

# LABORATORIO VIRTUAL PARA EL CÁLCULO DE FENÓMENOS TRANSITORIOS EN REDES DE AGUA A PRESIÓN POR EL MÉTODO DE LAS CARACTERÍSTICAS

Holger Benavides-Muñoz <sup>1</sup>, José Cueva-Torres <sup>2</sup>

Autor para correspondencia: Holger Benavides-Muñoz, Universidad Técnica Particular de Loja – UTPL, Sección de Recursos Hídricos, Departamento de Geología y Minas e Ingeniería Civil. e-mail: hmbenavides@utpl.edu.ec

<sup>1</sup> Sección de Recursos Hídricos, Departamento de Geología y Minas e Ingeniería Civil, Universidad Técnica Particular de Loja – UTPL.

<sup>2</sup> Ingeniero Civil por la Universidad Técnica Particular de Loja – UTPL.

Manuscrito recibido el 25 de septiembre de 2015    Aprobado tras revisión el 22 de noviembre de 2017

## RESUMEN

Los fenómenos transitorios hidráulicos pueden suscitar grandes daños a los sistemas de tuberías a presión destinadas al transporte de agua; es por ello que además de estudiar dichos sistemas en régimen estacionario o permanente, se deben analizar en régimen transitorio o modelo elástico, con el propósito de anticipar matemáticamente los efectos que produce el golpe de ariete, sobrepresiones y subpresiones que pueden llegar a destruir las tuberías, sea por explosión o por aplastamiento, respectivamente. En el estudio del modelo elástico se utilizan métodos numéricos y gráficos, el más divulgado para analizar la evolución del transitorio hidráulico en los sistemas a presión es el método de las características, el cual evalúa dos variables importantes (presión y caudal) a través del tiempo. En esta investigación se utiliza el método de las características para el análisis del transiente hidráulico. Como resultado de este estudio se genera una herramienta virtual denominada Hydrotransis v 1.0, la misma que ejecutado libremente -en línea- desde el portal del Laboratorio Virtual de Fluidos, Hidráulica y Eficiencia Energética – FHEEL-V, permite analizar el comportamiento de los fenómenos transitorios en tuberías. Hydrotransis v 1.0 se compone de dos módulos: transitorios hidráulicos para una línea de conducción simple y transitorios hidráulicos en sistemas de bombeo. Se trata de una aplicación informática dinámica, en la cual se observa de manera gráfica y numérica la evolución espacio-temporal del transiente hidráulico.

**Palabras clave:** Transitorio hidráulico, cálculo de transiente, golpe de ariete, Hydrotransis, herramienta virtual.

## ABSTRACT

Transient hydraulic phenomena can cause great damage to pressure pipe systems intended for water transport; that is why in addition to studying these systems in stationary or permanent regime they should be analyzed in transient or elastic model, in order to anticipate mathematically the effects of water hammer, overpressure and underpressure that can destroy the pipes, either by explosion or by crushing, respectively. In the study of the elastic model, numerical and graphical methods are used, the most disclosed to analyze the evolution of the hydraulic transient in pressure systems is the method of characteristics, which evaluates two important variables (pressure and flow) through time. In this research, the method of characteristics is used for the hydraulic transient analysis. As a result of this study, a virtual tool called Hydrotransis v 1.0 is generated, it is freely executed -online- from the portal of the Virtual Laboratory of Fluids, Hydraulics and Energy Efficiency - FHEEL-V, allowing to analyze the behavior of transitory phenomena in pipes. Hydrotransis v 1.0 is composed of two modules: hydraulic transients for a simple driving line and hydraulic transients in pumping systems. It is a dynamic computer application, in which the spatio-temporal evolution of the hydraulic transient is observed graphically and numerically.

**Keywords:** Hydraulic transient, transient calculation, water hammer, Hydrotransis, virtual tool.

## INTRODUCCIÓN

El diseño de tuberías a presión debe incluir el cálculo de los efectos que pueden generar los fenómenos hidráulicos que afectan directamente su funcionalidad durante la vida útil para la cual se proyectan. Entre los fenómenos hidráulicos que se deben considerar están los transitorios o golpe de ariete originados por las severas variaciones de presiones a lo largo de la línea. Su cálculo iterativo se resuelve mediante el aprovechamiento de herramientas informáticas que facilitan alcanzar el resultado en cortos períodos de cálculo.

Son graves las consecuencias de un fenómeno transitorio para una línea hidráulica presurizada que no se dimensionó para soportarlo o prevenirlo adecuadamente; y, con frecuencia son del tipo permanente, debido a la acción cíclica de sobrepresiones y subpresiones que soportan las tuberías.

A nivel profesional y formativo existen pocas herramientas informáticas de acceso libre que permitan efectuar simulación de transitorios en tuberías; las que existen mayoritariamente son bajo licencia de pago, cuyos costos -la mayoría de las veces- superan los presupuestos del cual podrían disponer los interesados. Algunas de estas aplicaciones son: KYPipe:Surge, Ariete-HidraSoftware, PipeNet – Transient, Allievi y Hammer, entre otros.

El presente estudio propone desarrollar una herramienta virtual de libre acceso para el cálculo de fenómenos transitorios en líneas hidráulicas por el método de las características para sistemas presurizados mediante estaciones de bombeo y “a gravedad”.

## Método de las características

### Modelo elástico.- Integración numérica de las ecuaciones básicas de un transitorio hidráulico

Las perturbaciones por transitorios hidráulicos de un flujo en sistemas de tuberías a presión provocan cambios de la velocidad, presión, densidad del fluido y de la sección viva. Las ecuaciones 01 y 02 representan dicha evolución (Izquierdo, Pérez e Iglesias, 2004).

$$p = p(x, t) \quad (01)$$

$$V = V(x, t) \quad (02)$$

Se trata de ecuaciones en derivadas parciales que rigen el fenómeno y que se obtienen al aplicar balances de masa y fuerza a un volumen diferencial de la conducción. Para realizar el balance diferencial de masa se parte de la ecuación de continuidad expresada en forma diferencial según la ecuación 03 (Liu, *et al.*, 2014).

$$\frac{g}{\alpha^2} \frac{dH}{dt} + \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{g}{\alpha^2} V \sin \theta = 0 \quad (03)$$

El balance diferencial de fuerzas se analiza con la ecuación 04 de la cantidad de movimiento en forma diferencial (Meniconi, Brunone, Ferrante y Massari, 2014).

$$\frac{dV}{dt} + f \frac{V|V|}{2D} + g \frac{\partial H}{\partial x} = 0 \quad (04)$$

El método de las características es un algoritmo para el cálculo de flujos transitorios (Liu, *et al.*, 2014) (Carlsson, 2016). Las ecuaciones 03 y 04 expresadas en función del caudal (Q) dan origen a las ecuaciones 05 y 06; la altura piezométrica y la velocidad del flujo se pueden modelar mediante las ecuaciones en derivadas parciales del golpe de ariete, basadas en la conservación de la masa y cantidad de movimiento (Wylie, Streeter y Suo, 1993) (Sadafi, Riasi, Nourbakhsh, 2012) (Van Pham *et al.*, 2014):

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\alpha^2}{gA} \frac{\partial H}{\partial x} = 0 \quad (05)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{fQ|Q|}{2DA} = 0 \quad (06)$$

A partir de las ecuaciones 05 y 06 se realiza la integración numérica (Elaoud y Hadj-Taïeb, 2011). Las notaciones 07 y 08 se aplican para simplificar dicha integración.

$$C_a = \frac{gA}{a} \tag{07}$$

$$R = \frac{f}{2DA} \tag{08}$$

Las ecuaciones 09 y 10 representan las características positiva y negativa, (Rohani y Afshar, 2010); y permiten obtener los valores de H y Q en un punto.

Característica positiva (C+)

$$C_p = Q_{i-1,j} + C_a \times H_{i-1,j} - R \times Q_{i-1,j} \times |Q_{i-1,j}| \times (\Delta t) \tag{09}$$

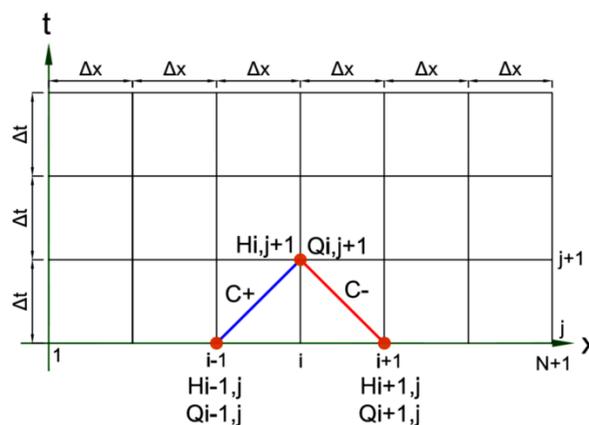
Característica negativa (C-)

$$C_n = Q_{i+1,j} - C_a \times H_{i+1,j} - R \times Q_{i+1,j} \times |Q_{i+1,j}| \times (\Delta t) \tag{10}$$

La expresión 11 permite obtener el caudal (Q) en función del promedio de las dos características.

$$Q(P) = \frac{C_p + C_n}{2} \tag{11}$$

Con la combinación lineal de las ecuaciones 09 y 10, se describe la perturbación a lo largo de las características positivas y negativas (Riasi, Nourbakhsh y Raisee, 2013) (Carlsson, 2016). Ver figura 1.



**Figura 1**

Esquema de las rectas características

**Fuente**

(Rohani & Afshar, 2010)  
(Riasi, Nourbakhsh y Raisee, 2013) (Carlsson, 2016)

En la intersección de las dos líneas, los valores de las dos incógnitas (H y Q) satisfacen ambas ecuaciones que las contienen (Provenzano, 2013).

### Sistema equivalente

Las características equivalentes de un conducto se determinan con las ecuaciones 12, 13 y 14. La longitud total L se asigna directamente a la sumatoria de todos los tramos en los que se

divide la línea hidráulica,  $L = \sum L_j$ ; el tiempo invertido por la onda de presión en recorrer la tubería real,  $\sum(L_j/a_j)$ , debe coincidir con aquel que se invierte en el conducto equivalente, para ello se define una celeridad también equivalente,  $a_e$ , (ecuación 12) que hace que dicho tiempo sea  $L/a_e$  (Kodura y Weinerowska, 2005).

$$a_e = \frac{L}{\sum \frac{L_j}{a_j}} \quad (12)$$

El diámetro equivalente,  $D_e$ , se determina con la expresión 13; así se consigue que la masa del fluido en la longitud  $L$  tenga la misma cantidad de movimiento que el fluido en la tubería real.

$$D_e^2 = \frac{L}{\sum \frac{L_i}{D_i^2}} \quad (13)$$

Para que las pérdidas en ambos casos coincidan, se define un factor de fricción equivalente,  $f_e$ , mediante la ecuación 14.

$$f_e = \frac{D_e^5}{L} \sum \left( \frac{f_i L_i}{D_i^5} \right) \quad (14)$$

Otras dos expresiones importantes para el análisis de transientes son: *la celeridad y el pulso de Jowkowski* (Tijsseling & Anderson, 2007) (Stokes, Miller y Hocking, 2016), con base en el balance integral de fuerzas que parte de la ecuación integral de la cantidad de movimiento en un volumen de control determinado (Abreu, Guarga e Izquierdo, 1995) de este balance integral se obtiene la expresión 15.

$$\Delta p = \alpha \rho \Delta V \quad (15)$$

En función de las propiedades del agua, se obtiene la ecuación 16:

$$\Delta p = \frac{\alpha}{g} \Delta V \quad (16)$$

En 1878, Korteweg propuso la ecuación de la velocidad de onda de presión para un flujo a presión, desarrolló un balance de volúmenes, en el cual se considera que la longitud de onda es mucho más grande que el diámetro interno, introduce las propiedades elásticas del fluido y de la tubería que lo contiene y desprecia los esfuerzos longitudinales sobre la pared del tubo (Abreu, Guarga e Izquierdo, 1995). De este balance de volúmenes se obtiene la expresión (17) (Wylie, Streeter y Suo, 1993) (Meniconi, Brunone y Ferrante, 2012) (Pandit, Oka, Shigeta y Watanabe, 2014) (Sánchez-Barra, Nicolás López y Valdiviezo-Mijangos, 2016) (Stokes, Miller y Hocking, 2016).

$$a = \frac{\sqrt{\frac{K}{\rho}}}{\sqrt{1 + \frac{K D}{E e}}} \quad (17)$$

Además del método de las características existen dos fórmulas para calcular la sobrepresión que se genera en las tuberías, la fórmula de Jules Michaud, propuesta en 1858 (Anderson, 1976), y la fórmula de Allievi propuesta en 1902 (Tijsseling y Anderson, 2007) (Kaless, 2016).

La ecuación (18) de Michaud es utilizada para calcular la sobrepresión cuando el cierre es lento

$\left(T > \frac{2L}{a}\right)$ . T es el tiempo de cierre de la válvula.

$$\Delta H = \frac{2 L V}{g T} \quad (18)$$

Cuando el cierre es rápido  $\left(T < \frac{2L}{a}\right)$  el valor de la sobrepresión es independiente de la longitud, (ecuación 19).

$$\Delta H = \frac{a V}{g} \quad (19)$$

La fórmula de Michaud se iguala a la de Allievi cuando el tiempo de cierre es el crítico, es decir para:  $T_c = \frac{2L}{a}$  (Bergant, Simpson y Vitkovsky, 2001).

## Caso de estudio con Hydrotransis

En la tabla 1 se detallan las características físicas e hidráulicas de una conducción propuesta para desarrollar el cálculo transitorio con la aplicación virtual Hydrotransis v 1.0.

**Tabla 1.**  
*Características iniciales de la conducción propuestas para este cálculo*

Longitud (L)	2000.00 m
Diámetro (D)	40.00 mm
Coefficiente de pérdidas (f)	0.02
Celeridad (a)	1000.00 m/s
Tiempo de cierre total de válvula (t)	2.00 s
Caudal (Q)	0.002 m <sup>3</sup> /s

Durante los dos segundos del tiempo de cierre de la válvula, la ley de cierre controla el caudal, de modo que éste disminuye linealmente con el tiempo. Se requiere efectuar el cálculo para obtener resultados en cinco nudos.

*Cálculo del régimen permanente*

Se determina la velocidad por continuidad.

$$V = \frac{4Q}{\pi D^2} = \frac{4(0.002)}{\pi(0.04)^2} = 1.59 \text{ m/s}$$

Se considera para este caso que la carga de velocidad es despreciable.

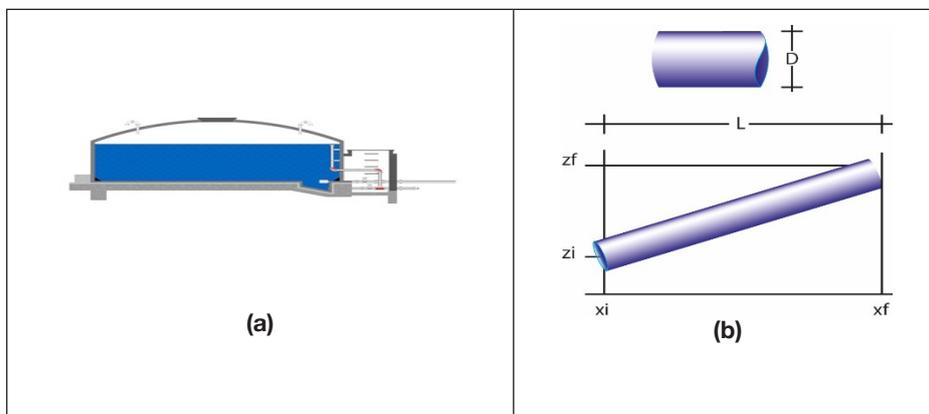
Línea de altura piezométrica, indica la altura de presión del fluido más la altura geométrica ( $\frac{p}{\gamma} + Z$ ) (White, 2011) (Gulbahar, 2016). Para obtener la línea de altura piezométricas se calcula las pérdidas mediante la ecuación de Darcy-Weisbach:  $H_f = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g}$ ; (figura 3).

Para generar cinco nudos se divide la tubería en cuatro tramos iguales (500 m cada uno). En la tabla 2 se presenta un extracto de los resultados del análisis hidráulico en régimen permanente conseguido con Hydrotransis.

Nudo	Nudo 1	Nudo 3	Nudo 5
Abscisa (m)	0.00	1000.00	2000.00
Pérdidas H <sub>f</sub> (m)	0.00	64.42	128.84
H Piezométrica (m)	264.00	199.58	135.16

**Tabla 2**  
Resultados de las piezométricas en régimen permanente, Hydrotransis v 1.0.

Los datos en la aplicación web se ingresan según se muestra un ejemplo en la figura 2.

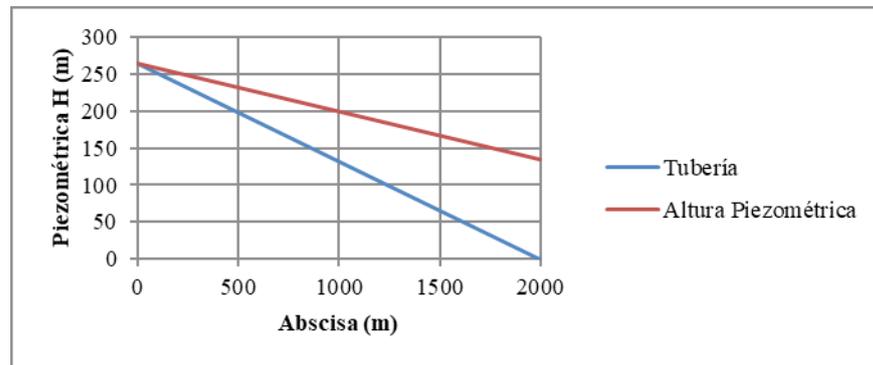


**Figura 2**  
Esquemas de la aplicación Hydrotransis v 1.0 para el ingreso de datos.

- (a) Parámetro de depósito.
- (b) Parámetros de las tuberías.

**Fuente**  
Hydrotransis v 1.0

**Figura 3**  
Perfiles: tubería & altura piezométrica  
**Fuente**  
Hydrotransis v 1.0



*Cálculo simplificado del golpe de ariete*

Determinar si el tiempo de cierre es lento o rápido:

$$T = \frac{2L}{a} = \frac{2 \times 2000}{1000} = 4.00 \text{ s}$$

El tiempo de cierre es de 2 s, que es menor que  $2L/a$ , entonces el cierre es rápido.

Sobrepresión máxima alcanzada: para cierre rápido, entonces la sobrepresión se determina por Allievi.

$$\Delta H = \frac{a V}{g} = \frac{1000 \times 1.59}{9.81} = 162.08 \text{ m}$$

A continuación se determina la longitud crítica ( $L_c$ ):

$$L_c = L - \frac{a t_c}{2} = 2000 - \frac{1000 \times 2}{2} = 1000 \text{ m}$$

Los primeros 1000 m desde la válvula (nudo 5, abscisa 2000 m) experimentan la máxima presión. La línea piezométrica de máximos, se obtiene de sumar la sobrepresión a la altura piezométrica en régimen permanente en el punto de la válvula; siendo esta sobrepresión la que va a soportar los 1000 m de la tubería contados a partir de la válvula.

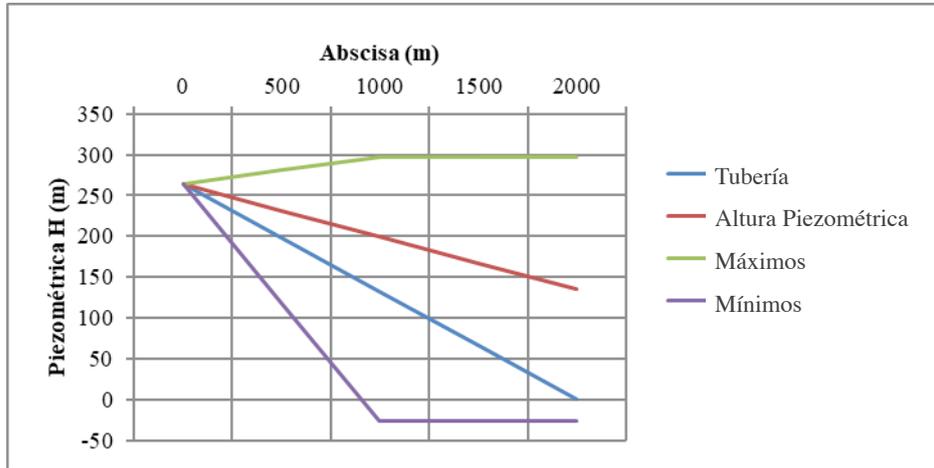
Altura piezométrica de máximos = Altura piezométrica + Sobrepresión

$$= 135.16 + 162.08$$

$$= 297.24 \text{ m}$$

La línea piezométrica de mínimos, se obtiene de restar la sobrepresión a la altura piezométrica en régimen permanente en el punto de la válvula (se desprecia el amortiguamiento del sistema por la fricción) siendo esta sub presión la que va a soportar los 1000 m de la tubería medidos a partir de la válvula (Ver figura 4).

$$\begin{aligned}
 \text{Altura piezométrica de mínimos} &= \text{Altura piezométrica} - \text{Sobrepresión} \\
 &= 135.16 - 162.08 \\
 &= -26.92 \text{ m}
 \end{aligned}$$



**Figura 4**  
 Perfil de la tubería, piezométrica en régimen permanente, valores máximos y mínimos.

**Fuente**  
 Hydrotransis v 1.0

**Cálculo del transitorio. Método de las características.**

El método de las características transforma el sistema de ecuaciones en derivadas parciales del tipo hiperbólico en un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias, que se pueden integrar numéricamente (Bouaziz, Guidara, Schmitt, Hadj-Taieb y Azari, 2014) (Carlsson, 2016).

Para este caso de estudio se consideran cinco nudos que se numeran desde el depósito (nudo 1) y se finaliza en la válvula (nudo 5).

Intervalos de tiempo  $\Delta t$ :

$$\Delta t = \frac{\Delta x}{a} = \frac{500}{1000} = 0.50 \text{ s}$$

Con el intervalo de tiempo se obtienen las condiciones de contorno en los nudos.

**Nudo 1:** La altura piezométrica es constante e igual a la altura del depósito en todo instante.  $H_{i1} = 264.00 \text{ m}$ .

También se necesita la ecuación C- , es decir:

$$C_n = Q_{1(j+1)} - C_a \times H_{1(j+1)} - R \times Q_{1(j+1)} \times |Q_{1(j+1)}| \times \Delta t$$

$$Q_{2j} = C_n + C_a \times H_{2j}$$

Para describir estas ecuaciones se colocan las variables  $Q_{ij}$  y  $H_{ij}$ . El subíndice i señala el tiempo de análisis del transitorio y j el número de nudo.

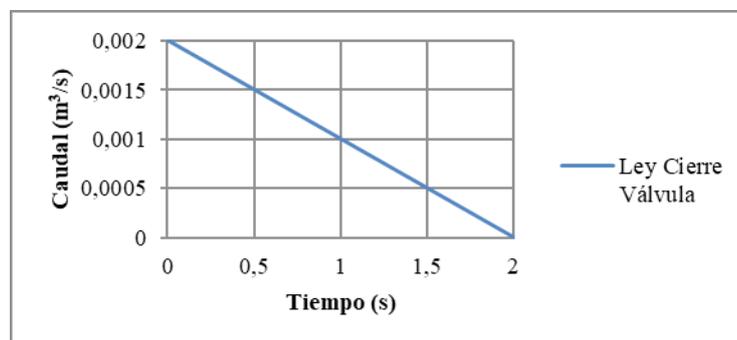
Las constantes  $C_a$  y  $R$  se describen con las ecuaciones 7 y 8

$$C_a := \frac{gA}{a}, \quad R := \frac{f}{2DA}$$

Nudo 5: Para este nudo se necesita una condición de contorno que cumpla con la ley de cierre de la válvula, que en este ejemplo es la disminución lineal del caudal con el tiempo, según figura 5.

$$\text{Si } t \leq 2 \text{ s} \rightarrow Q = 0.002 - 0.001t$$

$$\text{Si } t > 2 \text{ s} \rightarrow Q = 0$$



**Figura 5**  
Ley de cierre de la válvula.

**Fuente**  
Hydrotransis v 1.0

Y también en este nudo se necesita la ecuación  $C^+$  es decir:

$$C_p = Q_{1(j-1)} + C_a * H_{1(j-1)} - R * Q_{1(j-1)} * |Q_{1(j-1)}| * \Delta t$$

$$H_{2j} = \frac{(C_p - Q_{2j})}{C_a}$$

Nudos internos 2 a 4: Para los nudos internos se utilizan las ecuaciones  $C^-$  y  $C^+$ , es decir:

$$C_n = Q_{1(j+1)} - C_a \times H_{1(j+1)} - R \times Q_{1(j+1)} \times |Q_{1(j+1)}| \times \Delta t \tag{20}$$

$$C_p = Q_{1(j-1)} + C_a \times H_{1(j-1)} - R \times Q_{1(j-1)} \times |Q_{1(j-1)}| \times \Delta t \tag{21}$$

$$Q_{2j} = \frac{(C_p + C_n)}{2} \tag{22}$$

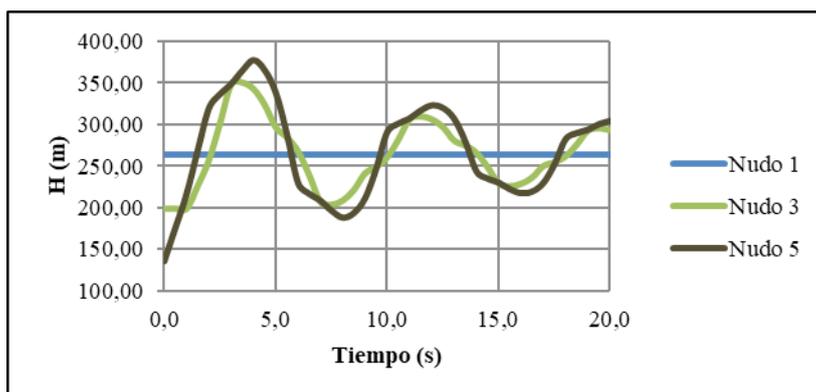
$$H_{2j} = \frac{(Q_{2j} - C_n)}{C_a} \tag{23}$$

Tiempo	Variable	Nudo 1	Nudo 3	Nudo 5
0.0	H (m)	264.00	199.58	135.16
	Q (m³/s)	0.0020	0.0020	0.0020
0.5	H (m)	264.00	199.58	175.65
	Q (m³/s)	0.0020	0.0020	0.0015
1.0	H (m)	264.00	199.58	216.17
	Q (m³/s)	0.0020	0.0020	0.0010
1.5	H (m)	264.00	227.06	268.64
	Q (m³/s)	0.0020	0.0017	0.0005
2.0	H (m)	264.00	257.72	318.83
	Q (m³/s)	0.0020	0.0013	0.0000
...	...	...	...	...
	...	...	...	...
4.0	H (m)	264.00	342.72	376.78
	Q (m³/s)	-0.0007	-0.0001	0.0000
...	...	...	...	...
	...	...	...	...
12.0	H (m)	264.00	306.52	322.30
	Q (m³/s)	-0.0003	0.0000	0.0000
...	...	...	...	...
	...	...	...	...
20.0	H (m)	264.00	293.57	303.63
	Q (m³/s)	-0.0002	0.0000	0.0000

**Tabla 3**  
Extracto de resultados del transitorio, variables H y Q, Hydrotransis v 1.0

**Fuente**  
Hydrotransis v 1.0

En la tabla 3 se presenta un extracto de los resultados del transitorio -variables H y Q- obtenidas con Hydrotransis v 1.0; y, con base en dichos valores se obtienen las gráficas representadas en las figuras 6 y 7.

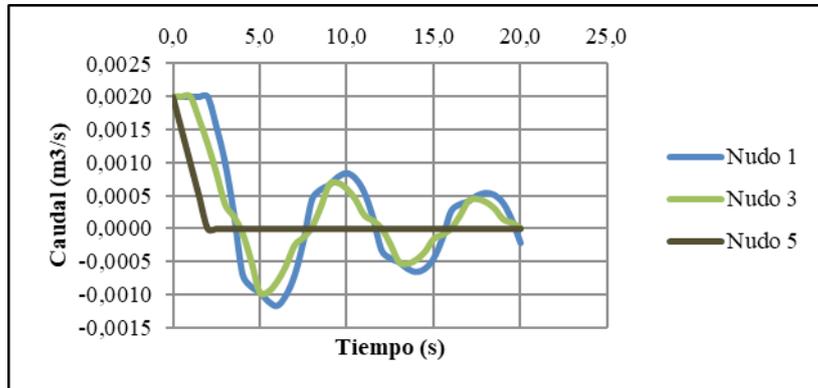


**Figura 6**  
Gráfica de la evolución de la piezométrica en los nudos 1, 3 y 5.

**Fuente**  
Hydrotransis v 1.0

**Figura 7**  
Gráfica de la evolución del caudal en los nudos 1, 3 y 5.

**Fuente**  
Hydrotransis v 1.0



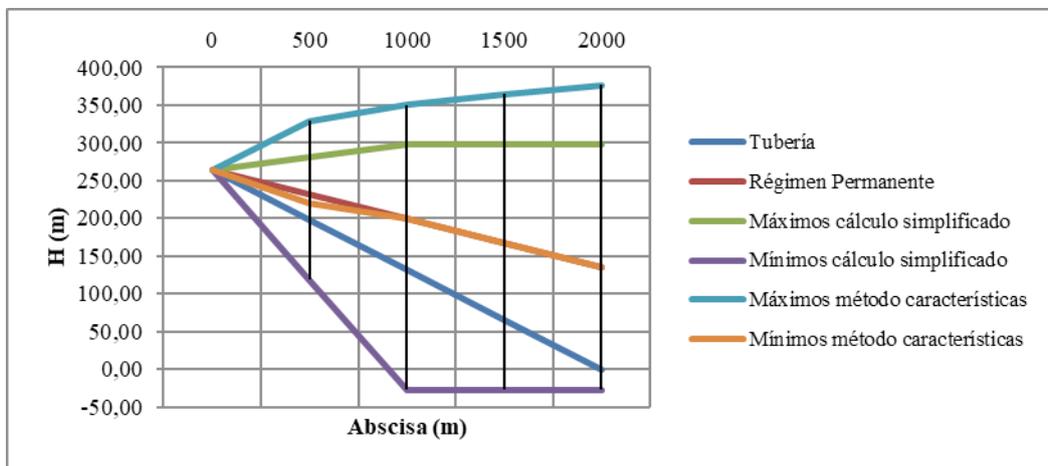
De las figuras 6 y 7, se observa que el periodo de oscilación de las ondas de presión es de 8 segundos,  $\cong 4 L/a$ , también se distingue la amortiguación de las ondas de presión, debido a la fricción con las paredes de las tuberías, en el nudo 5 (válvula) el primer incremento de presión alcanza los 376.78 m a los 4 s, luego en el siguiente período alcanza los 322.30 m.

### Resultados y discusión

A continuación se compara el resultado del método de cálculo simplificado con el resultado del método de las características. En la figura 8 se sobreponen las dos gráficas correspondientes.

**Figura 8**  
Gráfica de los valores máximos y mínimos (MOC y Método Simplificado).

**Fuente**  
Hydrotransis v 1.0

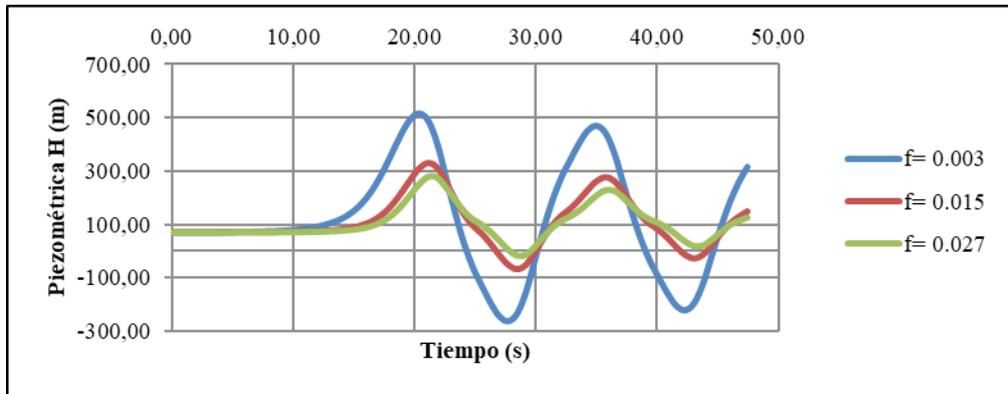


De la figura 8 se deduce que en el método de cálculo simplificado (MCS) existiría cavitación a lo largo de toda la tubería, mientras que por el método de las características (MOC) la línea piezométrica de régimen permanente coincide con la línea de piezométrica mínima, por lo que el cálculo del fenómeno hidráulico por el MCS resulta complejo de interpretar y también inconsistente al momento de dar una solución real que ayude al diseño de la tubería para soportar el transiente.

### Comparación de variables físicas e hidráulicas en el MOC

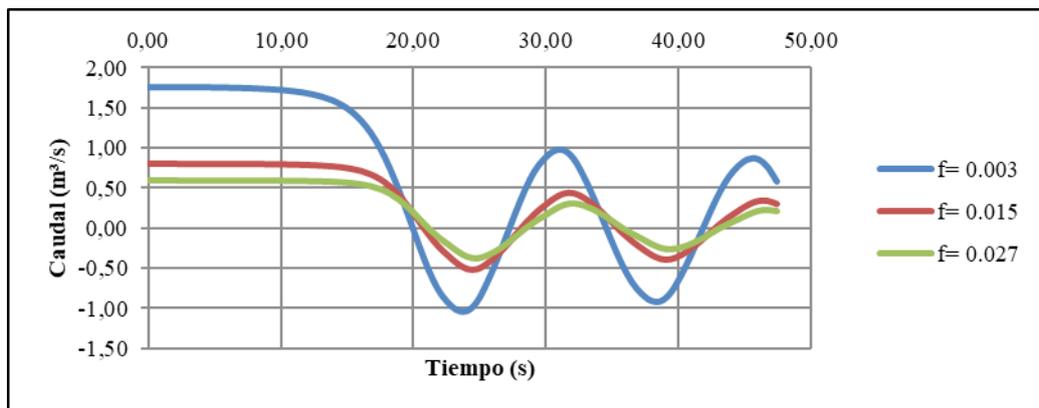
Seguidamente se compara la influencia que tienen las variables físicas del sistema en el transitorio hidráulico al utilizar el método de las características. Entre dichas variables constan: el factor de fricción ( $f$ ), el diámetro de la tubería ( $D$ ), la celeridad ( $a$ ) y el espesor de la pared de la tubería ( $e$ ).

Comparación de resultados por la variación del factor de fricción. Ver resumen gráfico en las figuras 9 a 14.



**Figura 9**  
Gráfica de la evolución de la altura piezométrica modificando la fricción en el nudo 3

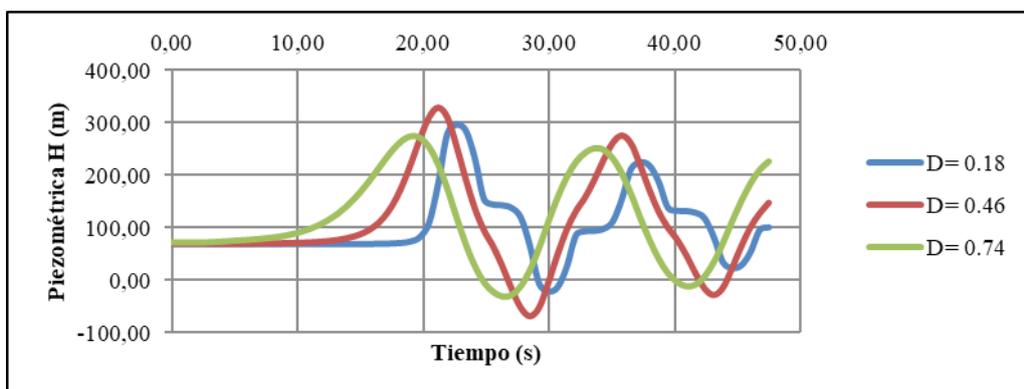
**Fuente**  
Hydrotransis v 1.0



**Figura 10**  
Gráfica de la evolución del caudal modificando la fricción en el nudo 3

**Fuente**  
Hydrotransis v 1.0

Se observa que la evolución del caudal se modifica según la fricción y el tiempo.

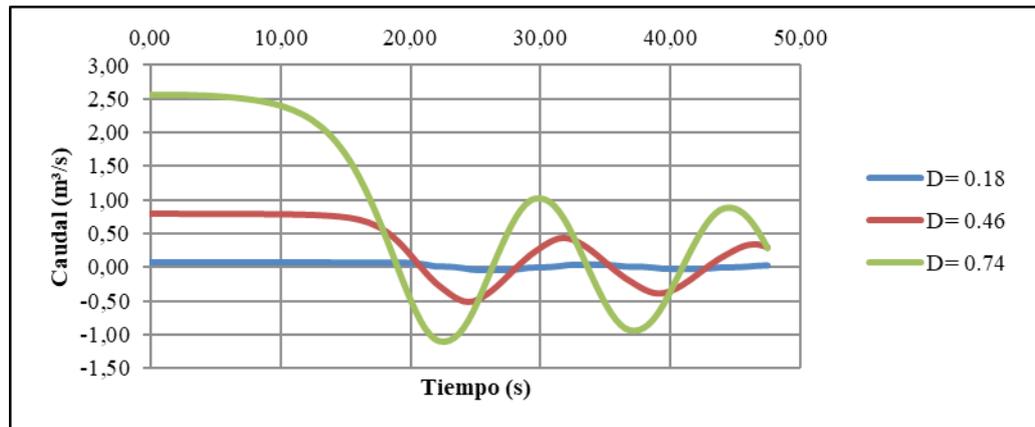


**Figura 11**  
Gráfica de la evolución de la altura piezométrica modificando el diámetro en el nudo 3

**Fuente**  
Hydrotransis v 1.0

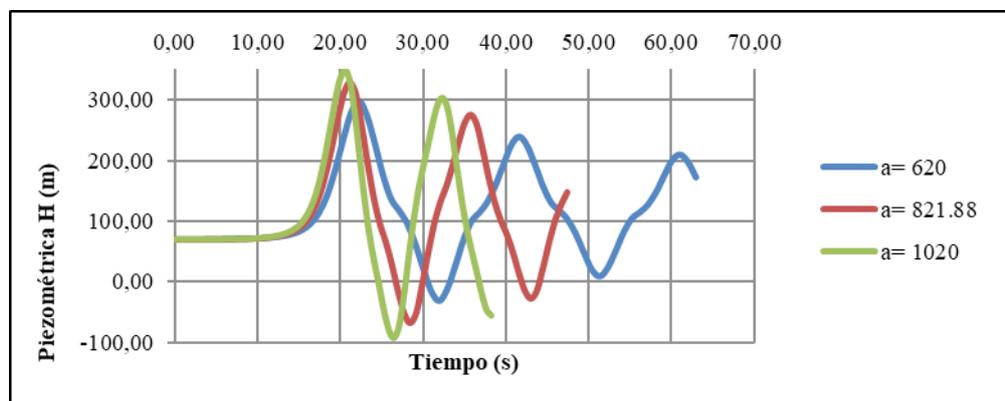
Se observa en la figura 11 que la altura piezométrica varía de acuerdo al valor del diámetro y el tiempo.

**Figura 12**  
Gráfica de la evolución del caudal modificando el diámetro en el nudo 3  
**Fuente**  
Hydrotransis v 1.0



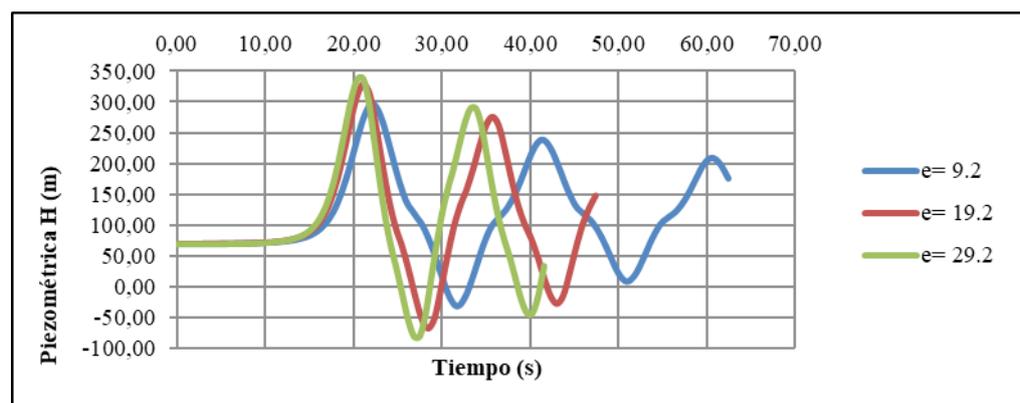
La figura 12 evidencia que la evolución del caudal se modifica por el diámetro y el tiempo.

**Figura 13**  
Gráfica de la evolución de la altura piezométrica modificando la celeridad en el nudo 3  
**Fuente**  
Hydrotransis v 1.0



Se observa en la figura 13 que la altura piezométrica varía en el tiempo según el valor de celeridad.

**Figura 14**  
Gráfica de la evolución de la altura piezométrica modificando el espesor de la pared en el nudo 3  
**Fuente**  
Hydrotransis v 1.0



La figura 14 muestra que la altura piezométrica varía con el espesor de la pared y al tiempo.

## CONCLUSIONES

El aprovechamiento efectivo de algoritmos y combinaciones matemáticas así como el acceso a herramientas informáticas hacen que sea más práctica y efectiva la programación de aplicaciones web para analizar fenómenos transitorios en sistemas hidráulicos por el método de las características.

En el presente estudio se desarrolló una herramienta virtual de libre acceso que permite calcular fenómenos transitorios en líneas hidráulicas presurizadas por el método de las características (MOC); el acceso a dicha plataforma es a través de la página del Laboratorio Virtual de Fluidos Hidráulica y Eficiencia Energética -FHEEL-V (<http://www.fheel-v.utpl.edu.ec>).

Hydrotransis v 1.0 permite observar la evolución del transitorio a través del tiempo en una conducción simple con nudo de altura conocido, presurizada “a gravedad” desde un depósito y cuyo último nudo es una válvula. Así mismo permite analizar la evolución temporal del transitorio en un sistema de bombeo (impulsiones), frente a un paro o arranque brusco del grupo motor-bomba.

## Nomenclatura:

- a: Celeridad de la onda de presión.
- A: Área de la tubería.
- D: Diámetro interno de la tubería.
- E: Módulo de elasticidad de la tubería o módulo de Young.
- e: Espesor de las paredes de la tubería.
- f: Factor de fricción de Darcy.
- K: Módulo de compresibilidad volumétrico del fluido
- Q: Caudal en régimen permanente
- $Q_{(i+1,j)}$ : Caudal en un espacio y tiempo determinado.
- $H_{(i+1,j)}$ : Altura piezométrica en un espacio y tiempo determinado.
- $\Delta t$ : Incremento del tiempo.
- $\Delta p$ : Incremento de la presión o pulso de Joukowski.
- $\Delta V$ : Variación de la velocidad (En algunos casos bruscos  $\Delta V=V_0 - 0$ ).

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abreu, J.; Guarga, R.; Izquierdo, J. (1995). *Transitorios y Oscilaciones en Sistemas de Impulsión*. Caps. 1; 2; 7. Unidad Docente Mecánica de Fluidos, Dpto. Ing. Hidráulica y Medio Ambiente, Universidad Politécnica de Valencia – España.
- Anderson, A. (1976). Menabrea's note on waterhammer: 1858. Research Student, Dept. of Engrg., Marischal Coll., Univ. of Aberdeen, Aberdeen, Scotland. *Journal of the Hydraulics Division*, 102, (1), 29-39. doi: <http://dx.doi.org/10.1061/JYCEAJ.0003646>
- Bergant, A., Simpson, A., Vitkovsky, J. (2001). Developments in unsteady pipe flow friction modelling. *Journal of Hydraulic Research, International Association of Hydraulic Research*. 39 (3), 249–257.

- Bouaziz, M.A.; Guidara, M.A.; Schmitt, C.; Hadj-Taïeb, E. & Azari, Z. (2014). Water hammer effects on a gray cast iron water network after adding pumps. *Journal Engineering Failure Analysis*, 44, 1-16. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.1016/j.engfailanal.2014.04.023>
- Carlsson, J. (2016). Water Hammer Phenomenon Analysis using the Method of Characteristics and Direct Measurements using a “stripped” Electromagnetic Flow Meter. Royal Institute of Technology: Estocolmo, Suecia.
- Elaoud, S.; Hadj-Taïeb, E. (2011). Influence of pump starting times on transient flows in pipes. *Journal of Nuclear Engineering and Design*, 241, 3624-3631. doi:10.1016/j.nucengdes.2011.07.039
- Gulbahar, N. (2016). Planning and Design Principles of Transmission Line in Water Supply Project. *International Journal of Engineering Technologies*, 2 (1), 22-28. doi: 10.19072/ijet.75015
- Hydrotransis v 1.0 (2013). Aplicación web para el cálculo de fenómenos transitorios en redes a presión para distribución de agua potable urbana por el método de las características. Laboratorio Virtual de Fluidos, Hidráulica y Eficiencia Energética - FHEEL-V. Recuperado de <http://www.fheel-v.utpl.edu.ec>.
- Izquierdo, J.; Pérez, R.; Iglesias, P.L. (2004). Mathematical models and methods in the water industry. *Mathematical and computer modelling*, 39, 1353-1374. doi: 10.1016/j.mcm.2004.06.012
- Kaless, G. (2016). Una nueva aproximación para la evaluación del golpe de ariete incluyendo la condición inicial de presurización de la instalación y del fluido. *Ingeniería del agua*, 20 (2), 59-72.
- Kodura, A., & Weinerowska, K. (2005). Some aspects of physical and numerical modeling of water hammer in pipelines. *International Symposium on Water Management and Hydraulic Engineering*, 125-133.
- Liu, E.; Zhu, S.; Li, J.; Tang, P.; Yang, Y.; Wang, D. (2014). Liquid Pipeline Transient Flow Analysis. *The Open Fuels & Energy Science Journal*. 7. 9-11.
- Meniconi, S.; Brunone, B.; Ferrante, M.; Massari, C. (2014). Energy dissipation and pressure decay during transients in viscoelastic pipes with an in-line valve. *Journal of Fluids and Structures*, 45, 235-249. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2013.12.013>
- Meniconi, S.; Brunone, B.; Ferrante, M. (2012). Water-hammer pressure waves interaction at cross-section changes in series in viscoelastic pipes. *Journal of Fluids and Structures*, 33, 44-58. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2012.05.007>
- Pandit, S. K., Oka, Y., Shigeta, N., & Watanabe, M. (2014). Comparative efficiencies study of slot model and mouse model in pressurized pipe flow. *Journal of Urban and Environmental Engineering (JUEE)*, 8(1).
- Provenzano P. (2013). Influencia del material de la conducción en el desarrollo del golpe de ariete. *Mecánica Computacional*, XXXII, 1347-1361.

- Riasi, A.; Nourbakhsh, A. & Raisee, M. (2013). Energy dissipation in unsteady turbulent pipe flows caused by water hammer. *Journal Computers & Fluids*, 73. 124-133. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compfluid.2012.12.015>
- Rohani, M.; Afshar, M.H. (2010). Simulation of transient flow caused by pump failure: Point-Implicit Method of Characteristics. *Journal of Annals of Nuclear Energy*, 37. 1742-1750. doi:10.1016/j.anucene.2010.07.004
- Sadafi, M.; Riasi, A.; Ahmad Nourbakhsh, S. (2012). Cavitating flow during water hammer using a generalized interface vaporous cavitation model. *Journal of Fluids and Structures*. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2012.05.014>
- Sánchez-Barra, A. J., Nicolás-López, R., Valdiviezo-Mijangos, O. C., & Camacho-Galván, A. (2016). Dynamic modeling of managed pressure drilling applying transient Godunov scheme. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 6 (2), 169-176.
- Stokes, Y. M., Miller, A., & Hocking, G. (2016). Pressure drop in pipelines due to pump trip event. *ANZIAM Journal*, 57, 163-204.
- Tijsseling, A. & Anderson, A. (2007). Johannes von Kries and the History of Water Hammer. *J. Hydraul. Eng.*, 133 (1), 1–8.
- Van Pham, T.; Georges, D. & Besançon, G. (2014). Predictive Control With Guaranteed Stability for Water Hammer Equations. *IEEE Transactions on automatic control*, 59 (2) pp. 465-470. doi: 10.1109/TAC.2013.2272171
- White FM. (2011). *Fluid Mechanics*, 7th edn. McGraw-Hill Higher Education, New York - USA.
- Wylie, E.B.; Streeter; Suo, Ls. (1993). *Fluid Transient in Systems*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs.