

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 726 627**

51 Int. Cl.:

**F04D 15/00** (2006.01)

**F04D 15/02** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **17.11.2014** **E 14193390 (3)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **27.02.2019** **EP 2884110**

54 Título: **Procedimiento de control para minimizar el consumo de energía eléctrica de un equipo de bombeo**

30 Prioridad:

**16.12.2013 FR 1362645**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:

**08.10.2019**

73 Titular/es:

**SCHNEIDER TOSHIBA INVERTER EUROPE SAS  
(100.0%)  
33, rue André Blanchet  
27120 Pacy sur Eure, FR**

72 Inventor/es:

**MALRAIT, FRANÇOIS y  
EJJABRAOUI, KAMAL**

74 Agente/Representante:

**CARPINTERO LÓPEZ, Mario**

**ES 2 726 627 T3**

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

**DESCRIPCIÓN**

Procedimiento de control para minimizar el consumo de energía eléctrica de un equipo de bombeo

**Campo técnico de la invención**

5 La presente invención se refiere a un procedimiento de control para minimizar la energía eléctrica consumida por un equipo de bombeo durante el proceso de llenado o de vaciado de un depósito. La invención también se refiere al sistema de control que permite implementar este procedimiento.

**Estado de la técnica**

Existe un cierto número de documentos que describen soluciones de minimización la energía consumida durante un proceso de llenado o de vaciado de un depósito.

10 La patente EP1725774B1 describe una solución en la que varias bombas se inician por secuencia en función de la evolución del nivel del líquido en el depósito. Cada una de las bombas se inicia a una velocidad óptima que no se readapta en función de las condiciones de llenado o de vaciado del depósito.

15 La solicitud de patente EP2610693A1 describe un procedimiento y un aparato para minimizar la energía eléctrica consumida por un sistema de bombeo asociado con un depósito. El procedimiento consta, en particular, de una etapa de identificación que permite determinar las características de la bomba y una etapa que permite determinar una zona óptima de funcionamiento de la bomba. Esta solución no tiene en cuenta un flujo de perturbador susceptible de modificar la zona de operación óptima de funcionamiento de la bomba.

20 El objeto de la invención es proponer un procedimiento de control para minimizar la energía eléctrica consumida por un equipo de bombeo durante el proceso de llenado o de vaciado de un depósito, permitiendo dicho procedimiento ahorrar energía eléctrica en todo el intervalo de funcionamiento del equipo de bombeo y hacer funcionar el equipo de bombeo en su punto óptimo.

**Descripción de la invención**

Este objeto se logra mediante un procedimiento de control según la reivindicación 1.

En el caso de un proceso de llenado de depósito, la velocidad óptima se expresa de la siguiente manera:

$$25 \quad \frac{\frac{d}{d\omega} (p(\omega, V)) \cdot (Q_{input}(\omega, V) - Q_c) - p(\omega, V) \cdot \frac{d}{d\omega} (Q_{input}(\omega, V))}{(Q_{input}(\omega, V) - Q_c)^2} = g(V, \omega)$$

En la que:

- V representa el volumen de líquido en el depósito,
- g representa una función de promedio cero en la variable V en el intervalo [0-Vmáx],
- ω representa la velocidad de la bomba del equipo de bombeo,
- 30 -  $Q_{input}$  representa un flujo de llenado del depósito,
- $Q_c$  representa el flujo perturbador,
- p representa la potencia instantánea consumida por el equipo de bombeo.

La invención también se refiere a un sistema de control según la reivindicación 3.

35 Según otra particularidad de la invención, el flujo perturbador se puede obtener mediante estimación con ayuda de un módulo de software de estimación.

**Breve descripción de las figuras**

Otras características y ventajas se mostrarán en la descripción detallada que sigue hecha con respecto a los dibujos adjuntos en los que:

- 40 - Las figuras 1A y 1B representan de manera esquemática el principio de bombeo de un depósito, respectivamente, para el proceso de llenado del depósito y para el proceso de vaciado del depósito,
- la figura 1C ilustra la expresión de la presión estática de un depósito,
- la figura 2 representa de manera esquemática un equipo de bombeo que consta de varias celdas monobomba ensambladas en paralelo,
- la figura 3 representa un cuadro sinóptico que ilustra el procedimiento de control de la invención,
- 45 - la figura 4 representa curvas que muestran la variación de la velocidad óptima de la bomba en función de la presión estática de la bomba y del flujo perturbador durante el proceso de llenado de un depósito,
- la figura 5 representa curvas que muestran la variación de la velocidad óptima de una bomba en funcionamiento,

de dos bombas en funcionamiento o de tres bombas en funcionamiento, en función del flujo perturbador durante el proceso de llenado de un depósito,

- la figura 6 representa curvas que muestran la variación de la energía eléctrica óptima consumida por una bomba en funcionamiento, dos bombas en funcionamiento o tres bombas en funcionamiento, en función del flujo perturbador durante el proceso de llenado de un depósito.

**Descripción detallada de al menos un modo de realización**

La invención está conectada al proceso de llenado o de vaciado de un depósito R implementado con ayuda de un equipo de bombeo EP. La invención encontrará una aplicación, en particular, en el campo del tratamiento de aguas residuales o del almacenamiento de agua potable.

Con referencia a la figura 1A, el proceso de llenado de un depósito R consiste en generar, con ayuda del equipo de bombeo EP, un flujo de llenado  $Q_{input}$  de un líquido hacia el interior del depósito R. Un flujo perturbador  $Q_c$  que vacía el depósito R perturba este proceso normal de llenado.

Con referencia a la figura 1B, el proceso de vaciado de un depósito R consiste en generar, con ayuda del equipo de bombeo EP, un flujo de vaciado de  $Q_{output}$  del líquido contenido en el depósito R. De manera similar, un flujo perturbador  $Q_c$  que llena el depósito perturba este proceso normal de vaciado.

En el proceso de llenado, cuando el nivel de líquido desciende por debajo de un valor límite bajo  $h_1$ , el equipo de bombeo EP debe ser activado para llenar el depósito hasta que el nivel de líquido exceda un valor límite alto  $h_2$ .

En el proceso de vaciado, cuando el nivel de líquido sube por encima del valor límite alto  $h_2$ , el equipo de bombeo EP se activa para vaciar el depósito hasta que el nivel de líquido vuelva a descender por debajo del valor límite bajo  $h_1$ .

Con referencia a la figura 2, un equipo de bombeo EP consta de una o varias celdas monobomba  $CelP1, CelP2, \dots, CelPn$ . Una celda monobomba consta de una bomba  $P1, P2, \dots, Pn$ , un motor eléctrico que acciona la bomba y un accionador  $A1, A2, \dots, An$  que controla el motor eléctrico. En la figura 2, el motor eléctrico de cada celda monobomba está integrado en la bomba. El accionador puede ser un variador de velocidad, un iniciador, un contactor o cualquier otro dispositivo de conversión de potencia que permite la alimentación del motor eléctrico. En el ámbito de la invención, con el fin de poder hacer variar la velocidad de al menos una bomba, al menos uno de los accionadores debe consistir en un variador de velocidad.

Como se representa en la figura 2, el equipo de bombeo EP puede constar de varias celdas monobomba conectadas en paralelo en la red de distribución eléctrica RD. El conjunto de celdas monobomba genera un flujo total  $Q_{Total}$ , correspondiente al flujo de llenado o al flujo de vaciado del depósito R.

La invención se aplica a un equipo de bombeo de una o varias celdas monobomba.

Un sistema de control, asociado con el equipo de bombeo EP, está dispuesto para implementar el procedimiento de control de la invención. Este sistema de control consta principalmente de:

- Medios de medición o de estimación de la presión estática  $H_{pump}$  del equipo de bombeo EP,
- medios de medición o de estimación del flujo de perturbador  $Q_c$ ,
- una unidad de control UC que ejecuta al menos un módulo de software para determinar la velocidad óptima  $\omega_{opt}$  que se aplicará al equipo de bombeo para minimizar la energía eléctrica consumida por este equipo EP.

La unidad de control UC, que implementa el procedimiento de control de la invención, es responsable de controlar los accionadores de las celdas monobomba. En la figura 2, la unidad de control UC está dissociada de las celdas monobomba y está conectada a cada accionador de las celdas monobomba para con el fin de poder enviarles señales de control.

El procedimiento de control de la invención, que permite minimizar la energía eléctrica consumida por el equipo de bombeo EP, se explicita en mayor detalle a continuación.

La energía consumida en el caso de una celda monobomba se expresa por la siguiente relación (1):

$$\frac{dE_{MonoCell}}{dt} = P_{pump} + P_{MotorLosses} + P_{ActionneurLosses} \tag{1}$$

Con:

- $E_{MonoCell}$ : la energía consumida por una celda monobomba [Wh],
- $P_{MotorLosses}$ : las pérdidas de julios en el motor [W] de la celda monobomba, que dependen del punto de funcionamiento definido por la velocidad y la potencia de la bomba,
- $P_{ActionneurLosses}$ : las pérdidas de julios en el accionador [W] de la celda monobomba, que dependen del punto de funcionamiento definido por la velocidad y la potencia de la bomba,

- $P_{\text{pump}}$ : la potencia consumida por la bomba de la celda monobomba [W], que depende del punto de funcionamiento definido por la velocidad y el nivel de presión estática del equipo de bombeo.

La energía general consumida en el caso de un equipo de bombeo con varias celdas monobomba se expresa entonces mediante la siguiente relación (2):

$$\frac{dE}{dt} = p = \sum_1^M P_{\text{pump}} + \sum_1^M P_{\text{MotorLosses}} + \sum_1^M P_{\text{ActionneurLosses}} \quad (2)$$

5

Con:

- E: la energía consumida por el equipo de bombeo [Wh],
- p: la potencia instantánea consumida por el equipo de bombeo [W].

10 El objetivo de la invención es determinar de manera continua la velocidad óptima  $\omega_{\text{opt}}$  a la cual al menos una bomba del equipo de bombeo EP debe girar para llenar y/o vaciar el depósito R mientras ahorra la energía eléctrica consumida por el equipo de bombeo EP, independientemente del valor del flujo perturbador  $Q_c$  y el de la presión estática aplicada  $H_{\text{pump}}$  a este equipo de bombeo EP.

El problema técnico es, por lo tanto, encontrar la trayectoria en velocidad que minimice la energía eléctrica consumida para llenar o vaciar el depósito R.

15 En el caso del proceso de llenado de un depósito R, tenemos la siguiente expresión (3):

$$\frac{dV}{dt} = Q_{\text{input}}(\omega, H_{\text{pump}}) - Q_c \quad (3)$$

En el caso del proceso de vaciado de un depósito R, tenemos la siguiente expresión (4):

$$\frac{dV}{dt} = Q_c - Q_{\text{output}}(\omega, H_{\text{pump}}) \quad (4)$$

Con:

- V: volumen de líquido en el depósito [ $\text{m}^3$ ] ( $V_{\text{máx}}$  siendo igual a  $V_2 - V_1$ , la diferencia entre el volumen en un llamado nivel alto y el volumen en un llamado nivel bajo),
- $Q_c$ : el flujo perturbador [ $\text{m}^3/\text{s}$ ],
- $Q_{\text{input}}$ : el flujo de llenado [ $\text{m}^3/\text{s}$ ] que depende de la velocidad  $\omega$  del equipo de bombeo y de la presión estática  $H_{\text{pump}}$  del equipo de bombeo,
- $Q_{\text{output}}$ : el flujo de vaciado [ $\text{m}^3/\text{s}$ ] que depende de la velocidad  $\omega$  y de la presión estática  $H_{\text{pump}}$  del equipo de bombeo.

25

De una manera general, la altura del líquido en el depósito se puede expresar en función del volumen contenido en éste. En lo sucesivo, tomamos el caso de un depósito R simétrico, para lo cual la magnitud V (es decir, el volumen) se expresa de la siguiente manera:

30

$$V = S \cdot h \quad (5)$$

Con:

- h: la altura [m] del líquido en el depósito, las alturas  $h_1$ , respectivamente  $h_2$ , correspondientes a los volúmenes  $V_1$ , respectivamente  $V_2$ ,
- S: sección del depósito [ $\text{m}^2$ ].

35 Con referencia a la figura 1C, la presión estática del equipo de bombeo se expresa en función de la altura del líquido en el depósito R:

$$H_{\text{pump}} = f(h) = H_0 - H_{\text{input}} + \rho \cdot g \cdot h \quad (6)$$

o

$$H_{\text{pump}} = f(V) = H_0 - H_{\text{input}} + \rho \cdot g \cdot \frac{V}{S} \quad (7)$$

40

Con:

- $H_0$ : la caída de presión debida a la altura geométrica  $h_0$  entre el punto de bombeo y la instalación del equipo de bombeo [Pa], que es una función de la altura geométrica  $h_0$ .
- $H_{input}$ : la presión en la entrada del equipo de bombeo [Pa],
- $\rho$ : la densidad del fluido [ $\text{kg/m}^3$ ],
- $g$ : la gravedad [ $\text{m/s}^2$ ].

5 La siguiente demostración que se aplica al proceso de llenado de un depósito R, pero debe entenderse que puede aplicarse fácilmente al proceso de vaciado del depósito, invirtiendo el efecto del flujo perturbador.

Las ecuaciones (2) y (3) anteriores se pueden volver a combinar de la siguiente manera:

$$\frac{dE}{dV} = E_V = \frac{p(\omega, H_{pump})}{Q_{input}(\omega, H_{pump}) - Q_c} \leftrightarrow \frac{dE}{dV} = E_V = \frac{p(\omega, V)}{Q_{input}(\omega, V) - Q_c} \quad (8)$$

10 que se expresa a continuación en una función integral teniendo en cuenta la variable del volumen de líquido en el depósito:

$$E = \int_0^{V_{m\acute{a}x}} E_V dV \quad (9)$$

Con la función  $Q_{input}(\omega, V)$  que se expresa de la siguiente manera en el caso de un equipo de bombeo EP con varias celdas monobomba:

$$Q_{input}(\omega, V) = Q_{Total}(\omega, V) = \sum_{i=1}^M Q_{pump\_i}(\omega, V) \quad (10)$$

15 El objetivo es minimizar la energía general E durante el proceso de llenado o de vaciado, lo que se traduce por cancelar la derivada parcial de la función de energía con relación a la variable de velocidad.

$$\frac{dE}{d\omega} \int_0^{V_{m\acute{a}x}} \frac{dE_V}{d\omega} dV = 0 \quad (11)$$

Esta solución general se puede expresar mediante una función periódica g de manera que:

$$20 \quad \frac{dE_V}{d\omega} = g(V, \omega), \text{ tal como } \int_0^{V_{m\acute{a}x}} g(V, \omega) dV = 0 \quad (12)$$

con

$$\frac{dE_V}{d\omega} = \frac{d}{d\omega} \left( \frac{p(\omega, V)}{Q_{input}(\omega, V) - Q_c} \right)$$

$$\frac{dE_V}{d\omega} = \frac{\frac{d}{d\omega}(p(\omega, V)) \cdot (Q_{input}(\omega, V) - Q_c) - p(\omega, V) \cdot \frac{d}{d\omega}(Q_{input}(\omega, V))}{(Q_{input}(\omega, V) - Q_c)^2}$$

La solución general consiste en encontrar la trayectoria  $\omega = f(V)$  que satisfaga la relación (12):

$$25 \quad \frac{\frac{d}{d\omega}(p(\omega, V)) \cdot (Q_{input}(\omega, V) - Q_c) - p(\omega, V) \cdot \frac{d}{d\omega}(Q_{input}(\omega, V))}{(Q_{input}(\omega, V) - Q_c)^2} = g(V, \omega) \quad (13)$$

Una solución particular de (13) consiste en minimizar la energía volumétrica consumida  $E_v$  durante el proceso de llenado o de vaciado de un volumen definido por  $V_{m\acute{a}x}$ , es decir, en considerar  $g(V, \omega) = 0$ .

Esto equivale a decir que para una presión estática de la bomba  $H_{pump}$  (es decir, un volumen dado), se busca cancelar el siguiente término:

$$30 \quad \frac{dE_V}{d\omega} = 0$$

Si anotamos  $p'(\omega, V) = \frac{d}{d\omega}(p(\omega, V))$  y  $Q'_{input}(\omega, V) = \frac{d}{d\omega}(Q_{input}(\omega, V))$ , se da que la solución al problema de minimización de la energía eléctrica consumida y definida por la fórmula implícita a continuación,

procedente de (13):

$$p'(\omega_{opt}, V) \cdot (Q_{input}(\omega_{opt}, V) - (Q_c) - p(\omega_{opt}, V) \cdot Q_{input}'(\omega_{opt}, V) = 0$$

La velocidad  $\omega$  que permite la cancelación de este término corresponde a la velocidad óptima  $\omega_{opt}$  a la que la bomba debe girar para llenar el depósito mientras consume menos energía.

- 5 La figura 3 representa de manera esquemática el procedimiento de control implementado en la unidad de control UC para determinar la velocidad óptima a aplicar al equipo de bombeo EP para minimizar la energía eléctrica consumida.

Para controlar el equipo de bombeo EP, la unidad de control UC recibe a la entrada:

- 10 - El valor de la presión estática  $H_{pump}$  del equipo de bombeo EP medido por los medios de medición,  
 - el valor del flujo perturbador  $Q_c$  medido por los medios de medición o estimado con ayuda de un estimador,  
 - las características conocidas del equipo de bombeo EP, en particular, las curvas de bomba  $f_1$  y  $f_2$ , es decir, la expresión de la presión y de la potencia mecánica desarrollada por cada bomba en función de su velocidad y del flujo generado,  
 15 - Los datos de la aplicación, por ejemplo, el volumen  $V$  de líquido en el depósito R, la sección  $S$  del depósito R y la altura máxima  $h_{m\acute{a}x}$ , la velocidad nominal  $\omega_n$  de cada bomba.

Las funciones  $f_1$  y  $f_2$  definen las curvas características de la bomba ( $H = f_1(\omega, Q)$  y  $P_{mec} = f_2(\omega, Q)$ ). Pueden ser o funciones de interpolación analíticas, o bien, tablas de datos numéricos. La función  $g_1$  expresa la densidad de energía volumétrica en todo el intervalo de variación de la velocidad (de cero a la velocidad nominal  $\omega_n$ ) de la bomba y, para el conjunto de los volúmenes de líquido contenido en el depósito; se puede definir como una función de estas dos variables o una tabla de datos numéricos. Se determina mediante un primer módulo de cálculo Mod1 de la unidad de control a partir de los datos descritos anteriormente.

20

A continuación, la unidad de control ejecuta un módulo de determinación Mod2 de la velocidad óptima  $\omega_{opt}$  a aplicar al equipo de bombeo EP, lo que permite minimizar la energía eléctrica consumida por el equipo de bombeo EP durante el proceso de llenado o de vaciado del depósito R para un valor  $H_{pump}$  dado. Este módulo de determinación Mod2 determina la velocidad óptima  $\omega_{opt}$ , que verifica la relación (13) descrita anteriormente.

25

El bloque BL1 puede ser o un medio de medición, o bien, un estimador de flujo perturbador  $Q_c$ .

Un ejemplo de un estimador de flujo perturbador lo proporciona el siguiente sistema:

$$\frac{d\hat{V}}{dt} = Q_{input}(\omega, H_{pump}) - \hat{Q}_c - K_1 \cdot (\hat{V} - V)$$

$$\frac{d\hat{Q}_c}{dt} = -K_2 \cdot (\hat{V} - V)$$

30 donde  $V$  y  $Q_{input}(\omega, H_{pump})$  son las variables conocidas y,  $\hat{V}$  y  $\hat{Q}_c$  son datos estimados.

Para entender mejor la invención, se tratan dos ejemplos a continuación. En un primer ejemplo se selecciona:

- Un flujo perturbador cero ( $Q_c = 0$ ),
- equipo de bombeo con una celda de monobomba (bomba designada  $pump\_1$ ),
  - La relación (10) se convierte en:  $Q_{input}(\omega, V) = Q_{pump\_1}(\omega, V)$
- 35 ◦ desatender las pérdidas de accionadores y de motores eléctricos.
  - La relación (2) se convierte en:  $p(\omega, V) = P_{pump\_1}$

Optimizar la energía de llenado se resuelve la relación (13):

$$p'(\omega_{opt}, V) \cdot Q_{pump\_1}(\omega_{opt}, V) - p(\omega_{opt}, V) \cdot Q_{pump\_1}'(\omega_{opt}, V) = 0$$

lo que es equivalente a:

40

$$\frac{d}{d\omega} \left( \frac{p(\omega V)}{Q_{pump\_1}(\omega, V)} \right) = 0$$

o también para:

$$H_{\text{pump}_1}(V) \frac{d}{d\omega} \left( \frac{p(\omega, V)}{H_{\text{pump}_1}(V) \cdot Q_{\text{pump}_1}(\omega, V)} \right) = 0$$

Por definición, el rendimiento de la bomba se define por la relación:

$$\eta(\omega, V) = \frac{H_{\text{pump}_1}(V) \cdot Q_{\text{pump}_1}(\omega, V)}{p(\omega, V)}$$

La velocidad óptima se define entonces por la siguiente relación:

$$5 \quad \frac{d}{d\omega} (\eta(\omega, V)) = 0$$

El punto óptimo de eficacia a velocidad nominal ( $\omega_n, H_{\text{BEP}}, Q_{\text{BEP}}$ ) es la solución de esta ecuación. Las leyes de afinidades permiten extender la solución y la velocidad óptima se expresa de la siguiente manera:

$$\omega_{\text{opt}} = \omega_n \cdot \sqrt{\frac{H_{\text{pump}_1}}{H_{\text{BEP}}}}$$

Con:

- 10
- $\omega_{\text{opt}}$ : la velocidad óptima a la que la bomba debe girar para una presión estática  $H_{\text{pump}}$  determinada,
  - $\omega_n$ : la velocidad nominal de la bomba,
  - $H_{\text{pump}_1}$ : la presión estática de la bomba,
  - $H_{\text{BEP}}$ : la presión estática correspondiente al punto de funcionamiento óptimo (rendimiento máximo) a la velocidad nominal.

15 En un segundo ejemplo se selecciona:

- Un flujo perturbador no cero,
- equipo de bombeo con N celdas de monobomba, en las que los N accionadores son idénticos y las N bombas son idénticas, girando a la misma velocidad,

■ La relación (10) se convierte en:  $Q_{\text{input}}(\omega, V) = \sum_{i=1}^N Q_{\text{pump}_i}(\omega_i, V) = N Q_{\text{pump}_i}(\omega_i, V)$

20 ◦ desatender las pérdidas de accionadores y de motores eléctricos.

■ La relación (2) se convierte en:  $p(\omega, V) = \sum_{i=1}^N P_{\text{pump}_i}(\omega_i, V) = N P_{\text{pump}}(\omega_i, V)$

Esto resuelve la relación (13) escrita arriba:

$$p'(\omega_{\text{opt}}, V) \cdot (Q_{\text{input}}(\omega_{\text{opt}}, V) - Q_c) - p(\omega_{\text{opt}}, V) \cdot Q_{\text{input}}'(\omega_{\text{opt}}, V) = 0$$

que es equivalente a:

$$25 \quad \frac{d}{d\omega} \left( \frac{N P_{\text{pump}}(\omega, V)}{N Q_{\text{pump}}(\omega, V) - Q_c} \right) = 0$$

o para:

$$\frac{d}{d\omega} \left( \frac{P_{\text{pump}}(\omega, V)}{Q_{\text{pump}}(\omega, V) - \frac{Q_c}{N}} \right) = 0$$

Es decir, que el flujo perturbador influye en el sistema multibomba inversamente proporcional al número de bombas.

30 Se puede deducir que la energía global consumida por las N bombas equivale a la consumida por una sola bomba en  $Q_{\text{ceq}} = Q_c / N$ .

Al introducir la expresión de la eficacia de la bomba, se obtiene la siguiente relación:

$$\frac{d}{d\omega} \left( \frac{1}{\eta(\omega, V)} \frac{P_{\text{pump}}(\omega, V)}{Q_{\text{pump}}(\omega, V) - \frac{Q_c}{N}} \right) = 0$$

Lo que lleva a la siguiente expresión:

$$\frac{d}{d\omega} (\eta(\omega, V)) = -\eta(\omega, V) \frac{\frac{d}{d\omega} (Q_{\text{pump}}(\omega, V))}{Q_{\text{pump}}(\omega, V)} \frac{\frac{Q_c}{3}}{Q_{\text{pump}}(\omega, V) - \frac{Q_c}{N}}$$

5 mostrando que el óptimo del sistema de bombeo se alcanza en un punto que no es el óptimo ( $\frac{d}{d\omega} (\eta(\omega, V)) = 0$ ) de cada bomba tomada individualmente.

La velocidad óptima se obtiene resolviendo la siguiente relación:

$$p'(\omega_{\text{opt}}, V) \left( Q_{\text{pump}}(\omega_{\text{opt}}, V) - \frac{Q_c}{N} \right) p(\omega_{\text{opt}}, V) \cdot Q_{\text{pump}}'(\omega_{\text{opt}}, V) = 0$$

Conociendo las expresiones:

- 10
- La potencia de una bomba en función de su volumen, es decir, su presión, y su velocidad,
  - el caudal de una bomba en función de su volumen, es decir, su presión, y su velocidad,
  - flujo perturbador,

es posible calcular la siguiente expresión:

$$p'(\omega_{\text{opt}}, V) \left( Q_{\text{pump}}(\omega_{\text{opt}}, V) - \frac{Q_c}{N} \right) - p(\omega_{\text{opt}}, V) \cdot Q_{\text{pump}}'(\omega_{\text{opt}}, V)$$

La solución es encontrar la velocidad que cancela esa expresión.

15 A partir de este segundo ejemplo, entonces se obtiene la figura 4, que muestra varias curvas que expresan la variación de la velocidad óptima  $\omega_{\text{opt}}$  en función de la altura (es decir, de la presión estática de la bomba), siendo cada curva obtenido a un flujo perturbador  $Q_c$  determinado. La flecha f1 es representativa de un aumento en el flujo perturbador  $Q_c$ . Se observa en esta figura 4 que un aumento en el flujo perturbador  $Q_c$  necesita un reajuste de la velocidad óptima. Por lo tanto, es necesario tener en cuenta el flujo perturbador para minimizar la energía eléctrica consumida por el equipo de bombeo.

20

Para una presión estática  $H_{\text{pump}}$  dada (es decir, un volumen), las figuras 5 y 6 dan, respectivamente, la velocidad óptima y la energía consumida en función del flujo perturbador  $Q_c$  en el caso de una sola bomba, de dos bombas y de tres bombas.

25 Como se observa en las figuras 5 y 6 que, para un mismo flujo perturbador  $Q_c$ , es más interesante hacer funcionar tres bombas a una velocidad baja óptima que una sola bomba a una velocidad óptima más elevada. Por ejemplo, en la figura 5, para un flujo perturbador al 60 % del flujo nominal de una bomba, el accionamiento de tres bombas (curva C1) a la velocidad óptima de aproximadamente 2700 revoluciones por minuto (RPM) consumirá menos energía eléctrica que el accionamiento de dos bombas (curva C2) a una velocidad de aproximadamente 2800 revoluciones por minuto y menos energía eléctrica que el accionamiento de una sola bomba (curva C3) a la velocidad óptima de

30 4700 revoluciones por minuto.

Por ejemplo, en la figura 6, el consumo de una energía eléctrica de 1,5 Kwh permite gestionar un flujo perturbador del 25 % si se emplea una sola bomba (curva C4), un flujo perturbador del 50 % si se emplean dos bombas (curva C5) y un flujo perturbador del 75 % si se emplean tres bombas (curva C6). Esto justifica el interés del accionamiento de varias bombas a la velocidad óptima en vista de minimizar la energía eléctrica consumida.

35

**REIVINDICACIONES**

1. Procedimiento de control para minimizar la energía eléctrica consumida durante un proceso de llenado o de vaciado de un depósito (R), implementándose dicho proceso de llenado o de vaciado del depósito con ayuda de un equipo de bombeo (EP) que comprende al menos una bomba, un motor eléctrico que acciona dicha bomba y un accionador que controla dicho motor eléctrico, estando dicho proceso de llenado o de vaciado realizado en presencia de un flujo perturbador ( $Q_c$ ) que vacía el depósito o llena el depósito respectivamente, consistiendo dicho procedimiento en determinar una velocidad óptima ( $\omega_{opt}$ ) del equipo de bombeo que minimiza una energía volumétrica ( $E_v$ ) consumida por el equipo de bombeo durante el proceso de llenado o de vaciado del depósito (R), estando dicho procedimiento **caracterizado porque** dicha energía volumétrica es una función:
- 5
  - 10 - del flujo ( $Q_{input}$ ) de llenado instantáneo del depósito producido por el equipo de bombeo o del flujo ( $Q_{output}$ ) de vaciado instantáneo del depósito producido por el equipo de bombeo,
  - del flujo perturbador ( $Q_c$ ),
  - del volumen (V) de líquido en el depósito, siendo dicho volumen variable en el tiempo en función de dicho flujo de llenado instantáneo o de dicho flujo de vaciado instantáneo, y de dicho flujo perturbador,
  - 15 - de la potencia instantánea (p) consumida por el equipo de bombeo.
2. Procedimiento según la reivindicación 1, **caracterizado porque** comprende una etapa de determinación por estimación del flujo perturbador.
3. Sistema de control de un equipo de bombeo que permite minimizar la energía eléctrica consumida durante un proceso de llenado o de vaciado de un depósito, comprendiendo dicho equipo de al menos una bomba, un motor eléctrico que acciona dicha bomba y un accionador que controla dicho motor eléctrico, estando dicho proceso de llenado o de vaciado realizado en presencia de un flujo perturbador que vacía el depósito o llena el depósito respectivamente, estando dicho sistema **caracterizado porque** comprende una unidad de control (UC) que comprende un módulo de determinación (Mod2) de una velocidad óptima ( $\omega_{opt}$ ) del equipo de bombeo que minimiza una energía volumétrica consumida por el equipo de bombeo durante el proceso de llenado o de vaciado del depósito (R), siendo dicha energía volumétrica una función:
- 20
  - 25 - del flujo ( $Q_{input}$ ) de llenado instantáneo del depósito producido por el equipo de bombeo o del flujo ( $Q_{output}$ ) de vaciado instantáneo del depósito producido por el equipo de bombeo,
  - del flujo perturbador ( $Q_c$ ),
  - del volumen (V) de líquido en el depósito, siendo dicho volumen variable en el tiempo en función de dicho flujo de llenado instantáneo o de dicho flujo de vaciado instantáneo, y de dicho flujo perturbador,
  - 30 - de la potencia instantánea (p) consumida por el equipo de bombeo.
4. Sistema según la reivindicación 3, **caracterizado porque** la unidad de control comprende un módulo estimador del flujo perturbador.

35

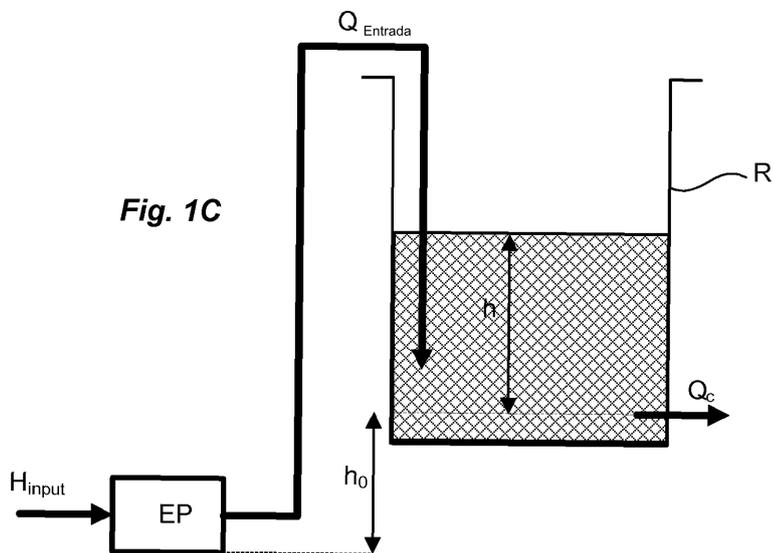
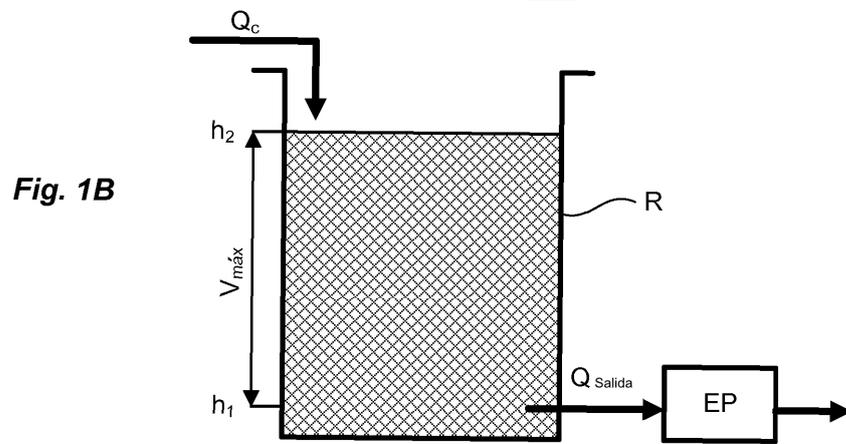
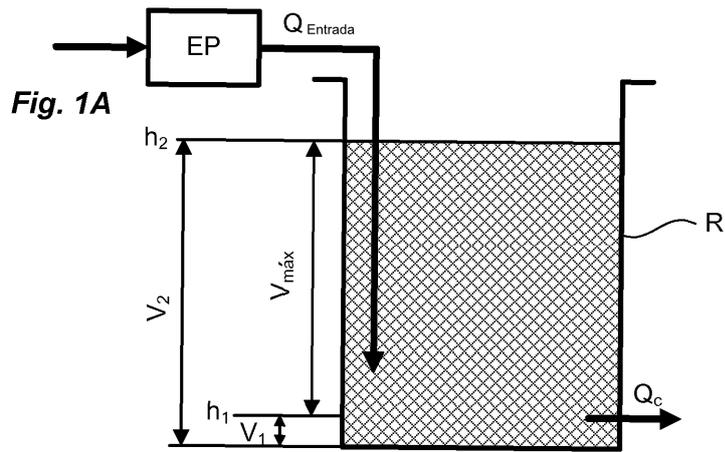
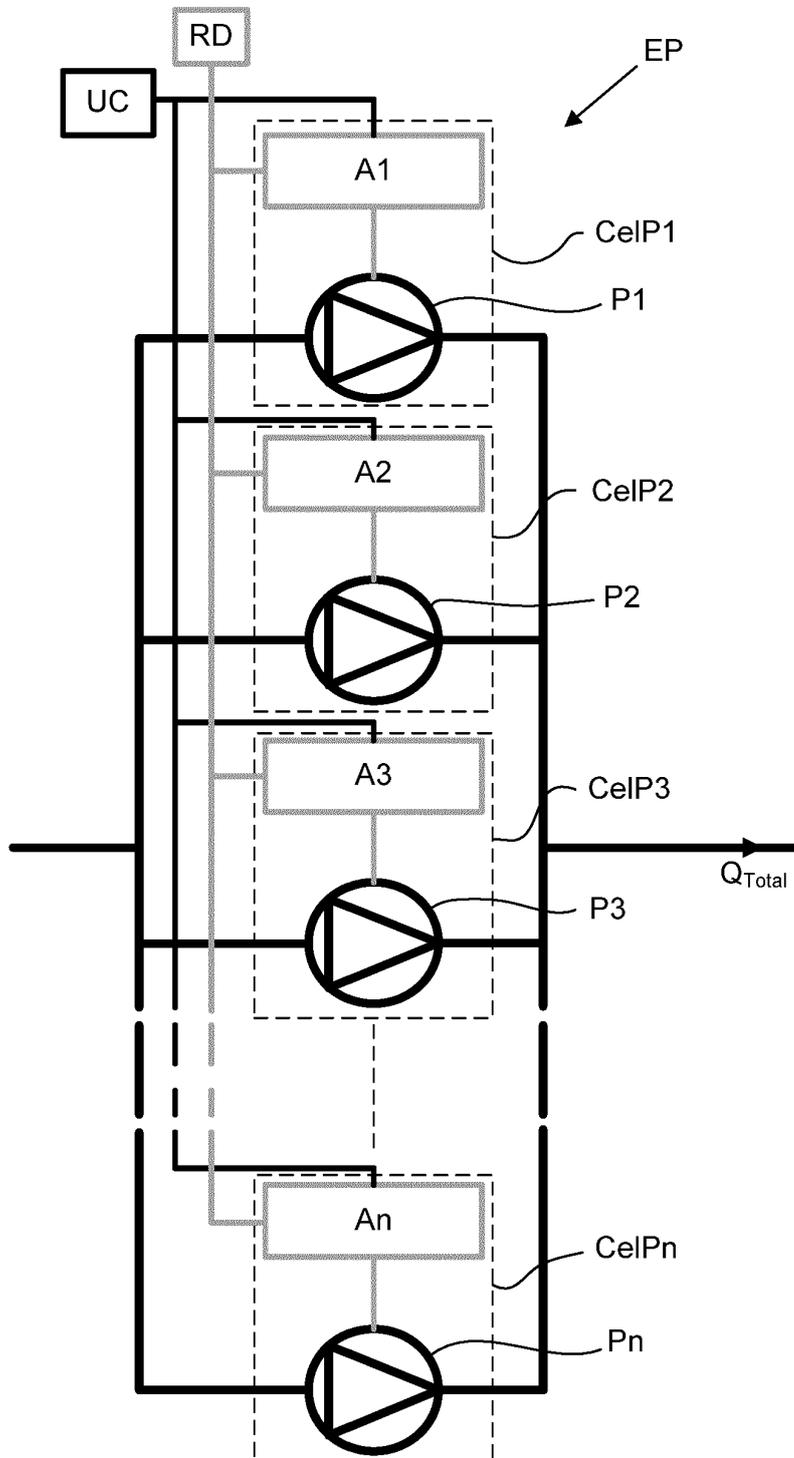
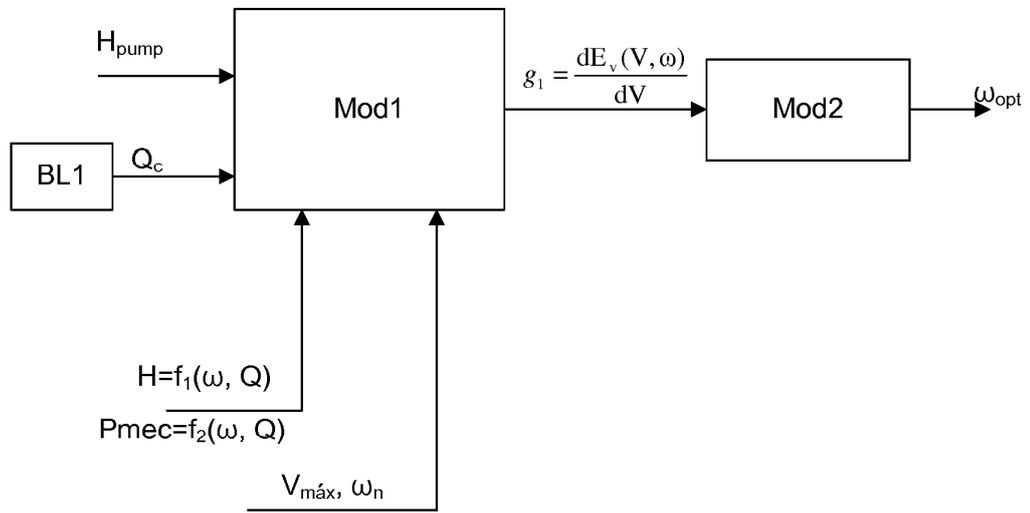


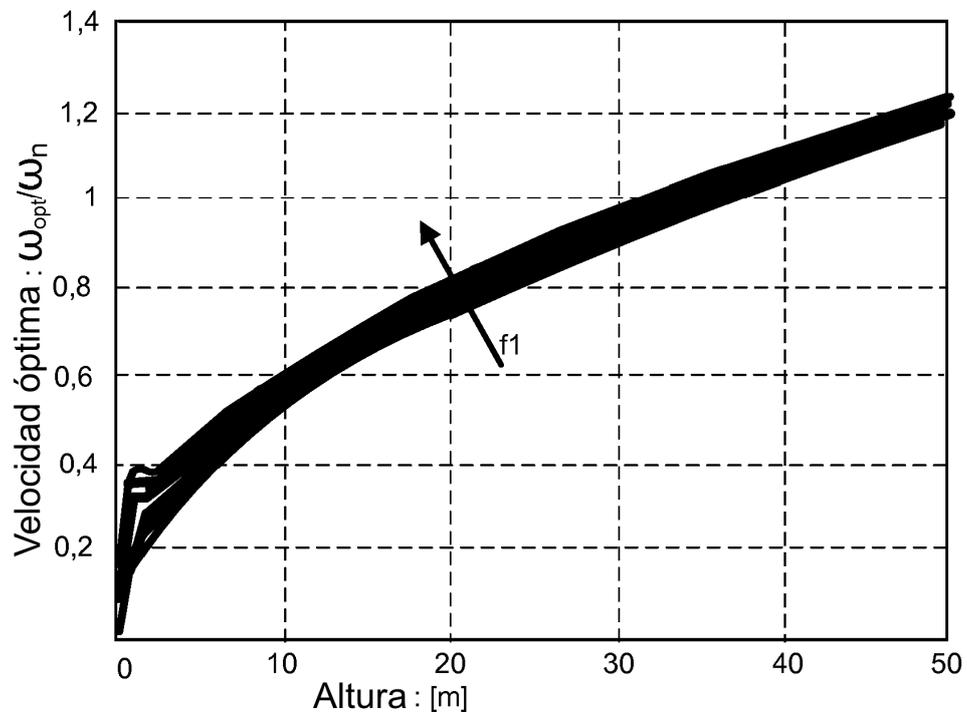
Fig. 2



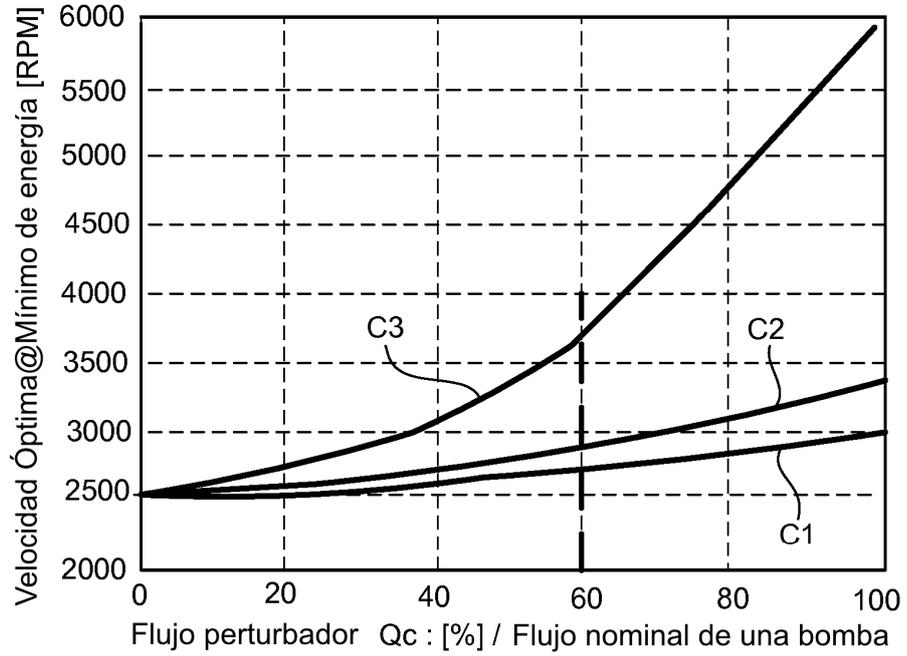
**Fig. 3**



**Fig. 4**



**Fig. 5**



**Fig. 6**

