

Eficiencia en la Disipación de Energía en Estructuras para Cambio Simultáneo de Nivel y de Dirección en Sistemas de Alcantarillado en Ciudades Andinas

Haro, Patricia¹; Hidalgo, Ximena¹; Jara, Fernanda²; Castro, Marco¹

¹Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental, Quito, Ecuador

²Ministerio de Electricidad y Energía Renovable, Subsecretaría de Generación y Transmisión de Energía, Quito, Ecuador

Resumen: Las características especiales de topografía que presentan las ciudades andinas, plantean ciertos problemas en cuanto al diseño de obras para los sistemas de alcantarillado con cambios simultáneos de nivel y de dirección del flujo con superficie libre. El objetivo principal de diseño de estas obras consiste en lograr la suficiente disipación de energía para garantizar que el flujo de salida al pie sea estable, con caudal permanente y con una distribución casi uniforme de la velocidad. En el presente artículo, se presentan dos alternativas de solución: el descargador a vórtice y el pozo de bandejas. El estudio en modelo físico permitió comparar la eficiencia en disipación de energía obtenida con las dos estructuras y realizar algunas recomendaciones para su diseño e implementación.

Palabras clave: Descargador a vórtice, disipador de bandejas, disipación de energía, eficiencia hidráulica

Energy Dissipation Efficiency in Structures for Simultaneous Change of Level and Direction in Sewer Systems of Andean Cities

Abstract: Design sewer networks in Andean cities which have irregular topography characteristics, represent a challenge for Hydraulic Engineers. They should solve the problem of free surface water conduction to an inferior ground level inside of longitudinal reduced spaces with alignment changes. The main design objective for these structures is to generate enough energy dissipation to ensure that discharge flow at the bottom will be permanent and steady. This means that velocity distribution also will be almost uniform. In this work two alternative solutions are presented: vortex drop shaft and trays dissipator. The study in physical scale model allowed to compare the energy dissipation efficiency in the two structures and make some design recommendations.

Keywords: Vortex drop shaft, trays dissipator, energy dissipation, hydraulic efficiency

1. INTRODUCCIÓN

Las exigentes características topográficas en las ciudades de la región andina plantean importantes problemas en el diseño de obras especiales al interior de sistemas de alcantarillado en particular en las redes de recolección tales como estructuras de cambio simultáneo de nivel y de dirección del flujo a superficie libre.

En el análisis para encontrar la solución técnica óptima exclusivamente desde el punto de vista del ingeniero hidráulico se requiere examinar el comportamiento hidráulico del flujo de aproximación, sea éste subcrítico o supercrítico, y de la estructura especial para garantizar que ésta no se transforme en un elemento cuyo objetivo sea absorber el impacto directo de la energía del escurrimiento, sino que, por el contrario se creen las condiciones en el flujo para que exista una disipación adecuada de energía, permitiendo mantener la

vida útil de la estructura, y con ello de la red (Escuela Politécnica Nacional, 2006).

Por otro lado, es ampliamente conocido que el uso de modelos físicos permite examinar el comportamiento de una determinada geometría, incluidos los fenómenos especiales que se presentan durante el funcionamiento, tales como introducción de aire y la presencia de ondas y perturbaciones en el flujo, afectaciones que normalmente se propagan hacia aguas abajo. “*El estudio en modelo físico a escala se fundamenta en la representación apropiada del fenómeno en la naturaleza, bajo las condiciones de similitud geométrica, cinemática y dinámica del comportamiento del flujo. Al ser este fenómeno bajo análisis a superficie libre, el criterio básico utilizado en la simulación física, es el criterio de similitud de Froude*” (Hidalgo et al, 2015).

En resumen, el objetivo planteado para el diseño de una estructura de cambio simultáneo de dirección y de nivel,

ximena.hidalgo@epn.edu.ec

Recibido: 16/06/2015

Aceptado: 28/11/2016

Publicado: 20/01/2017

consiste en lograr la suficiente disipación de energía, que garantice un flujo estable de salida al pie de la obra, con una distribución uniforme de la velocidad. Para cumplir con este requerimiento, se dispone de dos estructuras: el Descargador a Vórtice y el Pozo de Bandejas en su versión modificada sobre la base de las experiencias del Centro de Investigaciones y Estudios en Recursos Hídricos, CIERHI, Escuela Politécnica Nacional.

2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA FÍSICO

En ciudades como Quito, las zonas pobladas cubren áreas críticas por su ubicación como se puede observar en la Figura 1, y dan origen al reto ingenieril de encontrar soluciones costo eficientes para las obras especiales necesarias para una adecuada conducción de las aguas lluvias. Tanto la rehabilitación de sistemas existentes, como también la expansión de los mismos deberán enfrentar la necesidad de salvar grandes desniveles con desarrollos longitudinales mínimos.



Figura 1. Crecimiento urbano desordenado de las ciudades andinas

Las normas de diseño hidráulico exigen ubicar pendientes longitudinales mínimas en los colectores, con el fin de mantener las velocidades de flujo por debajo de las admisibles. Paralelamente se debe diseñar estructuras especiales de salto, que logren disipar la energía potencial debida al desnivel topográfico. En la mayoría de los casos se trata de flujos con diferencias de nivel mayores a los 2 m y caudales superiores a $1 \text{ m}^3/\text{s}$.

La acción del agua sobre los materiales con los que está construida una estructura de disipación, puede causar graves afectaciones a su calidad y a su resistencia mecánica, así como una apreciable disminución de su vida útil. Estos problemas deben evitarse mediante la selección apropiada y el correcto dimensionamiento de la geometría de las estructuras.

3. OBJETIVOS

Comparar las características de funcionamiento de obras especiales utilizadas en los diseños hidráulicos de redes de alcantarillado combinado en la ciudad de Quito utilizando los resultados experimentales obtenidos en las investigaciones de laboratorio.

Resumir los principales criterios constructivos que deben ser

tomados en cuenta para lograr una optimización económica de las obras.

4. METODOLOGÍA

Se construyeron dos modelos físicos de las estructuras uno del Descargador a Vórtice y uno del Pozo de Bandejas con dos modificaciones en sus bandejas utilizando plexiglás y madera pulida y pintada, con rugosidades absolutas del orden de los $0,0010 \text{ mm}$. Las dimensiones del modelo se obtuvieron en función del caudal disponible en el laboratorio, adoptándose una escala mínima 1:4 para los modelos. El caudal máximo de operación se definió en función de las limitaciones físicas del laboratorio; es decir caudales del orden de 130 l/s .

El análisis experimental en el Pozo de Bandejas se realizó con dos configuraciones de bandejas: la primera con una sección de $0,50 \times 1,00 \text{ m}$ conformada por una parte de losa completa, seguida por una rejilla y un orificio que ocupa todo el ancho del pozo (Figura 2.a); la segunda con una sección rectangular similar a la primera ($0,50 \times 1,00 \text{ m}$) pero constituida por una parte de losa completa seguida por una rejilla y añadiendo una inclinación de 5% a contrapendiente (Figura 2.b) (variante obtenida de estudios anteriores realizados en el CIERHI (Feria & Valencia, 2004; Poveda, 2005; Haro & Jara, 2006). La altura entre bandejas era de 50 cm .

Se realizaron mediciones de cargas piezométricas en tres puntos del canal de aproximación, y en cuatro puntos de cada una de las cuatro bandejas a fin de poder estimar la energía disipada durante el recorrido del flujo y obtener un porcentaje de eficiencia en la disipación de energía con respecto a los caudales ensayados.

El modelo del Descargador a Vórtice se diseñó para un caudal comparable al caudal de diseño del Pozo de Bandejas con flujo de aproximación subcrítico. El objetivo de la construcción de este modelo consistía en visualizar las características del flujo de descenso y de entrega a fin de comparar el comportamiento del flujo en las dos estructuras.

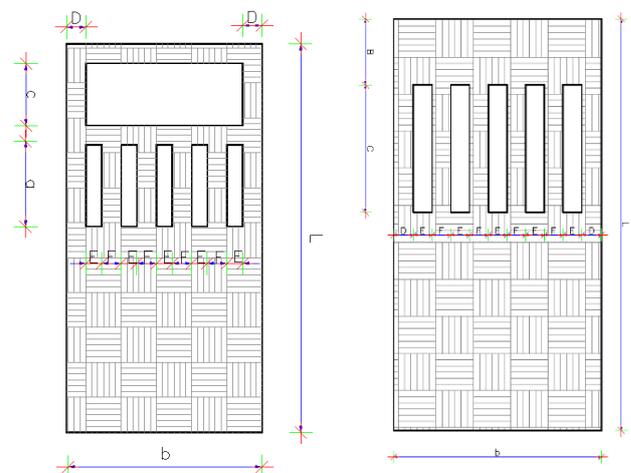


Figura 2. (Arriba) a) Bandeja Reja - Orificio – (Abajo) b) Bandeja inclinada 5% con Reja (Haro & Jara, 2006)

5. ANÁLISIS DIMENSIONAL

Cuando se trata de modelar estructuras hidráulicas de control, la simulación de flujo de agua exige que se cumplan los tres criterios de similitud: geométrica, dinámica y cinemática. El fenómeno de flujo analizado corresponde a un flujo a superficie libre bajo el efecto de la aceleración de la gravedad y que simultáneamente genera disipación de energía (por cambio de dirección del flujo y por fricción interna). La masa de agua está en continuo proceso de introducción de aire durante la caída.

Si se considera que el flujo en el Pozo de Bandejas y en el Descargador a Vórtice es un flujo con superficie libre donde la aceleración se debe a la acción de la gravedad y de la geometría de las estructuras, el criterio básico de similitud para el análisis experimental corresponde al de Froude. Por lo tanto, si se desea que la relación entre las fuerzas de inercia y las de gravedad sean idénticas en el modelo y en el prototipo se debe garantizar además la semejanza geométrica.

Por otro lado, se conoce que todo fenómeno de disipación de energía debe simularse utilizando el criterio de similitud de Reynolds. Sin embargo, no es posible cumplir de manera simultánea con la Similitud de Froude y la Similitud de Reynolds.

Para conseguir una simulación adecuada del efecto viscoso en el modelo no distorsionado bajo la similitud de Froude, se exige que el factor adimensional de fricción λ (relación de Darcy – Weisback) sea idéntico en el modelo y en el prototipo, de tal forma que aunque se tenga Números de Reynolds mayores en el modelo que en el prototipo se logra una apropiada representación del patrón de flujo y la disipación de energía. El cumplimiento de esta condición conduce a la construcción del modelo utilizando un material con comportamiento hidráulicamente liso para toda la gama de caudales que garantice la presencia de flujo turbulento totalmente desarrollado.

Adicionalmente, la reproducción del flujo de estos dos tipos de disipadores de energía, implica la representación adecuada del fenómeno de introducción de aire para lo cual se debe considerar el criterio de Similitud de Weber (fuerza predominante adicional: tensión superficial). De acuerdo a este criterio, en el modelo deben presentarse velocidades mayores que en el prototipo.

Por lo comentado en el párrafo anterior se concluye que un modelo operado bajo el criterio de similitud de Froude subestima la cantidad de aire que ingresa en la masa de agua ($We_P > We_M$).

No obstante esta restricción, es posible obtener una representación óptima de la introducción de aire siempre que “la escala de longitudes asociada a las dimensiones geométricas de los modelos corresponda a $L_r < 20$ y se pruebe la eficiencia de la estructura con caudales superiores al caudal máximo de diseño hasta en un 25%.

Esta restricción se basa en estudios realizados en una familia de modelos, construidos a diferentes escalas de longitudes y operados justamente para evaluar el efecto de escala debido a la tensión superficial y a la formación de burbujas de aire que pueden ser introducidas en la masa de agua”. (Escuela Politécnica Nacional, 2006).

Para el análisis dimensional del Pozo de Bandejas, se consideraron los siguientes parámetros:

Parámetros geométricos:

- Profundidad de flujo en el canal de aproximación (y_i)
- Profundidad de flujo en las bandejas (y_{ij})
- Profundidad crítica (y_c)
- Carga de energía en cada bandeja (Ho_y)
- Ángulo de inclinación de la bandeja [$\angle\alpha$]; variable $0^\circ, 3^\circ, 6^\circ$.
- Porcentaje de obstrucción en la reja de cada bandeja [O-R%]; variable 10%, 6% y 3% del área de la bandeja.

Parámetros cinemáticos:

- Velocidad de Flujo (V) o Caudal de operación (Q)

Parámetros dinámicos:

- Presión (Δp)
- Peso Específico del agua (γ)
- Viscosidad dinámica (μ)
- Tensión Superficial (σ)
- Módulo de elasticidad volumétrico (ϵ)
- Densidad (ρ)

Como resultado del análisis dimensional, tomando en consideración las restricciones mencionadas, se plantea una función en la que se observa la influencia de la fuerza de gravedad (Número de Froude) y de la geometría, como se presenta en la Ecuación (1):

$$0 = \varphi_i \left[\frac{y_i}{y_c}, \frac{y_i}{y_c}, \frac{y_i}{y_c}, \angle\alpha, O - R\%, Fr \right] \quad (1)$$

Finalmente, cabe mencionar que, dentro de las observaciones realizadas en modelos de Descargador a Vórtice, el fenómeno de introducción de aire en la masa de agua es irrelevante mientras se mantenga el núcleo de aire considerado en el dimensionamiento.

6. DESCRIPCIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DEL POZO DE BANDEJAS

Un pozo de bandejas tiene como objetivo técnico principal disipar la energía potencial de la masa de agua disponible por el descenso vertical desde el canal de aproximación en el nivel superior, hasta el colector de salida, en el nivel inferior. El flujo cae verticalmente a través de una serie de bandejas procurando eliminar parcialmente la energía en cada una de ellas. Adicionalmente permite, en forma limitada, el cambio

de dirección del flujo a la salida. La Figura 3 presenta un esquema de los elementos constitutivos del Pozo de Bandejas.

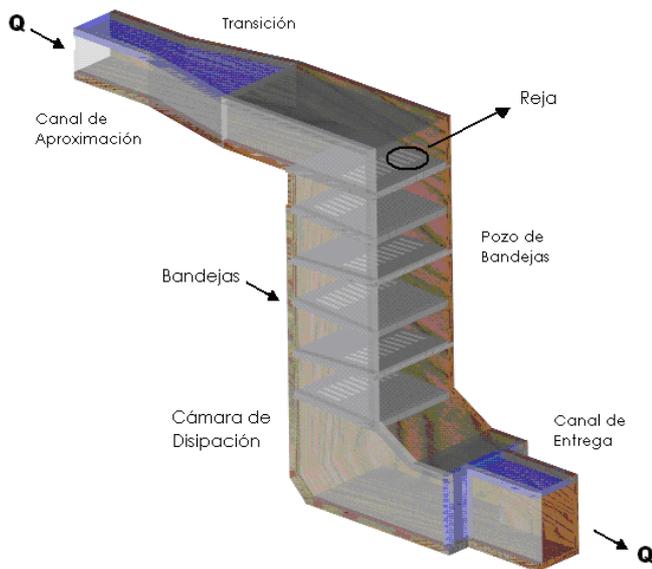


Figura 3. Elementos constitutivos del Pozo de Bandejas (Haro & Jara, 2006)

6.1 Canal de Entrega o de Aproximación

El canal de entrada o de aproximación exige la presencia de un flujo subcrítico estable, sin perturbaciones hacia el pozo vertical. Esta característica se consigue mediante el uso de secciones prismáticas y continuas en las que no se admite confluencia ni derivación de flujos en la zona cercana al ingreso del pozo.

6.2 Pozo de Bandejas

El canal de entrada o de aproximación exige la presencia de un flujo subcrítico estable, sin perturbaciones hacia el pozo vertical. Esta característica se consigue mediante el uso de secciones prismáticas y continuas en las que no se admite confluencia ni derivación de flujos en la zona cercana al ingreso del pozo.

6.3 Pozo de Bandejas

Para mejorar la eficiencia de la disipación es necesario que al pie del pozo se disponga de una cámara de entrega en la que se permita la eliminación de la energía residual del flujo, previo el ingreso al colector que recibe el flujo.

7. DESCRIPCIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DEL DESCARGADOR A VÓRTICE

En un descargador a 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 hasta llegar a la cámara de disipación y continuar por el canal de entrega hacia el colector de salida del sistema.*” (Escuela Politécnica Nacional, 2006) La definición gráfica de los

componentes del descargador a vórtice se muestra en la Figura 4.

En el diseño de estas estructuras es importante revisar la eficiencia del sistema para toda la serie de caudales de operación, incluyendo los caudales mínimos sanitarios, de manera que se garantice la formación y la presencia de flujo helicoidal en el interior del descargador a vórtice.

7.1 Canal de Entrega o de Aproximación

El tipo de flujo que circula por el canal de entrada determina las características hidrodinámicas del descargador a vórtice.

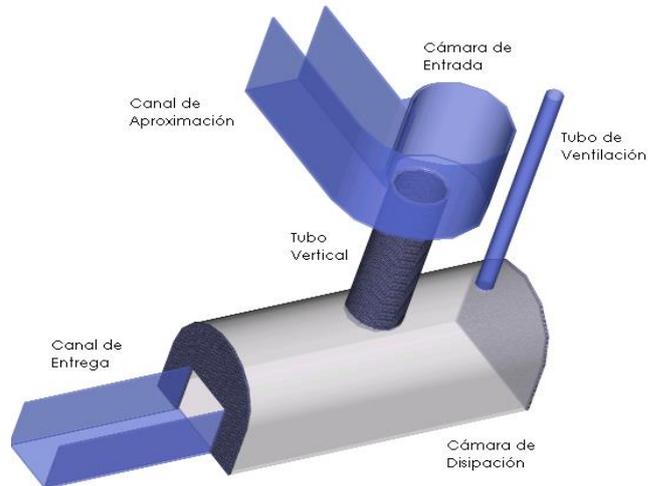


Figura 4. Esquema general y estructuras componentes del Descargador a Vórtice (Haro & Jara, 2006)

Para garantizar la estabilidad del flujo en el canal se deben cumplir con las siguientes recomendaciones:

- En el caso de flujo subcrítico, se requiere que $Fr < 0,75$ en la aproximación (Giudice & Gissoni, 2011). Las características hidrodinámicas en el canal de entrada serán controladas por la descarga en el tubo vertical, desde aguas abajo.
- Para canales de entrada con flujo supercrítico, se recomienda que $Fr > 1,30$ (Hager, 1990). En este caso es importante analizar la posibilidad de que las altas velocidades en el canal den lugar a perturbaciones (sobreelevaciones) en la superficie libre, las mismas que podrían ser transportadas aguas abajo con la consecuente afectación al proceso de generación del flujo helicoidal y de disipación de energía.

7.2 Cámara de Entrada

La configuración de la cámara, con paredes curvas, tanto para flujos de aproximación subcríticos (Figura 5a) como supercríticos (Figura 5b), permite que la lámina del flujo permanezca confinada a la geometría de entrada garantizando la entrega de un flujo helicoidal al tubo vertical.

7.2.1 Cámara Subcrítica:

La magnitud base para la configuración de este tipo de cámara

es el diámetro D_s del tubo vertical cuya apertura controla las características del flujo de aproximación subcrítico como se muestra en la Figura 6.

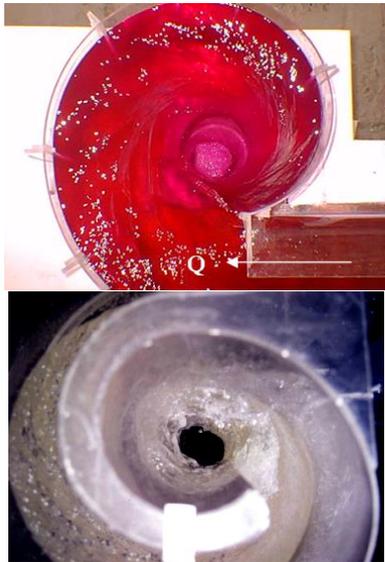


Figura 5. (Arriba) a) Cámara de entrada para régimen subcrítico (Caizaluisa, 2002) – (Abajo) b) Cámara de entrada para régimen supercrítico (Abarca & Romero, 1999) CIERHI

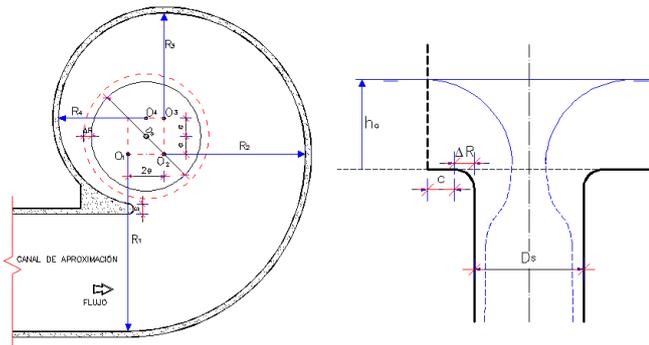


Figura 6. Elementos constitutivos de la Cámara de Entrada Subcrítica (Vischer & Hager, 1995)

7.2.2 Cámara Supercrítica:

El contorno de la cámara de entrada para flujo supercrítico no es límite para la masa de agua por lo que su configuración se diseña en forma de un tobogán con paredes altas que permiten controlar la sobreelevación del nivel de agua como se observa en la Figura 7.

7.3 Tubo Vertical o Pozo

El diámetro del tubo vertical debe garantizar tanto la presencia de un núcleo de aire, que permita la estabilización de la lámina descendente, así como la formación del flujo helicoidal adecuado; es decir, con un paso óptimo respecto de la longitud del tubo. La disipación de energía en esta parte de la estructura se produce por la fricción del flujo con las paredes del tubo a lo largo de una longitud efectiva de recorrido notablemente

mayor al simple desnivel, así como por el cambio continuo de dirección de las líneas de corriente.

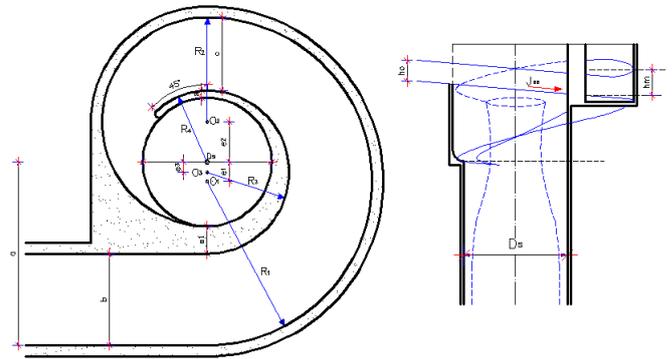


Figura 7. Elementos constitutivos de la Cámara de Entrada Supercrítica (Vischer & Hager, 1995)

7.4 Cámara de Disipación al Pie

Los principales objetivos que se satisfacen en esta cámara al pie del tubo vertical son los siguientes:

1. Garantizar la estabilidad del flujo helicoidal de caída proporcionando la ventilación suficiente del núcleo de aire en el tubo vertical.
2. Disipar la energía residual al pie del tubo vertical (generalmente se coloca un estrechamiento a la salida de la cámara de disipación para asegurar la formación de un colchón de aguas que permita la disipación de la energía residual).
3. Permitir que el flujo de ingreso al canal de entrega al pie de la estructura sea homogéneo y estable.
4. Permitir el cambio de dirección entre los canales de llegada y de salida del descargador a vórtice.
5. Ofrecer la posibilidad de inspección de la estructura de cambio de nivel.

Los elementos constitutivos de la cámara de disipación se observan en la Figura 8.

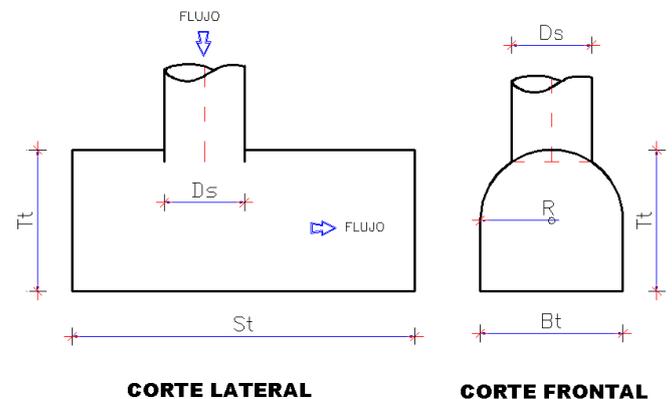


Figura 8. Elementos constitutivos de la Cámara de Disipación al pie (Haro & Jara, 2006)

7.5 Canal de Entrega

El canal de entrega puede tener cualquier forma en su sección transversal; siempre que la geometría de la transición entre la pared de aguas abajo de la cámara y el canal garantice un flujo controlado. En el canal de entrega es necesario que el flujo escurra libre de pulsaciones del caudal de la mezcla de agua y aire y/o que no se presente el riesgo de cavitación local.

8. VARIANTES ESTUDIADAS PARA EL POZO DE BANDEJAS

En su diseño original, la estructura constaba de una pantalla plana vertical colocada frente al canal de aproximación como elemento de impacto que debía servir para reducir la velocidad del flujo de ingreso y generar un cambio brusco de dirección, y bandejas horizontales colocadas de forma alternada con una separación determinada, no mayor a 1.50 m, en prototipo, según sugerencia del Plan Maestro de Alcantarillado de Quito (Escuela Politécnica Nacional, 2006).

En la primera investigación desarrollada en el CIERHI, se observó que la geometría original del pozo no permite la formación de colchones de agua para todo el rango de operación de caudales; además la masa de agua impacta directamente sobre las bandejas o las paredes verticales del pozo provocando que el flujo se reparta en direcciones aleatorias como se puede observar en la Figura 9. Estas condiciones de flujo no garantizaban la estabilidad de la estructura o la disipación de energía sin afectar la integridad del pozo de bandejas (Padilla & Torres, 2003; Poveda, 2005).

En la segunda variante realizada al pozo de bandejas se plantearon variantes para el pozo de bandejas que incluía la eliminación de la pantalla vertical, sección transversal cuadrada del pozo y la modificación de las bandejas horizontales de losa maciza hacia bandejas con rejillas, agregando inclinaciones a contrapendiente (Feria & Valencia, 2004; Poveda, 2005).



Figura 9. Características del flujo al interior del pozo de bandejas con diseño original con caudales bajos (<5% Qd), caudales medios (30% Qd) y cercanos al caudal de diseño (Escuela Politécnica Nacional, 2006)

La presencia de la reja generó algunos efectos en el flujo como se puede observar en la Figura 10 y que son: división del flujo generando varios chorros separados que caen hacia la siguiente bandeja; generación de una sección de control en cada rejilla que obliga a la formación de un colchón de agua; incremento en la introducción de aire por la presencia de varios chorros separados. La formación del colchón de agua evita el choque directo de los chorros contra la losa, mejorando el proceso de disipación de energía.



Figura 10. Características del flujo al interior del pozo de bandejas con rejillas para caudales bajos y altos (Escuela Politécnica Nacional, 2006)

En la presente investigación se planteó reproducir la experiencia con la bandeja reja (utilizando una geometría rectangular con la relación entre el ancho y la longitud del pozo de $b = L/2$ para aumentar el caudal unitario) y un inclinación del 5%; y se probó una tercera variante geométrica de bandejas rectangulares conformadas por una primera parte de una losa completa, seguida de una reja diseñada para descargar el 40% del caudal de diseño y finalmente un orificio por el que circulará el 60% restante del caudal de diseño, con el que se pensaba reducir el riesgo de obstrucción debido a la presencia de material sólido. La disposición de las bandejas, en los dos casos de prueba, se realiza de forma que la rejilla y el orificio o simplemente la rejilla se encuentren alternados.

9. PLAN DE PRUEBAS

Para analizar el comportamiento de flujo en las dos estructuras en estudio, se realizaron pruebas con caudales bajos, medios y altos con un similar orden de magnitud como se señala en la Tabla No. 1.

Tabla 1. Plan de Pruebas para las dos variantes de Pozo de Bandejas y para el Descargador a Vórtice

No.	Bandejas Reja – Orificio		Bandejas Reja		Descargador a Vórtice	
	Caudal Prototipo (m³/s)	Caudal Modelo (l/s)	Caudal Prototipo (m³/s)	Caudal Modelo (l/s)	Caudal Prototipo (m³/s)	Caudal Modelo (l/s)
1	0,42	13,10	0,33	10,20	1,01	31,69
2	1,44	45,00	0,88	27,50	1,37	42,80
3	2,03	63,40	1,49	46,60	2,15	67,24
4	2,54	79,50	2,09	65,30	3,01	93,91
5	2,70	84,40	2,42	75,50	4,00	125,02

Para las pruebas en el pozo de bandejas se realizaron mediciones del calado crítico en el canal de aproximación

(incluye la bandeja 1) y de los calados aireados en las bandejas inferiores. En las pruebas realizadas en el descargador a vórtice se realizaron mediciones del calado en el canal de aproximación, el calado en el centro del canal de descarga y el calado al final del canal de descarga.

La información obtenida permitió estimar en el pozo de bandejas: la energía total del sistema, la relación de calado de la mezcla sobre calado de aguas claras, las velocidades de la mezcla y de aguas claras, la energía específica de la mezcla, la pérdida de energía, la energía residual y la eficiencia en la disipación.

En el descargador a vórtice, se estimó la energía total a la entrada, las velocidades en la aproximación y en la descarga, la energía total en la descarga y la eficiencia en la disipación de energía.

10. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Una vez ejecutado el plan de pruebas, se obtuvieron los siguientes resultados experimentales:

10.1 Pozo de Bandejas Reja – Orificio

En la Figura 11 se puede apreciar el comportamiento del flujo con la variante de bandeja reja – orificio con tres tipos de caudales. En la fotografía de la izquierda (Figura 11.a) se observa que no existe ningún control para caudales bajos; los chorros impactan sobre las bandejas sin ninguna protección de colchón de agua; se presenta flujo separado en rejilla y orificio.



Figura 11. Características del flujo al interior del pozo de bandejas (reja – orificio) con caudales a) bajo, b) medio y c) cercano al caudal de diseño (Escuela Politécnica Nacional, 2006)

En la fotografía central y en la de la derecha (Figuras 11.b y 11.c) se observa la presencia de flujo pulsatorio e inestable (no existe una descarga constante); aparecen vibraciones en la estructura; las paredes soportan el impacto directo de los chorros de alta velocidad y actúan como deflectores; la capacidad de la estructura es menor que el caudal de diseño; la velocidad de flujo aumenta con el descenso del flujo (capacidad de disipación de energía relativamente bajo); los procesos de choque de chorros a alta velocidad (Figuras 11.b y 11.c) favorecen la introducción de aire por lo que a partir de la segunda bandeja el fluido se transforma en una mezcla aire-

agua en la que cada vez se incrementa el porcentaje de concentración de aire (Figura 12).

10.2 Pozo de Bandejas Reja con Inclinación del 5%

En la Figura 13 se puede apreciar el comportamiento del flujo con la variante de bandeja reja inclinada con tres tipos de caudales.

Para caudales bajos (Figura 13.a) se observa que la inclinación de las bandejas favorece la formación de colchones de agua en los que se sumergen los chorros divididos por la reja. No se presenta impacto de los chorros con las paredes laterales del pozo.

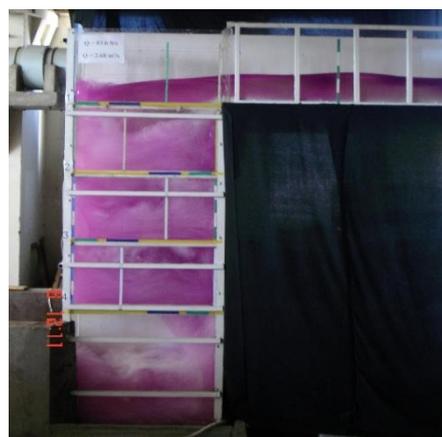


Figura 12. Vista lateral del modelo para $Q = 83,6$ l/s. Se observa que las bandejas 2 y 3 están ahogadas. Aumento de la masa agua – aire (Escuela Politécnica Nacional, 2006)



Figura 13. Características del flujo al interior del pozo de bandejas (reja con inclinación del 5%) con caudales a) bajo, b) medio y c) cercano al caudal de diseño (Escuela Politécnica Nacional, 2006)

Para caudales medios (Figura 13.b) se observa la formación de colchones de agua en cada nivel. Se presenta una fuerte turbulencia (generada por el ingreso de los chorros desde el nivel superior) e introducción de aire abundante. Los chorros no impactan directamente en las paredes y existe movimiento violento de la masa de agua con fluctuaciones intensas.

En cuanto a caudales grandes (cerca del caudal de diseño, Figura 14) se observa la formación de grandes masas de agua

para recibir el flujo descendente, gran turbulencia y la cantidad de aire introducido.

10.3 Descargador a Vórtice

En la Figura 15 se puede apreciar el comportamiento del flujo en la aproximación y entrada al descargador a vórtice con aproximación subcrítica. Se observa la presencia del flujo helicoidal totalmente definido y del núcleo de aire que garantiza el buen funcionamiento de la estructura.



Figura 14. Comportamiento del flujo con caudal cercano al de diseño. Se observa la formación de la masa de agua, la gran turbulencia desarrollada y la introducción de aire. (Escuela Politécnica Nacional, 2006)

En la Figura 16 se observa la formación del flujo helicoidal bien definido a lo largo del tubo vertical (para caudales altos y bajos), lo que favorece la disipación de energía que se produce por la fricción del flujo con las paredes del tubo, el cambio continuo de dirección y el incremento en la longitud de recorrido.



Figura 15. Comportamiento del flujo en a) la cámara de entrada con aproximación subcrítica del descargador a vórtice y en el b) canal de aproximación con caudales altos (Escuela Politécnica Nacional, 2006)

En cuanto a la cámara de disipación se observa que para caudales altos (Figura 16.a) se genera una mezcla violenta que provoca gran turbulencia con introducción de aire considerable. Para caudales bajos (Figura 16.b), en cambio, se observa la formación del colchón de aguas que permite la disipación de la energía residual.

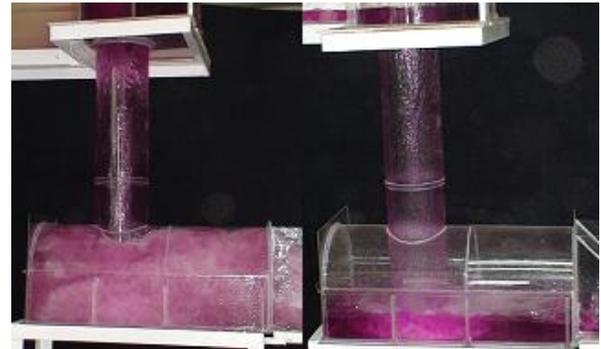


Figura 16. Comportamiento del flujo en el pozo o tubo vertical y en la cámara de disipación con a) caudales altos y b) caudales bajos. (Escuela Politécnica Nacional, 2006)

11. FUNCIONAMIENTO DE LAS DOS ESTRUCTURAS

Las siguientes fotografías (Figuras 17, 18 y 19) muestran el funcionamiento de las dos estructuras para condiciones similares de caudal de operación y altura de salto. En cada una se observa que el flujo de descenso en el descargador a vórtice es perfectamente controlado mientras que, en las bandejas, cada nivel debe soportar los efectos de la turbulencia generada por el ingreso de los chorros de agua.

Se aprecia además que los esfuerzos que el flujo produce sobre las estructuras son visiblemente diferentes: en el descargador a vórtice, la cámara de entrada y el tubo vertical no están sujetos a impactos directos ni al efecto de la turbulencia; mientras que, en el pozo de bandejas, cada nivel debe soportar el peso del agua que conforma el colchón de aguas y los efectos generados por la turbulencia.

En el descargador a vórtice, únicamente la cámara de disipación está sujeta a los efectos de la turbulencia generada.

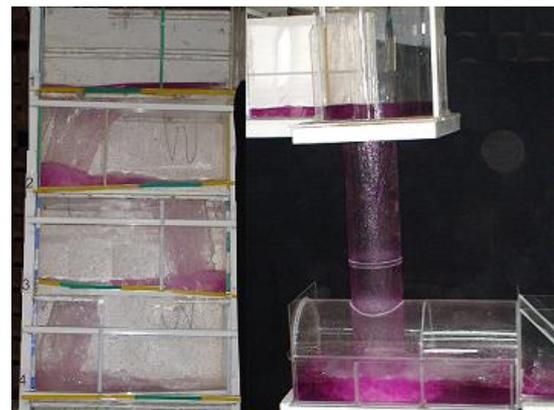


Figura 17. Funcionamiento de las estructuras para un caudal de operación aproximado del 12% del caudal de diseño. (Escuela Politécnica Nacional, 2006)



Figura 18. Funcionamiento de las estructuras para un caudal de operación aproximado del 62% del caudal de diseño. (Escuela Politécnica Nacional, 2006)



Figura 19. Funcionamiento de las estructuras para un caudal de operación aproximado del 100% del caudal de diseño. (Escuela Politécnica Nacional, 2006)

Adicionalmente se puede mencionar que el descargador a vórtice mantiene un flujo de descenso con superficie libre para todo el rango de caudales de operación y puede soportar caudales más altos hasta en un 150% del caudal de diseño; mientras que el pozo de bandejas tiene poca capacidad de admitir caudales mayores al de diseño puesto que corre el riesgo de trabajar a presión. En el laboratorio se observó con caudales del orden del 106% del caudal de diseño, el pozo de bandejas trabaja a presión.

En cuanto a la disipación de energía generada, en la Figura 20 se observa que la eficiencia en la disipación de energía, para las dos estructuras analizadas varía entre el 90% y el 100%.

Para caudales menores al caudal de diseño, que cubre el rango de operación frecuente de las estructuras, el descargador a vórtice tiene mejor eficiencia que el pozo de bandejas (alcanza una relación $Q_d/Q_{m\acute{a}x} \approx 0,30$ en el descargador a vórtice y en el pozo de bandejas se llega a una relación $Q_d/Q_{m\acute{a}x} \approx 0,15$), mientras que para la zona del caudal de diseño ($Q_d/Q_{m\acute{a}x} \approx 0,80$) las eficiencias son prácticamente similares.

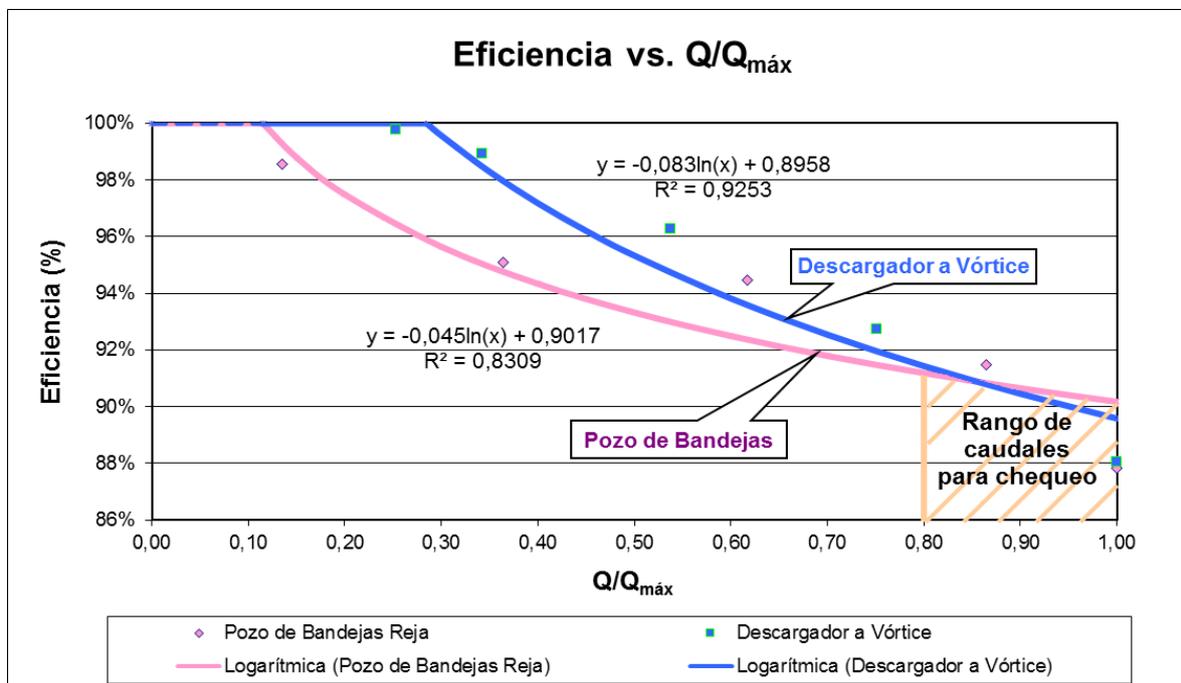


Figura 20. Eficiencia de las estructuras en función de la relación $Q/Q_{m\acute{a}x}$ (Haro & Jara, 2006).

12. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LAS ESTRUCTURAS ANALIZADAS PARA CAMBIO DE NIVEL Y DIRECCIÓN

Dentro de los criterios que deben tomarse en cuenta para la selección de la estructura adecuada en un cambio simultáneo

de nivel y dirección en sistemas de alcantarillado se mencionan:

Hidráulicos:

- a) Régimen del flujo en el colector de aproximación
- b) Condiciones aceptables para la entrega del flujo aguas abajo
- c) Caudal de diseño
- d) Eficiencia en la disipación

Sanitarios:

- a) Programas de operación y mantenimiento
- b) Capacidad de autolimpieza
- c) Aireación requerida

Estructurales:

- a) Esbeltez de la estructura (efectos de pandeo)
- b) Efectos de punzonamiento concentrados
- c) Estabilidad global
- d) Compresiones laterales y tensiones
- e) Efectos de abrasión
- f) Vibración

Económicos:

- a) Relación de costos
- b) Disponibilidad de materiales de construcción
- c) Tecnologías constructivas
- d) Operación y Mantenimiento

Las principales características de operación observadas en las estructuras que se plantean para lograr el cambio simultáneo de nivel y dirección en sistemas de alcantarillado permiten identificar las siguientes ventajas y desventajas:

- El descargador a vórtice permite el cambio de dirección entre el colector de entrada y de salida, debido a que la cámara al pie puede colocarse en cualquier dirección alrededor de los 360°. En cambio, el pozo de bandejas, en su configuración modificada, permite la salida únicamente con giros cada 90°, con respecto a la dirección del colector de entrada.
- El descargador a vórtice, por su configuración, elimina aristas vivas permitiendo la circulación del flujo sin cambios bruscos como aquellos que sufre el pozo de bandejas.
- El mantenimiento requerido en el Descargador a Vórtice es mínimo, pues no se disponen de áreas donde queden retenidos materiales sólidos. En el Pozo de Bandejas en cada nivel se dispone de la reja en donde necesariamente quedarán atrapados materiales sólidos que deben ser desalojados frecuentemente para minimizar el riesgo de taponamiento, que conduciría al colapso de la estructura.
- Para facilitar las operaciones de mantenimiento en un Descargador a Vórtice, es posible ubicar un acceso lateral en la cámara de disipación. Cuando las dimensiones del colector de salida permiten el ingreso del personal de mantenimiento, se omite este acceso lateral.

- Para realizar la limpieza y el mantenimiento del pozo de bandejas es necesario un ingreso en cada nivel; el mismo que puede implementarse a través de un pozo auxiliar de visita cuya profundidad sea prácticamente igual a la de la estructura principal. Para pozos con grandes dimensiones es posible lograr el acceso a través de rejas móviles en cada plataforma. Es recomendable la colocación de un by pass en el pozo de bandejas, que permita desviar el caudal sanitario durante las operaciones de mantenimiento.
- Para el adecuado funcionamiento de las dos estructuras de cambio de nivel y dirección se debe prever un apropiado sistema de ventilación. El Descargador a Vórtice cuenta con el núcleo de aire que debe ser garantizado en su dimensionamiento, mientras que el Pozo de Bandejas requiere de pozos auxiliares que logren la ventilación requerida.
- El Descargador a Vórtice mantiene un funcionamiento aceptable aun para caudales hasta 30% mayores a los de diseño; mientras el Pozo de Bandejas no puede admitir sobrecargas.

13. RECOMENDACIONES CONSTRUCTIVAS

- Las estructuras con grandes dimensiones constituyen un problema económico y constructivo. Tanto en el pozo de bandejas como en el descargador a vórtice, grandes alturas pueden superar los límites de esbeltez y producir problemas de pandeo. En estructuras de hormigón armado, el pandeo puede ser solucionado mediante la implementación de anclajes y rigidizadores dependiendo de la ubicación de la estructura.
- La altura entre bandejas no debe ser superior a los 2 m. La norma ecuatoriana en sistemas de alcantarillado pluvial y combinado no permite estructuras de salto con altura superior a este valor.
- La ubicación relativa de la reja en las bandejas, respecto de la pared posterior, debe ser tal que evite el impacto directo del flujo en las paredes del pozo.
- En caso de requerirse una estructura de disipación de energía para flujo de aproximación supercrítico, se recomienda la utilización del descargador a vórtice. Debido a las características de esta estructura, debe disponerse de una altura mínima o longitud mínima del pozo vertical, que garantice el funcionamiento adecuado.
- No se recomienda apoyar el tubo vertical directamente sobre la cámara de disipación ya que las dimensiones de ésta, así como la cantidad de material necesario para su construcción serían excesivas.
- Debido a las formas geométricas rectangulares que tiene el pozo de bandejas, se presentan tensiones y compresiones combinadas lateralmente que en el Descargador a Vórtice, por su geometría circular, no existen. Este aspecto es favorable si se diseñan estructuras en hormigón armado.

- La forma de péndulo invertido que presenta el descargador a vórtice es una desventaja estructural que debe ser controlada. Algunas soluciones que pueden adoptarse son la colocación de vigas rigidizadoras que sigan la forma de la cámara de disipación y permitan el anclaje del tubo vertical o la construcción de una torre que permita el anclaje superior de la estructura.
- El método que se empleará durante la construcción de un descargador a vórtice depende de la zona y las características del suelo en que se implemente. Además, se debe considerar si la estructura quedará enterrada o vista para diseñar elementos adicionales que garanticen su estabilidad.
- El descargador a vórtice presenta problemas de punzonamiento en la losa superior de la cámara de disipación y en la losa inferior de la cámara de entrada. Este problema puede ser solucionado utilizando métodos constructivos que permitan la transmisión uniforme de cargas al nivel inferior como en el caso de construcción de vigas rígidas en la losa. Estas vigas deben formar un sistema cerrado constituyéndose en parte de la geometría general de la cámara de disipación y de la cámara de entrada.
- En el pozo de bandejas se presentan problemas de punzonamiento en la losa inferior de apoyo de la cámara disipadora por lo que se recomienda la colocación de vigas de cimentación para que la carga sea repartida uniformemente.

14. CONCLUSIONES

Para solucionar problemas de cambio de nivel y/o dirección en sistemas de alcantarillado se presentan dos alternativas: el descargador a vórtice y el pozo de bandejas. Las configuraciones geométricas del descargador a vórtice permiten que esta estructura sea utilizada para solucionar la mayoría de problemas de cambio de nivel y dirección que se presentan en sistemas de alcantarillado. El pozo de bandejas es una estructura que presenta varias limitaciones de uso por lo que su implementación debe realizarse considerando todas las variables y restricciones que pueden afectar gravemente su funcionamiento y su eficiencia hidráulica.

REFERENCIAS

- Abarca, M.; Romero, J., (1999) "Análisis del flujo de aproximación supercrítico hacia el Descargador a Vórtice", Tesis de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, 1999.
- Caizaluisa, V., (2002) "Estudio en Modelo Hidráulico de los Descargadores a Vórtice en los Colectores El Colegio y Ponceano", Tesis de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, 2002.
- Del Giudice, G., & Gisonni, C. (2011). Vortex dropshaft retrofitting: case of Naples city (Italy). *Journal of Hydraulic Research*, 49(6), 804-808.
- Escuela Politécnica Nacional (2006). *Informe Final del Proyecto No. PIC-CEREPS-072: Análisis del Flujo en Estructuras para Cambios de Nivel y*

Dirección en Sistemas de Alcantarillado de Ciudades Andinas. Quito: Escuela Politécnica Nacional.

- Feria, M.; Valencia, N., (2004) "Estudio Experimental sobre el Pozo Modificado de Bandejas con Rejilla como Disipador de Energía", Tesis de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
- Haro, P.; Jara, F., (2006) "Manual Básico de Diseño de Estructuras de Cambio de Nivel y Cambio de Dirección con Flujo a Gravedad", Tesis de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
- Hager, W. (1990, Ago). "Vortex Drop Inlet for Supercritical Approaching Flow." *Journal of Hydraulic Engineering* 116(8), pp 1048-1054.
- Hidalgo, X; Castro, M.; Casa, E.; Dávila, D.; Ortega, P., (2015, Feb.). Evaluación sobre la Incidencia de la Forma y Distribución de los Deflectores en la Geometría de los Cuencos al Pie de Presas. *Revista Politécnica [Online]*. 35(3), pp. 103-109. Available: http://www.revistapolitecnica.epn.edu.ec/revista_archivos/revista_volumen_35/TOMO_3.pdf
- Padilla, J.; Torres, T., (2003) "Estudio Experimental sobre las Estructuras de Disipación de Energía en Pozos de Bandejas", Tesis de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
- Poveda, R., (2005) "Optimización de las Estructuras de Disipación de Energía en Pozos de Bandejas," Tesis de Maestría, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
- Vischer, D.; Hager, W. (1995), "Energy Dissipators", Rotterdam: A. A. Balkema, pp. 166-181.



Patricia Haro es Docente Titular Auxiliar I en la Escuela Politécnica Nacional desde el año 2014 y se encuentra adscrita al Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. Fue Analista de Expansión en el Ministerio de Electricidad y Energía Renovable entre los años 2008 y 2014, a cargo de la supervisión de los proyectos Coca Codo Sinclair, Minas – San Francisco, Sopladora y Manduriacu. Actualmente se encuentra cursando su primer año de doctorado en la Universidad Politécnica de Cartagena en España.