

ATENUACIÓN DEL GOLPE DE ARIETE EN ESTACIONES DE ELEVACIÓN DE PETRÓLEO, MEDIANTE EL USO DE BOMBAS DE VELOCIDAD VARIABLE

Norberto E. Molina *, Néstor D. Murga *y Marcelo Ciappina, ❖

** Mecánica de los Fluidos, Departamento de Ingeniería*

E-mail: mecflu@criba.edu.ar

**Hidráulica General, Departamento de Ingeniería*

E-mail: ndmurga@criba.edu.ar

Universidad Nacional del Sur

Av. Alem 1253, 8000 Bahía Blanca, Pcia. Bs.As. Rep., Argentina.

Fax.: 054 0291 4595110/4595157.

❖ Departamento de Física, Universidad Nacional del Sur

ciappina@criba.edu.ar

RESUMEN

El objeto de este trabajo, es el estudio de la forma de atenuar el efecto del golpe de ariete sobre los equipos de bombeo en estaciones de embarque de petróleo. La disminución del transitorio provocado por paradas bruscas de los equipos de bombeo: por rotura o corte de energía eléctrica, se puede obtener mediante bombas centrífugas en paralelo acopladas a motores eléctricos de velocidad variable. Se demuestra la conveniencia de que cañerías de impulsión bien conservadas reducen la altura de elevación para iguales caudales, con una apreciable disminución de la potencia necesaria para el bombeo.

El análisis del transitorio en las bombas con el objeto de determinar las presiones máximas se efectúa mediante el algoritmo de cálculo utilizando las ecuaciones características de la velocidad de onda de Allievi.

ABSTRACT

The objet of this work is the assessment of the mechanism to achieve the attenuation conditions of the destructive effect of water hammer due to sudden closure of regulation valves generated in stations of maritime pumping and pipelines in general. The diminish of the transients caused may be startup or stoppage the centrifugal pump, or by breakage of rubber tube or steel pipes is possible to obtain by means of the action of centrifugal pumping in parallel, coupled to electrical motors of variable velocity. The advantage of the clean pipelines and a good maintenance of it to reach the head with the same flow rate with low power pumping is demonstrated.

Analysis of the transients in pumps to determine the maximal pressure were done applying the Allievi Characteristics wave relations and Characteristics method introducing the Courant Number to stability condition. A mathematical model was developed.

INTRODUCCIÓN

Las estaciones de embarque de petróleo en general constan de cañerías de gran dimensión y longitud conectados en serie que transportan petróleo crudo a granel, impulsados por varios equipos de bombeo, conectados en paralelo. El

análisis propuesto esta basado en la Estación de Bombeo situada en Caleta Cordova, Pcia. de Chubut. La estación consta de cuatro bombas centrífugas de tres etapas, tipo VMT - 20 KXF + 2H, de las cuales una funciona como reserva.

El análisis de los transitorios^{1,2,3}, es complejo debido a que las pérdidas de fricción son importantes respecto a los cambios de presión causadas por una variación rápida de la velocidad de flujo. El conocimiento de la respuesta de un transitorio en el dominio de tiempo, cuando ocurre en un reducido intervalo de tiempo, determina la condición de estabilidad del sistema físico en lo que respecta a la tuberías, válvulas y bombas^{4,5}.

Las presiones máximas son determinadas con el objeto de especificar las características físicas de la cañería. Resultando sumamente importante en el diseño del oleoducto el factor de fricción^{7,8}, para determinar la distribución de presiones a lo largo de la cañería, el caudal y la capacidad de la carga en las bombas, redundando en mayor rendimiento de la instalación, y el óptimo funcionamiento de la estación de bombeo con el número adecuado de equipos de bombas.

Este estudio es general y se puede aplicar a tuberías de impulsión en serie de diámetros variables y distintas rugosidades.

LEYES DE AFINIDAD O SEMEJANZA DE LAS TURBO MÁQUINAS

Relaciones características

En las bombas centrífugas se presentan condiciones de flujo similares a las de series de bombas geoméricamente semejantes. Aplicando los principios de análisis dimensional y el procedimiento propuesto por Buckingham, se pueden obtener los tres grupos dimensionales independientes siguientes, para describir el funcionamiento de las máquinas roto dinámicas entre las que se incluyen las bombas centrífugas.

En una bomba instalada, el diámetro del rodete no varía, pero ésta puede funcionar con diferentes velocidades. Las siguientes relaciones se obtiene a partir de las ecuaciones anteriores:

$$C_Q = \frac{Q}{n d_r^3} \quad (1)$$

$$C_H = \frac{H}{n^2 d_r^2} \quad (2)$$

$$C_P = \frac{P}{n^3 d_r^5} \quad (3)$$

Donde:

C_Q = coeficiente de caudal , C_H = coeficiente de altura , C_P = coeficiente de potencia , Q = caudal H = altura ,
 P = potencia absorbida , d_r = diámetro del rodete y n = velocidad de giro .

(5)

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1}{n_2} \quad (4)$$

$$\frac{H_1}{H_2} = \frac{n_1^2}{n_2^2} \quad (5)$$

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{n_1^3}{n_2^3} \quad (6)$$

Estas relaciones, conocidas globalmente como leyes de afinidad, se utilizan para determinar los efectos de los cambios de velocidad sobre el caudal, altura y potencia absorbida de una bomba a partir de los datos de ensayo para condiciones establecidas.

DETERMINACIÓN DEL GOLPE DE ARIETE EN LAS BOMBAS

Ecuación general de Allievi

De la ecuación de la dinámica en un conducto y el análisis cinemático mediante la ecuación de continuidad en el tubo de corriente, introduciendo las simplificaciones de: flujo sin rozamiento, la ausencia de flujo convectivo y uniformidad de la presión en la sección transversales, se deduce la ecuación semejante a la de la onda expresada en velocidad de flujo y carga.

Para un instante $t = \frac{t}{T_{Allievi}}$, en $x = L$, reemplazando y ordenando, algebraicamente la ecuación discreta se

$$\text{escribe como: } H_i + H_{i-1} - 2H_0 = \frac{a}{g}(V_{i-1} - V_i) \quad (7)$$

La velocidad de la onda, en un conducto esta dada por:

$$a = 100 \left[\sqrt{\gamma g^{-1} \left(\frac{1}{k_{vol.}} + \frac{1}{E_{tubería}} \right)} \right]^{-1} \quad (8)$$

La ecuación permite calcular la carga piezométrica en la sección adyacente al elemento de control para el instante i , si se conoce su valor en el instante anterior $i - 1$.

Expresando la carga piezométrica y la velocidad del flujo, en relación a las de condiciones normales, H_0 y V_0 , resultan las relaciones adimensionales: $h_i = \frac{H_i}{H_0}$ y $v_i = \frac{Q_i}{Q_0}$, respectivamente. Introduciendo éstas últimas en (4) y

operando algebraicamente, se obtiene la ecuación más general para el análisis del golpe de ariete generado por el cambio brusco de velocidad del flujo:

$$h_i + h_{i-1} - 2 = 2\varepsilon(v_i - v_{i-1}) \quad (9)$$

En el caso que analizamos como la dirección del flujo para las condiciones iniciales coincide con la de propagación de la onda directa de presión, el segundo miembro de esta ecuación y entonces adquiere la forma: que es la ecuación general que rige el fenómeno de golpe de ariete en la bomba.

$$2\varepsilon = \frac{a V_0}{g H_0} \quad (10)$$

ECUACIONES DE BOMBEO PARA PLANTAS DE BOMBEO

En la estación de bombeo, los equipos son de iguales características y operan en paralelo^{3,4}, luego el valor del caudal Q_0 para el cálculo de 2ε , es el correspondiente al número de equipos N_b .

Potencia, momento de inercia y par motor

El par motor depende de la rapidez de variación de la velocidad angular ' ω ' de los elementos giratorios del conjunto y del momento de inercia ' I '; la potencia calculada mediante la expresión conocida:

$$P = -\omega I \frac{d\omega}{dt} \quad (11)$$

Cuando se interrumpe el suministro de energía, la variación dependerá del cambio, entre la condición inicial y final. En régimen permanente, para un rendimiento η_0 la potencia es expresa como:

$$P_0 = \frac{\gamma Q_0 H_0}{\eta_0} \quad (12)$$

Utilizando la relación de semejanza para turbo máquinas:

$$\alpha = Q_1 Q_2^{-1} \quad (13)$$

donde se verifican las siguientes relaciones: α^2 y α^3 ; de las ecuaciones (11) y (12), resulta:

$$\alpha^3 = -\frac{\eta_0 (\pi n_0)^2}{900 \gamma Q_0 H_0} \alpha \frac{d\alpha}{dt} \quad (14)$$

Si la ecuación anterior se integra tomando como límites las condiciones iniciales, y las correspondientes a cualquier instante de la primera zona de operación de la bomba, da como resultado :

Parámetro característico α

Integrando (12) entre la condición inicial: $\alpha = 1$ y $t = 0$, y cualquier instante de la zona de operación de la turbo máquina como bomba $Q \geq 0$, la ecuación paramétrica en α , discreta es:

$$\alpha_i = \frac{1}{i K_b + 1} \quad (15)$$

donde la constante vale: $K_b = \frac{900 \gamma Q_0 H_0}{\eta_0 I (\pi n_0)^2}$ (16)

Parámetro característico β

La variación de α , ecuación (14) implica el conocimiento del cambio del par motor T_{par} , función del tiempo mediante la relación característica β , como sigue:

$$\beta = \frac{T_{par}}{T_{par,0}} \quad (17)$$

Incidencia de la inercia del conjunto bomba - motor y del fluido confinado en la cavidad rodete – carcasa el momento de inercia se especifica a partir de los datos de ensayo en banco para el tiempo de parada.

Curvas paramétricas de las bombas

Utilizando la ecuación de la energía, resulta la ecuación de la carga un polinomio de segundo orden donde las constantes para la bomba centrífuga especificada se calculan a partir de los datos obtenidos en pruebas de funcionamiento en banco para diferentes caudales. Introduciendo las ecuaciones de semejanza para las turbo máquinas, reemplazando y agrupando convenientemente, resulta:

$$h_i = A_b \alpha_i^2 + B_b \alpha_i v_i + C_b v_i^2, \quad \alpha_i > 0, v_i \geq 0 \quad (18)$$

Para determinar los efectos del golpe de ariete en el equipo de bombeo, además de la ecuación (19), es necesario recurrir a la formula clásica de L. Allievi .

ALGORITMO DE CÁLCULO: ESQUEMA

Con las condiciones iniciales, operación de la bomba, y flujo permanente Q_0, H_0, n_0 y η_0 , y el momento de inercia especificado: I , se determina la constante de la turbo máquina: K_b . Conocido el tiempo de parada y el tiempo de corte, definimos el paso discreto i , con el cual se calcula el correspondiente parámetro α_i , en cada posición, el cual a su vez satisface las condiciones del polinomio característico en el plano adimensional (h_i, v_i). El algoritmo permite definir la región de funcionamiento de la máquina como bomba según las características físicas.

PROBLEMA DE APLICACIÓN

El análisis del fenómeno transitorio se desarrolla para una estación de embarque de petróleo, de impulsión. Del registro de operación de varios buques, durante el cual varió el número de bombas en funcionamiento, de un total de cuatro, se determina el caudal de bombeo y de la piezométrica del oleoducto, los coeficientes de rozamiento f , por tramo. El módulo de elasticidad volumétrico $K_{vol.}$ y la densidad del petróleo liviano ρ , son suministrados por el fabricante y operador.

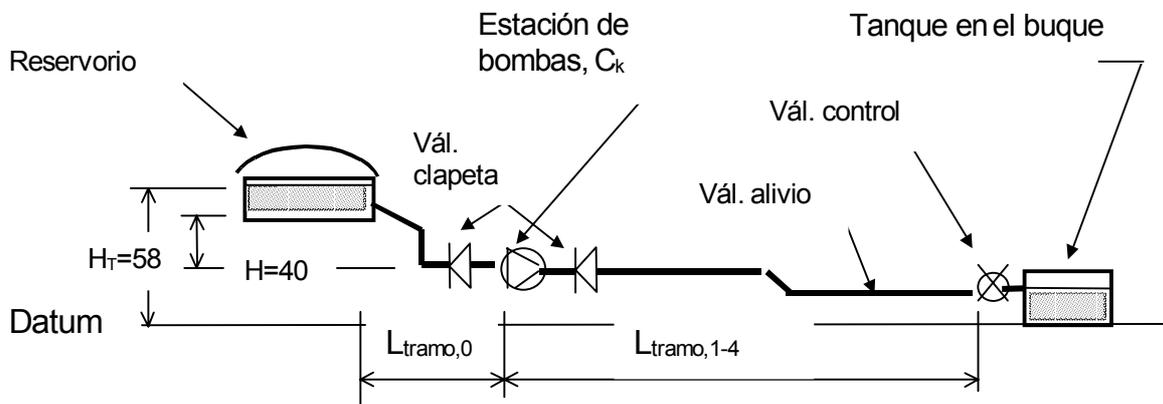


FIG. 1 Descripción de la instalación, esquema

HIPÓTESIS

1. No se tienen en cuenta: el movimiento del buque ni el de la monoboya, originado por la marea, tampoco las cargas resultantes sobre los tramos de material compuesto debido a la presión hidrostática o de desplazamiento.
2. La deformación elástica de las tuberías y el módulo volumétrico están implícitos en la ecuación de velocidad de la onda calculada para cada tramo.
3. El coeficiente de rozamiento es constante en cada tramo.
4. El nivel del reservorio se mantiene constante.
5. La longitud de los tramos para el cálculo numérico se subdivide en forma tal que resulte proporcional la longitud de estos con la velocidad de la onda para un incremento de tiempo mínimo.

Cálculo hidráulico en régimen permanente

Desde el depósito a la estación de bombas y desde ésta al Manifold del buque considerando las cotas de nivel de la instalación, las pérdidas primarias y secundarias de energía, mediante la ecuación de Darcy Weibach:

$$H = \sum_{i=1}^n \left[f_i \left(\frac{L_i}{D_i} \right) \left(\frac{Q^2}{2g A_i^2} \right) + H_{perd.s,i} \right] \quad (19)$$

TABLA 1 Especificaciones de la instalación: oleoducto

| Tramo | L [m] | D [m] | Re | Coef. de fricción: f | |
|-------|----------|-------|-----------|------------------------|-------|
| | | | | antiguo | nuevo |
| 0 | 1.66 | 0.762 | 569.183 | 0.0800 | 0.080 |
| 1 | 4,860.00 | 0.762 | 569.061 | 0.0715 | 0.018 |
| 2 | 216.40 | 0.508 | 853.866 | 0.0156 | 0.012 |
| 3 | 21.33 | 0.406 | 1.067.206 | 0.0183 | 0.012 |
| 4 | 10.60 | 0.305 | 1.423.050 | 0.0120 | 0.012 |

La energía resistente de las tuberías se calcula con la línea piezométrica, determinando el punto óptimo de funcionamiento de las bombas en su conjunto.

El coeficiente $f = F_{turb.} \left(\frac{k}{D}, R_e \right)$ para el flujo turbulento, donde k es rugosidad absoluta en [mm] y; ν es la viscosidad cinemática en [$m^2 s^{-1}$]; si el factor esta dado por $f = F_{ple.turb.} \left(\frac{k}{D} \right)$, el flujo se denomina plenamente turbulento, el cual no depende del número de Reynolds: $R_e = \frac{VD}{\nu}$, permaneciendo constante para cada rugosidad relativa, de acuerdo al gráfico de Moody. Para un petróleo de $\gamma = 920 [Kg m^{-3}]$. Si las cañerías fueran nuevas o en buenas condiciones de conservación, resultan:

$$H_{trab,0} = H_0 + 43.73703 Q^2 \quad (20)$$

en la instalación actual, resulta:

$$H_{trab,0} = H_0 + 100.3478 Q^2 \quad (21)$$

En ambos casos, la carga inicial en la sala de bombas es: $H_0 = 43.8042$

Estación de bombas

La zona de trabajo de una bomba depende de la característica motriz y la resistencia del sistema al flujo del fluido. La curva motriz de bombas acopladas en paralelo, se obtiene sumando los caudales para una misma altura de carga, en el plano (Q, H) , mediante válvulas del tipo clapeta o By-pass valve.

Zonas de operación de las turbo máquinas, como bombas

A partir del instante de la interrupción de energía del motor propulsor de la bomba, se inicia la zona de operación de bomba del rodete: disminuyendo la velocidad angular, la carga piezométrica y el caudal entregado, generándose ondas de presión desde la bomba hasta el depósito.

Funcionamiento de la estación de bombeo: ecuaciones de la curva motriz

De los datos de ensayos de ensayo de las bombas a una velocidad $n_{trab} = 1480$ rpm :

Una bomba:

$$H_1 = 164.642 + 0.2141266 Q - 631.6151 Q^2 \quad (22)$$

Dos bombas:

$$H_2 = 164.644 - 0.3885269 Q - 157.0642 Q^2 \quad (23)$$

Tres bombas:

$$H_3 = 164.6417 + 0.07105255 Q - 70.17862 Q^2 \quad (24)$$

Para $n_{trab} = 1200$ rpm, junto a las relaciones de semejanza de las turbo máquinas:

Una bomba:

$$H_{11} = 107.5059 + 0.212631 Q - 631.8286 Q^2 \quad (25)$$

Dos bombas:

$$H_{21} = 107.2825 + 3.611687 Q - 165.9337 Q^2 \quad (26)$$

Tres bombas:

$$H_{31} = 107.514 - 0.0828132 Q - 69.9995 Q^2 \quad (27)$$

Tres bombas a $n_{trab} = 1300$ rpm.

$$H_4 = 127.5807 - 4.76922 Q - 63.5864 Q^2 \quad (28)$$

RESULTADOS

Desde el depósito hasta las bombas el flujo es por gravedad, para cada una de las bombas, el caudal es: $Q_{bomba,0} = 0.2839 [m^3 s^{-1}]$.

Con las ecuaciones de Allievi se determina la variación de la presión en términos relativos, en función del tiempo, para tres situaciones de funcionamiento de las bombas, correspondientes a las siguientes condiciones de flujo permanente ver Tabla 2:

En la Figura 3 se representan la zona definida por las ecuaciones resistivas y de rozamiento, para la cañería de mayor longitud, diámetro de 0.762, actual y nueva. El flujo en la tubería principal es turbulento, en las restantes cañerías el flujo resulta plenamente turbulento. La Tabla 2 sintetiza los resultados de la Figura 2

Al sustituir los coeficientes por su valor, el polinomio característico varía en función del parámetro α_i de funcionamiento y las relaciones adimensionales (13), con: $T_{parad.} = 10.493 s$.

Curvas características de funcionamiento

En la Figura 2 se grafican las curvas resistivas de las cañerías actuales y nuevas y características de las bombas, en la Tabla 2 se sintetizan los resultados.

TABLA 2 Condiciones de operación de la estación de bombeo

| Nº de bombas | Velocidad [rpm] | Caudal Q[m³/s] | | Altura [mcp] | | Potencia, [CV] | |
|--------------|-----------------|----------------|-------|--------------|-------|----------------|-------|
| | | actual | nueva | actual | nueva | actual | nueva |
| Una | 1480 | 0.500 | ----- | ----- | ----- | ----- | ----- |
| Dos | 1480 | 0.777 | ----- | 89.00 | ----- | 1074 | ----- |
| | | 0.665 | | | | | |
| Tres | 1480 | 0.944 | 1.00 | 116.60 | 90.00 | 1612 | 1410 |
| | | 0.850 | | | | | |
| Una | 1200 | ----- | ----- | ----- | ----- | ----- | ----- |
| Dos | 1200 | 0.565 | 0.640 | 76.00 | 63.00 | 684 | 642 |
| Tres | 1200 | 0.625 | 0.740 | 84.00 | 69.00 | 836 | 813 |
| Tres | 1300 | 0.705 | 0.850 | 94.00 | 76.00 | 1055 | 1017 |

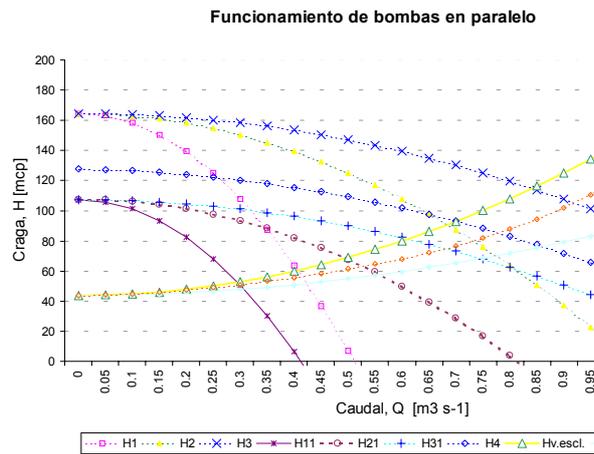


FIG. 2 Condiciones de trabajo: rugosidad de la tubería, potencia y velocidad variable.

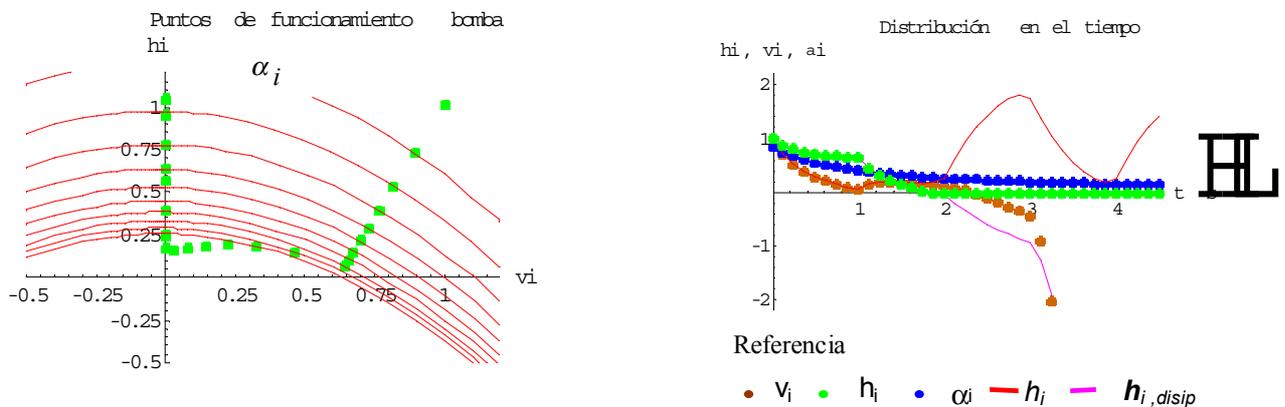


FIG. 3 Curvas paramétricas de α_i , en el plano (h_i, v_i) , carga máxima en función de ' $K_b T_{parada}$ ', bombas centrífugas con $N_s = 25$. Caso de tres bombas, $n_b = 1300$ $H = 76.00$, $Q = 0.85$.

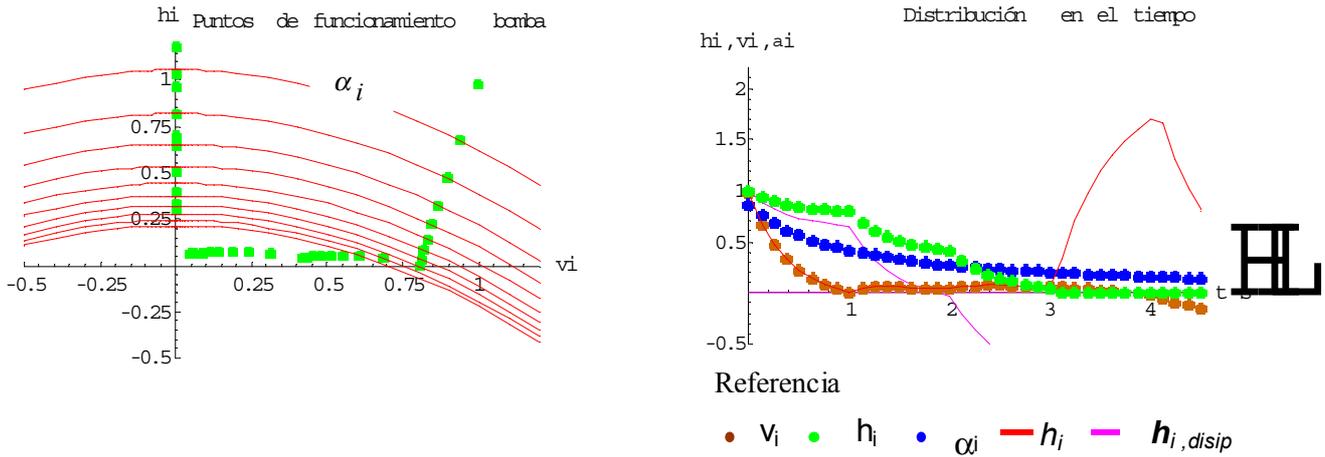


FIG. 4 Curvas paramétricas de α_i . Transitorio en la instalación: h_i, v_i en función del tiempo. Caso 3 bombas , $n_b = 1485$, $H = 116.66$, $Q = 0.85$, $\alpha(3) = 0.1$, $dt = 0.125$ y $2\varepsilon = 5.107$.

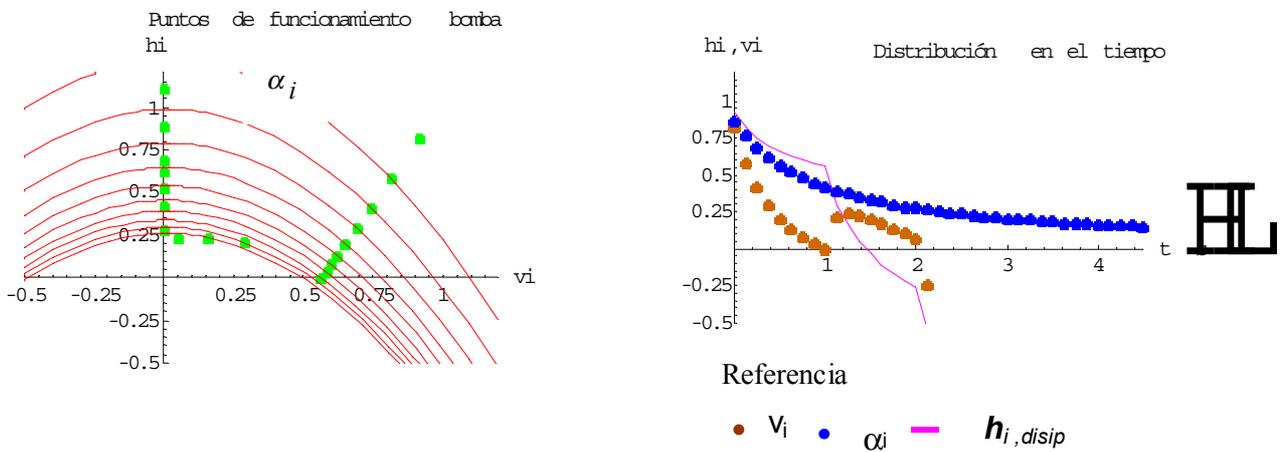


FIG. 5 Transitorio en la instalación: h_i, v_i en función del tiempo, para $H = 63.0$, $Q = 0.64$, $\alpha(3) = 0.1$. , Zona de disipación.

El tiempo total de cierre es de 28 segundos Se observa la disminución de la presión máxima, al cerrar lentamente las válvulas. Los registradores de presión durante el transitorio, debido al cierre rápido de las válvulas mariposas en el buque, indicaron 200 y 220 [mcp]. Para el cierre instantáneo la presión máxima es: 232.98 [mcp].

CONCLUSIONES

Del análisis de la Fig. 3 y Tabla 2 se deduce que una sola bomba no es solución del sistema: debería funcionar a baja velocidad, con un caudal menor al requerido. Para el caudal actual, la potencia es mayor respecto a la misma configuración en mejores condiciones de mantenimiento. Utilizando tuberías con mejor acabado superficial, se logra un ahorro del 37 % respecto a la potencia.

Las válvulas de retención introducen un flujo de retorno o inverso, antes del cierre total. Cuando el flujo se interrumpe en un tiempo reducido, se origina un aumento de presión, la cual deberá encontrarse dentro de los límites compatibles con la resistencia mecánica de las tuberías y de la válvula.

Con el objeto de no alcanzar el punto en el cual la velocidad el flujo es nulo en el rodete, y consecuentemente el giro inverso de este, es conveniente la protección de las bombas mediante válvulas del tipo by-pass antes y después

de cada bomba, se recomienda la instalación de una válvula de alivio compensada debe ubicarse en la boya o una válvula del tipo de pétalos entre el Plem y el Manifold, o ambas.

Actualmente se encuentra gran disponibilidad de motores de velocidad variables a través del control de la frecuencia, resultando ventajoso respecto a la regulación del caudal por medio de las válvulas de distintas características.

En todos los casos el caudal descargando debe ser almacenado, dentro de las posibilidades, para evitar daños ecológicos.

REFERENCIAS

- [1] B. Wylie, V. Streeter & Lisheng Suo, Fluid Transients in Systems. Prentice Hall, Englewoods Cliffs, NJ07632 ISBN 0-13-322173-3, (1993).
- [2] H Chaudhry , Applied Hydraulic Transients. Ed. Reinhold. Nueva York (1990).
- [3] A.Betâmio de Almeida and E. Koelle, Fluid Transients in piper Networks. Ed. Computational Mechanics Publications Elsevier Appied Science. Londres (1992).
- [4] Univ. de Coimbra (Portugal) , Univ. Politécnica de Valencia (España) y Univ. de la República (Uruguay), Transitorios y Oscilaciones en sistemas hidráulicos a presión. Ed. Abreu, Guarga y Izquierdo. Uruguay (1994).
- [5] CRANE, Flujo de Fluidos en Válvulas, accesorios y tuberías. Mc.G.Hill Méx. (1992). [6] N. Molina y N. Murga, Análisis de válvulas de alivio, compensada y de ruptura en cañerías en serie con flujo transitorio. Aplicación en Terminales de Petróleo existente. Ed. Sociedad Venezolana de Métodos Numéricos en Ingeniería. Venezuela. Marzo 1996.
- [7] N. Molina y N. Murga, Prevention of ecological damage due to petroleum spills in port works under transient flow condition. Ed. Proceedings of de Bahía Blanca International Coastal Symposium. Bahía Blanca. Argentina, Noviembre 1996..
- [8] N. Molina y N. Murga, Pump stations and pipes protection pipelines systems subject to transient flows. IVWCCM, iacm, 29 jun – 2jul 1998, Bs.As., Argentina.