

**TESIS DE PREGRADO EN INGENIERÍA CIVIL**

**DISEÑO DE UNA CÁMARA DE CAÍDA TIPO VÓRTICE AMPLIANDO SU  
CAPACIDAD DE DESCARGA HIDRÁULICA**

**Presentado por:**

**Cristian Camilo Gómez Cortés**

**Asesor:**

**Juan Guillermo Saldarriaga Valderrama**



**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL  
PREGRADO EN INGENIERÍA CIVIL  
BOGOTÁ D.C.  
DICIEMBRE DE 2019**

## TABLA DE CONTENIDO

1	Introducción .....	7
2	Objetivos .....	10
2.1	Objetivo General .....	10
2.2	Objetivos Específicos .....	10
3	Marco teórico .....	11
3.1	Antecedentes .....	11
3.1.1	“ <i>Experimental Study of Flow in a Vortex Drop Shaft</i> ” (Zhao, David Z. Zhu, Sun, & Liu, 2006).....	11
3.1.2	“ <i>Estudio Experimental En Modelo Hidráulico Del Pozo De Alta Caída</i> ” (Eduardo Rodal Canales, 2012) .....	13
3.2	Características de las cámaras de caída .....	14
3.2.1	Cámaras de caída .....	14
3.2.2	Cámaras de vórtice .....	14
3.3	Ecuaciones gobernantes .....	15
3.3.1	Geometría esperada .....	15
3.3.2	Tubería de entrada .....	15
3.3.3	Cámara de vórtice .....	16
4	Metodología .....	19
4.1	Descripción del montaje .....	19
4.2	Proceso constructivo .....	24
4.3	Variables independientes .....	27
4.4	Variables dependientes .....	27
4.5	Constantes .....	27
5	Resultados .....	29
5.1	Configuración 1 .....	29
6	Conclusiones .....	36

---

7	Recomendaciones.....	37
8	Referencias.....	38
9	Anexos.....	40
9.1	Planos de montaje.....	40
9.2	Planos de la pieza.....	41

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Modelo de cámara de caída tipo vórtice implementado en el artículo “ <i>Experimental Study of Flow in a Vortex Drop Shaft</i> ” .....	11
Figura 2. Modelo de cámara de caída tipo vórtice implementado en el artículo “ <i>Estudio Experimental En Modelo Hidráulico Del Pozo De Alta Caída</i> ” .....	13
Figura 3. Flujo dentro de la cámara .....	15
Figura 4. Forma del flujo dentro de la cámara.....	15
Figura 5. Flujo a superficie libre .....	16
Figura 6. Canales rectangulares anchos.....	17
Figura 7. Tanque de abastecimiento .....	20
Figura 8. Bomba de alimentación.....	20
Figura 9. Bypass hidráulico .....	20
Figura 10. Tubería de descarga.....	20
Figura 11. Válvula de control de la descarga .....	21
Figura 12. Compuerta de control en la tubería de entrada.....	21
Figura 13. Tubería de entrada.....	21
Figura 14. Conexión de entrada paralela a la pared de la cámara.....	21
Figura 15. Cámara de vórtice .....	22
Figura 16. Flujo en arco.....	22
Figura 17. Flujo en arco.....	22
Figura 18. Base del montaje .....	22
Figura 19. Tubería de salida y vertedero .....	23
Figura 20. Configuración 1 cámara de vórtice .....	23
Figura 21. Configuración 2 cámara de vórtice .....	24
Figura 22. Configuración 3 cámara de vórtice .....	24
Figura 23. Base Cámara Inspección 600mm Inicial .....	25
Figura 24. Cilindros en acrílico .....	25
Figura 25. Adaptador en acrílico .....	25
Figura 26. Ampliación de cámara.....	25
Figura 27. Montaje de cámara de vórtice .....	26
Figura 28. Montaje de cámara de vórtice .....	26

---

Figura 29. Relación perdidas por impacto con el número de Froude .....	35
Figura 30. Plano de implantación en el laboratorio de hidráulica .....	40
Figura 31. Vertedero de 90° nuevo y antiguo.....	41
Figura 32. Plano de base cámara inicial de 600 mm .....	42
Figura 33. Plano de adaptador a base cámara inicial.....	42
Figura 34. Plano de ampliación de cámara .....	43
Figura 35. Plano de entrada de cámara a 10 °.....	43
Figura 36. Plano de cámara de vórtice .....	44

## ÍNDICES DE ECUACIONES

Ecuación 1. Ecuación de energía para una sección de un flujo helicoidal.....	12
Ecuación 2. Ecuación de disipación de energía entre sección del flujo helicoidal .....	12
Ecuación 3. Angulo central .....	16
Ecuación 4. Área hidráulica de una sección circular parcialmente llena.....	16
Ecuación 5. Perímetro mojado de una sección circular parcialmente llena.....	16
Ecuación 6. Número de Froude .....	16
Ecuación 7. Radio hidráulico .....	16
Ecuación 8. Diámetro hidráulico .....	16
Ecuación 9. Ecuación de pérdidas de energía en la cámara de caída tipo vórtice .....	17
Ecuación 10. Radio hidráulico en caudales anchos .....	18
Ecuación 11. Número de Reynolds para canales anchos.....	18
Ecuación 12. ecuación de Colebrook-White para flujo turbulento.....	18
Ecuación 13. Relación entre el coeficiente de disipación y el número de Froude.....	18
Ecuación 14. Ecuación de calibración del vertedero .....	23

## 1 INTRODUCCIÓN

El agua es una fuente fundamental e indispensable para el origen y prevalencia de la vida. Sin embargo, este recurso es finito y cada vez más escaso gracias a su uso indiscriminado y contaminación descomunal. De modo que su preservación y correcta disposición son acciones a favor de la vida misma.

En la actualidad, la mayor prioridad de la humanidad es transformar el estilo de vida con el fin de adaptarlo a un modelo sostenible. Esto con el fin de lograr un desarrollo que maximice el bienestar de la población actual, sin comprometer las necesidades de las futuras generaciones. A partir de esta necesidad nace la idea de un sistema de alcantarillado sostenible.

Un sistema de alcantarillado sostenible tiene el objetivo de maximizar la recolección y correcta conducción de las aguas residuales con el objetivo de darles un correcto tratamiento y disposición. Lo anterior, por medio de las apropiadas condiciones de hermeticidad, resistencia estructural y eficiencia hidráulica. Adicionalmente, se deben cumplir estas características al mismo tiempo que se mantiene optimalidad económica.

La minimización de costos de construcción, operación, mantenimiento y reparación recae en la adaptabilidad del sistema a diversas condiciones topográficas, tecnológicas, ambientales y socioeconómicas. Un ejemplo de estas condiciones es el caso de un sistema de alcantarillado implementado en una zona de alta pendiente. En este caso el flujo se controla a través de pendientes menores a las del terreno, lo que produce diferencias entre las cotas de los diferentes tramos. Según el RAS2000 cuando se produce una diferencia entre cotas batea entre tramos superior a 0,75 m es necesario implementar una estructura de disipación de energía para reducir los posibles daños al sistema por impacto. Estas estructuras se denominan cámaras de caída.

Una cámara de caída se concentra en mantener las características de un alcantarillado sostenible a partir de la disipación controlada de energía. Estos elementos son esenciales en los alcantarillados. Además, permiten la inspección del sistema de manera controlada. Esto sin afectar la infraestructura de manera invasiva.

Existen diversos mecanismos de disipación de energía en cámaras de caída. Sin embargo, estos mecanismos se ven limitados por el espacio disponible, debido a que, para algunas condiciones de caudal, tanto sólido como líquido, necesitan una mayor infraestructura. Esto se traduce en muchas ocasiones a problemas de socavación en el sistema.

Los problemas de socavación se generan en las cámaras de caída tradicionales por la disipación de energía generada por el impacto del corriente de agua para caudales altos. Este mecanismo supera en muchas ocasiones la resistencia de los materiales. A pesar de que se encuentran en desarrollo nuevos materiales y políticas de operación, se debe solucionar el problema resolviendo la causa y no la consecuencia.

Los caudales altos se generan en consecuencia del aumento de la población y la infraestructura urbana de las ciudades en desarrollo. Lo que culminara en un aumento del deterioro de la red de alcantarillados. De modo que el sistema actual se verá afectado a largo plazo. Lo que conllevara a gastos de reparación y mantenimiento que afectaran la implementación y funcionamiento de un sistema de alcantarillado sostenible.

Con este escenario, es clara la necesidad de buscar un mecanismo de disipación de energía que permita controlar el efecto de los caudales altos sobre el sistema. De esta perspectiva nace la idea de una cámara de caída tipo vórtice. Este tipo de cámaras buscan disipar la energía a través de la generación de una corriente helicoidal sobre las paredes de la cámara. De modo que la energía se disipe en forma de calor por medio de la fricción con las paredes.

Con este mecanismo se tiene la expectativa de disipar gran parte o toda la energía del flujo entrante a la cámara, de modo que no se afecte el sistema. Lo que aumentara la eficiencia de disipación en la red. Por lo que se espera mantener los principios de un sistema de alcantarillado sostenible. Así ayudando al correcto desarrollo de una sociedad sostenible.

En la práctica, implementar cámaras de caída de todo tipo es una práctica muy común e indispensable. Sin embargo, su principal problema recae en su capacidad de descarga hidráulica. La cual usualmente se ve superada y ocasiona la presurización de la tubería de salida. Lo anterior, ocasiona problemas en la red de alcantarillados debido a que esta funciona parcialmente llena.

Para esto se decidió evaluar el comportamiento de una cámara de caída tipo vórtice al aumentar el diámetro del elevador donde se genera el vórtice. Lo anterior, con el propósito de aumentar la disipación de energía así como darle una mejor capacidad de descarga a la cámara de vórtice. Lo anterior, sin afectar el principio de disipación de energía de la cámara.

Asimismo, en muchas ocasiones no existen criterios claros bajo los cuales realizar la aplicación de estos elementos, debido a que no se poseen un criterio de valoración operacional que valide su asignación en la red. En consecuencia, se decidió implementar una modelación física sobre una matemática. De modo que además de su planteamiento geométrico se puedan dar algunas pautas operacionales para su implementación.

El comportamiento y eficiencia de la cámara de caída tipo vórtice se evaluará mediante la creación un modelo físico. Esto con el objetivo de estimar la relación entre el flujo de entrada y las variables geométricas de la cámara. Así como sus limitaciones de flujo y algunas pautas que permitan definir una correcta política de operación de este elemento.

El prototipo realizado busca maximizar la eficiencia del sistema. De modo que se espera implementar reglas de operación existentes para cámaras de caída, para evaluar su viabilidad y eficacia en el elemento. Un ejemplo de esto es la conformación de un colchón de agua en el fondo de la cámara para disipar la energía residual. Con este mecanismo se espera generar unas pautas de operación que apoyen el propósito de este prototipo.

Es importante resaltar que las pruebas realizadas al prototipo se realizarán con agua potable para evaluar el comportamiento de la espiral. Sin embargo, se espera implementar caudales sólidos en futuras etapas para evaluar el comportamiento real de la estructura. Con esto se espera estudiar también el efecto de la abrasión sobre las paredes de la cámara.

Por último, debido a que el principal mecanismo de disipación de energía es la fricción es importante considerar la rugosidad de las paredes de la cámara. Por ende, el material del cual estén recubiertas las paredes de la cámara es esencial en este elemento. Adicionalmente, el material del que este fabricado debe ser accesible, comercial y fácil de producir con el objetivo de cumplir con los requisitos de un sistema de alcantarillado sostenible.

En conclusión, la cámara de caída es un elemento imprescindible para la implementación de un sistema de alcantarillado del sistema, debido a que ayuda a preservar las características de hermeticidad, resistencia estructural y eficiencia hidráulica que este posee. Sin embargo, el aumento de caudales en la red de alcantarillados por el crecimiento de la población es una realidad que puede afectar al sistema a largo plazo. Por la anterior, se planteó una modelación física de una cámara de vórtice que permita disipar la energía eficientemente de los altos caudales de la red de alcantarillados.

---

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 Objetivo General

- Diseñar una cámara de caída tipo vórtice con una mayor capacidad de descarga manteniendo los principios de disipación de energía.

### 2.2 Objetivos Específicos

- Construir un modelo físico que replique a escala la cámara de caída tipo vórtice diseñada.
- Comprender las pérdidas de energía presentes dentro de las cámaras de caída tipo vórtice.
- Implementar diferentes geometrías para el diseño de la cámara de caída tipo vórtice.
- Analizar las distribuciones velocidades radiales, axiales y tangenciales del flujo turbulento dentro de la cámara y pérdidas de energía presentes en las paredes de la cámara de caída tipo vórtice.

### 3 MARCO TEÓRICO

A continuación, se presentan los antecedentes y conceptos más relevantes a partir de los cuales se realizó el diseño y análisis de la cámara de caída tipo vórtice. Adicionalmente, se mencionan los parámetros de diseño más relevantes extraídos de las diversas fuentes bibliográficas consultadas.

#### 3.1 Antecedentes

En esta sección se presentan los principales exponentes bibliográficos a partir de los cuales se fundamentó el diseño de la cámara de caída tipo vórtice. Adicionalmente, se extrajo información de los principales fenómenos dentro de la cámara de vórtice, a partir de los cuales se plantearon las pruebas y análisis mostrados más adelante en este documento

##### 3.1.1 “Experimental Study of Flow in a Vortex Drop Shaft” (Zhao, David Z. Zhu, Sun, & Liu, 2006)

Con el propósito de conocer el comportamiento de un flujo helicoidal dentro de una cámara de caída de un diámetro pequeño (200mm) a comparación de su altura se planteó el siguiente modelo físico mostrado en la figura a continuación:

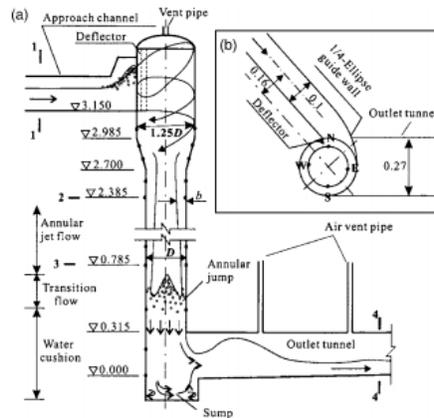


Fig. 1. (a) Sideview of experimental setup; and (b) inlet configuration. Locations of piezocrystal sensors (●) (not to scale; all dimensions are in meters)

Figura 1. Modelo de cámara de caída tipo vórtice implementado en el artículo “Experimental Study of Flow in a Vortex Drop Shaft”

Sobre este modelo físico de cámara de caída tipo vórtices con un flujo de entrada tangencial a la pared de la cámara se realizó el análisis de disipación de energía a partir de las siguientes ecuaciones:

$$E = \frac{v_z^2}{2 * g} + \frac{2 * \Omega}{g * D^2 * (1 - t)^2} + z$$

**Ecuación 1. Ecuación de energía para una sección de un flujo helicoidal**

Donde:

- $V_z$  = velocidad vertical
- $Q$  = Caudal
- $g$  = gravedad
- $D$  = Diámetro de la cámara de caída
- $t$  = espesor relativo del flujo =  $b/R$
- $b$  = espesor de agua en la helicoide
- $R$  = radio de la cámara =  $D/2$
- $\Omega$  = Vorticidad =  $V_t * r$
- $z$  = Altura con respecto al datum

$$\eta = \frac{1 - E_{i+1}}{E_i} * 100\%$$

**Ecuación 2. Ecuación de disipación de energía entre sección del flujo helicoidal**

Donde

- $E_{i+1}$  = Energía en la sección  $i+1$  calculada con la ecuación 1
- $E_i$  = Energía en la sección  $i$  calculada con la ecuación 1

A partir del análisis de disipación de energía planteado con las ecuaciones previamente mostradas se encontró que la disipación de energía superior al 90%. Lo anterior, corrobora la implementación de cámaras de caída tipo vórtice como disipador de energía.

Adicionalmente, se realizó un análisis de la presión sobre las paredes del flujo a partir de lo que se detectó que las presiones se mantienen positivas a lo largo de todo el flujo. De modo que se previene la cavitación. Sin embargo, no se encontró un modelo matemático que fuera capaz de describir las presiones sobre las paredes de la cámara.

Igualmente, se halló que el entrapamiento de aire es significativo. Por lo que es necesario incluir el entrapamiento de aire dentro de los modelos planteados. Esta propiedad es ideal para las aguas residuales debido a que ayuda al control de olores y permite la descomposición de material biológico.

### 3.1.2 “Estudio Experimental En Modelo Hidráulico Del Pozo De Alta Caída” (Eduardo Rodal Canales, 2012)

Con el propósito de conocer el comportamiento de un flujo helicoidal dentro de una cámara de caída de un diámetro pequeño a comparación de su altura se planteó el siguiente modelo físico a escala 1:20 mostrado en la figura a continuación:



Figura 2. Modelo de cámara de caída tipo vórtice implementado en el artículo “Estudio Experimental En Modelo Hidráulico Del Pozo De Alta Caída”

Sobre este modelo se analizó la incidencia de la pendiente sobre el caudal de descarga máximo que presenta la estructura antes de llegar a un nivel de colchón de agua máximo establecido durante en experimento. A partir de este análisis se encontró que el aumento de la pendiente eleva sustancialmente la capacidad de descarga de la cámara. Adicionalmente, se encontró que la altura de la cámara de caída tipo vórtice puede ser de hasta 60 m. Finalmente, se estableció que la cota de la base de la cámara debe estar  $\frac{1}{2}$  de diámetro por debajo de la cota de batea de la tubería de descarga para garantizar la disipación por el colchón de agua formado.

Por otro lado, se recalca la seguridad y confiabilidad de las cámaras de caída tipo vórtice. Adicionalmente, se reitera que las cámaras de caída tipo vórtice, al no poseer geometrías complejas, son más económicas que otras cámaras como las espirales por una rampa excéntrica al pozo, manteniendo la alta disipación de energía. Finalmente, se identificó que

la velocidad de caída después de un punto se mantiene constante, de modo que se controlan los efectos de abrasión sobre las paredes de la cámara.

## 3.2 Características de las cámaras de caída

### 3.2.1 Cámaras de caída

Según el Reglamento Técnico Del Sector De Agua Potable Y Saneamiento Básico Ras - 2000 “las cámaras de caída son estructuras de conexión frecuentes en terrenos con pendiente pronunciada, con el objeto de evitar velocidades mayores de las máximas permisibles.” (Ministerio de Desarrollo Económico, 2000). Su propósito recae en transportar el flujo de manera controlada, de modo que se disipe una parte de la energía con el fin de no generar daños a la estructura por impactos.

Existen diversos tipos de cámaras para diferentes tipos de conexiones y condiciones. Algunos tipos de cámaras de caída son: cámara de caída libre, cámara de caída escalonada, cámara de caída de gradas laterales, cámara de vórtice entre otras. En este documento se expondrá una variante de las cámaras de caída tipo vórtice.

### 3.2.2 Cámaras de vórtice

Las cámaras de vórtice son estructuras de caída las cuales crean un flujo helicoidal o en vórtice. A través de esto se convierte la energía potencial en energía cinética acelerando el flujo a lo largo de la cámara. De modo que la energía se disipa por fricción contra las paredes de la cámara y por impacto en el fondo de la cámara. Además, el vórtice crea una corriente de aire que ventila el flujo.

Estas cámaras se componen de la tubería de aproximación, el elevador donde se genera el vórtice y la tubería de salida. Su mecanismo de disipación se produce dividido a la configuración de la tubería de entrada, la cual es tangencial a la pared de la cámara. Cabe resaltar que este tipo de cámaras tiene un buen desempeño al momento de disipar energía para flujos en alta pendiente (altas velocidades). Sin embargo, su principal problema recae en la capacidad de descarga de la cámara, la cual usualmente se ve supera. Lo que ocasiona que la tubería de salida se presurice ocasionando problemas en la red de alcantarillado.

Debido a lo anterior, el propósito de este documento es explorar las capacidades de la cámara de vórtice al aumentar el diámetro del elevador donde se genera el vórtice. Lo anterior, con el propósito de aumentar la disipación de energía así como darle una mejor capacidad de descarga a la cámara de vórtice.

### 3.3 Ecuaciones gobernantes

#### 3.3.1 Geometría esperada

Para el análisis de pérdidas de energía planteado es necesario conocer la geometría del flujo dentro de la cámara de vórtice. El comportamiento de esta geometría se analizó de manera cualitativa debido a la irregularidad del flujo. La geometría encontrada para el flujo dentro de la cámara de caída tipo vórtice se presenta a continuación:



Figura 3. Flujo dentro de la cámara

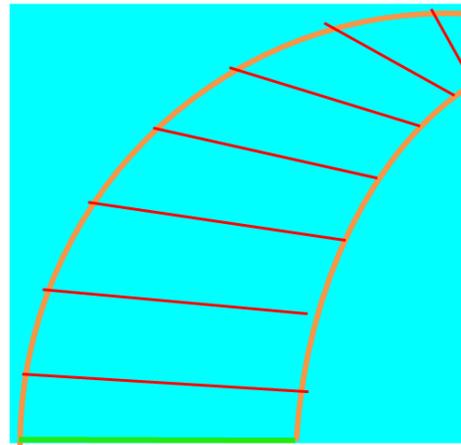


Figura 4. Forma del flujo dentro de la cámara

A partir del análisis de un modelo de la cámara de caída tipo vórtice se encontró que la geometría mostrada por el vórtice a lo largo de las paredes de la cámara se encuentra comprendida entre dos arcos cilíndricos. Adicionalmente, la profundidad de flujo es relativamente más pequeña a comparación del área superficial sobre la pared de la cámara. Finalmente, el área transversal que aumenta a medida que el flujo desciende por las paredes de la cámara.

#### 3.3.2 Tubería de entrada

La principal forma de caracterizar el comportamiento del flujo dentro de la cámara es con las condiciones de flujo en la tubería de entrada. Es importante aclarar que la tubería de entrada, al tratarse de una tubería de saneamiento, fluye a superficie libre. De modo que el análisis de las condiciones de flujo se realiza mediante las siguientes ecuaciones para la geometría mostrada en la figura a continuación:

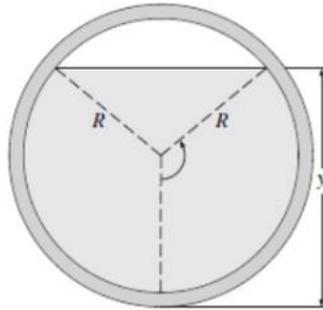


Figura 5. Flujo a superficie libre

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

Ecuación 3. Angulo central

$$A = (\theta - \text{sen}(\theta)) * \frac{D^2}{8}$$

Ecuación 4. Área hidráulica de una sección circular parcialmente llena

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

Ecuación 5. Perímetro mojado de una sección circular parcialmente llena

$$F_r = \frac{v}{\sqrt{g * D_h}}$$

Ecuación 6. Número de Froude

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

Ecuación 7. Radio hidráulico

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

Ecuación 8. Diámetro hidráulico

A partir de estas ecuaciones se realizará el análisis del flujo dentro de la tubería de entrada expuesto más adelante.

### 3.3.3 Cámara de vórtice

Para el análisis de las pérdidas de energía dentro de la cámara de caída tipo vórtice se implementó la ecuación de Bernoulli entre la tubería de entrada y la de salida. La ecuación

considera principalmente dos tipos de pérdidas de energía dentro de la cámara, las pérdidas por fricción y las pérdidas por impacto con la base de la cámara. La ecuación obtenida se muestra a continuación.

$$\frac{v_1^2}{2 * g} + z_1 = \frac{v_2^2}{2 * g} + z_2 + h_f + h_{imp}$$

**Ecuación 9. Ecuación de pérdidas de energía en la cámara de caída tipo vórtice**

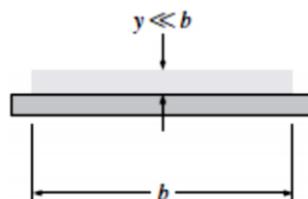
Donde:

- $v_1$  y  $v_2$  = velocidad a la entrada y a la salida respectivamente
- $z_1$  y  $z_2$  = altura a la entrada y a la salida respectivamente
- $h_f = f * \frac{L}{4 * R_h} * \frac{v_2^2}{2 * g}$  = Pérdidas por fricción (Ecuación de Darcy-Weisbach)
- $h_{imp} = K_{imp} * \frac{v_2^2}{2 * g}$  = Pérdidas por impacto

Para el análisis de las pérdidas por fricción se consideró la geometría que se forma dentro de la cámara de caída tipo vórtice a lo largo de la pared. Es geometría se asemeja al área comprendida entre dos arcos como se muestra en la Figura 4. Para el análisis de las pérdidas por fricción se utiliza la ecuación de Darcy-Weisbach, donde el termino L corresponde a la longitud promedio que recorre el flujo a lo largo del arco.

Se tiene la hipótesis de que el arco superior se puede interpretar como la trayectoria parabólica que se formaría en caída libre. De modo que se puede calcular con la ecuación de tiro parabólico. Mientras que el arco interior se describiría con una ecuación que contempla las pérdidas por fricción a medida que el flujo avanza por la pared. Para corroborar esto se recomiendan hacer más ensayos sobre el modelo físico.

Adicionalmente, esta geometría de arco cilíndrico se puede analizar como un canal ancho. Esto debido a que el espesor de la lámina de agua formada es mucho menor al ancho del arco a medida que avanza por la pared. La forma de este tipo de canales se muestra a continuación en la Figura 6.



**Figura 6. Canales rectangulares anchos**

A partir de esta geometría se obtiene que el radio hidráulico se describe de la siguiente manera:

$$R_h = \frac{A}{P} = \frac{y * b}{b + 2 * y} \cong \frac{y * b}{b} \cong y$$

#### Ecuación 10. Radio hidráulico en caudales anchos

De modo que el número de Reynolds se describe a partir de la siguiente ecuación:

$$Re = \frac{4 * R_h * v}{\nu} = \frac{4 * y * v}{\nu}$$

#### Ecuación 11. Número de Reynolds para canales anchos

Ahora, el factor de fricción dentro de la cámara se puede calcular con la ecuación de Colebrook-White para flujo turbulento mostrada a continuación:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 * \log_{10} \left( \frac{Re * \sqrt{f}}{2,51} \right)$$

#### Ecuación 12. ecuación de Colebrook-White para flujo turbulento

Por otro lado, el factor de impacto  $K_{imp}$  se determinará con base al comportamiento del número de Froude. Esto debido a que el número de Froude describe el comportamiento del flujo de entrada y se espera encontrar una relación entre estos dos componentes. De modo que se harán una regresión con los datos extraídos del ensayo con el fin de determinar si su comportamiento es constante o no. La ecuación que se espera que describa este comportamiento es la siguiente.

$$K_{imp} = A * F_r + B$$

#### Ecuación 13. Relación entre el coeficiente de disipación y el número de Froude

Donde:

- $F_r$  = Número de Froude
- A y B = Constantes

## 4 METODOLOGÍA

### 4.1 Descripción del montaje

Para realizar el análisis de la cámara de vórtice con una mayor capacidad de descarga se desarrolló un modelo físico en el laboratorio de hidráulica de la Universidad de los Andes. Para la primera aproximación al flujo de la cámara se tomó referencia los modelos físicos presentados en los artículos expuestos previamente. De manera que se mantenga la geometría que produce el fenómeno de disipación de energía presente en las cámaras de vórtice.

Con el propósito de aumentar la capacidad de descarga de las cámaras de vórtice se aumentó el diámetro de la cámara. De manera tal que se mantuvieron las dimensiones de la tubería de entrada y salida de 6” expuestas en los artículos. Sin embargo se modificó la dimensión del elevador, incrementándola hasta el máximo comercial disponible de 1000mm. Esto corresponde aumento de 5 veces más con respecto a las dimensiones típicas usadas en los artículos de 200mm. Este es un punto de partida óptimo para iniciar los estudios de esta modificación para la cámara de caída tipo vórtice.

Debido a las condiciones de espacio se optó por realizar un modelo a escala. Lo anterior optando por una escala de 1:1,67. De manera que se implemente una NOVACAM Base Cámara Inspección 600mm Inicial para facilitar la construcción del modelo físico y debido a su buena capacidad hidráulica de descarga. Lo anterior, le da una dimensión de 600mm de diámetro a la cámara de vórtice y de 4” o 114mm a las tuberías de entrada y salida.

Adicionalmente, se deseaba un modelo versátil el cual estuviera conformado por diferentes piezas intercambiables con el objetivo de realizar diversas modificaciones a lo largo de las pruebas. Por esto se diseñó un elevador desmontable por niveles, de modo que se pudiera variar la altura e intercambiar la entrada y la salida de manera fácil. El diseño resultante se expone a continuación.

Debido a las limitaciones de espacio se buscó un lugar en el que el modelo tuviera un tanque de abastecimiento adecuado sin interrumpir los proyectos existentes. De modo que se ubicó en el tanque mostrado en la Figura 7. El tanque tiene una capacidad de 10 m<sup>3</sup> aproximadamente y cuenta con un vertedero que permite registrar el caudal que pasa por el montaje. Lo anterior, lo convierten en el lugar de implantación idóneo para el montaje.

En primer lugar, se llena el tanque de abastecimiento a una altura de 50 cm, con el objetivo de que el vertedero funcione correctamente y no existan problemas de cavitación en la bomba por entrada de aire. El tanque de abastecimiento se muestra en la Figura 7. El sistema es

alimentado por una bomba HIDROMAC 6x6x9 RBR, como se muestra en la Figura 8. Esta bomba se alimenta del tanque de abastecimiento previamente mencionado.



**Figura 7. Tanque de abastecimiento**



**Figura 8. Bomba de alimentación**

Debido a que se usa una bomba de caudal constante, se implementa un bypass con el objetivo de regular el caudal que llega al modelo como se muestra en la Figura 9. Este bypass dirige una parte del agua al montaje y la otra parte hacia el tanque de almacenamiento. La tubería de descarga se muestra en la Figura 10.

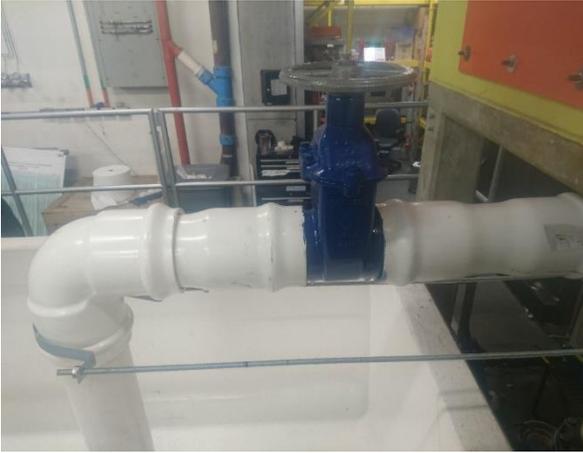


**Figura 9. Bypass hidráulico**



**Figura 10. Tubería de descarga**

Para regular la cantidad de agua que se dirige al montaje se opera una válvula en la descarga del bypass hacia el tanque como se muestra en la Figura 11. El agua se distribuye de manera presurizada hasta la compuerta de control ubicada en la tubería de entrada, como se muestra en la Figura 12. En este punto se pasa de un flujo presurizada a un flujo parcialmente lleno, donde el nivel se da a partir de la apertura de la compuerta.



**Figura 11. Válvula de control de la descarga**



**Figura 12. Compuerta de control en la tubería de entrada**

A partir de la compuerta el flujo se desplaza parcialmente lleno hasta la entrada de la tubería. Para evitar que el peso de la tubería afecte la unión con la cámara se ubicaron tres soportes, como se muestra en la Figura 13. Luego la tubería de entrada se conecta de manera paralela a la pared de la cámara, como se muestra en la Figura 14.



**Figura 13. Tubería de entrada**



**Figura 14. Conexión de entrada paralela a la pared de la cámara**

A partir de la conexión anterior, el flujo se desplaza en arco cilíndrico a través de la cámara de vórtice. Estas condiciones geométricas crean un flujo rotatorio como se muestra en la Figura 16. Estas condiciones de flujo producen pérdidas de energía y por impacto dentro de la cámara de vórtice.



Figura 15. Cámara de vórtice



Figura 16. Flujo en arco

Con el propósito de mantener la cámara de vórtice sobre la lámina de agua del tanque se construyó una base de 70 cm de altura como se muestra en la Figura 18.



Figura 17. Flujo en arco

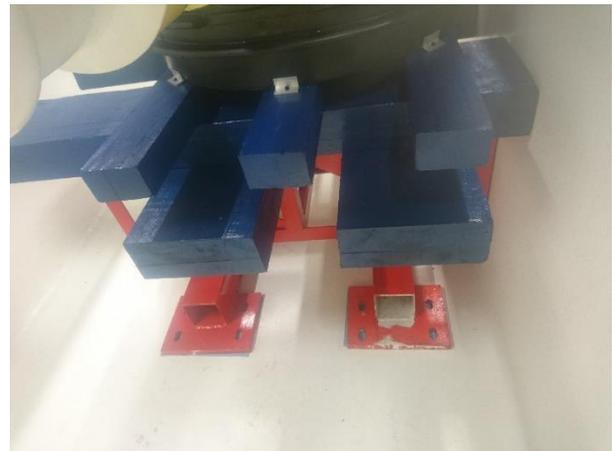


Figura 18. Base del montaje

La tubería de salida descarga aguas arriba del vertedero, lo que permite determinar el caudal que pasa a través del modelo. La geometría descrita se muestra en la Figura 19. Este vertedero descarga al tanque de almacenamiento del modelo, de modo que se recircula el agua de nuevo

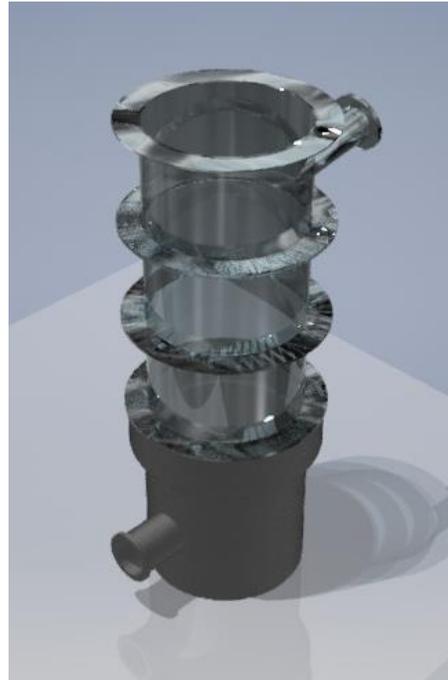
a través del montaje. La ecuación que permite determinar el caudal que descarga el vertedero a través de la altura se muestra a continuación.



**Figura 19. Tubería de salida y vertedero**

$$Q \left[ \frac{L^3}{s} \right] = (0,0147 * ((H - H_0)^{2,5481}))$$

**Ecuación 14. Ecuación de calibración del vertedero**



**Figura 20. Configuración 1 cámara de vórtice**

Con el objetivo de modificar la altura y analizar sus efectos sobre los fenómenos de disipación de energía se diseñaron tres configuraciones. La primera configuración tiene 2 metros de altura total. Adicionalmente, presenta una altura entre las cotas de batea de las tuberías de entrada y salida de 1,6 m. Las especificaciones adicionales se muestran en los planos presentados en los anexos. Esta configuración se muestra en la Figura 20.

La segunda configuración tiene 1,6 metros de altura total. Adicionalmente, presenta una altura entre las cotas de batea de las tuberías de entrada y salida de 1,2 m. Las especificaciones adicionales se muestran en los planos presentados en los anexos. Esta configuración se muestra en la Figura 21.

La segunda configuración tiene 1,2 metros de altura total. Adicionalmente, presenta una altura entre las cotas de batea de las tuberías de entrada y salida de 0,8 m. Las especificaciones adicionales se muestran en los planos presentados en los anexos. Esta configuración se muestra en la Figura 22.

Finalmente, es importante resaltar que se realizó el diseño de dos configuraciones de entrada. El ángulo de inclinación de esta tubería presenta una inclinación de 10° y de 0°

respectivamente en cada configuración. Con el objetivo de estudiar el efecto de la pendiente en la vorticidad de la cámara.



**Figura 21. Configuración 2 cámara de vórtice**



**Figura 22. Configuración 3 cámara de vórtice**

A partir de este montaje y sus modificaciones se obtuvieron los resultados mostrados más adelante. Sin embargo, debido a la versatilidad del montaje se realizarán más modificaciones de las cuales surgirán nuevas investigaciones y pruebas. Se recomienda empezar modificando el fondo de la cámara y el ángulo de inclinación para obtener resultados que contrastar contra los obtenidos en este documento, así como realizar más pruebas con la geometría actual.

## 4.2 Proceso constructivo

Como se mencionó previamente, se implementó como base del modelo la NOVACAM Base Cámara Inspección 600 mm Inicial (Figura 23), proporcionada por PAVCO. Esto debido a su eficiente descarga hidráulica y que se acomoda a las restricciones de espacio presentes en el laboratorio de hidráulica de la Universidad de los Andes. A partir de la NOVACAM se construyeron los anillos de acrílico de 600 mm de diámetro mostrados en la Figura 24.



**Figura 23. Base Cámara Inspección 600mm Inicial**



**Figura 24. Cilindros en acrílico**

Acto seguido, se instalaron las bridas en acrílico para unir el elevador con la pieza de entrada. Adicionalmente, se construyó un adaptador para conectar la NOVACAM con los elevadores en acrílico, este elevador se muestra en la Figura 25. Los elevadores que se conectan a la pieza de entrada se muestran en la Figura 26.



**Figura 25. Adaptador en acrílico**



**Figura 26. Ampliación de cámara**

Las piezas previamente descritas se pueden ver unificadas en la Figura 27. Adicionalmente, se creó una pieza que posee la tubería de entrada de manera paralela a la pared de la cámara. Todas las piezas del montaje unificadas se pueden ver en la Figura 28.



Figura 27. Montaje de cámara de vórtice



Figura 28. Montaje de cámara de vórtice

A partir del proceso anterior se construyó el modelo físico implementado para el desarrollo del estudio presente en este documento. Las especificaciones de las dimensiones de implantación y de cada una de las piezas que comprenden el montaje se pueden ver en los anexos de este documento.

### 4.3 Variables independientes

Para el experimento realizado las variables independientes son las siguientes:

- Profundidad aguas arriba del vertedero
- Profundidad en la tubería de entrada
- Profundidad en la tubería de salida
- Área del arco sobre la superficie de la cámara

Se recomienda mejorar la precisión de estas a través de instrumentos electrónicos como sensores de nivel y transductores para obtener un mayor número de mediciones con una mayor confiabilidad.

### 4.4 Variables dependientes

Para el experimento realizado las variables dependientes son las siguientes:

- Velocidad en la tubería de entrada= varia con respecto al nivel y al caudal dentro del modelo
- Velocidad en la tubería de salida= varia con respecto al nivel y al caudal dentro del modelo
- Caudal = varia con respecto al nivel aguas arriba del vertedero de la siguiente manera:

$$Q [L/s] = (0,0147 * ((H - H_0)^{2,5481}))$$

Donde:

- $Q [L/s]$  = Caudal
- $H_0 [cm]$  = Cero con respecto al cual se toma la medida hasta la cota más baja del vertedero triangular
- $H [cm]$  = Altura de la lámina de agua medida
- Disipación de energía = depende de la geometría y caudal dentro del modelo.

### 4.5 Constantes

Debido a las limitaciones físicas del modelo las constantes del experimento son las siguientes:

- Diámetro de la cámara = 600 mm
- Fondo de la base cámara = geometría única con las dimensiones mostradas en el Anexo 9,2

- 
- Diámetro de la tubería de entrada = 4” o 114 mm
  - Pendiente de la tubería de entrada = 0°

Para futuros ensayos se recomienda modificar estas constantes de modo que se exploren nuevas alternativas que mejoren las condiciones de disipación de la cámara.

## 5 RESULTADOS

### 5.1 Configuración 1

A partir de las ecuaciones presentadas anteriormente se realizaron los siguientes cálculos para las pérdidas de energía en la cámara de vórtice con ampliación del elevador. Lo anterior, se realizó sobre la configuración 1. De modo que la altura total de la cámara es de 2 m y la tubería de entrada no tiene un ángulo de inclinación.

Por otro lado, se realizaron dos pruebas sobre el modelo físico. Se realizaron pruebas para dos caudales altos, con velocidades moderadas con el fin de realizar una comparación cualitativa y cuantitativa. A partir de estos ensayos se obtuvieron los siguientes resultados:

Para la primera prueba se realizó el procedimiento mostrado a continuación. En primer lugar se tomaron medidas del nivel aguas arriba del vertedero desde el fondo del tanque de almacenamiento. El dato obtenido fue el siguiente:

$$Nivel_{\text{aguas arriba vertedero}} = 79 \text{ cm}$$

Acto seguido, se implementó la ecuación de calibración del vertedero con la que se determinó el caudal en L/s que circula a través del modelo. El caudal obtenido es el siguiente:

$$Q \left[ \frac{L}{s} \right] = (0,0147 * ((79\text{cm} - 65 \text{ cm})^{2,5481})) = 12,2 \frac{L}{s}$$

Por otro lado se registró el nivel dentro de la tubería de entrada. El dato obtenido fue el siguiente:

$$Nivel_{\text{Tubería de entrada}} = 9,4 \text{ cm}$$

Con este dato se procedió a calcular el ángulo central para la tubería con flujo parcialmente lleno. El ángulo central obtenido es el siguiente:

$$\theta[\text{rad}] = 2 * \cos^{-1} \left( 1 - \frac{2 * 9,4 \text{ cm}}{11,4 \text{ cm}} \right) = 4,6 \text{ rad}$$

A partir de esto se calculó el área mojada de la sección circular. El área obtenida es la siguiente:

$$A[m^2] = (4,6 \text{ rad} - \text{sen}(4,6 \text{ rad})) * \frac{(0,114 \text{ m})^2}{8} = 0,0090 \text{ m}^2$$

Por medio del caudal y el área calculados se determinó la velocidad que circula en la tubería de entrada. La velocidad obtenida es la siguiente:

$$v \left[ \frac{m}{s} \right] = \frac{0,0122 \frac{m^3}{s}}{0,0090 m^2} = 1,40 \frac{m}{s}$$

Finalmente, se calculó la energía total de la tubería de entrada tomando como datum la cota batea de la tubería de salida. De modo que el Z es igual a 1,6 m. La energía total obtenida es la siguiente:

$$E_1 = 0,094 m + \frac{\left(1,40 \frac{m}{s}\right)^2}{2 * 9,81 \frac{m}{s^2}} + 1,6 m = 1,79 m$$

Para la tubería de aguas abajo se calculó la energía total a través del siguiente procedimiento. En primer lugar se registró el nivel dentro de la tubería de salida. El dato obtenido fue el siguiente:

$$Nivel_{Tubería\ de\ salida} = 7,2\ cm$$

Con este dato se procedió a calcular el ángulo central para la tubería con flujo parcialmente lleno. El ángulo central obtenido es el siguiente:

$$\theta [rad] = 2 * \cos^{-1} \left( 1 - \frac{2 * 7,2\ cm}{11,4\ cm} \right) = 3,67\ rad$$

A partir de esto se calculó el área mojada de la sección circular. El área obtenida es la siguiente:

$$A [m^2] = (3,67\ rad - \text{sen}(3,67\ rad)) * \frac{(0,114\ m)^2}{8} = 0,0068\ m^2$$

Por medio del caudal y el área calculados se determinó la velocidad que circula en la tubería de entrada. La velocidad obtenida es la siguiente:

$$v \left[ \frac{m}{s} \right] = \frac{0,0122 \frac{m^3}{s}}{0,0068 m^2} = 1,80 \frac{m}{s}$$

Finalmente, se calculó la energía total de la tubería de salida tomando como datum la cota batea de la tubería de salida. De modo que el Z es igual a 0 m. La energía total obtenida es la siguiente:

$$E_2 = 0,072 \text{ m} + \frac{\left(1,80 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{2 * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} + 0 \text{ m} = 0,23 \text{ m}$$

Las disipación de energía obtenida para esta prueba se calcula a través de una diferencia porcentual de la siguiente manera:

$$\eta = \frac{E_1 - E_2}{E_1} * 100\% = \frac{1,79\text{m} - 0,23\text{m}}{1,79\text{m}} * 100\% = 86,72\%$$

Luego, se calculó el perímetro mojado, el radio hidráulico y el número de Reynolds con el objetivo de determinar el factor de fricción. A partir de este factor se calcularon las pérdidas por fricción de la siguiente manera:

$$P = 3,67 \text{ rad} * \frac{0,114 \text{ m}}{2} = 0,2094 \text{ m}$$

$$R_h = \frac{0,0068 \text{ m}^2}{0,2094 \text{ m}} = 0,0324 \text{ m}$$

$$Re = \frac{4 * 0,0324 \text{ m} * 1,80 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{(1,011 * 10^{-6})} = 231227,58$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 * \log_{10} \left( 231227,58 * \frac{\sqrt{f}}{2,51} \right) \rightarrow f = 0,0152$$

Para las pérdidas por fricción se implementó una longitud promedio del arco de 1,6 m debido a que no se pudo determinar con precisión la distancia real promedio del arco sobre el cual ocurren las pérdidas por fricción.

$$H_{fric} = 0,0152 * \frac{1,6 \text{ m}}{4 * 0,0324\text{m}} * \frac{\left(1,80 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{2 * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = 0,0310$$

Acto seguido, se aplicó el principio de conservación de energía. A través de esto se determinó el coeficiente de pérdidas por impacto dentro de la cámara:

$$E_1 = E_2 + H_{fric} + K_{Imp} * \frac{v^2}{2 * g} \rightarrow K_{imp} = 9,19$$

Por último, se calcularon las pérdidas por impacto de la siguiente manera

$$H_{imp} = 9,19 * \frac{\left(1,80 \frac{m}{s}\right)^2}{2 * 9,81 \frac{m}{s^2}} = 1,52 m$$

Como se mencionó previamente, el coeficiente de impacto se encuentra asociado al número de Froude, de modo que se calcula el número de Froude de la siguiente manera:

$$Fr = \frac{1,80 \frac{m}{s}}{\sqrt{4 * 0,0324m * 9,81 \frac{m}{s^2}}} = 1,60$$

Para la segunda prueba se realizó el procedimiento mostrado a continuación. En primer lugar se tomaron medidas del nivel aguas arriba del vertedero desde el fondo del tanque de almacenamiento. El dato obtenido fue el siguiente:

$$Nivel_{aguas\ arriba\ vertedero} = 77,5 cm$$

Acto seguido, se implementó la ecuación de calibración del vertedero con la que se determinó el caudal en L/s que circula a través del modelo. El caudal obtenido es el siguiente:

$$Q \left[ \frac{L}{s} \right] = (0,0147 * ((77,5cm - 65 cm)^{2,5481})) = 9,2 \frac{L}{s}$$

Por otro lado se registró el nivel dentro de la tubería de entrada. El dato obtenido fue el siguiente:

$$Nivel_{Tubería\ de\ entrada} = 8,2 cm$$

Con este dato se procedió a calcular el ángulo central para la tubería con flujo parcialmente lleno. El ángulo central obtenido es el siguiente:

$$\theta [rad] = 2 * \cos^{-1} \left( 1 - \frac{2 * 8,2 cm}{11,4 cm} \right) = 4,0 rad$$

A partir de esto se calculó el área mojada de la sección circular. El área obtenida es la siguiente:

$$A [m^2] = (4 rad - \text{sen}(4 rad)) * \frac{(0,114 m)^2}{8} = 0,0079 m^2$$

Por medio del caudal y el área calculados se determinó la velocidad que circula en la tubería de entrada. La velocidad obtenida es la siguiente:

$$v \left[ \frac{m}{s} \right] = \frac{0,0092 \frac{m^3}{s}}{0,0079 m^2} = 1,17 \frac{m}{s}$$

Finalmente, se calculó la energía total de la tubería de entrada tomando como datum la cota batea de la tubería de salida. De modo que el Z es igual a 1,6 m. La energía total obtenida es la siguiente:

$$E_1 = 0,082 m + \frac{\left(1,17 \frac{m}{s}\right)^2}{2 * 9,81 \frac{m}{s^2}} + 1,6 m = 1,75 m$$

Para la tubería de aguas abajo se calculó la energía total a través del siguiente procedimiento. En primer lugar se registró el nivel dentro de la tubería de salida. El dato obtenido fue el siguiente:

$$Nivel_{Tubería\ de\ salida} = 6,8\ cm$$

Con este dato se procedió a calcular el ángulo central para la tubería con flujo parcialmente lleno. El ángulo central obtenido es el siguiente:

$$\theta [rad] = 2 * \cos^{-1} \left( 1 - \frac{2 * 6,8\ cm}{11,4\ cm} \right) = 3,53\ rad$$

A partir de esto se calculó el área mojada de la sección circular. El área obtenida es la siguiente:

$$A [m^2] = (3,53\ rad - \text{sen}(3,53\ rad)) * \frac{(0,114\ m)^2}{8} = 0,0063\ m^2$$

Por medio del caudal y el área calculados se determinó la velocidad que circula en la tubería de entrada. La velocidad obtenida es la siguiente:

$$v \left[ \frac{m}{s} \right] = \frac{0,0092 \frac{m^3}{s}}{0,0063 m^2} = 1,44 \frac{m}{s}$$

Finalmente, se calculó la energía total de la tubería de salida tomando como datum la cota batea de la tubería de salida. De modo que el Z es igual a 0 m. La energía total obtenida es la siguiente:

$$E_2 = 0,068 \text{ m} + \frac{\left(1,44 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{2 * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} + 0 \text{ m} = 0,17 \text{ m}$$

Las disipación de energía obtenida para esta prueba se calcula a través de una diferencia porcentual de la siguiente manera:

$$\eta = \frac{E_1 - E_2}{E_1} * 100\% = \frac{1,75\text{m} - 0,17\text{m}}{1,75\text{m}} * 100\% = 90,04\%$$

Luego, se calculó el perímetro mojado, el radio hidráulico y el número de Reynolds con el objetivo de determinar el factor de fricción. A partir de este factor se calcularon las pérdidas por fricción de la siguiente manera:

$$P = 3,53 \text{ rad} * \frac{0,114 \text{ m}}{2} = 0,2012 \text{ m}$$

$$R_h = \frac{0,0063 \text{ m}^2}{0,2012 \text{ m}} = 0,0316 \text{ m}$$

$$Re = \frac{4 * 0,0316 \text{ m} * 1,44 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{(1,011 * 10^{-6})} = 180307,46$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 * \log_{10} \left( 180307,46 * \frac{\sqrt{f}}{2,51} \right) \rightarrow f = 0,0160$$

Para las pérdidas por fricción se implementó una longitud promedio del arco de 1,6 m debido a que no se pudo determinar con precisión la distancia real promedio del arco sobre el cual ocurren las pérdidas por fricción.

$$H_{fric} = 0,0160 * \frac{1,6 \text{ m}}{4 * 0,0316\text{m}} * \frac{\left(1,44 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{2 * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = 0,0215$$

Acto seguido se aplicó el principio de conservación de energía. A través de esto se determinó el coeficiente de pérdidas por impacto dentro de la cámara:

$$E_1 = E_2 + H_{fric} + K_{Imp} * \frac{v^2}{2 * g} \rightarrow K_{imp} = 14,63$$

Por último se calcularon las pérdidas por impacto de la siguiente manera:

$$H_{imp} = 14,63 * \frac{\left(1,44 \frac{m}{s}\right)^2}{2 * 9,81 \frac{m}{s^2}} = 1,55 m$$

Como se mencionó previamente, el coeficiente de impacto se encuentra asociado al número de Froude, de modo que se calcula el número de Froude de la siguiente manera:

$$Fr = \frac{1,44 \frac{m}{s}}{\sqrt{4 * 0,0316m * 9,81 \frac{m}{s^2}}} = 1,3$$

A través de los coeficientes de impacto calculados previamente se determina la siguiente relación:

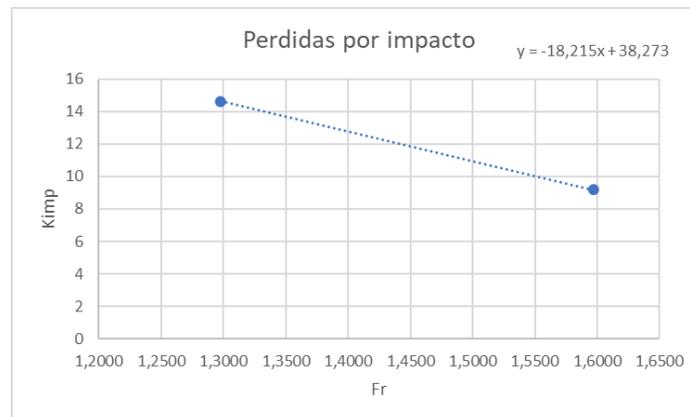


Figura 29. Relación pérdidas por impacto con el número de Froude

De modo que se obtienen los siguientes valores para los coeficientes A y B:

$$A = -18,215; B = 38,273$$

Para corroborar la validez de esta relación se recomienda realizar más pruebas con diferentes caudales y alturas. A partir de los resultados obtenidos se evidencia como a medida que se aumenta el caudal las pérdidas por impacto disminuyen, mientras que, las pérdidas por fricción aumentan. De modo que se puede establecer una relación inversa entre estas dos variables. Para reafirmar esta tendencia se recomienda realizar más pruebas con diferentes caudales.

Al final de ambas pruebas la tubería de salida no se presurizó de modo que la capacidad hidráulica de descarga de la cámara funciona preservando los principios de disipación de energía. Sin embargo, son necesarias más pruebas para corroborar estos resultados.

## 6 CONCLUSIONES

- Se amplia la capacidad de descarga hidráulica de la cámara de vórtice manteniendo los principios de disipación de energía de las cámaras de vórtice. De modo que el objetivo del experimento se cumple de manera satisfactoria.
- Se disipa entre el 85% y 90% de la energía, de manera que la cámara es adecuada para usarla con caudales altos para velocidades moderadas.
- La disipación de energía aumenta a medida que aumenta la velocidad de entrada. De manera que se recomienda usar este tipo de cámaras para velocidades altas.
- La disipación de energía se produce principalmente en el impacto con el fondo de la cámara, lo que se ve reflejado en el coeficiente de impacto. Este coeficiente disminuye a medida que se aumenta la velocidad. Por lo tanto, se reafirma su implementación en condiciones de alta velocidad.

## 7 RECOMENDACIONES

- Analizar el comportamiento del coeficiente de impacto para diferentes geometrías a las ensayadas en estas pruebas. Lo anterior, de modo que no se comprometa la estructura para valores muy altos de este coeficiente.
- Realizar pruebas con diferentes diámetros con el objetivo de analizar el comportamiento de la capacidad de descarga de la cámara.
- Probar diferentes pendientes de la tubería de entrada para comprender mejor el fenómeno de vorticidad dentro de la cámara. Asimismo, verificar el comportamiento que tienen las altas pendientes sobre la geometría del arco.
- Modificar la geometría de la sección de entrada a la cámara con el objetivo de mejorar el fenómeno de vorticidad dentro de la cámara.
- Cambiar la geometría del fondo de la cámara por una semiesférica o cónica para reducir el impacto del flujo sobre el fondo de la cámara y prolongar la vorticidad del flujo dentro de la cámara.
- Realizar diferentes pruebas con las alturas restantes para analizar la disipación y determinar cuál es la altura necesaria para garantizar el correcto funcionamiento de la cámara.
- Analizar el efecto del material de las paredes de la cámara sobre el flujo. Y como diferentes rugosidades aumentan o mantienen la disipación de energía.
- Realizar pruebas con sedimentos de modo que se repliquen las condiciones de un sistema de saneamiento dentro de la estructura.
- Implementar un mecanismo eficiente para medir la profundidad del flujo helicoidal dentro de la cámara con el propósito de implementar la ecuación de Darcy-Weisbach para varias secciones a lo largo del flujo.
- Aumentar la confiabilidad de las mediciones implementando medidores de velocidad electrónicos a la entrada y a la salida de la cámara.

## 8 REFERENCIAS

- Barreto Silva, D. A., & Cardona Suarez, D. E. (2014). *Estudio De Cámaras De Caída En Pozos De Inspección Tipo: Bajante Y Rampa En Sistemas De Drenaje Urbano*. Bogotá: Universidad De La Salle.
- BARRETO SILVA, D., & CARDONA SUAREZ, D. (2014). *ESTUDIO DE CÁMARAS DE CAÍDA EN POZOS DE INSPECCIÓN TIPO: BAJANTE Y RAMPA EN SISTEMAS DE DRENAJE URBANO*. Bogota: Universidad de la Salle.
- Crispino, G., Dorthe, D., Fuchsmann, T., Gisonni, C., & Pfister, M. (2016). *Junction chamber at vortex drop shaft: case study of Cossonay*. Hydraulic Structures and Water System Management.
- Eduardo Rodal Canales, G. E. (2012). *Estudio Experimental En Modelo Hidráulico Del Pozo De Alta Caída*. San José: Xxv Congreso Latinoamericano De Hidráulica.
- Empresas Públicas de Medellín. (2017). *Norma De Construcción De Cámaras De Caída*.
- Grupo Energía Bogotá. (2012). *Algunas características hidrodinámicas de un vórtice en un cilindro inducido por una corriente de agua*. Bogotá: Premio Fabio Chaparro.
- Ministerio de Desarrollo Económico. (2000). *REGLAMENTO TÉCNICO DEL SECTOR DE AGUA POTABLE Y SANEAMIENTO BASICO RAS-2000 TÍTULO D SISTEMAS DE RECOLECCIÓN Y EVACUACIÓN DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS Y PLUVIALES*. BOGOTA D.C.
- Ministerio de Vivienda. (2016). *Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS TÍTULO D Sistemas de Recolección y Evacuación de Aguas Residuales Domésticas y Aguas Lluvias*.
- PAVCO. (s.f.). *Manual Técnico Cámara y cajas de inspección NOVACAM*.
- St-Aubin, R. (2003). *Vortex flow inserts for odour and corrosion control*. Environmental, Science & Engineering Magazine.
- Universidad de la costa . (s.f.). *FLUJO EN CANALES ABIERTOS*. Obtenido de Hidráulica: <https://hidraulica65.webnode.com.co/paseos/>
- Wu, I. (1975). Design on Drip Irrigation Main Lines. *Journal of the Irrigation and Drainage Division, ASCE*.

---

Zhao, C.-H., David Z. Zhu, M., Sun, S.-K., & Liu, a. Z.-P. (2006). *Experimental Study of Flow in a Vortex Drop Shaft*. Journal of Hydraulic Engineering.

## 9 ANEXOS

### 9.1 Planos de montaje

En este apartado se muestran los planos de implantación y elementos adicionales para el montaje de la cámara de vórtice diseñada y construida para el desarrollo de esta tesis.

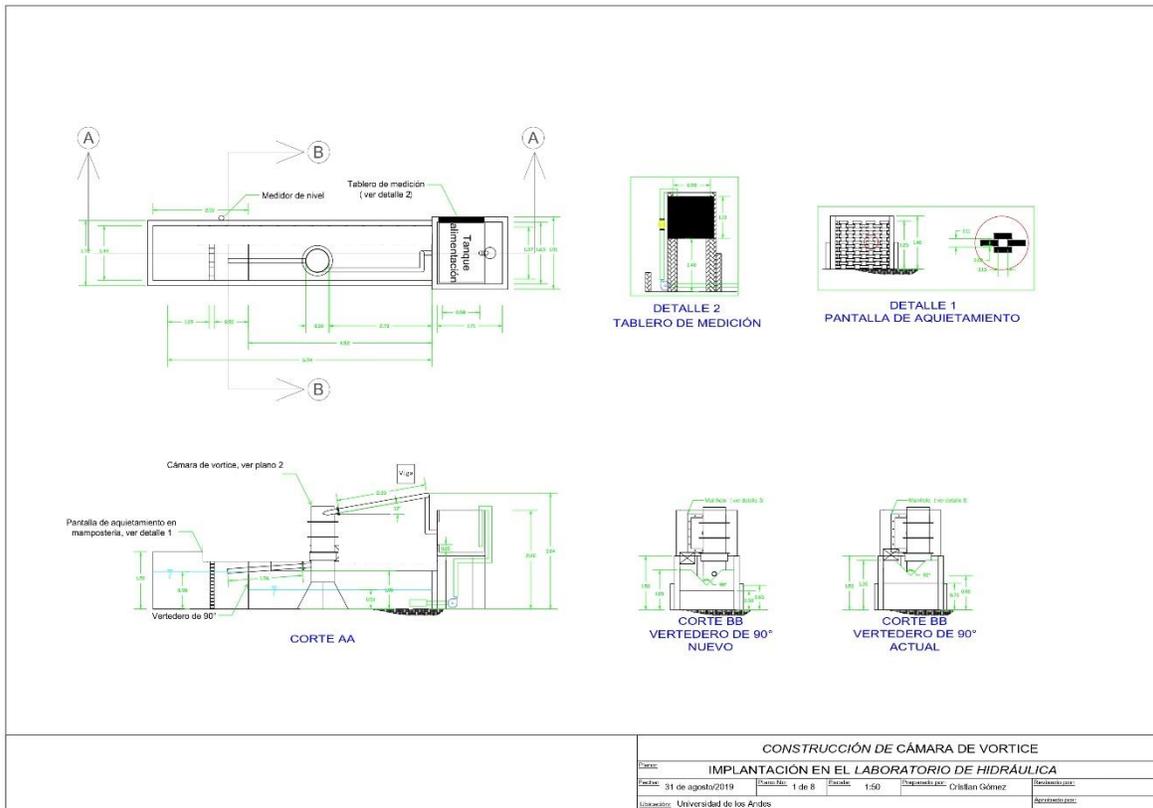


Figura 30. Plano de implantación en el laboratorio de hidráulica

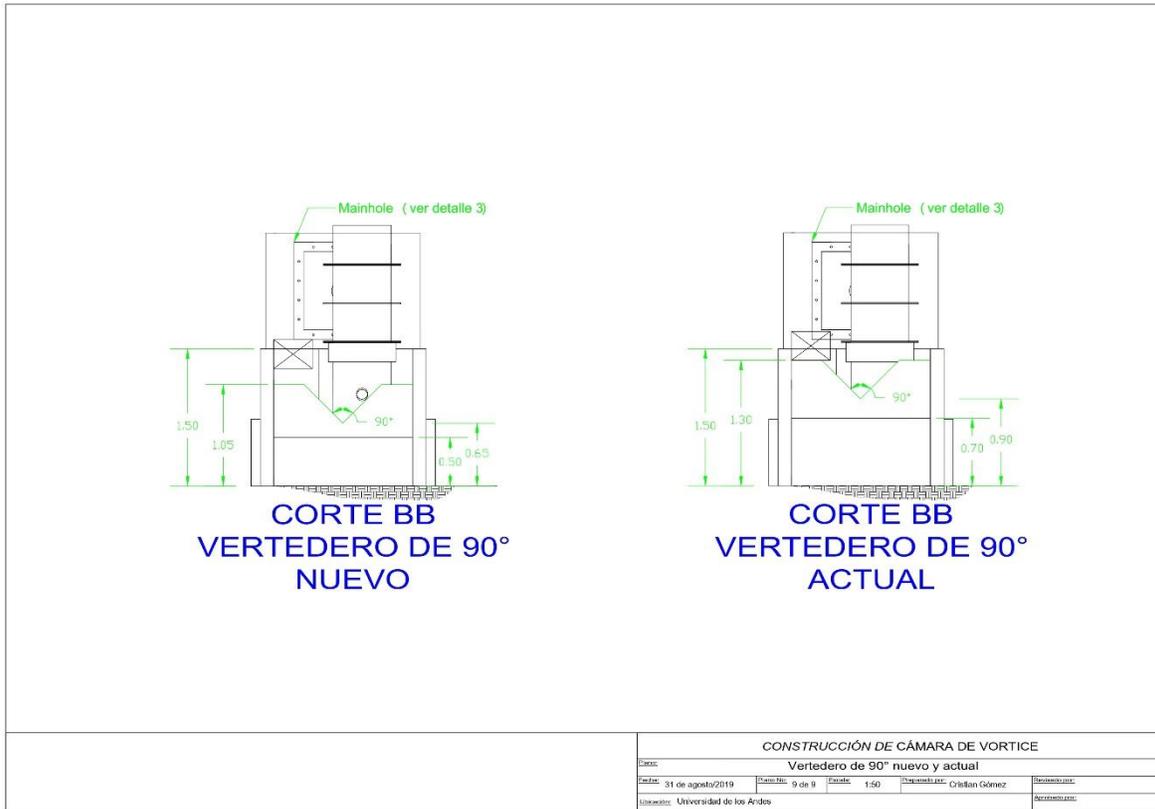


Figura 31. Vertedero de 90° nuevo y antiguo

## 9.2 Planos de la pieza

En este apartado se muestran los planos de los diferentes componentes de la cámara de vórtice diseñada y construida para el desarrollo de esta tesis.

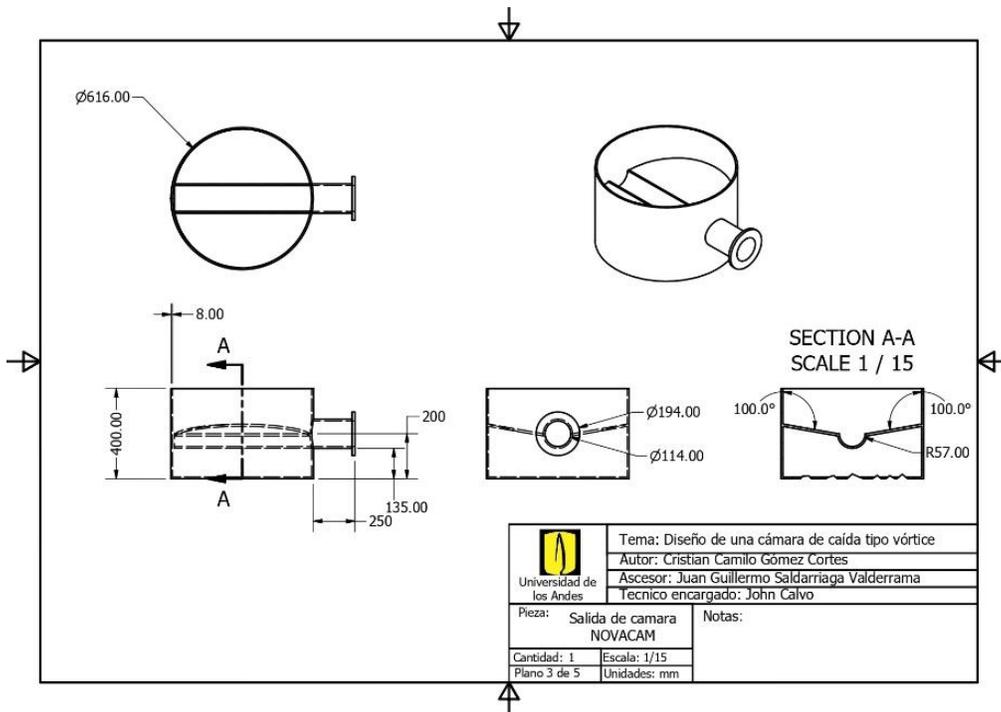


Figura 32. Plano de base cámara inicial de 600 mm

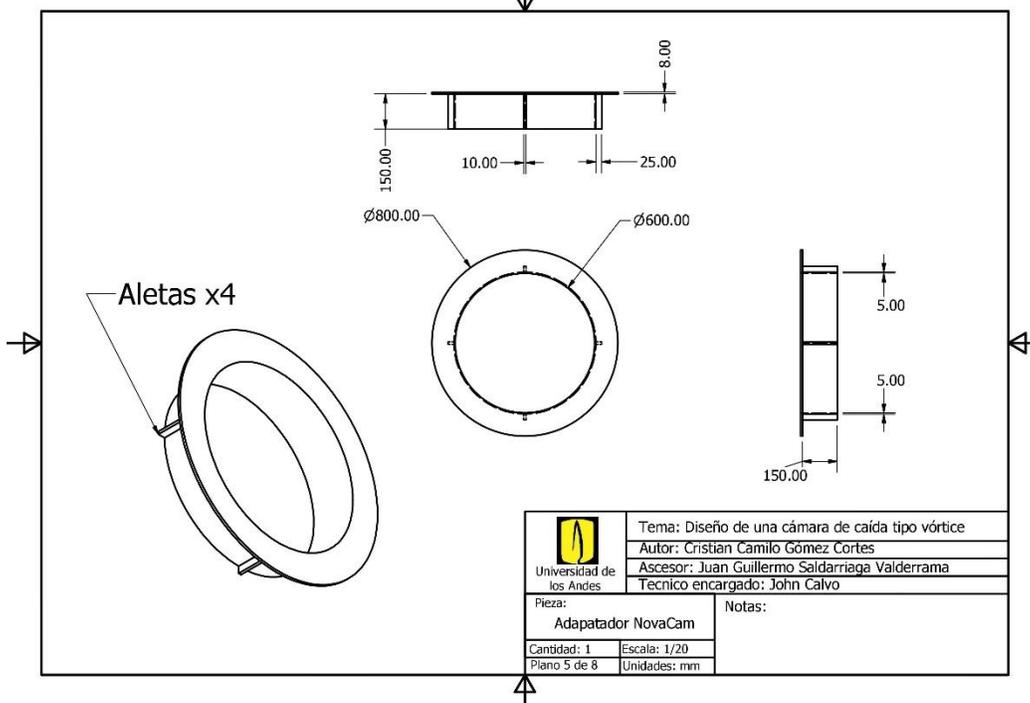


Figura 33. Plano de adaptador a base cámara inicial

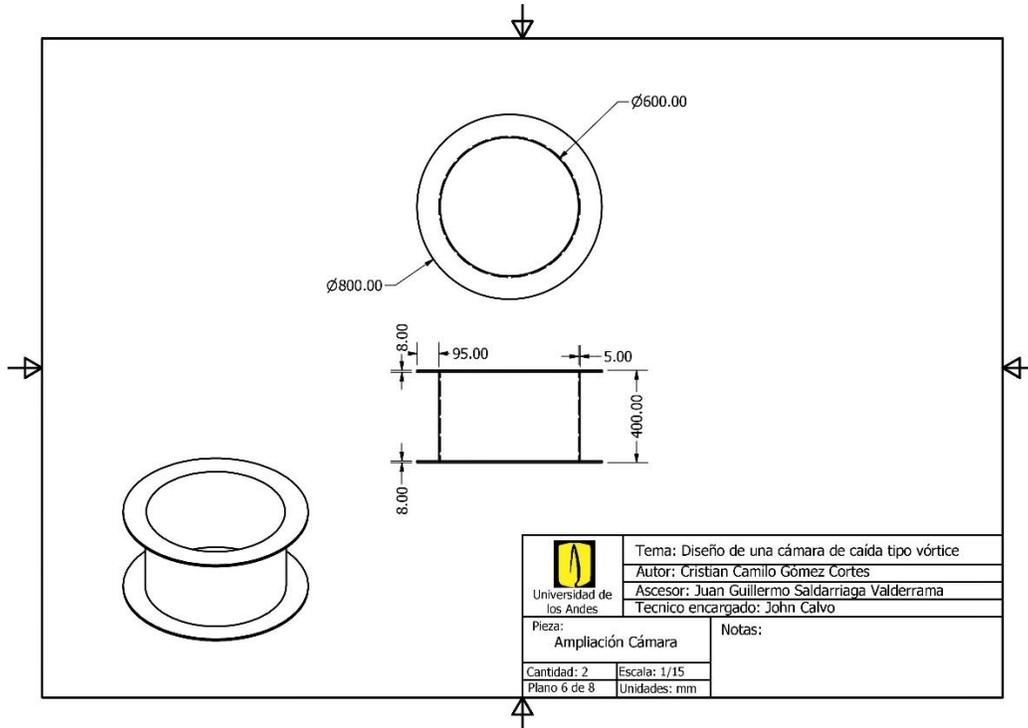


Figura 34. Plano de ampliación de cámara

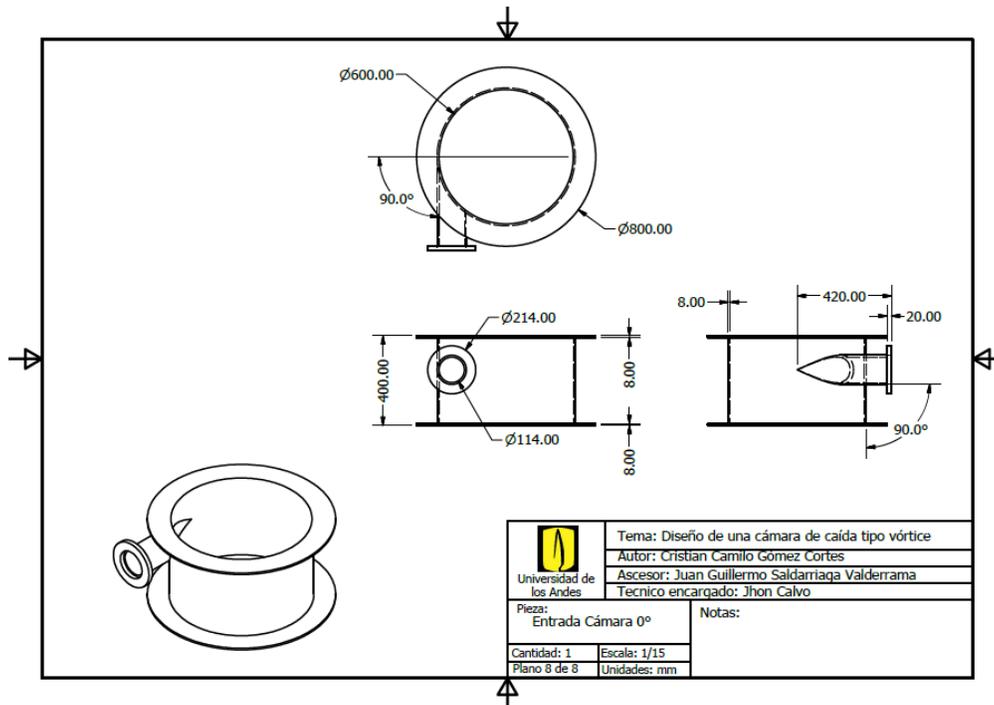


Figura 35. Plano de entrada de cámara a 10 °

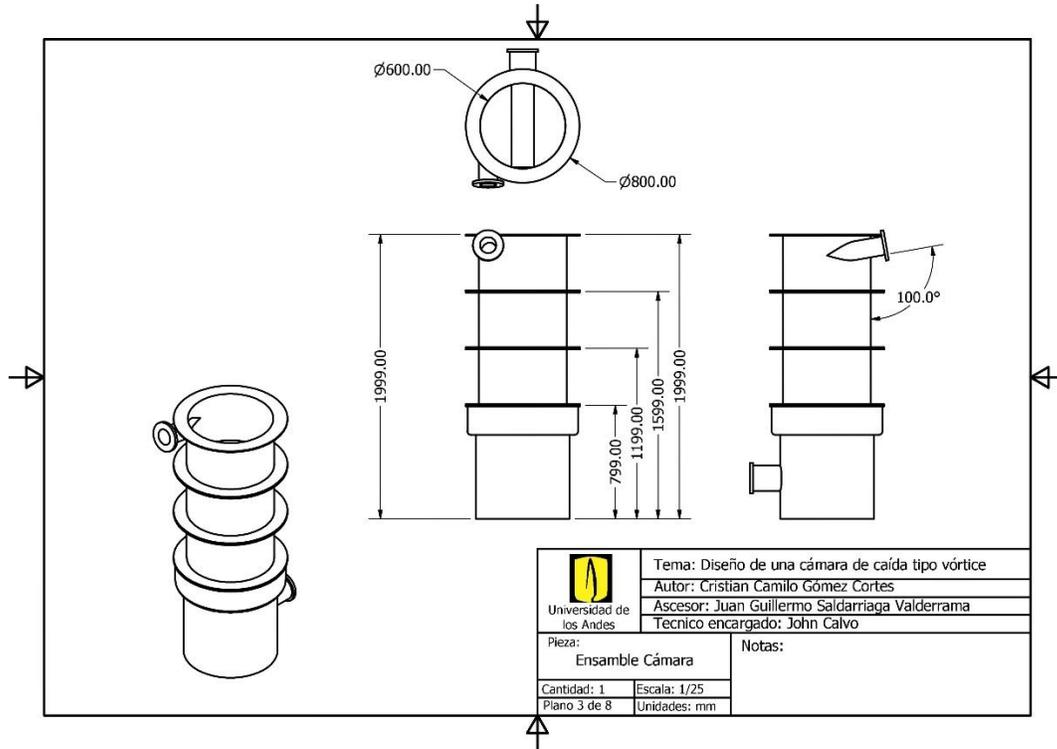


Figura 36. Plano de cámara de vórtice