

**ESTUDIO DE LA ESTABILIDAD DINÁMICA EN FLUJOS TRANSITORIOS UTILIZANDO
EL MÉTODO DE LAS CARACTERÍSTICAS EN ESTACIONES DE BOMBEO DE
PETRÓLEO**

Norberto E. Molina
Mecánica de los Fluidos
Universidad Nacional del Sur, Av. Alem 1253
8000 Bahía Blanca, Argentina

Néstor D. Murga
Hidráulica General
Universidad Nacional del Sur, Av. Alem 1253
8000 Bahía Blanca, Argentina

RESUMEN

Los conductos en serie sometidos a escurrimientos transitorios con grandes variaciones de longitud entre ellos, presentan problemas de estabilidad en el cálculo de la distribución de presión, al aplicar el método de las características. La incertidumbre al tener que adoptar el valor de la condición de estabilidad de Courant nos lleva a formular el presente estudio.

ABSTRACT

Transient flow in pipelines with important length differences causes stability problems for the calculus of the pressure variation in function of time, when applying the characteristics method. Uncertainty in adopting the value of Courant number stability condition moves us to perform the present work.

Key words: water hammer, Characteristics Methods, Courant number.

INTRODUCCIÓN

El análisis está orientado al estudio de los fenómenos de escurrimiento transitorio en conductos de Estaciones Terminales de Petróleo debido a un cierre rápido de las válvulas en el Manifold del buque. En estas instalaciones con tuberías de diámetros cuya dimensión disminuye en forma descendente en la dirección del escurrimiento, y la longitud de la última cañería es aproximadamente el 0,3% de la primera, al aplicarse el método de las características se originan serios problemas de estabilidad debido a la gran variación de la celeridad de la onda de presión, dificultando la verificación de la condición de Courant (Friedrich, Lewy, Courant); esto es, la gran diferencia en el número de secciones y el valor del incremento de tiempo para cada tramo en particular dificulta la determinación del tiempo mínimo a aplicar para el cálculo.

En el desarrollo del trabajo, se utilizan las leyes de cierre de válvula sugeridas por el fabricante, siendo éstas del tipo lineal. La correcta valoración del modelo permite prevenir roturas de cañerías y consecuentemente el derrame de petróleo en el mar, el cual causaría un impacto ecológico significativo.

ECUACIONES QUE DESCRIBEN EL FENÓMENO

Las ecuaciones que describen el fenómeno de golpe de ariete en conductos cerrados o flujos del tipo unidimensional [1,,6] son:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a^2}{gA} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

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

en las cuales t : tiempo; x : distancia; A : sección transversal del conducto; H : altura o carga de trabajo piezométrica desde el Datum; Q : caudal; R coeficiente resistente calculado de la forma: $R = f(2dA)^{-1}$ con f : coeficiente de rozamiento de Darcy-Weisbach; d : diámetro del conducto; g : aceleración de la gravedad.

El sistema formado por (1) y (2), es un conjunto de ecuaciones en derivadas parciales, 'Quasi linear', hiperbólico con coeficientes constantes.

Debido a la no-linealidad del término fuente[6], $RQ|Q|$, no es posible obtener una solución directa, para ello se utiliza uno de los métodos numéricos conocidos.

ESQUEMA DEL MÉTODO NUMÉRICO

Para resolver el problema de golpe de ariete, se utilizó el método de las características[7]; el cual fue ampliamente empleado por diversos autores [1,,6] en análisis similares.

El método consiste en transformar las ecuaciones (1) y (2) en ecuaciones diferenciales ordinarias las cuales son resueltas a lo largo de las líneas características utilizando diferencias finitas de 1^{er} o 2^{do} orden respecto a las aproximaciones, las curvas definidas son del tipo:

$$dx = \pm a dt \quad (3)$$

Para la estabilidad del método, es necesario que se emplee la condición de Courant[2,4,,6,8], $Cn \leq 1.0$ donde el número Cn está dado por la conocida expresión

$$Cn = a \frac{dt}{dx} \quad (4)$$

donde a : velocidad de la onda, dx : longitud alcanzada en el dt , dt : tiempo o paso de la etapa.

De acuerdo a la literatura consultada el método de 1^{er} orden resulta satisfactorio para $Cn = 1.0$ y pérdida por fricción pequeña [8]; para valores mayores del coeficiente de fricción, tales como líquidos viscosos o en flujos, donde los diámetros de los conductos son pequeños, éste comienza a ser inestable con pequeños valores de Cn , desdibujando el golpe de onda así como la velocidad de ésta.

con a : velocidad de la onda o celeridad[6]:

$$a = \sqrt{K \left(\rho \left(1 + K d (E e)^{-1} \right)^{-1} \right)} \quad (12)$$

K : módulo volumétrico, [kg cm^{-2}]; E : módulo de elasticidad de la tubería, [kg cm^{-2}]; e : espesor [m];
 ρ : densidad [$\text{Kg s}^2 \text{m}^{-4}$].

El segundo grupo de ecuaciones es:

$$HP = CM + BM Q_p \quad (13)$$

donde los coeficientes constantes están dados por:

$$CM = HB - B Q_B \quad (14)$$

$$BM = B + R |Q_B| \quad (15)$$

siendo las ecuaciones (8) y (13) fijas, y lineales en H y Q .

El método de integración es exacto en la medida que se tenga una relación de flujo constante; si bien el error disminuye al reducirse el intervalo de la evaluación para una aplicación práctica, es necesario satisfacer la condición de estabilidad a través de (3) y (4).

1.-CONEXIONES

En la Fig.2 se muestra esquemáticamente la unión de dos tuberías, las cuales poseen distintas propiedades físicas. Las ecuaciones de compatibilidad en términos de la impedancia son:

$$\text{para } C^+ : HP_i = CP - BP Q_{p,i} \quad (16)$$

$$\text{para } C^- : HP_i = CM + BM Q_{p,i} \quad (17)$$

de estas últimas, para una etapa de tiempo 't', es conocido el punto 'P' como solución del conjunto de ecuaciones (9), (10), (12) y (14); luego de ambas queda definido el caudal:

$$Q_{p,i} = \frac{CP - CM}{BP + BM} \quad (18)$$

1.1-CONDICIÓN DE BORDE EN LA UNIÓN

Como puede observarse en la Fig.2, y del análisis de la expresión (17), debe indicarse la condición externa para obtener la respuesta de la tubería resultante de la unión en cada intervalo de tiempo.

En el caso del tramo que termina 'j', también conocido en Hidráulica como de corriente arriba, donde la curva característica es C^+ , ecuación (16) las variables H y Q se hallan ubicadas en la sección $i = n+1$. Para resolver la ecuación es necesario especificar alguna de las variables, ya sea una de ellas constante o una función conocida del tiempo, además debe cumplirse en cada instante la condición de continuidad; no olvidando la condición impuesta de que la carga correspondiente al extremo final de la

El término de fricción está dado por

$$R Q_P |Q_A| = \int_{x_A}^{x_P} \frac{f Q^2}{2 g d A^2} dx \quad (5)$$

obtenido de la integración de la 1^{era} ecuación de compatibilidad considerando la variable dependiente Q constante y evaluando a lo largo de la característica definida por la curva (4) línea AP o también conocida por la notación C^+ .

En forma similar, para una aproximación a lo largo de la curva (5) definida por la línea BP o C^- mediante la integración entre x_B y x_P de la expresión ya definida

$$R Q_P |Q_B| = \int_{x_B}^{x_P} \frac{f Q^2}{2 g d A^2} dx \quad (6)$$

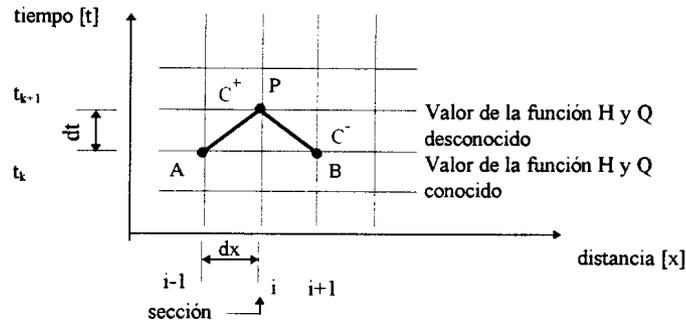


Fig. 1, Líneas características en el plano x,t ; malla computacional.

De la integración de la 2^{da} ecuación de compatibilidad:

$$\frac{dH}{dx} + \frac{a}{g A} \frac{dQ}{dx} + f Q^2 \frac{1}{2 g d A^2} dx = 0 \quad (7)$$

$$HP = CP - BP Q_P \quad (8)$$

donde los coeficientes constantes están dados por:

$$CP = HA + B Q_A \quad (9)$$

$$BP = B + R |Q_A| \quad (10)$$

El módulo del caudal se introduce en las ecuaciones a los efectos de tener en cuenta en el proceso de cálculo la dirección del flujo, quedando implícita la característica del conducto en el coeficiente $B[3,8]$, también conocido como impedancia, pudiéndose calcular mediante la expresión:

$$B = a \frac{1}{g A} \quad (11)$$

tubería 'j' será la aplicada al inicio del tramo 'j+1'. La ecuación que relaciona las impedancias de los tramos 'j' y 'j+1' es:

$$HP_{i,j} = \frac{CP_j / BP_j + CM_j / BM_j}{1 / BP_j + 1 / BM_j} \quad (19)$$

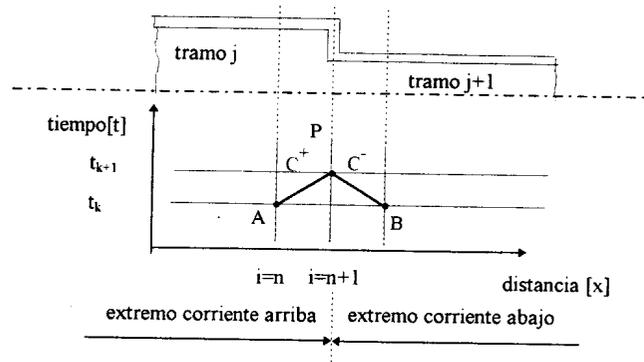


Fig.2 Unión de tuberías, esquema de curvas características como condición de borde.

2.-VÁLVULA DE REGULACIÓN

La ecuación a lo largo de la curva característica C^+ se utiliza para la condición particular en que se encuentra el extremo de la tubería; para el caso de la válvula[3,4,,6] el caudal es proporcional a la ley de descarga, y ésta es, función del coeficiente de descarga del orificio de la válvula[9,10], tabulado[9], y de la superficie transversal libre.

2.1-CONDICIÓN DE BORDE

El flujo a régimen permanente es dado por Q_o , especificándose la carga piezométrica H en el extremo de acuerdo a las condiciones existentes, atmósfera o de trabajo (libre, depósito, retención, etc.)

$$Q_o = \sqrt{(C_d A_v)_{\text{orificio}} (2g H_{\text{orificio}})} \quad (20)$$

En ésta última el término $(C_d A_v)$ lleva implícito las condiciones de cierre de la válvula adoptada.

De las ecuaciones (16) y (20), para una válvula ubicada en el extremo de la tubería 'j', sección 'ns = n + 1'; la carga es evaluada resolviendo el siguiente sistema[3,6] en cada etapa de tiempo:

$$C_x = -g BP (C_d A_v)^2 \quad (21)$$

$$QP_{j,ns} = C_x + \sqrt{C_x^2 + 2g CP (C_d A_v)^2} \quad (22)$$

$$QH_{j,ns} = CP - BP QP_{j,ns} \quad (23)$$

APLICACIÓN

El método de las Características permite determinar la distribución de presiones en una instalación existente de las características físicas y geométricas indicadas, y resolver el problema del golpe de ariete, a partir de la piezométrica de caudal de trabajo de la instalación, $Q = 0,65 \text{ [m}^3 \text{ s}^{-1}\text{]}$, que se presenta debido al cierre del 'manifold' en el buque en un tiempo $t = 4$ segundos; caracterizándolo como de cierre rápido[15], esto es, la relación existente entre la longitud del oleoducto y la velocidad de la onda estimada promedio como resultante del cálculo de la misma en cada una de los diferentes tramos que componen la instalación para un rango de variación del número de Courant.

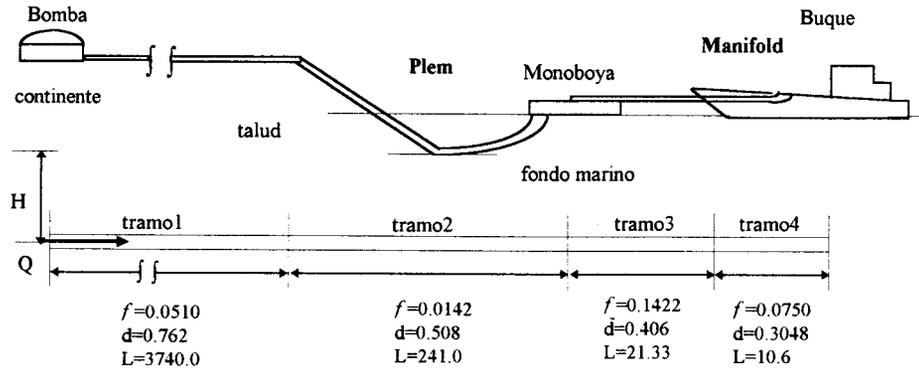


Fig. 3 Esquema de la instalación en Caleta Córdova, Pcia. del Chubut, Rep. Argentina.

En la figura, se muestra en forma esquemática la instalación física en la cual se ha presentado el problema en dos oportunidades y por diversos motivos, causando la ruptura en zonas próximas entre sí - secciones -, del segundo tramo[16].

El análisis propuesto se efectuará en una instalación existente de cuatro tramos, el 1^{ero} de los cuales es de acero con una longitud de 3740 [m], y los tres restantes, de un compuesto de goma-tela de algodón-trama de nylon con alma de acero en espiral de longitudes sensiblemente menores que por el tipo de construcción se lo define como flexible, adaptándose al talud marino y al movimiento oscilante originado por la marea en la unión entre la monoboya y el manifold del buque. Como puede observarse en el esquema, los tramos flexibles adoptan una gran curvatura y están sometidos a esfuerzos de tracción importantes originados por el desplazamiento continuo de la monoboya y el buque (movimiento oscilatorio en dirección vertical y transversal).

Debido a los distintos materiales utilizados en las tuberías, se aprecian diferentes coeficientes de rozamiento [8], resultando el diámetro del último tramo condición de montaje impuesta por las bridas de anclaje en el manifold del buque; la válvula es del tipo mariposa con una ley de descarga lineal.

HIPÓTESIS

El coeficiente de rozamiento es constante por tramo, no se consideran el movimiento de la monoboya ni la del buque tanque, tampoco las cargas resultantes sobre los tramos flexibles; se realiza una partición de los tramos de tubería de forma tal, que resulte proporcional la longitud de estos con la velocidad de la onda para un incremento de tiempo mínimo verificándose la condición de estabilidad, respecto a ésta última, el análisis se efectúa en base a la influencia en el sistema para dos leyes de cierre de válvula. La

deformación elástica de las tuberías del sistema está implícita en la ecuación de velocidad de la onda calculada inicialmente por tramo[14.,17]. Los valores de f coeficientes de rozamiento de Darcy - Weisbach indicados corresponden a la piezométrica de trabajo de la instalación existente, dados por valores adquiridos con manómetros en las respectivas secciones[16].

ALGORITMO DE CÁLCULO

- a.- inicialización.
- b.- cálculos varios: velocidad de la onda, tiempos por tramo, partición de estos últimos, piezométrica, condición de borde.
- c.- régimen permanente: condición de borde, cálculo de constantes, impedancia de las tuberías.
- d.- variación del flujo de acuerdo a la ley de descarga de la válvula.
- e.- método de las características, iterativo.
- f.- condición de estabilidad.
- g.- almacenamiento de valores hallados, condición de parada cuando corresponda.
- h.- vuelta al punto d-.
- i.- salida: perfil de presiones y caudal por sección y tramo; perfil longitudinal de la presión de acuerdo varía la sección, gráfico.

RESULTADOS

1-Leyes de cierre de la válvula en el 'manifold'.

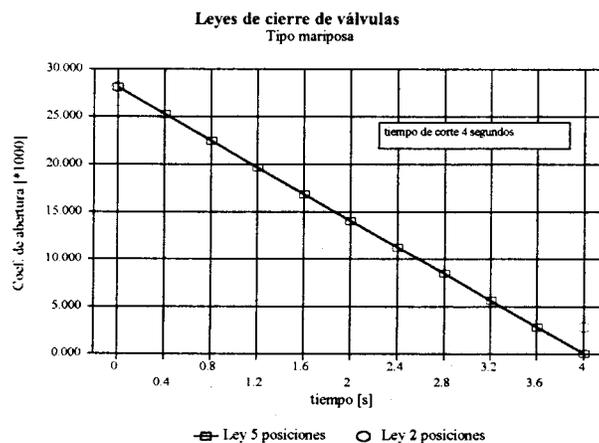


Fig. 4 Leyes de cierre de válvula tipo mariposa.

En la Fig.4 se observa la respuesta lineal de cierre de las válvulas simuladas para dos (2) y cinco (5) posiciones de tiempo de corte, respectivamente, lo que incide significativamente en el comportamiento de la distribución de presión y consecuentemente el caudal; nótese que las condiciones iniciales son idénticas.

2-Distribución de carga a lo largo de la instalación.

En la Fig. 5 puede apreciarse el efecto de cierre de la válvula, la zona de la instalación o secciones más solicitadas para las dos leyes de cierre (2 y 5 posiciones), con números de Courant próximos.

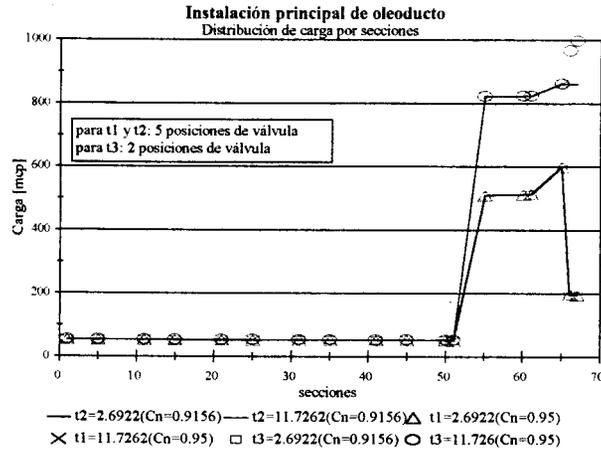


Fig 5 Distribución de cargas en la instalación, Caleta Córdova, Pcia. del Chubut, Argentina.

3-Perfil de cargas en las secciones de mayor solicitación.

En la Fig. 6 se observa la diferencia de carga para secciones próximas pertenecientes al final del segundo tramo (sec. 57 y 59) y comienzo del tercer tramo (sec. 62). Siendo cualitativamente igual la respuesta para los diferentes números de Courant en el rango simulado.

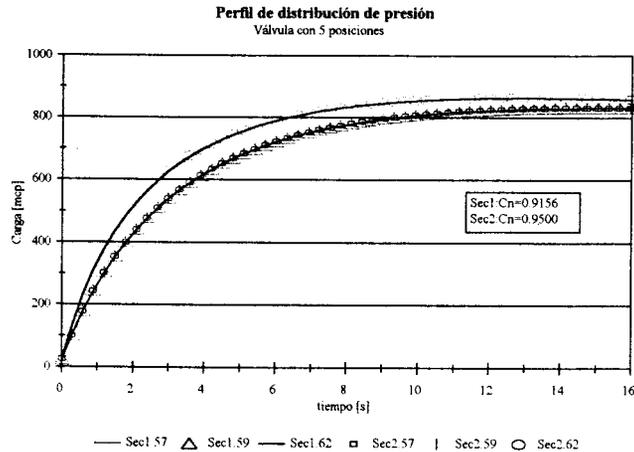


Fig. 6 Perfil de distribución de cargas en secciones críticas

4-Perfil del caudal en las secciones de mayor solicitación.

En la Fig. 7 se graficó el caudal en función del tiempo para las secciones consideradas, observándose la concordancia cualitativa de la respuesta al utilizar una ley de cierre de válvula de cinco puntos para los números de Courant establecidos.

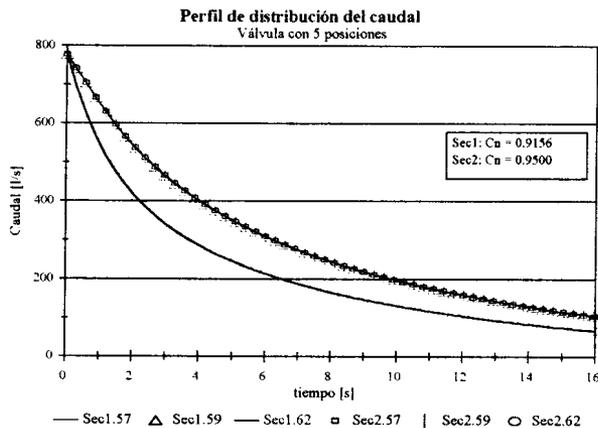


Fig. 7 Distribución de carga

5. Perfiles de carga y caudal en las secciones más solicitadas.

Se observa en la Fig. 8 coincidencia en la respuesta de distribución de caudal y carga en las secciones más solicitadas al utilizar diferentes números como condición de estabilidad.

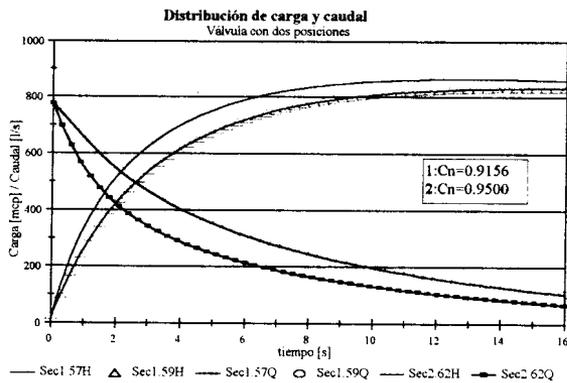


Fig. 8 Distribución de caudal y carga para una ley de cierre de válvula de dos posiciones.

CONCLUSIONES

Se considera como condición de frontera en el Manifold del buque una válvula de tipo mariposa. Se estudia la variación de presiones provocada por dos leyes de cierre lineales para un tiempo de corte de mínimo de 4 segundos.

La variación del número de Courant para los valores simulados hasta un tiempo máximo de 16 segundos, en un rango de 0,9156 a 1 no evidencia influencias significativas en los valores obtenidos para la presión y caudal en función del tiempo en las secciones estudiadas.

REFERENCIAS

- [1] Chaudhry, M.H., *Applied Hydraulic Transients*. Van Nostrand Reinhold Co., New York, N.Y., 1979.
- [2] Wylie, E.B., and Streeter, V.L., *Fluid Transients*. FEB Pres, P.O.Box 2431, Ann Arbor, Mich., 1983.
- [3] Streeter, V.L., and Wylie, E.B., *Fluid Mechanics*. 8th ed., McGraw Hill Book Co., New York, N.Y., 1987.
- [4] Wylie, E.B., *The microcomputer and pipeline transients*. Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 109, n° 12, December, 1983, page 1723-1739; paper n° 18453.
- [5] Wylie, E.B., *Fundamental equations of waterhammer*. Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 110, n° 4, April, 1984, page 539-542; paper n° 18707.
- [6] Karney, B.W., and McInnis Duncan, *Efficient calculation of transient flow in simple pipe networks*. Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 118, n° 7, July, 1992, page 1014-1029; paper n° 26648.
- [7] Courant, and Hilbert, *Methods of mathematical physics*, Vol. II, Cap. V: Interscience Publisher, 1962.
- [8] Chaudhry, M.H., and Hussaini, M.Y., *Second-order accurate explicit finite-difference schemes for waterhammer analysis*. Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME, Vol. 107, page 523-529, December 1985.
- [9] Dalmati, D., *Manual de hidráulica*, Centro de Estudiantes de Ingeniería de la Plata -CEILP-, tomo 1, cap.V, 1982.
- [10] Schlag, A., *Hidráulica*, Cap. XV y XVIII, Limusa-Wiley, S.A., México, 1966.
- [11] Greene, R. W., *Válvulas: selección, uso y mantenimiento*, McGraw-Hill, México, 1993.
- [12] The British Valve Manufacturers Association, *Technical reference book on valves for the control of fluids*, 1966.
- [13] Mendiluce Rosich, E., *El golpe de ariete en impulsiones*, págs.173-186, Bellisco Librería Editorial, Madrid, 1987.
- [14] Mancebo del Castillo, U., *Teoría del golpe de ariete y sus aplicaciones en ingeniería hidráulica*, 1990.
- [15] Goldberg, D.E., and Karr Ch. L., *Quick stroking: design of time-optimal valve motions*. Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 13, n° 6, June, 1983, page 780-795; paper n° 21592.
- [16] Molina, N. y Murga, N., *Estudio del golpe de ariete utilizando el método de las características en estaciones de bombeo de petróleo (Caleta Olivia. Pcia de Santa Cruz, Argentina)*. Jornadas Internacionales de Mecánica Computacional y CAD/CAM, Universidad de Concepción, Facultad de Ingeniería, Dpto. Ingeniería Mecánica, Chile, Noviembre de 1995.
- [17] Stuckenbruck, S., Wiggert, D.C., and Otwell, R.S., *The influence of pipe motion on acoustic wave propagation*. Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME, Vol. 107, page 518-522, December 1985.