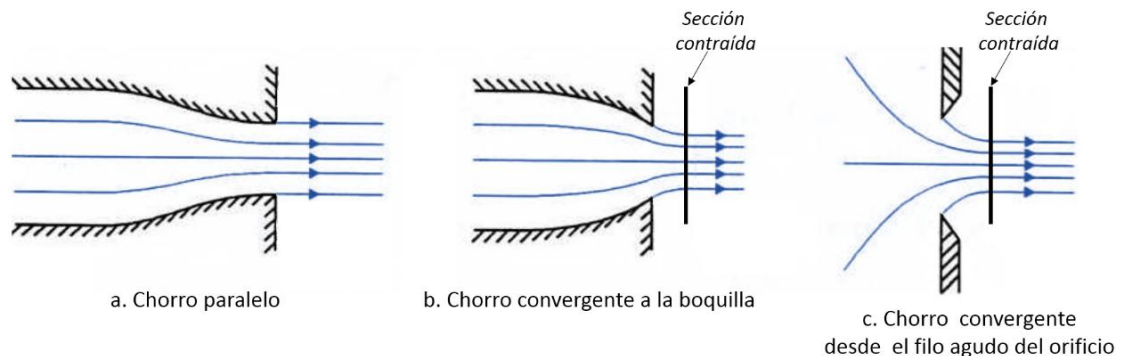


FLUJO A TRAVÉS DE ORIFICIOS

I.1. INTRODUCCIÓN



Adaptado de: Markland, E. (1994) "A first course in Hydraulics"

Fig. 1 Ejemplos de flujo de chorro en boquillas y orificios

En la Fig. 1(a) se visualizan corrientes de flujo a través de una boquilla de contracción suave la cual produce un chorro paralelo. El incremento en la velocidad a través de la contracción reduce el efecto de cualquier no-uniformidad que pueda existir en el flujo de aproximación, por tanto, es razonable asumir que la velocidad del fluido es uniforme a través del chorro emergente. Puesto que la sección transversal del chorro es la misma que la de la boquilla, el caudal se puede obtener multiplicando el área de la boquilla por la velocidad del chorro (MARKLAND, 1994). Sin embargo, en las Figs. 1(b) y 1(c) el fluido no emerge de modo paralelo, así que el área de la sección transversal del chorro se reduce a la llamada sección contraída o vena contraída. En esta sección las corrientes de flujo son paralelas (GÜNEL, 2010, p2). Además, la velocidad es uniforme sobre la sección contraída. La tasa de flujo se puede obtener multiplicando el área de la sección contraída por la velocidad del fluido sobre él.

En cada uno de estos tres ejemplos, el flujo emergente se muestra como un chorro libre, es decir, un chorro que no se mezcla con fluidos circundantes. Este es el caso, por ejemplo, para un chorro de agua emergiendo en el aire. Tal chorro suele conservar su identidad para una distancia considerable antes de que los disturbios causen su rotura, particularmente si el flujo de aproximación está libre de turbulencia (GÜNEL, 2010, p3). Sin embargo, si el flujo se mezcla con fluido circundante, el resultado es un chorro sumergido. Tal chorro normalmente llega a ser turbulento para una distancia corta debajo de la corriente de la sección contraída.

I.2.OBJETIVO

- Estudiar el comportamiento de la salida de un fluido por un orificio
- Determinar los coeficientes de descarga, velocidad y contracción
- Comprobar la relación $C_d = C_v * C_c$
- Determinar el porcentaje de error de los coeficientes para las diferentes cabezas hidráulicas

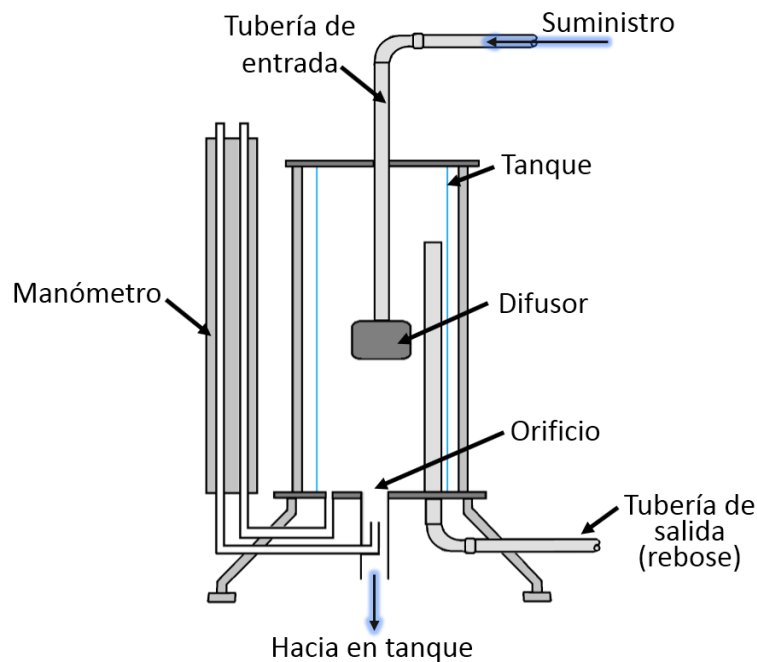
I.3.EQUIPO

H4 Flow through an Orifice, hydraulic bench H1, chronometer, thermometer.



Adaptado de: http://www.tecquipment.com/Datasheets/H4_1110.pdf

Fig. 2 Equipo para visualizar el flujo a través de un orificio



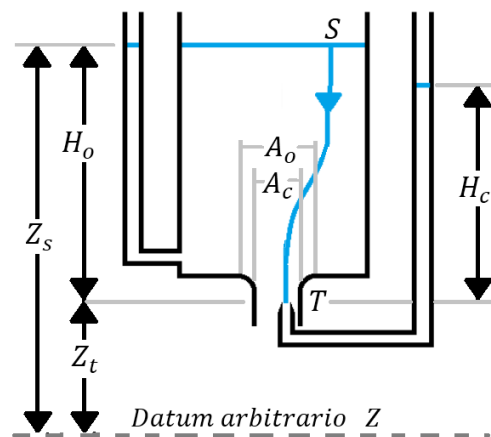
Fuente: Markland, E. (1994) "A first course in Hydraulics"

Fig. 3 Montaje de laboratorio

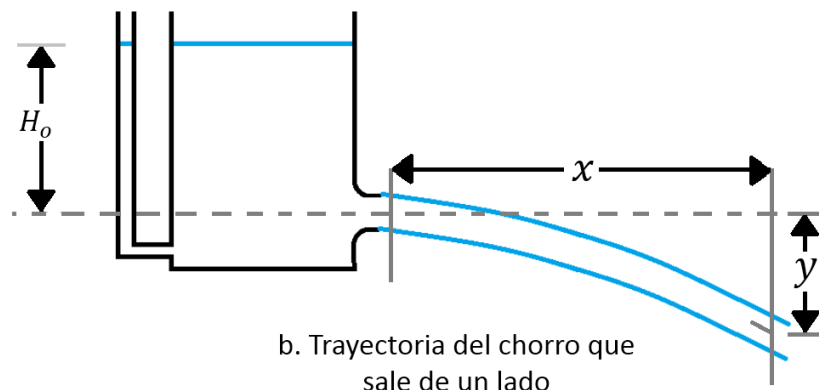
La Fig. 3 representa el montaje de laboratorio en el cual el tanque de agua se alimenta de la válvula de suministro a través de un tubo vertical ajustable, el cuál termina en un difusor justo bajo la superficie del agua. Por un tubo de drenaje sale el agua excedente del tanque. El orificio o boquilla bajo prueba está ajustado a la base del tanque, y el chorro emergente pasa al banco volumétrico. El ajuste del orificio es tal que no existe desnivel a lo largo de la superficie de entrada del tanque. Hay un grifo en la base el cual se conecta con un tubo manométrico montado en frente de una escala vertical, mostrando el nivel del agua en el tanque (GÜNEL, 2010, p2). Un segundo tubo manométrico se conecta a un tubo de Pitot, el cual se introduce dentro del chorro de descarga para medir la cabeza (carga) total. El diámetro del chorro se mide con una hoja afilada apoyada en el tubo de Pitot de un lado del chorro al otro. El Pitot puede atravesar el chorro girando la tuerca graduada que funciona a lo largo de un tornillo de posicionamiento de 1mm de graduación, es decir cada revolución completa de la tuerca mueve el tubo de Pitot una distancia de 1mm. El diámetro del chorro puede ser así medido atravesando la hoja cortante apoyada en el tubo de pitot de un lado del chorro al otro (GÜNEL, 2010, p3).

También, el montaje tiene una salida adicional en el lado del tanque, para así montar el orificio en el plano vertical. El chorro emerge entonces horizontalmente. Un engranaje de atravesamiento es proporcionado para medir la forma de la trayectoria del chorro, de la cual se puede encontrar la componente horizontal de la velocidad (MARKLAND, 1994).

I.4. MARCO TEÓRICO



a. Flujo a través del orificio en la base del tanque



b. Trayectoria del chorro que sale de un lado

Adaptado de: Markland, E. (1994) "A first course in Hydraulics"

Fig. 4 Diagramas de notación

La Fig. 4a representa las características del flujo a través de un orificio o boquilla en la base de un tanque. H_o corresponde a la altura del agua sobre el

plano de la sección contraída indicada por el nivel del agua en un tubo piezométrico, el cual se conecta a la base o pared del tanque en cualquier parte donde la velocidad del flujo sea insignificante. Una corriente típica de flujo corre desde cualquier punto S en la superficie al punto T de la sección contraída (GÜNEL, 2010, p4). De acuerdo con el teorema de Bernoulli en ausencia de pérdidas a lo largo de la línea de corriente, la cabeza total es constante de S a T, así:

$$\frac{u_s^2}{2g} + \frac{P_s}{\gamma} + Z_s = \frac{u_t^2}{2g} + \frac{P_t}{\gamma} + Z_t$$

Si el área de la superficie del tanque es mucho mayor que la del orificio, entonces u_s , se puede despreciar. De igual forma, ya que la presión es la atmosférica en S y T, $P_s = P_t$. Por tanto,

$$Z_s - Z_t = H_o$$

Sustituyendo en la ecuación de Bernoulli se encuentra la velocidad u_t en T como:

$$u_t = \sqrt{2gH_o}$$

Esta velocidad corresponde a la velocidad ideal en T sobre la base de una cabeza total constante a lo largo de la línea de corriente. Igual resultado aplica para todas las líneas de corriente del flujo, por tanto si u_o indica esta velocidad ideal, se tiene:

$$u_o = \sqrt{2gH_o} \quad (1)$$

La velocidad u_o en la sección contraída se puede ver como la que es adquirida por un cuerpo cayendo bajo la acción de la gravedad a través de una distancia H_o .

Este resultado se refiere a menudo como el teorema de Torricelli (MARKLAND, 1994).

Debido a que se tiene pérdida de altura total, la velocidad real u_c en la sección contraída es menor que la ideal. Un tubo de Pitot instalado en la corriente de la sección contraída registrará un valor H_c , un tanto menor que H_0 como se indica en la Fig. 4a. La velocidad real u_c está dada en términos de H_c por:

$$u_c = \sqrt{2gH_c} \quad (2)$$

Si se asume para simplificar que u_c es uniforme sobre la sección transversal de la sección contraída, se puede definir un coeficiente de velocidad C_u como la relación entre la velocidad real u_c y la velocidad ideal u_o , es decir:

$$C_u = u_c/u_o = \sqrt{H_c/H_0} \quad (3)$$

De forma similar, el coeficiente de contracción C_c se define como la relación entre el área contraída A_c y el área del orificio A_o :

$$C_c = A_c/A_o \quad (4)$$

Finalmente, el coeficiente de descarga C_d se define como la relación entre la descarga real y la descarga ideal Q_o , la cual puede ser tomada como si el chorro descargara a la velocidad ideal sin reducción de área (GÜNEL, 2010, p5). La descarga real Q es:

$$Q = u_c \cdot A_c \quad (5)$$

Si el chorro descarga a la velocidad ideal u_o sobre el área del orificio A_o la descarga ideal Q_o debe ser:

$$Q_o = u_o \cdot A_o = u_c = \sqrt{2gH_o} \cdot A_o \quad (6)$$

Por tanto, el coeficiente de descarga se puede escribir como:

$$C_d = Q/Q_o = Q/\sqrt{2gH_o} \cdot A_o \quad (7)$$

Sustituyendo Q en (5) y Q_o en (6) se tiene:

$$C_d = u_c \cdot A_c/u_o \cdot A_o$$

Y utilizando las ecuaciones (3) y (4) se tiene que:

$$C_d = C_u \cdot C_c \quad (8)$$

Esta ecuación representa el caudal de descarga reducido de su valor ideal en la relación C_d por dos influencias: la viscosidad del fluido reduce la velocidad de su valor ideal en la relación C_u , y el área efectiva de la sección transversal de flujo en la sección contraída es menor que en el orificio en la relación C_c . Este corresponde al producto de estos dos efectos los cuales conducen a la reducción del flujo en la relación C_d . En el experimento descrito más adelante los valores de cada uno de los tres coeficientes son medidos independientemente (GÜNEL, 2010, p5).

Otra forma de encontrar la velocidad en la sección contraída es como se indica en la Fig. 4b, en vez de utilizar un tubo de Pitot para encontrar u_c se utiliza la forma de la trayectoria del chorro. El orificio o boquilla es colocado en

el lado vertical del tanque, así el chorro emerge en una dirección perfectamente horizontal (MARKLAND, 1994). Se mide la distancia horizontal x y la distancia vertical y (medida hacia abajo) de la línea central del chorro desde el punto central de la sección contraída. Asumiendo que la componente horizontal de la velocidad del chorro permanece constante, entonces la distancia horizontal cubierta en el tiempo t es:

$$x = u_c \cdot t$$

La distancia vertical cubierta a la vez como consecuencia de la acción de la gravedad es:

$$y = g \cdot t^2 / 2$$

Eliminando t de estas dos ecuaciones anteriores:

$$u_c = \sqrt{gx^2/2y} \quad (9)$$

Esta ecuación puede ser utilizada para determinar u_c de un grupo de mediciones de x y y . Por otra parte, las mediciones pueden ser utilizadas para establecer el valor de C_u de la siguiente forma:

$$u_c = C_u u_o = C_u \cdot \sqrt{2gH_o}$$

Y esto conduce a la siguiente ecuación:

$$C_u = \sqrt{x^2/4H_o y} \quad (10)$$

I.5.PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

El experimento es dividido en dos partes. Primero, los valores de C_{ur} , C_{cr} y C_d son encontrados para un único valor de H_o . Luego la descarga Q se mide para un número diferente de valores de H_o .

El equipo es colocado en el banco y nivelado de tal forma que la base del tanque este horizontal; con el orificio en la base posicionado tal que descargue directamente dentro del tanque de medición. El tubo de suministro flexible de la válvula de control del banco se conecta al tubo de entrada del aparato. Para obtener mediciones lo más uniformes posibles, este tubo debe estar colocado tal que el difusor quede sumergido. El resobe del tanque está en la parte superior. Se debe tomar el diámetro del orificio o boquilla (HERNÁNDEZ, 2010, p77).

En la primera parte del experimento, el agua entra al tanque hasta que se llene a la altura del tubo de rebose. El caudal de entrada se regula hasta obtener una descarga uniforme en el rebose, garantizando así que el nivel en el tanque permanezca constante mientras se hacen las mediciones. Para medir C_d , se determina el caudal de agua en el tanque de medida y se anota la cabeza H_o sobre la sección contraída. Para medir C_{ur} , el tubo de Pitot es insertado en el chorro en la sección contraída y se toman los valores tanto para la altura de cabeza del Pitot H_c como la cabeza H_o . Para medir C_{cr} , es necesario medir el diámetro del chorro en la sección contraída; esto se hace fijando la cuchilla cortante al tubo de Pitot y dejando el plano de la cuchilla normal a la dirección de la sección transversal del tubo. La cuchilla es llevada a cada lado del chorro en el nivel de la sección contraída y se toman las lecturas en cada una de las posiciones con la tuerca graduada, por medio de la diferencia de estas lecturas se obtiene el diámetro del chorro.

Otra forma de obtener C_u es por medio de la medición de las coordenadas x y y del chorro como se aprecia en la figura 4(b), tomando especial cuidado en garantizar que el orificio se encuentre en un plano vertical.

La segunda parte del experimento consiste en reducir el caudal de entrada por etapas, y así obtener un conjunto de valores de H_o y las correspondientes descargas Q . Se debe tener especial cuidado en permitir que el nivel en el tanque se establezca en un valor constante en cada cambio del caudal de entrada. Es conveniente tomar varias lecturas de H_o mientras se descarga el flujo y tomar el valor como una media de estos valores. Unas 8 lecturas para diferentes caudales son suficientes para establecer la relación entre Q y H_o .

I.6.RESULTADOS Y CÁLCULOS

Las mediciones de descargas para varias alturas se registran en la Tabla 1 y la Fig. 5. De acuerdo con la ecuación (7) la variación de Q con $H_o^{1/2}$ debe ser lineal siempre que C_d permanezca constante en el rango del experimento. La Fig. 5 muestra como esto es cierto dentro de los límites de error del experimento y permite el cálculo de C_d por medio de la ecuación (7) como sigue:

La pendiente de la gráfica, en unidades de metro-segundo, es

$$Q/\sqrt{H_o} = 3.70 \times 10^{-4}$$

Sustituyendo este valor en la ecuación (7) se obtiene

$$C_d = \frac{Q}{\sqrt{2gH_o} \cdot A_o} = \frac{Q}{\sqrt{H_o}} \cdot \frac{1}{\sqrt{2g} \cdot A_o} = \frac{3.70 \times 10^{-4}}{\sqrt{2 \times 9.81 \times 1.327 \times 10^{-4}}} = 0.629 \approx 0.63$$

Tabla 1 Mediciones de H_o y Q para el orificio
(Prueba con una gama de cabezales)

Q_{ty} (kg)	t (s)	H_o (mm)	$10^{-4}Q$ (m^3/s)	$H_o^{1/2}$ ($m^{1/2}$)
15	65.8	372.5	2.28	0.610
15	70.9	347.0	2.12	0.589
15	75.1	308.5	2.00	0.555
15	79.0	275.5	1.90	0.525
15	83.5	243.0	1.80	0.493
15	89.1	210.0	1.68	0.458
15	94.7	186.0	1.58	0.431
15	105.4	145.0	1.42	0.381

Fuente: Markland, E. (1994) "A first course in Hydraulics"
Fig. 5 Variación de Q con H_o para el flujo a través del orificio

Tipo de orificio: borde afilado

Prueba con cabeza constante

Diámetro del orificio	D_o	13.00 mm
Área de la sección transversal del orificio	A_o	$1.327 \times 10^{-4} m^2$
Cabeza sobre la sección contraída	H_o	372.5 mm
Tiempo para recolectar 15 kg de agua		65.8 s
Tasa de descarga	$Q = \frac{15 \times 10^{-3}}{65.8}$	$= 2.28 \times 10^{-4} m^3/s$
Lectura del tubo Pitot	H_c	371.5 mm
Diámetro del chorro: 10.45 vueltas del micrómetro		
1 mm equivale a una vuelta del micrómetro	D_c	10.45 mm
Coeficiente de descarga		

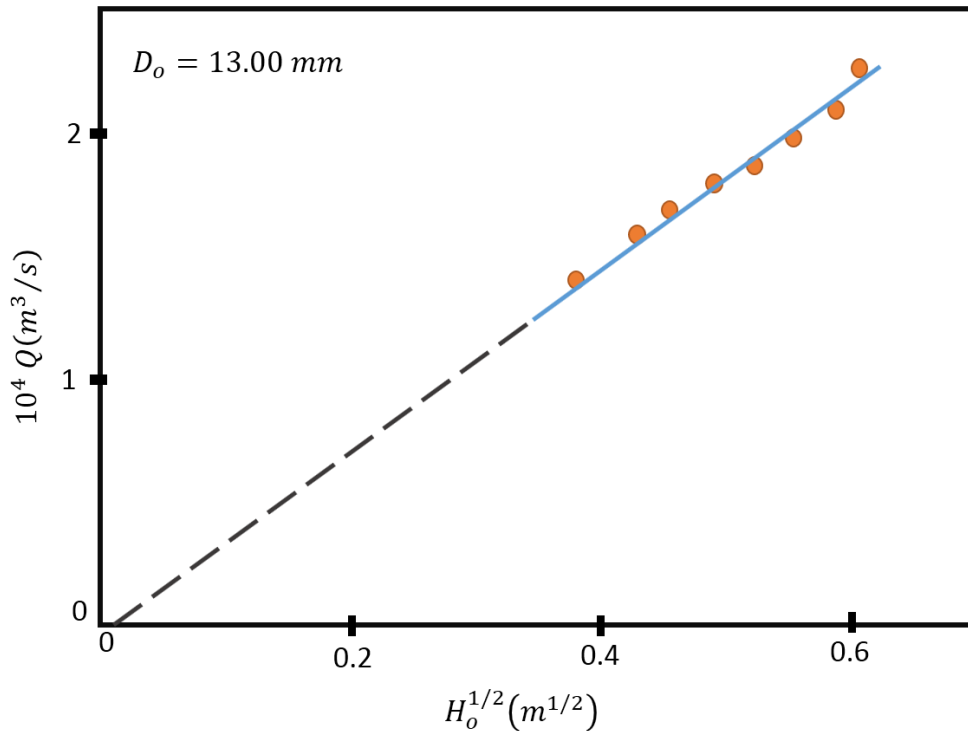
$$C_d = \frac{Q}{\sqrt{2gH_o} \cdot A_o} = \frac{2.28 \times 10^{-4}}{\sqrt{2 \times 9.81 \times 0.3725} \cdot 1.327 \times 10^{-4}} = 0.635 \approx 0.64$$

Coeficiente de velocidad

$$C_u = \sqrt{H_c/H_o} = \sqrt{371.5/372.5} = 0.999 \approx 1.00$$

Coefficiente de contracción

$$C_c = A_c/A_o = (10.45/13.00)^2 = 0.646 \approx 0.65$$



Fuente: Markland, E. (1994) "A first course in Hydraulics"

Fig. 5 Variación de Q con H_o para el flujo a través del orificio

I.6.1. Cuestiones de discusión

1. Determine C_{d1} , C_{u1} , C_c experimentalmente.
2. Grafique Q vs $H_o^{1/2}$. Determine C_d a partir de esta gráfica y de la ec. (7)
3. Comente, analice y concluya acerca de los datos, resultados y gráficos obtenidos en el experimento.
4. ¿Qué sugerencias tiene para mejorar el aparato?
5. Si la gráfica de Q vs $H_o^{1/2}$ parece no pasar por el origen, ¿Cuál es la razón

para que esto suceda? ¿Cómo se podría afectar el valor de C_d obtenido de la gráfica?

6. Se asume que el tamaño del tanque es lo suficientemente grande como para que se pueda despreciar la velocidad del flujo hacia el orificio. ¿Es justificado esto? Si por ejemplo el área transversal del tanque fuera $4 \times 10^{-2} m^2$, ¿cuál es la velocidad media de aproximación cuando el caudal de descarga es $2 \times 10^{-4} m^3/s$? ¿Cuál es la altura de velocidad correspondiente a esta velocidad y es significativa en relación a los valores típicos de H_o utilizados en la prueba? ($5 mm/s, 1.3 \times 10^{-3} mm$)

7. Suponga que no es posible medir el diámetro del chorro en la sección contraída, pero que el diámetro fue medido en algún punto bajo ella ¿se verían afectados los resultados? Si es así, estimar el cambio en el diámetro del chorro al caer a un plano que se extiende $20 mm$ por debajo de la sección de contraída.

8. Suponga que el tanque estuviera completamente lleno y el orificio temporalmente obstruido, y por consiguiente el suministro de agua cortado. Cuando las condiciones en el tanque se normalizan el orificio se destapa repentinamente, permitiendo así que el nivel del agua en el tanque caiga constantemente mientras el agua drena por el orificio. Demuestre que el tiempo T requerido para que el nivel del agua caiga de H_1 a H_2 esta dado por:

$$T = \frac{2A_t}{C_d \cdot A_o \sqrt{2g}} \cdot \{\sqrt{H_1} - \sqrt{H_2}\}$$

Donde A_t corresponde al área de la superficie del agua en el tanque. Diseñe y lleve a cabo un experimento para encontrar el valor de C_d utilizando esta ecuación, compare los resultados con los obtenidos por los otros métodos usados.

I.7. BIBLIOGRAFÍA

MARKLAND, E. (1994) "A first course in Hydraulics" by Emeritus Professor E. Markland, Published by TecQuipment Limited, 1994. Recuperado de: http://csserver.evansville.edu/~tipton/images/coursework/2011_Spring_ME360/TecQuipment_F2_Workbook1978.pdf. Fecha de recuperación: 1 de Agosto de 2013.

PÉREZ R., H. (2011) "Guías para prácticas de laboratorio mecánica de fluidos", Flujo a través de un orificio, versión 2, Facultad de Ingeniería Ambiental, Universidad Santo Tomás.

GÜNEL O. (2010), Experimental Aerodynamics flow through an orifice lab sheet (2010), Middle East Technical University, Recuperado de: http://www.ae.metu.edu.tr/~ae547/lab13/Lab9_manual.pdf. Fecha de recuperación: 1 de Agosto de 2013.

HERNÁNDEZ N. (2010), Guías de laboratorio de hidráulica I. Universidad Nacional de Ingeniería, Nicaragua. Recuperado de: http://www.ftc.uni.edu.ni/pdf/guias_laboratorio/hidraulica.pdf. Fecha de recuperación: 1 de Agosto de 2013.