

## **Manual de laboratorio de simulación computacional**

### **Práctica N°2: Evaluación de la Energía Específica y el Régimen Crítico**

**Fuente del recurso:** Las guías de simulación desarrolladas en el presente trabajo se adaptaron del trabajo de grado de Malaver Nieto (2023), adaptando su metodología a las condiciones y objetivos del presente estudio.

#### **1. Objetivos de la simulación**

- ✓ Analizar la energía específica y el régimen crítico en un canal abierto mediante simulaciones en la herramienta H-Canales, complementadas con el uso de Wolfram Alpha y el cálculo manual, para comparar los resultados obtenidos.
- ✓ Aplicar los conceptos de energía específica a través del desarrollo de un ejemplo resuelto utilizando H-Canales, Wolfram Alpha y la calculadora.
- ✓ Comparar los resultados obtenidos por los distintos métodos de cálculo, evaluando su coherencia y su aporte al análisis hidráulico del canal

#### **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
- ✓ Calculadora
- ✓ Wolfram|Alpha: Computational Intelligence

### 3. Introducción

El programa H-Canales permite a los usuarios realizar cálculos rápidos en el sistema internacional de unidades y las herramientas que utiliza concuerda con la teoría presente en este documento.

La energía específica en la sección de un canal se deriva de la ecuación de Bernoulli y se define como la energía por kilogramo de agua que fluye a través de la sección, medida con respecto al fondo del canal (Villón, 1995).

La curva de energía específica (E) se estudia debido a la importancia de mostrar la relación que hay entre las posibles profundidades del flujo en una sección específica de un canal y la energía específica para un caudal dado. Esto ocurre en todos los casos en los que fluya un gasto de agua por una sección transversal, y para todo el canal o para alguna sección transversal en específico, se puede cumplir condiciones de flujo subcrítico, supercrítico o crítico.

El flujo crítico hace referencia a un flujo que se encuentra entre un estado de transición del flujo subcrítico y supercrítico, existe un único valor de tirante asociado a la condición crítica y se caracteriza principalmente por un número de Froude igual a 1.

La condición del flujo subcrítico hace referencia a un flujo caracterizado por alturas del tirante hidráulico altas y velocidades bajas, el número de Froude es menor a la unidad y el valor de energía se compone principalmente por el valor de energía potencial y una pequeña parte de la energía cinética.

El flujo supercrítico por otra parte se refiere a flujos con bajas alturas de tirante hidráulico y altas velocidades; el número de Froude asociado a este es mayor a la unidad y la energía específica la compone principalmente el valor de energía cinética.

En la curva de energía específica (E), para un valor de energía, existen dos profundidades del flujo que pueden satisfacer esta condición, estas dos profundidades se denominan profundidades alternas. La profundidad alterna superior corresponde a condiciones del flujo subcrítico (área hidráulica mayor y baja velocidad) mientras que la profundidad alterna inferior corresponde a condiciones de flujo supercrítico (área hidráulica menor y alta velocidad).

La condición de flujo crítico no posee una profundidad alterna, y para definir la condición de flujo crítico, podemos decir que ocurre cuando:

- ✓ Posee la energía específica mínima para un caudal dado, o
- ✓ Posee el caudal máximo para una energía específica dada, o
- ✓ Posee la fuerza específica mínima para un caudal dado (Villón, 1995).

Es importante analizar el concepto de energía específica porque nos permite comprender las características hidráulicas del flujo en cada tramo del canal, y además de esto, este concepto fue introducido por Boris A. Bakhmeteff en 1912, para que mediante su adecuada consideración se pudieran resolver los más complejos problemas de transiciones cortas, en las que los efectos de fricción son despreciables (Villón, 1995).

## 4. Marco teórico

### 4.1 Energía específica

La energía específica es una derivación de la ecuación de Bernoulli en la cual se desprecia el término  $Z$ , que hace referencia a la cabeza de elevación o altura desde un nivel de referencia hasta el fondo del canal. Dado que en Hidráulica de canales el plano de referencia es el fondo del canal, este valor es igual a cero. Por lo tanto, la energía específica es igual a la suma de la cabeza de presión (profundidad del agua) más la cabeza de velocidad. Esto se demostrará de la siguiente manera, resultando en la ecuación número 5 que representa la energía específica en cualquier sección transversal.

La ecuación de Bernoulli, para una sección del canal es:

$$H = Z + y + \alpha \frac{\bar{U}^2}{2g} \quad (1)$$

Si hacemos  $Z = 0$ , tomando la definición de energía específica antes mencionada encontraremos que:

$$E = y + \alpha \frac{\bar{U}^2}{2g} \quad (2)$$

En cuanto al coeficiente de Coriolis ( $\alpha$ ), se puede asumir un valor de 1 para el caso de canales rectos, prismáticos donde hay flujo uniforme (FU) o flujo gradualmente variado (FGV). Acorde a esto obtenemos lo siguiente:

$$E = y + \frac{\bar{U}^2}{2g} \quad (3)$$

Sin embargo, de la ecuación de continuidad para canal con cualquier forma tenemos que:

$$V = \frac{Q}{A} \quad (4)$$

Si sustituimos la ecuación 4 en la ecuación 3 encontraremos que:

$$E = y + \frac{Q^2}{2gA^2} \quad (5)$$

La ecuación número 4 es válida para todas las unidades ya que son numéricas y generales. Sin embargo, hay que tener en cuenta que se deben utilizar el mismo sistema de unidades para todas las variables.

Donde:

H: Es energía total [kg-m/kg]

E: Energía específica [kg-m/kg]

$\alpha$ : Coeficiente de Coriolis

$\bar{U}$ : Velocidad promedio en la sección transversal [m/s]

y: Altura del tirante hidráulico en unidades de longitud [m]

Q: Caudal que fluye por el canal [m<sup>3</sup>/s]

A: Área mojada o hidráulica de la sección transversal [m<sup>2</sup>]

g: Valor de la gravedad [m/s<sup>2</sup>]

Es de esta forma, que se logra obtener una expresión para calcular la energía específica en cualquier sección transversal del canal a estudiar. Sin embargo, la energía específica para el canal no siempre puede mantenerse constante, ya que, si bien es cierto depende de la profundidad del flujo, si no se mantienen constantes términos como el caudal y la sección transversal, la gráfica que representa la energía específica (o también llamada curva de energía específica) puede variar de distintas formas.

## 4.2 Curva de energía específica

De la ecuación 5, puede verse que para una sección del canal y un caudal determinados, la energía específica en una sección del canal sólo es función de la profundidad del flujo. Cuando graficamos la profundidad del flujo contra la energía específica para una sección de canal y caudal determinados, se obtiene una curva de energía específica como se muestra en la *Figura 1*.

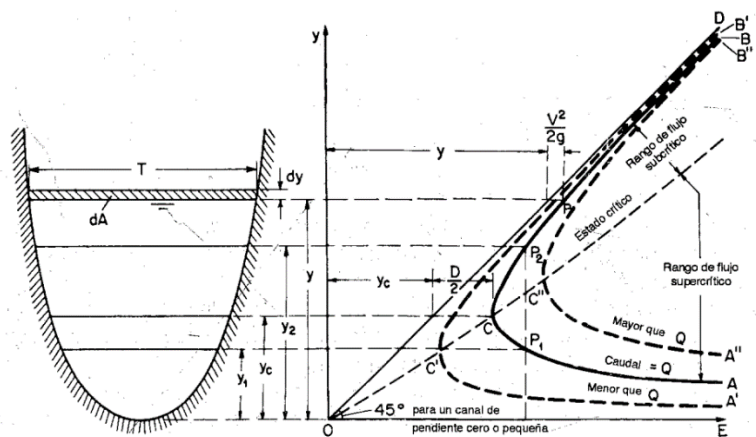


Figura 1 Curva de energía específica (Chow, 1994)

Para comprender los componentes de la *Figura 1*, se recurre a la siguiente explicación:

Esta curva tiene dos ramas, AC y BC. La rama AC se aproxima asintóticamente al eje horizontal hacia la derecha. La rama BC se aproxima a la línea OD a medida que se extiende hacia arriba y hacia la derecha. La línea OD es una línea que pasa a través del origen y tiene un ángulo de inclinación igual a  $45^\circ$ . Para un canal de pendiente alta, el ángulo de inclinación de la línea OD será diferente de  $45^\circ$ . En cualquier punto P de esta curva, la ordenada representa la profundidad y la abscisa representa la energía específica, que es igual a la suma de la altura de presión (Y) y la altura de velocidad ( $\bar{U}^2/2g$ ).

La curva muestra que, para una energía específica determinada, existen dos posibles profundidades, la profundidad baja ( $Y_1$ ) y la profundidad alta ( $Y_2$ ). La profundidad baja es la profundidad alterna de la profundidad alta, y viceversa. En el punto C, la energía específica es mínima. Más adelante se probará que esta condición de energía específica mínima corresponde al estado crítico de flujo. Por consiguiente, en el estado crítico es claro que las dos profundidades alternas se convierten en una, la cual es conocida como profundidad crítica ( $Y_c$ ). Cuando la profundidad de flujo es mayor que la profundidad crítica, la velocidad de flujo es menor que la velocidad crítica para un caudal determinado y, por consiguiente, el flujo es subcrítico. Cuando la profundidad del flujo es menor que la profundidad crítica, el flujo es supercrítico. Por tanto, ( $Y_1$ ) es la profundidad de un flujo supercrítico y ( $Y_2$ ) es la profundidad de un flujo subcrítico.

Si el caudal cambia, existiría un cambio correspondiente en la energía específica. Las dos curvas A'B' y A''B'' (*Figura 1*) representan posiciones de la curva de energía específica cuando el caudal es menor y mayor, respectivamente, que el caudal utilizado para la construcción de la curva AB (Chow, 1994).

#### 4.3 Regímenes del flujo

Para comprender la curva de energía específica, es necesario introducir tres conceptos, los cuales son, régimen subcrítico, régimen crítico y régimen supercrítico. Primero recordemos que el concepto del número de Froude hace referencia a la relación existente entre las fuerzas inerciales y las fuerzas gravitacionales, la ecuación característica del número de Froude es la siguiente:

$$F = \frac{\bar{U}}{\sqrt{gL}} \quad (6)$$

Donde:

$F$ : Es el número de Froude [adimensional]

$\bar{U}$ : Velocidad del flujo [m/s]

$g$ : Valor de la gravedad en [m/s<sup>2</sup>]

$L$ : Es la longitud característica que para el caso de la hidráulica es la profundidad hidráulica ( $D_m$ ) [m]

La profundidad hidráulica es la relación entre el área mojada de la sección y el ancho superficial ( $D_m = A/T$ ). Las expresiones tanto para el área mojada y para el ancho superficial, varían dependiendo de la sección transversal a utilizar.

#### 4.3.1 Régimen crítico

El régimen crítico representado por el punto C en la *Figura 1*, se caracteriza por que solo tiene un valor de profundidad del fujo asociado a este régimen, y el número de Froude es igual a la unidad. Tiene algunas otras características como la de poseer el mínimo valor de energía específica, es decir la energía mínima que se puede encontrar en el flujo bajo las condiciones hidráulicas en las que se encuentra esa sección (Chow, 1994).

#### 4.3.2 Régimen subcrítico

El régimen subcrítico está asociado a flujos con velocidades bajas, pero con profundidades de flujo altas. Se caracteriza por que los valores del número de Froude en su flujo no superan la unidad y las alturas del agua se ubican en la rama BC (Villón, 1995).

#### 4.3.3 Régimen supercrítico

El régimen supercrítico hace referencia a condiciones de flujo con velocidades muy altas, representadas por valores en el número de Froude mayores a 1 y las alturas del agua se ubican en la rama AC (Villón, 1995).

### 4.4 Profundidades alternas

Las profundidades alternas hacen referencia a las dos alturas posibles para las cuales se puede tener el mismo valor de energía; es decir, existe una profundidad en el régimen subcrítico la cual posee igual magnitud de energía específica que una profundidad en el régimen supercrítico.

Usando el caso del canal rectangular, es posible generar la ecuación del polinomio cúbico que permite obtener las profundidades alternas. Si se toma la ecuación número 5 y sabiendo que  $A = by$ , donde  $b$  es el valor del ancho del canal y  $y$  es el valor de la altura del tirante hidráulico en la sección, entonces se tiene:

$$E = y + \frac{Q^2}{2gA^2} \quad (7)$$

Despejando el valor del área para una sección rectangular se tiene:

$$E = y + \frac{Q^2}{2gb^2y^2} \quad (8)$$

Si se multiplica toda la expresión por  $2gy^2$  se obtiene:

$$2gy^2E = 2gy^3 + \frac{Q^2}{b^2} \quad (9)$$

Es usual que el valor de  $Q/b$  se reemplace por un término denominado caudal por unidad de ancho, el cual tiene el siguiente símbolo:

$$q = \frac{Q}{b} \quad (10)$$

Si se reemplaza la ecuación 10 en la ecuación 9, se tiene:

$$2gy^2E = 2gy^3 + q^2 \quad (11)$$

Reescribiendo la ecuación 11 se tiene:

$$2gy^3 - 2gy^2E + q^2 = 0 \quad (12)$$

Si se conoce el valor de la energía en un instante, el caudal asociado al flujo y el ancho del canal (realizando la suposición para canales rectangulares), se encuentra una expresión (polinomio cúbico) que tiene tres soluciones posibles. Sin embargo, como uno de esos valores es negativo (una altura de agua negativa es imposible), es posible calcular los dos valores de profundidades hidráulicas que hacen referencia a las profundidades alternas.

#### 4.5 Régimen crítico

El estado crítico se define como la condición para el cual el número de Froude es igual a la unidad. Una definición más común es aquella que dice que es el estado del flujo para el cual la energía específica toma un valor mínimo, para un caudal y sección transversal dados (Marbello, 2005). Se determina matemáticamente haciendo de la ecuación 5, una derivación respecto a la altura del flujo ( $dE/dY$ ), como se muestra a continuación:

A partir de esto, y suponiendo un canal prismático con una pendiente pequeña, se obtiene lo siguiente:

$$\frac{dE}{dy} = 0 \quad (13)$$

Reemplazando en la ecuación de energía presentada en la ecuación 5, se encuentra que:

$$\frac{dE}{dy} = \frac{d}{dy} \left( y + \frac{Q^2}{2gA^2} \right) \quad (14)$$

Teniendo en cuenta que el valor del caudal es constante, se obtiene la siguiente expresión:

$$\frac{dE}{dy} = 1 + \frac{Q^2}{2g} * \frac{d}{dy} \left( \frac{1}{A^2} \right) \quad (15)$$

Continuando con la derivación:

$$\frac{dE}{dy} = 1 + \frac{Q^2}{2g} * \left[ \frac{(0)(A^2) - (1)(2A) \left( \frac{dA}{dy} \right)}{A^4} \right] \quad (16)$$

Si realizamos las respectivas simplificaciones, obtiene la siguiente expresión:

$$\frac{dE}{dy} = 1 - \frac{Q^2}{gA^3} \left( \frac{dA}{dy} \right) \quad (17)$$

De la *Figura 1*, se encuentra la relación entre el diferencial de área y el diferencial de altura del tirante hidráulico (para secciones rectangulares), esta relación está dada por el ancho superficial (T), encontrando que:

$$\frac{dA}{dy} = T \quad (18)$$

Y a partir de esto se tiene:

$$\frac{dE}{dy} = 1 - \frac{Q^2 T}{gA^3} \quad (19)$$

Siguiendo con la definición de flujo crítico, la cual expresa que la variación de la energía específica con respecto a la altura del tirante hidráulico es igual a cero, como se presenta en la ecuación 13, se obtiene:



$$1 - \frac{Q^2 T}{g A^3} = 0 \quad (20)$$

Realizando el despeje adecuado, se obtiene:

$$\frac{Q^2 T}{g A^3} = 1 \quad (21)$$

Si reescribimos la ecuación de la siguiente manera, obtiene lo siguiente:

$$\frac{\frac{Q^2}{A^2} * T}{g \left( \frac{A}{T} \right)} = 1 \quad (22)$$

Y realizando los respectivos reemplazos se encuentra que:

$$\frac{V^2}{g D} = 1 \quad (23)$$

Y sabemos que por definición Froude es igual a lo siguiente:

$$F^2 = \frac{V^2}{g D} \quad (24)$$

Reemplazando la relación obtenida en la ecuación 24, en la ecuación 23, obteniendo lo que sigue:

$$F^2 = 1 \quad (25)$$

De esta manera, se corrobora la deducción presentada en la ecuación 13 la cual presenta que el flujo crítico se presenta cuando la variación de energía específica respecto a la variación del tirante hidráulico es igual a cero.

#### 4.5.1 Términos del régimen crítico

- ✓ **Tirante crítico:** El tirante crítico es el valor asociado al régimen crítico en el cual, la curva de energía específica se divide entre régimen subcrítico y régimen supercrítico. Este valor se

encuentra cuando el valor del número de Froude es igual a la unidad, por lo tanto, partiendo de la ecuación 6:

$$F = \frac{v}{\sqrt{gL}} \quad (26)$$

Realizando el cambio entre la longitud característica y la profundidad hidráulica promedio se tiene:

$$F = \frac{v}{\sqrt{gD}} \quad (27)$$

Recuerde que la profundidad hidráulica promedio se define como lo siguiente:

$$D = \frac{A}{T} \quad (28)$$

Para canales rectangulares el área es igual al ancho del canal multiplicado por la altura del tirante y el ancho superficial es igual al ancho del canal, siendo esto:

$$D = \frac{by}{b} \quad (29)$$

Resultando en:

$$D = y \quad (30)$$

Si se reemplaza el valor de la profundidad hidráulica promedio en la ecuación 27 se tiene:

$$F = \frac{v}{\sqrt{gy}} \quad (31)$$

Como se está refiriendo a la condición del régimen crítico, el valor del número de Froude es igual a la unidad, por lo tanto, la altura del tirante hidráulico es la crítica y la velocidad también hará referencia a la velocidad crítica, siendo esto:

$$\sqrt{gy_c} = v_c \quad (32)$$

Recuerde de la ecuación de continuidad que  $v = Q/A$ , para este caso se estará hablando de un área crítica, que es función del tirante hidráulico crítico, encontrando así que:

$$\sqrt{gy_c} = \frac{Q}{A_c} \quad (33)$$

Realizando las respectivas deducciones y simplificaciones, se llega a una expresión para encontrar el valor del tirante hidráulico en secciones rectangulares, siendo esta:

$$y_c = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}} \quad (34)$$

- ✓ **Velocidad crítica:** Hace referencia a la velocidad asociada al régimen crítico, la cual es función del tirante crítico y se halla de la siguiente manera:

$$v_c = \frac{Q}{A_c} \quad (35)$$

El área crítica depende de la sección transversal, para secciones rectangulares se tiene:

$$A_c = b * y_c \quad (36)$$

Resultando en que la velocidad crítica para secciones rectangulares es igual a:

$$v_c = \frac{Q}{by_c} \quad (37)$$

- ✓ **Energía mínima:** La energía mínima está asociada al menor valor de energía presente en la sección transversal, es decir es el valor de energía asociado al régimen crítico en la sección, para encontrarla se usa la ecuación de energía específica de la siguiente manera:

$$E = y + \frac{v^2}{2g} \quad (38)$$

Y teniendo en consideración que hace referencia al régimen crítico, se tiene lo siguiente:

$$E_{min} = y_c + \frac{v_c^2}{2g} \quad (39)$$

- ✓ **Pendiente crítica:** Es el valor particular de la pendiente del fondo del canal, para la cual éste conduce un caudal  $Q$  en régimen uniforme y con energía específica mínima, o sea, que en todas sus secciones se tiene el tirante crítico, formándose el flujo crítico uniforme (Villón, 1995). La pendiente crítica se puede encontrar a partir de la ecuación de Manning de la siguiente manera:

$$S_c = \left( \frac{v_c * n}{R^{\frac{2}{3}}} \right)^2 \quad (40)$$

Donde:

$S_c$ : Es la pendiente crítica [m/m]

$v_c$ : Es la velocidad crítica en la sección [m/s]

$n$ : Es el coeficiente de rugosidad de Manning que depende de la sección transversal [ $s/m^{\frac{1}{3}}$ ]

$R$ : Es el radio hidráulico de la sección transversal que es igual a la relación entre el área y el perímetro mojados  $\left( R = \frac{A}{P} \right)$  [m]

#### 4.6 Relación entre el caudal y el tirante hidráulico

También existe una ecuación en la que podemos relacionar el caudal y la altura del tirante hidráulico, para esto se parte de la ecuación de energía específica, siendo esta la expresada en la ecuación 5:

$$E = y + \frac{Q^2}{2gA^2} \quad (41)$$

Si se mantiene constante el valor de la energía y se despeja el caudal, se llega a la siguiente expresión:

$$Q = \sqrt{2gA(E - y)^{\frac{1}{2}}} \quad (42)$$

Donde:

$Q$ : Es el caudal [m<sup>3</sup>/s]

$g$ : El valor de la gravedad [m/s<sup>2</sup>]

$A$ : Área de la sección transversal [m<sup>2</sup>]

$E$ : Valor de la energía [kg-m/kg]

$y$ : Altura del tirante hidráulico [m]

La expresión general presentada en la ecuación 41, presenta la siguiente figura que relaciona el caudal con la altura del tirante hidráulico (Figura 2)

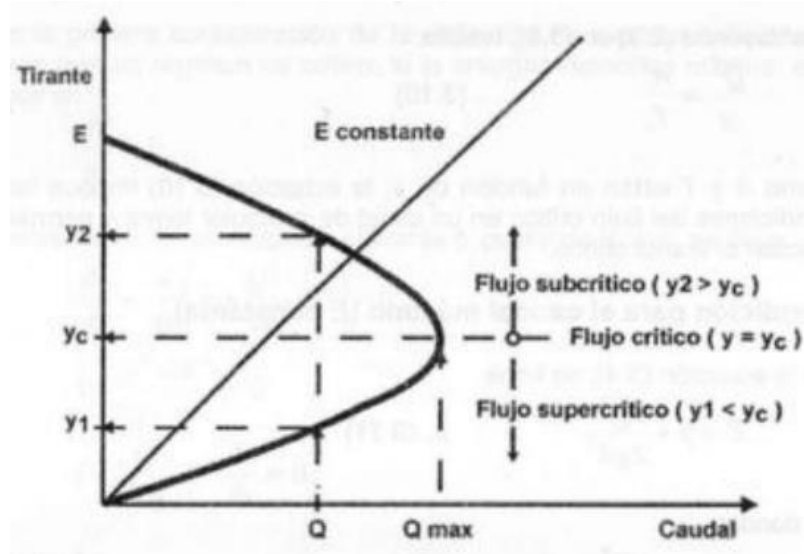


Figura 2 Relación entre el caudal y el tirante hidráulico

En la Figura 2 se puede ver, que también hay una distinción entre el régimen subcrítico y el régimen supercrítico, como también, se presenta el punto de inflexión en el cual se presenta el régimen crítico. Además de esto, también se puede evidenciar que para un mismo valor de caudal existen dos profundidades alternas  $y$ , finalmente, se observa que el valor para el caudal máximo se da cuando el valor del tirante hidráulico es el crítico.

Esto se puede confirmar, a partir de la consideración, de que el régimen crítico también se da cuando posee el caudal máximo para una energía específica dada (Villón, 1995), a partir de esto se tiene:

$$\frac{dQ}{dy} = 0 \quad (43)$$

Por lo tanto:

$$\frac{dQ}{dy} = \frac{d}{dy} \left( Q = \sqrt{2gA(E - y)^{\frac{1}{2}}} \right) = 0 \quad (44)$$

Realizando las respectivas deducciones y simplificaciones se llega a que:

$$\frac{Q^2}{g} = \frac{A_c^3}{T_c} \quad (45)$$

Donde:

$Q$ : Valor del caudal en la sección transversal [m<sup>3</sup>/s]

$g$ : El valor de la gravedad [m/s<sup>2</sup>]

$A_c$ : Valor del área crítica [m<sup>2</sup>]

$T_c$ : Ancho superficial [m]

Lo cual indica que, al tener los valores del área y ancho superficial en función de la altura del tirante hidráulico, la ecuación 45 impone las condiciones del flujo crítico en un canal de cualquier forma y permite calcular el tirante crítico (Villón, 1995), demostrando así, la condición crítica.

#### 4.7 Referencias adicionales

Como referencias adicionales se le sugiere al estudiante que consulte la guía del laboratorio de la UNAL que hace referencia a la transición en flujo subcrítico (Marbello, 2005), que se presentará a continuación:

- ✓ Guía de laboratorio de la Universidad Nacional de Colombia: [3. ENERGIA ESPECIFICA \(unal.edu.co\)](http://3.ENERGIA_ESPECIFICA.unal.edu.co)
- ✓ Hidráulica de Canales Abiertos (Chow, 1994): [99+ Ven Te Chow - HIDRAULICA DE CANALES ABIERTOS | David Abarca Gutiérrez - Academia.edu](http://99+ Ven Te Chow - HIDRAULICA DE CANALES ABIERTOS | David Abarca Gutiérrez - Academia.edu)
- ✓ Video tutorial para encontrar el libro Hidráulica de Canales (Villón, 1995): <https://www.youtube.com/watch?v=7mxytmrSUXk>

## 5. Implementación de la simulación

### 5.1 Descripción del problema

Se quiere desarrollar un problema en el programa computacional H-Canales, para esto a usted como ingeniero residente se le solicita llevar a cabo el siguiente procedimiento para estar capacitado en la resolución de problemas similares. Un canal trapezoidal tiene un ancho de solera  $b = 3$  [m], un talud de relación 1:2 y debe conducir un caudal de 10 [m<sup>3</sup>/s]. Calcular el tirante crítico ( $Y_c$ ) y la energía específica mínima.

Para esto, se presenta la sección transversal del problema de tal manera que usted como ingeniero residente pueda evidenciar mejor el problema planteado.

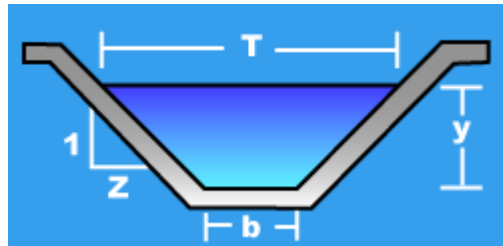


Figura 3 Sección transversal del problema planteado

## 5.2 Proceso de simulación

### 5.2.1 Apertura del programa H-Canales

- ✓ Para iniciar el programa H-Canales (Rojas, 2013), es necesario seguir la Guía 2, la cual contiene las instrucciones correspondientes a la descarga e instalación del software y se encuentra incluida dentro del material de laboratorio.
- ✓ Debe recordar, que la guía antes mencionada debe estar desarrollada en su totalidad de tal manera que el estudiante no tenga problemas al momento de desarrollar esta simulación.
- ✓ Existen varias formas de abrir el programa H-Canales (Rojas, 2013). Una de ellas consiste en acceder directamente desde el escritorio, siempre y cuando durante la instalación se haya autorizado la creación de un acceso directo, el cual se identifica con el ícono del programa
- ✓ En caso de no haberse creado un acceso directo en el escritorio, el programa quedará almacenado en su ruta predeterminada, por lo que se deberán seguir una serie de pasos para su ubicación.

1. Se debe acceder al Disco local (C:) desde la carpeta Este equipo.

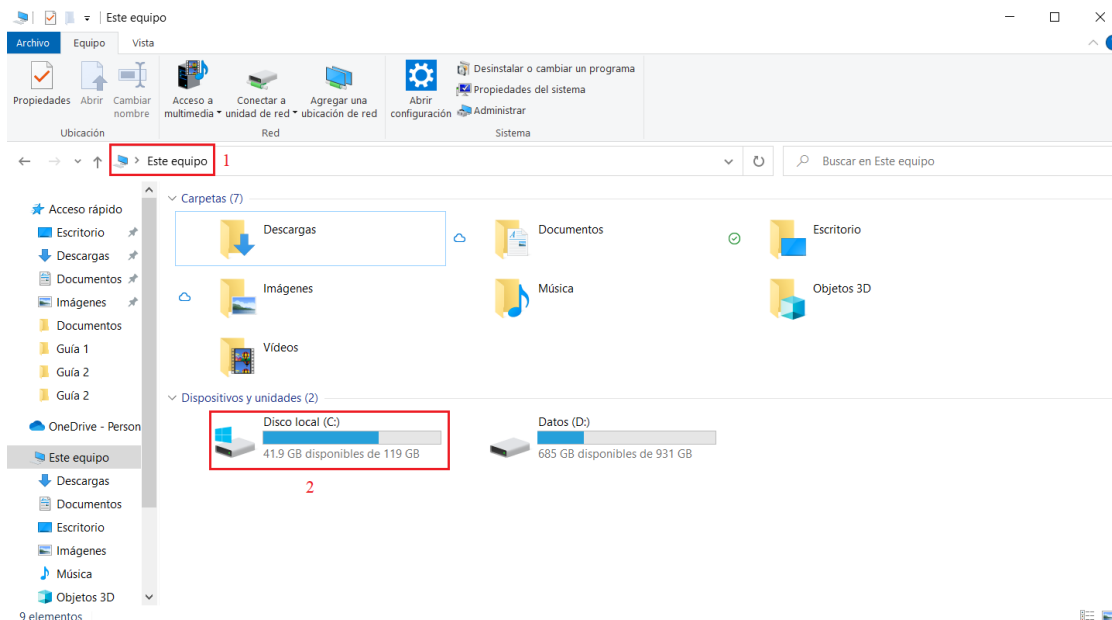


Figura 4 Ventana de la carpeta "Este equipo"

2. Una vez abierto el Disco local (C:), se debe ingresar a la carpeta denominada Archivos de programa (x86).

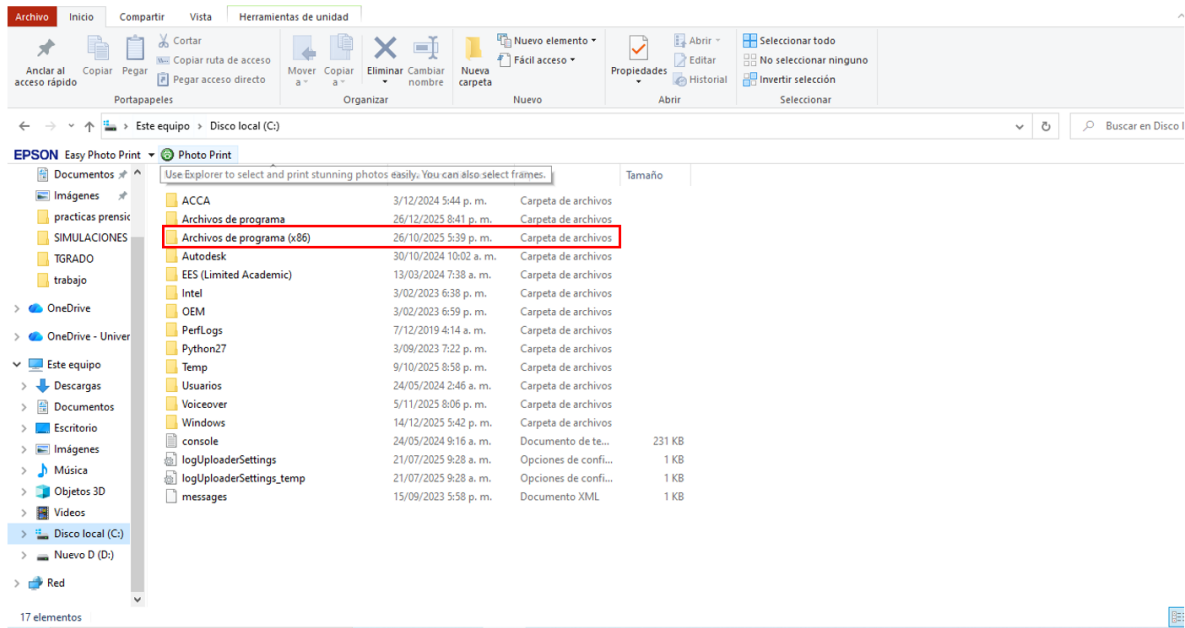


Figura 5 Carpeta de "Archivos de programa (x86)"

- Dentro de esta carpeta, se encontrará una subcarpeta llamada Hcanales, la cual debe abrirse para continuar con el proceso.

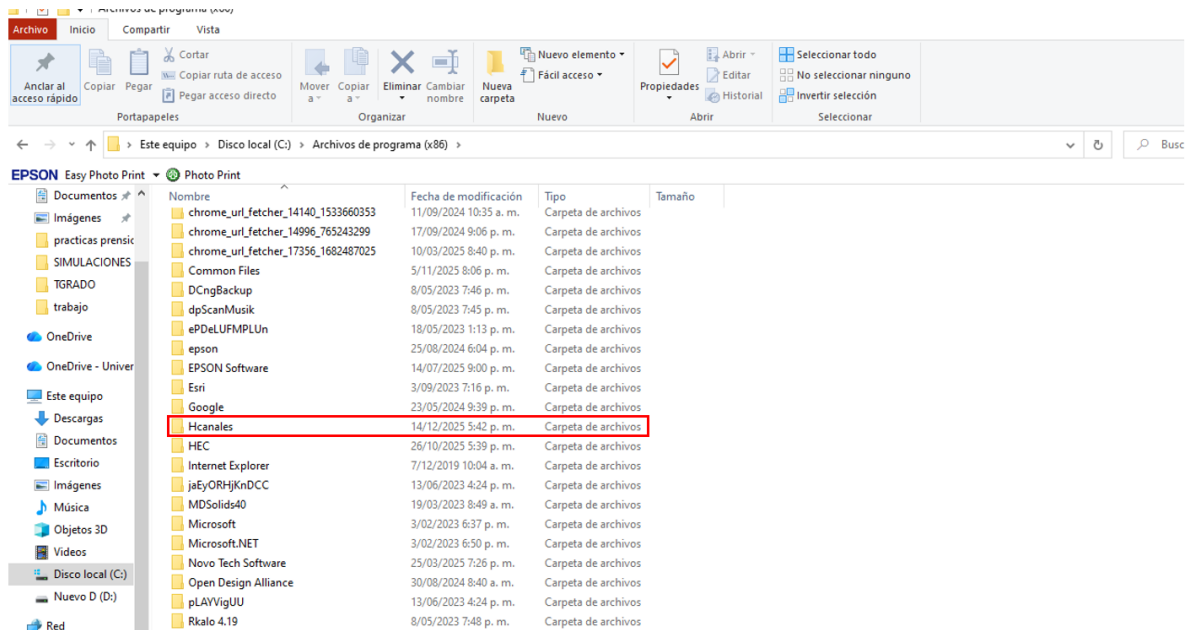


Figura 6 Ubicación de la carpeta Hcanales

- Posteriormente, se visualizarán los archivos correspondientes al programa, y se deberá ejecutar el archivo identificado como H-Canales. Dando Click derecho y ejecutar



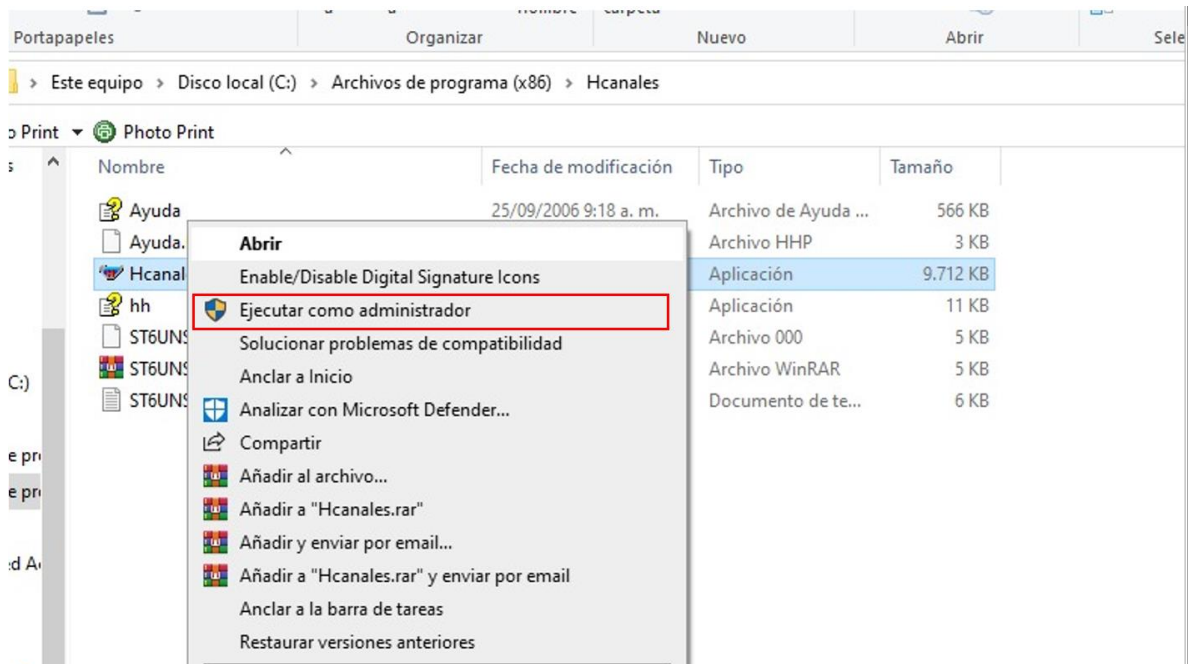


Figura 7 Ubicación final del programa H-canales

5. De esta forma, se abrirá el programa y se mostrará su interfaz principal.



Figura 8 Presentación del programa

### 5.2.2 Desarrollo del ejemplo propuesto

6. A continuación, se debe seleccionar la opción Tirante Crítico y luego hacer clic en Sección trapezoidal, ubicadas en la parte superior del programa.



Figura 9 Ventana del programa para hallar un tirante crítico

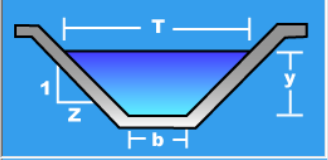
7. Al realizar esta acción, se abrirá una ventana que permitirá el ingreso de los datos necesarios para la resolución del ejercicio.

**Cálculo del Tirante Crítico sección Trapezoidal, Rectangular, Triangular**

Lugar:  Proyecto:   
Tramo:  Revestimiento:

**Datos:**

Caudal (Q):  m<sup>3</sup>/s  
Ancho de solera (b):  m  
Talud (Z):



**Resultados:**

Tirante crítico (y):  m Perímetro (p):  m  
Área hidráulica (A):  m<sup>2</sup> Radio hidráulico (R):  m  
Espejo de agua (T):  m Velocidad (v):  m/s  
Número de Froude (F):  Energía específica (E):  m-Kg/Kg

Ingresar el valor del caudal Q 11:01 p. m. 27/12/2025

Figura 10 Ventana para el cálculo del tirante crítico

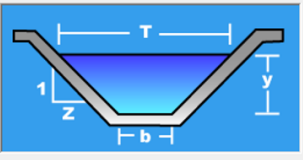
8. En esta ventana ingresará los datos y obtendrá los resultados asociados a estos, como se muestra en la *Figura 11*. Para obtener los resultados en la sección de la ventana que dice *Calcular*.

**Cálculo del Tirante Crítico sección Trapezoidal, Rectangular, Triangular**

Lugar:  Proyecto:   
Tramo:  Revestimiento:

**Datos:**

Caudal (Q):  m<sup>3</sup>/s  
Ancho de solera (b):  m  
Talud (Z):



**Resultados:**

Tirante crítico (y):  m Perímetro (p):  m  
Área hidráulica (A):  m<sup>2</sup> Radio hidráulico (R):  m  
Espejo de agua (T):  m Velocidad (v):  m/s  
Número de Froude (F):  Energía específica (E):  m-Kg/Kg

Ingresar el valor del talud, para taludes diferentes ingresar su promedio 11:14 p. m. 27/12/2025

Figura 11 Datos del problema

9. De esta manera se encuentran los siguientes resultados:

- **Tirante crítico (y):** 0.8555 m
- **Área hidráulica (A):** 4.0303 m<sup>2</sup>
- **Espejo de agua (T):** 6.4220 m
- **Número de Froude (F):** 1.0000
- **Perímetro mojado (p):** 6.8259 m
- **Radio hidráulico (R):** 0.5904 m
- **Velocidad (V):** 2.4812 m/s
- **Energía específica (E):** 1.1693 m

### 5.2.3 Uso de calculadora y Wolfran alfa

A continuación, se desarrollará el mismo ejercicio mediante cálculo manual, utilizando calculadora, y con el apoyo de la herramienta Wolfram Alpha, con el propósito de comparar los resultados obtenidos con aquellos generados a partir de la simulación realizada en el programa H-Canales..

- Cálculo manual: en esta sección se presenta el procedimiento paso a paso para la determinación del tirante crítico y la energía específica mínima correspondientes al problema planteado.

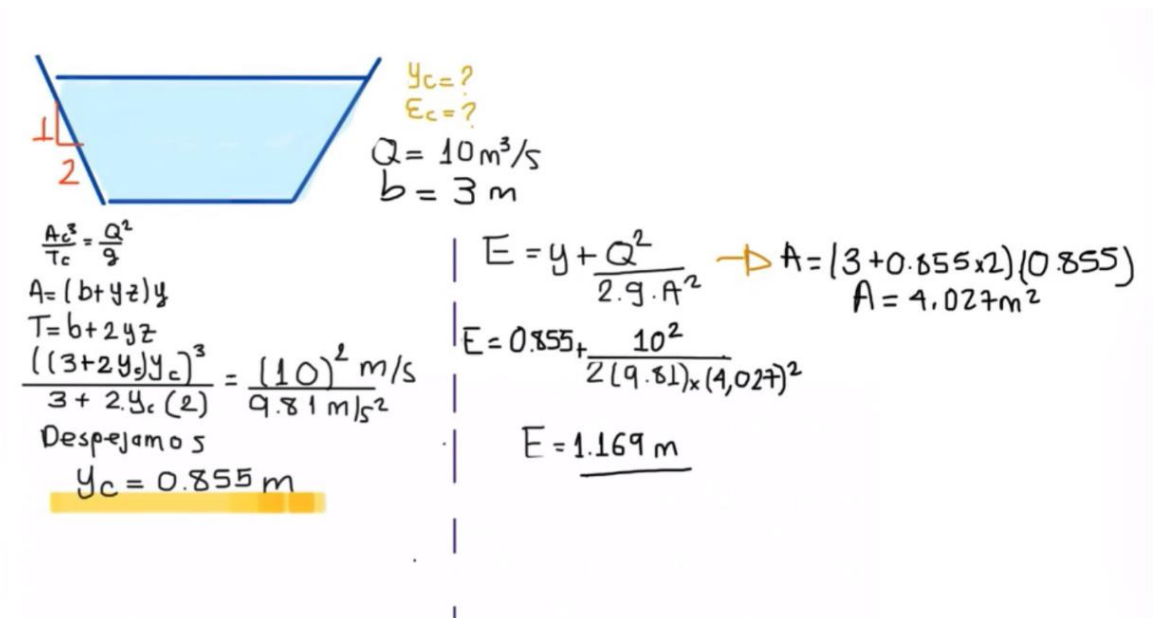


Diagram of a trapezoidal channel with bottom width  $b = 3\text{ m}$  and side slopes of 1 horizontal to 2 vertical. The flow is represented by a blue trapezoid. Handwritten notes indicate  $y_c = ?$  and  $E_c = ?$ .

Given data:  
 $Q = 10\text{ m}^3/\text{s}$   
 $b = 3\text{ m}$

Formulas and calculations:  

$$\frac{A_c^3}{T_c} = \frac{Q^2}{g}$$

$$A = (b + zy)z$$

$$T = b + 2yz$$

$$\frac{((3 + 2y_c)y_c)^3}{3 + 2y_c(2)} = \frac{(10)^2\text{ m}^3/\text{s}}{9.81\text{ m/s}^2}$$

Despejamos  
 $y_c = 0.855\text{ m}$

Calculation of specific energy  $E$ :  

$$E = y + \frac{Q^2}{2g \cdot A^2}$$

$$E = 0.855 + \frac{10^2}{2(9.81)(4.027)^2}$$

$$E = 1.169\text{ m}$$

Intermediate calculation for Area  $A$ :  
 $A = (3 + 0.855 \times 2)(0.855)$   
 $A = 4.027\text{ m}^2$

Figura 13 Cálculos del problema propuesto

- Uso de Wolfram Alpha: posteriormente, se ingresa a la plataforma y, en el campo denominado “escriba lo que quiera calcular”, se introduce la ecuación formulada para el análisis del ejercicio.



Figura 14 Ecuación en Wolfram Alpha

- Una vez ingresada la ecuación, se procede a ejecutar el cálculo para obtener los resultados numéricos correspondientes.

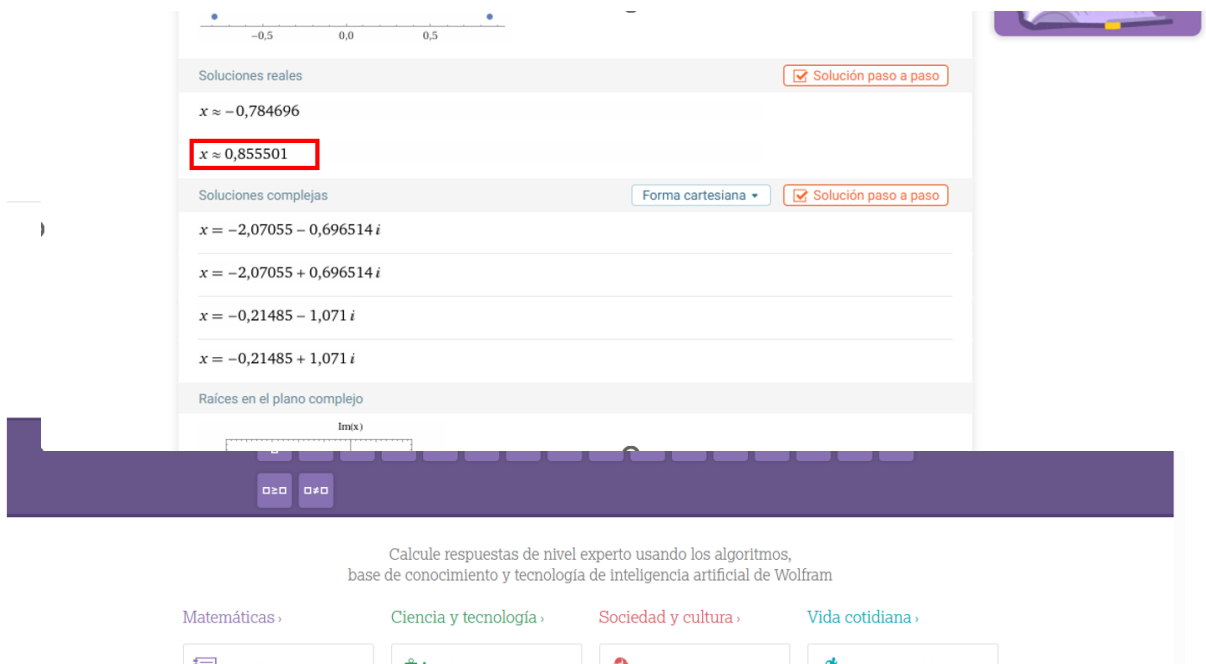


Figura 15 Resultados Wolfram Alpha

- Al resolver la ecuación en Wolfram Alpha se obtuvieron varias soluciones; sin embargo, las raíces complejas y la raíz real negativa se descartan por no tener significado físico. Por tanto, se adopta como solución válida la única raíz real positiva, correspondiente al tirante crítico, con un valor de  $Y_c=0,8555m$ .

- **Uso de la calculadora:**
- ✓ Se introduce la ecuación correspondiente.

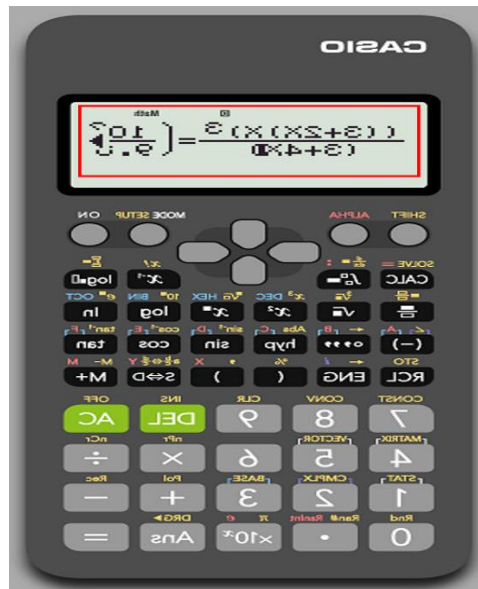


Figura 16 Ecuación

- ✓ Luego, se presiona Shift + Solve

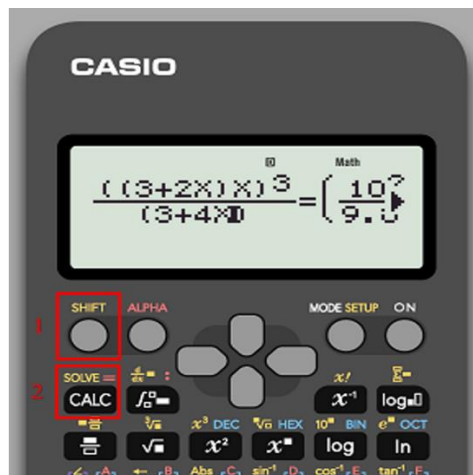


Figura 16 Resolución del problema por calculadora

- ✓ A continuación, se selecciona la opción número 1.





Figura 16 Resolución del problema por calculadora

- ✓ Finalmente, se obtiene el valor de  $X = 0.855501742$ .



Figura 16 Resolución del problema por calculadora

### 5.3 Video de la simulación

- A continuación, se incluye el enlace del video de la simulación, el cual hace parte de una serie de tutoriales de apoyo para el uso del programa computacional.
- Enlace del video: <https://youtu.be/eQUECRd7gZo?si=oxfx87CZUyFINwtP>

## 6. Descripción del entregable

### 6.1 Entregables de la simulación inicial

Se debe entregar un documento en formato PDF que contenga capturas completas de la pantalla del escritorio (no solo una sección del programa) durante las siguientes etapas del proceso:

- ✓ La ubicación del programa H-Canales en el ordenador, ya sea en la ruta indicada previamente o según lo indicado en el apartado superior.
- ✓ La visualización de la ventana correspondiente al cálculo del tirante hidráulico.
- ✓ La ventana donde se muestran los resultados obtenidos.
- ✓ La ventana donde se ingresa la ecuación en Wolfram Alpha y, posteriormente, los resultados obtenidos.
- ✓ Evidencia fotográfica del uso de la calculadora.

### 6.2 Preguntas de análisis

1. Con base en el marco teórico desarrollado en este documento, realice el bosquejo de la curva de energía específica correspondiente al problema planteado, identificando y describiendo cada una de sus partes. Presente el procedimiento paso a paso y exponga las conclusiones derivadas del desarrollo de este primer punto y de los resultados obtenidos.
2. Considere ahora una sección transversal rectangular. Explique el procedimiento para llevar a cabo la simulación utilizando el mismo caudal y ancho de solera, variando únicamente el valor del talud. Posteriormente, determine el tirante crítico, la energía específica mínima y la velocidad crítica mediante las ecuaciones presentadas en este documento, y compare estos resultados con los obtenidos en la simulación, para finalmente analizar y concluir sobre las diferencias y comportamientos observados.
3. ¿Por qué, para un mismo valor de energía específica, pueden existir dos profundidades alternas en un canal abierto, cómo se explica este comportamiento a partir de la forma de la curva de energía específica y de la ecuación de continuidad, y de qué manera cada una de estas profundidades se asocia con los regímenes de flujo subcrítico y supercrítico en función de la velocidad, el tirante hidráulico y el número de Froude?



## 7. Referencias Bibliográficas

- Chow, V. T. (1994). *Hidráulica de Canales Abiertos*.  
[https://www.academia.edu/43519012/Ven\\_Te\\_Chow\\_HIDRAULICA\\_DE\\_CANALES\\_ABIERTOS](https://www.academia.edu/43519012/Ven_Te_Chow_HIDRAULICA_DE_CANALES_ABIERTOS)
- Marbello, R. (2005). 3. *Energía específica y flujo crítico*. Universidad Nacional de Colombia.  
<https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/21725/3353962.2005.Parte%207.pdf?sequence=4&isAllowed=y>
- Rojas, P. (2013, julio 25). Descargar Hcanales v3. *Ingeciv*. <https://ingeciv.com/descargar-hcanales-v3/>
- Villón, B. (1995). *Hidráulica de canales*. <https://uis-odilotk-es.bibliotecavirtual.uis.edu.co/.https://pdfb9c6919cf9985b759bfeca2ebb3e1fa1.odilo.us/#/e81c25ea3bb04acc86cfe4f557ac2fae/18955710ff93c4e1ea3445e0c6c773fc3fa6b9587e23c2b8572103ae049747ae>
- Malaver Nieto, E. D. (2023). Desarrollo de simulaciones de modelos hidráulicos como herramienta de soporte de la enseñanza del laboratorio de hidráulica [Trabajo de grado, Universidad Industrial de Santander]. Repositorio institucional UIS.