



III CONGRESO NACIONAL DE RIEGO Y DRENAJE COMEII 2017

Puebla, Pue., del 28 al 30 de noviembre de 2017

DISEÑO DE UN AFORADOR VENTURI POR SIMILITUD DINÁMICA TIPO FROUDE

Mauro Íñiguez Covarrubias^{1*}, Waldo Ojeda Bustamante¹

¹Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Paseo Cuauhnáhuac No. 8532, Col. Progreso, Jiutepec Morelos, México. C.P. 62550.

mic@tlaloc.imta.mx - 777 327 3600 ext. 195 (*Autor de correspondencia)

Resumen

Cuantificar el gasto que pasa por los puntos de control o entrega de una red de conducción y distribución de una zona de riego utilizando una estructura aforadora, es necesario e inaplazable en la tecnificación de la irrigación en México. Seleccionar el mejor aforador y la instalación necesaria para las condiciones de trabajo de las zonas de riego, puede ser una tarea sencilla si el proyectista tiene las referencias documentales de diseño y operación de los distintos equipos disponibles. Para ampliar la elección en este trabajo se adiciona un aforador de energía mínima, tipo rectangular, resultado de utilizar similitud dinámica de Froude al escalar las dimensiones de un prototipo concebido en el laboratorio de la Secretaría de Recursos Hidráulicos, mismo que se compara con resultados derivados del software WinFlume, muy reconocido en el medio hidroagrícola. Con los criterios de comparación de acuerdo a estándares internacionales, se concluye que el aforador tipo Venturi resultante, representa convenientemente el fenómeno estudiado al escalarlo a las nuevas condiciones. Por lo que se recomienda utilizar este procedimiento para nuevos proyectos que demande diferente dimensionamiento. Tiene la ventaja adicional de no obstruir el recorrido del agua en el canal y no acumula sedimentos aguas arriba de la sección de control, al permanecer plano el fondo de la estructura. En la actualidad este equipo aforador no se usa en los distritos de riego de México a pesar de su aplicación potencial en varias redes hidráulicas del país. Se presenta su viabilidad de empleo como opción de innovación tecnológica que puede automatizarse y promover su uso en México.

Palabras clave adicionales: aforadores Venturi, semejanza de Froude, modelos hidráulicos



Introducción

Cuantificar el gasto que pasa por un punto de control sobre una red de conducción y distribución de un distrito de riego utilizando una estructura aforadora es necesario y urgente en los trabajos de tecnificación integral de la irrigación en México. La Infraestructura hidráulica de distribución y control que existe en los distritos de riego, define, cualitativa y cuantitativamente, la calidad de la operación y se puede agrupar en estructuras de: conducción (canales principales, laterales, sublaterales, etc.), estructuras de regulación (represas) y estructuras aforadoras (tomas para canales, tomas directas y estructuras aforadoras) (S.R.H., 1973).

En general las estructuras de extracción para canales laterales son compuertas de carga constante. Usualmente diseñados con tomas granjas controladas por una compuerta circular tipo "Miller" acoplada a un aforador entre otros, como los tipo Guamuchil, Celaya o Venturi. Para las tomas laterales o directas de los canales, se utilizaron recomendaciones hechas del laboratorio de la Secretaría de Recursos Hidráulicos. Se instalara el aforador de energía mínima tipo rectangular sólo con contracciones laterales.

Estas estructuras aforadoras presentan diferentes ventajas reflejadas en su desempeño hidráulico y operativo (S R H., 1973). Dichas estructuras se localizan en sitios donde existen las condiciones hidráulicas para asegurar su buen funcionamiento, además de garantizar el alcance de toda el área con total abastecimiento. Otra estructura aforadora de energía mínima son los aforadores llamados aquí en México de garganta larga (Figura 1), el control del tirante es sobre-elevando el fondo de la zona de control de la propia estructura (USDI, 1979). A pesar de su gran difusión en distritos de riego de México, este tipo de estructura ha tenido serios problemas en su operación, ya que se azolvan y son lugares propicios para producir maleza, al mantener remansada el agua obstruyendo el buen funcionamiento de la estructura, además de requerir mantenimiento frecuente sobre todo en canales no revestidos.



Figura 1. Vista del aforador de Garganta larga, instalado en El Carrizo, Sinaloa, México

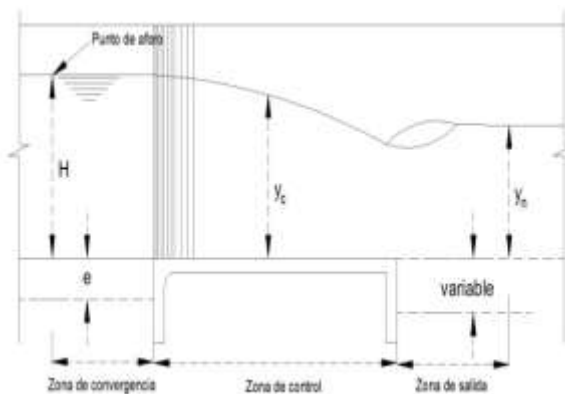


Figura 2. Vista longitudinal del aforador Venturi rectangular



Una alternativa a los aforadores de garganta larga son los aforadores tipo Venturi que se muestra en la Figura 2. Este tipo de aforadores se caracterizan por ser estructuras que utilizan el concepto de energía mínima, esto es para el gasto máximo.

Seleccionar el aforador e instalación para las condiciones de trabajo en los distritos de riego, puede ser una tarea sencilla si el proyectista tiene las referencias de diseño y operación de los distintos equipos utilizados. Para ampliar su elección, en este trabajo se analiza un aforador tipo Venturi, tipo rectangular, resultado de utilizar la similitud dinámica (Sotelo, 1979), herramienta en la mecánica de fluidos que al escalar las dimensiones de un prototipo experimental concebido en un laboratorio de hidráulica permita diseñar aforadores para diferentes dimensiones. Lo anterior permite ampliar las opciones disponibles de aforadores para caudales que usualmente se tienen en los puntos de control de las grandes zonas de riego.

Materiales y métodos

Descripción del aforador

Los componentes del equipo aforador Tipo Venturi para su buen funcionamiento se divide en cuatro zonas (Figura 2): a) zona o punto de aforo: tiene como función favorecer una distribución uniforme de las líneas de flujo dentro de la unidad, y con ello la velocidad de llegada a la zona de reducción; al inicio de esta zona se ubica la escala o el punto de nivel para el aforo, b) zona de contracción o convergencia: parte de la estructura en la cual se realiza el proceso de reducción del canal de entrada a la sección menor por acción del estrangulamiento, ya sea gradual o brusco, c) zona de control: conformada por un tramo de igual sección contraída a la entrada y salida, esta ampliación puede ser brusca o con transición, este punto es importante porque es aquí en donde normalmente puede existir una caída, esto de acuerdo a las condiciones aguas abajo y, d) zona de salida aguas abajo: constituida por un tramo recto con que conduce hacia la regadera o canal secundario.

La definición de la energía mínima específica (Chow 1959) indica la zona en donde se ubica el tirante crítico e inicia en cálculo del perfil. Las investigaciones para el tirante crítico están basadas en la ecuación 1.

$$\frac{dh}{dx} = \frac{S_0 - S_f + \frac{\alpha Q^2}{gA^3} \frac{\partial A}{\partial x}}{1 - \frac{\alpha Q^2 B}{gA^3}} \quad (1)$$

donde: H es la carga total aguas arriba del aforador invertido; d es la carga de flujo; V es la velocidad promedio en la sección ($V = Q/A$); Q gasto en m^3/s ; A es el área hidráulica de la sección de transversal; g es la aceleración de la gravedad.



Para la determinación del gasto por medio del tirante crítico es necesario tomar en cuenta los efectos de la capa límite, por lo que se puede tomar las recomendaciones reportadas por estándares internacionales como ISO. 4359 (2013).

Semejanza hidráulica

En la mecánica de fluidos se llama Semejanza hidráulica a la relación existente entre una magnitud física en el prototipo y el modelo expresada en las mismas unidades. El método de semejanza de Froude se utiliza cuando tenemos problemas con superficie libre donde las fuerzas predominantes son las gravitatorias, parámetro adimensional en mecánica de fluidos que relaciona las fuerzas de inercia con las fuerzas gravitatorias. Como ejemplos pueden tenerse los problemas de oleaje, canales, vertederos, resaltos, desagües, etc.

Supongamos que utilizamos λ para expresar la relación geométrica entre las dimensiones del prototipo L_p y del modelo L_m : El valor de λ es lo que constituye la relación de escala entre ambos. Si se utiliza una semejanza de Froude afirmándose que se asume que el monomio adimensional dado por la ecuación 2 permanece constante entre el prototipo y el modelo, cada una de las magnitudes físicas del problema se reproducirá en el modelo a través de su relación de escala. Si esta es una magnitud derivada, se puede a su vez expresar en función de las ecuaciones fundamentales. En un modelo se tiene una semejanza mecánica cuando se tiene a la vez, la semejanza geométrica, cinemática y dinámica, y el mismo número de froude. Por ejemplo el parámetro de semejanza λ para el caudal se muestra en la ecuación 2.

$$\lambda_Q = \frac{Q_p}{Q_m} = \frac{\frac{L_p^3}{t_p}}{\frac{L_m^3}{t_m}} = \frac{L_p^3 t_m}{L_m^3 t_p} = \frac{\lambda_L^3}{\lambda_t} \quad (2)$$

siendo λ la relación entre el tiempo utilizado en el prototipo y el modelo.

Propuesta de revisión del modelo y prototipo

a) En primer lugar, se da revisión del modelo de un aforador de energía mínima, es decir, se revisa el concebido en 1969 en el laboratorio de la antigua Secretaría de Recursos Hidráulicos (Maza y Zambrana, 1969). Se revisa el aforador rectangular tipo sólo con contracciones laterales para las 4 zonas, 1) Condiciones de punto de contacto, 2) Zona de contracción o convergencia, 3) Zona de control y 4) Zona de salida aguas abajo. Además se revisan las condiciones de dimensionamiento del radio de entrada, ancho de garganta en relación a B y por último la longitud total L, acuerdo a datos y gráfica del aforador concebido en el laboratorio de la S.R.H. Radio de entrada $R = (1/4 a 1) * b$, Ancho de garganta del Venturi es $b = (1/3 a 2/3) * B$ y la Longitud total de garganta igual a $L = 3b$.



b) Se aplica la semejanza hidráulica: en este apartado se presenta la metodología para escalar el modelo al prototipo deseado para requerimientos específicos. Es decir, se revisa el concebido en el laboratorio y las escalas utilizadas, sabiendo que ha de mantenerse el número de Froude, el valor de la gravedad y el fluido circulante (agua) tanto en el prototipo (p) como en el modelo (m), de acuerdo a la similitud de Froude, ecuación (2). Se obtiene lambda y se realiza el escalado cada una de las longitudes de ancho, carga y gasto.

c) Los valores tanto del modelo como del prototipo resultante del Venturi son base para realizar el ejercicio de revisión en el software reconocido en el medio tecnológico, WinFlume.

d) Por último, se comparan los resultados y al mismo tiempo se señalan las deficiencias que se tiene del diseño original.

Análisis y discusión de resultados

a) Del aforador en revisión concebido en 1969 en el laboratorio de la Secretaría de Recursos Hidráulicos. El ancho de garganta $b = 45 \text{ cm}$, longitud total de garganta, $L = 135 \text{ cm}$. La condición del ancho del canal aguas arriba está entre $B = 68 \text{ a } 135 \text{ cm}$, El gasto mínimo y máximo fue de 60.0 y 324.2 lps, los valores que relaciona carga-gasto se muestra en la Tabla 1 y la gráfica relación carga-gasto en la Figura 3.

Modelo S.R.H			Figura 3. Curva relación carga-gasto
Base (cm)	H (cm)	Q (lps)	
45	18.0	60.0	<p style="text-align: center;"> $H_{P_{carga}} = 1.9638 Q^{1.4298}$ $R^2_{P_{carga}} = 0.9998$ </p>
45	20.3	70.0	
45	22.5	82.0	
45	24.4	95.0	
45	27.0	107.5	
45	29.2	119.0	
45	31.5	133.0	
45	33.8	145.0	
45	36.0	160.0	
45	38.2	175.0	
45	40.5	190.0	
45	42.7	205.0	
45	45.0	220.0	
45	47.1	236.0	
45	49.3	255.0	
45	51.5	270.0	
45	54.0	287.0	
45	56.2	305.0	
45	58.5	322.5	
45	60.7	340.0	
45	62.8	358.0	
45	65.2	377.0	

Tabla 1. Datos y gráfica del aforador concebido en 1969 en el laboratorio de la S. R. H.



Se cumple la longitud total de garganta igual a $L=3b$ y el radio de entrada se conserva $R=(1/4 a 1)*b$, señalando que el ancho de la entrada respecto al ancho de garganta del Venturi es $b=(1/3 a 2/3)*B$. Esta norma del diseño según propuesta requiere una caída al terminar la longitud de la garganta o que las condiciones aguas abajo $y_n/H \leq 0.7$. En el diseño no se encontró lo referente a la ubicación del punto de afora en relación a la entrada de la estructura.

b) Para ensayar el Venturi de un canal se quiere construir un modelo a escala no conocida, donde el rango de caudales en el modelo tiene como gasto máximo $Q_{maxm} = 377 \text{ litros}$ y un mínimo de $Q_{maxm} = 60 \text{ litros}$. Se obtiene además la rugosidad que debe tener el material del modelo para conservar el número de Manning si este es de 0,014 en el prototipo. Las escalas utilizadas, sabiendo que ha de mantenerse el numero de Froude, el valor de la gravedad y el fluido circulante (agua) tanto en el prototipo (p) como en el modelo (m), son de acuerdo a la similitud de froude, ecuación $Q_p/Q_m = 2037_p/377_m = \sqrt{\lambda^5}$, por lo que de la ecuación de lambda es igual a $\lambda = 1.9636$: Se obtiene lambda y se realiza el escalando cada una de las longitudes de ancho b base=88.4 cm, carga $H_{carga} = 35.3 \text{ cm}$. Como se observa en esta etapa se ha logrado integrar en una función conjunta las variables Escalando cada una de las longitudes de ancho. carga y gasto se tiene la siguiente resultados en la tabla 2y la relación carga-gasto en la Figura 4.

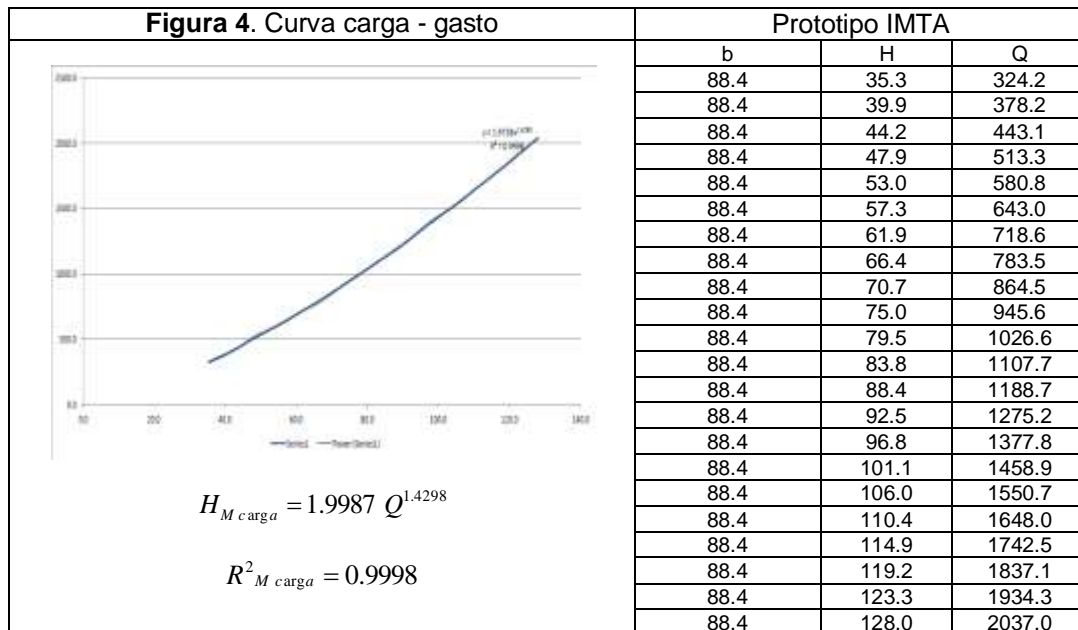


Tabla 2. Datos y gráfica del aforador escalado 1: 9636 al del laboratorio de la S. R. H

c) Estos valores resultantes de Venturi son base para realizar el ejercicio en el software del WinFlume, en donde se validó. Es preciso comentar que en este ejercicio el software no tiene la opción de la forma de entrada alabeada. Al compararse las dos curvas que relacionan escala-gasto son prácticamente las



mismas, es aquí en donde se puede determinar la longitud de la Zona o punto de aforo encontrándose $L_1 = 3 H$ aguas arriba del inicio de la estructura. En la figura 5 se muestra el empleo de la instrumentación con equipo electrónico ya que actualmente este equipo para el aforador es insulso. En los distritos de riego ya existe este tipo de instrumentación.



Figura 5. Modelo del aforador Venturi rectangular equipado

Conclusiones

Con los criterios de comparación, incluyendo los del ISO 4359 (2013), se concluye que el Venturi resultante representa el fenómeno estudiado convenientemente al escalarlo, por lo que se recomienda utilizar este procedimiento para otras dimensiones, se tiene la ventaja adicional de no obstruir el recorrido del agua en el canal y no acumular sedimentos aguas arriba al permanecer plano el fondo de la zona de control de la estructura.

Esta norma del diseño requiere como opción una caída al terminar la longitud de la garganta o que las condiciones aguas abajo permitan la condición en donde: $y_n/H \leq 0.6$.

Se termina el problema de los sedimentos. No existe más, al corto tiempo, el mantenimiento especial y no existirá más sitios propicios para la maleza.

En la actualidad no hay equipo aforador de este tipo instalado en los distritos de riego, lo que alguna vez existió en la versión de modelo, por lo que el fin último de este escrito es mostrar viabilidad de innovación y comprobar su funcionamiento al escalarlo, al mismo tiempo promover su utilización en México.



Referencias Bibliográficas

- Chow, V. T. (1959). *Open channel hydraulics*, McGraw-Hill, New York
- ISO. (1983). "Liquid flow measurement in open channel: Rectangular, trapezoidal and U-shaped flumes." ISO 4359, Geneva.
- ISO. (2013). "Liquid flow measurement in open channel: Rectangular, trapezoidal and U-shaped flumes." ISO 4359, Geneva.
- Maza Á. J.A. y Zambrana P. W. (1969), "Aforador Venturi de gasto constante" Ingeniería hidráulica en México, vol. XXIII (2).
- Paine, J. N. (1992). "Open-channel flow algorithm in Newton-Raphson form." J. Irrig. Drain. Eng., 118(2), 306–319.
- Sotelo, A, G. (1979). *Hidráulica general*, Limusa, México D. F.
- S R H. (1973). *Proyecto de Zonas de Riego*. Secretaria de Recursos Hidráulicos. Dirección de Proyectos de Grande Irrigación, México, D. F.
- USBR (U.S. Bureau of Reclamation), *User's Manual For the Winflume* (Version 1.05.0029), http://www.usbr.gov/pmts/hydraulics_lab/winflume/index.html, (2007).
- USDI (U.S. Department of Interior), *Water Measurement Manual*, Bureau of reclamation Third edition, U.S. Govern printing office, Denver, 1979.
- Webber, N. B., *Fluid Mechanics for Civil Engineers*, Primera edición, Chapam and Hall, 1971, 330 pp.
- White, F. M. (2007). *Fluid mechanics*, McGraw-Hill, New York.