

**SISTEMAS DE PROTECCIÓN DE BOMBAS Y CAÑERÍAS EN OLEODUCTOS  
SOMETIDOS A ESCURRIMIENTOS TRANSITORIOS.**

**Norberto E. Molina, Néstor D. Murga**  
Departamento de Ingeniería, Área Hidráulica,  
Universidad Nacional del Sur, Av. Alem 1235, 8000 Bahía Blanca, Argentina.  
E-mail: fipetti@criba.edu.ar

**RESUMEN**

El presente trabajo tiene aplicación directa en estaciones de bombeo marítima y oleoductos en general de características variables y fluidos de baja viscosidad, existentes en el país.

Mediante la simulación por métodos numéricos del funcionamiento de tales estaciones es posible determinar en forma aproximada, cuales serían los medios físicos a aplicar para evitar el derrame de petróleo, con el consecuente daño ecológico.

El modelo matemático desarrollado resuelve las ecuaciones hiperbólicas del algoritmo formulado en base a las ecuaciones características, acotadas por el criterio de estabilidad de Courant (CFL).

**ABSTRACT**

The present work has direct application in stations of maritime pumping and pipelines in general of variable characteristics and flows of low viscosity, existent in our country.

In the important transient flow analysis arising from hydraulic design are involved the startup, stoppage, control of pump and the opening and closing of valve associated with them.

By means of the simulation by numerical method of the performance of such stations it is possible to determine approximately, the physical means to apply in order to avoid petroleum overflowing, with the consequent ecological damages.

The developed mathematical model resolves the hyperbolically equations of the formulated algorithm based on the characteristic equations, limited by the stability criteria of Courant ( CFL ).

**Key Words:**

Transients-Centrifugal Pumps-Oil pipeline- Numerical Simulation-Parallel Pumping Plant- CFL conditions-Fortran code-Mathematica code.

## INTRODUCCIÓN

Los sistemas de bombas de las instalaciones portuarias de embarque de petróleo están sometidos al efecto destructivo del golpe de ariete. Esto ocurre ante una eventual falla del motor propulsor previéndose mecanismos para evitar que las bombas trabajen como una turbina, al invertirse la dirección del flujo en las cañerías de bombeo, con la consiguiente rotura de las bombas. En este trabajo se determinan los parámetros característicos de las bombas,  $\alpha$  y  $\beta$ , partiendo de las condiciones iniciales, los mismos se calculan en tres zonas de funcionamiento: a) *Bomba*, b) *Disipación de energía* y c) *Turbina*. Se consideran los efectos de inercia y par motor de los equipos.

## APLICACIÓN

### Descripción de la instalación

El estudio se desarrolla con datos de una estación de embarque de petróleo liviano, por bombeo, ubicada Caleta Córdova, provincia del Chubut. La instalación consta de un tanque de almacenamiento de petróleo a 58 m sobre el nivel del mar, cañería de acero que alimenta a cuatro bombas centrífugas, del tipo VMT-20KXF+2H, ubicada a una cota de 18 m sobre el nivel del mar. A partir de la estación de bombeo continúa el oleoducto estando empalmado el tramo de acero con una cañería de material compuesto, de menor diámetro, encontrándose en parte sumergido en el mar, sobre el talud marino y conectada a su vez con la monoboja. Parte de ésta, a partir de la monoboja, se halla a nivel del mar hasta el buque, montada sobre flotadores. La instalación se completa con válvulas, bridas de conexión y cambio de sección, codos y curvas de gran radio de giro. Los valores de: potencia, rendimiento, rpm, caudal, carga y peso específico, son obtenidos del ensayo de funcionamiento del grupo motor bomba.

### Cálculo del caudal de bombeo a régimen permanente.

El caudal de bombeo se determina durante la operación con varios buques y diferente número de bombas en funcionamiento, y estado de la marea: alta y baja.

Para tres bombas accionadas y una de reserva el caudal es  $Q_0 = 0.8517 \text{ m}^3 / \text{s}$ . El régimen de escurrimiento es plenamente turbulento. Ver Tabla I.

### Determinación de la pérdida de energía en la instalación.

Las pérdidas primarias se calculan mediante la ecuación de Darcy-Weisbach, en nuestro caso, cinco cañerías:

$$H = \sum_{i=1}^4 f \frac{l_i}{d_i} \frac{V_i^2}{2g} \quad (1)$$

El coeficiente de rozamiento '  $f$  ', se calcula en la hipótesis de régimen estacionario, dado que el coeficiente de fricción es variable durante el transitorio debido a la evolución en el tiempo de los perfiles de velocidad, como ocurre en el tramo recto. Su influencia es leve en el valor del primer pico de presión, que es el de mayor interés en ingeniería, Ref.[1]. Las pérdidas secundarias o de forma corresponden en nuestro caso a codos de 45° y 90°, válvulas esclusa, válvulas mariposa y reducciones de sección. Ref.[2].

### Determinación de la carga estática .

La carga estática de referencia es consecuencia del efecto de pérdida de energía sumado a la cota de instalación de la estación de bombas, dado por:  $H_0 = 18 + 25.8042$  .

### Línea piezométrica: Carga resistente en la cañería.

La carga de trabajo para el correcto funcionamiento de la estación de bombeo, en condiciones nominales, se deben determinar con las pérdidas a lo largo de la instalación. La pérdida de energía total en la instalación es:  $H_T = 100.752 m$  . Ver Tabla I.

Tabla I

Caudal	longitud	diámetro	velocidad	Reynolds	coef. fricción	presión
$Q_0$	$l$	$d$	$v$	Re	$f$	$p$
0.8517	1660	0.7620	1.867	569061	0.08000	$H_m$ 116.596
0.8517	4858	0.7620	1.867	569061	0.07152	58.533
0.8517	216.40	0.5080	4.202	853866	0.01563	27.729
0.8517	21.33	0.4064	6.565	1067206	0.01829	25.235
0.8517	10.60	0.3048	11.672	1423050	0.02148	17.352

Finalmente, la ecuación ajustada con los datos de la instalación y la carga estática resulta:

$$H = 43.8042 + 100.3478 Q^2 \quad (2)$$

La ecuación nos permite determinar el punto de funcionamiento de las turbo-bombas, debido a que éste depende simultáneamente de la características motriz de la instalación y de la resistencia al flujo de fluido de la instalación en su conjunto.

### Acoplamiento de las bombas en paralelo.

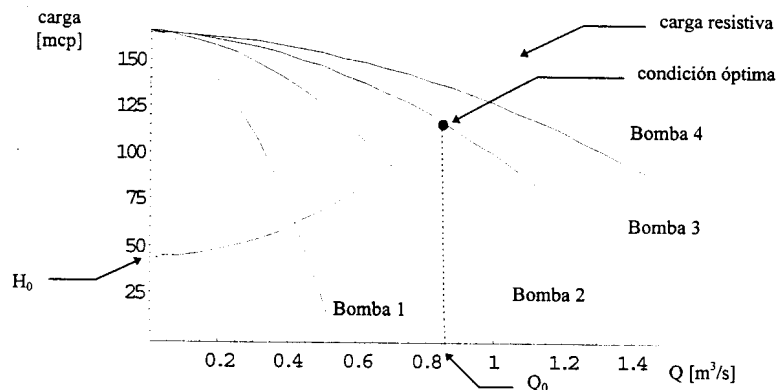


Fig. 1. Puntos de funcionamiento de la estación de bombeo.

En un acoplamiento en paralelo se incrementa la carga en función del caudal. El régimen de servicio puede garantizarse mediante la progresiva entrada en funcionamiento de los distintos grupos compuestos por motor y bomba, manteniendo el rendimiento del conjunto durante la operación, Ref.[3]. Las curvas paramétricas en el plano Q-H, que representan el caudal para cada una de las bombas en funcionamiento resultan del tipo como el indicado en la Fig.1.

#### Curvas características de las bombas.

Si se considera la curva carga-gasto para la condición de operación normal, es posible expresar la situación a través de la expresión parabólica:

$$H = a_1 + \frac{b}{N_{eb}} Q + \frac{c}{N_{eb}^2} Q^2 \quad (3)$$

Para la instalación analizada siguiendo el procedimiento, resulta:

$$H = 165.314 - 8.71863Q - 56.8211Q^2 \quad (4)$$

Definiendo los parámetros adimensionales  $\alpha_i^2$  y  $\alpha_i$ , los cuales relacionan las alturas de carga y los caudales, respectivamente, de acuerdo a las leyes de semejanza para turbinas, Ref. [1].

$$\alpha_i^2 = \frac{H_i}{H_m} \text{ y } \alpha_i = \frac{Q_i}{Q_0} \quad (5)$$

Introduciendo los parámetros adimensionales:

$$H_i = a_1 \alpha_i^2 + \frac{b}{N_{eb}} \alpha_i Q + \frac{c}{N_{eb}^2} Q^2 \quad (6)$$

Luego, los coeficientes resultan del tipo:

$$h_i = \frac{H_i}{H_m} \text{ y } v_i = \frac{Q_i}{N_{eb} Q_0} \quad (7)$$

Agrupando los términos, los coeficientes del polinomio son de la forma:

$$Ab = \frac{a_1}{H_m}; Bb = \frac{b Q_0}{H_m} \text{ y } Cb = \frac{c Q_0^2}{H_m} \quad (8)$$

Finalmente resulta:

$$h_i = 1.41697 \alpha_i^2 - 0.06365 \alpha_i v_i - 0.3529 v_i^2 \quad (9)$$

#### Golpe de ariete en plantas de bombeo.

En el instante en que se presenta la interrupción citada, se inicia la *zona de funcionamiento de la bomba*, donde la única energía que permite el giro de las masas rotantes del conjunto

bomba-motor, es la cinética de estos últimos, disminuyendo la velocidad angular, y elevando la carga piezométrica disminuyendo el gasto suministrado por la bomba, generándose ondas de presión que partiendo de ésta viajan por la tubería hasta el depósito del buque.

La disminución de la velocidad angular continúa hasta el límite en que la bomba no puede continuar alimentando a la tubería de descarga y como no existe una válvula que lo impida, el flujo que pasa por la carcasa dividida de la bomba invierte su dirección aunque los elementos rotatorios todavía giran en el sentido original, iniciándose la *zona de disipación de energía*.

A partir del instante anterior la velocidad angular disminuye aún más rápidamente hasta llegar a un valor nulo. A continuación la bomba comienza a trabajar como turbina, o *zona de turbina*. A medida que la velocidad de rotación inversa de los elementos de la bomba se aproxima a su valor máximo, el flujo invertido que circula a través del rodete y difusor se reduce.

### Ecuaciones generales

Se define al tiempo de Allievi a la relación entre longitud y la celeridad de la onda 'a', como:

$$T = \frac{2l}{a} \quad (10)$$

Las ecuaciones adimensionales discretas para el caso de plantas de bombeo, resultan:

a) *Zona de operación como bomba:*

$$h_i + h_{i-1} - 2 = 2\varepsilon(v_i - v_{i-1}) \quad (11)$$

El factor  $2\varepsilon = 5.107$ , representa la pendiente de las curvas características, constante básica utilizada en el método desarrollado por Shnyder - Bergeron, calculado con:

$$2\varepsilon = \frac{aV_0}{gH_m} \quad (12)$$

b) *Zona de disipación de energía, como bomba, y turbina:*

$$h_i + h_{i-1} - 2 = 2\varepsilon(v_{i-1} - v_i) \quad (13)$$

### Efecto de la inercia del conjunto bomba - motor

El par motor 'T<sub>r</sub>' es función del momento de inercia, de acuerdo a la siguiente expresión:

$$T_r = -I \frac{d\omega}{dt} \quad (14)$$

El momento de inercia por bomba, es:  $I = 6.66 \text{ Kgms}^2$ . La potencia entregada esta dada por la relación:  $P = \omega T_r$ ; de la Ley de semejanza para turbo máquinas se tiene lo siguiente:

$$P = P_0 \alpha^{*3} \text{ y } \omega = \omega_0 \alpha^* \quad (15)$$

La potencia, esta dada por:

$$P = \gamma \frac{Q_0 H_m}{\eta_0} \quad (16)$$

El subíndice cero denota las condiciones de flujo permanente; reordenando las ecuaciones e integrando entre límites adecuados para las condiciones físicas del problema, encontramos la expresión paramétrica de ' $\alpha_i$ ' en función del tiempo y las condiciones iniciales de carga y caudal, donde  $K_b T = 2.3969$ :

$$\alpha_i = \frac{1}{(K_b T i + 1)} \quad (17)$$

estando definido el paso de tiempo discreto por:  $t = iT$ ; y el factor ' $K_b$ ' por:

$$K_b = \frac{900 \gamma Q_0 H_m}{\eta_0 I (\pi n_0)^2} \quad (18)$$

En la zona de disipación de energía y turbina el valor del parámetro característico, luego de efectuada la integración para  $t_{de} = 7.89266$ , esta dada por:

$$\alpha_i = \frac{1}{(-K_b T i + t_{de})} \quad (19)$$

Resulta conveniente señalar que debemos conocer el par motor como una función del tiempo, además definir un nuevo parámetro característico de las turbo máquinas ' $\beta_i$ ', esto es:

$$\beta_i = \frac{T_r}{(T_r)_0} \quad (20)$$

El rango del factor ' $K_b T$ ' varía entre 0.10 y 5.0, Ref.[1]; la ecuación proporciona resultados precisos para la zona de operación de la bomba, cuando ' $Q \geq 0$ '.

El valor de ' $\beta_i$ ' se calcula en función de ' $\alpha_i$ '; efectuando una integración aproximada para dos instantes consecutivos, o lo que es lo mismo un ' $\Delta t$ ', por lo que resulta:

$$\beta_i + \beta_{i+1} = \frac{2 I \omega_0}{(T_r)_0 \Delta t} (\alpha_i - \alpha_{i+1}) \quad (21)$$

**Celeridad de la onda**

$$a = 100 \left[ \frac{\gamma}{g} \left( \frac{1}{k} + \frac{1}{C} \right) \right]^{-1/2} \quad (22)$$

La celeridad de las ondas de presión en un conducto se calculan utilizando la ecuación (22). Las constantes:  $\gamma$ ,  $k$  y  $C$ , son función del fluido, la geometría y el material del oleoducto. Los coeficientes se obtienen de Tablas y gráficos, Ref. [4].

### Análisis de conductos con características variables

La condición de variabilidad de las características físicas de las tuberías, esto es la elasticidad del material y la geometría en toda su extensión, hace necesario, recurrir al dimensionamiento de una tubería equivalente para aplicar el método de Allievi. Métodos más generalizados, por ejemplo el de las 'Características' permite analizar y resolver el problema por tramos del oleoducto, reduciendo la inestabilidad numérica del sistema, en su conjunto, al introducir el criterio correspondiente de convergencia: CFL. Ref.[5].

### Velocidad y celeridad equivalente

Al aplicar las ecuaciones equivalentes para nuestro sistema, tendremos:

$$V_0 = 2.00 \text{ m/s} \text{ y } a_e = 973 \text{ m/s}$$

De las ecuaciones reagrupadas y ábacos, determinamos el momento de inercia del sistema, calculando el golpe de ariete en las zonas indicadas: *zona de bomba* y *zona de turbina*.

Los polinomios adimensionales  $h_i = F(v_i)$ , función de los parámetros ' $\alpha$ ,  $\gamma$   $\beta_i$ ' nos permite trazar el gráfico en las distintas zonas de operación de las bombas; ver Fig.4.

### Solución de las ecuaciones (9), (17) y (19) en forma discreta

La ecuación recursiva utilizada es de la forma  $v_i = \sqrt{b^2 + c} - b$ , donde los coeficientes 'b' y 'c' se se terminan utilizando  $Ab$ ,  $Bb$  y  $Cb$ , coeficientes de los polinomios, mediante:

$$b = \frac{Bb \alpha_i - 2 \varepsilon}{2 Cb} \quad (23)$$

$$c = \frac{2 - Ab \alpha_i^2 - h_{i-1} - 2 \varepsilon v_{i-1}}{Cb} \quad (24)$$

### Cálculo del valor del tiempo de parada

El tiempo ' $T_p$ ' es el intervalo entre la iniciación y la finalización de la maniobra, ya sea cierre o apertura total o parcial de la válvula, debido a que se produce la modificación del régimen de movimiento del fluido, válido en impulsiones, Ref.[6]. Efectuando un balance de energía:

$$T_p = C + \frac{KlV}{g H_m} \quad (25)$$

En nuestro caso,  $T_p = 28 \text{ s}$ ,  $T_p > T$ ; valiendo las constantes:  $V = 3 V_0 \text{ m/s}$ ,  $C = 1$  y  $K = 1$ .

### Curvas Universales del funcionamiento de bombas

Al estudiar el transitorio de una estación de bombas el principal problema que se plantea es conocer la respuesta de las bombas en cualquier región o al menos en la zona de bomba. El fabricante excepcionalmente proporciona las curvas completas de trabajo. En nuestro caso:  $n_s = 25$ . Como se indicó precedentemente, se dispone de las funciones paramétricas:

$$h = H(\alpha, v) \text{ y } \beta = B(\alpha, v) \quad (26)$$

La relación de estos parámetros con la zona de funcionamiento en función del ángulo en el cuadrante respectivo, esta dado por la siguiente ecuación, para  $0^\circ \leq \vartheta \leq 270^\circ$ :

$$\frac{h}{(\alpha^2 + v^2)} = F(\vartheta) = F\left[\arctan\left(\frac{\alpha}{v}\right)\right] \quad (27)$$

El trazado de la función se puede ver en la Fig.5.

### RESULTADOS

El estudio matemático del golpe de ariete por el método de Allievi, para nuestras bombas, nos lleva como se indicó precedentemente, a determinar los parámetros ' $\alpha$ ' y ' $\beta$ ' y con los valores de ' $v_i$ ', utilizando las ecuaciones (9), (17) y (19), construimos los gráficos de funcionamiento de las bombas instaladas. Ver Figs. 2 y 3.

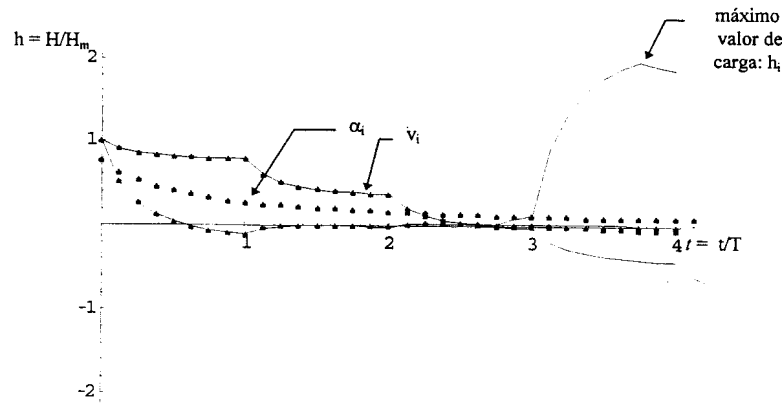


Fig.2. Respuesta de la instalación al efecto de golpe de ariete: carga, velocidad del flujo y tiempo de Allievi. Funcionando como bomba.



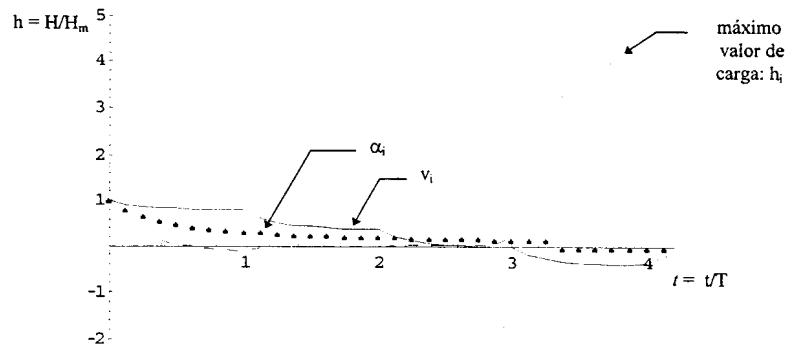


Fig. 3. Respuesta de la instalación al efecto de golpe de ariete: carga, velocidad del flujo y tiempo de Allievi. Funcionando como turbina.

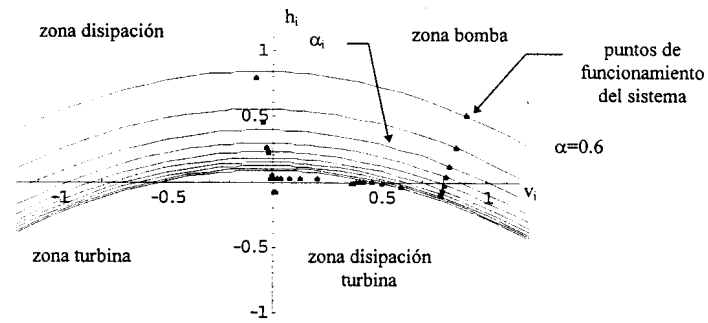


Fig. 4. Curvas paramétricas de ' $\alpha_i$ '. ( $\Delta\alpha=0.06$ )

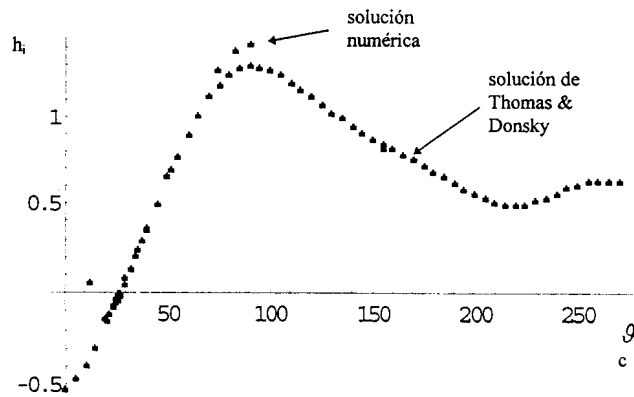


Fig. 5. Parámetros ' $h_i, v_i, \alpha_i$  y  $g_i$ ', curvas de Thomas & Donsky.

### Comparación de resultados

El golpe de ariete en las zonas de bombas calculado por el método de Allievi se compara con los obtenidos por otros métodos, para la velocidad específica  $n_s = 25$ :

Método	Carga mcp
Ecuación de Allievi, zona de bomba	233.189
Ecuación de Michaud	233.08
Shnyder-Bergeron	196.594
Características	196.200

La presión total la determinamos sumando el valor de  $H_0$  a la carga calculada.

### CONCLUSIONES

Los parámetros ' $\alpha_i$ ' y ' $\beta_i$ ' obtenidos al ser comparados con las curvas Universales, presentan un ajuste aceptable. Con el tiempo de parada de las bombas y del momento de inercia de las partes rotantes determinados en el rango de funcionamiento, resultaron aceptables los valores del golpe de ariete calculados; pudiendo ser soportados con una cañería Clase 25 Kg/cm<sup>2</sup>.

Si el golpe de ariete es provocado por un cierre rápido de la válvula mariposa en el buque, como en nuestro caso, se produjo una rotura parcial en las cañerías de material compuesto. En esta circunstancia la onda de presión llegó hasta las bombas, registrándose 200 mcp. Se aconseja proteger las bombas con un sistema combinado de válvulas: de 'no' retorno amortiguada, de alivio tipo Ross y optimizadora; evitándose además el funcionamiento como turbina. La válvula de alivio deberá estar tarada para abrir a una presión de 150 mcp, por lo cual descargará un caudal de 20 l/s, el que debe ser almacenado para evitar *daños ecológicos*.

### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la colaboración a Marcelo Ciappina, del Departamento de Física de la U.N.S., en la aplicación del Software Mathematica ©3.0 para resolver algoritmos de cálculo y la edición del trabajo.

### REFERENCIAS

- [1] Mancebo del Castillo U., *Teoría del golpe de ariete y sus aplicaciones en ingeniería hidráulica*, Ed. Limusa, México, (1990)
- [2] Mendiluce E. & Rosich, *El golpe de ariete en impulsiones*, Bellisco, Madrid, (1987)
- [3] Bridgestone Tire Ca. Ltda., *Bridgestone Technical Report, n° M83-12 y Curvas características de las bombas de la estación de Bombas de Caleta Córdova*, ensayo en banco, 1995.
- [4] Mateos, M., *Válvulas para abastecimiento de aguas*, Bellisco, Madrid, España, (1989).
- [5] Molina, N.E. y Murga, N.D., *Análisis de válvulas de alivio, compensada y de ruptura en cañerías en serie con flujos transitorios. Aplicación en terminales de petróleo existente*. S.V. M. N., (PI) págs. 17 a 28. ISBN 980-07-3075-3; Mérida, Venezuela; 1996.
- [6] Univ. de la Rep. Uruguay, Univ. Politéc. de Val. España & Univ. de Coimbra Portugal, *Transitorios y oscilaciones en sistemas Hidráulicos a presión*, 1994.