

Manual de laboratorio de simulación computacional

Práctica N°7: Análisis de Una Compuerta de Descarga Libre, Plana y Vertical

Fuente del recurso: Ejemplo adaptado del libro Hidráulica de Canales (Villón, 1995), por el estudiante UIS Eliel David Malaver Nieto, en el desarrollo de su trabajo de grado

1. Objetivos de la simulación

- ✓ Comprender los conceptos de las compuertas de admisión inferior en canales abiertos, mediante la implementación de una simulación en la herramienta computacional H-Canales
- ✓ Aplicar los conceptos adquiridos sobre las compuertas de admisión inferior, mediante el desarrollo de un ejemplo orientador utilizando el programa H-Canales
- ✓ Evaluar y fortalecer la comprensión de los conceptos de las compuertas de admisión inferior en canales abiertos, a través de la resolución de preguntas orientadoras que involucren la aplicación de los conocimientos teóricos en situaciones prácticas simuladas con la herramienta H-Canales

2. Requerimientos para la simulación

- ✓ Sistema operativo Windows
- ✓ Seguir el manual de instrucciones para descargar e instalar el programa H-Canales
- ✓ Preferiblemente poseer la versión 3 del programa H-Canales

3. Introducción

En el ámbito de la gestión de flujo en los canales, es necesario regularlo mediante estructuras hidráulicas con el fin de cumplir diversos objetivos, como el control económico del recurso hídrico o la ejecución de tareas de mantenimiento. Dentro de estas estructuras, se encuentra la compuerta de admisión, la cual se compone de placas móviles, planas o curvas, que permiten modificar el flujo natural del agua al crear una abertura debajo de ellas.

Es importante destacar que estas compuertas constituyen un obstáculo para el flujo, ocasionando un estancamiento de estas aguas arriba de la compuerta. Dicha acción implica que la fuerza del fluido ejerza presión sobre la compuerta y las paredes del canal. Además, la presencia de una compuerta en un canal causará que las condiciones hidráulicas del flujo se vean alteradas, aguas arriba y abajo de esta estructura hidráulica.

Mediante esta práctica de laboratorio, se busca que los estudiantes desarrollen una base sólida y adquieran nociones fundamentales para abordar el estudio de las estructuras hidráulicas. Asimismo, se espera que adquieran habilidades analíticas y comprensión del comportamiento de las compuertas de admisión inferior, a través de la simulación y la aplicación de conceptos teóricos en el campo de la hidráulica.

Para cumplir este propósito, se llevará a cabo un ejercicio de simulación para calcular el valor del caudal que fluye por debajo de una compuerta de admisión inferior, haciendo uso del software H-Canales y considerando aspectos teóricos relevantes asociados a esta simulación. Mediante este ejercicio y la resolución de preguntas orientadoras, se espera brindar al estudiante nociones básicas sobre la compuerta de admisión inferior, en descarga libre, de forma plana y ubicación vertical.

4. Marco teórico

4.1 Compuerta de admisión

Las compuertas son placas móviles, planas o curvas, que al ser elevadas, forman una abertura entre su borde inferior y la estructura hidráulica (presa, canal, etc.), permitiendo así controlar el caudal presente en el flujo. Estos elementos desempeñan un papel crucial en la regulación de caudales y en situaciones emergencia para el cierre temporal de otras estructuras con fines de mantenimiento (Marbello, 2005). Por lo general, la abertura se localiza entre el fondo del canal y el borde inferior de la compuerta, por lo que su ancho coincide con el del canal correspondiente. El flujo en un canal cuando se dirige de forma perpendicular a la compuerta una vez esta es instalada en su posición (Villón, 1995). La *Figura 1* ilustra ejemplos representativos de diversos tipos de compuertas y el comportamiento hidráulico asociado a cada una de ellas.

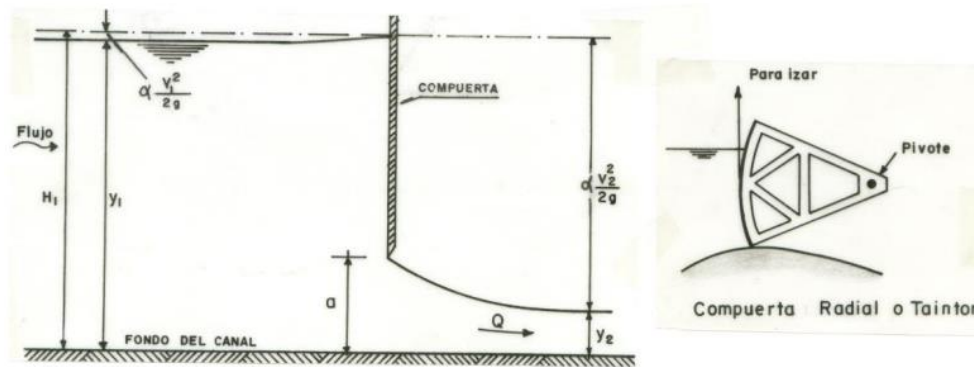


Figura 1 Flujo a través de una compuerta plana y una compuerta radial (Marbello, 2005)

4.2 Clasificación de las compuertas

La selección adecuada del tipo y tamaño de las compuertas se basa en una evaluación apropiada de las condiciones físicas, hidráulicas, climáticas y de operación. Estas compuertas se diseñan con una variedad de características en su funcionamiento y mecanismo de elevación, lo que permite clasificarlas en grupos generales según su tipología (Marbello, 2005):

✓ Según las condiciones del flujo aguas abajo

En la *Figura 2* se observa una representación de la clasificación de las compuertas teniendo en cuenta la condición del flujo aguas abajo. Según esta característica, las compuertas se clasifican así:

- **Compuertas de descarga libre:** son aquellas en las que el flujo supercrítico saliente de la parte inferior de la compuerta está abierto a la atmósfera y no está cubierto o sumergido en agua. Como se muestra en la *Figura 2*, en la zona izquierda.
- **Compuertas con descarga sumergida o ahogada:** se dice que una compuerta de descarga es sumergida, cuando la altura y_3 que es producida por un control hidráulico aguas abajo (*Figura 2*),

se acerca tanto a la compuerta que ahoga la salida del flujo por la abertura de la compuerta que ocasiona variaciones en las condiciones del flujo saliente por la compuerta y aguas arriba de esta.

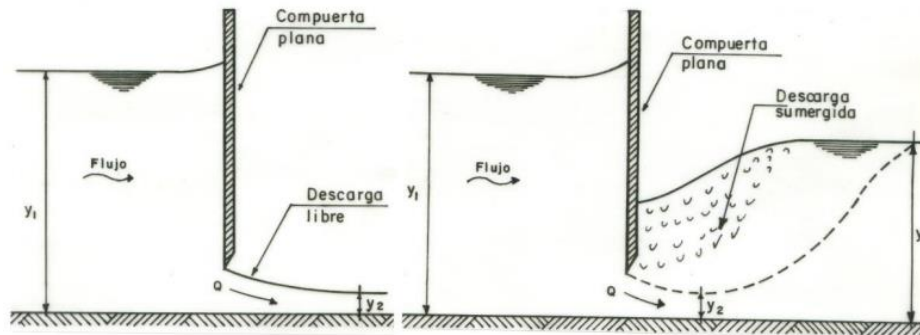


Figura 2 Tipos de descargas en compuertas (Marbello, 2005)

✓ **Según el tipo de operación y funcionamiento**

- Compuertas principales:
 - De regulación
 - De guarda o cierre
- Compuertas de emergencia

✓ **De acuerdo con sus características geométricas**

- Compuertas planas:
 - Rectangulares
 - Cuadradas
 - Circulares
 - Triangulares, etc.
- Compuertas curvas o alabeadas:
 - Radiales
 - Tambor
 - Cilíndricas

✓ **Según el mecanismo de izado o elevación:**

- Compuertas deslizantes
- Compuertas rodantes

4.3 Ecuaciones para el flujo a través de compuertas planas

Para deducir una expresión que permita determinar el caudal que fluye a través de una compuerta plana, considere el caso más general de una compuerta plana, inclinada un ángulo θ respecto a la horizontal, y ancho B igual al ancho del canal como se muestra en la *Figura 3* (Marbello, 2005).

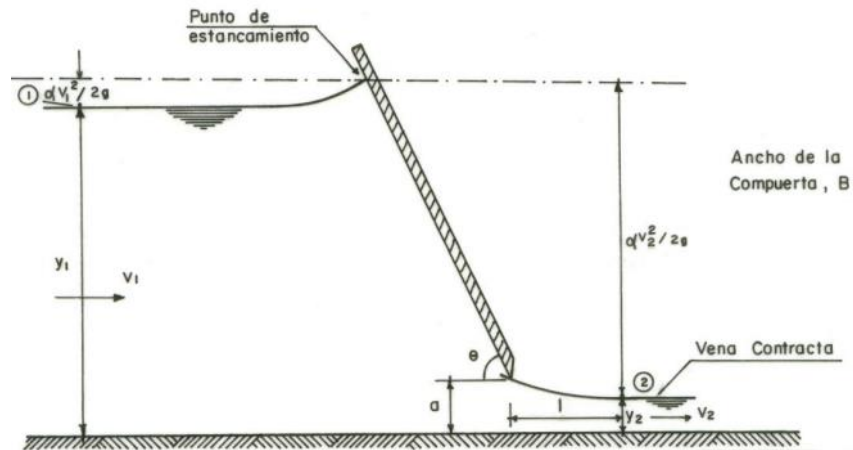


Figura 3 Flujo a través de una compuerta plana inclinada (Marbello, 2005)

El flujo a través la abertura formada entre el labio inferior de la compuerta y el fondo del canal puede considerarse bidimensional. Nótese que la descarga supercrítica bajo la compuerta reduce progresivamente su profundidad a lo largo de una corta distancia l , aguas abajo, hasta una sección en donde la contracción del chorro es completa, llamada **vena contracta** (Marbello, 2005).

La profundidad del flujo en la vena contracta y_2 , se relaciona con la abertura a , por medio del coeficiente de **contracción** C_c , así:

$$C_c = \frac{y_2}{a} \quad (1)$$

De donde:

$$y_2 = aC_c \quad (2)$$

Para compuertas verticales se ha comprobado que:

$$l = \frac{a}{C_c} \quad (3)$$

Reemplazando (1) en (3) se tiene:

$$l = \frac{a}{\frac{y_2}{a}} = \frac{a^2}{y_2} \quad (4)$$

Aceptando las hipótesis de fluido incompresible, flujo permanente y uniforme, distribución hidrostática de presiones lejos de la compuerta, y esfuerzos cortantes nulos en paredes y fondo del canal, la ecuación de Bernoulli expresa lo siguiente (Marbello, 2005):

$$y_1 + \frac{P_{atm}}{\gamma} + \frac{\alpha V_1^2}{2g} = y_2 + \frac{P_{atm}}{\gamma} + \frac{\alpha V_2^2}{2g} \quad (5)$$

$$y_1 + \frac{\alpha V_1^2}{2g} = y_2 + \frac{\alpha V_2^2}{2g} \quad (6)$$

Por conservación de la masa,

$$\begin{aligned} Q &= A_1 V_1 = A_2 V_2 \\ Q &= B y_1 V_1 = B y_2 V_2 \end{aligned} \quad (7)$$

De donde:

$$V_1 = \frac{y_2}{y_1} V_2 \quad (8)$$

Sustituyendo (8) en (6), y haciendo $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha = 1$, se tiene:

$$y_1 + \frac{\left[\left(\frac{y_2}{y_1}\right)^2 V_2^2\right]}{2g} = y_2 + \frac{V_2^2}{2g} \quad (9)$$

$$y_1 - y_2 = \frac{V_2^2}{2g} \left[1 - \left(\frac{y_2}{y_1}\right)^2 \right] \quad (10)$$

$$y_1 - y_2 = \frac{V_2^2}{2g} \left[\frac{(y_1^2 - y_2^2)}{y_1^2} \right] \quad (11)$$

$$(y_1 - y_2)y_1^2 = \left(\frac{V_2^2}{2g}\right)(y_1 + y_2)(y_1 - y_2) \quad (12)$$

$$V_2^2 = \frac{2gy_1^2}{(y_1 + y_2)} = \frac{y_1}{(y_1 + y_2)} 2gy_1 \quad (13)$$

Extrayendo la raíz cuadrada de ambos miembros de la igualdad,

$$V_2 = \sqrt{\frac{1}{\frac{(y_1 + y_2)}{y_1}}} \sqrt{2gy_1} \quad (14)$$

$$V_2 = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{y_2}{y_1}\right)}} \sqrt{2gy_1} \quad (15)$$

Reemplazando (2) en (15), se tiene:

$$V_2 = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{aC_c}{y_1}\right)}} \sqrt{2gy_1} \quad (16)$$

Introduciendo el coeficiente de velocidad, C_v , resulta:

$$V_{2real} = C_v V_2 \quad (17)$$

$$V_{2real} = C_v \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{aC_c}{y_1}}} \sqrt{2gy_1} \quad (18)$$

Reemplazando (18) y (2) en (7), se tiene que:

$$Q = V_{2real} A_2 = V_{2real} B y_2 \quad (19)$$

$$Q = \frac{C_v}{\sqrt{1 + \frac{aC_c}{y_1}}} \sqrt{2gy_1} B y_2 \quad (20)$$

$$Q = \frac{C_v}{\sqrt{1 + \frac{aC_c}{y_1}}} \sqrt{2gy_1} B a C_c \quad (21)$$

$$Q = \frac{C_v C_c}{\sqrt{1 + \frac{aC_c}{y_1}}} B a \sqrt{2gy_1} \quad (22)$$

Introduciendo el coeficiente de descarga C_d como:

$$C_d = \frac{C_v C_c}{\sqrt{1 + \frac{aC_c}{y_1}}} \quad (23)$$

Se obtiene:

$$Q = C_d a B \sqrt{2gy_1} \quad (24)$$

A partir de la ecuación 23, para C_v se tiene:

$$C_v = \frac{C_d}{C_c} \sqrt{1 + \frac{aC_c}{y_1}} \quad (25)$$

$$C_v C_c = C_d \sqrt{1 + \frac{aC_c}{y_1}} \quad (26)$$

Elevando al cuadrado ambos miembros de la ecuación 26, se encuentra:

$$C_v^2 C_c^2 = C_d^2 \left(1 + \frac{aC_c}{y_1} \right) \quad (27)$$

$$C_c^2 = \left(\frac{C_d}{C_v}\right)^2 \left(1 + \frac{aC_c}{y_1}\right) \quad (28)$$

$$C_c^2 = \left(\frac{C_d}{C_v}\right)^2 + C_c \frac{a}{y_1} \left(\frac{C_d}{C_v}\right)^2 \quad (29)$$

$$C_c^2 - \frac{a}{y_1} \left(\frac{C_d}{C_v}\right)^2 C_c - \left(\frac{C_d}{C_v}\right)^2 = 0 \quad (30)$$

$$C_c = \frac{\frac{a}{y_1} \left(\frac{C_d}{C_v}\right)^2 \pm \sqrt{\left(\frac{a}{y_1}\right)^2 \left(\frac{C_d}{C_v}\right)^4 - 4(1) \left(\frac{C_d}{C_v}\right)^2}}{2} \quad (31)$$

$$C_c = \frac{1}{2} \left(\frac{a}{y_1}\right) \left(\frac{C_d}{C_v}\right)^2 \pm \sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{a}{y_1}\right)^2 \left(\frac{C_d}{C_v}\right)^4 - \left(\frac{C_d}{C_v}\right)^2} \quad (32)$$

Introduciendo el término k , definido como:

$$k = \frac{1}{2} \left(\frac{a}{y_1}\right) \left(\frac{C_d}{C_v}\right)^2 \quad (33)$$

Se obtiene:

$$C_c = k \pm \sqrt{k^2 + \left(\frac{C_d}{C_v}\right)^2} \quad (34)$$

De esta manera, se encuentra una relación entre los coeficientes de contracción C_c , descarga C_d , velocidad C_v , altura desde el fondo hasta la parte inferior de la compuerta a y la altura del flujo antes de la compuerta y_1 (Marbello, 2005).

Gentilini desarrolló una gráfica para encontrar el valor del coeficiente de descarga para compuertas planas inclinadas con descarga libre (*Figura 4*) y H. Rouse propuso que para compuertas planas verticales ($\theta = 90^\circ$), el coeficiente de descarga es esencialmente constante con ligeras variaciones lo cual se confirma con la gráfica de la *Figura 4* (Marbello, 2005).

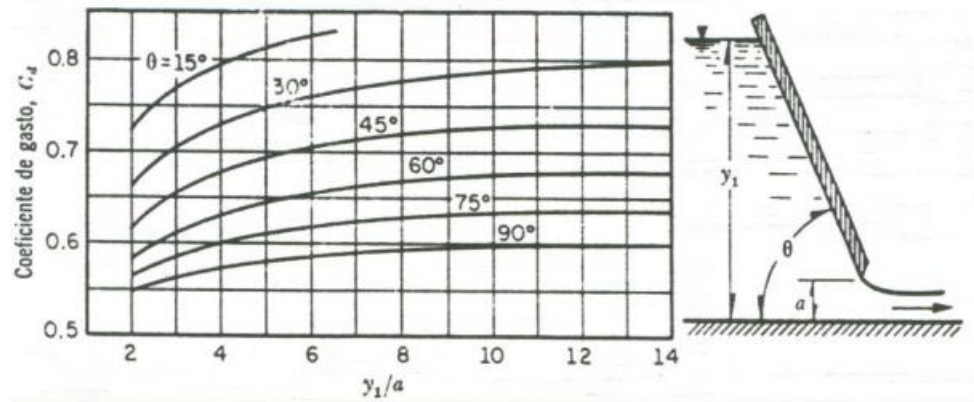


Figura 4 Coeficiente de descarga para compuertas planas inclinadas, con descarga libre (Marbello, 2005)

Partiendo de las expresiones de Gentilini, F. H. Knapp propuso una ecuación para calcular el coeficiente de velocidad, la cual es (Marbello, 2005):

$$C_v = 0.96 + 0.0979 \frac{a}{y_1} \quad (35)$$

Con límite superior $C_v = 1$, correspondiente a la relación $a/y_1 = 0.408$

Es importante considerar que estas suposiciones se aplican a compuertas con labios inferiores puntiagudos. En el caso de labios redondeados (ver *Figura 5*), los coeficientes de velocidad, descarga y contracción se hallan de la misma manera, pero se multiplican por un factor épsilon que depende del radio de curvatura del labio y el valor de a .

| r/a | 0.1 | 0.2 | 0.3 | 0.4 |
|------------|------|------|------|------|
| ϵ | 1.03 | 1.13 | 1.25 | 1.25 |

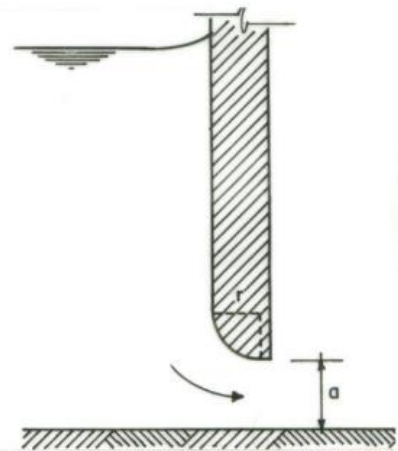


Figura 5 Factor de corrección épsilon para los coeficientes de descarga, velocidad y corrección con labio redondeado (Marbello, 2005)

H. R. Henry (1950) estudió ampliamente el coeficiente de descarga en compuertas planas verticales con descargas libres y sumergidas. Sus resultados fueron validados por A. Confré y Buchheister, y mostrados en las curvas C_d vs. y_1/a en función de y_3/a , (*Figura 6*). y_3 es la profundidad de aguas

abajo de la compuerta como se muestra en la *Figura 2*, operando con descarga sumergida (Marbello, 2005).

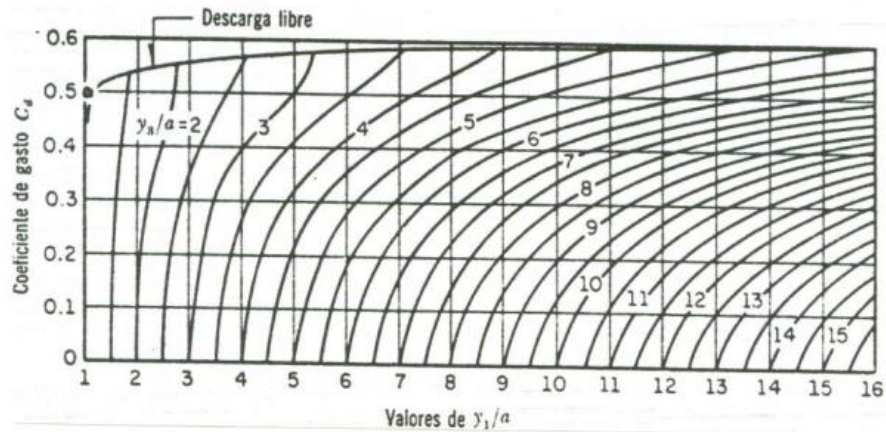


Figura 6 Coeficientes de descarga en compuertas planas verticales con descarga libre o sumergida (Marbello, 2005)

4.4 Fuente de información adicional

Para una mayor información adicional, puede consultar los siguientes enlaces:

- ✓ [5.Flujo a través de compuertas \(unal.edu.co\)](http://5.Flujo a través de compuertas (unal.edu.co))
- ✓ [\(99+\) Ven Te Chow - HIDRAULICA DE CANALES ABIERTOS | David Abarca Gutiérrez - Academia.edu](#) (Chow, 1994)
- ✓ Al final del video de la práctica número 2 ([\(6\) P2 Energía Específica y Régimen Crítico - YouTube](#)), puede encontrar un paso a paso para hallar el libro Hidráulica de Canales del profesor Máximo Villón Béjar (Villón, 1995).

5. Implementación de la simulación

5.1 Descripción del problema

Se tiene una compuerta de descarga libre en un canal rectangular con las siguientes condiciones:

$b = 2 \text{ [m]}$; ancho del canal; $Q = 2.5 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right]$; caudal; $C_c = 0.61$; coeficiente de contracción; $a = 0.35 \text{ [m]}$; apertura de la compuerta

Teniendo en cuenta las condiciones anteriormente mencionadas, encuentre el valor del tirante hidráulico aguas arriba de la compuerta, verifique que el valor del caudal calculado usando H-Canales sea igual al presentado en los datos, y halle los valores del coeficiente de velocidad y el coeficiente de descarga.

5.2 Procedimiento de implementación

5.2.1 Ubicación del programa H-Canales

- ✓ Busque el acceso directo que se creó al instalar H-Canales, y ejecute el programa
- ✓ Al abrir el programa encontrará una ventana como la siguiente



Figura 7 Ventana del programa H-Canales

5.2.2 Ingreso de datos para la simulación

- ✓ Haga clic en *Medición > Compuertas y Orificios*



Figura 8 Icono para realizar una medición de caudal

- ✓ Se abrirá la siguiente ventana en la cual se pueden realizar cálculos en compuertas de admisión inferior

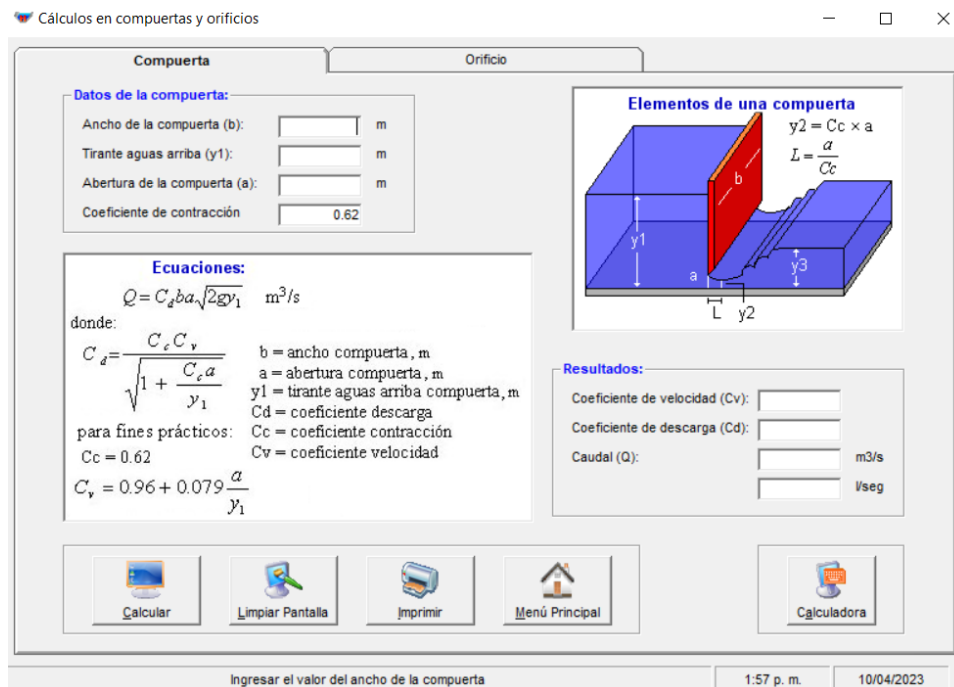


Figura 9 Ventana para el cálculo en compuertas y orificios

- ✓ En la sección de *Datos de la compuerta*, es necesario ingresar el valor del tirante aguas arriba de la compuerta, por lo que se realizará el procedimiento que se muestra en la siguiente sección.

5.2.3 Cálculo del tirante aguas arriba de la compuerta

Para el cálculo del tirante aguas arriba de la compuerta, puede utilizar la ecuación 22 de la siguiente forma:

$$Q = \frac{C_v C_c}{\sqrt{1 + \frac{a C_c}{y_1}}} B a \sqrt{2 g y_1} \quad (36)$$

Si reemplaza por los valores presentados en la sección de descripción del problema y tiene en cuenta la ecuación 35 para el valor del coeficiente de velocidad, obtiene:

$$2.5 = \frac{\left(0.5856 + \frac{0.0209}{y_1}\right) (0.7) \sqrt{2 * 9.81 * y_1}}{\sqrt{1 + \frac{0.35 * 0.61}{y_1}}} \quad (37)$$

Al encontrar el valor de y_1 por el método de tanteo o de iteraciones se tiene que $y_1 = 2.0238$

5.2.4 Continuación del ingreso de los datos a la simulación

Continuando con la simulación:

- ✓ Teniendo el valor de la altura del tirante hidráulico antes de la compuerta, proceda a ingresar los valores de 2 metros, 2.0238, 0.35 y 0.61, que hacen referencia al ancho de la compuerta (b), tirante aguas arriba (y_1), abertura de la compuerta (a) y coeficiente de contracción (C_c) respectivamente (ver *Figura 10*). Ahora haga clic en *Calcular* (*Figura 11*).

Datos de la compuerta:

| | | |
|---------------------------------|-------------------------------------|---|
| Ancho de la compuerta (b): | <input type="text" value="2"/> | m |
| Tirante aguas arriba (y_1): | <input type="text" value="2.0238"/> | m |
| Abertura de la compuerta (a): | <input type="text" value="0.35"/> | m |
| Coeficiente de contracción | <input type="text" value="0.61"/> | |

Figura 10 Datos de ingreso al programa

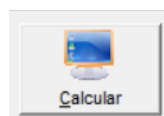


Figura 11 Icono de Calcular

Ahora se ejecutará la simulación de tal forma que el programa presentará los resultados en la parte inferior derecha como se muestra en la *Figura 12*

Cálculos en compuertas y orificios

Compuerta

Datos de la compuerta:

Ancho de la compuerta (b): 2 m

Tirante aguas arriba (y1): 2.0238 m

Abertura de la compuerta (a): 0.35 m

Coefficiente de contracción: 0.61

Orificio

Elementos de una compuerta

$y_2 = C_c \times a$
 $L = \frac{a}{C_c}$

Ecuaciones:

$$Q = C_d b a \sqrt{2 g y_1} \quad \text{m}^3/\text{s}$$

donde:

$$C_d = \frac{C_c C_v}{\sqrt{1 + \frac{C_c a}{y_1}}}$$

b = ancho compuerta, m
a = abertura compuerta, m
y1 = tirante aguas arriba compuerta, m
Cd = coeficiente descarga
para fines prácticos: Cc = coeficiente contracción
Cv = coeficiente velocidad
 $C_v = 0.96 + 0.079 \frac{a}{y_1}$

Resultados:

Coefficiente de velocidad (Cv): 0.9737

Coefficiente de descarga (Cd): 0.5649

Caudal (Q): 2.4917 m³/s
2491.6742 l/seg

Calcular Limpiar Pantalla Imprimir Menú Principal Calculadora

Retorna al Menú principal 2:37 p. m. 10/04/2023

Figura 12 Ventana de resultados obtenidos

Nota: El programa presenta un error en la ecuación para el cálculo del coeficiente de velocidad, ya que calcula con el término de 0.079 en vez del término real (0.0979) que se muestra en la ecuación 35.

De esta forma obtiene los resultados para el coeficiente de velocidad C_v , el coeficiente de descarga C_d y el caudal Q

Comparando el valor de caudal presentado por el programa y el caudal presentado en los datos iniciales del ejercicio, encontrará que son muy similares.

5.3 Video de la simulación

A continuación, se presentará el enlace del video que hace referencia a la simulación número siete presentada en este documento. Este video hace parte de una serie de tutoriales que apoyan al usuario en el manejo del programa computacional abordado en cada una de las simulaciones.

✓ Enlace del video: <https://www.youtube.com/watch?v=6aEKSCYgIIM>

6. Descripción del entregable

6.1 Entregables de la simulación inicial

Debe entregar en archivo PDF un documento donde se realice una captura de toda la pantalla (no solo una sección del programa computacional sino **TODA LA PANTALLA DEL ESCRITORIO**) de los siguientes pasos durante el proceso.

- ✓ La ventana inicial del programa H-Canales
- ✓ La ventana para el cálculo en compuertas y orificios mostrada en la *Figura 9*
- ✓ Los datos ingresados al programa mostrados en la *Figura 10*
- ✓ Los resultados de la simulación mostrados en la *Figura 12*

6.2 Preguntas de análisis

1. ¿Cómo definiría el concepto de compuerta y cuál cree que es la diferencia clave entre las compuertas de descarga libre y las compuertas de descarga sumergida, basándose en el marco teórico presentado en este documento y en otras fuentes de información?
2. Elabore un procedimiento paso a paso para determinar el caudal mediante la ecuación 22, teniendo en cuenta el uso del coeficiente de velocidad mediante la ecuación 35. Luego de ello realice un análisis de las variables que componen la ecuación 22, describiendo lo que representan físicamente dentro de la ecuación.
3. Realice la simulación de un canal con un ancho de compuerta de 1,5 metros, un caudal de 1,5 [m³/s], una abertura de compuerta de 0,2 [m] y un coeficiente de contracción de 0,7. Considere que la compuerta es de descarga libre y utilice las ecuaciones relevantes presentadas en el marco conceptual de esta guía. Adicionalmente, determine el valor de la velocidad real en la sección 2 de la compuerta utilizando el coeficiente de velocidad indicado en la ecuación 35 de este documento. Proporcione un paso a paso detallado del procedimiento seguido y concluya con las observaciones realizadas.

7. Referencias Bibliográficas

Chow, V. T. (1994). *Hidráulica de Canales Abiertos*.
https://www.academia.edu/43519012/Ven_Te_Chow_HIDRAULICA_DE_CANALES_ABIERTO
S

Marbello, R. (2005). 5. *Flujo a través de compuertas*. Universidad Nacional de Colombia.
<https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/21725/3353962.2005.Parte%209.pdf?sequence=18&isAllowed=y>

Villón, B. (1995). *Hidráulica de canales*. <https://uis-odilotk-es.bibliotecavirtual.uis.edu.co/>.
<https://pdfb9c6919cf9985b759bfeca2ebb3e1fa1.odilo.us/#/e81c25ea3bb04acc86cfe4f557ac2fae/18955710ff93c4e1ea3445e0c6c773fc3fa6b9587e23c2b8572103ae049747ae>