ADVERSA	$Y > Y_c$	(-)	Decreciente	A2	Subcrítico	(d)
	<b>A</b>	$Y < Y_c$	(+)	Creciente	A3	Supercrítico	

Fuente: Chow (1994)

Elaborado por: Berrones & Quilligana (2017)



**Figura 1.3** Perfiles de flujo para FGV

**Fuente:** Chow (1994)

**Elaborado por:** Berrones & Quilligana (2017)

### 1.4.5 Números adimensionales que determinan los estados de flujo en canales

Para caracterizar los estados de flujos en los canales se deben determinar los números adimensionales de Froude, Reynolds y Vedernikov. (Berrones y Quilligana, 2017)

#### 1.4.5.1 Efecto de la gravedad (Froude)

Este efecto permite determinar el tipo de régimen de flujo, además con la Ecuación 1.3 se determina el número de Froude y en la Tabla 1.2 se muestra la clasificación de los regímenes de flujo en función del número de Froude.

$$F_r = \frac{V}{\sqrt{gD}}$$

**Ecuación 1.3** Número de Froude

Donde:

$F_r$ : número de Froude

$D$ : profundidad hidráulica

$g$ : aceleración de la gravedad

**Tabla 1.2** Clasificación del flujo por efecto de la gravedad

<b>Tipo de régimen de flujo</b>	<b>Froude</b>	<b>Definición</b>
Régimen subcrítico	<1	Velocidades bajas Predomina la energía potencial.
Régimen crítico	1	Punto intermedio entre el flujo subcrítico y supercrítico.
Régimen supercrítico	>1	Velocidades altas Predomina la energía cinética.

**Fuente:** Sotelo (2002)

**Elaborado por:** Jhosselin Chanaluisa

#### **1.4.5.2 Efecto de la viscosidad (Reynolds)**

La relación de la viscosidad y la inercia es representada mediante el Número de Reynolds, este número adimensional determina si el flujo es laminar, en transición o turbulento. La Ecuación 1.4 determina este valor. En la Tabla 1.3 se muestra la categorización de los tipos de flujo en función del número de Reynolds.

$$Re = \frac{VL\rho}{\mu} = \frac{VL}{\nu}$$

#### **Ecuación 1.4** Número de Reynolds

Donde:

$V$ : velocidad

$L$ : longitud, para tuberías representa el diámetro

$\rho$ : densidad

$\mu$ : viscosidad del fluido

$\nu$ : viscosidad cinemática



**Tabla 1.3** Clasificación del flujo por efecto de la viscosidad

<b>Tipo de Flujo</b>	<b>Reynolds</b>	<b>Definición</b>
Laminar	<2000	Si las fuerzas viscosas son fuertes en relación a las inerciales
En Transición	2000<Re<4000	Ocurre un comportamiento intermedio indefinido
Turbulento	Re>4000	Si las fuerzas viscosas son débiles en relación a las inerciales

**Fuente:** Sotelo (2002)

**Elaborado por:** Jhosselin Chanaluisa

#### 1.4.5.3 Inestabilidad del Flujo Uniforme (Número de Vedernikov)

La inestabilidad del flujo se produce por dos escenarios, cuando se dan velocidades muy altas o cuando la pendiente del canal es muy pronunciada. Cornish (1910) evidenció la formación de ondas por remolino en los canales superficiales de los Alpes. Este fenómeno atribuye a un tipo de flujo no permanente. Por tanto, se hicieron varias investigaciones para desarrollar un criterio de inestabilidad es así que según Chow(1983) y Ponce(1979) para determinar el número de Vedernikov se usa la Ecuación 1.5

$$V = \frac{V_k}{V_d}$$

**Ecuación 1.5** Número de Vedernikov

Donde:

$V_k$ : Velocidad relativa de onda cinemática

$V_d$ : Velocidad relativa de onda dinámica

Y según este número el flujo se clasifica en tres estados como se muestra en la Tabla 1.4

**Tabla 1.4** Estados de flujo de Vedernikov

<b>Estado de flujo</b>	<b>Número de Vedernikov</b>
Estable	<1
Neutralmente estable	1
Inestable	>1

**Fuente:** Chow (1994)

**Elaborado por:** Jhosselin Chanaluisa

### 1.4.6 Generalidades de los canales con régimen supercrítico

Los canales con régimen supercrítico son un ejemplo de flujo no uniforme inestable, debido a que el número de Froude es mayor a uno; se producen las ondas de Froude (Naudascher, 2017).

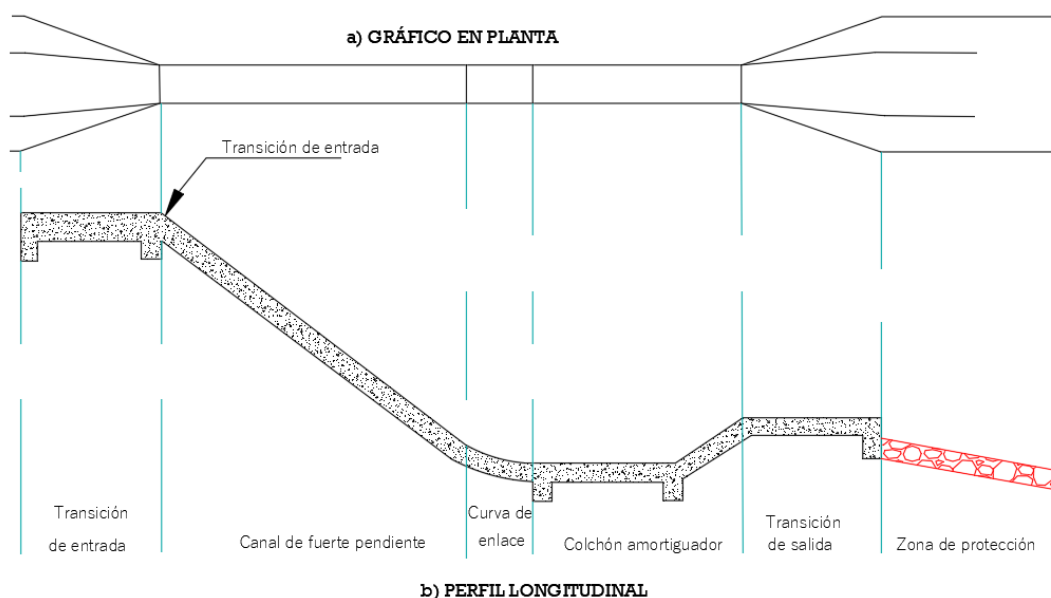
Los canales de fuerte pendiente denominados rápidas de descarga son ejemplos prácticos de canales con régimen supercrítico, debido a que presentan velocidades altas generando inestabilidad en el flujo. (Berrones y Quilligana, 2017). Este tipo de estructuras tienen como función principal descargar caudales desde una cota mayor a una menor debido al desnivel topográfico. (Plua, 2001)

#### 1.4.6.1 Componentes de la Rápida de Descarga

Una rápida de descarga está compuesta por varios componentes que contribuyen a conducir el flujo desde la transición de entrada hasta la transición de salida Figura 1.4.

**Transición de entrada:** Provee el ingreso del flujo hacia el tramo inclinado, es importante que este componente otorgue un control del flujo, pues se debe evitar la aceleración del flujo a fin de prevenir socavación aguas abajo.

**Sección de control:** En este componente se produce el cambio de régimen subcrítico a un régimen supercrítico porque es el inicio de la inclinación de la rápida.



**Figura 1.4** Componentes de la rápida de descarga

**Fuente:** Monge (2017)

**Elaborado por:** Jhosselin Chanaluisa

**Canal con fuerte pendiente:** Es la sección inclinada encargada de conectar el flujo desde la entrada con la estructura de disipación, esta sección puede ser aprovechada para disipar energía usando la rugosidad al fondo del canal.

**Curva de enlace:** Es importante colocar este elemento en la rápida de descarga pues genera que el flujo se adhiera al fondo del canal impidiendo así el ingreso de aire al sistema.

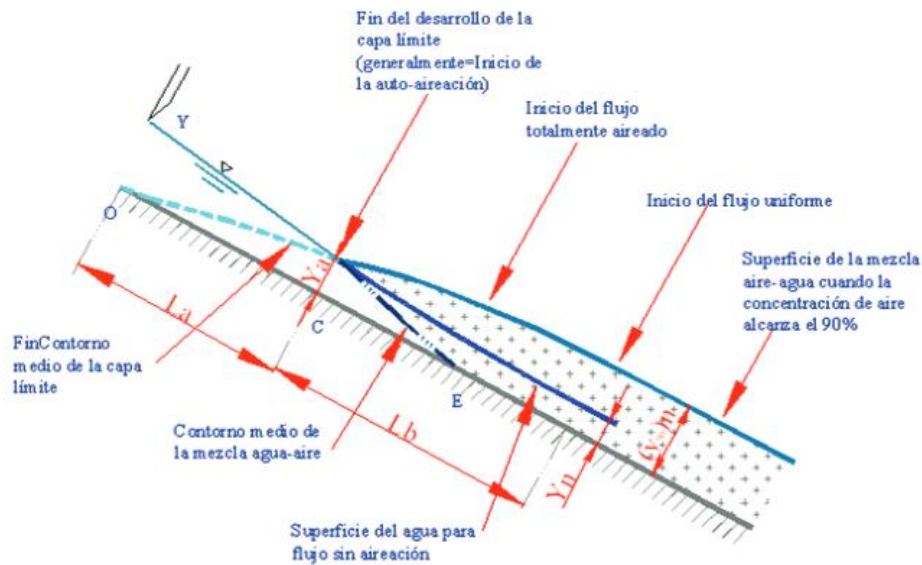
**Disipador de energía:** La función principal de este componente es liberar la energía acumulada del flujo luego de atravesar por el tramo inclinado, los disipadores de energía más comunes son los colchones de agua los cuales reducen resalto hidráulico.

**Transición de salida:** Conecta el disipador de energía con en la zona de protección, en este componente se espera obtener un flujo estable con velocidades bajas evitando así posibles daños aguas abajo.

**Zona de protección:** Se ubica después de la transición de salida este componente contribuye a evitar socavaciones y erosiones al final de la rápida, generalmente se colocan enrocados o estructuras con mampostería generando fricción hasta obtener un flujo subcrítico.

#### **1.4.6.2 Mezcla de agua-aire**

Las condiciones inherentes de la rápida de descarga tales como la pendiente inclinada, la rugosidad del canal, volumen de descarga, entre otras, hacen que el ingreso de aire al sistema no se pueda controlar, produciéndose un flujo bifásico (mezcla agua-aire); a este flujo se lo conoce como flujo autoaireado. La mezcla de agua-aire incrementa proporcionalmente en función de la velocidad y turbulencia del sistema. El análisis y cálculo de canales de fuerte pendiente deben realizarse considerando la capa límite y la autoaireación, debido a que el flujo no es uniforme. En la Figura 1.5 se evidencia las longitudes y calados de la capa límite, así como la longitud donde se produce la aireación. Además, se puede apreciar que el calado con concentración al 90% es mayor al calado normal.



**Figura 1.5** Flujo en la rápida de descarga

**Fuente:** Naudascher (2017)

#### 1.4.7 Sistema de captación de fondo

Este sistema de captación posee una reja situada al fondo del canal, generalmente estas captaciones han sido ubicadas en ríos con pendientes altas como son los ríos de montaña considerando que los mismos poseen un alto transporte de material y un lecho irregular. (Bouvard, 1953)

Dentro de la Ingeniería Hidráulica las rejas tienen una aplicación considerable en estructuras de admisión como bocatomas tirolesas o caucasianas, también funcionan como sumideros en las estructuras de drenaje urbano (Carrillo et al., 2018).

El diseño de una reja de fondo está orientado a cumplir con dos funciones principales; la de captar mayor cantidad de caudal y la de evitar el ingreso de sedimentos. Por tanto para garantizar la eficiencia del diseño se deben considerar varios aspectos como: la inclinación pues debe asegurar la autolimpieza, el material de la reja, el espaciamiento entre barras, la longitud, el tipo de barras, incluso las condiciones de aproximación del flujo de entrada y salida. (Carrión, 2022)

Además, se deben considerar factores externos a la captación que pueden modificar la eficiencia del sistema entre ellos se encuentran las condiciones ambientales, geomorfológicas, económicas, estructurales, hidráulicas. Mantener un adecuado control de las variables antes mencionadas puede asegurar el correcto funcionamiento de la

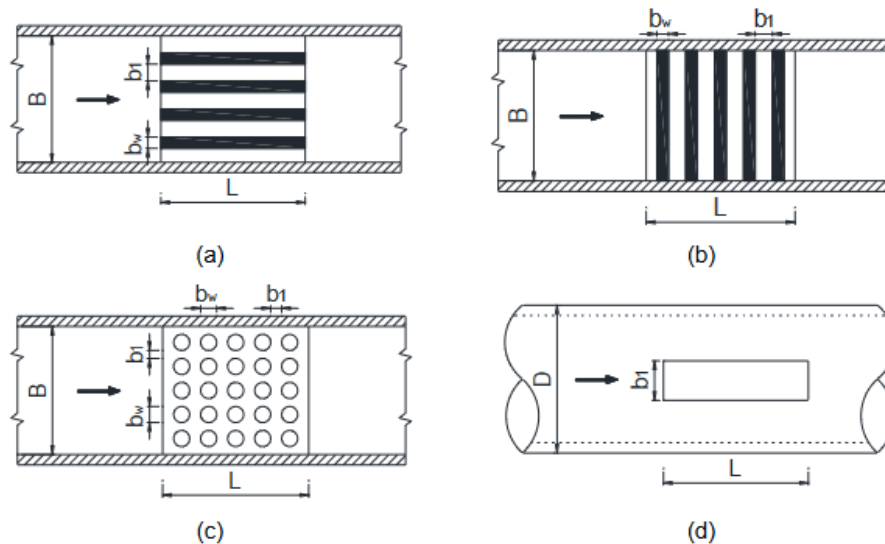
estructura y minimizar los costos de mantenimiento, con el fin de cumplir con la vida útil del proyecto (Carrillo et al., 2018).

#### 1.4.7.1 Clasificación de las rejas de fondo

Según Subramanya (2009), las rejas de fondo generalmente se suelen clasificar en cuatro tipos:

- De barras longitudinales, se ubican paralelas al flujo, son las más utilizadas.
- De barras transversales, se colocan transversalmente al flujo.
- Barras perforadas, tienen aberturas uniformemente espaciadas.
- Ranuras inferiores, sin reja

En la Figura 1.6 se presentan los tipos de reja.

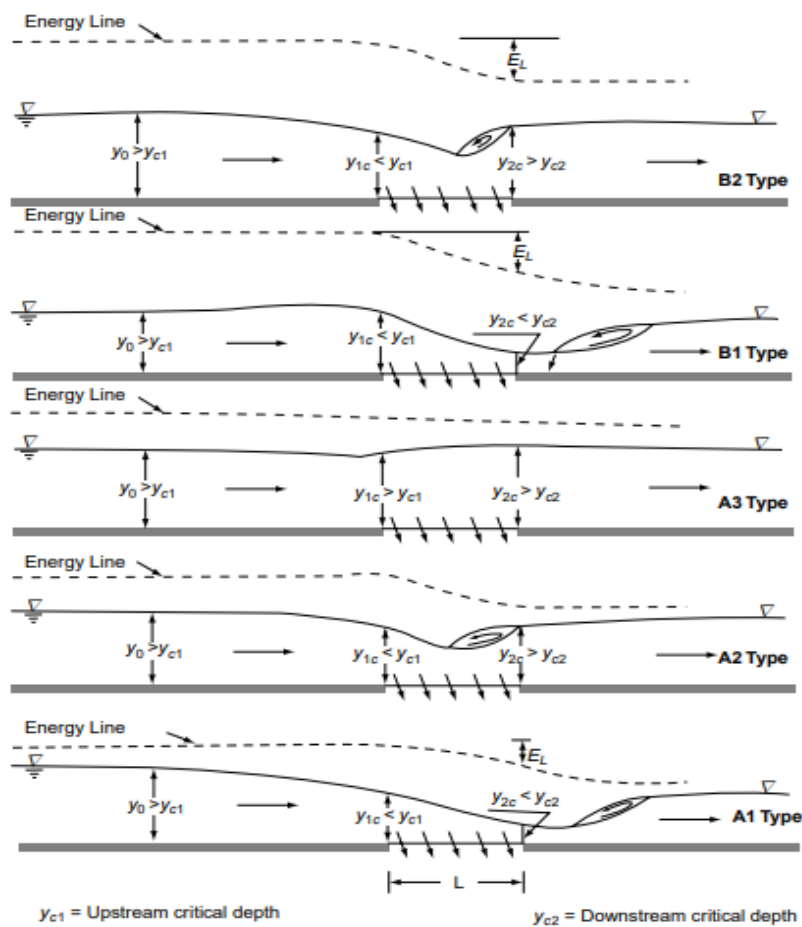


**Figura 1.6** (a) barras longitudinales (b) barras transversales  
(c) barras perforadas (b) barras perforadas

**Fuente:** Subramanya (2009)

#### 1.4.7.2 Tipos de Perfiles sobre la reja de fondo

Subramanya (2009) clasifica a los perfiles de flujo sobre la reja de acuerdo a la naturaleza del flujo de aproximación. En Figura 1.7 se evidencia los diferentes perfiles flujo sobre las rejas de fondo.



**Figura 1.7** Perfiles de flujo

**Fuente:** Subramanya (2009)

Además, se presenta la Tabla 1.5 que resumen este tipo aproximación a la rejilla

**Tabla 1.5** Tipos de flujo sobre rejillas de fondo

Tipo	Aproximación	Flujo sobre la rejilla	Flujo aguas abajo
A1	Subcrítico	Supercrítico	Puede presentarse un resalto hidráulico
A2	Subcrítico	Parcialmente supercrítico	Subcrítico
A3	Subcrítico	Subcrítico	Subcrítico
B1	Supercrítico	Supercrítico	Puede presentarse un resalto hidráulico
B2	Supercrítico	Parcialmente supercrítico	Subcrítico

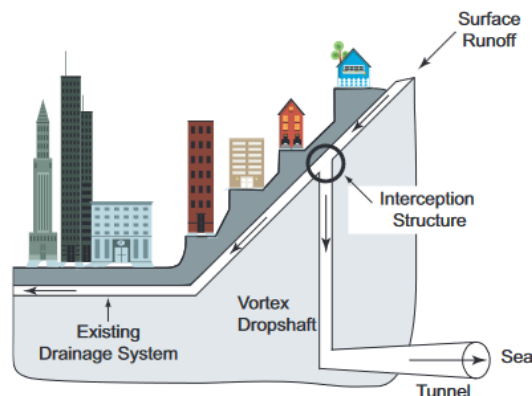
**Fuente:** Subramanya (2009)

**Elaborado por:** Jhosselin Chanaluisa

## 1.4.8 Sistema de Captación de Fondo para régimen supercrítico adoptado por Wong

### 1.4.8.1 Descripción del modelo

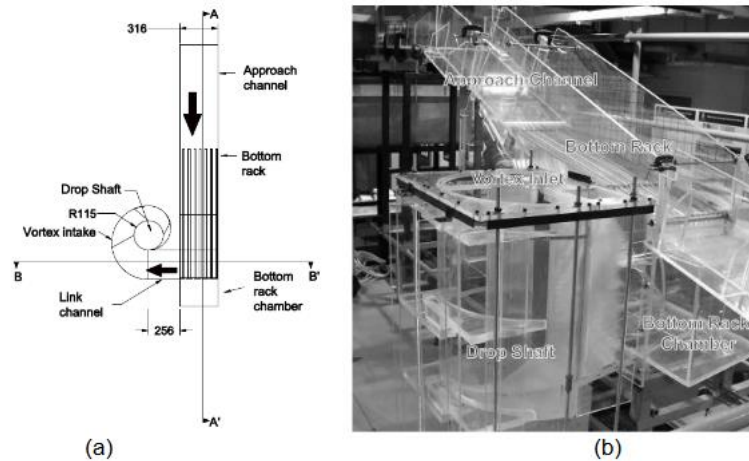
El estudio realizado por Wong (2009), muestra el diseño de una captación con reja de fondo para aproximación supercrítica, usando la modelación física y numérica con ayuda del programa Flow3D, el objetivo principal de su investigación fue plantear una guía de diseño de este tipo de estructuras. Wong realizó un modelo físico para su estudio, el cual representaba un Túnel de Drenaje urbano de Hong Kong que fue planteado para derivar el caudal captado provocado por las altas precipitaciones en la isla y desembocar directamente al mar con el fin de no provocar inundaciones aguas abajo. En la Figura 1.8 se puede apreciar el sistema que deseaba representar Wong.



**Figura 1.8** Esquema del túnel de drenaje occidental de Hong Kong

**Fuente:** Wong (2009)

El modelo físico fue desarrollado en el laboratorio a partir de un prototipo, diseñado a escala de Froude (1:9.5), el cual consta de un canal de aproximación con una inclinación de  $21.8^\circ$  (1:2,5), un ancho de 316 mm, una reja de fondo (estructura de interceptación de flujo) con una pendiente de  $11,3^\circ$  (1:5), una galería inferior que genera el cambio de orientación del flujo a noventa grados, un canal de conexión y un descargador a vórtice. El cambio en la dirección del flujo es necesario debido a consideración propias de la topografía de la ciudad en estudio y la entrada del vórtice facilita la disipación de energía y el desarrollo de un núcleo de aire central dentro del eje de caída. El flujo interceptado permanece supercrítico en toda la estructura. (Wong, 2009). En la Figura 1.9 se evidencia el esquema físico desarrollado por Wong en el laboratorio.

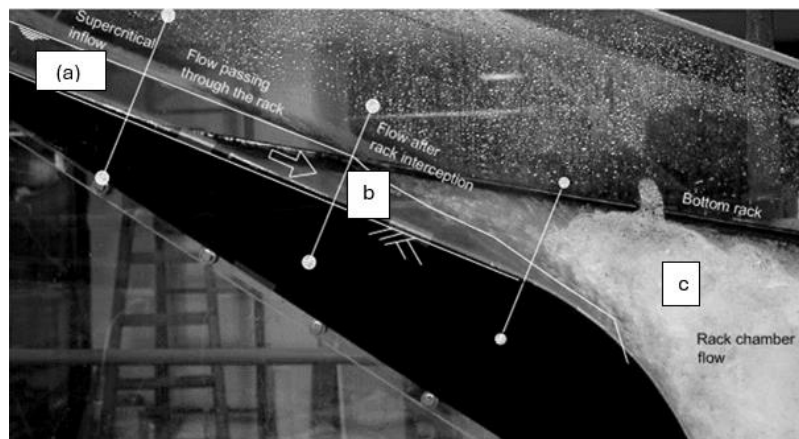


**Figura 1.9** Esquema físico del modelo (b) Modelo construido en el laboratorio

**Fuente:** Wong (2009)

#### 1.4.8.2 Comportamiento hidráulico del flujo

Wong hace énfasis en que el flujo posee varias características hidráulicas a lo largo del modelo, por lo tanto, realiza experimentaciones en tres zonas de medición a) flujo sobre la reja, b) flujo cuando atraviesa la reja y c) flujo en la galería de captación. Con el fin de conocer el comportamiento del flujo se utilizó tres caudales, a los cuales denominó flujo bajo, flujo de transición y flujo alto, de 21.6 l/s, 35.9 l/s y de 41.3 a 64.7 l/s respectivamente.



**Figura 1.10** Comportamiento hidráulico del modelo

**Fuente:** Wong (2009)

**Zona de medición (a):** Se conoce que el flujo de aproximación es supercrítico, el perfil de flujo se puede estimar mediante la teoría del flujo gradualmente variado, Wong usó el método del paso directo.

**Zona de medición (b):** Wong afirma que en esta zona se puede usar el enfoque unidimensional del flujo gradualmente variado a pesar de que el flujo sea tridimensional



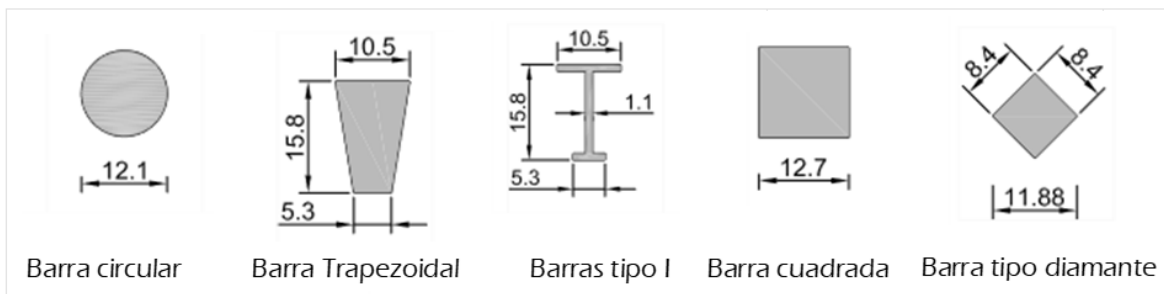
con el fin de estimar el perfil de flujo cuando el agua se intercepta con la reja. Además, menciona que en estudios anteriores se ha considerado la teoría del flujo espacialmente variado, pero él plantea que en esta zona no sólo se experimenta pérdida por fricción del fondo sino también por expansión y contracción (pérdidas por remolino).

**Zona de medición (c):** En esta zona Wong (2009) realizó mediciones de tres parámetros tales como la profundidad del flujo, la velocidad y la concentración de aire. El estudio planteado por Wong se diferencia de estudios anteriores en este aspecto debido a que no se ha estudiado al flujo como tridimensional turbulento aireado dentro de la galería de captación.

### 1.4.8.3 Criterios estudiados en la experimentación

#### 1.4.8.3.1 Tipo de Barra

Los principales criterios que Wong consideró para el planteamiento de los tipos de barra se basan en el caudal captado, la longitud mojada y la concentración de aire, bajo estos parámetros, Wong usó cinco tipos de barras para la experimentación: circulares, trapezoidales, cuadradas, tipo I y tipo diamante. En la Figura 1.11 se muestran las diferentes dimensiones que se utilizaron en su estudio.



**Figura 1.11** Tipos de reja usadas en el modelo físico de Wong

**Fuente:** Wong (2009)

**Elaborado por:** Jhosselin Chanaluca

Producto de la investigación se determinó que el tipo de reja óptimo para este tipo de aproximación de flujo son las barras circulares debido a que se obtiene menor entrada de aire. Las características de esta barra son las siguientes: diámetro de 12.1 mm, espaciamiento de 8 mm y un índice de huecos de  $m=0.39$ .

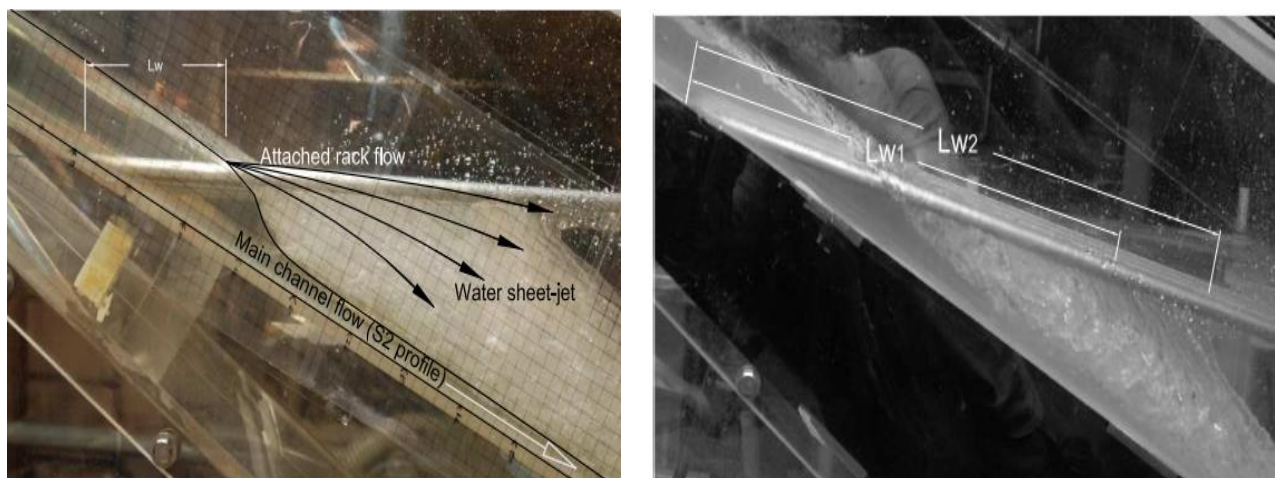
Como sustento a esta afirmación se realizó experimentos con el fin de tomar medidas a las variables que se consideraron de mayor influencia en el diseño óptimo. Estos criterios son: la longitud de reja mojada y concentración de aire en la galería se destaca que la

concentración de aire es el criterio fundamental en el diseño con aproximación supercrítica porque el flujo permanece con esta aproximación luego de atravesar la reja.

#### 1.4.8.3.2 Longitud de reja mojada

En la experimentación se realizaron mediciones de las longitudes características  $L_w$ ,  $L_{w1}$ ,  $L_{w2}$  para todos los tipos de reja. En la Figura 1.12 se aprecia estas longitudes.

- $L_w$ : esta longitud representa el tramo de intercepción del flujo
- $L_{w1}$ : esta dimensión representa la distancia en que la reja no está mojada
- $L_{w2}$ : representa la distancia en la cual el flujo pierde el contacto con la reja



a) Longitud  $L_w$

b) Longitud  $L_{w1}$ - $L_{w2}$

**Figura 1.12** Longitudes características para caracterizar el flujo a través de la reja

**Fuente:** Wong (2009)

En la Tabla 1.6 se presentan los datos experimentales de las longitudes características para todos los tipos de reja que usó Wong (2009). Además, se evidencia que la reja con menor longitud mojada es de tipo circular incluso en los caudales de 21.6 L/s y 43,1L/s no presenta desbordamiento con respecto a los demás tipos de reja.

**Tabla 1.6** Longitudes mojadas y desbordamiento para los tipos de reja

Caudal (L/s)	Longitudes	Reja Circular	Reja Diamante	Tipo I	Reja Trapezoidal
21,6	$L_w$ (mm)	112	125	180	160
	$L_{w1}$ (mm)	240	350	-	-
	$L_{w2}$ (mm)	-	545	660	520
	Desbordamiento (L/s)	-	-	586	460,9

43,1	Lw (mm)	212	225	280	230
	Lw1 (mm)	450	365	-	-
	Lw2 (mm)	510	560	780	660
	Desbordamiento (L/s)	-	39,4	573,7	464,1
64,7	Lw (mm)	275	325	330	310
	Lw1 (mm)	580	510	-	-
	Lw2 (mm)	670	690	810	740
	Desbordamiento (L/s)	187,5	148,5	917,5	712,5

Fuente: Wong (2009)

Elaborado por: Jhosselin Chanaluisa

#### 1.4.8.3.3 Concentracion de aire en la galería

Este parámetro que Wong destaca en su estudio es relevante debido a que en estudios anteriores esta variable no ha sido considerada pues se analizaba un flujo con aproximación subcrítica. Wong (2009) sostiene que para proponer un tipo de reja óptima para condiciones supercríticas es crucial tener en cuenta que el flujo provocará un impacto al atravesar la reja lo cual ocasiona el arrastre de aire que puede producir altas perturbaciones en el flujo que se conduce al vórtice de descarga. Para poder medir esta variable Wong (2009) usó una sonda óptica y sonda de conductividad que mide la concentración de aire arrastrado.

En la Figura 1.13 se presenta la medición de la concentración de aire usando una sonda de conductividad para un tipo de reja circular con un  $Q=43.13$  L/s. Por otro lado, en la Figura 1.14 (a) se muestra la medición de la concentración de aire con la sonda óptica en donde se verifica que los dos métodos se correlacionan por tanto muestran resultados adecuados, además en la Figura 1.14 (b) se presenta la medición de la velocidad del flujo. Por consiguiente, determina que el tipo de reja que no induce alta concentración de aire al flujo es la reja tipo circular.

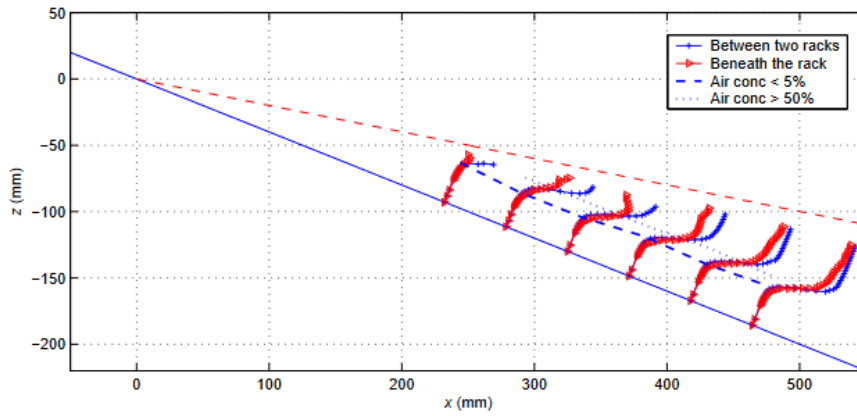
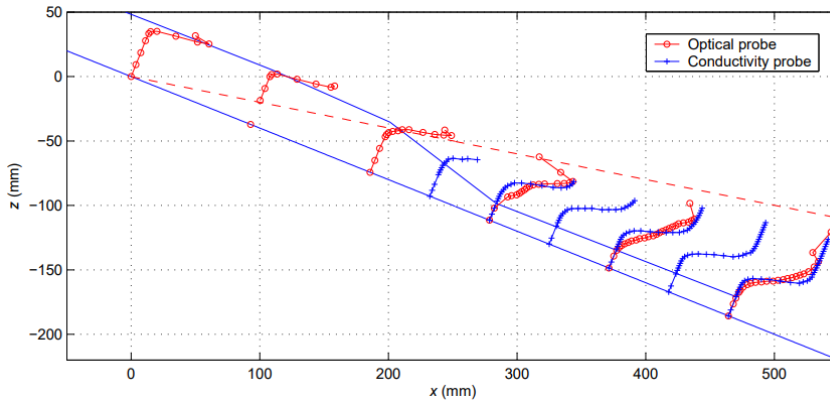
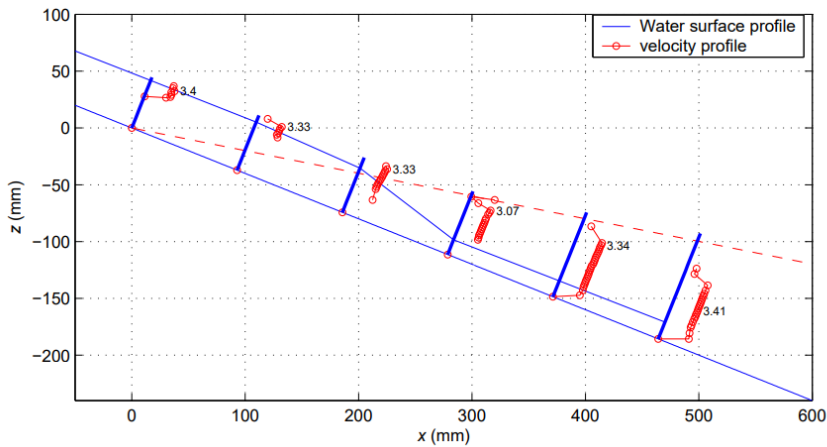


Figura 1.13 Medición con sonda de conductividad para reja tipo circular

Fuente: Wong (2009)



a) Perfil de concentración de aire con sonda óptica vs sonda de conductividad



b) Medición de velocidad con sonda óptica

Figura 1.14 Medición con sonda óptica para reja tipo circular

Fuente: Wong (2009)

## 2. METODOLOGÍA

En este apartado se explica el procedimiento que se siguió para el diseño del sistema de captación con reja de fondo. Se analizaron dos alternativas de diseño del sistema, por lo tanto, se hará un resumen del proceso de dimensionamiento de los componentes que forman parte de las dos alternativas.

Como fase inicial se realizaron visitas al LDH con el fin de evaluar el funcionamiento del modelo físico, así como verificar los componentes principales de la rápida de descarga. Además, se verificó el funcionamiento del sistema de bombeo que suministra el caudal al modelo. Se realizaron verificaciones de las medidas del modelo que generaron incertidumbres sobre la información disponible (planos en planta del LDH) por lo que fue necesario efectuar un levantamiento topográfico que permita adaptar de forma adecuada el sistema de captación de reja de fondo con aproximación supercrítica a la superficie disponible dentro del laboratorio.

Adicionalmente, se presentan los criterios de diseño que han sido usados en varias investigaciones para el dimensionamiento de cada elemento, para finalmente determinar la alternativa que resulte más adecuada.

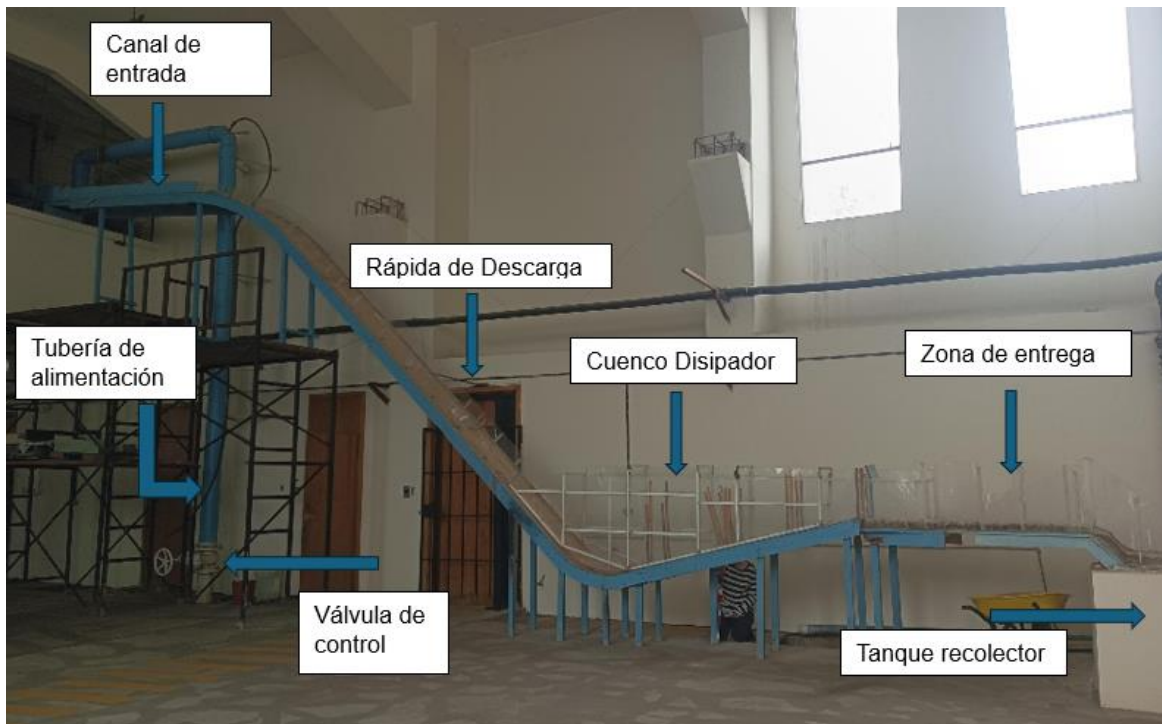
### 2.1 Levantamiento de información: Descripción del modelo físico de la Rápida del Batán

El modelo actual representa la estructura de Derivación y Desvío de la Quebrada del Batán, el cual fue construido a una escala (1:25) por la EPN, en convenio con la EMMAPQ (Empresa Pública de Agua y Saneamiento), en el 2000 (Berrones et al., 2017).

La rápida comprende los siguientes componentes que se pueden observar en la Figura 2.1.

- **Tubería de alimentación:** Esta tubería es la encargada de proveer el caudal al sistema, tiene un diámetro de 200 mm colocada a 6m desde el piso, además está conectada a una válvula de control. Esta tubería se conecta con el canal de entrada.
- **Canal de entrada:** Canal rectangular de 0.40 m de ancho, 0.23 m de altura de pared y una longitud de 7.85 m, el material usado en su diseño es de madera trípex tanto para las paredes, así como para el fondo del canal.
- **Compuerta plana vertical:** sirve como sección de control
- **Rápida de descarga:** Posee una pendiente del 100%, una longitud de 3.84 m con un canal de 0.4m de ancho y 0.15 m de altura de pared.

- **Cuenco disipador:** Tiene una forma de trampolín liso y desarrollo en contrapendiente (pendiente de -25%), sus principales materiales son el acrílico para las paredes y estructuras metálicas como soporte.
- **Zona de entrega o salida:** Está sección posee una longitud de 2 m y está constituida por acrílico en sus paredes; y el fondo de 2 capas de grava pequeña.
- **Tanque:** Está realizado a base de ladrillo y mortero es el elemento colocado al pie de la rápida, dentro del tanque se encuentra una estructura de impacto (rejilla estabilizadora)
- **Vertedero Triangular:** Este elemento se encuentra al final de todo el sistema como un elemento de aforo de caudal.



**Figura 2.1** Rápida de descarga del Batán

**Elaborado por:** Jhosselin Chanaluisa

### 2.1.1 Problemática del modelo

Se realizaron algunas visitas al LDH donde se pudo observar el funcionamiento de la estructura en su estado actual. En estas experiencias se evidenció que la estructura presenta fugas de caudal en dos partes específicas como son en el cuenco disipador y en el tanque de recolección como se puede observar en la Figura 2.2.



a) Cuenco disipador



b) Tanque de recolección

**Figura 2.2** Fugas identificadas en la rápida de descarga

### **2.1.2 Sistema de bombeo del LDH**

El Laboratorio Docente de Hidráulica cuenta con un sistema de bombeo el cual se encarga de suministrar el caudal para el funcionamiento de los modelos existentes y se encuentra regulado a través de un conjunto de válvulas. A continuación, se describen los principales componentes.


#### **2.1.2.1 Bombas**

Se dispone de tres bombas encargadas de incorporar energía al sistema. De acuerdo con la clasificación de bombas, se determina que son un tipo de bomba centrífuga. Las características técnicas se muestran en la Figura 2.3.

#### **2.1.2.2 Motor**

El motor es el componente que genera energía mecánica haciendo que el eje se mueva accionando la bomba. EL LDH cuenta con tres motores las cuales proveen caudales de 25L/s, 50L/s y 75L/s. En la Figura 2.4 se puede apreciar los motores para cada caudal.

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS	
Marca:	KSB (KLEIN, SCHANZLIN & BECKER AG)
Tipo:	ETA-300-35 KN
N°	6-102-257 622/1
Año:	1968



**Figura 2.3** Características técnicas de las bombas

**Elaborado por:** Jhosselin Chanaluisa



**Figura 2.4** Motores del LDH

**Elaborado por:** Jhosselin Chanaluisa

### 2.1.2.3 Tuberías de impulsión y aspersion

Es sistema de bombeo está constituido por tuberías de aspersion y tuberías de impulsión de asbesto; este material ya no es usado en la distribución de agua potable actualmente debido a los riesgos que que produce en la salud de las personas (Torres , 2019).En el caso del LDH se han mantenido estas tuberías porque el agua que circula por ellas no se utiliza para consumo humano pero si abastece de caudal a los modelos hidráulicos. Los diámetros de las tuberías de impulsión para los caudales de 25 L/s, 50L/s y 75L/s son: 17



cm, 29 cm, 34 cm respectivamente. En la Figura 2.5 se puede observar las tuberías de aspersión e impulsión.



**Figura 2.5** Tuberías de aspersión e impulsión

**Elaborado por:** Jhosselin Chanaluisa

#### **2.1.2.4 Válvulas**

Las válvulas son indispensables en un sistema de bombeo debido a que cumplen funciones como la regulación y cierre del flujo. En el LDH se dispone de válvulas check y de compuerta colocadas en el tramo de impulsión y de aspersión como se evidencia en la Figura 2.6.



**Figura 2.6** Válvulas del LDH

**Elaborado por:** Jhosselin Chanaluisa

### 2.1.2.5 Panel de control

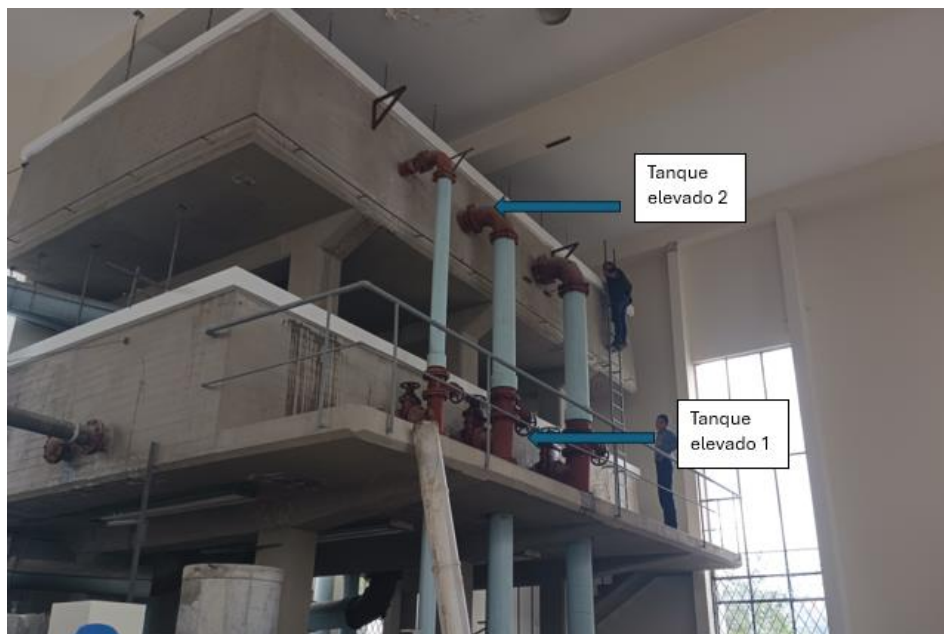
Este elemento es el encargado de accionar el sistema de bombeo.



**Figura 2.7** Panel de control  
**Elaborado por:** Jhosselin Chanaluisa

### 2.1.2.6 Tanques elevados

Cuando se enciende una de las bombas, el flujo pasa a través de la tubería de impulsión y se conduce a los tanques de reserva. El LDH cuenta con dos tanques. El volumen de estos tanques es de  $31.4 \text{ m}^3$  cada uno. En la Tabla 2.1 se muestra las dimensiones de los tanques.



**Figura 2.8** Tanques elevados  
**Elaborado por:** Jhosselin Chanaluisa

**Tabla 2.1** Dimensiones de los tanques elevados

Ancho (m)	Longitud (m)	Profundidad (m)	Volumen (m <sup>3</sup> )
4,5	4,5	1,55	31,4

**Elaborado por:** Jhosselin Chanaluisa

### 2.1.2.7 Tuberías de distribución

Como se evidencia en la Figura 2.9 existen tuberías conectadas a los tanques de reserva, estas tuberías son las que se encargan de distribuir el flujo a los diferentes modelos físicos, para el caso de la rápida de descarga se conectan con el tanque más elevado que se encuentra a 10 m del nivel del piso. El agua se distribuye a los modelos físicos por la diferencia de cotas.



**Figura 2.9** Tuberías de distribución de caudal a la rápida

**Elaborado por:** Jhosselin Chanaluisa

### 2.1.2.8 Canal de recirculación

El LDH dispone de un canal destinado a almacenar y recircular el flujo generado por la corrida de los modelos. Este canal se encuentra ubicado en el perímetro del LDH, cercano a la rápida de descarga como se aprecia en la Figura 2.10.



**Figura 2.10** Canal de recirculación  
**Elaborado por:** Jhosselin Chanaluisa


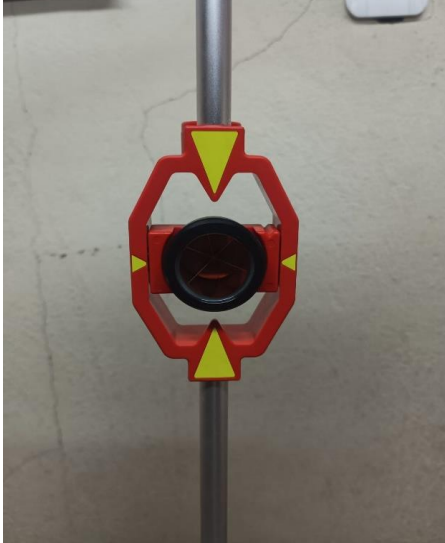
## **2.2 Levantamiento topográfico del LDH**

El levantamiento topográfico es importante dentro de la planificación de algún proyecto, debido a que proporciona información que permite identificar posibles obstáculos, como son las construcciones existentes, vegetación, etc. (Reyes, 2017) El componente de este trabajo de integración es proponer un diseño de captación con reja de fondo para régimen supercrítico por tal razón se debe disponer de un espacio considerable para el diseño de los diversos componentes que comprenden este sistema.

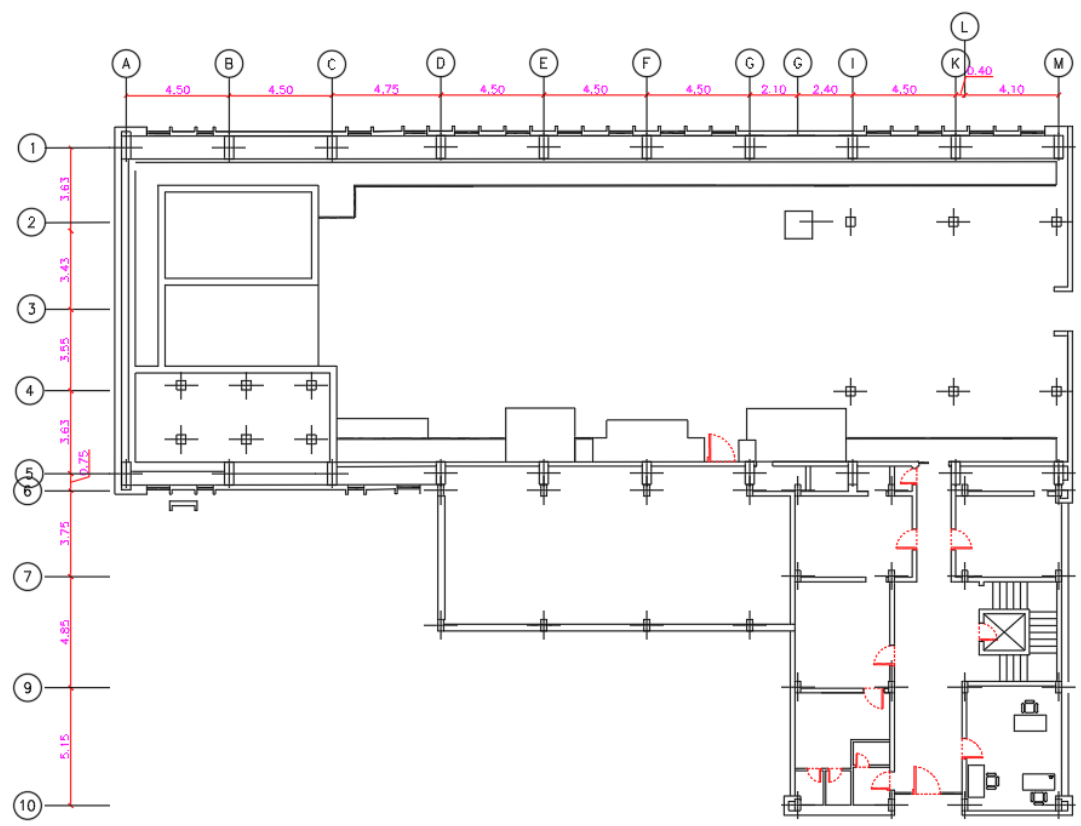
Se cuenta con una información base producto de un levantamiento planimétrico que fue realizado en el 2014 como se presenta en la Figura 2.12. Con la finalidad de verificar algunas medidas que se encontraban en este plano se realizó un nuevo levantamiento planimétrico que ayudaría a proponer la localización de las estructuras que serán diseñadas.

El levantamiento se realizó con el equipo de topografía proporcionado por Laboratorio de Ensayos de Materiales Mecánica de Suelos y Rocas LEMSUR. Para este caso se usó un mini prisma con el fin de tener mayor precisión; las características de estos instrumentos se presentan en la Figura 2.11

Estación Total		Mini prisma	
Marca:	Trimble	Marca:	Leika
Modelo:	M3	Serial:	2019
Presión:	±2,5	Código:	6MPIII
Serie:	C602792		

**Figura 2.11** Instrumentos de topografía usados en el levantamiento  
**Elaborado por:** Jhosselin Chanaluisa

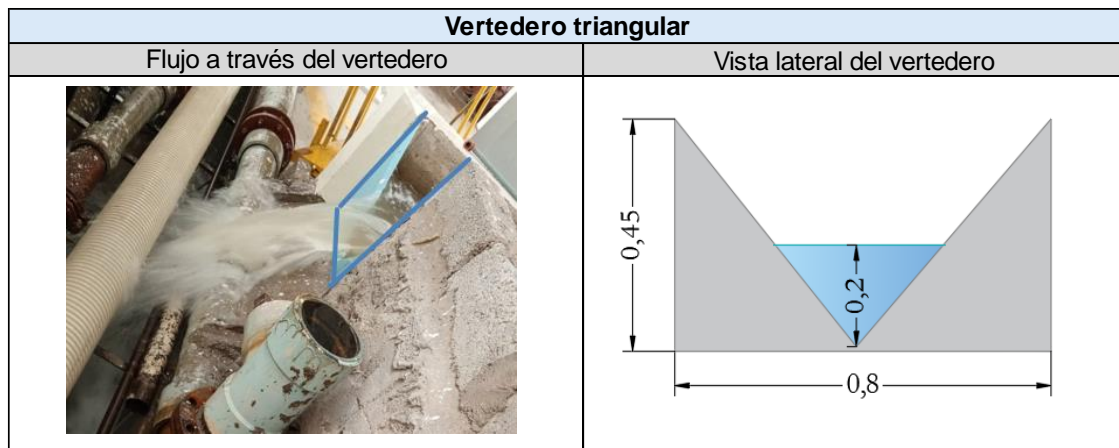


**Figura 2.12** Planimetría del LDH

## 2.3 Consideraciones sobre el Caudal de diseño

Una vez realizada la corrida del modelo como se observa en la Figura 2.13 se procede a determinar el caudal que circula por la rápida, para ello se realiza una medición de la altura sobre el vertedero triangular ubicado al final del modelo y usando las expresiones que Plua (2001) usó en su tesis de grado se estima el caudal para un vertedero triangular de 90° como se muestra en la

Tabla 2.2. Sin embargo, este caudal estimado no es el caudal que realmente está circulando por la rápida debido a que existe el problema de fugas en algunas zonas del modelo como se evidenció en la Figura 2.2.



**Figura 2.13** Vertedero triangular de la rápida

**Elaborado por:** Jhosselin Chanaluisa

**Tabla 2.2** Caudal circulante por la rápida de descarga con fugas

Altura sobre el vertedero (h)	0,2	m	
Determinación del caudal			
Autores	Ecuación	m <sup>3</sup> /s	L/s
Thopson	$Q = 1,4h^{5/2}$	0,025	25,04
Horace King	$Q = 1,34h^{2,47}$	0,025	25,16
A.A Barnes	$Q = 1,33h^{2,48}$	0,025	24,57
Raymond Boucher	$Q = 1,3424h^{2,48}$	0,025	24,80
<b>Promedio</b>		0,025	24,89

**Fuente:** Plua (2001)

**Elaborado por:** Jhosselin Chanaluisa

Por tal razón para efectos de diseño se tomará en cuenta el caudal máximo de 47 L/s que fue experimentado en la tesis de Plua (2001). En la Tabla 2.3 se evidencia los caudales que fueron experimentados en el modelo físico de la rápida del Batán de donde se determina que el caudal máximo fue de 47 L/s.

**Tabla 2.3** Caudales circulantes por la rápida de descarga

Ancho	Caudal	Caudal unitario	Observaciones
b (m)	Q(L/s)	q (m <sup>3</sup> /s) /m	
0,4	3	0,008	Este resalto no aprovecha las dimensiones del dissipador
	5	0,013	a) El flujo es subcrítico en la zona de entrega. El volumen de resalto producido ocupa en su totalidad el del cuenco dissipador
	16	0,040	
	19	0,048	
	22	0,055	
	25	0,063	
	27	0,068	
	31	0,078	b) No existe una disipación adecuada de energía. En la zona de entrega se observan fuertes fluctuaciones
	33	0,083	
	41	0,103	
	44	0,110	
	47	0,118	

Fuente: Plua (2001)

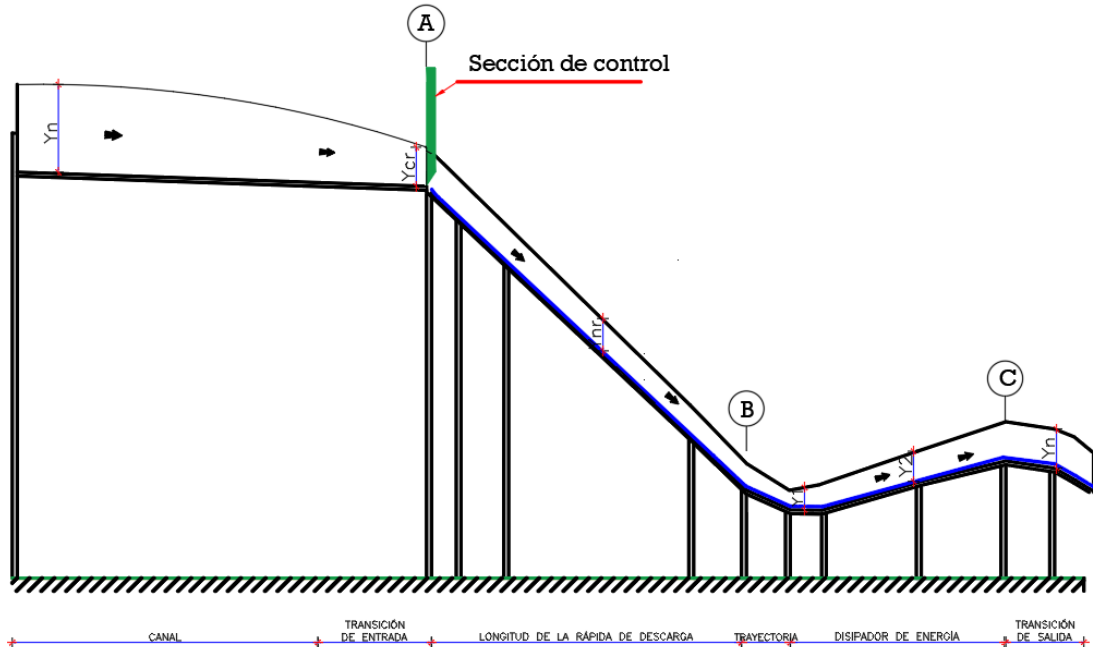
Elaborado por: Jhosselin Chanaluisa

## 2.4 Calados de la rápida de descarga

Es necesario conocer los calados en cada uno de los tramos de la rápida de descarga, por tanto, usando las ecuaciones del flujo uniforme se estiman tres calados que ayudarán a determinar el perfil de aproximación de la rápida de descarga.

Al inicio del canal de entrada se estima que se tendrá un calado normal ( $y_n$ ), conforme el flujo va avanzando en la zona de sección de control se produce un calado crítico ( $y_c$ ), al iniciar la pendiente pronunciada se determina otro calado ( $y$ ), se espera que el flujo sea supercrítico debido a las velocidades altas y la pendiente pronunciada. Además, es

necesario realizar el cálculo del calado  $y_{90}$  debido a que al ser un flujo inestable se produce la introducción de aire, este calado se debe calcular con el fin de determinar el calado con el que se realizará el diseño del sistema de captación.



**Figura 2.14** Esquema de calados en la rápida de descarga

**Elaborado por:** Jhosselin Chanaluisa

### 2.4.1 Calado con concentración al 90 %

Para determinar el calado aireado se siguen los siguientes pasos:

Primero se halla el calado crítico, al ser un canal rectangular se puede usar la Ecuación 2.1

$$y_c = \sqrt{\frac{q^2}{g}}$$

**Ecuación 2.1** Calado crítico

El caudal unitario se estima con la Ecuación 2.2

$$q = \frac{Qd}{b}$$

**Ecuación 2.2** Caudal unitario

Una vez obtenido el calado crítico se procede a calcular el número de Froude para el flujo en condición aireada con la Ecuación 2.3



$$Fr_o = \frac{q}{\sqrt{g * \text{sen}(\theta) * k^3}}$$

**Ecuación 2.3** Froude para condición aireada

Donde:

$\theta$ : ángulo de inclinación

k: valores de rugosidad

Luego se determina la longitud medida desde el colector hasta el inicio de la introducción de aire usando la Ecuación 2.4

$$L_a = 13.6 * k * (\text{sen}\theta)^{0.0796} * Fr_o^{0.713}$$

**Ecuación 2.4** Longitud para que aparezca la introducción de aire

Donde:

$L_a$ : Longitud donde aparece la introducción de aire

k: valores de rugosidad

$Fr_o$ : Froude para condición aireada

La rugosidad para el canal que se está diseñando es acrílico por tanto el valor de k es de 0.003 pues el fondo es totalmente liso y es de tipo plexiglás.

GRADO DE RUGOSIDAD	ACABADO DE LA SUPERFICIE	k (mm)
TECNICAMENTE LISO	Metales no ferrosos, estirados, pulidos y galvanizados	0,001
	Metales no ferrosos estirados (Vidrio Plexiglás)	0,003

**Figura 2.15** Valores de rugosidad k

**Fuente:** Naudascher (2017)

También se halla el calado donde aparece la autoaeración mediante el uso de la Ecuación 2.5

$$y_a = 0.223 * k * (\text{sen}\theta)^{-0.04} * Fr_o^{0.643}$$

**Ecuación 2.5** Calado de inicio de autoaeración

Donde:

$L_a$ : Longitud de la capa límite

k: valores de rugosidad

$Fr_o$ : Froude para condición aireada

Se calcula el número de Froude el cual considera en calado de inicio de autoaeración con la Ecuación 2.6

$$Fr_a = \frac{V_a}{\sqrt{g * y_a}} = \frac{q}{y_a * \sqrt{g * y_a}}$$

**Ecuación 2.6** Froude para el calado al inicio de la autoaeración

Se debe calcular la rugosidad relativa usando la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

$$\varepsilon = \frac{k}{4 * y_a}$$

**Ecuación 2.7** Rugosidad relativa

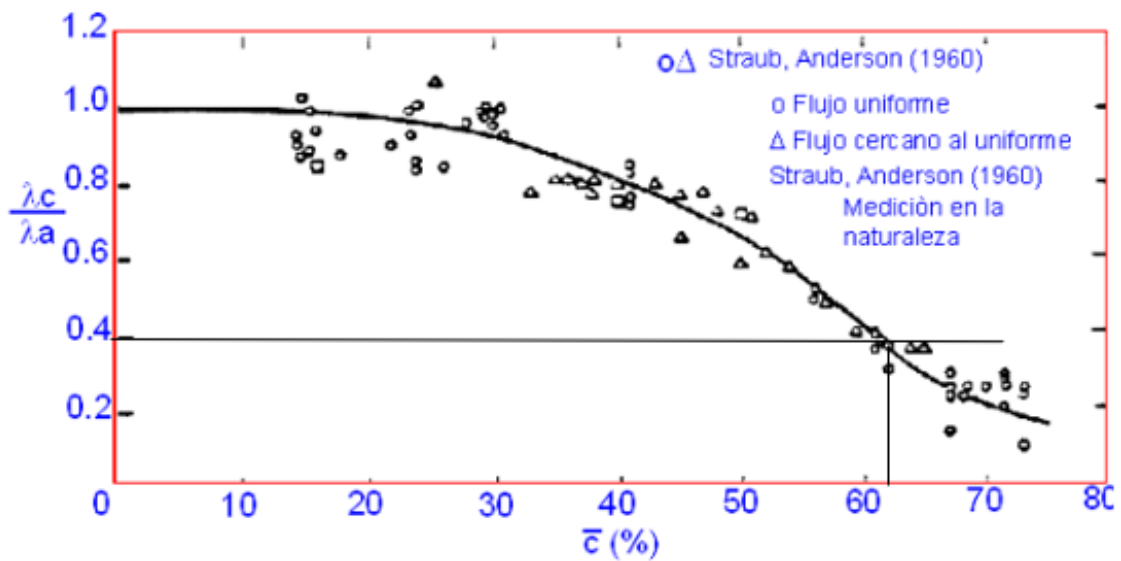
Es necesario conocer el valor de la concentración de aire de acuerdo con la inclinación de la rápida, usando la Figura 2.16 se establece un valor de 0.618 de concentración debido a los 45° de inclinación de la rápida de descarga.

$\Theta$ (°)	$\bar{c}$	$Y_n/Y_{90}$
7.5	0.137	0.86
15.0	0.245	0.76
22.5	0.302	0.70
30.0	0.410	0.59
37.5	0.560	0.44
45.0	0.618	0.38
60.0	0.675	0.33
75.0	0.715	0.29

**Figura 2.16** Concentración media de aire según el ángulo de inclinación del canal

**Fuente:** Naudascher (2017)

Luego de haber definido del valor de la concentración de aire se procede a usar la Figura 2.17 para extraer el valor de relación de los coeficientes internos, por tanto, se tiene un valor de  $\lambda_c/\lambda_a = 0.4$ .



**Figura 2.17** Relación de los coeficientes de fricción interna en función de la concentración

**Fuente:** Naudascher ( 2017)

Para determinar el coeficiente  $\lambda_c$  se despeja de la relación encontrada en la Figura 2.17, de ahí que se obtiene la Ecuación 2.8

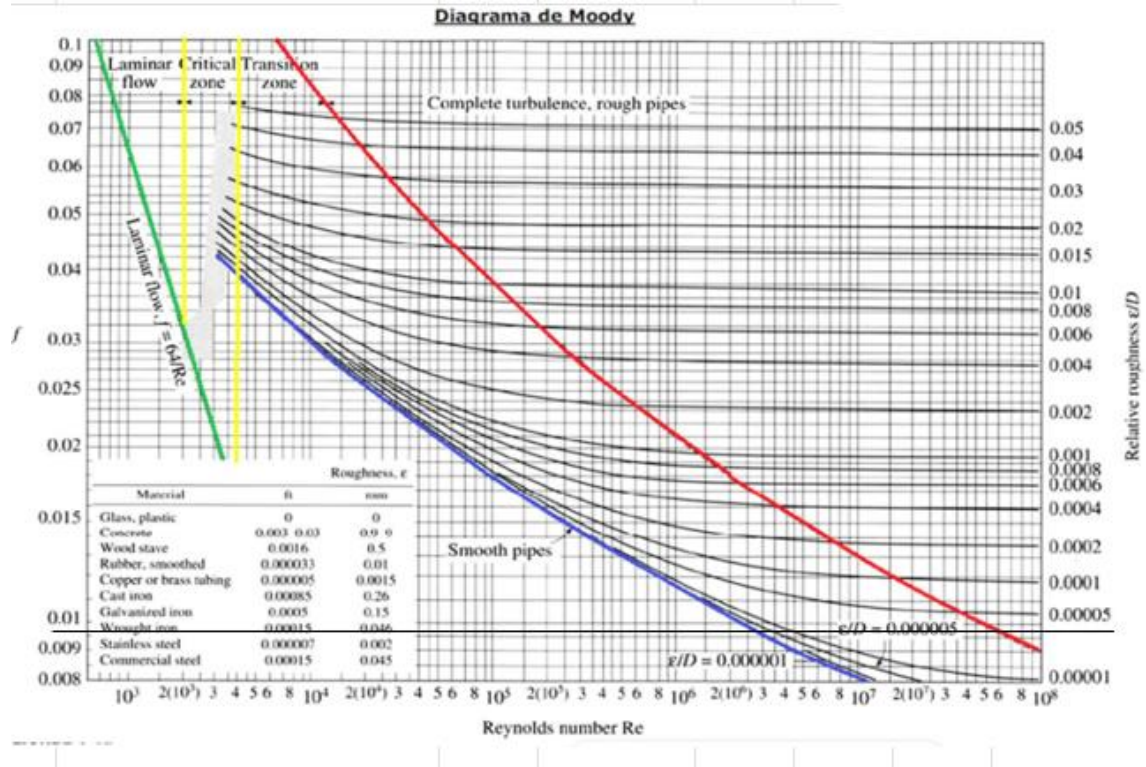
$$\lambda_c = 0.40 * \lambda_a$$

**Ecuación 2.8** Coeficiente de fricción interna para flujo totalmente aireado

Donde:

$\lambda_a$ : Coeficiente de fricción al inicio de la aireación

Para ello es necesario determinar el valor de  $\lambda_a$ , este valor se halla usando la Figura 2.18 ,con la rugosidad y el número de Reynolds. El número de Reynolds para el flujo que circula a través de la rápida muy alto debido a que el flujo es turbulento inestable. (Haro & Jara , 2010) Por lo que se obtiene un valor de  $\lambda_a = 0.0098$



**Figura 2.18** Diagrama de Moody

**Fuente:** Sotelo (2002)

Luego se calcula el calado normal de agua clara con la Ecuación 2.9

$$y_n = \left( \lambda_c * \frac{q^2}{8g * \text{sen}\theta} \right)^{1/3}$$

**Ecuación 2.9** Calado normal de agua clara

Una vez determinado el calado normal de agua se procede a estimar el calado con concentración del 90% de aire con la Ecuación 2.10

$$Y_{90} = \frac{Y_n}{(1 - \bar{c})}$$

**Ecuación 2.10** Profundidad con concentración del 90% de aire

Donde:

$Y_{90}$ : calado de agua con una concentración del 90% de aire

$Y_n$ : calado de agua (sin aire)

$\bar{c}$ : concentración media de aire

## 2.5 Rugosidad del canal

Es importante considerar la rugosidad en el cálculo de canales este parámetro se usa en la Ecuación 1.1. Se va a realizar cálculo para el canal de entrada a la rápida (fondo de madera), el canal de la rápida (fondo de acrílico), y además en la propuesta planteada se tiene planeado diseñar usando acrílico. Por lo que es necesario determinar los “n” de Manning que se usarán en los cálculos. Para el canal con fondo de madera se usa un  $n=0.011$ , mientras que para el fondo de acrílico de usa un  $n=0.010$ . Estos valores se muestran en la Tabla 2.4.

**Tabla 2.4** Coeficiente de Manning

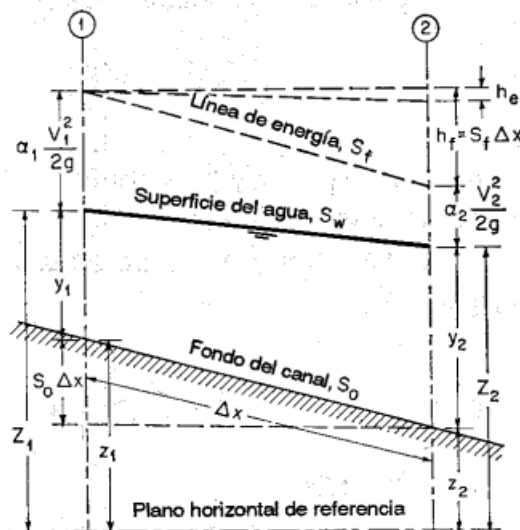
Tipo y descripción del canal	Mínimo	Normal	Máximo
Acrílico	0.008	0.009	0.010
Madera cepillada creosotada	0,011	0,012	0,015

**Fuente:** Hidráulica de canales (Chow, 1994)

**Elaborado por:** Jhosselin Chanaluisa

## 2.6 Perfil de aproximación de la rápida

Una vez determinados los calados de la rápida se procede a estimar el perfil de aproximación de la rápida en este caso se usó el método del paso directo, el cual consiste en dividir la longitud del canal en tramos pequeños con el fin de desarrollar la curva de remanso. De la Figura 2.19 se deduce la Ecuación 2.11.



**Figura 2.19** Esquema para la deducción del método del paso directo

**Fuente:** Chow (1994)

$$S_o \Delta x + y_1 + \alpha_1 \frac{v_1^2}{2g} = y_2 + \alpha_2 \frac{v_2^2}{2g} + S_f \Delta x$$

**Ecuación 2.11** Ecuación para el método del paso directo

Se resuelve la ecuación mostrada anteriormente y se obtiene la Ecuación 2.12

$$\Delta x = \frac{E_2 - E_1}{S_o - S_f} = \frac{\Delta E}{S_o - S_f}$$

**Ecuación 2.12** Longitud del tramo por segmentos

Con la Ecuación 2.13 se determina la ecuación específica

$$E = y + \alpha \frac{v^2}{2g}$$

**Ecuación 2.13** Ecuación energía específica

## 2.7 Dimensionamiento de los componentes hidráulicos

### 2.7.1 Reja de fondo

La reja de fondo es el componente principal del sistema de captación. A continuación, se detallan las fórmulas utilizadas para estimar la longitud, el espaciamiento y la distribución de las barras. Para esta estimación, se emplearon las ecuaciones proporcionadas en la bibliografía de Subramanya (2009), que incluyen expresiones para el cálculo de rejas en régimen de aproximación supercrítico.

#### 2.7.1.1 Longitud de la reja

Subramanya (2009) hace énfasis en la estimación del caudal para la distribución de barras longitudinales y perforadas, mientras que para las transversales detalla que no se ha realizado aún el estudio. La descarga estimada depende de la energía específica y la expresión que se usa es la Ecuación 2.14. De esta ecuación se puede calcular la longitud de la reja, pues se tiene el caudal conocido, en este caso es el caudal de diseño de 47L/s.

$$Q_d = C_d * B * L * m * \sqrt{2gE_o}$$

**Ecuación 2.14** Ecuación de descarga para rejas longitudinales

Donde:

$Q_d$ : caudal descargado

$C_d$ : coeficiente de descarga de la reja de fondo para distribución longitudinal

B: ancho del canal

L: longitud de la reja

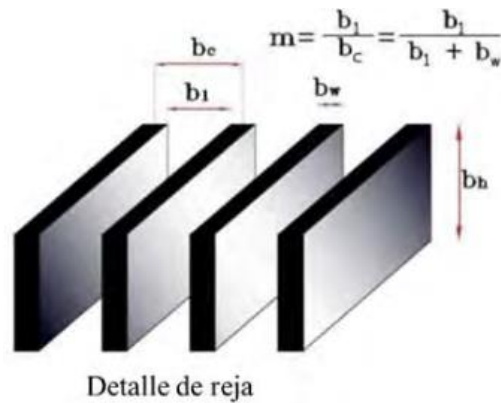
m: índice de huecos

g: gravedad

$E_0$ : energía

### 2.7.1.2 Índice de huecos

Se define como la relación entre el espaciamiento entre barras y la suma del diámetro de la barra y el espaciamiento entre ellas. Se calcula usando la Ecuación 2.15



**Figura 2.20** Índice de huecos

**Fuente:** García (2016)

$$m = \frac{b_1}{b_c} = \frac{b_1}{b_1 + b_w}$$

**Ecuación 2.15** Índice de huecos

Donde:

m: índice de huecos

$b_1$ : espaciamiento entre barras

$b_w$ : diámetro de la barra

$b_c$ : distancia entre ejes

### 2.7.1.3 Espaciamiento entre barras

El parámetro que interviene en el índice de huecos es el espaciamiento entre barras, es una variable indispensable que se debe considerar en el diseño de una captación con reja de fondo pues depende del uso que se le va a dar a la captación, en el estudio realizado por Haro (2019) se presenta la recopilación de la literatura técnica de varios autores con valores recomendados para el espaciamiento entre barras como se aprecia en la Tabla 2.5

**Tabla 2.5** Espaciamiento entre barras

<b>Autor</b>	<b>Uso</b>	<b>Espaciamiento</b>
(Andaroodi y Schleiss,2006)	Generación de electricidad (pequeñas centrales hidroeléctricas)	0,02 a 0,04 m
(Raudkivi,1993)		0,005 m mínimo
(Bouvard,1992)	Generación de electricidad (turbinas o sifones)	0,02-0,03 m
(Bouvard,1992)	Otros usos	0,10-0,12 m
(Castro,1986)	Si el flujo va hacia un reservorio	0,10 m o más
(Castro,1986)	Generación de electricidad	0,02 m o menos
(Drobir,1981)		0,15 m
(Krochin,1978)	Generación de electricidad	0,02-0,06 m
(Ract-Madoux et al., 1955)		0,10 m

**Fuente:** Haro (2019)

**Elaborado por:** Jhosselin Chanaluisa

Sin embargo, Wong (2009) menciona que su estudio del diseño de captación con reja de fondo se diferencia de investigaciones previas porque no sólo se centran en usos tales como generación de energía o suministro de agua; sino que se enfoca en la derivación de caudales proveniente de precipitaciones. Por tanto, su propuesta de espaciamiento entre barras se basa en el uso de estructuras de control de inundaciones.

Una vez descrita la literatura técnica sobre las recomendaciones de espaciamiento entre barras, se decide realizar el cálculo del índice de huecos usando los espaciamientos planteados por Wong en su tesis doctoral debido a que se tiene un modelo base construido en laboratorio y además no sólo considera el uso como de generación eléctrica o suministro de agua sino en la derivación de caudales provenientes de lluvias.



#### 2.7.1.4 Tipo de Reja

Para el desarrollo de este trabajo se planea construir los tipos de reja propuestos por Wong (2009). Usando las mismas dimensiones que se usó en su tesis doctoral como se mostró en la Figura 1.11

#### 2.7.1.7 Coeficiente de descarga

Según Subramanya (2009), el coeficiente de descarga está en función de las siguientes variables: diámetro y espaciamiento de las barras, pendiente de la reja, así como el tipo de flujo, para hallarlo se usa la Ecuación 2.16

$$C_d = fn \left[ \frac{b_w}{b_1}, S_L, \eta_E \text{ y } (\text{tipo de flujo}) \right]$$

#### Ecuación 2.16 Coeficiente de descarga

Donde:

$b_w$ : diámetro de la barra

$b_1$ : espaciamiento entre barras

$S_L$ : pendiente longitudinal de la reja ó  $\text{tg}\theta$

$\eta_E$ : parámetro de flujo

El parámetro de flujo se da en función de la velocidad y energía, pero también se estima con el número de Froude como se evidencia en la Ecuación 2.17

$$\eta_E = \frac{V_o^2}{2gE_o} = \left( \frac{Fo^2}{2 + Fo^2} \right)$$

#### Ecuación 2.17 Parámetro de flujo

Para calcular el coeficiente de descarga Subramanya (2009) presentan las expresiones mostradas en la Tabla 2.6 para las diferentes tipos de flujo según la inclinación de la reja.

**Tabla 2.6** Ecuaciones del coeficiente de descarga según el tipo de flujo

Tipo de reja	Tipo de flujo	Ecuación
Rejas inclinadas	A1	$C_q = 0,53 + 0,4 \log \left( \frac{b_w}{b_1} \right) - 0,61 \operatorname{tg} \theta$
	B1	$C_q = 0,39 + 0,27 \log \left( \frac{b_w}{b_1} \right) - 0,8 \frac{Fr_0^2}{2 + Fr_0^2} - 0,5 \log ( \operatorname{tg} \theta )$
Rejas horizontales	A1	$C_q = 0,601 + 0,2 \log \left( \frac{b_w}{b_1} \right) - 0,247 \frac{Fr_0^2}{2 + Fr_0^2}$
	A3	$C_q = 0,752 + 0,28 \log \left( \frac{b_w}{b_1} \right) - 0,565 \frac{Fr_0^2}{2 + Fr_0^2}$
	B1	$C_q = 1,115 + 0,36 \log \left( \frac{b_w}{b_1} \right) - 1,084 \frac{Fr_0^2}{2 + Fr_0^2}$

Fuente: Subramanya (2009)

Elaborado por: Jhosselin Chanaluisa

Para el dimensionamiento de este proyecto se ha determinado que el perfil de aproximación de la reja es un B1, además se usa la expresión del coeficiente de descarga para rejas inclinadas debido a que se les otorgará una pendiente. Por tanto, la expresión a usarse según la Tabla 2.6 es la Ecuación 2.18.

$$C_d = 0.39 + 0.27 \log \left( \frac{b_w}{b_1} \right) - 0.8 \eta_E - 0.5 \log ( \operatorname{tg} \theta )$$

**Ecuación 2.18** Coeficiente de descarga para rejas inclinadas

Donde:

$b_w$ : diámetro de la barra

$b_1$ : espaciamiento entre barras

$\eta_E$ : parámetro de flujo

$\operatorname{tg} \theta$ : pendiente longitudinal de la reja

Una vez determinada la longitud de la reja se procede a determinar el número de barras que se usarán, para ello se divide el ancho de la reja de fondo para la distancia entre ejes esta expresión se halla despejando la Ecuación 2.15

$$\text{número de barras} = \frac{b}{b_c}$$

**Ecuación 2.19** Número de barras

**2.7.2 Canal de recolección**

Este elemento tiene como finalidad captar el agua interceptada por la reja de fondo para posteriormente conducirla al canal de aproximación del vórtice de descarga. Generalmente la sección transversal usada suele ser rectangular, pero en este caso se va a tomar como recomendación el planteamiento del estudio realizado por Brunella et al. (2003) en donde se determina que la sección de este canal debe ser trapezoidal, pues al ser de tipo rectangular se producen vórtices en la galería como se observa en la Figura 2.21



**Figura 2.21** Formación de vórtices en el canal de admisión

**Fuente:** Brunella et al. (2003)

En base a esta investigación, se propone el diseño de un canal de recolección de tipo trapezoidal en donde se usarán las expresiones del diseño de un canal trapezoidal.

Las ecuaciones que se usarán son las siguientes.

$$A = (b + zy) * y$$

**Ecuación 2.20** Área de la sección trapezoidal

Donde:

*b*: ancho del canal

*z*: talud

*y*: calado

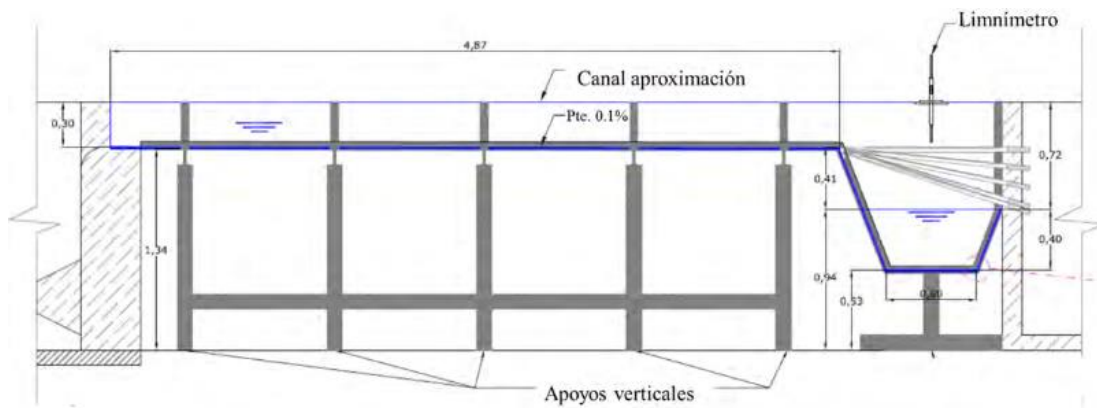
$$P = b + 2y + \sqrt{1 + z^2}$$

**Ecuación 2.21** Perímetro de la sección trapezoidal

$$R_h = \frac{(b + zy)y}{b + 2y\sqrt{1 + z^2}}$$

**Ecuación 2.22** Ecuación del radio hidráulico

Un ejemplo de la adaptación de este canal de recolección con sección trapezoidal se llevó a cabo en el laboratorio de la Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT), donde se observa el canal de aproximación, el canal de recolección, y se muestra la inclinación de la reja, que puede variar las pendientes desde el nivel del canal de aproximación hacia abajo, como se evidencia en la Figura 2.22.



**Figura 2.22** Implementación del canal de sección trapezoidal en el laboratorio de la UPCT

**Fuente:** García (2016)

## 2.7.3 Vórtice de descarga

### 2.7.3.1 Definición

Estructura hidráulica caracterizada por generar un movimiento helicoidal en un pozo de caída vertical. Este movimiento ocasiona un rozamiento del flujo con las paredes del tubo vertical en el descenso provocando la disipación de energía. (Haro y Jara , 2006).

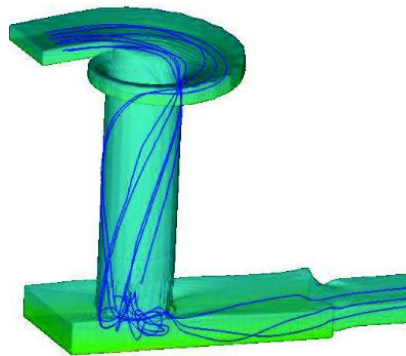


**Figura 2.23** Vórtice de descarga

**Fuente:** Haro & Jara ( 2006)

### **2.7.3.2 Desarrollo del flujo helicoidal**

Está determinado por la velocidad de entrada al tubo, por tanto, depende del caudal que circula a lo largo de la estructura, de la resistencia al flujo, así como del diámetro del tubo. De modo que el primer parámetro ( $Q$ ) es directamente proporcional y ( $n$ ,  $D_s$ ) que son inversamente a la longitud total en la que se desarrolla el flujo (Rodríguez , 2016).

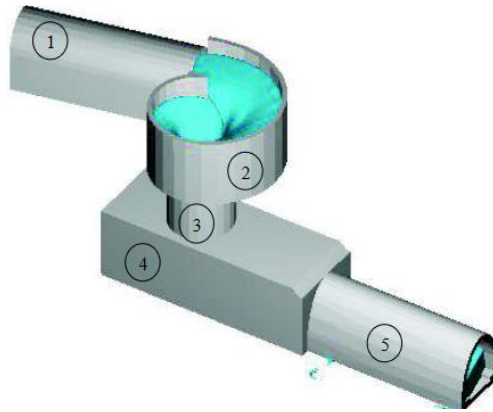


**Figura 2.24** Flujo helicoidal

**Fuente:** Rodríguez (2016)

### **2.7.3.3 Elementos del vórtice de descarga**

Un diseño típico de esta estructura incluye los siguientes componentes: cámara de aproximación (1), cámara de entrada(2), tubo de caída vertical(3), cámara de disipación(4), canal o túnel de salida (5) (Ettema et al., 2023). En la Figura 2.25 se evidencia dichos elementos.



**Figura 2.25** Elementos del vórtice de descarga

**Fuente:** Rodríguez (2016)

#### 2.7.4 Canal de aproximación

El dimensionamiento del descargador a vórtice depende del Número de Froude ( $Fr$ ), debido a que este parámetro determina el tipo de flujo de aproximación. Con el fin de garantizar la estabilidad del flujo es necesario basarse en las siguientes recomendaciones (Haro y Jara, 2006):

- Es indispensable que el número de Froude sea menor a 0.70 para un canal de entrada con **régimen subcrítico**.
- Para **régimen supercrítico** es necesario asegurar que el número de Froude sea mayor a 1.30. Para este caso es necesario evaluar la posibilidad de velocidades altas que generen una sobreelevación en la superficie libre del agua.



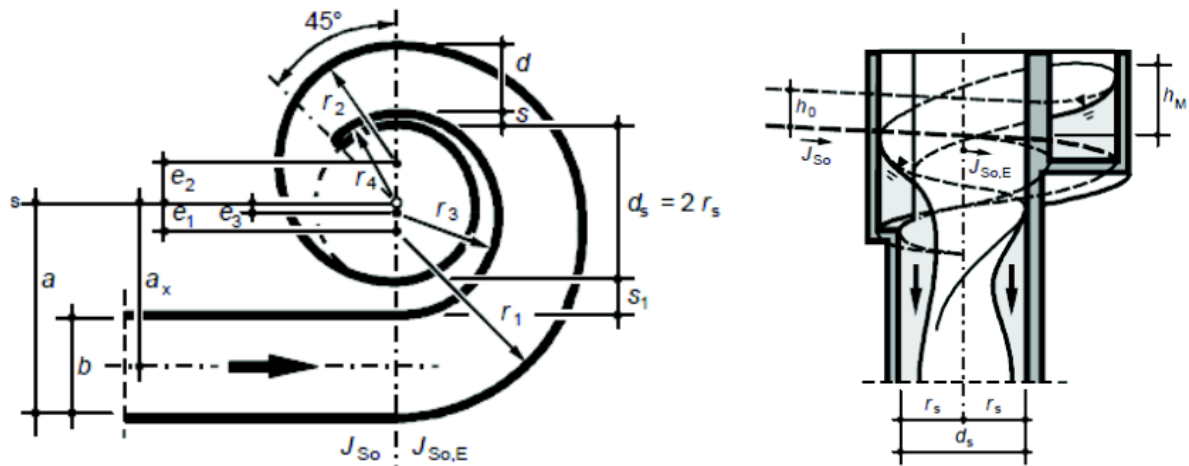
**Figura 2.26** Canal de aproximación del vórtice de descarga

**Fuente:** Haro & Jara (2006)

#### 2.7.5 Cámara de entrada

Para el diseño de este elemento se debe considerar el flujo de aproximación, para el dimensionamiento de este componente existen expresiones tanto para el régimen

subcrítico como para el supercrítico. En el presente estudio se va a considerar la hipótesis de Wong (2009) la que considera que el flujo tiene aproximación supercrítica cuando atraviesa por el vórtice de descarga. Por tanto se presentan las expresiones para el dimensionamiento en régimen de flujo supercrítico, planteadas por Hager (1990), quien introdujo el siguiente diseño de entrada en espiral.



**Figura 2.27** Cámara de entrada tipo espiral

**Fuente:** Weiss et al.(2010)

Hager planteó cuatro formas de reducir el radio, en la Ecuación 2.23, se muestran las expresiones que se usarán para determinar los radios de giro.

$$\begin{aligned}
 R4 &= 0.5D_s + s \\
 R3 &= \frac{0.5D_s + s + a - b}{2} \\
 R2 &= \frac{D_s + s + c}{2} \\
 R1 &= \frac{D_s + s + a + c}{2}
 \end{aligned}$$

**Ecuación 2.23** Radios de giro

Donde:

$D_s$ : diámetro del tubo vertical

$a$ : distancia de la pared exterior del canal de aproximación desde el eje

$c$ : ancho del canal opuesto a la sección de entrada

$s$ : coordenada a lo largo de la pared exterior de la estructura de entrada

Por otro lado, la expresión para hallar la distancia “a” se usa la Ecuación 2.24

$$a = 0.5D_s + b_o + s_1$$

**Ecuación 2.24** Distancia de la pared exterior del canal de aproximación desde el eje

Donde:

$b_o$ : ancho del canal de aproximación

$s_1$ : espesor de la pared interior de la cámara de entrada

Además, se calcula las excentricidades usando las expresiones mostradas en la Ecuación 2.25

$$e1 = a - R1$$

$$e2 = 0.5D_s + s + c - R2$$

$$e3 = a - b - R3$$

$$s1 = a - b - 0.5D_s$$

**Ecuación 2.25** Excentricidades

Con el fin de garantizar un diseño óptimo se debe garantizar que se cumplan las restricciones mostradas en la Ecuación 2.26.

$$0.5SD_s + s + c \leq a \leq 1.5D_s + s$$

$$0.4D_s \leq b \leq D_s$$

$$0.4D_s \leq c \leq D_s$$

**Ecuación 2.26** Condiciones de diseño

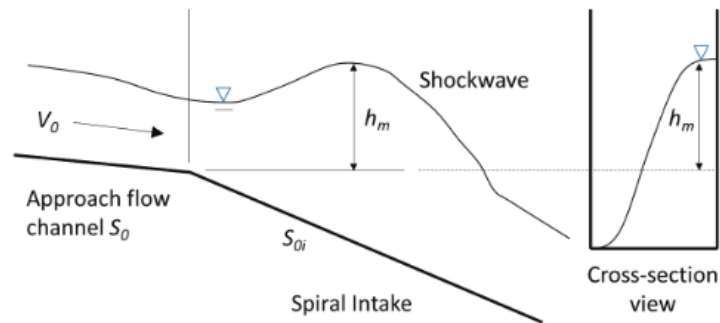
Los valores de  $c, s, s_1$  son estimados con consideraciones estructurales, mientras que los radios de giro y excentricidades se determinan a partir de relaciones geométricas, por otro lado, la pendiente longitudinal a lo largo de la cámara de entrada debe ser diferente a la pendiente del canal de aproximación, la pendiente recomendada oscila entre el 5%-30% (Ettema et al., 2023).

### 2.7.5.1 Sobreelevación

La sobreelevación se estima despejando la Ecuación 2.27 la cual fue determinada experimentalmente por Kellenberger (1988).(Hager, 1990).En la Figura 2.28 se observa



que la formación de la onda estacionaria a lo largo de la pared, esta altura es crítica (altura máxima de la onda) que evita derrames y desbordamientos de la toma. (Ettema et al., 2023)



**Figura 2.28** Onda estacionaria a lo largo de la pared (a) vista lateral (b) vista transversal

**Fuente:** Ettema et al. (2023)

$$\frac{h_M}{R_1} = (0.15 * F_r + 1.10) * \left( \frac{2b_0 h^2 * F_r}{R_1^3} - \frac{J_{so}}{2} \right)$$

**Ecuación 2.27** Altura de sobreelevación

Donde:

$h_M$ : altura de sobreelevación

$R_1$ : radio de giro 1

$F_r$ : número de Froude

$b_0$ : ancho del canal de aproximación

$J_{so}$ : pendiente del canal de aproximación

La ubicación de la altura máxima de la onda estacionaria puede ser determinada con la Ecuación 2.28

$$\frac{\alpha_M}{F_r} = 75 * \sqrt{\frac{h}{R_1}}$$

**Ecuación 2.28** Ubicación de la sobreelevación

Donde:

$\alpha_M$ : ángulo de ubicación de la sobreelevación

$F_r$ : número de Froude

$R_1$ : radio de giro 1

$h$ : profundidad del canal de aproximación

## 2.7.6 Tubo de descargador a vórtice

### 2.7.6.1 Descripción

El siguiente componente del descargador a vórtice es el tubo de descarga vertical, el cual es el encargado de conectar las cámaras de entrada y disipación. Al ingresar el agua a este elemento se adhiere a las paredes produciendo una trayectoria helicoidal. Su función principal es la vencer un desnivel topográfico produciendo disipación de energía conforme el flujo desciende (Rodríguez, 2016).



**Figura 2.29** Tubo de descargador a vórtice  
**Fuente:** Haro y Jara (2006)

### 2.7.6.2 Diámetro del tubo vertical

Para dimensionar diámetro del tubo de descargador a vórtice se considera el caudal de diseño, así como es necesario considerar un factor de seguridad  $\eta$  que posteriormente se explicará que valor fue considerado para el caso en estudio. La expresión que usada para estimar el diámetro se evidencia en la Ecuación 2.29

$$D_s = \eta \left( \frac{Q_d^2}{g} \right)^{1/5}$$

**Ecuación 2.29** Diámetro del tubo vertical

Donde:

$\eta$ : factor de seguridad

$Q_d$ : caudal de diseño

$g$ : gravedad

Cuando se trabaja con caudales altos es posible que se dé un cierre del núcleo o garganta y para evitarlo se debe corregir con el factor de seguridad  $\eta$ . El coeficiente puede variar entre  $0.83 \leq \eta \leq 2.0$  (Chiluisa y Guanoluisa, 2015)

La recomendación de diseño planteada por Hager (1990) fue la de optar por un valor de 1.25 con el fin de evitar ondas cruzadas a la entrada de la cámara de disipación. Por otro lado en base a los modelos ensayados en la EPN se estableció que el valor recomendado para los dos tipos de aproximación es de  $\eta = 1.25$ . (Haro y Jara, 2006)

Por tanto, el valor que se optó por considerar en el diseño de este trabajo será de  $\eta = 1.25$  por recomendación experimental y teórica mencionada anteriormente.

### **2.7.6.3 Longitud del tubo vertical**

Para determinar la longitud del tubo vertical se usará la expresión de (Chiluisa y Guanoluisa, 2015), la que relaciona la dimensión geométrica del diámetro del tubo para estimar la altura del mismo, se usa la Ecuación 2.30

$$H_T \leq 3D_s$$

### **Ecuación 2.30 Longitud del tubo vertical**

Donde:

$H_T$ : longitud del tubo vertical

$D_s$ : diámetro del tubo vertical

## **2.7.7 Cámara de disipación**

### **2.7.7.1 Descripción**

La cámara de disipación es el componente que está conectado al tubo vertical, puede tener una forma rectangular o puede ser tipo baúl, el material con el que se construye debe ser resistente debido a que tiene que albergar al colchón de agua que elimina la energía no

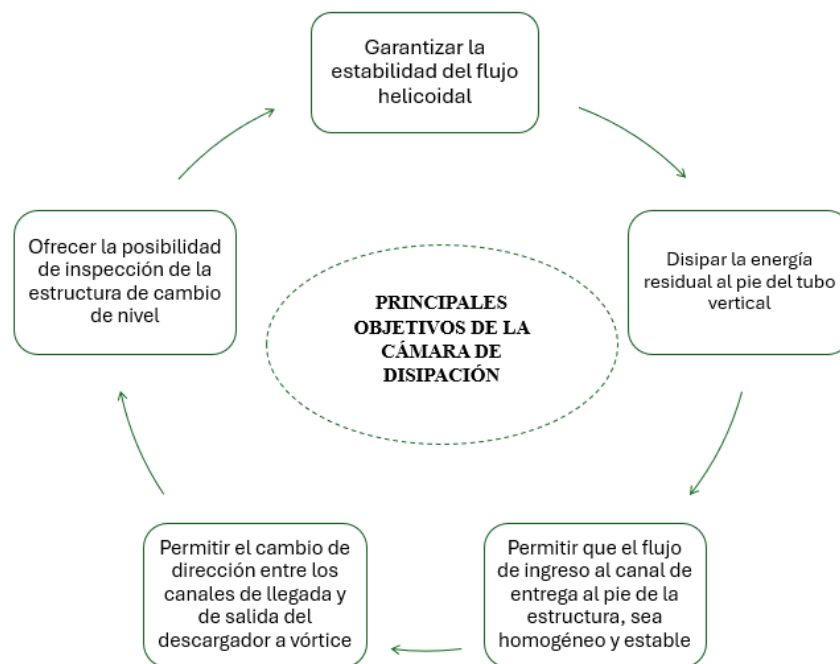
disipada en el tubo vertical. Logrando estabilizar el flujo para el posterior desvío hacia el canal de salida (Rodríguez, 2016).



**Figura 2.30** Cámara de disipación

**Fuente:** Haro y Jara (2006)

Los principales objetivos de este elemento se describen a continuación:



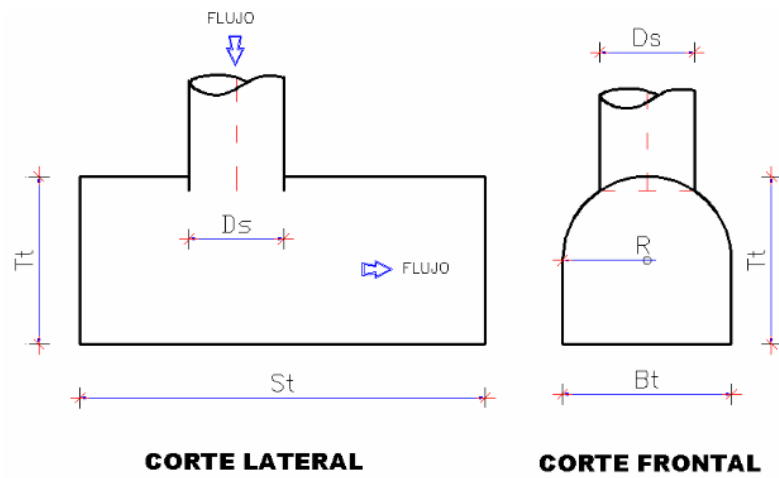
**Figura 2.31** Principales objetivos de la cámara de disipación

**Fuente:** Haro & Jara (2006)

**Elaborado por:** Jhosselin Chanaluisa

Para el dimensionamiento de este componente se usarán las expresiones presentadas en la tesis de Haro y Jara (2006), en donde se muestran ecuaciones que dependen directamente del diámetro del tubo vertical, con este valor se halla la altura, el ancho y la longitud. Además, es conveniente determinar la distancia desde el eje del tubo vertical hacia la cara de la cámara de disipación esta expresión presenta Chiluisa y Guanoluisa

(2015) en su proyecto de titulación. Con estas expresiones se completa el diseño de la cámara de disipación.



**Figura 2.32** Corte lateral y transversal de la cámara de disipación

**Fuente:** Haro & Jara (2006)

$$4 \leq \frac{St}{D_s} < 6$$

**Ecuación 2.31** Longitud de la cámara de disipación

$$2 \leq \frac{Bt}{D_s} < 3$$

**Ecuación 2.32** Ancho de la cámara de disipación

$$2 \leq \frac{Tt}{D_s} < 3$$

**Ecuación 2.33** Altura de la cámara de disipación

$$S_b = \left[ \frac{St}{3} \text{ ó } \frac{St}{4} \right]$$

**Ecuación 2.34** Distancia desde el eje del tubo vertical hacia la cara de la cámara de disipación

### 2.7.8 Canal de entrega

Este elemento tiene por objetivo conducir el agua captada de la cámara de disipación hacia el canal de descarga. Es recomendable diseñar este componente con las dimensiones adoptadas para el canal de aproximación debido a que no se conoce con exactitud el comportamiento hidráulico del flujo a la salida de la cámara de disipación. (Chiluisa y Guanoluisa , 2015). El requisito principal del canal de entrega es evitar fluctuaciones en el flujo por la mezcla de aire y agua. Por tanto se debe asegurar la recirculación del aire y ventilación dentro de la cámara de disipación pues así se evitan inconvenientes en el canal de entrega (Haro & Jara, 2006).

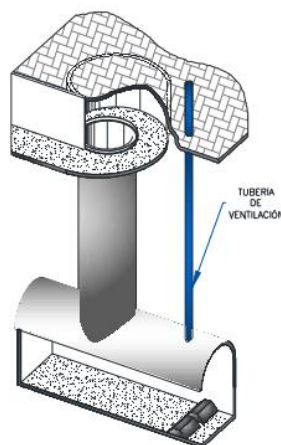


**Figura 2.33** Canal de entrega

**Fuente:** Haro y Jara (2006)

### 2.7.9 Tubería de ventilación

Se coloca en vórtices de descarga con aproximación supercrítica, el cual está conectado con la superficie (presión atmosférica) y la cámara de disipación. La función principal es la de asegurar de ventilación y recirculación de aire dentro de la cámara disipadora evitando posibles presiones.



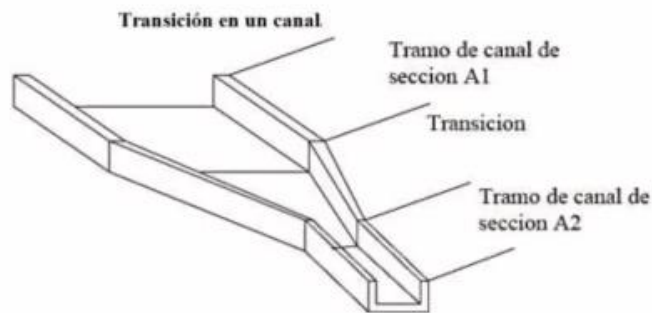
**Figura 2.34** Tubería de ventilación

**Fuente:** Chiluisa y Guanoluisa (2015)

### 2.7.10 Diseño de Transiciones

Las transiciones con estructuras complementarias en canales se usan para modificar de forma gradual la sección transversal del canal, cuando se unen dos canales con diferentes secciones, pendientes. Estas estructuras se diseñan al ingreso o salida de estructuras como: rápidas, desarenadores, alcantarillas, sifones invertidos, etc. (Villón, 2005).

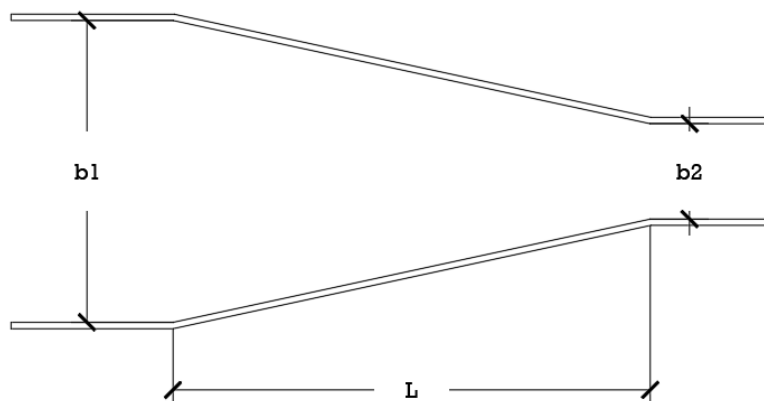
Se diseña este tipo de estructuras con el fin de eliminar ondas cruzadas, evitar pérdidas de energía, otras turbulencias, asegurar la estabilidad de la estructura así como el flujo del agua. (Chow, 1994)



**Figura 2.35** Vista isométrica de la transición en un canal

**Fuente:** Villón (2005)

En este caso resulta necesario diseñar una transición debido a que se debe conectar la sección de recolección del flujo (galería) con el canal de derivación de caudal. Para diseñar esta transición se usa la Ecuación 2.35



**Figura 2.36** Vista en planta de una transición

**Fuente:** Villón (2005)

$$L = \frac{b_1 - b_2}{2 \tan \theta}$$

**Ecuación 2.35** Longitud de la transición

Donde:

$L$ : longitud de la transición

$b_1, b_2$  : ancho de las secciones transversales

$\theta$ : ángulo formado entre los espejos de agua

Según el Bureau of Reclamation determina que el ángulo óptimo que conectan los lados del canal entre las secciones de entrada y salida es de 12.5° porque se consiguen pérdidas mínimas en la transición.(Chow, 1994). Por lo que se va a diseñar este elemento usando la Ecuación 2.36

$$L_{\text{óptima}} = \frac{b_1 - b_2}{2 \tan (12.5)}$$

**Ecuación 2.36** Longitud óptima de la transición

## 2.8 Consideraciones para el Presupuesto

Una vez finalizado el dimensionamiento de los elementos que intervienen en el diseño de captación con reja de fondo se procede a estimar el presupuesto referencial de los materiales que forman parte de cada elemento, así como la mano de obra y los consumibles.

### 2.8.1 Materiales

Para determinar los costos de los materiales, se realizaron cotizaciones con el fin de conocer el valor estimado. Los materiales empleados incluyen planchas de acrílico para el diseño del canal de recolección, la transición y el vórtice de descarga, así como acero para las rejas de fondo. También se utiliza tol galvanizado para la placa. Además, se ha considerado la construcción de un soporte metálico para fijar los elementos diseñados por lo que se requiere de perfilera de acero, triplex y pintura para darle un acabado entre otros.

### 2.8.2 Mano de Obra y Consumibles

Por recomendación del Ing. Pablo Pinto, docente de la carrera de Ingeniería Civil de la EPN, se sugiere colocar en la descripción del presupuesto, la mano de obra y consumibles. Los porcentajes planteados para estas descripciones se realizan de acuerdo con el material utilizado. En las estructuras que son a base de acrílico se sugiere considerar en mano de



obra el 30% del costo total de los materiales, y en consumibles el 15% del total de la mano de obra. Por otro lado, en el soporte metálico se usa acero y debe ser soldado por lo que se sugiere que en mano de obra se considere el 50% del costo total de los materiales.

### 2.8.3 Presupuesto

Para estimar el presupuesto se debe calcular las cantidades de obra de los elementos de las alternativas propuestas, de acuerdo con el dimensionamiento planteado en el apartado **2.7 Dimensionamiento de los componentes hidráulicos**, seguidamente se estiman los costos de cada elemento los cuales consideran los materiales, la mano de obra y los consumibles. Para ello se ha dividido por elementos y se llenará siguiendo el esquema de la Tabla 2.7

Para el presupuesto final, se considera que el presupuesto se elabora en la etapa de factibilidad; por lo tanto, se utiliza un presupuesto de Clase 4 de acuerdo con la Figura 2.37. Este tipo de presupuesto se emplea comúnmente durante la fase de concepto o de estudio preliminar. En este caso, se va a estimar en un rango de precisión de -10% a 10%.

CLASE	MÉTODO	CARACT. PRIMARIA	CARACTERÍSTICAS SECUNARIAS		
		NIVEL DE MADUREZ (% DE DEFINICIÓN)	USO	METODOLOGIA	% DE PRECISIÓN ESPERADO
CLASE 5	COMPARATIVO	0% AL 2%	Prefactibilidad	Estadístico (factores y/o modelos). Experiencia. Usa información histórica de proyectos similares	-50% AL +100%
CLASE 4	POR UNIDAD	1% AL 15%	Diseño conceptual y Factibilidad	Básicamente estadístico. Datos históricos. Por grupos de actividades	-30% AL +50%
CLASE 3	PARAMÉTRICO	10% AL 40%	Autorización de presupuesto o control	Mezcla de métodos, pero básicamente estadístico, basado en datos reales de obras anteriores	-20% AL 30%
CLASE 2		30% AL 75%	Control y concurso	Básicamente determinístico, basado en datos reales de obras anteriores	-15% AL +20%
CLASE 1	CUBICAJE	5% AL 100%	Para concurso y solicitud de crédito	Determinístico (menor incertidumbre)	-10% AL +15%

**Figura 2.37** Clases de Presupuesto

**Fuente:** Pablo Pinto

**Tabla 2.7** Esquema de análisis del presupuesto

ALTERNATIVA 1				
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO	SUBTOTAL
<b>1.NOMBRE DEL ELEMENTO</b>				
<b>Materiales</b>				
Mano de Obra	30 ó 50%M			
Consumibles	15%MO			
<b>SUBTOTAL</b>				
<b>TOTAL</b>				
<b>PRESUPUESTO CLASE 4 (-10% a 10%)</b>			<b>-10% Total</b>	<b>10% Total</b>

Elaborado por: Jhosselin Chanaluisa

### 3. RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 3.1 Resultados

##### 3.1.1 Cálculo de los calados de la rápida

###### 3.1.1.1 Calado inicial del canal de entrada

A continuación, se presentan los cálculos para obtener el calado inicial del canal de entrada de la rápida usando la Ecuación 1.1 de flujo uniforme, este tramo posee una pendiente de 10.959%, un n de Manning de 0.011 (para fondo de madera), el caudal circulante es de 0.047 m<sup>3</sup>/s con un ancho de 0.4 m. En base a estas características del canal se determina un Número de Froude de 4.9 que señala que el flujo a la entrada de la rápida de descarga tiene una aproximación supercrítica.

**Tabla 3.1** Cálculo del calado inicial del canal de entrada de la rápida

Denominación	Símbolo	Valor	Unidad
Caudal de diseño	Q <sub>d</sub>	0,047	m <sup>3</sup> /s
Ancho	B	0,40	m
Pendiente	S	0,10959	m/m
Coefficiente de Manning	N	0,011	-
Gravedad	G	9,81	
Calado inicial	y <sub>n</sub>	0,039	
Velocidad inicial	V <sub>o</sub>	3,03	m/s <sup>2</sup>

Froude del flujo de aproximación	Fr	4,90	-
<b>Tipo de Flujo</b>	<b>Supercrítico</b>		

Elaborado por: Jhosselin Chanaluisa

### 3.1.1.2 Calado crítico

Usando la Ecuación 2.1 se calculó el calado crítico de la rápida de descarga de donde se obtiene un calado de 0.112 m.

**Tabla 3.2** Cálculo del calado crítico en la sección de control

Denominación	Símbolo	Valor	Unidad
Caudal de diseño	Qd	0,047	m <sup>3</sup> /s
Ancho	b	0,40	m
Caudal unitario	q	0,12	m <sup>3</sup> /ms
Gravedad	g	9,81	m/s <sup>2</sup>
Calado critico	yc	0,112	m
Velocidad crítica	Vo	1,05	m/s <sup>2</sup>
Froude del flujo de aproximación	Fr	1,00	-
<b>Tipo de Flujo</b>	<b>Crítico</b>		

Elaborado por: Jhosselin Chanaluisa

### 3.1.1.3 Calado de la pendiente inclinada

A continuación, se muestra el cálculo del calado de la rápida de descarga de donde se determina que el flujo que circula a través de la rápida de descarga es supercrítico. Se usa un n de Manning de 0.01 (para fondo con acrílico), una inclinación del 100%.

**Tabla 3.3** Cálculo del calado de la rápida de descarga

Denominación	Símbolo	Valor	Unidad
Caudal de diseño	Qd	0,047	m <sup>3</sup> /s
Ancho del canal	b	0,4	m
Gravedad	g	9,81	m/s <sup>2</sup>
Coefficiente de Manning	n	0,01	-

Pendiente del canal	S	1	m/m
Profundidad del canal	$y_n$	0,018	m
Velocidad	$V_o$	6,48	m/s <sup>2</sup>
Froude del flujo de aproximación	Fr	15,4	-
<b>Tipo de Flujo</b>	<b>Supercrítico</b>		

**Elaborado por:** Jhosselin Chanaluisa

### 3.1.1.4 Calado aireado

Se presenta el cálculo del calado con concentración de aire del 90% usando la Ecuación 2.10, de donde se obtiene un valor de profundidad de 0.026 m, este calado se produce una vez finalizada la capa límite, usando la Ecuación 2.4 se determina que la longitud de la capa límite es de 3.49m como se muestra en la Tabla 3.4. Considerando que la rápida tiene una longitud de 3.84m se entiende que una vez finalizada la capa límite inicia el tramo que comprende el calado  $y_{90}$ .

**Tabla 3.4** Cálculo del calado con concentración de aire del 90%

Denominación	Símbolo	Valor	Unidad
Caudal de diseño	$Q_d$	0,047	m <sup>3</sup> /s
Ancho del canal	B	0,40	m
Ángulo	$\Theta$	45	°
Valor de rugosidad	K	0,003	mm
Coeficiente de Manning	N	0,01	-
Gravedad	G	9,81	m/s <sup>2</sup>
Calado normal de la rápida	Y	0,018	m
Espejo de agua	B	0,40	m
Caudal unitario	q	0,12	m <sup>3</sup> /ms
Pendiente del canal	$I_o$	0,71	m/s <sup>2</sup>

Y <sub>o</sub>	Y <sub>o</sub>	0,112	-
Número de Froude en condición de flujo aireado	Fr <sub>o</sub>	8585764,65	-
Longitud a la que inicia la aireación	La	3,49	m
Calado a la que inicia la aireación	Ya	0,019	m
Número de Froude considerando el calado de inicio de la autoaireación	Fr <sub>a</sub>	13,78	-
Rugosidad relativa	E	3,85E-05	
Coefficiente de fricción para flujo sin aire al inicio de la admisión	λ <sub>a</sub>	0,0098	-
Concentración del aire	$\bar{c}$	0,618	-
Relación entre coeficientes de fricción internos	λ <sub>c</sub> /λ <sub>a</sub>	0,4	-
Coefficiente de fricción interna para flujo totalmente aireado	λ <sub>c</sub>	0,00392	-
Profundidad normal de agua clara	y <sub>n</sub>	0,010	m
Profundidad de la superficie de la mezcla agua-aire cuando la concentración de aire alcanza el 90%	y <sub>90</sub>	0,026	m

**Elaborado por:** Jhosselin Chanaluisa

### 3.1.2 Perfil de aproximación de la rápida de descarga

Usando el método del paso directo se grafica el perfil de la rápida para ello se consideran los datos iniciales mostrados en la Tabla 3.5 , en base a estos datos se han realizado los diferentes cálculos determinar así la variación de caudales a lo largo de la rápida como se evidencia en el ANEXO I, a partir de estos datos y usando Excel se grafica el perfil de aproximación de la rápida.

**Tabla 3.5** Datos iniciales para determinar el perfil de flujo

<b>Datos</b>			
Caudal	Q	0,047	m <sup>3</sup> /s
Ancho canal	B	0,4	m
Talud	Z	0	m
Pendiente	S	1	
Rugosidad	n	0,01	-
Tirante inicial	yc	0,112	m
Tirante final	y	0,01813	m
Delta y	$\Delta y$	0,0020	m
Gravedad	g	9,81	m/s <sup>2</sup>

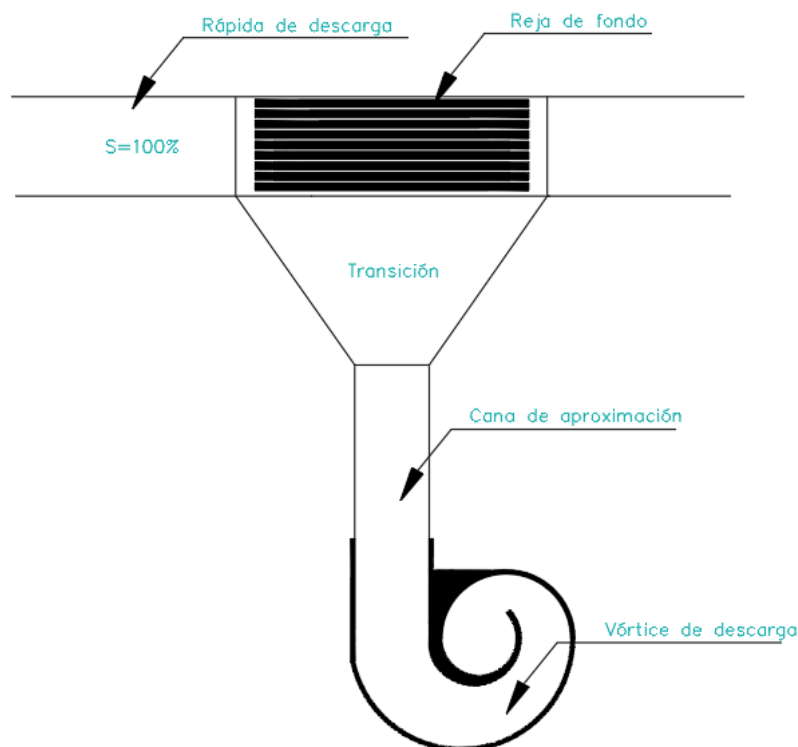
**Elaborado por:** Jhosselin Chanaluisa

En la Figura 3.1 se puede apreciar que el flujo inicia con un calado crítico como condición de calado inicial y a medida que transcurre el flujo se va aproximando al calado que fue calculado en la Tabla 3.3, con la finalidad de que se desarrolle completamente la curva de remanso en la rápida con una longitud de 3.84m se iteró el valor del calado aguas abajo, este calado fue de 0.01872 lo que quiere decir que efectivamente el tipo de perfil que se desarrolla en la rápida de descarga es una curva S2 lo que indica que tiene posee una aproximación supercrítica.



### 3.1.3.1 Desarrollo del esquema general

Se ha planteado la colocación de una reja de captación basada en los criterios para un régimen supercrítico, a continuación, se propone la colocación de un canal recolector con una sección transversal de tipo trapezoidal. Para que este canal se conecte con el vórtice se descarga fue necesario plantear una transición que hace que se genere el cambio de una sección transversal a otra, una vez pase el flujo por este elemento se conecta con el canal de aproximación al vórtice de descarga. Este esquema se muestra en la Figura 3.2



**Figura 3.2** Esquema general

**Elaborado por:** Jhosselin Chanaluisa

### 3.1.3.2 Reja

En la Tabla 3.6 se muestra las características geométricas de las barras tanto el diámetro, el espaciamiento entre ellas, el índice de huecos, la longitud, la dirección seleccionada es longitudinal, el número de barras para cada tipo, debido a que se propone que la reja sea desmontable va a ser necesario que la longitud de reja sea fija ,por tanto se plantea que las longitudes de los demás tipos de reja sean igual a la longitud de la reja circular, se tomó como referencia este tipo de barra por ser la longitud óptima de diseño según el estudio de Wong.En este caso se obtuvo una longitud de 1.10m por tanto se realiza variaciones en la inclinación de los demás tipos de reja con la finalidad de que se ajusten a esta longitud. El



ancho de la reja también es un parámetro fijo debido a la configuración de la rápida de descarga.

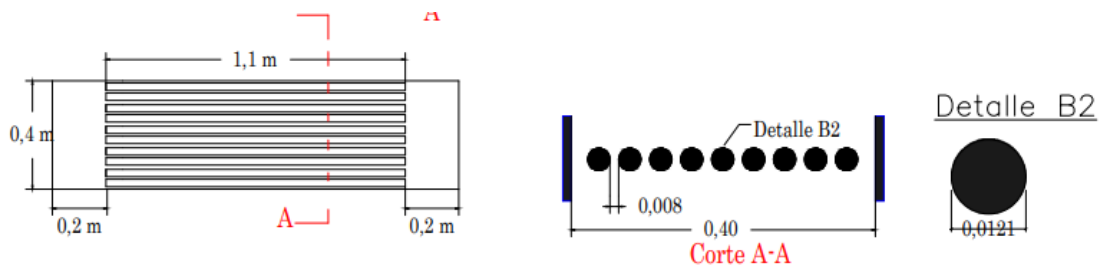
**Tabla 3.6** Dimensiones geométricas de las barras

Parámetros calculados	Tipo de barra				
	Circular	Trapezoidal	I	Cuadrada	Diamante
Diámetro de la barra bw (mm)	12,10	10,50	10,50	12,70	11,88
Espacio entre barras b1 (mm)	8,00	9,00	9,00	12,50	8,00
Espacio entre ejes bc (mm)	20,10	19,50	19,50	25,20	19,88
Índice de huecos	0,40	0,46	0,46	0,50	0,40
Longitud (m)	1,10				
Ancho de reja (m)	0,40				
Dirección de la reja	Longitudinal				
Pendiente de la reja (°)	9,10	8,20	8,20	7,70	9,00
Pendiente de la reja (%)	16,02	14,41	14,41	13,52	14,41
Número de barras	19,90	20,51	20,51	15,87	20,12

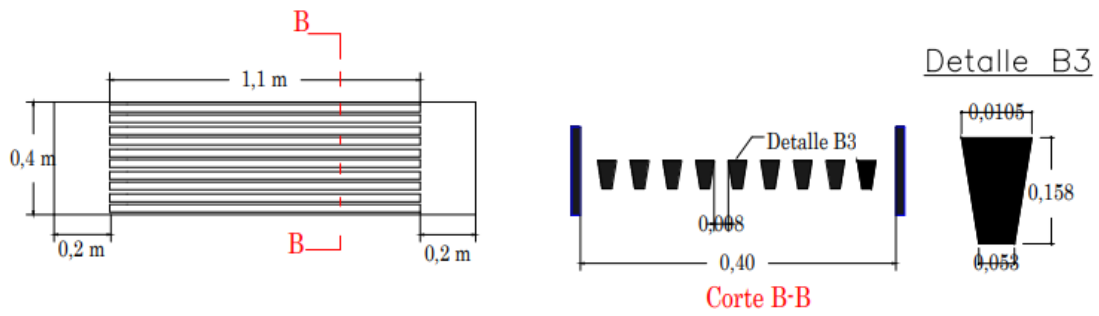
**Elaborado por:** Jhosselin Chanaluisa

Seguidamente se muestran los esquemas gráficos para cada tipo de reja, se ha considerado el dejar un espacio libre entre barras de 0.20m para cada lado de la reja.

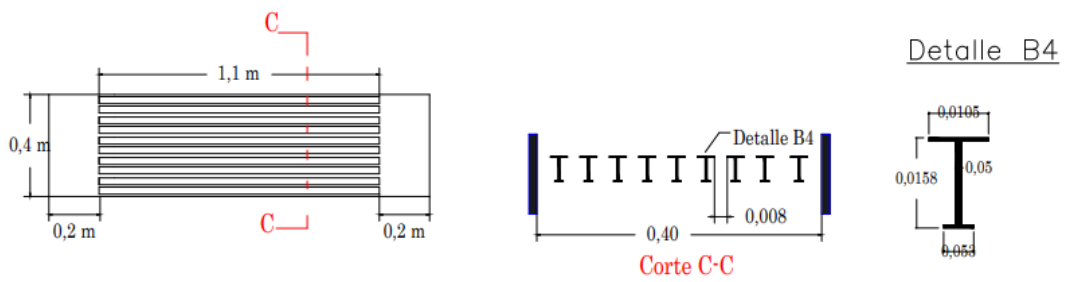
a) Reja con barra tipo circular



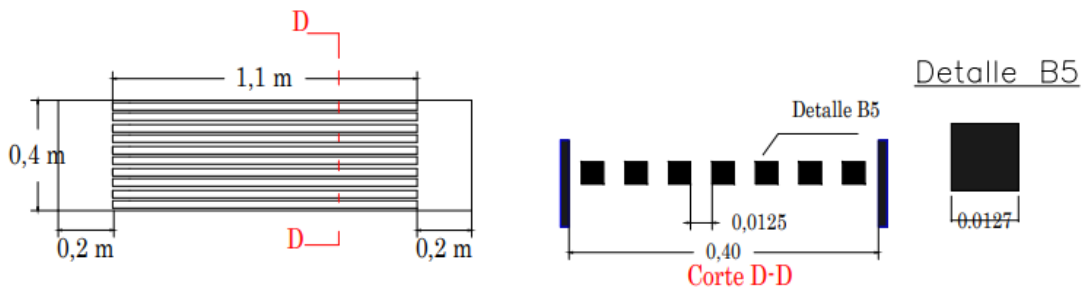
b) Reja con barra tipo trapezoidal



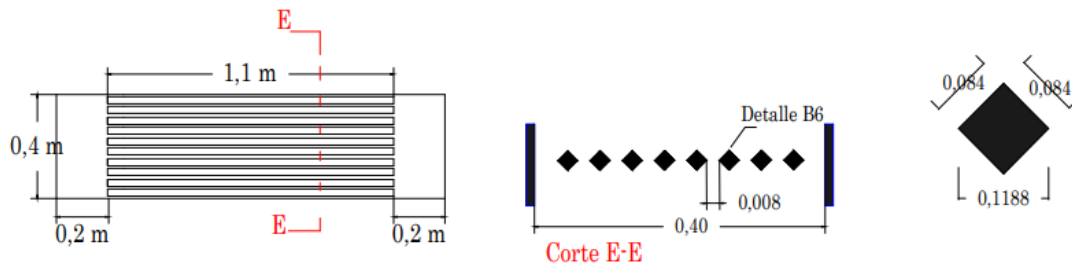
c) Reja con barra tipo I



d) Reja con barra tipo cuadrada



e) Reja con barra tipo diamante

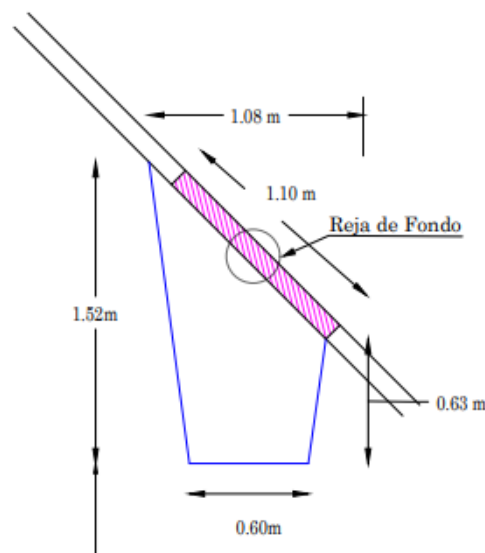


**Figura 3.3** Vista en planta y corte transversal para cada tipo de reja

**Elaborado por:** Jhosselin Chanaluisa

### 3.1.3.3 Canal de recolección

Dado que este canal de recolección debe conectarse con el vórtice de descarga, su ubicación depende de las dimensiones adoptadas para la altura del tubo vertical y la cámara de disipación, en base a este criterio se tomó como referencia el plano existente que se realizó en la tesis de Plúa (2009), cabe destacar que estas dimensiones fueron verificadas en el estudio topográfico realizado. Por tanto, sirve de base para plantear la ubicación de esta galería de tipo trapezoidal. La implementación de este elemento se puede apreciar en el ANEXO II Las dimensiones adoptadas para este canal se visualizan en la Figura 3.4



**Figura 3.4** Detalle de las dimensiones adoptadas para el canal de recolección

**Elaborado por:** Jhosselin Chanaluisa

En base al esquema anteriormente presentado, se llevaron a cabo los cálculos para verificar si las dimensiones adoptadas para este canal pueden asegurar el ingreso total del caudal de diseño. Para esto, se determinó la profundidad del canal utilizando la Ecuación 1.1 mediante iteraciones. Las características hidráulicas como el área, el perímetro y el radio hidráulico fueron obtenidas utilizando las ecuaciones Ecuación 2.20, Ecuación 2.21, Ecuación 2.22, respectivamente. Una vez determinada la profundidad basada en las dimensiones propuestas, se pudo verificar que estas dimensiones satisfacen el caudal que se desea captar pues tiene un caudal calculado de  $0.049 \text{ m}^3/\text{s}$ , además el calado que se obtuvo es de  $0.060 \text{ m}$  y este dato es menor a la altura de  $0.68 \text{ m}$  mostrada en la Figura 3.4 por tanto se asegura que la galería pueda recolectar el caudal de diseño sin existir desbordamientos.

**Tabla 3.7** Dimensiones adoptadas para el canal de recolección

<b>Datos de diseño</b>			
<b>Denominación</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Caudal de diseño	Qd	0,047	m <sup>3</sup> /s
Manning	n	0,01	
Gravedad	g	9,81	
<b>Dimensiones adoptadas</b>			
Ancho del canal	b	0,60	m
Ancho de espejo de agua	T	1,08	m
Talud	z	0,0134	
Pendiente del canal de recolección	S	0,01	m/m
Calado	y	0,060	m
Área	A	0,04	m <sup>2</sup>
Perímetro	P	0,72	m
Radio hidráulico	Rh	0,05	m
Profundidad hidráulica	d	0,03	m
Velocidad	Vo	1,30	m/s <sup>2</sup>
Froude del flujo de aproximación	Fr	2,28	-
Caudal calculado	Q	0,049	m <sup>3</sup> /s

**Elaborado por:** Jhosselin Chanaluisa

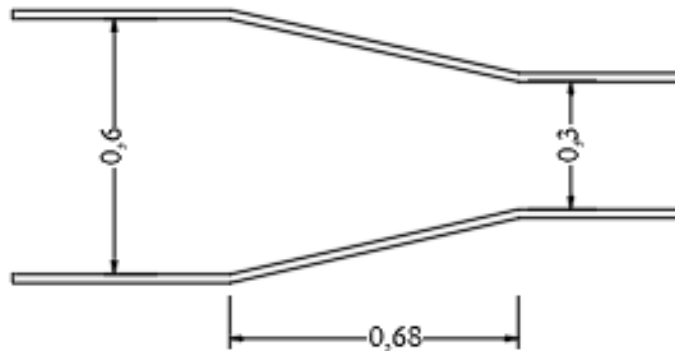
### 3.1.3.4 Transición

Con el fin de conectar el canal de recolección con el canal de aproximación al vórtice de descarga, se determina la longitud de transición con los datos de los anchos de las secciones transversales como observa en la Tabla 3.8, y en la Figura 3.5 se observa el esquema en planta con las respectivas dimensiones.

**Tabla 3.8** Longitud de Transición

$b_1$	0,6	m
$b_2$	0,3	m
Ángulo	12,5	°
Longitud	0,68	m

**Elaborado por:** Jhosselin Chanaluisa



**Figura 3.5** Esquema con dimensiones de transición

**Elaborado por:** Jhosselin Chanaluisa

### 3.1.3.5 Vórtice de descarga

#### 3.1.3.5.1 Canal de aproximación

A continuación, se presenta el cálculo del canal de aproximación al vórtice de descarga, para el dimensionamiento de este elemento se considera un ancho de 0.3m, la pendiente que se ha considerado es del 1%, se plantea diseñar esta estructura con fondo de acrílico por tanto el  $n$  de Manning es de 0.01, el tipo de régimen para este elemento es supercrítico con un valor de  $Fr=1.5$  por tanto se cumple la condición de ser mayor que 1.3, lo cual asegura que no existirán perturbaciones al ingreso del vórtice. En la Tabla 3.9 se aprecia los datos calculados para el canal de aproximación.

**Tabla 3.9** Datos del canal de aproximación al vórtice de descarga

<b>Datos de ingreso</b>			
<b>Denominación</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Caudal de diseño	Qd	0,047	m <sup>3</sup> /s
Ancho del canal de aproximación	b	0,3	m
Caudal unitario	q	0,16	m <sup>3</sup> /ms
Gravedad	g	9,81	m/s <sup>2</sup>
Coeficiente de Manning	n	0,01	-
Pendiente del canal de aproximación	J <sub>so</sub>	0,010	m/m
<b>Datos calculados</b>			
Calado critico	yc	0,14	m
Profundidad del canal de aproximación	h <sub>o</sub>	0,10	m
Velocidad	V <sub>o</sub>	1,53	m/s <sup>2</sup>
Froude del flujo de aproximación	Fr	1,5	-

**Elaborado por:** Jhosselin Chanaluisa

### 3.1.3.5.2 Tubo vertical

A continuación, se presentan las dimensiones propuestas para el tubo vertical. Para ello se usa la Ecuación 2.29 con la que se obtiene el diámetro del tubo de caída vertical, para efectos constructivos se sugiere un diámetro de 0.3 m, además se muestra la longitud que se calculó usando la Ecuación 2.30. En la Tabla 3.10 se muestran dichos resultados.

**Tabla 3.10** Tubo de caída vertical

<b>Denominación</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Diámetro del pozo	D <sub>scal</sub>	0,23	m
Diámetro del pozo ajustado	D <sub>s</sub>	0,3	m
Longitud del pozo	H <sub>T</sub>	0,9	m

**Elaborado por:** Jhosselin Chanaluisa

### 3.1.3.5.3 Cámara de entrada

Luego, se dimensiona la cámara de entrada al vórtice de descarga para este caso el ancho que se determinó por la geometría fue de 0.30 m, pues se debe garantizar la condición de diseño mostrada en la Ecuación 2.26. Se obtuvo las dimensiones de los radios de giro y excentricidades con las Ecuación 2.23 y Ecuación 2.25 respectivamente. Además, se determinó que se va a tener 6 cm de sobreelevación del flujo con la Ecuación 2.27 el cual estará ubicado a  $55.46^\circ$  usando la Ecuación 2.28. En la Tabla 3.11 se muestran las dimensiones adoptadas.

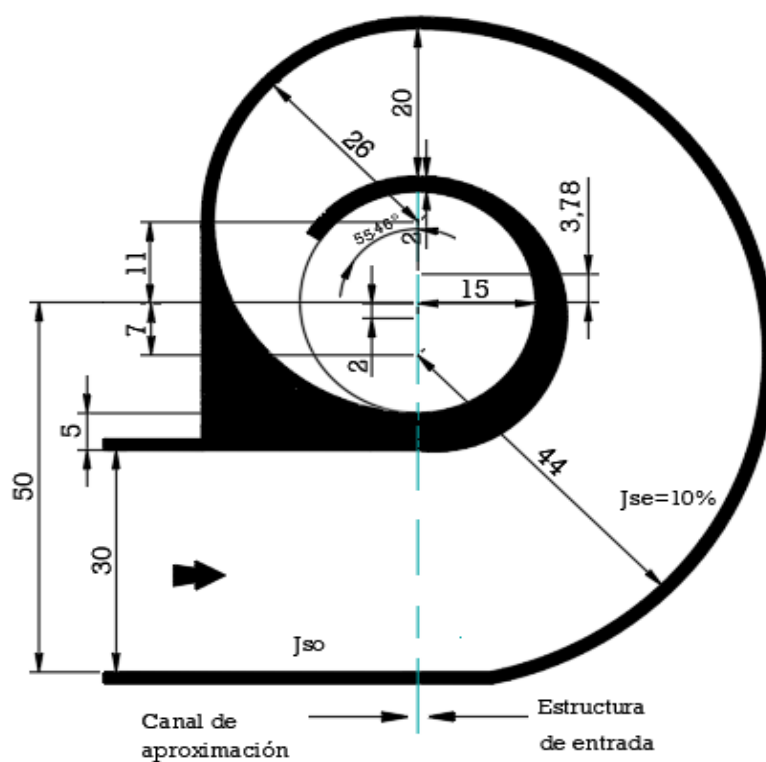
**Tabla 3.11** Dimensiones de la cámara de entrada

<b>Condiciones de diseño</b>			
<b>Denominación</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Ancho del canal de aproximación	b	0,3	m
Pendiente de la cámara de entrada	$J_{se}$	0,100	m/m
Factor $\eta$	$\eta$	1,25	-
Dimensiones constructivas	c	0,2	m
	s	0,02	m
	$s_1$	0,05	m
<b>Datos calculados</b>			
Radio del eje	a	0,5	m
Dimensión e1	e1	0,07	m
Dimensión e2	e2	0,11	m
Dimensión e3	e3	0,02	m
Radios de giro	R4	0,17	m
	R3	0,19	m

	R2	0,26	m
	R1	0,44	m
Sobreelevación	hm	0,06	m
Ubicación de la sobreelevación	$\alpha M$	55,46	

**Elaborado por:** Jhosselin Chanaluisa

En el esquema de la Figura 3.6 se muestra detalladamente cada una de las dimensiones calculadas para el diseño del vórtice de descarga.



**Figura 3.6** Dimensionamiento de la cámara de entrada al vórtice de descarga

**Elaborado por:** Jhosselin Chanaluisa

### 3.1.3.5.4 Cámara de disipación

Una vez determinadas las dimensiones del vórtice de descarga se hallan las características geométricas de la cámara de disipación ubicada al pie de esta estructura. En la Tabla 3.12 se muestran las longitudes de este elemento.

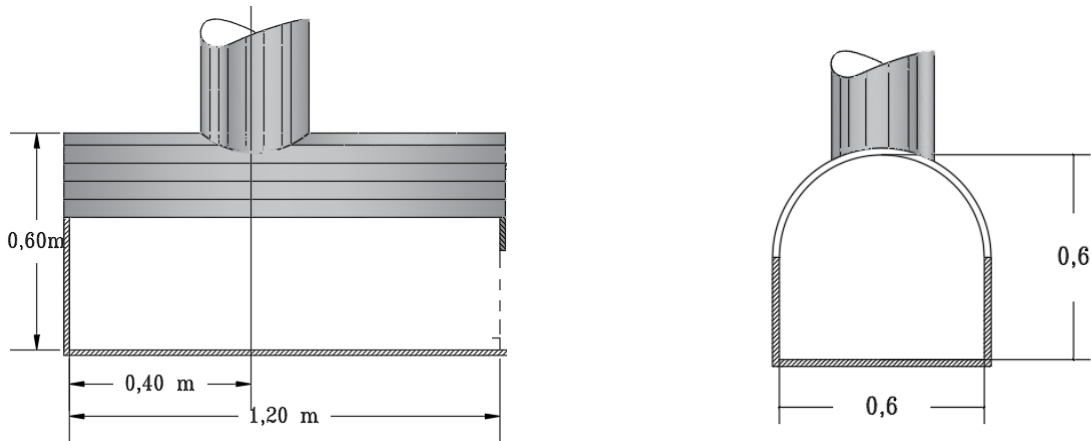


**Tabla 3.12** Cámara de disipación

Denominación	Símbolo	Valor	Unidad
Longitud	St	1,2	m
Ancho	Bt	0,6	m
Altura	Tt	0,6	m
Distancia del eje del tubo vertical a la cara	Sb	0,4	m

**Elaborado por:** Jhosselin Chanaluisa

Además, en la Figura 3.7 se presenta el esquema grafico de la cámara de disipación planteada



**Figura 3.7** Corte longitudinal y transversal de la cámara de disipación

**Elaborado por:** Jhosselin Chanaluisa

### 3.1.3.5 Canal de Salida

#### 3.1.3.5.1 Alternativa 1

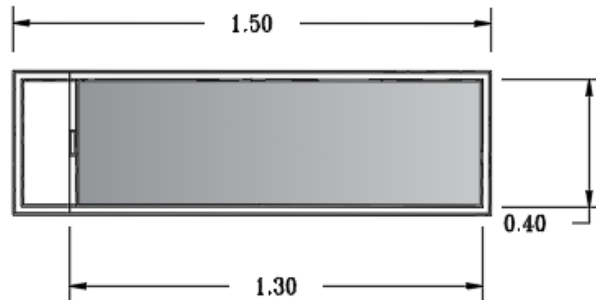
Este canal conecta la cámara de disipación con la estructura que se está planeando diseñar, las dimensiones adoptadas son de 40 cm para el ancho y una longitud de 1,34m como se muestra en el ANEXO III

#### 3.1.3.5.2 Alternativa 2

Esta alternativa contempla el mismo dimensionamiento del esquema general pero la consideración es que el flujo captado va a hacer desviado hacia el canal de recolección, situado a lado de la rápida de descarga. Las dimensiones adoptadas para este canal son de 40cm para el ancho y una longitud de 1. 18m.Como se muestra en el ANEXO IV

### 3.1.3.6 Dimensionamiento del elemento complementario a la captación

Para implementar el diseño de captación con reja de fondo es necesario que la rápida se conecte con la captación por lo que se debe extraer una parte del fondo del canal con el fin de colocar la reja. Siguiendo la premisa planteada al inicio este trabajo se planea que las rejas sean desmontables con el fin de no perturbar el normal funcionamiento de la rápida de descarga original; por lo que fue necesario diseñar un elemento que reemplace el fondo que será retirado y tenga dos funciones: la primera es sellar la rápida de descarga y que el flujo circule normalmente y la segunda que, al retirar esta placa, permita la interceptación del flujo hacia el sistema de captación propuesto. Las dimensiones adoptadas para esta placa se observan en la Figura 3.8 ,estas dimensiones se plantearon en función de las dimensiones de la reja.



**Figura 3.8** Dimensiones de la placa propuesta  
Elaborado por: Jhosselin Chanaluisa

### 3.1.4 Presupuesto

Siguiendo las consideraciones descritas en el apartado 2.8 Consideraciones para el Presupuesto, se ha obtenido la Tabla 3.13 la cual describe el presupuesto para la Alternativa 1, y en la Tabla 3.14 se detalla el presupuesto para la Alternativa 2. Los costos de los materiales cotizados, que incluyen un 15% de IVA, se encuentran en el ANEXO VII

**Tabla 3.13** Presupuesto referencial para la Alternativa 1

ALTERNATIVA 1				
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO	SUBTOTAL
<b>1.CONSTRUCCIÓN DE LA PLACA</b>				
<b>Materiales</b>				
Tol galvanizado (1,22*2,44) 0,9mm (1/25")	m2	0,52	25,25	4,41

Correa G 60X30X10 x 6m(2mm)	m	6	12	12
Rodamiento aéreo 21/2	u	4	7,6	30,4
Perno negro 5/16 X2 ½	u	6	0,123214	0,7393
Mano de Obra 50%M				23,78
<b>SUBTOTAL 1</b>				<b>71,33</b>
<b>2. CONSTRUCCIÓN DE LA REJA DE FONDO</b>				
Reja con barra tipo circular	u	1	110	110
Reja con barra tipo trapezoidal	u	1	200	200
Reja con barra tipo I	u	1	150	150
Reja con barra tipo cuadrada	u	1	170	170
Reja con barra tipo diamante	u	1	170	170
<b>SUBTOTAL 2</b>				<b>800</b>
<b>3.CANAL DE RECOLECCIÓN</b>				
<b>Materiales</b>				
Acrílico Liso 1,20x 1,80m x 5mm cristal	m2	2,6556	112,58	138,41
Mano de Obra 30%M				41,52
Consumibles 15%MO				6,23
<b>SUBTOTAL 3</b>				<b>186,16</b>
<b>4. TRANSICIÓN</b>				
<b>Materiales</b>				
Acrílico	m2	0,821	112,58	42,79
Mano de Obra 30%M				12,84
Consumibles 15%MO				1,93
<b>SUBTOTAL 4</b>				<b>57,55</b>
<b>5.CANAL DE APROXIMACIÓN AL VÓRTICE DE DESCARGA</b>				
<b>Materiales</b>				
Acrílico Liso 1,20x 1,80m x 5mm cristal	m2	0,65	112,58	33,88
Mano de Obra 30%M				10,16
Consumibles 15%MO				1,52
<b>SUBTOTAL 5</b>				<b>45,57</b>
<b>6.CONSTRUCCIÓN DEL VÓRTICE DE DESCARGA</b>				
<b>6.1 CÁMARA DE ENTRADA</b>				
<b>Materiales</b>				
Acrílico Liso 1,20x 1,80m x 5mm cristal	m2	2,08	112,58	108,18
Mano de Obra 30%M				32,45

Consumibles 15%MO				4,87
<b>6.2 TUBO VERTICAL</b>				
<b>Materiales</b>				
Acrílico Liso 1,20x 1,80m x 5mm cristal	m2	0,27	112,58	14,07
Mano de Obra 30%M				4,22
Consumibles 15%MO				0,63
<b>6.3 CAMARA DE DISIPACIÓN</b>				
<b>Materiales</b>				
Acrílico	m2	1,04	112,58	54,28
Mano de Obra 30%M				16,28
Consumibles 15%MO				2,44
<b>SUBTOTAL 6</b>				<b>237,43</b>
<b>7. CANAL DE SALIDA</b>				
<b>Materiales</b>				
Acrílico Liso 1,20x 1,80m x 5mm cristal	m2	1,742	112,58	90,79
Mano de Obra 30%M				27,24
Consumibles 15%MO				4,09
<b>SUBTOTAL 7</b>				<b>122,12</b>
<b>8. ESTRUCTURA DE SOPORTE</b>				
<b>Materiales</b>				
Tubo cuadrado 1 1/2X1/2 O (40x40mm) X6m	m	43,87	22	160,84
Angulo 25x3mm(1"X1/8") x6m	m	8,08	7,5	10,1
TEES 25X3mm (1"X1/8")x6m	m	1,8	11,50	3,45
Triplex 2,44*1,22* 9mm	m2	2,102	26,3	18,57
Thinner	gal	1	6,4	6,40
Adheprimer vinilico gris	gal	0,26	29	7,54
Anticorrosivo dura color gris	gal	0,26	12	3,12
Esmalte dura color negro	gal	0,26	12	3,12
Masilla plástica	lt	0,26	7,2	1,87
Electrodos	lb	1	17	17,00
Disco corte metálico	u	1	1,55	1,55
Disco de pulir	u	1	2,05	2,05
Regatón cuadrado 1"	u	6	0,102679	0,62
Regatón cuadrado 1 1/2	u	11	0,2	2,20
Mano de Obra 50%M				119,22

	<b>SUBTOTAL 8</b>	<b>357,65</b>
	<b>TOTAL</b>	<b>1877,80</b>
<b>PRESUPUESTO CLASE 4 (-10% a 10%)</b>	<b>1690,02</b>	<b>2065,58</b>

**Elaborado por:** Jhosselin Chanaluisa

**Tabla 3.14** Presupuesto referencial para la Alternativa 2

<b>ALTERNATIVA 2</b>				
<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>CANTIDAD</b>	<b>COSTO</b>	<b>SUBTOTAL</b>
<b>1.CONSTRUCCIÓN DE LA PLACA</b>				
<b>Materiales</b>				
Tol galvanizado (1,22*2,44) 0,9mm (1/25")	m2	0,52	25,25	4,41
Correa G 60X30X10 x 6m(2mm)	m	6	12	12
Rodamiento aéreo 21/2	u	4	7,6	30,4
Perno negro 5/16 X2 ½	u	6	0,123214	0,7393
Mano de Obra 50%M				23,78
<b>SUBTOTAL 1</b>				<b>71,33</b>
<b>2. CONSTRUCCIÓN DE LA REJA DE FONDO</b>				
Reja con barra tipo circular	u	1	110	110
Reja con barra tipo trapezoidal	u	1	200	200
Reja con barra tipo I	u	1	150	150
Reja con barra tipo cuadrada	u	1	170	170
Reja con barra tipo diamante	u	1	170	170
<b>SUBTOTAL 2</b>				<b>800</b>
<b>3.CANAL DE RECOLECCIÓN</b>				
<b>Materiales</b>				
Acrílico Liso 1,20x 1,80m x 5mm cristal	m2	2,6556	112,58	138,41
Mano de Obra 30%M				41,52
Consumibles 15%MO				6,23
<b>SUBTOTAL 3</b>				<b>186,16</b>
<b>4. TRANSICIÓN</b>				
<b>Materiales</b>				
Acrílico Liso 1,20x 1,80m x 5mm cristal	m2	0,821	112,58	42,79
Mano de Obra 30%M				12,84

Consumibles	15%MO				1,93
<b>SUBTOTAL 4</b>					<b>57,55</b>
<b>5.CANAL DE APROXIMACIÓN AL VÓRTICE DE DESCARGA</b>					
<b>Materiales</b>					
Acrílico Liso 1,20x 1,80m x 5mm cristal		m2	0,65	112,58	33,88
Mano de Obra	30%M				10,16
Consumibles	15%MO				1,52
<b>SUBTOTAL 5</b>					<b>45,57</b>
<b>6.CONSTRUCCIÓN DEL VÓRTICE DE DESCARGA</b>					
<b>6,1 CÁMARA DE ENTRADA</b>					
<b>Materiales</b>					
Acrílico Liso 1,20x 1,80m x 5mm cristal		m2	2,08	112,58	108,18
Mano de Obra	30%M				32,45
Consumibles	15%MO				4,87
<b>6.2 TUBO VERTICAL</b>					
<b>Materiales</b>					
Acrílico Liso 1,20x 1,80m x 5mm cristal		m2	0,27	112,58	14,07
Mano de Obra	30%M				4,22
Consumibles	15%MO				0,63
<b>6.3 CAMARA DE DISIPACIÓN</b>					
<b>Materiales</b>					
Acrílico Liso 1,20x 1,80m x 5mm cristal		m2	1,04	112,58	54,28
Mano de Obra	30%M				16,28
Consumibles	15%MO				2,44
<b>SUBTOTAL 6</b>					<b>237,43</b>
<b>7. CANAL DE SALIDA</b>					
<b>Materiales</b>					
Acrílico Liso 1,20x 1,80m x 5mm cristal		m2	1,534	112,58	79,95
Mano de Obra	30%M				23,99
Consumibles	15%MO				3,60
<b>SUBTOTAL 7</b>					<b>107,54</b>
<b>8. ESTRUCTURA DE SOPORTE</b>					
<b>Materiales</b>					
Tubo cuadrado 1 1/2X1/2 O (40x40mm) X3 BR		m	43,87	22	160,84
Angulo 25x3mm(1"X1/8")		m	7,76	7,5	9,7

TEES 25X3mm (1"X1/8")	m	1,80	11,5	3,45
Tríplex 2,44*1,22* 9mm	m2	2,038	26,3	18,01
Thinner	gal	1	6,4	6,40
Adheprimer vinilico gris	gal	0,26	29	7,54
Anticorrosivo dura color gris	gal	0,26	12	3,12
Esmalte dura color negro	gal	0,26	12	3,12
Masilla plástica	lt	0,26	7,2	1,87
Electrodos	lb	1	17	17,00
Disco corte metálico	u	1	1,55	1,55
Disco de pulir	u	1	2,05	2,05
Regatón cuadrado 1"	u	6	0,102679	0,62
Regatón cuadrado 1 ½	u	11	0,2	2,20
Mano de Obra 50%M				118,73
<b>SUBTOTAL 8</b>				<b>356,20</b>
<b>TOTAL</b>				<b>1861,77</b>
<b>PRESUPUESTO CLASE 4 (-10% a 10%)</b>			<b>1675,59</b>	<b>2047,95</b>

Elaborado por: Jhosselin Chanaluisa

### 3.1.5 Análisis de Factibilidad de implementación del sistema propuesto

#### 3.1.5.1 Alternativa 1

La construcción del esquema general es factible gracias al uso de acrílico para el fondo y las paredes, un material fácilmente disponible en el mercado. Además, la estructura de soporte, hecha de acero, también puede ser realizada sin problemas.

En cuanto al dimensionamiento de la reja del fondo, al ser dimensiones específicas para laboratorio, no se encuentran fácilmente en el mercado, por lo que será necesario fabricarlas conforme a los planos diseñados.

Desde el punto de vista técnico, se logró dimensionar todos los componentes de esta alternativa, adaptando la geometría al espacio disponible en el laboratorio. En cuanto al canal de salida, es factible conectarlo a la estructura actualmente en proceso de diseño. Sin embargo, esto implica la necesidad de construir dicha estructura para poder implementar esta alternativa. Por lo que su implementación depende directamente de esta estructura. Por otro lado, perturba el espacio de ingreso hacia las demás estructuras como se evidencia en el ANEXO III

En cuanto al análisis del presupuesto de la implementación de esta alternativa se ha realizado la Tabla 3.13 donde se resume costo de cada uno de los elementos, de donde se puede determinar que el costo de la construcción de las rejillas es el rubro con mayor estimación de presupuesto pues representa el 42.60% del presupuesto final, y el rubro con menor costo es el de la transición con un porcentaje del 3.06%. Por otro lado, de la Tabla 3.13 se observa que el presupuesto oscila entre el \$1690,02 a los \$2065.58

**Tabla 3.15** Porcentaje de costos de implementación para cada elemento de la Alternativa 1

DESCRIPCIÓN	COSTO	PORCENTAJE
1.Construcción de la placa	\$ 71,33	3,80%
2. Construcción de la reja de fondo	\$ 800,00	42,60%
3.Canal de recolección	\$ 186,16	9,91%
4. Transición	\$ 57,55	3,06%
5.Canal de aproximación al Vórtice de descarga	\$ 45,57	2,43%
6.Construcción del vórtice de descarga	\$ 237,43	12,64%
7. Canal de salida	\$ 122,12	6,50%
8.Estructura de soporte	\$ 357,65	19,05%
<b>TOTAL</b>	<b>\$ 1.877,80</b>	<b>100,00%</b>

Elaborado por: Jhosselin Chanaluisa

### 3.1.5.2 Alternativa 2

Al igual que la alternativa 1, el esquema general resulta factible en cuanto a la construcción debido a que se tienen los materiales y recursos necesarios para su implementación.

Por otro lado, en cuanto a la parte técnica, la propuesta de desvío al canal de recirculación es factible debido a que no perjudica el espacio de ninguna estructura existente en el laboratorio puesto que se coloca debajo de la rápida y su desvío es hacia el canal de recirculación como se aprecia en el ANEXO IV.

En lo que respecta al análisis económico de esta alternativa se puede realizar una comparación con la Alternativa 1 debido a que los costos que se mantienen fijos son los del esquema general; es decir, de la reja, transición, canal de aproximación al vórtice y el vórtice. Las cantidades en las que existe variación son en los elementos del canal de salida, así como del soporte metálico. Como se muestra en la Tabla 3.16, en lo que se refiere al



presupuesto de la Alternativa 1 con respecto a la Alternativa 2 se evidencia que existe una diferencia de \$16.03.

**Tabla 3.16** Comparación de costos de las alternativas

DESCRIPCIÓN	ALTERNATIVA 1	ALTERNATIVA 2	DIFERENCIA
	COSTO	COSTO	
1.Construcción de la placa	\$ 71,33	\$ 71,33	\$ -
2. Construcción de la reja de fondo	\$ 800,00	\$ 800,00	\$ -
3.Canal de recolección	\$ 186,16	\$ 186,16	\$ -
4. Transición	\$ 57,55	\$ 57,55	\$ -
5.Canal de aproximación al Vórtice de descarga	\$ 45,57	\$ 45,57	\$ -
6.Construcción del vórtice de descarga	\$ 237,43	\$ 237,43	\$ -
7. Canal de salida	\$ 122,12	\$ 107,54	\$ 14,58
8.Estructura de soporte	\$ 357,65	\$ 356,20	\$ 1,45
<b>TOTAL</b>	<b>\$ 1.877,80</b>	<b>\$ 1.861,77</b>	<b>\$ 16,03</b>

**Elaborado por:** Jhosselin Chanaluisa

### 3.2 Conclusiones

La construcción de estructuras a gran escala implica desafíos significativos en los ámbitos económico, constructivo e hidráulico. Predecir con precisión el comportamiento del agua frente a diversas estructuras, especialmente en condiciones de flujo supercrítico, representa un desafío considerable para los diseñadores. Por lo tanto, se comprende la importancia de contar con un modelo físico que simule condiciones que se asemejen a la realidad con la finalidad de contar con prácticas de laboratorio que permitan a los estudiantes comprender y asimilar la realidad de la relación entre las estructuras hidráulicas y el agua.

El modelo físico propuesto por Wong para abordar los desafíos de Hong Kong es relevante debido a sus contribuciones significativas al diseño de sistemas de captación con rejas de fondo. A lo largo de varios años, este tema ha sido objeto de investigación, con enfoques dirigidos hacia la generación de energía y el suministro de agua en condiciones de aproximación subcrítica. Sin embargo, el trabajo de Wong está enfocado en considerar un flujo supercrítico y controlar inundaciones.

Las condiciones geométricas de la rápida de descarga del LDH, especialmente por su pendiente pronunciada genera la aparición de velocidades altas, dando lugar a un flujo supercrítico. Esta condición se confirmó al determinar el perfil de la rápida utilizando el método del paso directo para un flujo gradualmente variado, obteniendo así una curva tipo S2. Esta curva logra desarrollarse a lo largo de toda la longitud de la rápida.

El diseño propuesto para la captación con reja de fondo en el LDH sigue la misma premisa que Wong consideró en su investigación, donde se supone que el flujo permanecerá en condiciones supercríticas antes y después de la intercepción. Por lo tanto, al diseñar los diferentes componentes del sistema, se emplearon expresiones dimensionales adecuadas para el flujo en régimen supercrítico.

Inicialmente, existía incertidumbre respecto al caudal de diseño necesario para dimensionar los elementos de captación y derivación. Por consiguiente, se realizó una prueba del modelo con el fin de estimar el caudal que estaba circulando por la rápida. Durante esta evaluación, se identificaron fugas en el modelo, lo cual afectaba la exactitud en el aforo del caudal. En consecuencia, se estableció como hipótesis considerar que todo el caudal se va a captar, por tanto, se optó por utilizar el caudal máximo de 47L/s documentado en la tesis de Plua (2001).

Para el dimensionamiento de la reja, se utilizaron las expresiones propuestas por Subramanya, ya que era la única referencia bibliográfica que consideraba la aproximación del flujo en régimen supercrítico. En este contexto, se empleó la expresión del coeficiente de descarga para un perfil tipo B1, el cual implica un flujo en régimen supercrítico con la posibilidad de formación de resalto aguas abajo. Este criterio se justifica debido a la presencia de un cuenco disipador justo debajo de la reja, donde se produce este resalto hidráulico.

Se determinó utilizando expresiones teóricas el calado inicial necesario para el diseño de la reja. Las alternativas que se analizaron fueron utilizar el calado normal de la rápida de descarga, calculado bajo la ecuación de flujo uniforme, o el calado con concentración de aire al 90%, común en canales con pendientes pronunciadas. Tras comparar la longitud del desarrollo de la capa límite ( $L_a = 3.41$  m) con la longitud total de la rápida (3.84 m), se decidió usar el calado normal para los respectivos cálculos.

La ubicación de la reja y canal de recolección (galería) en la rápida dependió exclusivamente del diseño del descargador a vórtice pues se debe considerar las alturas adecuadas para el tubo vertical y la cámara de disipación con el fin de que se desarrolle el flujo helicoidal.

Los parámetros considerados en el diseño de la reja para el LDH se basaron principalmente en los siguientes supuestos: la reja será desmontable por lo que se requiere una longitud fija; se diseñará para captar el caudal máximo circulante. En función de estas suposiciones, los parámetros variables incluyen el índice de huecos, dado que se consideran diseños de rejas con barras de tipo circular, trapezoidal, tipo I, cuadrada y diamante. Además, el coeficiente de descarga pues depende del perfil de aproximación a la reja y de su inclinación de la misma.

El dimensionamiento del canal de recolección (galería) se basó principalmente en que no se generen vórtices en las paredes, por tanto, se optó por diseñar un canal con una sección trapezoidal, y por cálculo teóricos se verifica que la capacidad de este elemento es suficiente para captar sin dificultades el caudal de 47 L/s proyectado.

Fue necesario el dimensionamiento de la transición como estructura complementaria debido a que se debía conectar dos elementos como el canal de recolección y el canal de aproximación al vórtice de descarga, esta transición se diseñó usando el criterio de del Bureau of Reclamation que define el ángulo óptimo para el cálculo de la longitud.

Con respecto a la cámara de entrada, el tema de la sobreelevación fue un criterio importante a considerar para determinar la altura de las paredes. Es fundamental asegurar que no ocurran desbordamientos en este elemento por lo tanto usando las expresiones teóricas de determinó una sobreelevación de 6 cm desarrollándose en una ubicación de  $55.46^\circ$ , se propone una altura de pared de 30 cm, lo cual garantiza que no habrá desbordamiento en este elemento.

Se determinó que el dimensionamiento del tubo de caída vertical depende directamente del caudal para el cual se está diseñando el vórtice de descarga, además que considera un factor de seguridad para este caso se ha considerado un factor de 1.25, con lo que se ha determinado que el diámetro, así como la longitud constructiva de este elemento. Para este caso se obtuvo un diámetro de 30 cm y una longitud del tubo de 90cm.

Con respecto a las alternativas planteadas se realizó el análisis de factibilidad donde se analiza la cuestión técnica de implementación. De lo que se determina que el sistema de captación propuesto por Wong puede ser implementado en el LDH, se pudo diseñar los elementos que componen cada alternativa propuesta. Los cuales pueden adaptarse a la geometría de la rápida existente en el LDH.

En lo que respecta al análisis económico de las alternativas propuestas se determina que no existen mayor variación de presupuesto pues apenas difieren con \$16.03 del presupuesto

fijo. Cabe destacar que el presupuesto fijo puede variar en un  $\pm 10\%$ . Pero como las alternativas poseen los mismos rubros se prevé que no exista mayor variación entre ellas. Por lo tanto, el presupuesto para la Alternativa oscila desde el \$1690.02 a \$2065.58, y el presupuesto para la Alternativa 2 comprende desde \$1675.59 a \$2047,95.

En cuanto a la viabilidad, se considera que la Alternativa 1 presenta una mayor complejidad en comparación con la Alternativa 2. Esto se debe a que, para desarrollar la Alternativa 1, es necesario construir la propuesta que está actualmente en fase de diseño. En contraste, la Alternativa 2 resulta más viable, ya que no interfiere con las estructuras existentes en el laboratorio y puede implementarse sin requerir una estructura adicional para su desvío, dado que el canal de recirculación ya está construido.

### **3.3 Recomendaciones**

Se recomienda que el todo el sistema de captación sea desmontable; es decir que no se lo coloque de manera fija con la finalidad de no perturbar el espacio de las estructuras existentes.

Para evitar dañar la estructura original de la rápida de descarga, se sugiere que la reja sea desmontable. Esto implica retirar una sección del fondo del canal para permitir la instalación de la reja. Por lo tanto, se sugiere instalar una placa de tol galvanizado, complementada con una estructura de perfiles tipo G que formen un esquema tipo "ventana corrediza". Esto permitirá que, cuando se desee utilizar el sistema de captación, la placa pueda deslizarse para permitir la colocación de las rejillas. De esta manera, cuando se quiera estudiar el flujo a través de la rápida, la placa pueda volver a su posición original, cubriendo el fondo del canal extraído. Sin embargo, esta modificación podría alterar la rugosidad de la rápida, lo que podría afectar la veracidad de los resultados si se realiza la toma de datos únicamente con la rápida de descarga.

Se recomienda la construcción de algún soporte el cual pueda facilitar la colocación de las diferentes rejillas a las inclinaciones especificadas en los planos de diseño.

En cuanto a la estructura del descargador a vórtice se recomienda colocar un tubo de ventilación el cual asegura que no exista presiones dentro de la cámara de disipación, pues se conecta con la atmosfera (presión atmosférica).

## **4. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

Berrones Cuenca, J. A., & Quilligana Chamba, O. R. (2017). *Simulación numérica de una rápida con fondo rugoso en el paquete computacional OpenFOAM*. 221.

- Berrones Cuenca, J. A., Quilligana Chamba, O. R., Ortega Lara, P. R., Plua Aguirre, F. A., & Hidalgo Bustamante, X. D. R. (2017). Simulación numérica tridimensional de una rápida de fuerte pendiente en el paquete computacional OpenFOAM. *Ingeniería del agua*, 18(1), ix. <https://doi.org/10.4995/ia.2014.3293>
- Bouvard, M. (1953). Débit d'une grille par en dessous. *La Houille Blanche*, 39(2), 290-291. <https://doi.org/10.1051/lhb/1953027>
- Brunella, S., Hager, W. H., & Minor, H.-E. (2003). Hydraulics of Bottom Rack Intake. *Journal of Hydraulic Engineering*, 129(1), 2-10. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2003\)129:1\(2\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2003)129:1(2))
- Carrillo, J., García, J., & Castillo, L. (2018). Experimental and Numerical Modelling of Bottom Intake Racks with Circular Bars. *Water*, 10(5), 605. <https://doi.org/10.3390/w10050605>
- Carrión Coronel, E. F. (2022, junio). *EXPERIMENTACIÓN FÍSICA Y NUMÉRICA DE LA HIDRODINÁMICA LOCAL DE REJAS DE FONDO TRANSVERSALES AL FLUJO EN CAPTACIONES DE AGUA SUPERFICIAL*.
- Chiluisa Samaniego, C. A., & Guanoluisa Erazo, C. A. (2015). *Verificación del Diseño Hidráulico de un dissipador de energía tipo vórtice mediante modelo físico construido en laboratorio*.
- Chow, V. T. (1994). *Ven Te Chow—HIDRAULICA DE CANALES ABIERTOS*. [https://www.academia.edu/43519012/Ven\\_Te\\_Chow\\_HIDRAULICA\\_DE\\_CANALES\\_ABIERTOS](https://www.academia.edu/43519012/Ven_Te_Chow_HIDRAULICA_DE_CANALES_ABIERTOS)
- Drobir, H., Kienberger, V., & Krouzecky, N. (1981). *The wetted rack length of the tyrolean weir*.
- Ettema, R., Zhu, D. Z., Gaskin, S. J., Mulligan, S., Lyons, T. C., Boes, R. M., Ning Chan, S., & Lee, J. H. W. (2023). Vortex-Flow Intakes. En D. Violeau (Ed.), *IAHR Water Monograph Series* (Vol. 2, pp. 1-155). The International Association for Hydro-Environment Engineering and Research (IAHR). [https://doi.org/10.3850/978-90-833476-0-8\\_IAHR\\_Watermonograph\\_002](https://doi.org/10.3850/978-90-833476-0-8_IAHR_Watermonograph_002)
- García Bermejo, J. T. (2016). *Estudio experimental y numérico de los sistemas de captación de fondo* [Universidad Politécnica de Cartagena]. <https://doi.org/10.31428/10317/5582>
- Hager, W. H. (1990). Vortex Drop Inlet for Supercritical Approaching Flow. *Journal of Hydraulic Engineering*, 116(8), 1048-1054. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1990\)116:8\(1048\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1990)116:8(1048))
- Haro Ruiz, P. L. (2019). *Optimización de los sistemas de captación de fondo con alto contenido de transporte de sedimentos* [Universidad Politécnica de Cartagena]. <https://doi.org/10.31428/10317/8634>
- Haro Ruiz, P. L., & Jara Vaca, M. F. (2006). *Manual básico de diseño de estructuras de cambio de nivel y cambio de dirección con flujo a gravedad*.
- Haro Ruiz, P. L., & Jara Vaca, M. F. (2010). *Análisis de flujo inestable y autoaireado en canales de fuerte pendiente*.
- Krochin, S. (1986). *Diseño Hidráulico*. Escuela Politécnica Nacional.

- Monge Jingo, C. F. (2017). *Modelo numérico de un canal de fuerte pendiente con rugosidad variable aplicando el software ANSYS CFX y comparación con los resultados obtenidos en el paquete computacional OpenFOAM*. 175.
- Naudascher, E. (2017). *Hidráulica de Canales*. Limusa S.A.
- Plua Aguirre, F. A. (2001). *Análisis del problema de disipación de energía al pie de una rápida*. Escuela Politécnica Nacional.
- Reyes, A. (2017). Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- Rodríguez Badillo, F. I. (2016). *Modelación numérica del flujo en un descargador a vórtice aplicando mecánica de fluidos computacional (CFD)*.
- Sotelo Ávila, G. (2002). *Hidráulica de Canales*.
- Subramanya. (2009). *Flow In Open Channels*. Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited.
- Torres Muñoz, R. (2019). *Agua potable conducida por tuberías de cemento/asbesto*. 5.
- Villón Béjar, M. (2005). *Diseño de Estructuras Hidráulicas (Segunda)*. Villón.
- Weiss, G., Brombach, H., & Hohl, E. (2010). *Hydraulic model tests on a stormwater vortex drop shaft: Verification of special conditions*.
- Wong, K., Colin. (2009). *Hydraulics of bottom rack chamber for supercritical flow diversion* (pp. 991027489109703414, b42664469) [Master of Philosophy, The University of Hong Kong]. [https://doi.org/10.5353/th\\_b4266446](https://doi.org/10.5353/th_b4266446)

## 5. ANEXOS

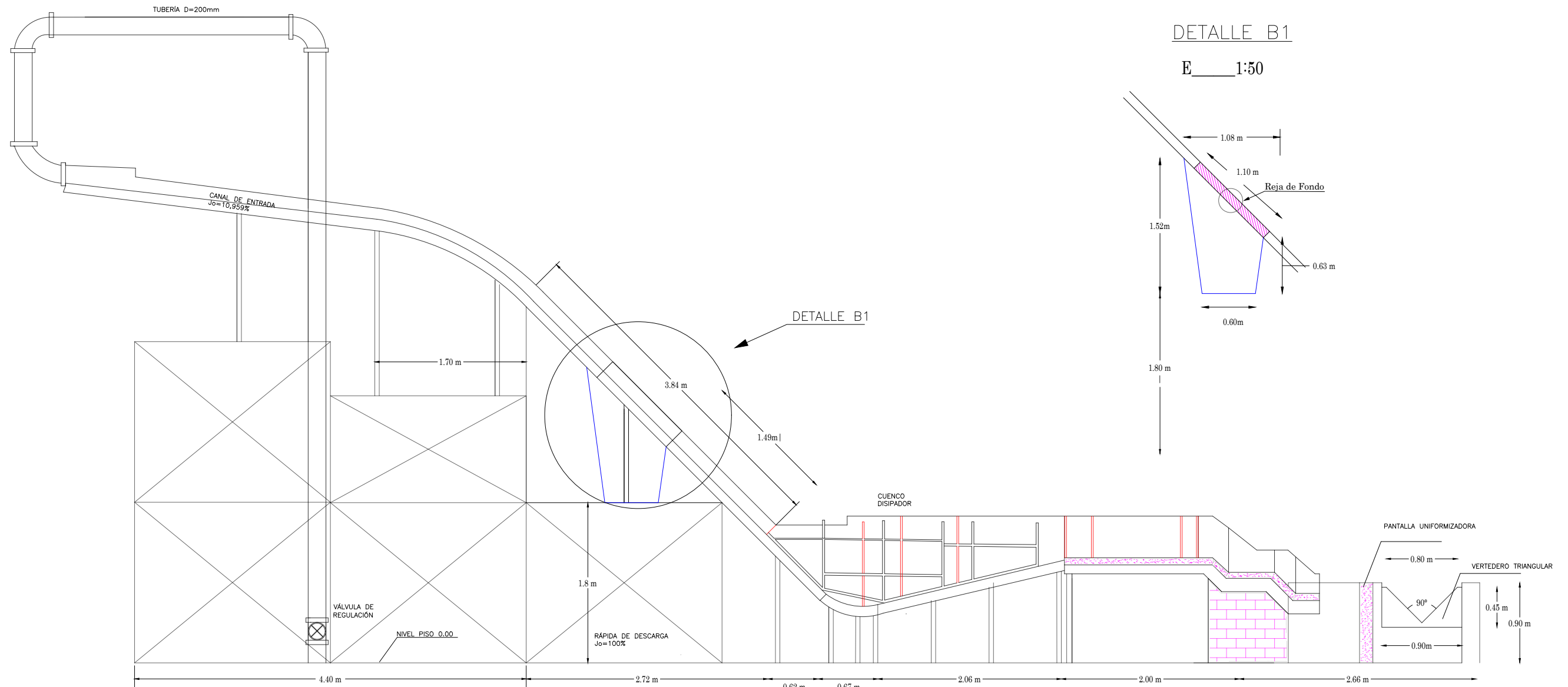
**ANEXO I: Datos para generar el perfil de la rápida de  
descarga**

Tramos	y	A	P	R	R^(2/3)	V	V^2/2g	E	Δ E	Sf		So- $\bar{S}f$	Δ x	ΣΔ x	yc	yn
1	0,112	0,045	0,624	0,072	0,173	1,049	0,056	0,168	-	0,004	-	-	-	0,000	0,112	0,018
2	0,110	0,044	0,620	0,071	0,171	1,068	0,058	0,168	0,000	0,004	0,004	0,996	0,000	0,000	0,112	0,018
3	0,108	0,043	0,616	0,070	0,170	1,087	0,060	0,168	0,000	0,004	0,004	0,996	0,000	0,000	0,112	0,018
4	0,106	0,042	0,612	0,069	0,169	1,108	0,063	0,169	0,000	0,004	0,004	0,996	0,000	0,001	0,112	0,018
5	0,104	0,042	0,608	0,068	0,167	1,129	0,065	0,169	0,000	0,005	0,004	0,996	0,000	0,001	0,112	0,018
6	0,102	0,041	0,604	0,068	0,166	1,151	0,068	0,170	0,001	0,005	0,005	0,995	0,001	0,002	0,112	0,018
7	0,100	0,040	0,600	0,067	0,164	1,174	0,070	0,170	0,001	0,005	0,005	0,995	0,001	0,002	0,112	0,018
8	0,098	0,039	0,596	0,066	0,163	1,198	0,073	0,171	0,001	0,005	0,005	0,995	0,001	0,003	0,112	0,018
9	0,096	0,038	0,592	0,065	0,161	1,223	0,076	0,172	0,001	0,006	0,006	0,994	0,001	0,004	0,112	0,018
10	0,094	0,038	0,588	0,064	0,160	1,249	0,080	0,174	0,001	0,006	0,006	0,994	0,001	0,006	0,112	0,018
11	0,092	0,037	0,584	0,063	0,158	1,276	0,083	0,175	0,001	0,006	0,006	0,994	0,002	0,007	0,112	0,018
12	0,090	0,036	0,580	0,062	0,157	1,305	0,087	0,177	0,002	0,007	0,007	0,993	0,002	0,009	0,112	0,018
13	0,088	0,035	0,576	0,061	0,155	1,334	0,091	0,179	0,002	0,007	0,007	0,993	0,002	0,011	0,112	0,018
14	0,086	0,034	0,572	0,060	0,154	1,365	0,095	0,181	0,002	0,008	0,008	0,992	0,002	0,013	0,112	0,018
15	0,084	0,034	0,568	0,059	0,152	1,398	0,100	0,184	0,003	0,008	0,008	0,992	0,003	0,016	0,112	0,018
16	0,082	0,033	0,564	0,058	0,150	1,432	0,104	0,187	0,003	0,009	0,009	0,991	0,003	0,019	0,112	0,018
17	0,080	0,032	0,560	0,057	0,148	1,468	0,110	0,190	0,003	0,010	0,009	0,991	0,003	0,022	0,112	0,018
18	0,078	0,031	0,556	0,056	0,147	1,505	0,115	0,194	0,004	0,011	0,010	0,990	0,004	0,026	0,112	0,018
19	0,076	0,030	0,552	0,055	0,145	1,545	0,122	0,198	0,004	0,011	0,011	0,989	0,004	0,030	0,112	0,018
20	0,074	0,030	0,548	0,054	0,143	1,586	0,128	0,202	0,005	0,012	0,012	0,988	0,005	0,035	0,112	0,018
21	0,072	0,029	0,544	0,053	0,141	1,630	0,135	0,208	0,005	0,013	0,013	0,987	0,005	0,040	0,112	0,018
22	0,070	0,028	0,540	0,052	0,139	1,677	0,143	0,213	0,006	0,015	0,014	0,986	0,006	0,046	0,112	0,018
23	0,068	0,027	0,536	0,051	0,137	1,726	0,152	0,220	0,007	0,016	0,015	0,985	0,007	0,052	0,112	0,018
24	0,066	0,026	0,532	0,050	0,135	1,779	0,161	0,227	0,007	0,017	0,017	0,983	0,007	0,060	0,112	0,018
25	0,064	0,026	0,528	0,049	0,133	1,834	0,171	0,236	0,008	0,019	0,018	0,982	0,008	0,068	0,112	0,018
26	0,062	0,025	0,524	0,047	0,131	1,893	0,183	0,245	0,009	0,021	0,020	0,980	0,009	0,078	0,112	0,018
27	0,060	0,024	0,520	0,046	0,129	1,956	0,195	0,255	0,010	0,023	0,022	0,978	0,011	0,088	0,112	0,018
28	0,058	0,023	0,516	0,045	0,127	2,024	0,209	0,267	0,012	0,026	0,024	0,976	0,012	0,100	0,112	0,018



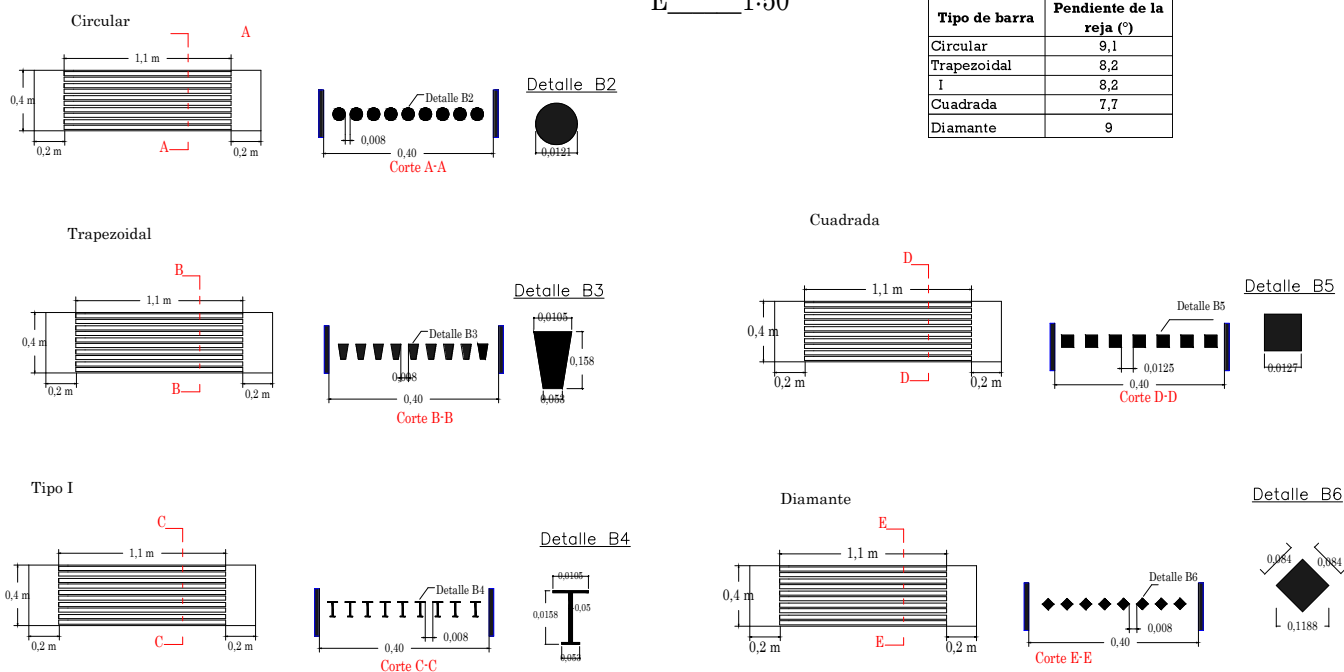
29	0,056	0,022	0,512	0,044	0,124	2,096	0,224	0,280	0,013	0,028	0,027	0,973	0,014	0,114	0,112	0,018
30	0,054	0,022	0,508	0,043	0,122	2,173	0,241	0,295	0,015	0,032	0,030	0,970	0,015	0,129	0,112	0,018
31	0,052	0,021	0,504	0,041	0,120	2,257	0,260	0,312	0,017	0,036	0,034	0,966	0,017	0,147	0,112	0,018
32	0,050	0,020	0,500	0,040	0,117	2,347	0,281	0,331	0,019	0,040	0,038	0,962	0,020	0,166	0,112	0,018
33	0,048	0,019	0,496	0,039	0,115	2,445	0,305	0,353	0,022	0,046	0,043	0,957	0,023	0,189	0,112	0,018
34	0,046	0,018	0,492	0,037	0,112	2,551	0,332	0,378	0,025	0,052	0,049	0,951	0,026	0,216	0,112	0,018
35	0,044	0,018	0,488	0,036	0,109	2,667	0,362	0,406	0,029	0,060	0,056	0,944	0,030	0,246	0,112	0,018
36	0,042	0,017	0,484	0,035	0,106	2,793	0,398	0,440	0,033	0,069	0,064	0,936	0,036	0,282	0,112	0,018
37	0,040	0,016	0,480	0,033	0,104	2,933	0,438	0,478	0,039	0,080	0,074	0,926	0,042	0,323	0,112	0,018
38	0,038	0,015	0,476	0,032	0,101	3,087	0,486	0,524	0,045	0,094	0,087	0,913	0,050	0,373	0,112	0,018
39	0,036	0,014	0,472	0,031	0,098	3,258	0,541	0,577	0,053	0,111	0,102	0,898	0,059	0,432	0,112	0,018
40	0,034	0,014	0,468	0,029	0,095	3,449	0,606	0,640	0,063	0,133	0,122	0,878	0,072	0,505	0,112	0,018
41	0,032	0,013	0,464	0,028	0,091	3,664	0,684	0,716	0,076	0,161	0,147	0,853	0,089	0,594	0,112	0,018
42	0,030	0,012	0,460	0,026	0,088	3,908	0,779	0,809	0,092	0,197	0,179	0,821	0,112	0,706	0,112	0,018
43	0,028	0,011	0,456	0,025	0,085	4,187	0,893	0,921	0,113	0,245	0,221	0,779	0,145	0,851	0,112	0,018
44	0,026	0,010	0,452	0,023	0,081	4,508	1,036	1,062	0,140	0,310	0,277	0,723	0,194	1,045	0,112	0,018
45	0,024	0,010	0,448	0,021	0,077	4,883	1,215	1,239	0,177	0,399	0,354	0,646	0,275	1,320	0,112	0,018
46	0,022	0,009	0,444	0,020	0,073	5,325	1,445	1,467	0,228	0,527	0,463	0,537	0,425	1,745	0,112	0,018
47	0,020	0,008	0,440	0,018	0,069	5,856	1,748	1,768	0,301	0,714	0,621	0,379	0,792	2,537	0,112	0,018
48	0,01872972	0,007	0,437	0,017	0,066	6,273	2,006	2,025	0,257	0,892	0,803	0,197	1,303	3,840	0,112	0,018

**ANEXO II: Vista longitudinal de la rápida de descarga con el canal de recolección**



TIPOS DE LA REJA DE FONDO  
E 1:50

VISTA LONGITUDINAL DE LA RÁPIDA DE DESCARGA  
E 1:50



Nota: Las rejas serán ubicadas en la rápida de acuerdo a la inclinación descrita en los planos

**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

**FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y AMBIENTAL**

---

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO INGENIERO CIVIL**

---

DIRECTOR:  
**ING.PATRICIA HARO**

NOMBRE:  
**JHOSELIN GRACIELA CHANALUISA AYALA**

---

COMPONENTE:  
**DISEÑO DE UNA CAPTACIÓN CON REJA DE FONDO PARA APROXIMACIÓN SUPERCRÍTICA**

---

CONTIENE:  
VISTA LONGITUDINAL DE LA RÁPIDA DE DESCARGA  
DETALLE DE LA GALERÍA  
TIPOS DE REJA DE FONDO

---

ESCALA:  
INDICADAS

---

FECHA:  
AGOSTO 2024

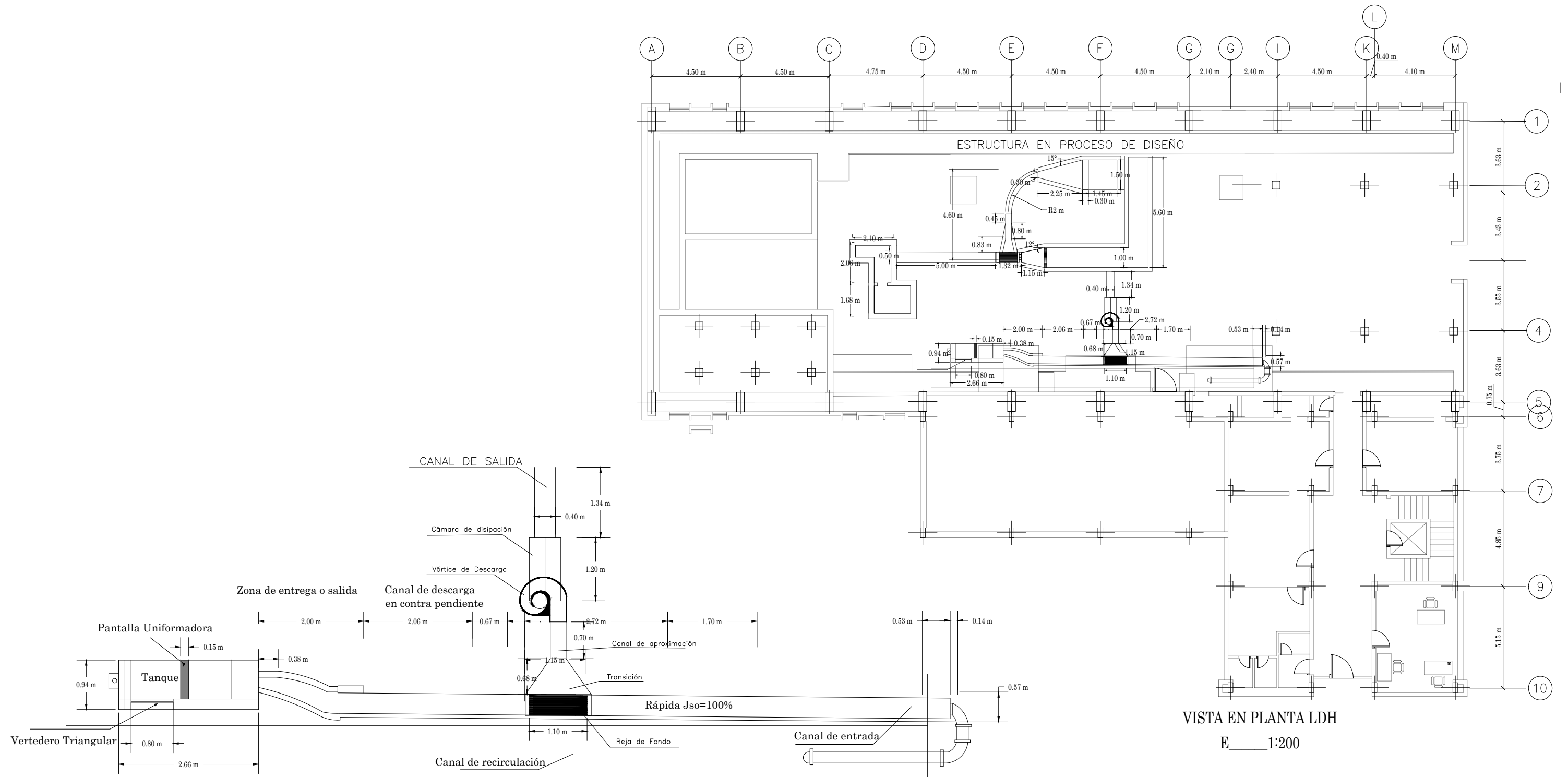
---

HOJA No.:  
**1/5**

---

DIBUJO:  
F.A.P.A  
J.G.C.A

## **ANEXO III: Plano Alternativa 1**



VISTA EN PLANTA ALTERNATIVA 1

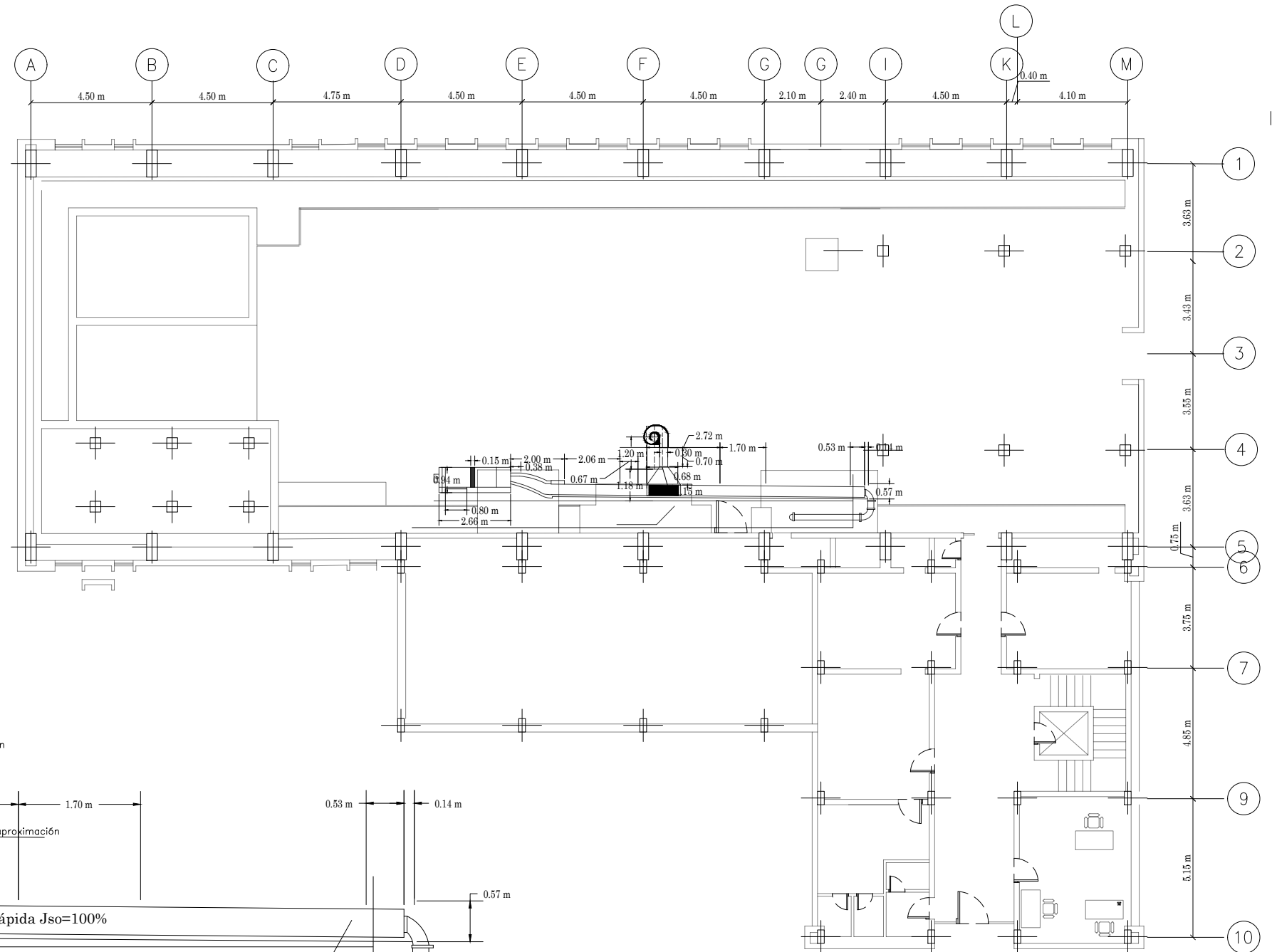
E 1:75

VISTA EN PLANTA LDH

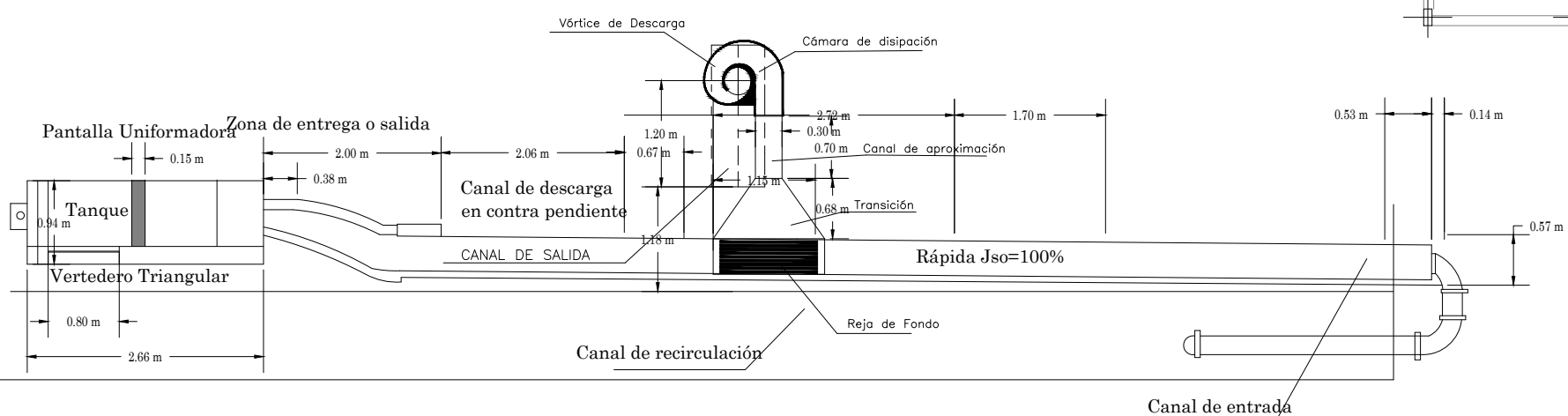
E 1:200

 <p>ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL</p> <p>FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y AMBIENTAL</p>	<p>NOMBRE:</p> <p><b>JHOSELIN GRACIELA CHANALUISA AYALA</b></p>	
	<p>COMPONENTE:</p> <p><b>DISEÑO DE UNA CAPTACIÓN CON REJA DE FONDO PARA APROXIMACIÓN SUPERCRÍTICA</b></p>	<p>ESCALA:</p> <p>INDICADAS</p>
<p>TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO INGENIERO CIVIL</p>	<p>FECHA:</p> <p>AGOSTO 2024</p>	
	<p>CONTIENE:</p> <p>VISTA EN PLANTA DE LA ALTERNATIVA N° 1</p>	<p>HOJA No.:</p> <p><b>2/5</b></p>
<p>DIRECTOR:</p> <p><b>ING.PATRICIA HARO</b></p>	<p>DIBUJO:</p> <p>F.A.P.A J.G.C.A</p>	


## **ANEXO IV: Plano Alternativa 2**



VISTA EN PLANTA LDH  
E 1:200

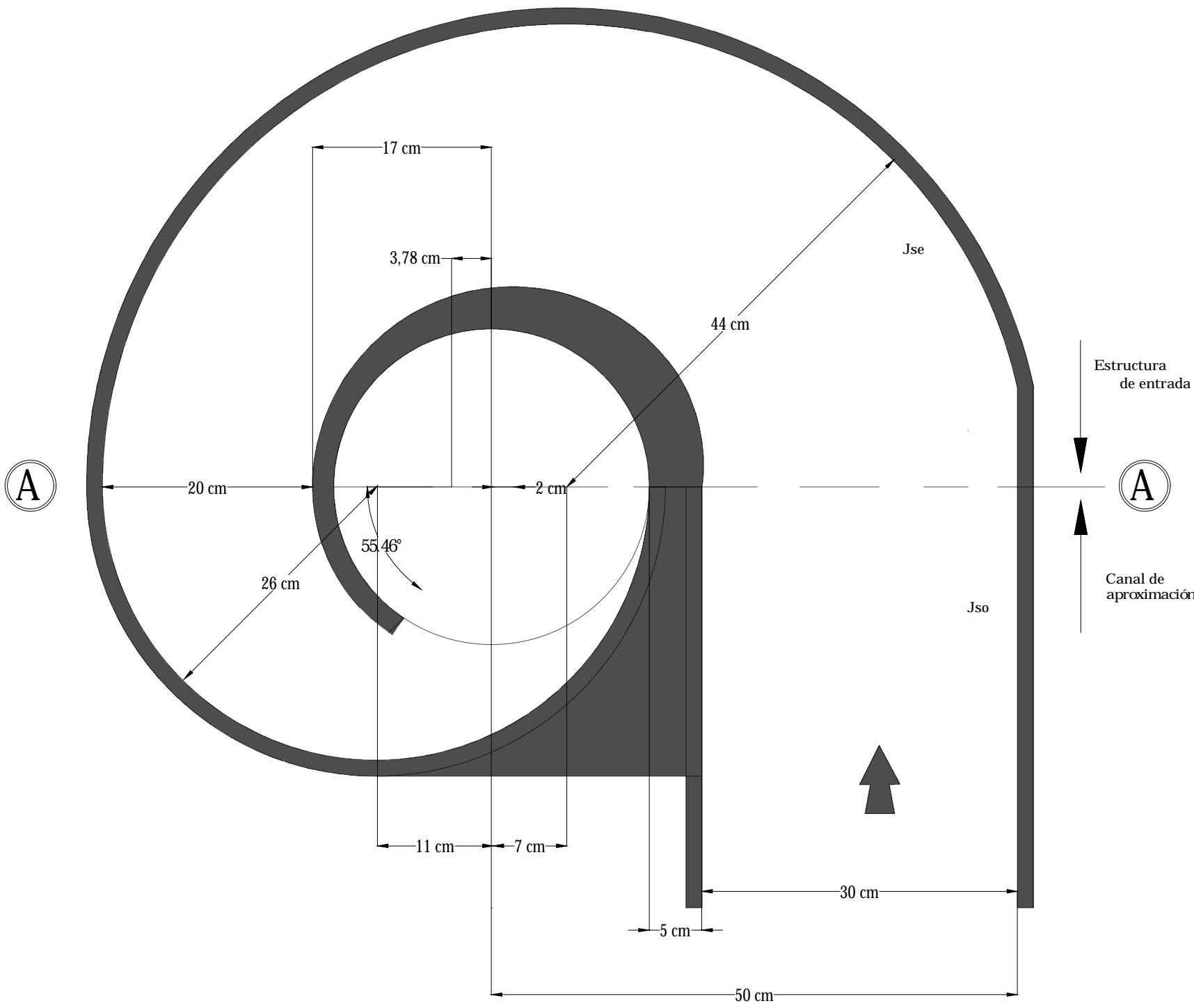


VISTA EN PLANTA  
E 1:75

 <p>ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL</p> <p>FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y AMBIENTAL</p>	<p>NOMBRE:</p> <p><b>JHOSELIN GRACIELA CHANALUISA AYALA</b></p>	
	<p>COMPONENTE:</p> <p><b>DISEÑO DE UNA CAPTACIÓN CON REJA DE FONDO PARA APROXIMACIÓN SUPERCRÍTICA</b></p>	<p>ESCALA:</p> <p>INDICADAS</p>
<p>TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO INGENIERO CIVIL</p>	<p>FECHA:</p> <p>AGOSTO 2024</p>	
	<p>CONTIENE:</p> <p>VISTA EN PLANTA DE LA ALTERNATIVA N° 2</p>	<p>HOJA No.:</p> <p>3/5</p>
<p>DIRECTOR:</p> <p><b>ING.PATRICIA HARO</b></p>	<p>DIBUJO:</p> <p>F.A.P.A J.G.C.A</p>	

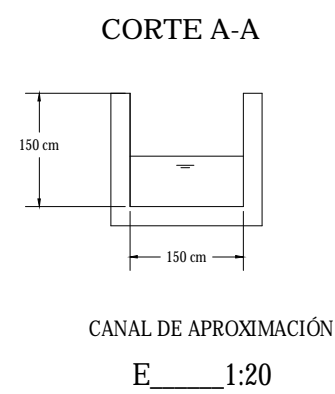
## **ANEXO V: Plano del Vórtice**






VISTA EN PLANTA  
E 1:5


CUADRO RESUMEN DE MEDIDAS	
R1:	0,435 m
R2:	0,26 m
R3:	0,185 m
R4:	0,17 m
a:	0,5 m
e1:	0,5 m
e2:	0,31 m
e3:	0,5 m
$\alpha M$	55,46 m





ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y AMBIENTAL

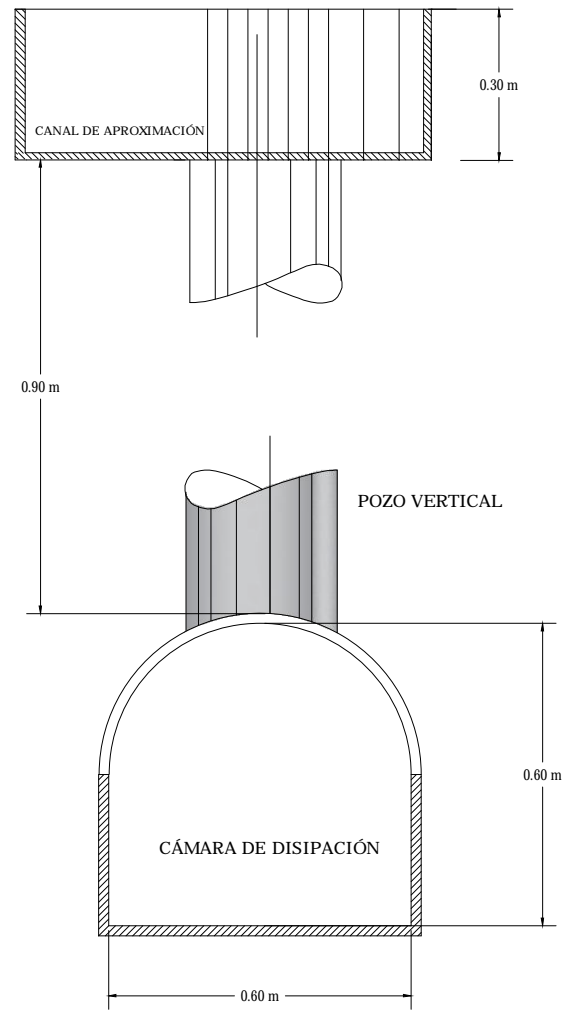


TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO INGENIERO CIVIL

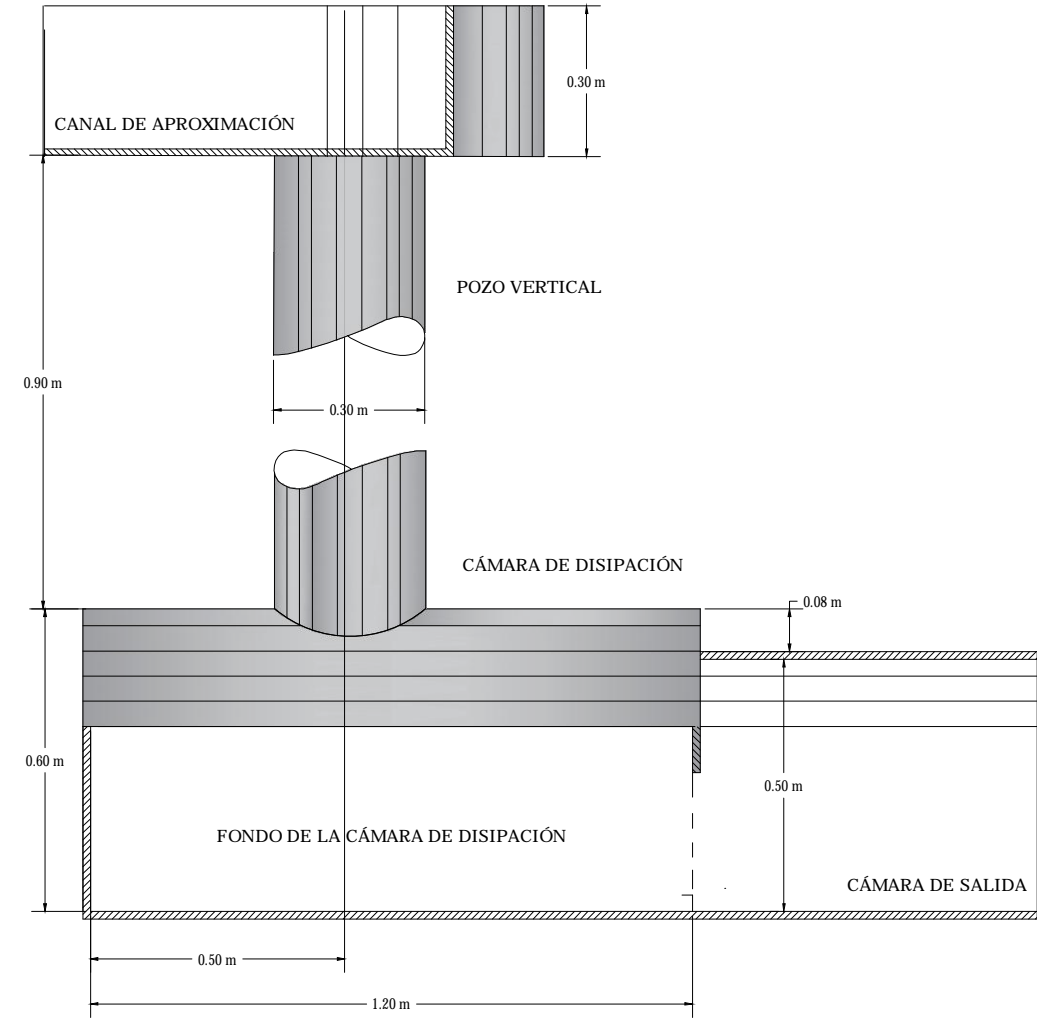
DIRECTOR: ING. PATRICIA HARO

NOMBRE: <b>JHOSELIN GRACIELA CHANALUISA AYALA</b>	
COMPONENTE: <b>DISEÑO DE UNA CAPTACIÓN CON REJA DE FONDO PARA APROXIMACIÓN SUPERCRÍTICA</b>	ESCALA: Se indica
CONTIENE: <b>VISTA EN PLANTA DEL VÓRTICE DE DESCARGA</b>	FECHA: AGOSTO 2024
	HOJA No: 4/5
	DIBUJO: JGCA

## **ANEXO VI: Plano Cámara de Disipación**



VISTA FRONTAL  
E 1:15



VISTA LATERAL  
E 1:15

 <p>ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL</p> <p>FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y AMBIENTAL</p> 	NOMBRE: <b>JHOSELIN GRACIELA CHANALUISA AYALA</b>	
	COMPONENTE: <b>DISEÑO DE UNA CAPTACIÓN CON REJA DE FONDO PARA APROXIMACIÓN SUPERCRÍTICA</b>	ESCALA: 1:15
TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO INGENIERO CIVIL	FECHA: AGOSTO 2024	
DIRECTOR: <b>ING. PATRICIA HARO</b>	CONTIENE: <b>CÁMARA DE DISIPACIÓN</b>	HOJA No: 5/5
	DIBUJO: JGCA	

## **ANEXO VII: Cotizaciones**

CLIENTE: ESCUELA POLITECNICA NACIONAL

FECHA: 24-ago-23

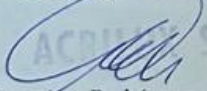
CODIGO	DESCRIPCION	CANTIDAD	DESCTO.	VALOR UNITARIO	VALOR TOTAL
LL406 05.0 0002	Lisa 1.20 x 1.80m x 5mm cristal	5	0%	112.58	\$ 562.88

SUBTOTAL					\$ 562.88
DESCUENTO		5%			\$ (28.14)
VALOR NETO					\$ 534.73
I.V.A.		12%			\$ 64.17
TOTAL					\$ 598.90

VALIDEZ DE LA PROFORMA: 15 días.

ENTREGA: Por confirmar.

- Nosotros entregamos el producto en nuestro almacén en la ciudad de Quito, no tenemos servicio de transporte.
- El pago se realiza de contado, en efectivo; se puede hacer transferencia o depósito, pero la entrega la hacemos una vez que se haya confirmado que el dinero se ha acreditado en nuestra cuenta.
- La existencia del producto se informa previa verificación con bodega de los ítems requeridos. Si no tenemos en stock el producto se requiere el 70% de anticipo para su fabricación
- El horario de atención es de lunes a viernes en horario de 7:30 am a 4:00pm.
- Somos agentes de retención.

  
ACRILUX S.A.

Jonathan Rodríguez

[www.acrilux.com.ec](http://www.acrilux.com.ec)

Telf. 3343-060 / 3343-034

Celular: 0991 971 256



TOAQUIZA VILCA EDISON VLADIMIR  
FERRETERIA TOAQUIZA JR  
RUC 0502663701001

TELEFONOS: 0980447919-

Cliente: JOSSELIN GRACIELA CHANLUISA AYALA  
RUC: 0550520936  
Direccion: LATACUNGA  
Telefonos:  
Fecha: 27/07/2024

PROFORMA

P000000655

CANTIDAD	DESCRIPCION	MEDIDA	PRECIO	IVA	DESC.	TOTAL
1,00	TEES 25X3MM (1"X1/8")	UND	11,500000	15,00	0,00	11,50
1,00	ANGULO 25X3MM (1"X1/8")	UND	7,500000	15,00	0,00	7,50
1,00	TUBO CUADRADO LC 1 1/2X1 1/2 O (40X40MM)X3 BR	UND	22,000000	15,00	0,00	22,00
1,00	PL. 1220X2440X0.90MM HG (1/25")	UND	25,250000	15,00	0,00	25,25
1,00	ADHEPRIMER VINILICO GRIS GALON	UND	29,000000	15,00	0,00	29,00
1,00	ANTICORROSIVO DURA COLOR GRIS GALON	UND	12,000000	15,00	0,00	12,00
1,00	LITRO DE TIÑER		6,400000	15,00	0,00	6,40
1,00	ESMALTE DURA COLOR NEGRO 01 GALON	UND	12,000000	15,00	0,00	12,00
1,00	CORREA G 60X30X10 (2MM)	UND	12,000000	15,00	0,00	12,00
1,00	RODAMIENTO AEREO 21/2	UND	7,600000	15,00	0,00	7,60
1,00	SOLDADURA SOLDEX 6011X1/8 LIBRA		17,000000	15,00	0,00	17,00
1,00	DISC. NORTON. CORT.MET. 4 1/2X1/16 CORTE	UND	1,550000	15,00	0,00	1,55
1,00	DISC. NORTON. PULIR. 4 1/2X1/4	UND	2,050000	15,00	0,00	2,05
1,00	DISCO FLAP LIJA 4 1/2	UND	1,500000	15,00	0,00	1,50
1,00	MASILLA PLASTICA MUSTANG LT	UND	7,200001	15,00	0,00	7,20
1,00	Regaton Cuadrado 1"	UND	0,102679	15,00	0,00	0,10
1,00	Regaton Cuadrado 1 1/2	UND	0,200000	15,00	0,00	0,20
1,00	PERNO G2 NEGRO UNC 5/16 X 2 1/2	UND	0,123214	15,00	0,00	0,12



\* Productos y Servicios Sujetos a Impuestos, no estan incluidos en la proforma

Observaciones:

SUBTOTAL	152,15
DESCUENTO	0,00
SUBTOTAL NETO	152,15
SUBTOTAL 0%	0,00
SUBTOTAL IVA	152,15
IVA 5%	0,00
IVA 15 %	22,82
TOTAL	174,97