

Fig. 5: Concentración adimensional con presencia de turbulencia.

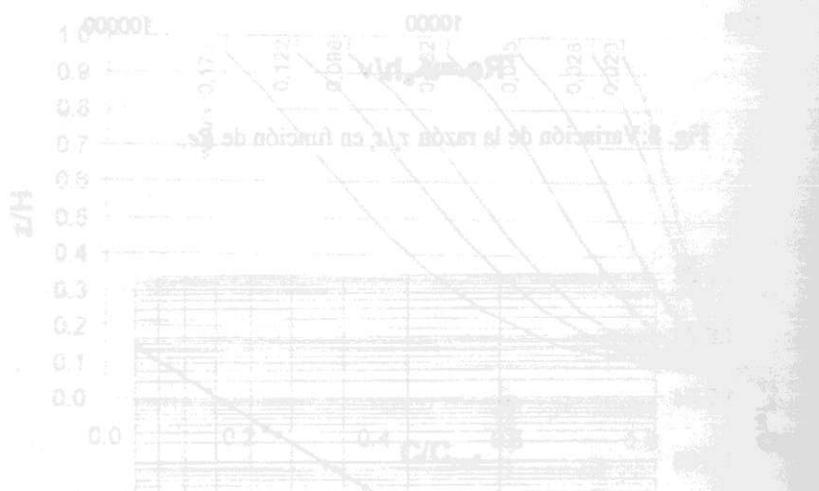


Fig. 6: Perfil de concentración adimensional para...

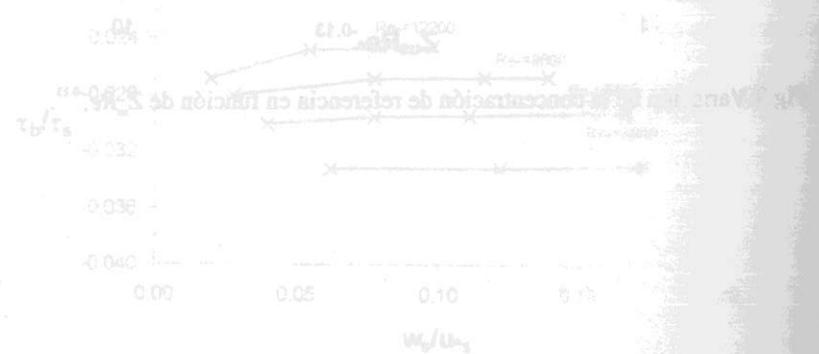


Fig. 7: Variación de la razón τ_b/τ_s en función de w_b/w_s para...

COMPORTAMIENTO HIDRAULICO IMPERMANENTE DE UN EMISARIO SUBMARINO

MUÑOZ PARDO, JOSE FRANCISCO¹
 REYES SALAZAR, JORGE²
 VARAS CASTELLON, EDUARDO³

RESUMEN

Se presenta un modelo numérico para estudiar el comportamiento del nivel del agua en la cámara de carga de un emisario submarino frente a diversos escenarios de detención y arranque. El sistema está compuesto por tres tramos, el primero con escurrimiento en superficie libre formado por una tubería de 231 m de largo y 1,125 m de diámetro, con pendiente promedio de 0,6 %. El segundo, también con escurrimiento libre, formado por una tubería de 15,74 m de longitud y 1,125 m de diámetro, con pendiente promedio de 10,8%, el cual descarga a la cámara de carga. El tercer tramo, denominado emisario, se inicia en la cámara de carga y está constituido por una tubería de 513 m de longitud y diámetro de 1,125 m, que descarga al mar; la cámara de carga tiene una geometría variable con la profundidad.

La variación del caudal en el tiempo a la salida del tramo con superficie libre se obtiene al resolver las ecuaciones de Saint Venant considerando un canal prismático, sin ingresos ni salidas laterales. El comportamiento del nivel de la cámara de carga se obtiene resolviendo simultáneamente las ecuaciones del momentum para el emisario y de continuidad para la cámara.

El modelo desarrollado para determinar la fluctuación del nivel en la cámara considera el ingreso del hidrograma proveniente del tramo con superficie libre y el área variable de la cámara con la profundidad incorporando el área que aporta el tramo de la tubería cercana a la cámara. El modelo permite simular el comportamiento del nivel de la cámara para distintos escenarios de detención y puesta en marcha, así como también distintas dimensiones y posiciones de la cámara.

Se presenta en este artículo los resultados obtenidos con el diseño final de la cámara para diversos caudales de funcionamiento y dos alturas del nivel del mar. Con el modelo se definen también los programas de partida y la operación del sistema.

¹Ingeniero Civil, Dr. Ing. Profesor Titular, Depto. Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Pontificia Universidad Católica de Chile.
²Ingeniero Civil, Programa de Doctorado, Depto. Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Pontificia Universidad Católica de Chile.
³Ingeniero Civil, Ph.D., Profesor Titular, Depto. Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Pontificia Universidad Católica de Chile.

1.- INTRODUCCION

En este artículo se analiza y se estudia el comportamiento del nivel del agua en una cámara de carga que recibe el agua mediante un canal circular y la entrega al mar mediante un emisario también circular. Las fluctuaciones de nivel de agua en la cámara de carga del emisario submarino debido a variaciones de caudal puede en algunos casos hacer colapsar al emisario si un descenso del nivel permite el ingreso de aire al emisario.

El sistema de circulación de agua de mar, tiene el objetivo de proporcionar el agua de enfriamiento a una planta de explosivos. Consiste en un sifón submarino que descarga a un pozo desde el cual, dos bombas verticales alimentan 4 intercambiadores de calor de placas en paralelo. La salida de éstos intercambiadores es libre hacia la canaleta de 1,4 m de ancho y luego llega al emisario propiamente tal.

El sistema hidráulico se puede dividir en tres tramos tal como se presenta en la figura N°1. El tramo N°1, formado por un canal circular (HDPE PN) de 231 m de longitud, 1,125 m de diámetro y pendiente igual a 0,6% entrega un caudal máximo de 3,25 m³/s en condiciones de escurrimiento libre. El tramo N°2, formado por una tubería circular de diámetro 1,125 m, longitud 15,74 m, pendiente 10,8%, se conecta a la cámara de carga funcionando en régimen permanente para caudal máximo casi completamente llena. Esta tubería inclinada colabora durante el vaciado de la cámara con un área correspondiente a su superficie libre horizontal. El tramo N°3, corresponde al emisario propiamente tal, tiene una longitud de 513,12 m, un diámetro 1,125 m y entrega el agua al mar. Dadas las condiciones de la marea el nivel del mar fluctúa entre las cotas 84,834 msnm (nivel pleamar) y 86,634 msnm nivel máximo.

La oscilación que se produce en el nivel de agua de la cámara de carga depende de las condiciones de borde que se impongan en el sistema. Para una detención brusca del caudal que ingresa al sistema, la cámara recibe un caudal variable en el tiempo que constituye el hidrograma de salida de los tramos N°1 y N°2, el cual varía desde el caudal máximo de 3,25 m³/s a un caudal cero. Por otra parte para una partida repentina el hidrograma de salida de los tramos N°1 y N°2, el caudal varía de cero a un caudal máximo en forma instantánea.

Debe indicarse que las situaciones a estudiar no forman parte de las reglas de operación normales del sistema, sino mas bien corresponden a situaciones de posibles emergencias o fallas de bombas.

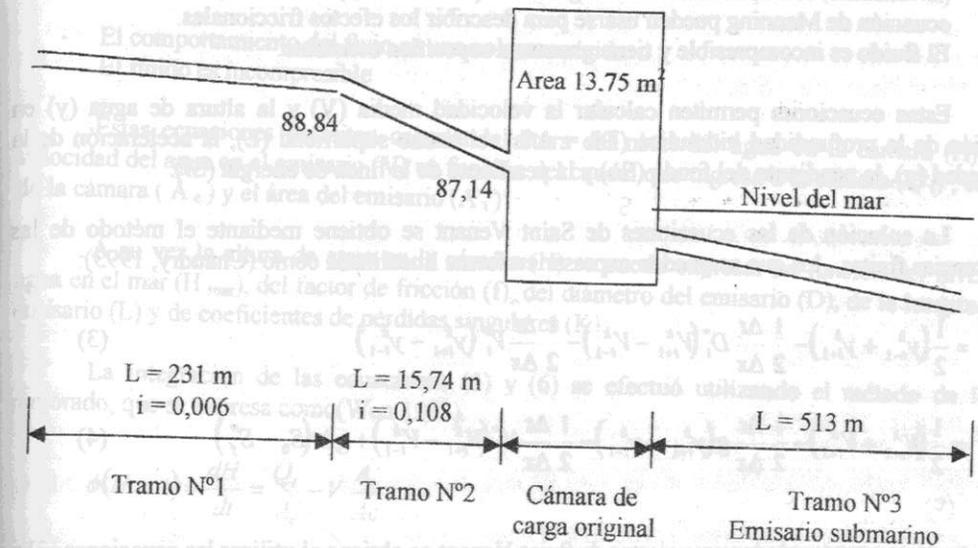
2.- ECUACIONES Y SOLUCION NUMERICA

2.1.- Primer y Segundo tramo : Escorrimento con superficie libre

Estos tramos se encuentran con escurrimiento libre y por lo que se aplicarán las ecuaciones que gobiernan este tipo de flujo.

El hidrograma de salida de los tramos N°1 y N°2 se obtiene al integrar numéricamente las ecuaciones de Saint Venant.

Figura N°1. Sistema hidráulico original



Las ecuaciones que representan el movimiento del agua en un escurrimiento unidimensional con superficie libre en régimen impermanente, conocidas como las ecuaciones de Saint Venant, se pueden escribir para un canal prismático, sin aportes y sin salidas laterales como sigue (Chaudry, 1993):

- Ecuación de continuidad:

$$\frac{\partial y}{\partial t} + Dh \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial y}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

- Ecuación de la cantidad de movimiento:

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + g \frac{\partial y}{\partial x} = g(S_0 - S_f) \quad (2)$$

El considerar todos estos términos, nos permite evaluar la situación de flujo impermanente no uniforme. Las hipótesis de las ecuaciones anteriores son las siguientes (Fernández y Vargas, 1994):

- El flujo es unidimensional, es decir la profundidad y velocidad varían sólo en la dirección del escurrimiento. Esto significa que la velocidad es constante y que la superficie libre es horizontal, en cualquier sección transversal al escurrimiento.
- El flujo varía gradualmente en la canalización, de manera que puede considerarse distribución hidrostática de presiones y despreciar las aceleraciones verticales.
- La pendiente del canal es pequeña y el fondo es fijo, de modo que los efectos de depositación y socavación son despreciables.

- Los coeficientes de fricción válidos para flujo uniforme en régimen turbulento permanente, son aplicables en el régimen impermanente; por lo tanto, relaciones como la ecuación de Manning pueden usarse para describir los efectos friccionales.
- El fluido es incompresible y tiene una masa específica constante.

Estas ecuaciones permiten calcular la velocidad media (V) y la altura de agua (y) en función de la profundidad hidráulica ($D_h = A/L$), el ancho superficial (L), la aceleración de la gravedad (g), la pendiente del fondo (S_0) y la pendiente de la línea de energía (S_f).

La solución de las ecuaciones de Saint Venant se obtiene mediante el método de las diferencias finitas, los que se pueden expresar en forma linealizada como (Chaudry, 1993):

$$y_i^{k+1} = \frac{1}{2}(y_{i-1}^k + y_{i+1}^k) - \frac{1}{2} \frac{\Delta t}{\Delta x} D_i^* (V_{i+1}^k - V_{i-1}^k) - \frac{1}{2} \frac{\Delta t}{\Delta x} V_i^* (y_{i+1}^k - y_{i-1}^k) \quad (3)$$

$$V_i^{k+1} = \frac{1}{2}(V_{i-1}^k + V_{i+1}^k) - \frac{1}{2} \frac{\Delta t}{\Delta x} g (y_{i+1}^k - y_{i-1}^k) - \frac{1}{2} \frac{\Delta t}{\Delta x} V_i^* (V_{i+1}^k - V_{i-1}^k) + g \Delta t (S_0 - S_f^*) \quad (4)$$

La solución numérica de las ecuaciones de Saint Venant se obtiene al utilizar las ecuaciones (3) y (4) sujeta a las siguientes condiciones de borde:

$$y_1 = 0 \quad x = 0 \quad t \geq 0$$

$$y_n = y_{n+1} \quad x = L \quad t \geq 0 \quad \text{escurrimiento torrencial } y_n < y_c$$

2.2.- Ecuaciones del tramo 3: Emisario

Este tramo se encuentra con escurrimiento a presión por lo cual se aplican las ecuaciones que gobiernan este tipo de flujo.

El nivel del agua en la cámara de carga se puede relacionar con las características del escurrimiento en el emisario mediante la ecuación de continuidad:

$$Q_i = A_c \frac{dH}{dt} + VA_i \quad (5)$$

Por su parte, el escurrimiento de un fluido incompresible, en el emisario se puede representar mediante la ecuación del momentum para una tubería rígida de longitud L, como (Wen, 1983):

$$H = H_{max} + \left(1 + K + f \frac{L}{D}\right) \frac{|V|V}{2g} + \frac{L}{g} \frac{dV}{dt} \quad (6)$$

Fluctuación del nivel de la cámara de carga

Las hipótesis de cálculo para este tramo son:

- El comportamiento del flujo es una columna rígida
- El fluido es incompresible

Estas ecuaciones permiten calcular la altura del nivel del agua en la cámara (H) y la velocidad del agua en el emisario (V) en función del caudal que ingresa a la cámara (Q_i), el área de la cámara (A_c) y el área del emisario (A_i)

A su vez la altura de agua en la cámara (H) se puede expresar en función del nivel de agua en el mar (H_{mar}), del factor de fricción (f), del diámetro del emisario (D), de la longitud del emisario (L) y de coeficientes de pérdidas singulares (K)

La integración de las ecuaciones (5) y (6) se efectuó utilizando el método de Euler mejorado, que se expresa como (Wen 1983):

$$\phi(H, v, t) = \frac{dH}{dt} = \frac{Q_i}{A_c} - V \frac{A_i}{A_c} \quad (7)$$

$$\Psi(H, v, t) = \frac{dV}{dt} = \frac{g}{L} \left[(H - H_{mar}) - \left(1 + k + f \frac{L}{D}\right) \frac{V^2}{2g} \right] \quad (8)$$

Si se considera H_n y V_n en el tiempo t_n conocidos, se puede calcular H_{n+1} y V_{n+1} en el tiempo t_{n+1} calculando H'_{n+1} y V'_{n+1} como:

$$H'_{n+1} = H_n + \Phi_n \Delta t \quad (9)$$

$$V'_{n+1} = V_n + \Psi_n \Delta t \quad (10)$$

donde Φ_n y Ψ_n son funciones evaluadas con H_n, V_n y t_n . Con H'_{n+1}, V'_{n+1} y t_{n+1} se evalúan los términos Φ'_{n+1}, Ψ'_{n+1} para expresar finalmente:

$$H_{n+1} = H_n + \frac{1}{2} (\Phi_n + \Phi'_{n+1}) \Delta t \quad (11)$$

$$V_{n+1} = V_n + \frac{1}{2} (\Psi_n + \Psi'_{n+1}) \Delta t \quad (12)$$

El método de Euler mejorado, permite calcular con buena aproximación, el valor futuro de un parámetro al considerar la pendiente como un valor promedio entre la pendiente del inicio y la del final. Utiliza el criterio denominado predictor y corrector. El método es preciso en la medida que Δt sea pequeño.

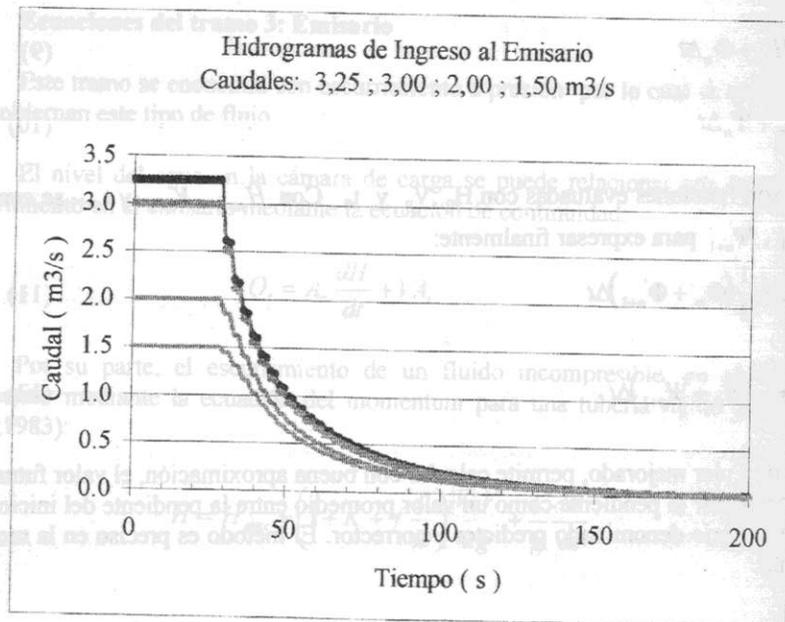
Los coeficientes de fricción válidos para flujo... Se verificaron los resultados obtenidos con otros métodos numéricos que permiten resolver ecuaciones diferenciales, como el de Runge Kutta y se concluyó que no diferían con los valores del método de Euler mejorado y sin embargo introducir al programa el RK-4 hubiera causado un mayor tiempo de ejecución.

3.- RESULTADOS

3.1.- Hidrograma de salida después de una detención brusca

En la figura N°2 se presenta el hidrograma de ingreso a la cámara de carga (inicio del tramo N°3) para una detención brusca para diferentes caudales de funcionamiento. Se observa que en todos los casos, el caudal se mantiene constante por un período de tiempo, el cual corresponde al de la velocidad de propagación de la onda. El efecto la velocidad de propagación de la onda en un escurrimiento a superficie libre se puede estimar como la suma de la velocidad del escurrimiento mas la velocidad de la onda. En el caso del caudal máximo de 3,25 m³/s, la velocidad media del escurrimiento es V=3,79 m/s, la velocidad de propagación de la onda es $c = \sqrt{g \frac{A}{L}}$ (Chaudry, 1980) igual a 3,07 m/s. Luego la velocidad absoluta de propagación es V_{abs} = 6,86 m/s lo que significa que la señal de detención demora un tiempo teórico 33,7 s en llegar al tramo final, el tiempo calculado en el modelo es de 28,5 s.

Figura N° 2. Hidrograma de salida del tramo N°2 frente a una detención total en su alimentación, para caudales de funcionamiento de 3,25 m³/s.



3.2.- Fluctuación del nivel de la cámara de carga

3.2.1.- Comparación de resultados numéricos con métodos gráficos

Fluctuación del nivel de la cámara par una reducción brusca del caudal aportante (total stop) y para una reducción del 50% del caudal (half stop).

En el diseño de la cámara de carga de emisarios se acostumbra a utilizar la condición de total stop y half stop para verificar las dimensiones de la cámara. De acuerdo a la metodología sugerida por Janson, se puede estimar el nivel mínimo alcanzado por el agua en la cámara para estas dos situaciones.

Con el objeto de comparar ambas metodologías se sometió al diseño original (con un área de cámara constante) a las dos situaciones antes mencionadas: total stop y half stop.

En la tabla N°1 y en la figura N°5 se presentan los resultados obtenidos para el nivel mínimo de la superficie del agua en la cámara. Para una reducción denominada total stop el nivel mínimo alcanza a permitir la entrada de aire al sistema mientras que para una reducción del 50% al caudal el nivel alcanza el mínimo requerido (pleamar).

Tabla N°1. Comparación de resultados numéricos y gráficos (Janson, 1994).

Caudal de Operación m ³ /s	% del Caudal que Ingresa a la Cámara	Nivel mínimo en la Cámara (m)	
		Método Numérico	Método Gráfico
3,25	0,50 Q	86,308	86,22
3,25	0 Q	80,718	80,65
1,413	0 Q	81,977	81,84
1,413	0,5 Q	84,095	83,82

3.2.2.- Análisis del funcionamiento hidráulico original

El modelo numérico fue utilizado para simular el funcionamiento del diseño original propuesto para la cámara de carga. La cámara inicial tenía un área de 13,75 m² la que disminuía a 7 m² cuando el nivel desciende bajo los 85,34 msnm.

En la figura N°3 se presenta la fluctuación del nivel de la cámara obtenido para una detención brusca del caudal al inicio del tramo N°1. Para lo cual se empleó Coeficiente de fricción de 0,021 y el nivel de reducción de sonda del mar en 84,834 m. Se observa que el nivel mínimo alcanzado es menor que el nivel mínimo del mar por lo que se concluye y recomienda modificar las dimensiones de la cámara. Se observa además, que la oscilación del agua permite el ingreso de aire a la cámara por tener un nivel inferior a 83,949 m.

Se hace necesario efectuar las modificaciones al diseño original porque permitiría el ingreso de aire al emisario, en caso de producirse una situación de falla o de mala operación del sistema.

La introducción de aire al emisario produciría el riesgo de que éste se desprenda de sus apoyos y tienda a flotar hacia la superficie, todo esto supondría reconstruirlo a un costo muy alto y se tendría que paralizar la operación de la planta.

3.2.3.- Análisis del funcionamiento hidráulico del diseño propuesto

Con el objeto de considerar el efecto amortiguador que puede aportar el área de la tubería de ingreso a la cámara de carga, se eliminó el tramo N°2 que tenía fuerte pendiente y se colocaron tres tramos denominados A, B, C, de menor pendiente estableciéndose por lo tanto 5 diferentes áreas de aporte a la cámara, las cuales se muestran en la tabla N° 2. El sistema propuesto se muestra en la figura N°4.

Figura N°3. Fluctuación del nivel del agua en la cámara para una detención brusca de los caudales 1,50; 2,00; 3,00 y 3,25 m³/s.

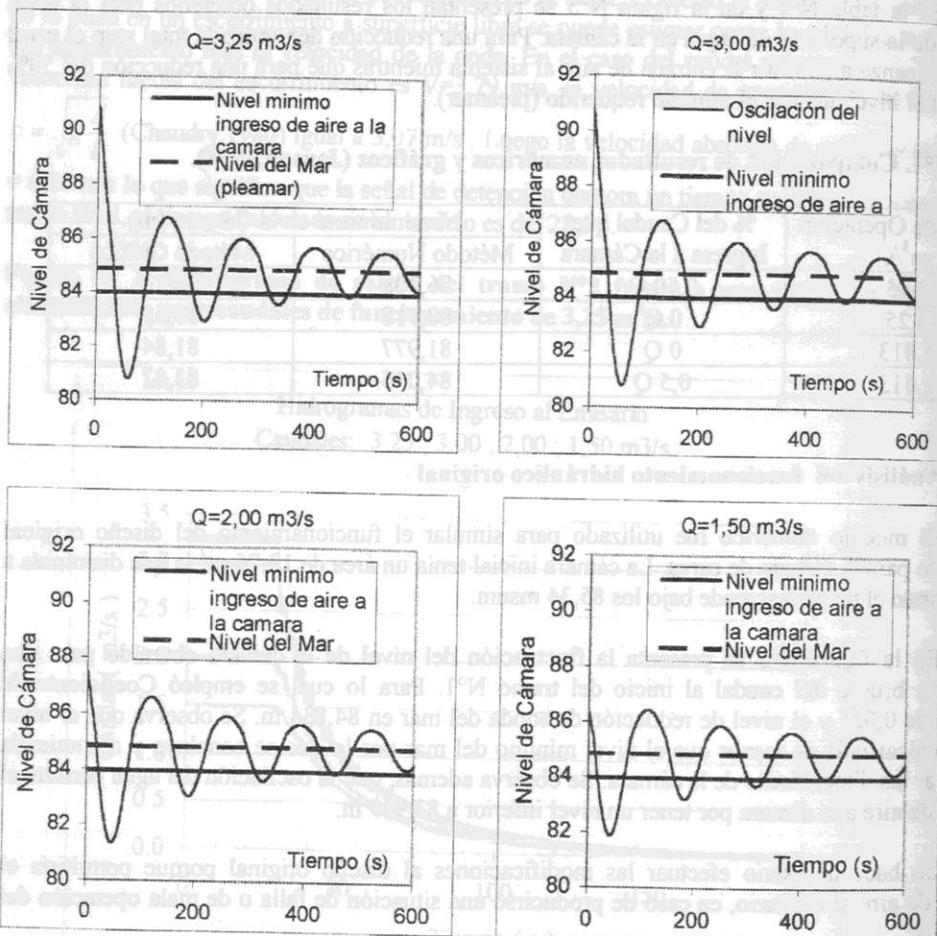
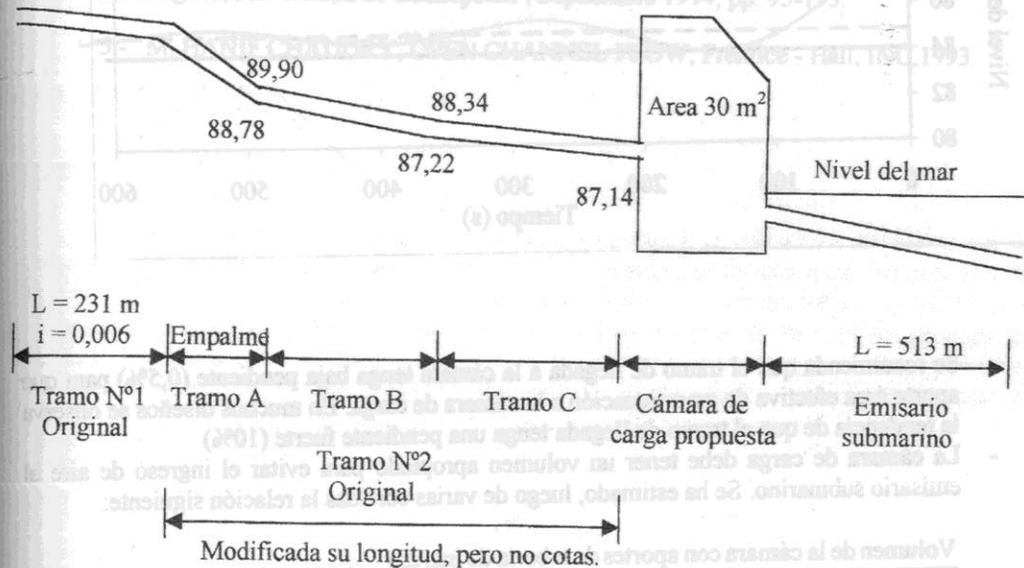


Tabla N°2. Areas de aporte a la cámara.

N°	Area m ²	Ubicación
N°1	1,5	89,90
N°2	17,0	88,78
N°3	31,5	88,34
N°4	73,3	87,14
N°5	30,0	

Figura N°4. Diseño propuesto del sistema.

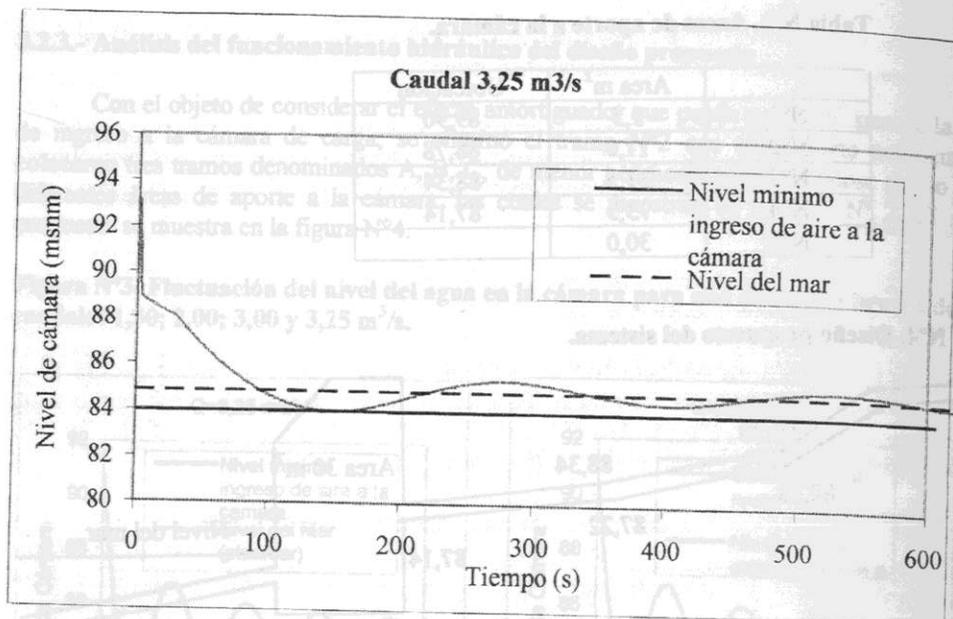


En la figura N°5 se presentan las fluctuaciones del nivel del agua obtenidos para el sistema propuesto frente a una disminución brusca del caudal al inicio del tramo N°1, cuando en el sistema circula el caudal de 3,25 m³/s (caso crítico).

4.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Para el sistema planteado, volumen de la cámara de carga 13,75 m² y longitud del emisario 513 metros, se hace necesario efectuar modificaciones para evitar el ingreso de aire y el consiguiente riesgo de colapso.
- Se debe considerar situaciones de emergencia (detenida brusca de bombas) y medidas de seguridad para la operación del sistema debido a que puede tener graves implicancias en su infraestructura.

Figura N°5. Fluctuaciones del nivel de agua en el sistema propuesto.



- Se recomienda que el tramo de llegada a la cámara tenga baja pendiente (0,5%) para que aporte área efectiva de amortiguación a la cámara de carga. En muchos diseños se observa la tendencia de que el tramo de llegada tenga una pendiente fuerte (10%)
- La cámara de carga debe tener un volumen apropiado para evitar el ingreso de aire al emisario submarino. Se ha estimado, luego de varias corridas la relación siguiente:

$$\frac{\text{Volumen de la cámara con aportes de tubería de ingreso}}{\text{Volumen del emisario}} = 0,30$$

Sin embargo para que esta relación sea válida los volúmenes deben de estar adecuadamente repartidos entre determinadas cotas.

Todo lo anterior indica que debemos cuidar 2 aspectos en la elección de la geometría de la cámara de carga y de la tubería de llegada: área y volumen de amortiguación.

- De los resultados obtenidos se concluye que, ante una detención brusca de las bombas, el hidrograma de ingreso a la cámara de carga proporcionado por los tramos N°1 y N°2, sólo retarda aproximadamente 30 segundos el ingreso de aire al sistema. Esto indica que si el bombeo se detiene algunos minutos se presentará el problema de ingreso de aire al sistema, por lo tanto concluimos que el hidrograma no constituye una defensa del sistema.

5.- REFERENCIAS

- 1.- WEN HSIUNG LI, Fluid Mechanics in water resources engineering, Allyn and Bacon INC, 1983.
- 2.- M.HANIF CHAUDRY, COLORADO SATATE UNIVERSITY, Unsteady flow in open channels, Water Resources Publications, 1980.
- 3.- JANSON, L.E. Plastic Pipes for Water Supply and Sewage Disposal, 1994
- 4.- BONIFACIO FERNANDEZ L., XIMENA VARGAS, Propagación de crecidas en cauces naturales. Terceras Jornadas de Hidráulica Profesor Francisco Javier Domínguez, Universidad de Concepción, Septiembre 1994, pp. 95-133.
- 5.- M. HANIF CHAUDRY, OPEN CHANNEL FLOW, Prentice - Hall, INC, 1993.

SUMEN

Se presentan los resultados de un estudio respecto a la estructura turbulenta en un flujo de agua contenida en un estanque, la que es agitada por la acción de microchorros. El flujo es capaz de producir turbulencia homogénea e isotrópica, obteniéndose expresiones que permiten determinar la distancia desde los microchorros a partir de la cual se obtienen las condiciones de homogeneidad e isotropía, así como el valor de la energía cinética turbulenta. Además se encontró que el decaimiento de la energía cinética turbulenta es proporcional al inverso del cuadrado de la distancia desde los microchorros.