

FLUJOS TRANSITORIOS EN SISTEMAS: TUBERÍAS, VÁLVULAS Y BOMBAS CENTRÍFUGAS

Norberto E. Molina

Cátedra de Mecánica de los Fluidos, Departamento de Ingeniería
Universidad Nacional del Sur, Av. Alem 1253, 8000 Bahía Blanca, Prov. Bs. As., Argentina
e-mail: mecflu@criba.edu.ar

RESUMEN

El trabajo aquí desarrollado es de aplicación directa en estaciones de bombeo, oleoductos y acueductos, de características físicas variables. Se estudia en particular el efecto causado por el funcionamiento defectuoso o la operación incorrecta de válvulas, o bien la parada simultánea de una o más bombas de la estación de bombeo, durante el transporte a granel de petróleo crudo desde una estación marítima hacia el buque tanque.

La utilización de métodos numéricos permite modelar la instalación física y simular el funcionamiento de las estaciones de embarque en su conjunto, encontrando, en forma aproximada, cuales serían los medios físicos a aplicar, o las condiciones de operación a observar, para evitar la rotura en alguna sección o tramo de la tubería de embarque, como así también la protección de los elementos contra posibles daños o roturas de las bombas o sistemas de control.

En el trabajo se aplica el Método de las Características para la solución del sistema de las ecuaciones hiperbólicas, implementándose condiciones de estabilidad numérica.

Se simula el efecto de un transitorio en las bombas, determinando la incidencia de la inercia de las masas en rotación y los efectos de la rugosidad en el flujo del fluido, así como el rozamiento entre el fluido y la tubería para diferentes condiciones físicas.

ABSTRACT

The work here presented is of direct application to pumping stations for water and oil pipelines with variable physical characteristics. The effects studied include those caused by faults or incorrect operation of valves and the sudden stoppage of the pumping station, during the transport of crude oil, from a coastal storage to a ship.

The use of numerical methods allows modeling the physical installation and simulating the operation of the oil pumping stations as a whole, finding the physical constraints to apply, or the operational conditions to observe, in order to avoid damages to the system components, and also to study safety elements that could avoid damages to the system.

The Method of Characteristics is also implemented for the solution of the system of the hyperbolic equations, with due consideration of the stability limits.

The effect of the water hammer on the pumps is simulated, determining the incidence of the polar moment inertia of the rotating masses and of surface roughness on the flow, as well as the friction between the fluid and the pipe for different physical conditions.

DESARROLLO TEMÁTICO

La operación de varios elementos de control, accesorios o falla del sistema propulsor, ocasiona condiciones de transitorios en cañerías de transporte de petróleo a granel.

Definición del volumen de control. Ecuaciones de continuidad y de movimiento

El volumen de control definido, como se indica en la Figura 1, con las hipótesis siguientes:

- El flujo es unidimensional.
- El rozamiento es calculado para un régimen estacionario.
- La fuerza resultante de carácter volumétrico, es en general despreciable.
- Las fuerzas de carácter exterior, o de superficie son presión y rozamiento.
- En la componente de rozamiento, se introduce el factor de Darcy-Weisbach: ' f '.

La ecuación de continuidad y la expresión de la velocidad de la onda, resulta la ecuación matricial del sistema, [1,2]:

$$\frac{\partial}{\partial t} \begin{pmatrix} H \\ V \end{pmatrix} + A(V) \frac{\partial}{\partial x} \begin{pmatrix} H \\ V \end{pmatrix} = B(V), \tag{1}$$

donde la velocidad de propagación en el medio, $a = \sqrt{kRT}$, en forma adiabática y entropía constante, {Laplace (1816), Newton (1687), Euler (1759)} [1,2]. La ecuación de carácter hiperbólico:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = a^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}. \tag{2}$$

en el seno de un fluido la perturbación es más lenta Helmholtz (1848); la ecuación que incluye los efectos elásticos del fluido y de la tubería, Korteweg (1878), está dada por:

$$a = a_0 \sqrt{1 + \left[\frac{D K_{vol.}}{e E_{elán.}} \right]^{-1}}, \tag{3}$$

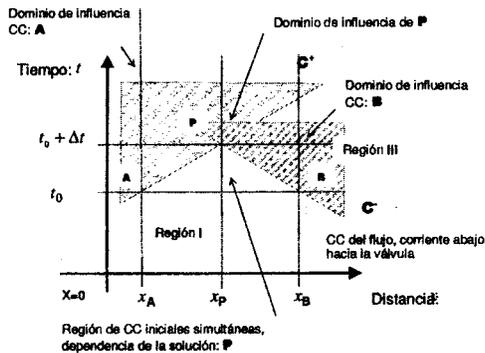
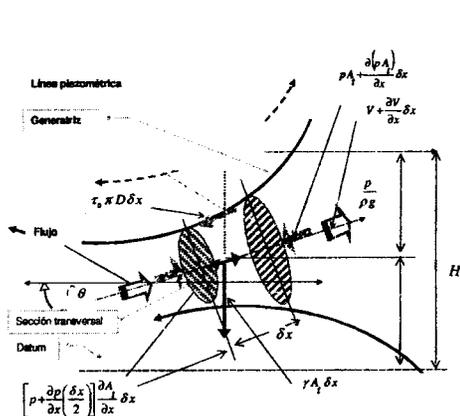


Figura 1 Esquema del volumen de control **Figura 2** Dominio del efecto de la señal en el flujo Resal y Rayleigh (1876-1877), analizan la propagación en un medio incompresible y tubería elástica, conocida como 'teoría del sonido', no obstante, es Allievi quién justifica que el término de la aceleración convectiva es despreciable respecto a la local, como asimismo introduce los términos adimensionales: tiempo de Allievi ' $t_{Allievi}$ ' y el parámetro ' $2\mathcal{E}$ ' [1].

Señal de perturbación: rápida – lenta

El transitorio puede ser caracterizado por la rapidez de variación de las variables significativas: muy rápidos debido a un cambio violento del flujo (cierre de una válvula de aguja o de compuerta), o bien lentos, (operación lenta y controlada de una válvula mariposa).

Tuberías: cañería de acero y tubos flexibles o mangueras de material compuesto

Cañerías de acero rígido forman el conducto principal; estación de bombas y válvulas: Plem; zona de control y direccionamiento a los tanques de almacenamiento: Manifold del buque. El estado de conservación de la superficie interna (Moody) define los coeficiente de rozamiento para los tramos.

Las mangueras o tubos flexibles, de desarrollo muy reciente, son de estructura compleja: varias capas de diferentes materiales pegados entre sí y un alma de acero helicoidal.

Pérdida de energía

La energía resistente se calcula a partir de la línea piezométrica, funcionando por gravedad (cotas de nivel) o bien a partir de la estación de bombas por impulsión. Las pérdidas primarias y secundarias se incluyen en:

$$H_{pérd.} = \sum_{j=1}^{n_r} f_j \left(\frac{L_j}{D_j} \right) \left(\frac{Q^2}{2g A_{transv}^2} \right) + \sum_{j=1}^{n_r} H_{resist.} \quad (4)$$

Leyes de cierre de válvulas discreto o continuo

La expresión matemática del tiempo de cierre en función del tiempo de operación $\tau(t)$ para los distintos tipos de válvulas se obtuvo a partir de datos experimentales, aproximando con funciones exponenciales del tipo: $\tau(t) = A e^{-bt}$ y con polinomios cúbicos: $\tau(t) = A + Bt + Ct^2 + Dt^3$.

Las características de las válvulas de corte están evaluadas por el coeficiente de descarga del flujo pasante por un orificio de área variable en función del tiempo, [1]:

$$A_1(t) = 0.1297 + 0.00649t \quad , \text{ para } 0 \leq t \leq 1 \text{ s ; y} \quad (5)$$

$$A_1(t) = 0.06933 + 0.004333t \quad , \text{ para } 1 < t \leq 16 \text{ s.} \quad (6)$$

La ecuación de la válvula de pétalos de doble disco (ocho pétalos triangulares), sin bifurcación, es:

$$Q_{orif.} = (C_{desc} A_{valu})_{orif.} \sqrt{2g H_{orif.}} \quad (7)$$

Las válvulas de corte y de pétalos son accionadas una vez superada la presión de calibración.

Estación de bombeo, curvas características de las bombas

Las bombas son del tipo centrífugo, con diferentes características de los rodets y cantidad de estos montadas en serie, en el eje, constituyendo la masa giratoria de la bomba. La conexión entre las bombas es mediante una red, con una tubería principal de succión y otra de salida, instalándose de acuerdo al diseño, dispositivos de corte en cada rama de la red o en los tramos colectores.

Para modelar bombas centrífugas se proponen polinomios de segundo orden, un grado mayor mejora la bondad del ajuste, requiriendo una amplia base de datos experimentales y se justifica en bombas de tipo mixto, axial y con rodets especiales. La operación de ' N_b ' equipos de bombas iguales en

paralelo, donde 'a, b y c', constantes, se determinan de los datos de ensayo utilizando mínimos cuadrados, en régimen de carga nominal. Las curvas en el plano '(Q, H)' de rendimiento ' η ', velocidad de giro ' $n = n_0$ ' y potencia, son dadas por el fabricante, reemplazando términos (Ley de semejanza) de turbo máquinas, y ordenando:

$$H_i = a \alpha_i^2 + \frac{b}{N_b} \alpha_i Q_i + \frac{c}{N_b^2} Q_i^2, \quad (8)$$

$$h_i = \frac{H_i}{H_{0,prob.}} \quad y \quad v_i = \frac{Q_i}{N_b Q_0}. \quad (9)$$

introduciendo los parámetros adimensionales, ecuación (9), hallamos el polinomio adimensional.

MÉTODO NUMÉRICO

Las ecuaciones que describen el flujo en estado transitorio en conductos cerrados son ecuaciones diferenciales en derivadas parciales hiperbólicas, con las correspondientes condiciones de borde. El método de las características utilizado para resolver las ecuaciones es estable por tramos; dadas las condiciones del problema se extiende la convergencia del método aplicando el criterio de estabilidad.

Las válvulas de regulación y control (compensada y no compensada), de seguridad (pétalos y de corte, etc.), las del tipo mariposa o de esclusa también se modelan utilizando el método de las características (Lister, Streeter y Wylie et al.), [1,2].

$$L_1 \equiv \frac{\partial Q}{\partial t} + g A \frac{\partial H}{\partial x} + f \frac{Q|Q|}{2DA} = 0, \quad (10)$$

$$L_2 \equiv a^2 \frac{\partial Q}{\partial x} + g A \frac{\partial H}{\partial t} = 0. \quad (11)$$

que combinadas con un multiplicador desconocido, resulta: $L = L_1 + \lambda L_2$. Si $H = H(x, t)$ y $Q = Q(x, t)$ son soluciones de las ecuaciones indicadas precedentemente. Ambas ecuaciones son válidas al satisfacerse la condición del autovalor λ , correspondiendo para la pendiente negativa o positiva: $\frac{dx}{dt} = \mp a$. De la Figura 2, y para ambas características, negativa '**BP**' y positiva '**AP**':

$$(Q_p - Q_A) + \frac{gA}{a} (H_p - H_A) + \frac{f \Delta t}{2DA} Q_A |Q_A| = 0, \quad (12)$$

$$(Q_p - Q_B) - \frac{gA}{a} (H_p - H_B) + \frac{f \Delta t}{2DA} Q_B |Q_B| = 0. \quad (13)$$

las características físicas del conducto o resistiva: $R = \frac{f \Delta x}{2g DA^2}$, y del flujo o impedancia: $B = \frac{a}{gA}$.

Asociando la posición del punto considerado ' i ' en correspondencia con la grilla de cálculo, en ambas ecuaciones, obtenemos las ecuaciones en forma discreta. La primera de las ecuaciones, resulta:

$$H_i = H_{i-1} + B Q_{i-1} - B Q_i - R Q_i |Q_{i-1}|. \quad (14)$$

Agrupando según los coeficientes definidos para las ecuaciones de recurrencia

$$H_i = C_p - B_p Q_i, \quad (15)$$

$$H_i = C_m - B_m Q_i, \quad (16)$$

$$H_i = (B_m C_p + B_p C_m) (B_m + B_p)^{-1}. \quad (17)$$

Para el cálculo del transitorio se requieren determinar las condiciones de frontera por tramos. Estas se desarrollan resolviendo las ecuaciones (15) o (17) en forma independiente o ambas, y la condición de contorno impuesta por los cambios de sección, continuos o no, o en función del tiempo.

Condiciones de borde en oleoductos en general: tuberías, válvulas y bombas

El coeficiente en función del grado de apertura función de la velocidad media del flujo: 'V', y la variación de la carga, dado por la expresión: $K_{abert}(\theta) = 2g \Delta H V^{-2}$; el coeficientes de pérdida localizada referido al caudal: 'Q', se expresa: $K_{perd}(\theta) = \frac{\Delta H}{Q^2}$, para cualquier instante de tiempo

' $t \leq t_c$ '. La ley de cierre o apertura de la válvula ' $\varphi[\theta(t)]$ ' es un dato del problema. La función ' τ ' es la relación entre el coeficiente de caudal para un grado de apertura: ' $\theta(t)$ ' y el coeficiente de caudal correspondiente al grado de apertura inicial [1,2]:

$$\tau(t) = \frac{K_{válv}(t)}{K_{válv}(0)} = \frac{\varphi(t)}{\varphi(0)} = \sqrt{\frac{K(0)}{K(t)}}. \quad (18)$$

En general las curvas pueden ajustarse a expresiones de la forma: $\varphi(\theta) = \theta^{valv}$.

En las válvulas esféricas, el exponente es inferior a la unidad. Para las válvulas mariposa, el exponente es mayor a uno; estos datos son indicativos y se obtuvieron en la bibliografía especializada consultada.

$$\theta(t) = \left(1 - \frac{t}{t_c}\right). \quad (19)$$

La apertura es función lineal del tiempo, desde el instante: $t = 0$, válvula totalmente abierta, hasta el instante ' t_c ', válvula cerrada, luego: $\theta(t_c) = 0$. La caracterización de la condición de contorno de válvula, se traduce en el análisis de los transitorios hidráulicos en la determinación de la expresión que relaciona los coeficientes en función del grado de apertura, con el tiempo: ' $\theta(t)$ '.

Curva característica de la bomba a diferentes velocidades de giro: de carga y de momento

De las relaciones homólogas de carga y velocidad de giro e introduciendo el caudal impulsado:

$$\frac{h_b(t)}{\alpha_j^2 + v_j^2} = WH(x_j). \quad (20)$$

Del ensayo de la bomba se obtienen los pares de puntos de funcionamiento para velocidades de giro y potencia: $P = \omega M$, en régimen permanente y la constante de inercia, para dos instantes:

$$\beta_{j-1} + \beta_j = \frac{2I\omega_b}{M_0 \Delta t} (\alpha_{j-1} - \alpha_j), \quad (21)$$

del par motor y la velocidad de giro, la función:

$$\frac{\beta(t)}{\alpha_j^2 + v_j^2} = WB(x_j). \quad (22)$$

En la hipótesis de que la bomba antes de la parada funcione en el punto de régimen, donde los parámetros característicos son función del número de revoluciones por minuto, la masa del rodete y el

fluido contenido (inercia), la carga y el caudal a través del área A_0 , definidos como: $\alpha_0 = \beta_0 = h(A_0) = v(A_0) = 1$, las funciones están dadas por las ecuaciones (20) y (22); ambas tabuladas por: Marchal, Flesch y Suter, así como Thomas y Donsky [1], validas para las diferentes zonas de trabajo de las turbo máquinas. Ver Figura 6.

El sistema de ecuaciones a resolver es similar al caso del golpe de ariete en la tubería de impulsión con válvula de retención u otras, en el caso más general, lo que cambia son las condiciones de frontera, expresadas en variables adimensionales, para el tiempo: 'j'. En un paso intermedio, se define ' β_j ', función del par motor y la inercia del sistema conocido, por lo que el sistema se reduce a dos ecuaciones con dos incógnitas: ' $v_A(j)$ ' y ' α_j ', cuya solución se podrá abordar por algún método numérico, en este caso particular se utilizó el de Newton-Raphson.

$$\frac{v_A(j)}{C_0} + C_{\text{valv.mor.}}^* (j) v_A(j) |v_A(j)| - \left[\alpha_j^2 + v_A(j)^2 \right] WH(x_j) - \frac{C_m}{C_0} = 0 \quad (23)$$

$$\frac{2I\omega_0}{M_0 \Delta t} \alpha_j + \left[\alpha_j^2 + v_A(j)^2 \right] WB(x_j) + \beta_{j-1} - \frac{2I\omega_0}{M_0 \Delta t} \alpha_{j-1} = 0 \quad (24)$$

Aplicación. Estaciones de embarque sitas en Caleta Córdova, Prov. del Chubut y Caleta Olivia, Prov. de Santa Cruz, República Argentina.

La instalación consta de un tanque de almacenamiento de petróleo liviano, a 5800 m, sobre el nivel del mar costa adentro y una cañería de acero de 1660.00 m y 0.762 m de diámetro, alimenta a cuatro bombas centrífugas de tres etapas tipo *VMT-20KFT+2H*; las características de la instalación son:

Tabla I Caleta Córdova, especificaciones técnicas

Tramo N° n° sección	Material	Longitud [m]	Diámetro [m]	Espesor [m]	Velocidad [m s ⁻¹]	N° de Reynolds
1-50	Acero	4,858.00	0.7620	0.0127	1.846	929,577.0
2-10	Compuesto	233.40	0.508	0.1000	4.192	1.394,138.0
3-4	Compuesto	21.33	0.4060	0.1000	6.553	1.734,048.0
4-2	Compuesto	10.60	0.3040	0.1000	11.643	2.322,671.0

Tabla II Caleta Olivia, especificaciones técnicas

Tramo N° n° sección	Material	Longitud [m]	Diámetro [m]	Espesor [m]	Velocidad [m s ⁻¹]	N° de Reynolds
1-50	Acero	3,740.00	0.7620	0.0127	1476.8	743,661.6
2-10	Compuesto	216.40	0.508	0.1000	3355.2	852,884.0
3-4	Compuesto	21.33	0.4060	0.1000	5242.4	1.387,238.0
4-2	Compuesto	10.60	0.3040	0.1000	9314.4	1.858,136.8

RESULTADOS

En régimen de trabajo: $H_{0, \text{trab.}}$, debe corregirse con el valor correspondiente a la pérdida, la curva característica:

$$H_{0, \text{trab.}} = 43.8042 + 100.3478 Q^2 \quad (25)$$

Punto óptimo de funcionamiento del conjunto de bombas

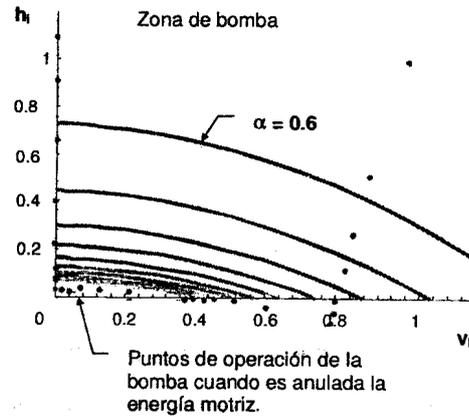
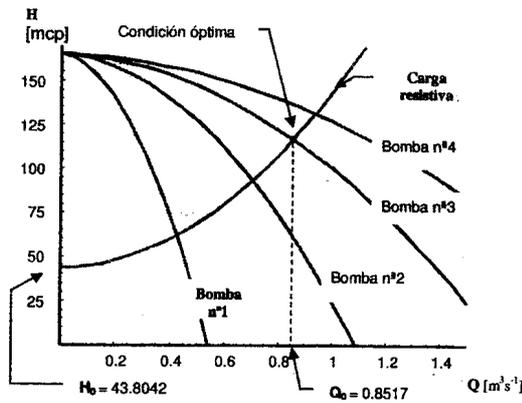


Figura 3 Curvas de funcionamiento de las bombas y resistente de la tubería **Figura 4** Curvas de funcionamiento de las bombas adimensional

La ecuación parabólica para la instalación, Ver Figura 3, con tres bombas es:

$$H = 165.314 - 8.71863 Q - 56.82111 Q^2, \tag{26}$$

verificándose para un caudal: $Q_0^{stac} = 0.8517 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, la carga resulta: $H_{0,reb} = 116.596 \text{ m}$. El conjunto de curvas paramétricas ' α_i ', en el plano adimensional (v_i, h_i) , esta dado por.

$$h_i = 1.41783 \alpha_i^2 - 0.063687 \alpha_i v_i - 0.35350 v_i^2, \tag{27}$$

de las relaciones homólogas y las condiciones de flujo:

$$\alpha^3 = - \frac{\lambda_0 (\pi n_0)^2 l}{900 \gamma Q_0 H_0} \alpha \frac{d\alpha}{dt}, \tag{28}$$

donde ' γ ' es el peso específico del fluido y ' λ_0 ' el rendimiento de la máquina en condiciones normales de funcionamiento. Finalmente, al integrarse la ecuación (33) entre los límites inicial y final ' t ', Ver Figura 4, resulta:

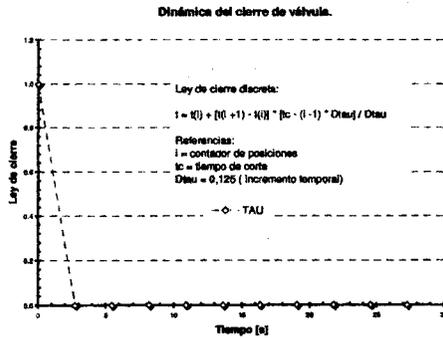
$$\alpha_i = \frac{1}{K_b T i + 1}. \tag{29}$$

Ley de cierre con posiciones discretas

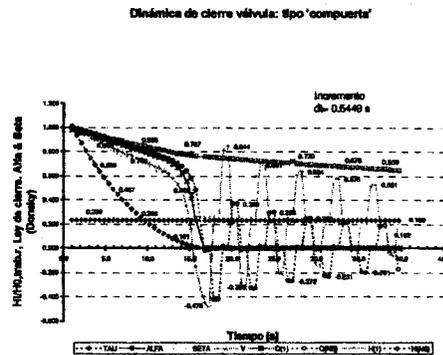
El sistema con una sola válvula en su extremo corriente abajo para el tiempo de corte ' t_c ' superior al período característico del transitorio la operación es lenta. En la hipótesis de que la velocidad varía siguiendo una ley de cierre del tipo de la ecuación (19), exponente uno, implica una distribución del tipo lineal; esta variación incide en la presión del fluido a lo largo de la tubería, Michaud [1].

Condición de estabilidad

Se resuelve el sistema para distintos números de C_n , en diferentes secciones, para un tiempo máximo de simulación de $t = 16.1 \text{ s}$, el rango es: $0.9156 \leq C_n \leq 0.95$.



Figuras 5 Posiciones discretas



Figuras 6 Posiciones continua del cierre de válvula

En las Figuras 7 y 8 se representan las respuestas para dos números de Courant y cierres de válvulas, en secciones típicas. Cualitativamente, el dominio de dependencia de los puntos solución en el esquema de cálculo contiene el dominio de dependencia en cada uno de esos puntos en el problema más general.

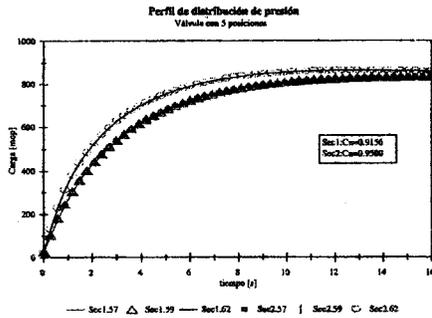


Figura 7 Variación del perfil de carga

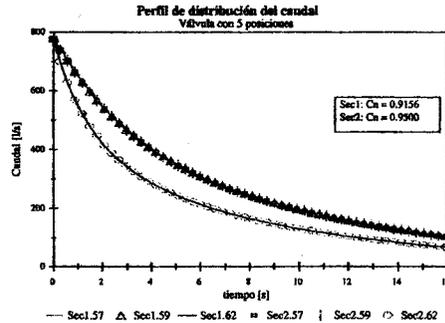


Figura 8 Variación del perfil caudal

CONCLUSIONES

- Desarrollo de modelos matemáticos originales para los componentes de un sistema completo.
- Desarrollo de un modelo dinámico global.
- Generado métodos de resolución numérica del modelo, el cual se lo ha aplicado con éxito.
- Verificación del diseño de la instalación en condiciones normales y de transitorios.
- Evaluación de distintas opciones de operación y protección del sistema, como tipo, número y ubicación de válvulas de alivio y retención de caudales, etc.

Un resultado puntual destacable es que el valor de la presión máxima es del orden de magnitud al registrado por el instrumento de control de operación de la estación de embarque sita en Caleta Córdova, (200 mcp), hoja del registro del incidente debido a una falla de operación en el MANIFOLD.

[1] Molina, Norberto E. , *Estudio del efecto del golpe de ariete en estaciones de bombeo, oleoductos y los sistemas inherentes de prevención de fallas, para evitar daños ecológicos.*, Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, Prov. Bs. As., Argentina Tesis Doctoral, 2000.

[2] Wylie Benjamin E. and Streeter, Victor L. with Suo Sisheng, *Fluid transients in systems.*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ 07632.