

TESIS DE MAESTRÍA

**DISEÑO DE CÁMARA DE CAÍDA EN SISTEMAS DE ALCANTARILLADO
BASADO EN MATERIALES PLÁSTICOS MEDIANTE UNA MODELACIÓN
FÍSICA.**

Humberto Santiago Morillo Rosero

Asesor: Juan G. Saldarriaga Valderrama



**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C.
2020**

AGRADECIMIENTOS

A Dios por darme la sabiduría y fortaleza para superar cada obstáculo.

A mi madre por su apoyo constante para la realización de cada nuevo proyecto.

A mis tías, tíos y hermanos por sus palabras de ánimo y preocupación durante toda mi vida, en especial a mi hermano Anthony quien ha sido un respaldo en estos últimos meses.

Al profesor Juan Saldarriaga por la oportunidad y ayuda brindada durante la realización de esta tesis.

Al señor técnico John Calvo por su colaboración en el proceso del montaje en el laboratorio.

TABLA DE CONTENIDO

1	Introducción	1
1.1	Objetivos	2
1.1.1	Objetivo General	2
1.1.2	Objetivos Específicos	2
2	Marco teórico	3
2.1	Normativa para el uso de cámaras de caída	3
2.1.1	Normativa en Colombia	3
2.1.2	Normativa en Ecuador	3
2.2	Descripción de las cámaras de caída	4
2.2.1	Cámara de caída: Definición	4
2.2.2	Cámaras de caída libre	4
2.2.3	Cámaras de caída tipo vórtice	5
2.2.4	Cámaras de caída con estructura de bandejas	6
2.3	Tipos de entrada cámara tipo vórtice	7
2.4	Antecedentes	11
2.4.1	“Experimental Study of Flow in a Vortex Drop Shaft”	11
2.4.2	“Energy dissipation of flow in the vortex structure: experimental investigation” ...	12
2.5	Descripción de las ecuaciones utilizadas	13
2.5.1	Principio de conservación de energía (Ecuación de Bernoulli)	13
2.5.2	Energía específica	14
2.5.3	Tubería de entrada y salida	14
2.5.4	Cámara vertical de vórtice	16
2.5.5	Eficiencia de disipación de energía de flujo	17
3	Metodología	18
3.1	Descripción del modelo físico	18
3.2	Montaje en el laboratorio	20



3.2.1	Motobomba	22
3.2.2	Tubería de PVC	23
3.2.3	Tanque o piscina de almacenamiento.....	23
3.2.4	Base de madera	24
3.2.5	Vertedero	24
3.2.6	Variador de velocidad	25
3.3	Instrumentación y medición de los datos	25
3.3.1	Limnómetro del vertedero	25
3.3.2	Limnómetro para la entrada y salida de la cámara	26
3.3.3	Cinta métrica	26
3.3.4	Descripción de la toma de datos	27
4	Resultados	28
4.1	Entrada tangente interna	28
4.2	Entrada tangente externa circular con ángulo de 90°	32
4.3	Entrada tangente externa cuadrada	36
5	Conclusiones	41
6	Recomendaciones	42
7	Referencias.....	43
8	Anexos	44
8.1	Esquemas	44
8.2	Manejo de la bomba	47

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Cámara de caída libre.	5
Figura 2. Cámara de caída tipo vórtice.	6
Figura 3. Cámara de caída con estructuras de bandejas.	7
Figura 4. Tipos de entrada de cámaras tipo vórtice.	8
Figura 5. Parámetros hidráulicos y geométricos en el modelo: (a) vista lateral; (b) vista en planta de la parte de entrada; y (c) sección transversal de la cámara de disipación.	13
Figura 6. Definición de elementos geométricos para una tubería circular.	15
Figura 7. Base cámara inspección NOVACAM 600 mm	18
Figura 8. Fabricación de las piezas de acrílico	19
Figura 9. Entrada tangente interna	19
Figura 10. Entrada tangente externa circular 90 °	19
Figura 11. Entrada externa cuadrada	20
Figura 12. Montaje del modelo físico en el laboratorio	22
Figura 13. Bomba centrífuga HIDROMAC.	23
Figura 14. Tubería de alimentación a la cámara de vórtice.	23
Figura 15. Tanque o piscina de almacenamiento	23
Figura 16. Base de madera	24
Figura 17. Vertedero triangular (90 grados).	24
Figura 18. Variador de velocidad de la bomba	25
Figura 19. Limnómetro del vertedero.	25
Figura 20. Limnómetros móviles (ubicados en la entrada y salida de la cámara de vórtice)	26
Figura 21. Cintas métricas	26
Figura 22. Cintas métricas a diferentes alturas de la cámara de vórtice.	27

ÍNDICE DE ESQUEMAS

Esquema 1. Plano instalación en planta de cámara de vórtice con entrada recta.....	20
Esquema 2. Plano instalación en perfil de cámara de vórtice con entrada recta	21
Esquema 3. Plano instalación en planta de cámara de vórtice con entrada circular a 90 grados	21
Esquema 4. Plano instalación en perfil de cámara de vórtice con entrada circular a 90 grados	21
Esquema 5. Plano instalación en planta de cámara de vórtice con entrada cuadrada.....	22
Esquema 6. Plano instalación en perfil de cámara de vórtice con entrada cuadrada.....	22
Esquema 7. Dirección de flujo en la entrada tangente interna.....	32
Esquema 8. Dirección de flujo en la entrada tangente externa circular de 90°	36
Esquema 9. Dirección de flujo en la entrada tangente externa cuadrada	40
Esquema 10. Entrada tangente interna.....	44
Esquema 11. Entrada tangente externa circular 90°	45
Esquema 12. Vista en planta de entrada tangente externa cuadrada	45
Esquema 13. Vista perfil entrada tangente externa cuadrada.....	46
Esquema 14. Anillo elevador	46



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Evaluación de estructura de caída basada en el tipo de entrada	9
Tabla 2. Caudales obtenidos del vertedero (Entrada tangente interna)	28
Tabla 3. Valores de las variables de entrada (Entrada tangente interna)	29
Tabla 4. Valores de las variables de salida (Entrada tangente interna).....	30
Tabla 5. Valores de la cámara (Entrada tangente interna).....	31
Tabla 6. Valores de disipación de energía (Entrada tangente interna)	31
Tabla 7. Caudales obtenidos del vertedero (Entrada tangente externa circular de 90°)	32
Tabla 8. Valores de las variables de entrada (Entrada tangente externa circular de 90°)	33
Tabla 9. Valores de las variables de salida (Entrada tangente externa circular de 90°)	34
Tabla 10. Valores de la cámara (Entrada tangente externa circular de 90°)	35
Tabla 11. Valores de disipación de energía (Entrada tangente externa circular de 90°)	35
Tabla 12. Caudales obtenidos del vertedero (Entrada tangente externa cuadrada)	36
Tabla 13. Valores de las variables de entrada (Entrada tangente externa cuadrada).....	37
Tabla 14. Valores de las variables de salida (Entrada tangente externa cuadrada)	38
Tabla 15. Valores de la cámara (Entrada tangente externa cuadrada)	39
Tabla 16. Valores de disipación de energía (Entrada tangente externa cuadrada).....	39

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Ecuación de energía Bernoulli	13
Ecuación 2. Conservación de energía entre 2 secciones	14
Ecuación 3. Energía específica	14
Ecuación 4. Energía específica con pendiente pequeña	14
Ecuación 5. Ángulo central en radianes	14
Ecuación 6. Área mojada de tubería circular parcialmente llena	15
Ecuación 7. Perímetro mojado de tubería circular parcialmente llena	15
Ecuación 8. Radio hidráulico de tubería circular parcialmente llena	15
Ecuación 9. Diámetro hidráulico para tubería circular	15
Ecuación 10. Número de Froude	15
Ecuación 11. Número de Reynolds	15
Ecuación 12. Profundidad para canal rectangular	16
Ecuación 13. Pérdida de energía por fricción (Ecuación Darcy-Weisbach)	16
Ecuación 14. Factor de fricción de Colebrook-White	16
Ecuación 15. Número de Reynolds en canal ancho	16
Ecuación 16. Ángulo de barrido	16
Ecuación 17. Eficiencia de disipación de energía	17
Ecuación 18. Calibración del vertedero	24

1 INTRODUCCIÓN

Los sistemas de drenaje urbano tienen varios roles importantes en el mantenimiento de la salud y seguridad pública, pero a través de la historia se ha visto que también se ha causado daño quizá por la falta de conocimiento y la intervención inadecuada. Actualmente es bien sabido que los excrementos humanos (especialmente las heces) son el principal vector para la transmisión de muchas enfermedades. Por tanto, los sistemas de drenaje urbano compuesto por tuberías y estructuras complementarias (cámaras de inspección, aliviaderos, tanques de tormenta, entre otros) tienen un papel directo e importante en la eliminación efectiva de excrementos de las inmediaciones de las viviendas. (Butler & Davies, 2010)

Así también, un sistema de drenaje urbano involucra en su funcionamiento variaciones en el flujo, así como también tránsito de crecientes, entrega de caudales, entre otros; lo que hace necesario la construcción de estructuras específicas en cada caso, por ejemplo: tanques de tormenta que regulan el agua que se infiltra en el suelo durante una tormenta; los pozos de inspección donde se puede hacer una revisión respecto al transporte y depositación de sedimentos.

El diseño mejorado de estructuras hidráulicas permite un correcto funcionamiento del sistema de drenaje en este caso las cámaras de quiebre que ayuda a prevenir el desgaste de estructuras aguas abajo evitando así problemas de rotura de tuberías que se encuentran dentro del sistema de drenaje, así como también una mejor aireación del flujo evitando de esta manera malos olores.

Por eso, desde hace más de 3000 años se vio la necesidad de construir estructuras que se encargaran de la disipación de energía en el alcantarillado; en un caso específico los ingenieros romanos ya habían diseñado estructuras de caída en sus sistemas de drenaje en Túnez, Argelia, Francia e Italia para que cumplir con ese objetivo. (Chanson, 1999)

En nuestros días, cuando se construye un sistema de drenaje urbano en lugares con una pendiente pronunciada presente en países con presencia de sistemas montañosos, una situación común en algunas ciudades de Colombia y países de la región andina, donde existe una topología quebrada que genera una diferencia de niveles considerable con respecto al tramo siguiente es necesario construir una estructura que disipe la energía potencial producida por el desnivel evitando así la generación de flujos verticales, además de minimizar los daños en la red y entregar un flujo más tranquilo es decir la construcción de una cámara de caída. (RAS, 2016)

Adicionalmente, las limitaciones que sufren las ciudades modernas en espacio y la rapidez con que funcionan las personas en las ciudades actuales dan en evidencia la necesidad de realizar estructuras que maximicen su funcionamiento en espacios más cortos y sin provocar incomodidades en periodos largos de tiempo en su instalación.



Para esto, la presente investigación analizará la disipación de energía que ocurre dentro de la cámara de caída mediante el uso de un modelo físico; siendo los modelos físicos unas herramientas excelentes para evaluar el funcionamiento de estructuras hidráulicas, evaluando algunos tipos de variables tales como: altura de caída, profundidad del colchón de agua, caudal, pendiente y disipación de energía; y así poder establecer criterios de diseño y operación.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo General

Elaborar un modelo físico de una cámara de caída tipo vórtice en acrílico y realizar la estimación de disipación de energía presente.

1.1.2 Objetivos Específicos

- I. Establecer una revisión bibliográfica relacionado con cámaras de caída en sistemas de alcantarillado.
- II. Fabricar una cámara de caída mediante un modelo físico a escala estableciendo su comportamiento.
- III. Realizar una evaluación del comportamiento del modelo físico para diversas condiciones y evaluar su funcionamiento.

2 MARCO TEÓRICO

2.1 Normativa para el uso de cámaras de caída

2.1.1 Normativa en Colombia

Mediante La Resolución 0330 de 2017 expedida por el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio por la cual se adopta el Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS; la Resolución reglamenta los requisitos técnicos que se deben cumplir en las etapas de diseño construcción, puesta en marcha, operación, mantenimiento y rehabilitación de la infraestructura relacionada con los servicios públicos de acueducto, alcantarillado y aseo.

Según el RAS (2016), el cual establece, que cuando no es posible que todos los tramos de las tuberías de alcantarillado lleguen a un mismo nivel a la cámara de conexión e inspección y a su vez cuando dicho desnivel sea mayor a 0,75 m se debe proyectar una cámara de caída.

2.1.2 Normativa en Ecuador

La Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento es la encargada de la prestación de servicios de agua potable y alcantarillado sanitario y pluvial en el Distrito Metropolitano de Quito; es decir, realiza las actividades necesarias para abastecer de estos servicios a los usuarios, dentro de las que se encuentran la ejecución de obras, adquisición de equipos, operación y mantenimiento de los sistemas, gestión administrativa, comercial y financiera, a través de todo el ciclo del agua, desde la captación en las fuentes hasta el manejo de las aguas residuales urbanas, pasando por todo el proceso de conducción, potabilización, distribución, recolección de las aguas residuales y la disposición final.

La EMAAP-Quito (2009), manifiesta que para todos los casos que involucren obras de gran magnitud, $h > 5$ m y/o $Q > 10$ m³/s el proyectista deberá efectuar estudios hidráulicos particulares que consideren las características propias del salto. En casos especiales se deberán prever estudios de modelo a escala reducida.

Adicionalmente, se recomienda el uso de pozos de caída:

- **Pozos de caída tipo I**, para saltos de altura máxima de 0,75 m y diámetros hidráulicos de la sección del conducto de entrada menores a 0,90 m.
- **Pozos de caída tipo II**, para saltos altura máxima 3,00 m y diámetros hidráulicos de la sección del conducto de entrada menores a 0,90 m.
- **Pozos de caída tipo III**, para saltos de altura máxima 3,00 m y diámetros hidráulicos de la sección del conducto de entrada entre 1,00 m y 1,50 m. (EMAAP-Quito, 2009)



2.2 Descripción de las cámaras de caída

2.2.1 Cámara de caída: Definición

Una cámara de caída es una estructura complementaria cuyo propósito es:

- Realizar la unión de colectores en alcantarillados de alta pendiente, para evitar velocidades superiores a la máxima permitida, también una posible erosión de la tubería.
- Mitigar la turbulencia, la cavitación, los flujos inestables y el esfuerzo cortante entre 2 tramos de tuberías de un sistema de alcantarillado.

2.2.2 Cámaras de caída libre

Es el diseño más simple para este tipo de estructuras; conecta un conducto de salida, a través de una cámara simple, en la cual ocurren los fenómenos de disipación de energía.

Se puede tener 3 condiciones:

- Condición 1, el chorro que proviene del ducto de entrada golpea el colchón de agua formada en el fondo.
- Condición 2, el chorro golpea la unión entre el ducto de salida y la cámara en este caso el resalto hidráulico ocurre en el ducto de salida.
- Condición 3, el chorro golpea la pared opuesta de la cámara, en este caso el colchón de agua puede ser más alto que el ducto de salida. (Saldarriaga, Cámaras de quiebre en sistemas de alcantarillado de alta caída, 2008)

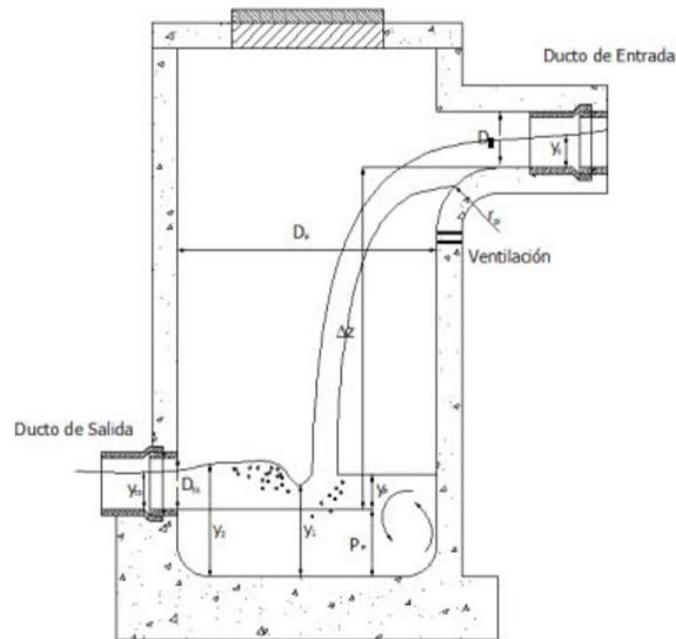


Figura 1. Cámara de caída libre.
 Fuente: Saldarriaga (2008)

2.2.3 Cámaras de caída tipo vórtice

El flujo ingresa a través del canal de entrada o aproximación con condiciones específicas de funcionamiento; continúa el flujo por la cámara de entrada y desciende en forma helicoidal por el pozo vertical y continúan por el canal de entrega hacia el colector de salida del sistema.

Se puede dividir en 5 partes:

- a) Canal de entrega o aproximación, donde el tipo de flujo que circula por el canal de entrada determinará las características hidrodinámicas.
- b) Cámara de entrada, La configuración de la cámara, con paredes curvas, permite que la lámina del flujo permanezca confinada a la geometría de entrada garantizando la entrega de un flujo helicoidal al tubo vertical.
- c) Tubo vertical o pozo, el diámetro del tubo vertical debe garantizar la presencia de aire, para la estabilización de la lámina descendente, y la formación del flujo helicoidal adecuado.
- d) Cámara de disipación al pie, disipar la energía residual y ofrecer la posibilidad de inspección de la estructura de cambio de nivel.

e) Canal de entrega, la geometría de la transición entre la pared de aguas abajo de la cámara y el canal garantice un flujo controlado. (Haro & Jara, 2006)

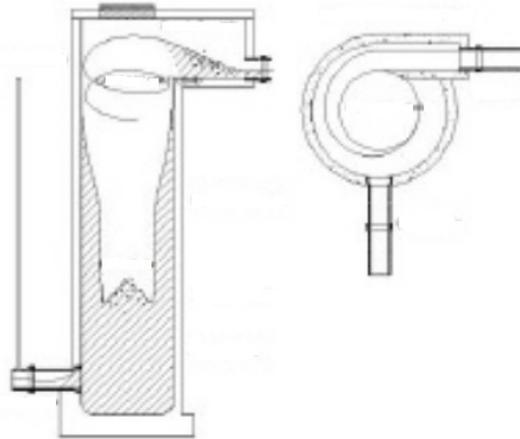


Figura 2. Cámara de caída tipo vórtice.
Fuente: Saldarriaga (2008)

2.2.4 Cámaras de caída con estructura de bandejas

El flujo cae verticalmente a través de una serie de bandejas procurando eliminar parcialmente la energía en cada una de ellas. Además, permite en forma limitada, el cambio de dirección del flujo a la salida.

Se divide en 3 partes:

- a) Canal de entrega o de aproximación, donde no se admite confluencia ni derivación de flujos en la zona cercana al ingreso del pozo.
- b) Pozo de bandejas, van bandejas horizontales colocadas de forma alternada con una separación determinada que gradualmente disipan energía.
- c) Canal de entrega, permita la eliminación de la energía residual del flujo. (Haro & Jara, 2006)

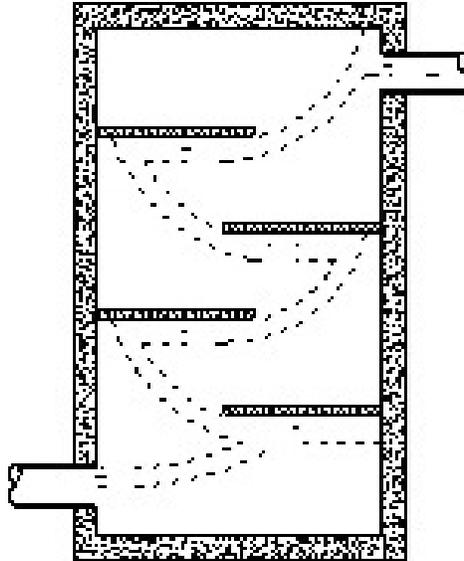


Figura 3. Cámara de caída con estructuras de bandejas.
Fuente: RAS (2016)

2.3 Tipos de entrada cámara tipo vórtice

La naturaleza del flujo en el eje de caída se encuentra en función de la geometría de entrada. La configuración de entrada también controla la profundidad de agua requerida en el canal de aproximación (relación profundidad-descarga) y el diámetro del eje vertical (relación diámetro-descarga) para pasar el flujo de diseño. La Figura 4, presenta diferentes tipos de entrada asociados a la estructura de caída tipo vórtice: circular, sifón, espiral, helicoidal y tangencial.

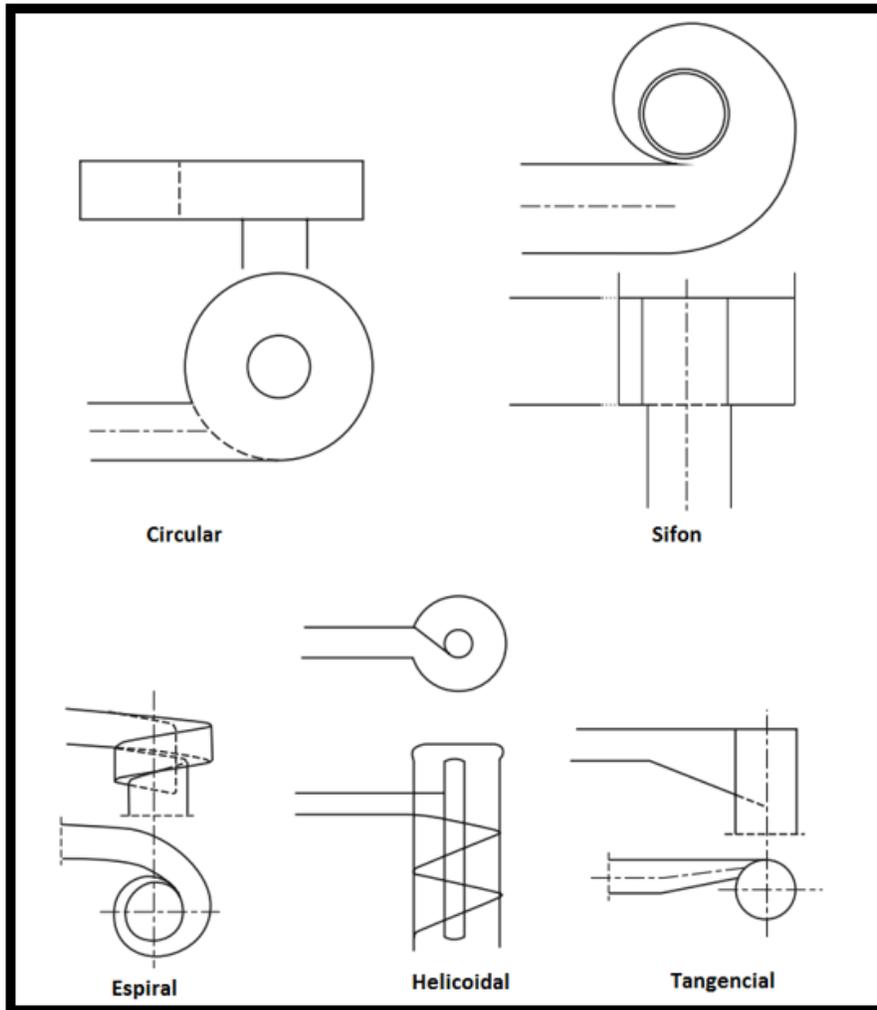


Figura 4. Tipos de entrada de cámaras tipo vórtice.
Fuente: Tomado de Williamson (2001)

La tabla 1 presenta la evaluación de la estructura de caída teniendo como base el tipo de entrada.



Tabla 1. Evaluación de estructura de caída basada en el tipo de entrada

Tipo/Configuración de entrada	Ventajas	Desventajas
Vórtice/Entrada Tangencial	<p>Diseño simple</p> <p>Arrastre de aire a baja velocidad; transporta el flujo de manera eficiente desde la superficie hasta la parte inferior del eje</p> <p>Ampliamente utilizado desde la entrada tipo vórtice</p> <p>Rendimiento comprobado</p> <p>Puede usarse como eje de acceso al túnel principal en sistemas de clima húmedo</p> <p>Minimiza la turbulencia y la generación de olores</p> <p>Fácil mantenimiento</p> <p>Disipa eficazmente la energía</p> <p>Diseño y construcción de entrada simple</p> <p>Entra la menor cantidad de aire y minimiza la turbulencia</p> <p>Puede eliminar la necesidad de una cámara de desaireación y ventilación</p> <p>Huella compacta</p>	<p>Una gran cámara de desaireación puede ser difícil de construir condiciones de suelo blando</p> <p>El generador de vórtice puede ser grande y costoso de construir</p> <p>Ocupa gran superficie</p> <p>Puede requerir ventilación en la superficie o en la instalación de control de olores</p>
Vórtice/Rampa helicoidal	<p>La conexión corta al túnel puede minimizar el trabajo subterráneo</p> <p>Generación de olor menos de un problema</p> <p>El costo total puede ser menor en comparación con otros diseños ya que la cámara de ventilación y desaireación puede ser eliminada</p> <p>Aplicado en sistema de aguas pluviales con buenos resultados reportados</p>	<p>Registro de rendimiento a largo plazo aún no probado</p> <p>Aplicación limitada solo en el sistema de aguas pluviales</p> <p>Las rampas helicoidales son caras y la fabricación personalizada es típicamente requerida</p> <p>Las rampas helicoidales pueden estar sujetas a erosión / corrosión dependiendo de la aplicación y las características del flujo; puede no ser práctico para aplicaciones de flujo continuo (por ejemplo, alcantarillado sanitario).</p> <p>Eje vertical más grande en comparación con otros diseños</p> <p>La pérdida de carga alta a través de la estructura requiere un eje vertical de mayor diámetro</p> <p>Puede requerir pantallas de barra para evitar que los objetos se obstruyan o se alojen en rampas</p> <p>No se puede usar la estructura como acceso al túnel principal</p>



Tipo/Configuración de entrada	Ventajas	Desventajas
Vórtice/Entrada Circular y Entrada de Desplazamiento	<p>El diseño de entrada circular tiene un rendimiento comprobado a largo plazo en el sistema sanitario</p> <p>Arrastre de aire a baja velocidad; transporta el flujo de manera eficiente desde la superficie hasta la parte inferior del eje</p> <p>Puede usarse como eje de acceso al túnel principal en sistemas de clima húmedo</p> <p>Minimiza la turbulencia y la generación de olores</p> <p>Fácil mantenimiento</p> <p>Disipa eficazmente la energía</p> <p>Útil bajo condiciones de flujo supercrítico</p>	<p>Tecnología más nueva, instalaciones limitadas, historial de corto plazo</p> <p>Requiere una altura elevada en la entrada para pasar los flujos de diseño</p> <p>Se puede requerir una tapa a presión para reducir los requisitos de cabeza alta</p> <p>La gran cámara de desaireación puede ser difícil de construir en condiciones de suelo blando</p> <p>La estructura de entrada puede ser grande y costosa de construir</p> <p>Ocupa gran superficie</p> <p>Puede requerir ventilación en la superficie o en la instalación de control de olores</p>
Vórtice/Entrada Espiral y Entrada Sifón	<p>Arrastre de aire a baja velocidad; transporta el flujo de manera eficiente desde la superficie hasta la parte inferior del eje</p> <p>Puede usarse como eje de acceso al túnel principal en sistemas de clima húmedo</p> <p>Minimiza la turbulencia y la generación de olores</p> <p>Fácil mantenimiento</p> <p>Disipa eficazmente la energía</p>	<p>Estructuralmente compleja, difícil de construir.</p> <p>La gran cámara de desaireación puede ser difícil de construir en condiciones de suelo blando</p> <p>La estructura de entrada puede ser grande y costosa de construir</p> <p>Ocupa gran superficie</p> <p>Puede requerir ventilación en la superficie o en la instalación de control de olores</p>

Fuente: (Williamson, 2001)



2.4 Antecedentes

2.4.1 “Experimental Study of Flow in a Vortex Drop Shaft”

En el estudio realizado por (Zhu, 2006), establece que el rendimiento de una estructura de caída de vórtice con una relación altura-diámetro relativamente pequeña.

Se hace mención de varios trabajos anteriores unos realizados por Jain y Kennedy (1984) en el Distrito Metropolitano de Alcantarillado de Milwaukee donde algunas de las estructuras de caída llevan una descarga de hasta 90 m³/s sobre una altura de caída de 80 m.

Adicionalmente, también hace referencia sobre el trabajo de Vischer y Hager (1995) Curbans, Italia, quienes comentan sobre una caída de 170 m de altura y 7,30 m de diámetro para una descarga de diseño de 140 m³/s.

Finalmente, un trabajo en China, sobre la central eléctrica Shapai con una altura de caída de aproximadamente 100 m y una descarga de diseño de más de 200 m³/s.

Este estudio se realizó en el Instituto de Investigación de Recursos Hidráulicos e Hidroeléctricos de China (IWHR).

Dicha experimentación tuvo varios aspectos que se describen a continuación:

- El canal era casi horizontal y la entrada de vórtice puede clasificarse como un tipo de ranura tangencial. El modelo estaba hecho de plexiglás para observación visual.
- La descarga de diseño máxima de 0,051 m³/s, la altura total de caída de la estructura es $L = 3,15$ m, un diámetro de 0,223 y la longitud del eje es 2.70 m.
- Las descargas se midieron con un vertedero rectangular.
- La presión de la pared se midió mediante un total de 50 sensores de presión de cristal piezoeléctrico dispuestos en 13 secciones.
- Una sonda pequeña en forma de L especialmente diseñada. La sonda consistía en un tubo horizontal de 3 mm de diámetro y un pequeño tubo de entrada (1,5 mm de altura y 1,2 mm de diámetro) que se colocaba verticalmente en la cabeza.

Al realizar varios ensayos se obtuvieron mediciones detalladas de la presión de la pared y el espesor del agua del flujo de chorro anular a lo largo del eje vertical de caída, y se midió la velocidad de arrastre de aire.

Finalmente, los resultados confirmaron la alta eficiencia de la disipación de energía en la estructura de caída de vórtice incluso para una altura de caída relativamente pequeña.



2.4.2 “Energy dissipation of flow in the vortex structure: experimental investigation”

En la investigación realizada por (Khanjani & Mahmoudi-Rad, 2019) muestra la configuración de un modelo físico, hecho de segmentos de plexiglás, en el cual se estudia el rendimiento hidráulico de la estructura de caída de vórtice con entrada tangencial en términos de eficiencia de disipación de energía de flujo.

Para lo cual construyeron un modelo físico de cámara de vórtice para el sistema de alcantarillado urbano de Teherán, Irán, a una escala de 1:10 en el laboratorio hidráulico de la Universidad Shahid Bahonar de Kerman. Dicho modelo fue realizado en plexiglás transparente incluía un canal de aproximación rectangular, una entrada tangencial, un pozo de caída, una cámara de disipación y un túnel de salida rectangular.

Para esta investigación se realizaron un total de 144 experimentos donde se fue variando la altura de total de caída (L) así como la profundidad del sumidero (Hs) con respecto al diámetro del eje de la cámara (D) por lo cual la cámara estaba diseñada para tener cinco, cuatro y tres segmentos para relaciones $L/D = 16$, 13 y 10 , respectivamente, para cambiar la altura del eje durante los experimentos. Además, se construyeron dos segmentos prefabricados para variar Hs y de esa manera, les fue posible regular Hs/D entre 0 y 2.

El estudio reporta que el valor en la eficiencia de disipación de energía de flujo (FEDE) fue de 94,3% para $L/D = 10$ a 91,88% para $L/D = 16$. Para Hs/D = 2 aumentando a 94,98% para $L/D = 16$, en Hs/D = 1, los valores de FEDE cayeron en picado del 94,3% para $L/D = 10$ a 93,72% para $L/D = 13$.

Estos valores de FEDE se realizaron para caudales entre 9,7 y 27,1 L/s, donde observaron que no se produjo la formación de un salto hidráulico en la entrada tangencial y el flujo se drenó libremente al eje de caída. Además, la superficie del agua en la entrada tangencial era más baja que la del canal de aproximación.

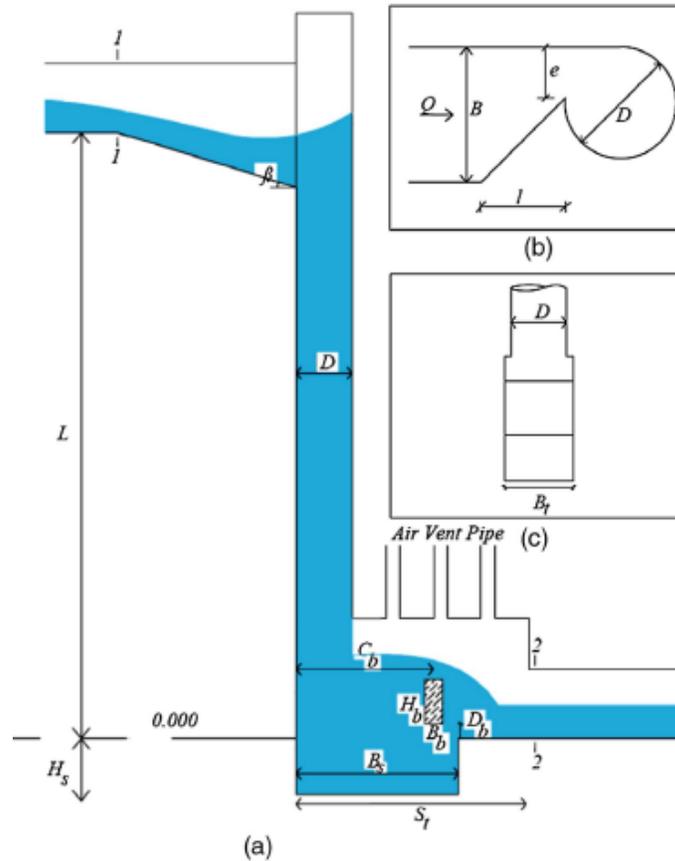


Figura 5. Parámetros hidráulicos y geométricos en el modelo: (a) vista lateral; (b) vista en planta de la parte de entrada; y (c) sección transversal de la cámara de disipación.
 Fuente: (Khanjani & Mahmoudi-Rad, 2019)

2.5 Descripción de las ecuaciones utilizadas

2.5.1 Principio de conservación de energía (Ecuación de Bernoulli)

En el caso de fluidos incompresibles se puede integrar la segunda ley de Newton o aplicando la ley de conservación de energía entre dos secciones a lo largo de una línea de corriente, ignorando la viscosidad, la compresibilidad y los efectos térmicos.

Por lo que en hidráulica:

$$\frac{p}{\rho * g} + \frac{v^2}{2 * g} + z = cte$$

Ecuación 1. Ecuación de energía Bernoulli

$\frac{p}{\rho * g}$, es la altura de la presión. Representa la energía por unidad de peso debida a las fuerzas de presión.



$\frac{v^2}{2 * g}$, es la altura de velocidad o altura cinética y representa la energía cinética por unidad de peso del fluido en un punto.

z, es la altura geométrica y representa la energía potencial gravitatoria del fluido por unidad de peso.

Por ende, de acuerdo con el principio de conservación de energía, la altura de energía total en la sección 1 localizada aguas arriba debe de ser igual a la altura de energía total en la sección 2 localizada aguas abajo más la pérdida de energía h_f entre las dos secciones. (Chow, 1994)

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

Ecuación 2. Conservación de energía entre 2 secciones

2.5.2 Energía específica

Según (Chow, 1994), para una sección de canal, la energía específica se define como la energía de agua en cualquier sección de un canal, medida con respecto al fondo de este.

$$E = d * \cos\theta + \alpha \frac{V^2}{2g}$$

Ecuación 3. Energía específica

Cuando hay un canal de pendiente pequeña y $\alpha=1$, la ecuación se convierte en

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

Ecuación 4. Energía específica con pendiente pequeña

La cual indica que la energía específica es igual a la suma de la profundidad del agua más la altura de velocidad. Como $V=Q/A$, puede escribirse como $E=y+Q^2/2gA^2$. Puede verse que, para una sección de canal y caudal Q determinados, la energía específica en una sección de canal sólo es función de la profundidad de flujo.

2.5.3 Tubería de entrada y salida

Para realizar el análisis del comportamiento en la disipación de energía dentro de la cámara es importante establecer las condiciones de flujo en la entrada y salida de la cámara mediante las siguientes ecuaciones donde se calcula la geometría respectiva. (Butler & Davies, 2010)

$$\theta = 2 * \cos^{-1} \left(1 - \frac{2y}{D} \right)$$

Ecuación 5. Ángulo central en radianes

$$A = \frac{D^2}{8} (\theta - \sin\theta)$$

Ecuación 6. Área mojada de tubería circular parcialmente llena

$$P = \frac{D\theta}{2}$$

Ecuación 7. Perímetro mojado de tubería circular parcialmente llena

$$R_h = \frac{A}{P} = \frac{D}{4} \left[\frac{\theta - \sin\theta}{\theta} \right]$$

Ecuación 8. Radio hidráulico de tubería circular parcialmente llena

$$D_h = \frac{4A}{P} = 4R_h$$

Ecuación 9. Diámetro hidráulico para tubería circular

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

Ecuación 10. Número de Froude

$$Re = \frac{D_h * V}{\nu} = \frac{4 * R_h * V}{\nu}$$

Ecuación 11. Número de Reynolds

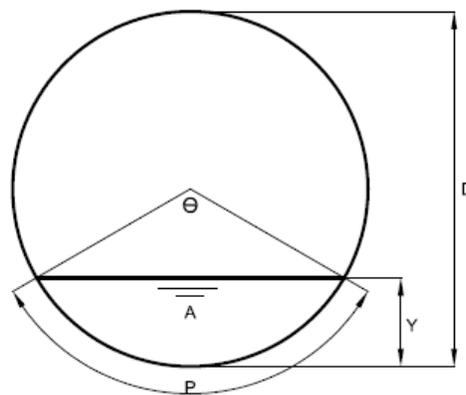


Figura 6. Definición de elementos geométricos para una tubería circular.

2.5.4 Cámara vertical de vórtice

Para analizar el comportamiento del flujo en la parte vertical de la cámara de vórtice se parte de la suposición que la lámina de agua que circula se comporta como un flujo en un canal abierto rectangular por lo que se utilizaron las siguientes ecuaciones:

$$y_c = \left(\frac{Q^2}{gb^2} \right)^{1/3}$$

Ecuación 12. Profundidad para canal rectangular

Para calcular las pérdidas por fricción es necesario ocupar la ecuación de Darcy-Weisbach dado que es la ecuación más general para pérdidas de energía mientras ocurre el movimiento de fluidos. (Saldarriaga J. , 2016)

$$h_f = f * \left(\frac{L}{D} \right) * \left(\frac{v^2}{2g} \right)$$

Ecuación 13. Pérdida de energía por fricción (Ecuación Darcy-Weisbach)

Mientras que el factor de fricción necesario en la ecuación de Darcy-Weisbach será calculado mediante la ecuación de Colebrook-White que describe mejor el comportamiento de la rugosidad relativa en todas las zonas de flujo. (Saldarriaga J. , 2016)

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left(\frac{k_s}{3,7d} + \frac{2,51}{Re\sqrt{f}} \right)$$

Ecuación 14. Factor de fricción de Colebrook-White

Cuando se consideran canales rectangulares anchos, es decir cuando el ancho es 5 a 10 veces mayor que la profundidad ($b \gg y$), el valor de $R_h \approx y$.

$$Re = \frac{4 * R_h * V}{\nu} = \frac{4yV}{\nu}$$

Ecuación 15. Número de Reynolds en canal ancho

$$\psi_{barrido} = \frac{S}{r}$$

Ecuación 16. Ángulo de barrido



2.5.5 Eficiencia de disipación de energía de flujo

En base a investigaciones anteriores mencionadas en (Khanjani & Mahmoudi-Rad, 2019), donde se calculó la eficiencia de disipación de energía (η) en las estructuras de caída, incluidas las estructuras de caída de vórtice se presenta la siguiente ecuación:

$$\eta = \left(1 - \frac{E_2}{E_1}\right) * 100$$

Ecuación 17. Eficiencia de disipación de energía

3 METODOLOGÍA

3.1 Descripción del modelo físico

Con el propósito de probar la eficiencia en la disipación de energía de flujo en una cámara de vórtice se realizó la fabricación de una estructura elaborada en acrílico transparente con piezas desmontables.

Para dicha fabricación se tuvo en cuenta el espacio físico disponible dentro del laboratorio de hidráulica de la Universidad de los Andes, el aspecto económico y el material bibliográfico expuesto anteriormente.

Para lo cual se consideró que se implemente una base cámara inspección NOVACAM de 600mm de diámetro con salida recta esto para facilitar la construcción del modelo físico y debido a su buena capacidad hidráulica de descarga.



Figura 7. Base cámara inspección NOVACAM 600 mm

Una vez establecido la base se dimensionaron las piezas de acrílico transparente con un diámetro de 600 mm y para la altura de la cámara se decidió tener en cuenta las dimensiones del lugar donde se ubicó el modelo, así como la relación altura de caída – diámetro (L/D) cuyo valor debía ser diferente a los antecedentes bibliográficos donde se habían probado cámaras con $L/D = 10, 13$ y 16 para el trabajo de Khanjani & Mahmoudi-Rad (2019) y de aproximadamente un valor de $L/D = 12$ para el estudio realizado por Zhu (2006). Por lo que se decidió que el modelo tuviera un valor aproximado de $L/D = 2,6$ lo que significaría tener una cámara no tan alta y donde se verificaría si aún así la eficiencia en la disipación de energía es aceptable.



Figura 8. Fabricación de las piezas de acrílico

Finalmente se diseñaron 3 tipos de entrada de cámaras tipo vórtice en acrílico transparente de 5 mm de grosor para poder verificar así diferentes configuraciones. Los esquemas con las especificaciones de estas entradas se encuentran en los anexos.

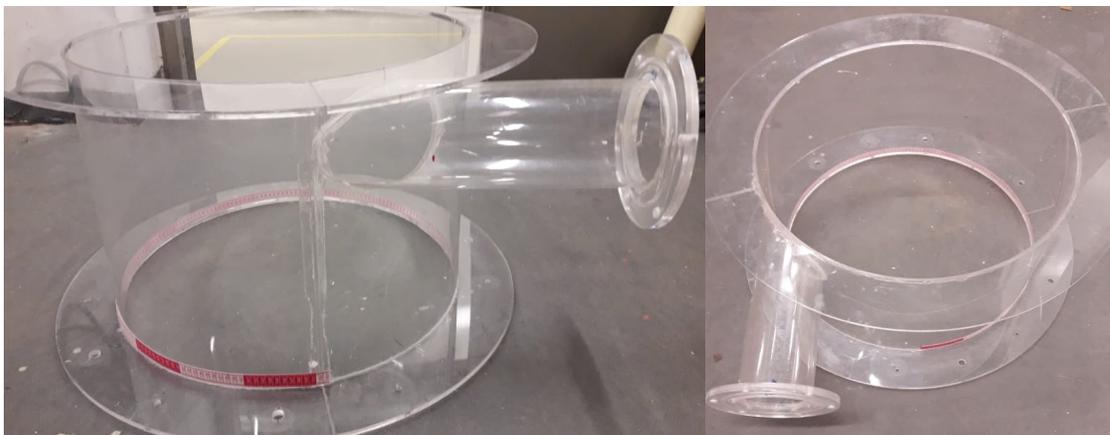


Figura 9. Entrada tangente interna

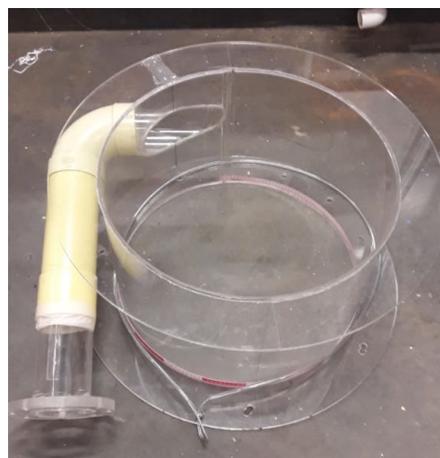


Figura 10. Entrada tangente externa circular 90°

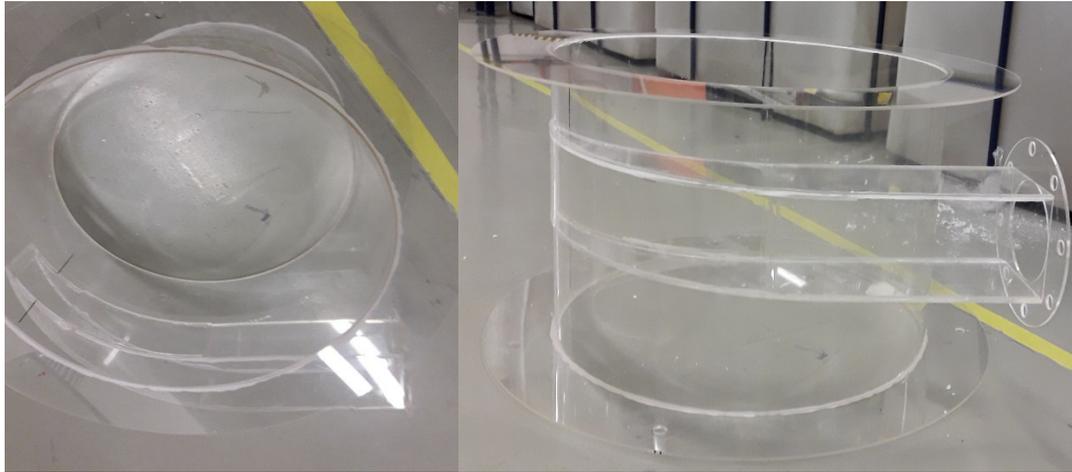
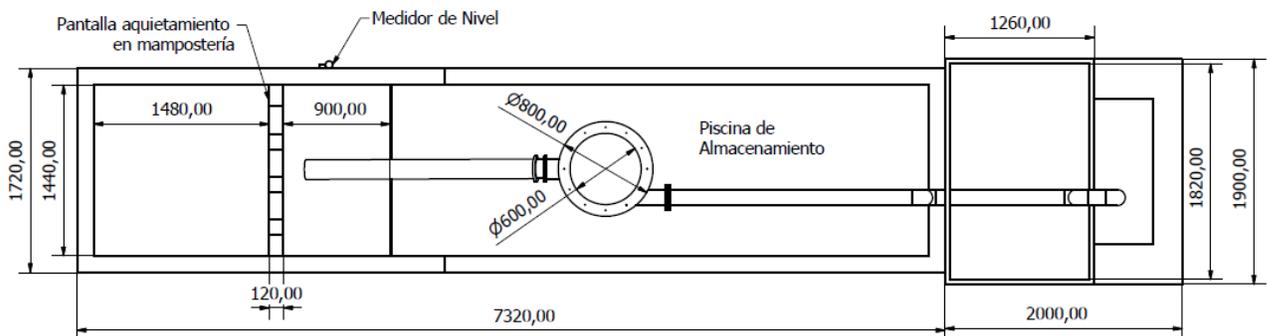


Figura 11. Entrada externa cuadrada

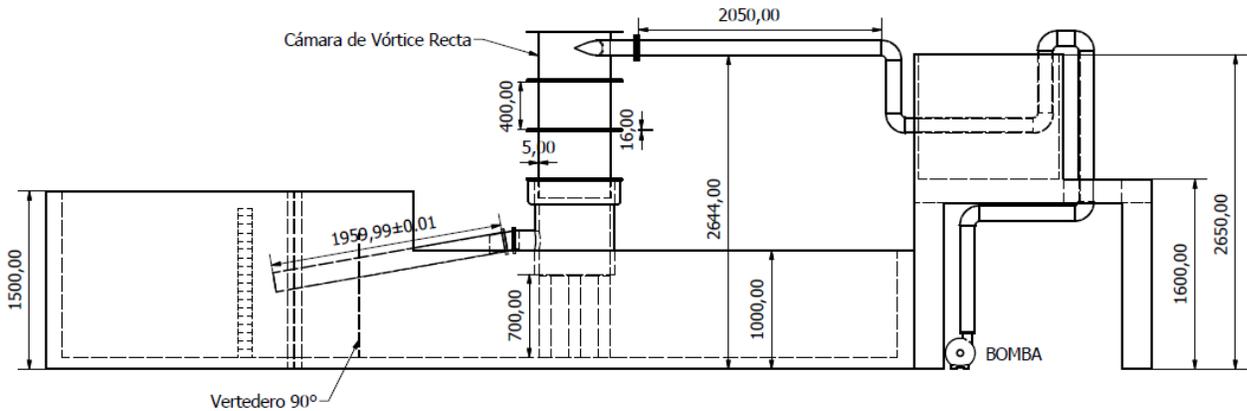
3.2 Montaje en el laboratorio

Para desarrollar el estudio de la eficiencia de la cámara de vórtice se buscó el sitio adecuado en el laboratorio de hidráulica de la Universidad de los Andes para la instalación del prototipo, para lo cual fue necesario realizar varias adecuaciones en el lugar donde se ubicaría ulteriormente el prototipo.

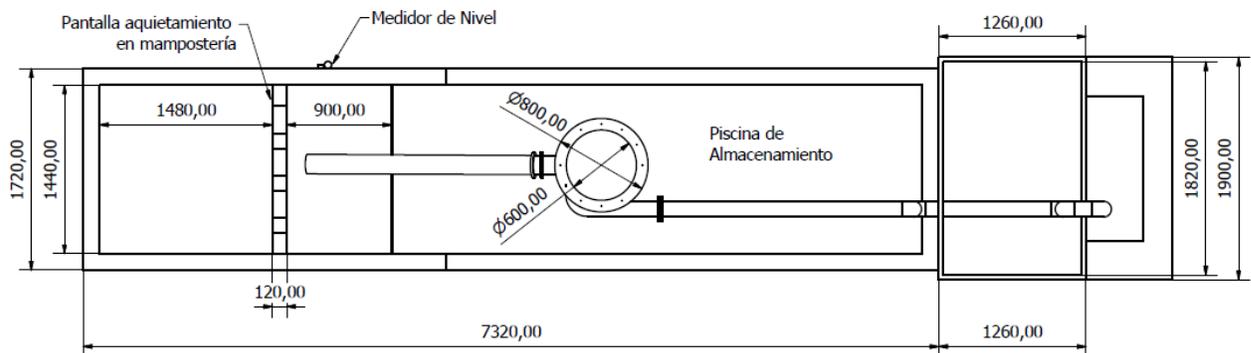
En el Esquema 1, se muestra una vista del montaje dentro del lugar asignado en el laboratorio ubicado en el edificio ML-034.



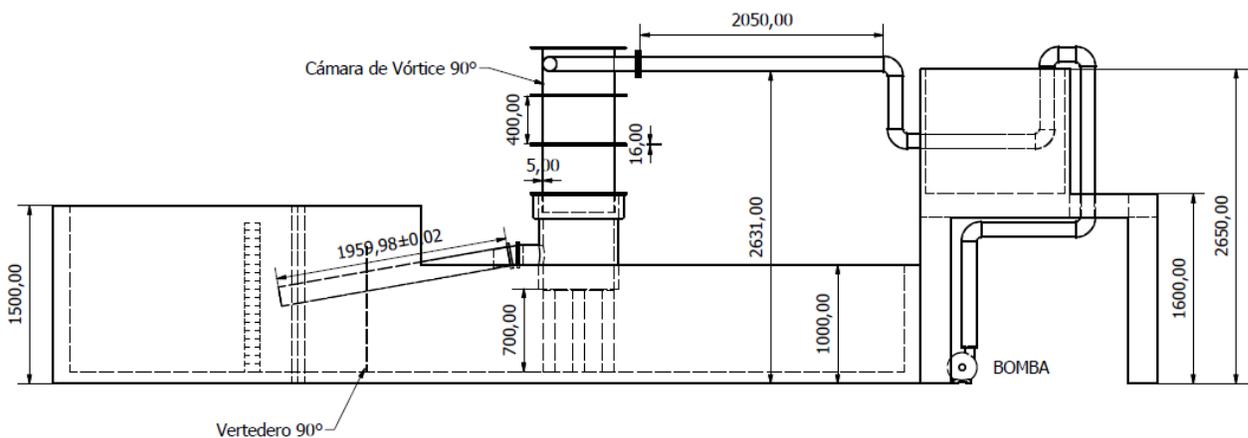
Esquema 1. Plano instalación en planta de cámara de vórtice con entrada recta



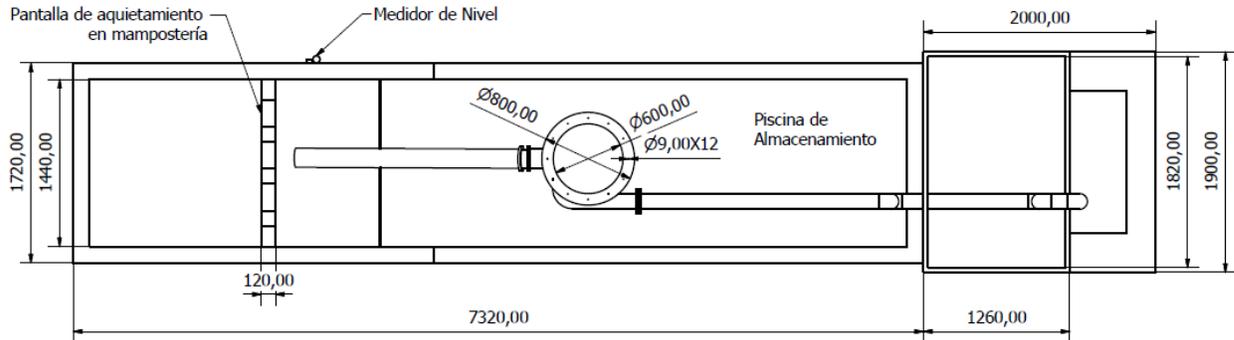
Esquema 2. Plano instalación en perfil de cámara de vórtice con entrada recta



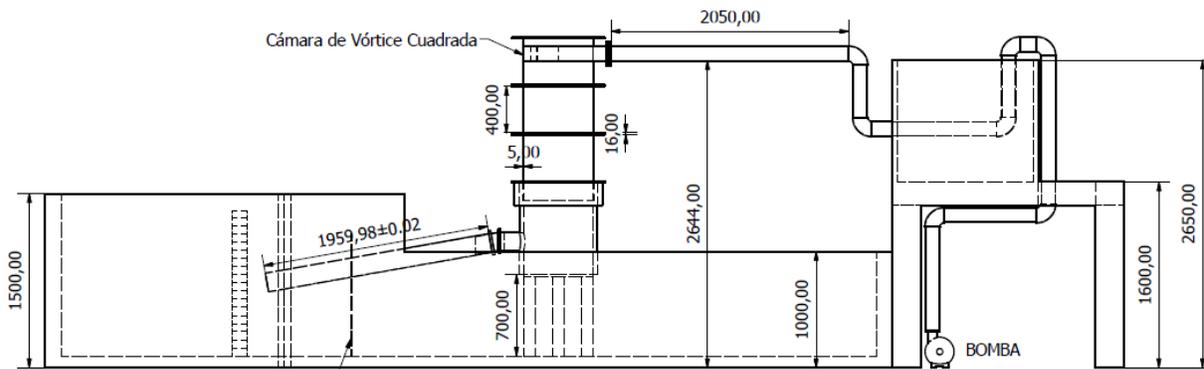
Esquema 3. Plano instalación en planta de cámara de vórtice con entrada circular a 90 grados



Esquema 4. Plano instalación en perfil de cámara de vórtice con entrada circular a 90 grados



Esquema 5. Plano instalación en planta de cámara de vórtice con entrada cuadrada



Esquema 6. Plano instalación en perfil de cámara de vórtice con entrada cuadrada



Figura 12. Montaje del modelo físico en el laboratorio

3.2.1 Motobomba

Una bomba de tipo centrífuga de la marca HIDROMAC de 175 mm de diámetro que trabaja a 1750 RPM es la encargada para la impulsión del agua desde el tanque de almacenamiento y luego a través de la tubería hasta llegar al prototipo de la cámara de vórtice.



Figura 13. Bomba centrífuga HIDROMAC

3.2.2 Tubería de PVC

La alimentación del agua hacia la entrada del prototipo de la cámara de vórtice es a través de un tubo de 4 pulgadas de PVC.

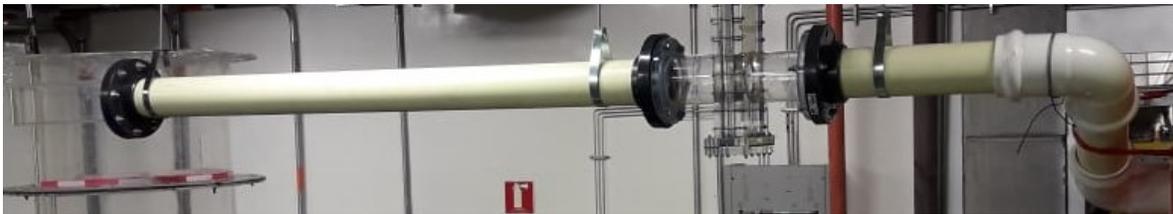


Figura 14. Tubería de alimentación a la cámara de vórtice

3.2.3 Tanque o piscina de almacenamiento

Es el lugar donde se encuentra almacenada el agua que es recirculada a través de todo el sistema del montaje cuya capacidad es aproximadamente de 9800 litros, cuya altura de lámina de agua está a 625 mm para que no existan problemas de cavitación en la bomba por entrada de aire.

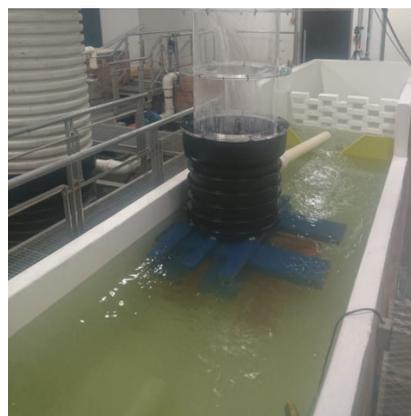


Figura 15. Tanque o piscina de almacenamiento

3.2.4 Base de madera

Se construyó una base de madera y metal con una altura de 70 cm con el objetivo de mantener la cámara tipo vórtice sobre la lámina de agua del tanque.

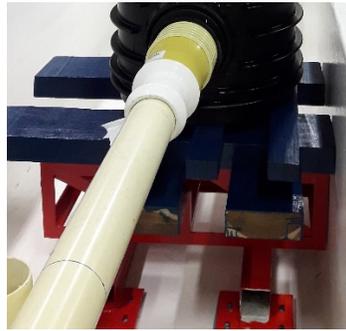


Figura 16. Base de madera

3.2.5 Vertedero

Este cumplió un papel muy importante en el montaje ya que tenía como función la verificación del caudal. Este vertedero descarga el agua a la piscina de almacenamiento del modelo, de tal forma que el agua es recirculada de manera consecutiva a través del montaje.

Para ello se realizó la calibración del vertedero mediante un aforo y de esa manera se estableció una ecuación que permite determinar el caudal de descarga a través de la altura.



Figura 17. Vertedero triangular (90 grados)

El aforo se realizó mediante la toma de 15 valores de tiempo, cuyos valores fueron promediados, para caudales diferentes. A continuación, se muestra la ecuación obtenida:

$$Q(L/s) = 1834.4983 * \Delta H^{2.5481}$$

Ecuación 18. Calibración del vertedero

Donde:

ΔH = medida del limnómetro en m.

3.2.6 Variador de velocidad

Tiene como función regular el caudal que transita a través del montaje debido a que controla el número de revoluciones de la bomba que succiona el agua desde la piscina de almacenamiento.



Figura 18. Variador de velocidad de la bomba

3.3 Instrumentación y medición de los datos

3.3.1 Limnómetro del vertedero

Ubicado en la pared externa del vertedero cuyo propósito es medir la diferencia de altura de la lámina de agua que se encuentra aguas arriba del vertedero.



Figura 19. Limnómetro del vertedero

3.3.2 Limnómetro para la entrada y salida de la cámara

Para medir la profundidad de agua en la entrada y salida de la cámara en cada prueba se instaló unos limnómetros, los cuales mediante una ajuga metálica se mueve de manera manual para poder observar la profundidad del agua.



Figura 20. Limnómetros móviles (ubicados en la entrada y salida de la cámara de vórtice)

3.3.3 Cinta métrica

Mediante el uso de varias cintas métricas se midió el ancho de la lámina de agua que circula dentro de la parte vertical de la cámara, así como también se obtuvo valores aproximados de la longitud de la lámina de agua.



Figura 21. Cintas métricas

3.3.4 Descripción de la toma de datos

Para que exista un grado de validez aceptable en la toma de mediciones de alguna magnitud es necesario y eficaz realizar varias repeticiones en la determinación de dicho valor, el número de valores medidos depende de que tan dispersos estén los valores individuales medidos.

Debido a esto se procedió a efectuar 3 repeticiones en la toma de las mediciones individuales en el limnómetro del vertedero para cada caudal que fue probada la cámara de vórtice, luego se calculó un valor medio con estas medidas individuales y posteriormente este valor medio fue usado en la ecuación del vertedero.

De la misma manera se obtuvo los valores de profundidad medidos en los limnómetros en la entrada y salida de la cámara de vórtice que posteriormente se usaron en las ecuaciones para el cálculo de los resultados de los diferentes parámetros.

Para obtener los valores de las mediciones realizadas dentro de la parte vertical de la cámara se colocaron varias cintas métricas a diferentes alturas ya que el flujo observado es no permanente y por tanto el ancho de la lámina de agua que circula dentro de ella varía según la posición de la altura donde se realiza la medición.

Por ende, se tomó las medidas de ancho a diferente altura, seguidamente se calculó un valor medio del ancho de la lámina con los estos valores, para finalmente usar este valor al efectuar los cálculos de las variables respectivas dentro de la cámara.

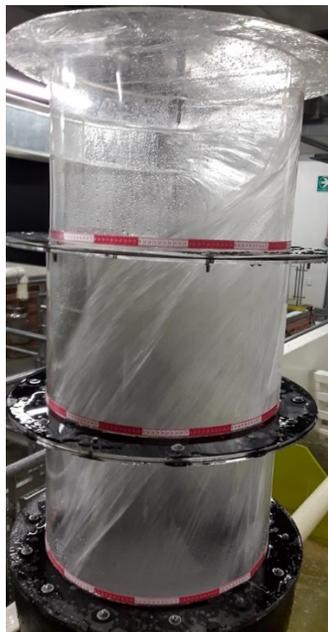


Figura 22. Cintas métricas a diferentes alturas de la cámara de vórtice

4 RESULTADOS

4.1 Entrada tangente interna

Teniendo en cuenta las ecuaciones presentadas anteriormente se procedió al cálculo de las diferentes variables para la obtención de la eficiencia de disipación de energía de flujo en la cámara de vórtice.

A continuación, se muestra el procedimiento seguido para calcular en primer lugar los caudales que circulan a través del montaje con la ecuación del vertedero.

$$\Delta H_{\text{promedio aguas arriba vertedero}} = 0,121 \text{ m (valor medido)}$$

$$Q(\text{L/s}) = 1834.4983 * (0,121)^{2.5481} = 8,44039$$

$$Q(\text{m}^3/\text{s}) = 0,00844039$$

ΔH_{medido}	Q	
	(L/s)	m3/s
0.121	8.44039392	0.00844039
0.124	8.98390415	0.0089839
0.129	9.93598562	0.00993599
0.136	11.2619043	0.0112619
0.145	13.3844066	0.01338441
0.148	14.1013662	0.01410137
0.152	15.0929092	0.01509291

Tabla 2. Caudales obtenidos del vertedero (Entrada tangente interna)

Después se calcula las diferentes variables de entrada y salida de la cámara de vórtice.

$$y_{\text{promedio entrada}} = 0,065 \text{ m (valor medido)}$$

$$\theta = 2 * \cos^{-1} \left(1 - \frac{2 * 0,065}{0,114} \right) = 3,423 \text{ rad}$$

$$A = \frac{0,114^2}{8} (3,423 - \sin 3,423) = 0,0060125 \text{ m}^2$$

$$P = \frac{0,114 * 3,423}{2} = 0,1951 \text{ m}$$



$$R_h = \frac{A}{P} = \frac{0,0060125}{0,1951} = 0,0308 \text{ m}$$

$$D_h = 4R_h = 4 * 0,0308 = 0,1232 \text{ m}$$

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{0,00844}{0,0060125} = 1,4038 \text{ m/s}$$

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gD_h}} = \frac{1,4038}{\sqrt{9,8 * 0,1232}} = 1,277$$

$$Re = \frac{D_h * V}{\nu} = \frac{0,1232 * 1,4038}{1,106 * 10^{-6}} = 156443,4$$

Q (m3/s)	y_medido (m)	Θ (rad)	A (m2)	v (m/s)	P (m)	Rh (m)	Dh (m)	Fr	Re
0.00844039	0.0650	3.423	0.006013	1.4038044	0.1951238	0.0308138	0.1232554	1.277	156443.447
0.00898390	0.0670	3.494	0.006238	1.4402725	0.1991748	0.0313174	0.1252697	1.300	163130.637
0.00993599	0.0665	3.476	0.006181	1.6073791	0.1981599	0.0311944	0.1247777	1.454	181342.721
0.01126190	0.0785	3.915	0.007495	1.5025709	0.2231618	0.0335859	0.1343436	1.310	182514.257
0.01338441	0.0820	4.050	0.007859	1.703001	0.2308309	0.0340479	0.1361916	1.474	209705.584
0.01410137	0.0830	4.089	0.007961	1.771248	0.2330672	0.0341586	0.1366346	1.531	218818.888
0.01509291	0.0830	4.089	0.007961	1.895794	0.2330672	0.0341586	0.1366346	1.638	234205.223

Tabla 3. Valores de las variables de entrada (Entrada tangente interna)

$$y_{promedio \text{ entrada}} = 0,0615 \text{ m} \quad (\text{valor medido})$$

$$\theta = 2 * \cos^{-1} \left(1 - \frac{2 * 0,0615}{0,114} \right) = 3,442 \text{ rad}$$

$$A = \frac{0,114^2}{8} (3,442 - \sin 3,442) = 0,005349 \text{ m}^2$$

$$P = \frac{0,114 * 3,442}{2} = 0,1841 \text{ m}$$

$$R_h = \frac{A}{P} = \frac{0,005349}{0,1841} = 0,029 \text{ m}$$

$$D_h = 4R_h = 4 * 0,029 = 0,116 \text{ m}$$

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{0,00844}{0,005349} = 1,577 \text{ m/s}$$

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gD_h}} = \frac{1,577}{\sqrt{9,8 * 0,116}} = 1,479$$

$$Re = \frac{D_h * V}{\nu} = \frac{0,116 * 1,577}{1,106 * 10^{-6}} = 165779,26$$

Q (m3/s)	y_medido (m)	Θ (rad)	A (m2)	v (m/s)	P (m)	Rh (m)	Dh (m)	Fr	Re
0.00844039	0.0615	3.442	0.00535	1.57799	0.18414	0.02905	0.11619	1.479	165779.2582
0.00898390	0.0585	3.329	0.00503	1.78598	0.17809	0.02825	0.11298	1.697	182444.5416
0.00993599	0.0630	3.499	0.00551	1.80420	0.18718	0.02942	0.11769	1.680	191983.7621
0.01126190	0.0660	3.613	0.00582	1.93462	0.19331	0.03011	0.12045	1.781	210700.651
0.01338441	0.0900	4.643	0.00807	1.65797	0.24841	0.03250	0.12999	1.469	194862.6537
0.01410137	0.0970	5.040	0.00857	1.64576	0.26966	0.03177	0.12710	1.475	189122.2582
0.01509291	0.1070	6.283	0.00899	1.67848	0.33615	0.02675	0.10700	1.639	162384.3511

Tabla 4. Valores de las variables de salida (Entrada tangente interna)

Posteriormente se obtienen los valores de las variables dentro de la cámara.

$$L_{promedio} = 1,407 \text{ m} \quad (\text{valor medido})$$

$$b_{promedio} = 0,54 \text{ m} \quad (\text{valor medido})$$

$$y_c = \left(\frac{Q^2}{gb^2} \right)^{1/3} = \left(\frac{0,00844^2}{9,8 * 0,54^2} \right)^{1/3} = 0,029 \text{ m}$$

$$A = by = 0,54 * 0,029 = 0,01577 \text{ m}^2$$

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{0,00844}{0,01577} = 0,535 \text{ m/s}$$

$$Re = \frac{4yV}{\nu} = \frac{4 * 0,029 * 0,535}{1,106 * 10^{-6}} = 56529,328$$

$$f = 0,02034$$

$$h_f = f * \left(\frac{L}{4y_c} \right) * \left(\frac{v_2^2}{2g} \right) = 0,02034 * \left(\frac{1,407}{4 * 0,029} \right) * \left(\frac{0,535^2}{2 * 9,8} \right) = 0,003577 \text{ m}$$

$$\psi_{barrido} = \frac{S}{r} = \frac{0,925}{0,3} = 3,083 \text{ rad}$$

L (m)	b (m)	Q (m3/s)	yc (m)	A (m2)	v (m/s)	Re	f	hf (m)	Ψbarrido (rad)
1.407	0.54	0.0084404	0.0292027	0.0157695	0.5352368	56529.328	0.02034026	0.00357734	3.083
1.457	0.58	0.0089839	0.0290270	0.0168356	0.5336240	56019.855	0.02038084	0.00371186	3.200
1.522	0.71	0.0099360	0.0272129	0.0192304	0.5166802	50851.201	0.02082213	0.00396141	3.567
1.617	0.70	0.0112619	0.0298654	0.0208062	0.5412758	58464.423	0.02019044	0.00408099	3.633
1.732	0.85	0.0133844	0.0293087	0.0249612	0.5362074	56837.417	0.02031596	0.00439841	4.100
1.822	0.90	0.0141014	0.0293222	0.0262923	0.5363312	56876.784	0.02031287	0.00462626	4.267
1.832	0.96	0.0150929	0.0293845	0.0281112	0.5369005	57058.084	0.02029866	0.00464839	4.433

Tabla 5. Valores de la cámara (Entrada tangente interna)

Finalmente se calcula los valores de disipación de energía, donde z_1 es el valor de la altura medida de la batea de la entrada a la batea de salida cuyo valor es 1,6 m por lo que el valor de z_2 es 0 puesto que este se convierte en el punto de referencia.

$$\text{Energía entrada} = E_1 = y_1 + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 = 0,065 + \frac{1,4038^2}{2 * 9,81} + 1,6 = 1,765 \text{ m}$$

$$\text{Energía salida} = E_2 = y_2 + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 = 0,0615 + \frac{1,577^2}{2 * 9,81} + 0 = 0,188 \text{ m}$$

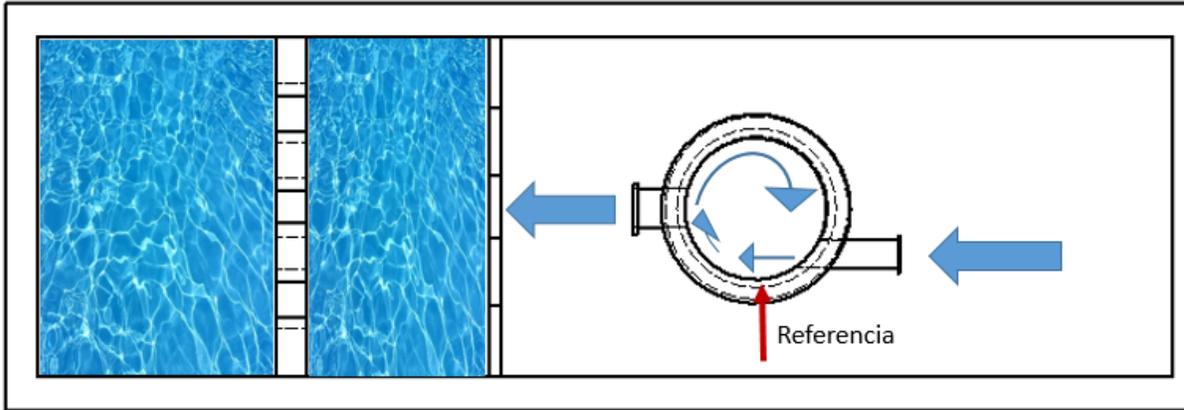
$$\text{Energía por colisión} = E_4 = E_1 - E_2 - E_3 = 1,765 - 0,188 - 0,003576 = 1,573 \text{ m}$$

$$\eta = \left(1 - \frac{E_2}{E_1}\right) * 100 = \left(1 - \frac{0,188}{1,765}\right) = 89,33\%$$

E1 (m)	E2 (m)	Disipación	hf (m)	E4 (m)
1.76544173	0.1884147	89.33%	0.00357734	1.57344969
1.77272807	0.22107554	87.53%	0.00371186	1.54794068
1.79818541	0.22890902	87.27%	0.00396141	1.56531498
1.79357234	0.25676271	85.68%	0.00408099	1.53272864
1.82981919	0.23010517	87.42%	0.00439841	1.59531561
1.84290416	0.23504863	87.25%	0.00462626	1.60322927
1.86618221	0.25059259	86.57%	0.00464839	1.61094122

Tabla 6. Valores de disipación de energía (Entrada tangente interna)

Se puede observar que la eficiencia de disipación de energía es alta ya que esta entre el 86,57 % y el 89,33 % aunque la pérdida de energía por fricción es pequeña donde el valor más alto es de 0,004648 m y la mayor cantidad de energía se disipa por colisión ya que este tipo de entrada genera un chorro en forma de parábola que impacta con la pared frente a la tubería de entrada. También se puede mirar que el ángulo de barrido no llega a completar una vuelta dentro de la cámara.



Esquema 7. Dirección de flujo en la entrada tangente interna

4.2 Entrada tangente externa circular con ángulo de 90°

De la misma manera que en el primer caso se inició por el cálculo de caudales.

$$\Delta H_{promedio \text{ aguas arriba vertedero}} = 0,12 \text{ m (valor medido)}$$

$$Q(L/s) = 1834.4983 * (0,12)^{2.5481} = 8,263$$

$$Q(m^3/s) = 0,008263$$

ΔH_{medido} (m)	Q	
	(L/s)	m3/s
0.12	8.26378571	0.00826379
0.128	9.74089893	0.0097409
0.135	11.1563155	0.01115632
0.141	12.4635722	0.01246357
0.145	13.3844066	0.01338441
0.149	14.3454192	0.01434542
0.152	15.0929092	0.01509291
0.155	15.8635913	0.01586359

Tabla 7. Caudales obtenidos del vertedero (Entrada tangente externa circular de 90°)

Posteriormente se calcula las diferentes variables de entrada y salida de la cámara de vórtice.

$$y_{promedio \text{ entrada}} = 0,106 \text{ m (valor medido)}$$

$$\theta = 6,283 \text{ rad}$$

$$A = 0,0088247 \text{ m}^2$$



$$P = 0,333 \text{ m}$$

$$R_h = 0,0265 \text{ m}$$

$$D_h = 4R_h = 0,106 \text{ m}$$

$$V = \frac{Q}{A} = 0,9364 \text{ m/s}$$

$$F_r = \frac{V}{\sqrt{gD_h}} = 0,919$$

$$Re = \frac{D_h * V}{\nu} = 89748,701$$

Q (m3/s)	Θ (rad)	A (m2)	v (m/s)	P (m)	Rh (m)	Dh (m)	Fr	Re
0.008263786	6.283	0.0088247	0.9364346	0.3330088	0.0265	0.106	0.919	89748.701
0.009740899	6.283	0.0088247	1.1038179	0.3330088	0.0265	0.106	1.083	105790.864
0.011156316	6.283	0.0088247	1.2642099	0.3330088	0.0265	0.106	1.240	121162.971
0.012463572	6.283	0.0088247	1.4123454	0.3330088	0.0265	0.106	1.386	135360.410
0.013384407	6.283	0.0088247	1.5166924	0.3330088	0.0265	0.106	1.488	145361.115
0.014345419	6.283	0.0088247	1.6255923	0.3330088	0.0265	0.106	1.595	155798.177
0.015092909	6.283	0.0088247	1.7102963	0.3330088	0.0265	0.106	1.678	163916.279
0.015863591	6.283	0.0088247	1.7976283	0.3330088	0.0265	0.106	1.764	172286.259

Tabla 8. Valores de las variables de entrada (Entrada tangente externa circular de 90°)

$$y_{\text{promedio entrada}} = 0,072 \text{ m} \quad (\text{valor medido})$$

$$\theta = 3,875 \text{ rad}$$

$$A = 0,006382 \text{ m}^2$$

$$P = 0,2053 \text{ m}$$

$$R_h = \frac{A}{P} = 0,031 \text{ m}$$

$$D_h = 4R_h = 0,124 \text{ m}$$

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{0,00844}{0,005349} = 1,294 \text{ m/s}$$

$$F_r = \frac{V}{\sqrt{gD_h}} = 1,173$$

$$Re = \frac{D_h * V}{\nu} = 145528,56$$

Q (m3/s)	y_medido (m)	Θ (rad)	A (m2)	v (m/s)	P (m)	Rh (m)	Dh (m)	Fr	Re
0.00826379	0.072	3.875	0.006382	1.294786	0.205369	0.031077	0.124310	1.173	145528.568
0.00974090	0.087	4.535	0.007751	1.256716	0.240330	0.032252	0.129007	1.118	146587.381
0.01115632	0.100	5.322	0.008626	1.293270	0.282082	0.030581	0.122325	1.181	143037.437
0.01246357	0.101	5.407	0.008673	1.436980	0.286595	0.030264	0.121055	1.319	157281.652
0.01338441	0.101	5.407	0.008673	1.543147	0.286595	0.030264	0.121055	1.417	168901.944
0.01434542	0.103	5.607	0.008754	1.638725	0.297173	0.029458	0.117830	1.525	174585.560
0.01509291	0.104	5.732	0.008786	1.717811	0.303796	0.028921	0.115685	1.613	179678.346
0.01586359	0.104	5.732	0.008786	1.805527	0.303796	0.028921	0.115685	1.696	188853.177

Tabla 9. Valores de las variables de salida (Entrada tangente externa circular de 90°)

Posteriormente se obtienen los valores de las variables dentro de la cámara.

$$L_{promedio} = 1,195 \text{ m} \quad (\text{valor medido})$$

$$b_{promedio} = 0,35 \text{ m} \quad (\text{valor medido})$$

$$y_c = \left(\frac{Q^2}{gb^2} \right)^{1/3} = 0,038 \text{ m}$$

$$A = by = 0,01345 \text{ m}^2$$

$$V = \frac{Q}{A} = 0,614 \text{ m/s}$$

$$Re = \frac{4yV}{\nu} = 85391,74$$

$$f = 0,01860$$

$$h_f = f * \left(\frac{L}{4y_c} \right) * \left(\frac{v_2^2}{2g} \right) = 0,0027779 \text{ m}$$

$$\psi_{barrido} = \frac{S}{r} = 3,69 \text{ rad}$$

L (m)	b (m)	Q (m3/s)	yc (m)	A (m2)	v (m/s)	Re	f	hf (m)	Ψbarrido (rad)
1.195	0.35	0.0082638	0.0384460	0.0134561	0.6141296	85391.741	0.0186094	0.0027798	3.690
1.255	0.43	0.0097409	0.0375353	0.0160526	0.6068121	82375.583	0.0187516	0.0029417	4.010
1.342	0.52	0.0111563	0.0361608	0.0187313	0.5955982	77892.545	0.0189760	0.0031832	4.367
1.412	0.60	0.0124636	0.0352866	0.0211837	0.5883553	75085.304	0.0191254	0.0033756	4.700
1.619	0.76	0.0133844	0.0316853	0.0240069	0.5575237	63888.958	0.0198031	0.0040076	5.600
1.749	0.87	0.0143454	0.0303557	0.0262881	0.5457010	59910.124	0.0200827	0.0043906	6.057
1.779	0.81	0.0150929	0.0329228	0.0265577	0.5683065	67668.058	0.0195579	0.0043492	6.157
1.825	0.89	0.0158636	0.0319070	0.0283547	0.5594705	64560.590	0.0197581	0.0045073	6.310

Tabla 10. Valores de la cámara (Entrada tangente externa circular de 90°)

Finalmente se calcula los valores de disipación de energía, donde z_1 es el valor de la altura medida de la batea de la entrada a la batea de salida cuyo valor es 1,55 m por lo que el valor de z_2 es 0 puesto que este se convierte en el punto de referencia.

$$\text{Energía entrada} = E_1 = y_1 + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 = 1,7 \text{ m}$$

$$\text{Energía salida} = E_2 = y_2 + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 = 0,157 \text{ m}$$

$$\text{Energía por colisión} = E_4 = E_1 - E_2 - E_3 = 1,7 - 0,157 - 0,002777 = 1,54 \text{ m}$$

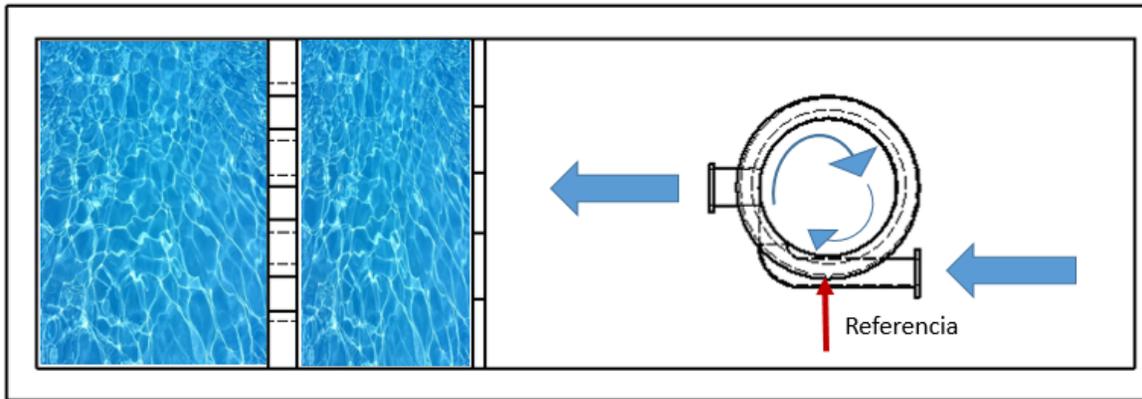
$$\eta = \left(1 - \frac{E_2}{E_1}\right) * 100 = \left(1 - \frac{0,157}{1,700}\right) = 90,74 \%$$

E1 (m)	E2 (m)	Disipación	hf (m)	E4 (m)
1.70069468	0.15744704	90.74%	0.00277978	1.54046786
1.71810061	0.16749613	90.25%	0.00294166	1.54766282
1.73745905	0.18524699	89.34%	0.00318323	1.54902883
1.75766766	0.2062453	88.27%	0.00337563	1.54804674
1.77324545	0.22237126	87.46%	0.00400765	1.54686654
1.79068656	0.23987155	86.60%	0.00439058	1.54642443
1.80508834	0.25440143	85.91%	0.0043492	1.54633772
1.82070273	0.27015334	85.16%	0.00450733	1.54604207

Tabla 11. Valores de disipación de energía (Entrada tangente externa circular de 90°)

De la misma manera que el caso anterior la eficiencia de disipación de energía es alta incluso llega a valores del 90,74 % aunque la pérdida de energía por fricción sigue siendo pequeña donde la mayor cantidad de energía sigue disipándose por colisión. Este tipo de entrada debido al cambio tan brusco en el ángulo (90 grados) produce que el agua en la boca de la entrada se represe haciendo que la tubería se comience a presurizar a pesar de tener caudales no tan altos. También se puede mirar que el ángulo de barrido comienza a incrementarse en referencia a la entrada

tangente interna llegando a completar casi una vuelta si se tiene en cuenta el mismo punto de referencia de la entrada anterior. Asimismo, se pudo observar que al cambiar la dirección del flujo con el ángulo de 90 grados hizo que el agua fluyera de mejor manera en la salida ya que al momento del giro el flujo queda a lado opuesto de esta.



Esquema 8. Dirección de flujo en la entrada tangente externa circular de 90°

4.3 Entrada tangente externa cuadrada

$$\Delta H_{\text{promedio aguas arriba vertedero}} = 0,122 \text{ m (valor medido)}$$

$$Q(\text{L/s}) = 1834.4983 * (0,122)^{2.5481} = 8,6192$$

$$Q(\text{m}^3/\text{s}) = 0,008619$$

ΔH_{medido} (m)	Q	
	(L/s)	m3/s
0.122	8.61927621	0.00861928
0.128	9.74089893	0.0097409
0.135	11.1563155	0.01115632
0.139	12.0180312	0.01201803
0.143	12.9190051	0.01291901
0.146	13.6208693	0.01362087
0.15	14.5920212	0.01459202
0.154	15.6041049	0.0156041

Tabla 12. Caudales obtenidos del vertedero (Entrada tangente externa cuadrada)

Enseguida se calcula las diferentes variables de entrada y salida de la cámara de vórtice, para este caso hubo un cambio en las ecuaciones de la entrada debido a la forma cuadrada.



$$y_{\text{promedio entrada}} = 0,114 \text{ m} \quad (\text{valor medido})$$

$$A = by = 0,0129 \text{ m}^2$$

$$P = b + 2y = 0,342 \text{ m}$$

$$R_h = \frac{by}{b + 2y} = 0,038 \text{ m}$$

$$V = \frac{Q}{A} = 0,663 \text{ m/s}$$

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gD_h}} = 0,627$$

$$Re = \frac{D_h * V}{\nu} = 68361,38$$

A (m2)	v (m/s)	P (m)	Rh (m)	Fr	Re
0.012996	0.6632253	0.342	0.038	0.627	68361.380
0.012996	0.7495305	0.342	0.038	0.709	77257.217
0.012996	0.8584423	0.342	0.038	0.812	88483.198
0.012996	0.9247485	0.342	0.038	0.875	95317.655
0.012996	0.9940755	0.342	0.038	0.940	102463.478
0.012996	1.0480817	0.342	0.038	0.992	108030.117
0.012996	1.1228086	0.342	0.038	1.062	115732.537
0.012996	1.2006852	0.342	0.038	1.136	123759.596

Tabla 13. Valores de las variables de entrada (Entrada tangente externa cuadrada)

$$y_{\text{promedio entrada}} = 0,061 \text{ m} \quad (\text{valor medido})$$

$$\theta = 3,445 \text{ rad}$$

$$A = 0,005257 \text{ m}^2$$

$$P = 0,1825 \text{ m}$$

$$R_h = \frac{A}{P} = 0,0287 \text{ m}$$

$$D_h = 4R_h = 0,115 \text{ m}$$

$$V = \frac{Q}{A} = 1,639 \text{ m/s}$$



$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gD_h}} = 1,543$$

$$Re = \frac{D_h * V}{\nu} = 170748,242$$

y_medido (m)	Θ (rad)	A (m ²)	v (m/s)	P (m)	Rh (m)	Dh (m)	Fr	Re
0.061	3.445	0.00525714	1.63953848	0.1825658	0.0288	0.1152	1.543	170748.242
0.087	4.535	0.00775108	1.2567156	0.24032963	0.0323	0.1290	1.118	146587.381
0.100	5.322	0.00862644	1.29326951	0.28208236	0.0306	0.1223	1.181	143037.437
0.100	5.322	0.00862644	1.39316186	0.28208236	0.0306	0.1223	1.272	154085.671
0.101	5.407	0.00867345	1.4894893	0.28659548	0.0303	0.1211	1.368	163028.900
0.106	6.283	0.00882473	1.54348784	0.33300882	0.0265	0.1060	1.514	147929.215
0.106	6.283	0.00882473	1.6535367	0.33300882	0.0265	0.1060	1.622	158476.393
0.106	6.283	0.00882473	1.76822388	0.33300882	0.0265	0.1060	1.735	169468.111

Tabla 14. Valores de las variables de salida (Entrada tangente externa cuadrada)

Se obtienen los valores de las variables dentro de la cámara.

$$L_{promedio} = 1,572 \text{ m} \quad (\text{valor medido})$$

$$b_{promedio} = 0,66 \text{ m} \quad (\text{valor medido})$$

$$y_c = \left(\frac{Q^2}{gb^2} \right)^{1/3} = 0,025 \text{ m}$$

$$A = by = 0,01709 \text{ m}^2$$

$$V = \frac{Q}{A} = 0,5041 \text{ m/s}$$

$$Re = \frac{4yV}{\nu} = 47231,499$$

$$f = 0,02116$$

$$h_f = f * \left(\frac{L}{4y_c} \right) * \left(\frac{v_2^2}{2g} \right) = 0,004159 \text{ m}$$

$$\psi_{barrido} = \frac{S}{r} = 5,367 \text{ rad}$$

L (m)	b (m)	Q (m3/s)	yc (m)	A (m2)	v (m/s)	Re	f	hf (m)	Ψbarrido (rad)
1.572	0.66	0.0086193	0.0259057	0.0170977	0.5041177	47231.499	0.0211681	0.00415954	5.367
1.732	0.87	0.0097409	0.0233197	0.0203659	0.4782952	40338.883	0.0219358	0.00474910	6.067
1.842	0.98	0.0111563	0.0236934	0.0231405	0.4821119	41312.292	0.0218172	0.00502341	6.367
1.902	1.08	0.0120180	0.0232836	0.0251463	0.4779248	40245.232	0.0219474	0.00521800	6.533
2.002	1.16	0.0129190	0.0233413	0.0269981	0.4785162	40394.824	0.0219289	0.00548770	6.767
2.092	1.27	0.0136209	0.0227582	0.0288271	0.4725022	38890.842	0.0221194	0.00578424	7.133
2.202	1.36	0.0145920	0.0226875	0.0309306	0.4717669	38709.562	0.0221431	0.00609488	7.433
2.262	1.44	0.0156041	0.0228398	0.0329654	0.4733479	39100.030	0.0220924	0.00624661	7.633

Tabla 15. Valores de la cámara (Entrada tangente externa cuadrada)

Finalmente se calcula los valores de disipación de energía, donde z_1 es el valor de la altura medida de la batea de la entrada a la batea de salida cuyo valor es 1,55 m por lo que el valor de z_2 es 0 puesto que este se convierte en el punto de referencia.

$$\text{Energía entrada} = E_1 = y_1 + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 = 1,686 \text{ m}$$

$$\text{Energía salida} = E_2 = y_2 + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 = 0,198 \text{ m}$$

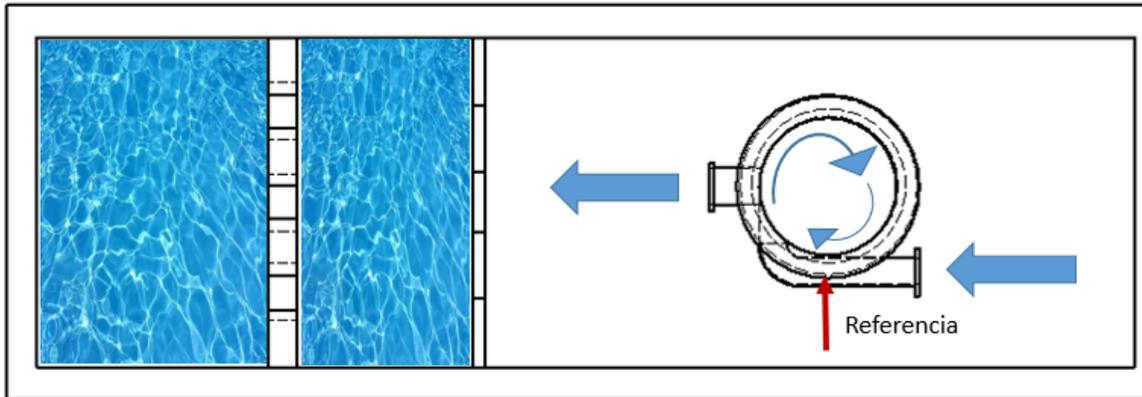
$$\text{Energía por colisión} = E_4 = E_1 - E_2 - E_3 = 1,686 - 0,198 - 0,004159 = 1,484 \text{ m}$$

$$\eta = \left(1 - \frac{E_2}{E_1}\right) * 100 = \left(1 - \frac{0,198}{1,686}\right) = 88,26 \%$$

E1 (m)	E2 (m)	Disipación	hf (m)	E4 (m)
1.68641936	0.19800746	88.26%	0.00415954	1.48425235
1.69263384	0.16749613	90.10%	0.0047491	1.52038861
1.70155979	0.18524699	89.11%	0.00502341	1.51128939
1.70758612	0.19892457	88.35%	0.005218	1.50344356
1.71436626	0.21407739	87.51%	0.0054877	1.49480117
1.71998752	0.22742481	86.78%	0.00578424	1.48677848
1.72825582	0.24535696	85.80%	0.00609488	1.47680398
1.73747834	0.2653586	84.73%	0.00624661	1.46587312

Tabla 16. Valores de disipación de energía (Entrada tangente externa cuadrada)

Como lo observado en los anteriores tipos de entrada la disipación de energía es alta, pero ahora ya se ve un incremento en la disipación de energía por fricción a pesar de ello aun los valores por colisión son considerables también el ángulo de barrido muestra que la lámina de agua ya completa una vuelta dentro de la cámara.



Esquema 9. Dirección de flujo en la entrada tangente externa cuadrada

5 CONCLUSIONES

- A pesar de que la relación $L/D = 2,6$ de la cámara es casi la cuarta parte de la establecida en estudios anteriores la eficiencia de disipación de energía se puede considerar como alta y en este caso sería aceptable.
- La disipación de energía se produce en mayor cantidad por colisión, pero tiende a disminuir con el aumento del ángulo de barrido ya que la lámina de agua tiene un camino más largo para recorrer dentro de la cámara.
- Una entrada tangente de forma cuadrada produce que el agua tome una forma de lámina rectangular que se mueve mejor sobre la pared dentro de cámara produciendo así que el ángulo de barrido sea mucho mayor que en las entradas circulares.
- El coeficiente de rugosidad al ser muy pequeño debido a que el material era bastante liso no ayudo a que la disipación de energía por fricción sea mayor, por lo que se podría pensar en revestir el interior de la cámara con un material más rugoso al momento de fabricarla.



6 RECOMENDACIONES

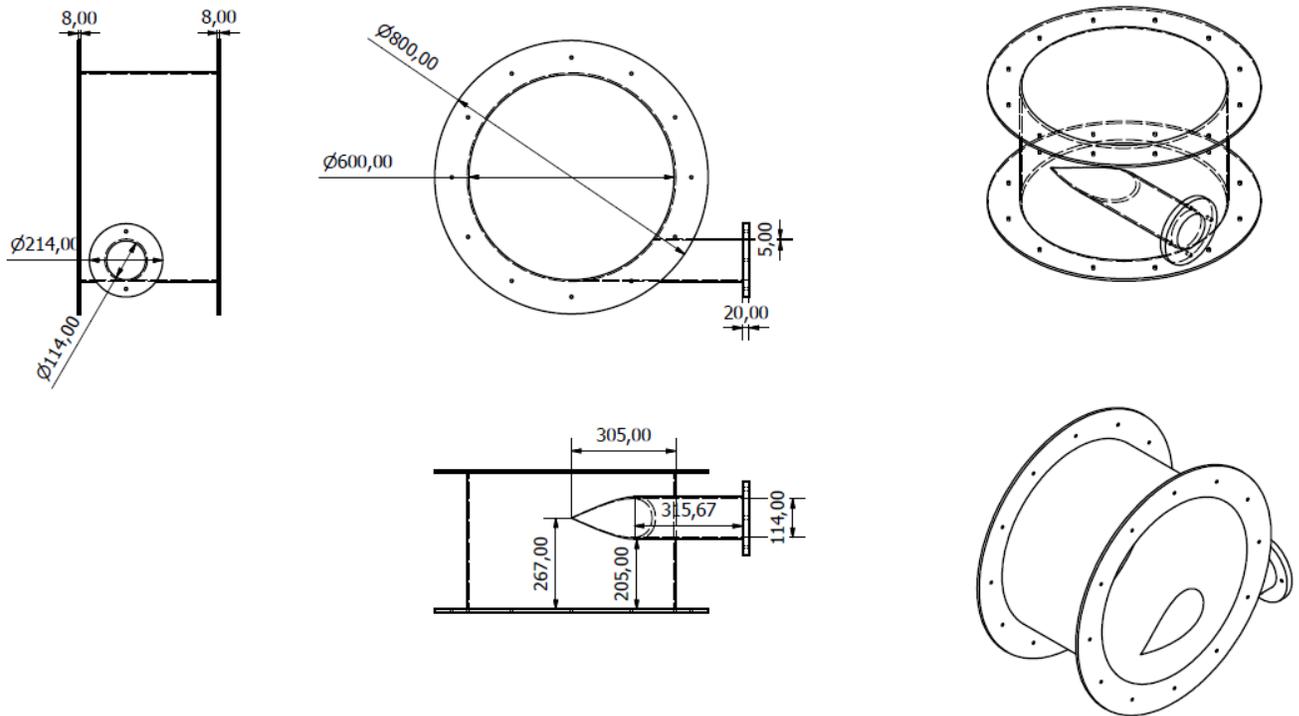
- Utilizar medidores de presión en las paredes dentro de la cámara como también en la base para tener una estimación aproximada de la pérdida de energía por colisión en diferentes puntos.
- Usar medidores de velocidad o caudal en las tuberías de entrada y salida para mejorar la confiabilidad de los datos obtenidos.
- Diseñar diferentes bases de la cámara para verificar si existe un incremento o disminución en la eficiencia de la disipación de energía.
- Buscar un instrumento o mecanismo eficaz para cuantificar la profundidad de la lámina de agua que se mueve dentro de la cámara.
- Revestir o modificar la rugosidad del material utilizado dentro de la cámara para observar su efecto en la disipación de energía.

7 REFERENCIAS

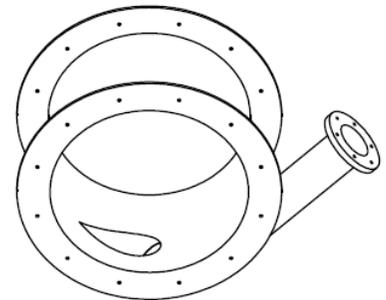
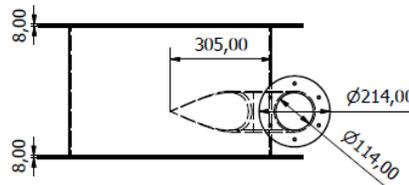
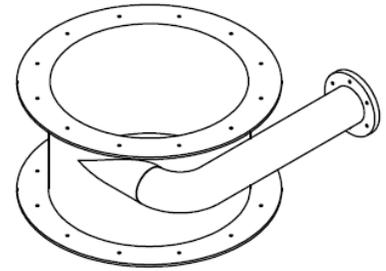
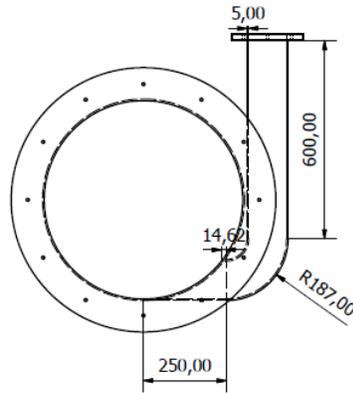
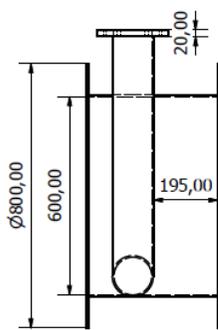
- Butler, D., & Davies, J. (2010). *Urban Drainage* (Tercera ed.). London and New York: Spon Press Editors.
- Chanson, H. (1999). Energy Dissipation and Drop Structures in Ancient Times: The Roman Drophafts. *Water 99 Joint Congress*, 987-992.
- Chow, V. (1994). *Hidráulica de canales abiertos*. McGrawHill.
- EMAAP-Quito. (2009). *Normas de diseño de sistema de alcantarillado*. Quito.
- Haro, P., & Jara, F. (2006). *Manual Básico de Diseño de Estructuras de Cambio de Nivel y Cambio de Dirección con Flujo a Gravedad*. Quito: Tesis de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Escuela Politécnica Nacional.
- Khanjani, M., & Mahmoudi-Rad, M. (2019). Energy dissipation of flow in the vortex structure: experimental investigation. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 10(4).
- RAS. (2016). *Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico - RAS. En Título A - Aspectos Generales de los Sistemas de Agua Potable y Saneamiento Básico*. Bogotá.
- Saldarriaga, J. (2008). *Cámaras de quiebre en sistemas de alcantarillado de alta caída*. Bogotá: XVIII Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología .
- Saldarriaga, J. (2016). *Hidráulica de tuberías* (Tercera ed.). Bogotá: Alfaomega.
- Williamson, S. (2001). *Drop Structure Design for Wastewater and Stormwater Collection System*.
- Zhu, D. (2006). Experimental study of flow in a vortex drop shaft. *Journal of Hydraulic Engineering*, 61-68.

8 ANEXOS

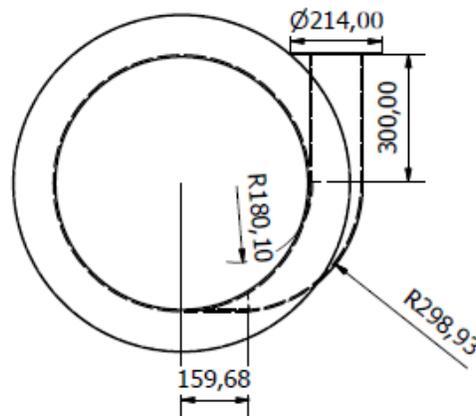
8.1 Esquemas



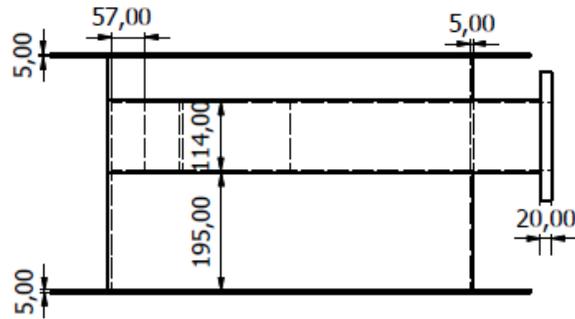
Esquema 10. Entrada tangente interna



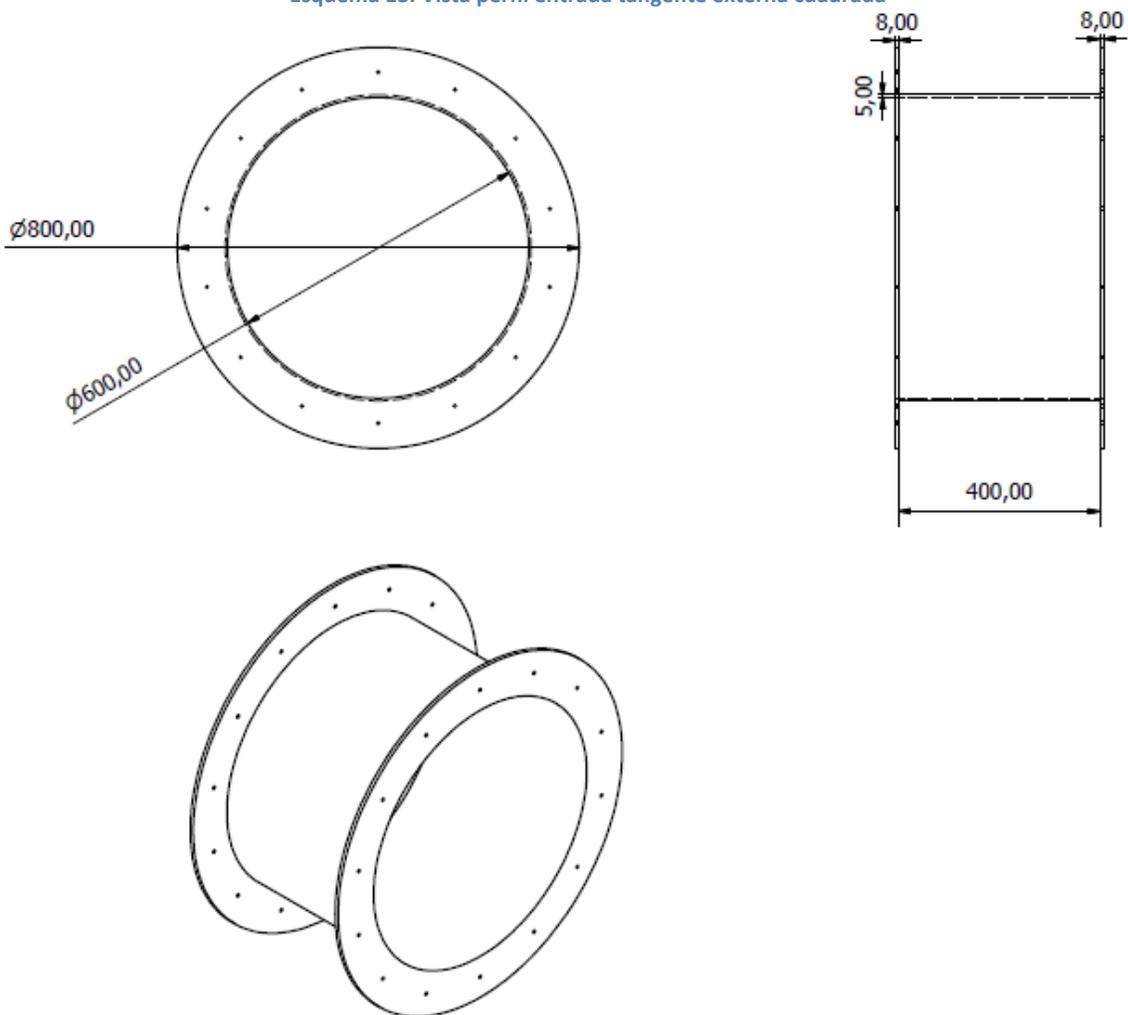
Esquema 11. Entrada tangente externa circular 90°



Esquema 12. Vista en planta de entrada tangente externa cuadrada



Esquema 13. Vista perfil entrada tangente externa cuadrada



Esquema 14. Anillo elevador

8.2 Manejo de la bomba

1. Antes de encender la bomba verificar el nivel de la altura del agua en la piscina, el cual por recomendaciones del técnico del laboratorio John Calvo se estableció en 625 mm para que no exista cavitación en la bomba.
2. En los tableros de control ubicados en la pared abrir la caja de controles con el nombre de Modelo Cámara de Vórtice.



3. En la caja del variador de velocidad encender el interruptor automático.



4. A continuación, en la consola del Nidec Answers Drives 700E pulsar el botón verde para que arranque la bomba.



5. Aumentar el número de revoluciones con la flecha que tiene hacia arriba, en la consola del Nidec Answers Drives 700E, se recomienda iniciar en 28 Hertz dado que antes la bomba no inicia con el transporte del agua.



6. Para detener la bomba presionar el botón rojo de la consola del Nidec Answers Drives 700E.



7. Finalmente, para apagar el sistema bajar el interruptor automático.

