

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA  
XVI CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

## **RÉGIMEN TRANSITORIO EN IMPULSIONES, INFLUENCIA DE LA DESCARGA ATMOSFÉRICA Y SU APROXIMACIÓN A ESTANQUE DE NIVEL CONSTANTE**

LEONARDO CHAMORRO CH.

Ingendesa S.A. lcc@ingendesa.cl

ALEJANDRO CHAMORRO CH.

Dirección de Obras Hidráulicas. alejandro.chamorro@moptt.gov.cl

### **RESUMEN**

Este trabajo aborda la influencia que tiene, en el análisis del régimen transitorio hidráulico, el considerar la condición de borde de descarga atmosférica como un estanque de nivel constante. Lo usual es considerar siempre un estanque en el extremo de aguas abajo, sin embargo desde el punto de vista de la mecánica ondulatoria esto no es estrictamente riguroso ya que la fluctuación transitoria de la cota piezométrica en el extremo no puede ser la misma porque las variaciones o demandas de gasto en el extremo son de distinta naturaleza.

Se utiliza el método de las características para el análisis de las condiciones de descarga atmosférica y la estanque de nivel constante y a partir de un ejemplo arbitrario se analiza la relevancia de tomar una u otra condición.

### **ABSTRACT**

This paper analyzes the importance of using the atmospheric discharge as a constant level reservoir as boundary condition in the analysis of hydraulics transients. Normally, a downstream end reservoir is considered, but from an ondulatory mechanics point of view this is not strictly accurate, because, the transient variation of the piezometric level at the end can not be the same, due to the different origin of the flow variations or requirements.

The atmospheric discharge and the constant level reservoir are analyzed by the method of characteristics method and, from an arbitrary example; the relevance of each boundary condition is also analyzed.



## RÉGIMEN TRANSITORIO EN IMPULSIONES INFLUENCIA DE LA DESCARGA ATMOSFÉRICA Y SU APROXIMACIÓN A ESTANQUE DE NIVEL CONSTANTE

### 1. Introducción

Como es sabido, la evolución espacio temporal de un fenómeno transitorio en un conducto en presión se aborda exitosamente, aún cuando sea de naturaleza compleja, considerando el sistema de ecuaciones de segundo orden en derivadas parciales del tipo hiperbólico que conforman la ecuación de continuidad y la cantidad de movimiento en su forma diferencial.

Esta evolución es absolutamente dependiente de las condiciones de contorno o de borde que se tengan en un sistema general. En particular la descarga directa a la atmósfera a una cota cualesquiera  $H_f$  suele referirse o modelarse comúnmente como un estanque de nivel constante. Esta forma usual de tratar esta condición de borde no es estrictamente rigurosa y esto se puede entender intuitivamente en el hecho de que en la fase de demanda de caudal en el transitorio, el estanque aporta con su carga constante y la descarga atmosférica solo puede producir descenso de nivel en la tubería en relación al caudal temporal requerido, y por consiguiente, las cotas piezométricas no pueden tener un patrón periódico estructuralmente similar. Este hecho puede verse también en forma intuitiva considerando un simple cambio de densidad del medio en que se propaga un pulso, según la teoría de cuerdas.

La condición de borde atmosférica se comporta, durante todas las fases del transitorio, como una chimenea de equilibrio de longitud  $\Delta x$  con posibilidad de vertimiento superior y considerando, por ende, la impulsión con longitud  $L - \Delta x$ .

### 2. Condiciones de borde

Las dos condiciones de borde consideradas tienen un tratamiento numérico distinto, de acuerdo a los esquemas mostrados en la figura,

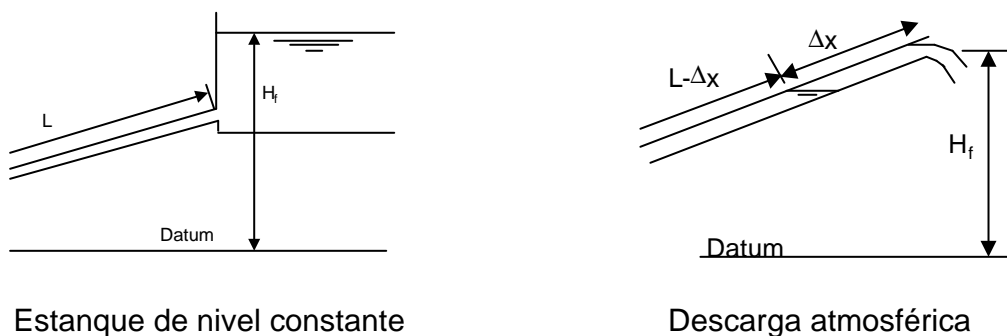
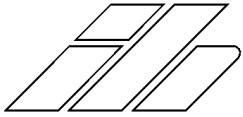


Figura 1 Condiciones de borde



## 2.1 Estanque de nivel constante

Si se supone un estanque a nivel constante aguas abajo y utilizando un esquema de modelación basado en el método de las características, se cumple que:

$$H_p = H_f \quad (1)$$

Donde  $H_f$  es el nivel de aguas del estanque. El caudal  $Q_p$  (en  $t+\Delta t$ ) se determina por la ecuación de la característica positiva:

$$Q_p = C_p - C_a H_f \quad (2)$$

donde

$$C_p = Q_A + \frac{g\Omega}{a} H_A - \frac{f\Delta t}{2D\Omega} Q_A |Q_A| \quad (\text{Característica positiva})$$

$$C_a = \frac{g\Omega}{a}$$

$\Omega$  = Sección de la tubería;  $a$  = celeridad de la onda de presión;  $f$  = factor de fricción y  $D$  = diámetro.

El subíndice  $A$  representa el punto de apoyo de la característica positiva, en el tiempo " $t$ ", sobre la tubería en el cual las variables principales de escurrimiento son conocidas para este instante de tiempo y el subíndice  $p$  representa aquel punto al que se le desea calcular su valor en el instante  $t+Dt$ .

El análisis es conceptualmente el mismo al considerar una pérdida singular a la salida del estanque.

## 2.2 Descarga atmosférica

Formalmente, la ecuación que gobierna la evolución de un conducto con nivel variable y a la atmósfera es:

$$\frac{dH}{dt} - \frac{Q}{A} \left( \frac{1}{gA} \frac{dQ}{dt} + 1 \right) = 0 \quad (3)$$

Cuando la conducción con "chimenea terminal de largo  $\Delta x \rightarrow \delta x$ " puede verter con magnitud  $Q_v$  variable, entonces la ecuación (3) necesariamente debe generalizarse de acuerdo este vertimiento como:

$$\frac{dH}{dt} - \frac{(Q - Q_v)}{A} \left( \frac{1}{gA} \frac{dQ}{dt} + 1 \right) = 0 \quad (4)$$

El caudal vertido  $Q_v$  puede ser evaluado considerando una ecuación de vertedero tipo  $Q_v = f(h=H-Z_v)$ . En el caso particular de una descarga vertical:



$$Q_v = mbh\sqrt{2gh} \text{ con } b \rightarrow (\sqrt{4p\Omega}) \quad (5)$$

### 3. Análisis

Tal como lo muestran las ecuaciones (2) y (4) la condición reflexiva en el extremo no es estrictamente igual, sin embargo para la amplia gama de valores usuales estas no debieran implicar modificaciones relevantes.

El hecho de que la ecuación (4) presente un término másico de pérdida, implica que la evolución temporal se vea (teóricamente) modificada a partir de un tiempo superior a  $t=l/a$  y a partir del cual la sinusoide que forma la cota piezométrica en cualquier punto evoluciona o converge a un nivel más bajo que el dado por el estanque de nivel constante.

En efecto, al suponer la condición de borde estricta de aguas arriba:

$$Q(t) = Q_0 \times m(t) \quad (6)$$

Para  $t \leq l/a$  la evolución espacio temporal del caudal y cota piezométrica es indiferente a la condición de borde de aguas abajo (sea estanque o chimenea). Sin embargo, cuando  $t > l/a$  la condición reflexiva del estanque aporta caudal al sistema de acuerdo a (2) pero en la condición de chimenea (4) la reflexión de caudal se hace necesariamente con descenso de nivel ( $H_d$ ). El descenso está dado directamente con el caudal vertido en el lapso  $t=0^+$  y  $t=l/a$  que lo aporta la compresión de la tubería y la elasticidad del fluido, es decir:

$$Q_0 \frac{L}{a} = H_d \Omega^* \quad (7)$$

es decir, el descenso es:

$$H_d = \frac{Q_0 L}{a \Omega^*} \quad (8)$$

donde  $\Omega^*$  es la proyección horizontal de la superficie de la tubería (obviamente si la descarga es vertical  $\Omega^* = \Omega$ ).

De acuerdo a (8) en la mayoría de los casos prácticos este valor no es importante, siendo aproximadamente 0.5% del largo de la impulsión para tuberías de plástico y 0.15% para tuberías de acero.

El valor indicado en (8) es una muy buena aproximación si la condición de borde de aguas arriba es "cercana" a (6). Sin embargo, en los casos prácticos la condición de borde de aguas arriba no se comporta como el escalón indicado ya que, por ejemplo, en el caso de una bomba la inercia del conjunto hace que el proceso sea gradual aun cuando la inercia del grupo sea baja.



En el caso de un grupo de impulsión, una corrección de primer orden es posible efectuarla utilizando criterios lineales. Así:

$$H_d = \frac{Q_0 L}{a \Omega} m \quad (9)$$

donde:

$$m = \begin{cases} \frac{gH_m}{2kva} & \text{si } a \geq \frac{gH_m}{kv} \\ 1 - \frac{kva}{2gH_m} & \neq \end{cases}$$

$H_m$  : altura manométrica de elevación

$k \approx 2-L/2000$  para  $L < 2000$  y 1 para otro caso.

Es claro que el factor  $\mu$  es estrictamente menor que 1, lo que reduce la magnitud del descenso  $H_d$ .

Al considerar la descarga libre, la cota piezométrica en el entorno de la condición de borde (de aguas abajo) debe responder a 2 factores simultáneos. Por un lado está el hecho que debe tener correspondencia con las variaciones periódicas de nivel que presenta la chimenea y por otro lado debe responder a las condición reflexiva en la base de esta "chimenea". Así, la evolución de la cota piezométrica en el entorno del borde presenta una evolución intermedia entre la evolución con estanque de nivel constante y la sinusoide del nivel de la chimenea. Este hecho puede verse a partir del siguiente ejemplo arbitrario.

Se considera una impulsión cuya condición de borde de aguas arriba es la indicada en (6), razón  $L/a=1$ , altura geométrica  $H_g=160$  m, diámetro  $d=0.5$  m y caudal  $Q_0=0.3$  m<sup>3</sup>/s. En la figura 2 se puede apreciar la evolución temporal de la cota piezométrica considerando los 2 casos, donde se considera una "chimenea vertical terminal" de longitud  $\Delta x = 5$  m.

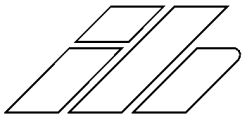
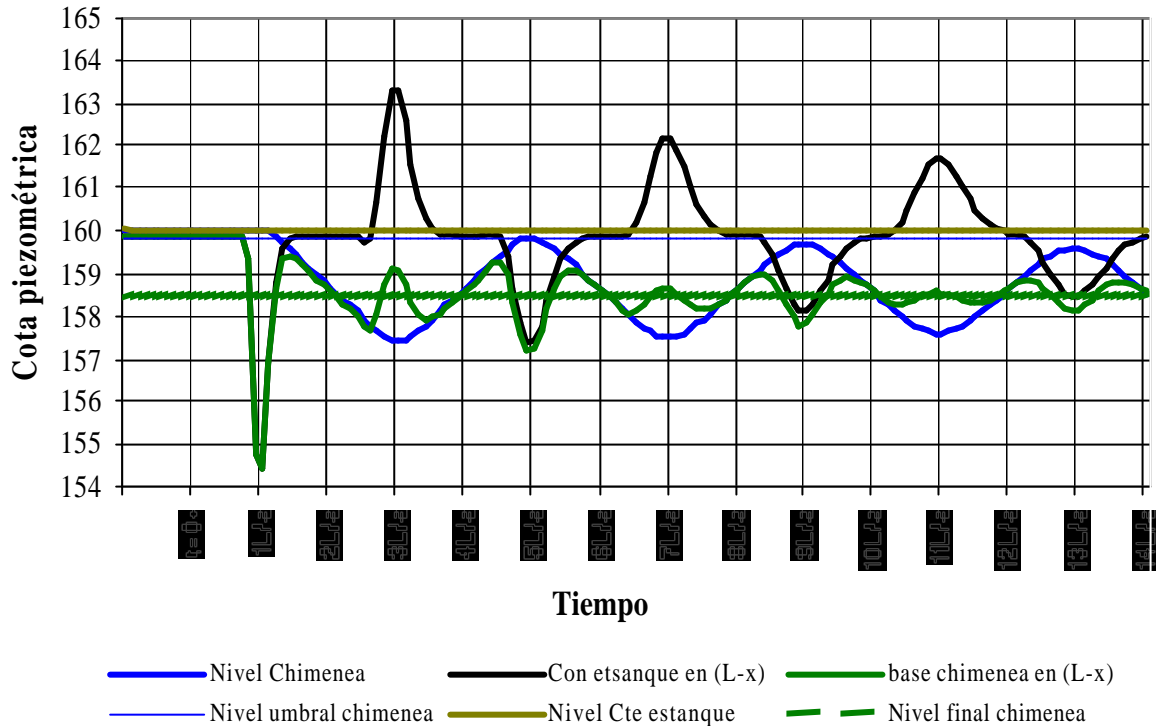


Figura 2 Evolución de la cota piezométrica con estanque y “chimenea”



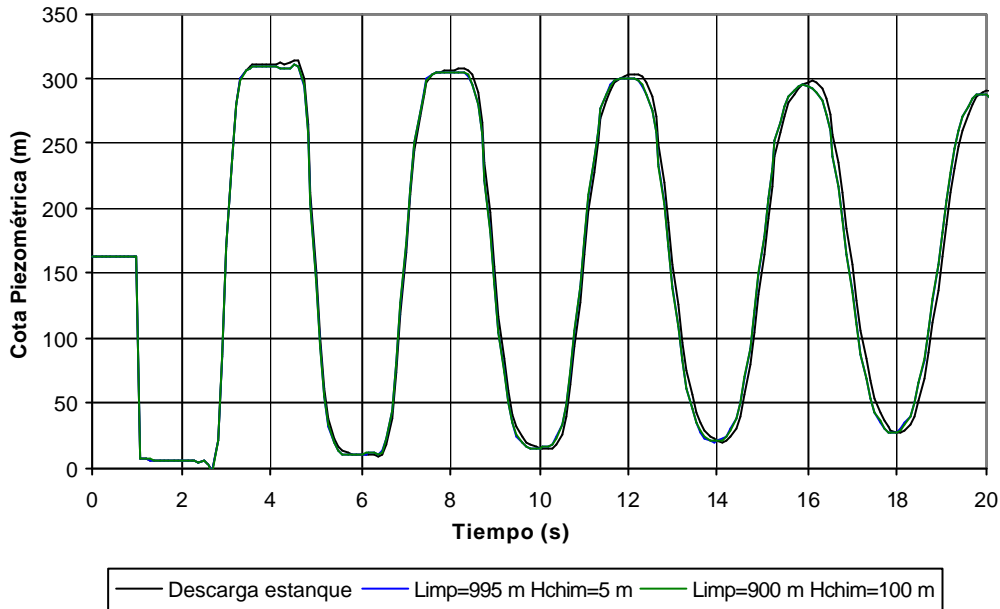
En la Figura 2 se puede ver claramente que la evolución temporal de la cota piezométrica en la base de la chimenea “vive” condicionada por la evolución del nivel de la superficie libre de la chimenea y por la evolución típica considerando un estanque.

A partir del ejemplo también se aprecia que, al considerar la descarga libre, la evolución de la cota piezométrica oscila en torno a un nivel menor al geométrico del estanque. La expresión (5) de descenso de nivel o diferencia de nivel (c/r al estanque)  $H_d$  muestra una muy buena correspondencia con lo que se observa en el ejemplo mostrado.

La longitud  $\Delta x$  considerada para la “chimenea” no es determinante en el cálculo. Este hecho se puede apreciar en el ejemplo descrito. Si se comparan las evoluciones temporales de la cota piezométrica al inicio de la impulsión considerando chimeneas de 5 y 100 m, no se observan variaciones de importancia. En la figura 3 se puede apreciar este hecho.



Figura 3 Evaluación de la cota piezométrica para 2 largos de chimenea. Comparación.



#### 4. Cometarios

Las condiciones de borde de estanque de nivel constante y de descarga atmosférica no son conceptualmente las mismas, ya sea en el tratamiento numérico o en la evolución temporal real de las principales variables. Sin embargo las diferencias que se puede observar no tienen peso frente a las variaciones máximas de la cota piezométrica que se pueden presentar a lo largo de la impulsión. Pero cuidado, esto último es posible porque los patrones de comportamiento reflexivos son los mismos en ambos casos. Por tanto, para los efectos prácticos puede considerarse la aproximación a estanque de nivel constante cuando el descenso determinado en la expresión (5) no produzca algún inconveniente en la impulsión.

#### 5. Bibliografía

ABREU, J. M., GUARGA, R. e IZQUIERDO, J. "Transitorios y Oscilaciones en Sistemas Hidráulicos a Presión". Universidad de Coimbra, Universidad Politécnica de Valencia, Universidad de la República, Montevideo. (1994).

CHAUDHRY, M. Hanif "Applied Hydraulic Transients". (1979).