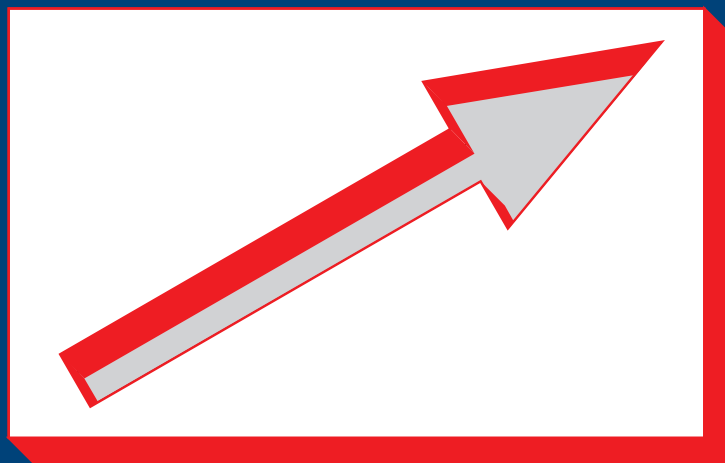


EL EQUILIBRADO DINÁMICO DE LOS CIRCUITOS HIDRÓNICOS



AutoFlow®

EL ESTABILIZADOR AUTOMÁTICO DE CAUDAL

 CALEFFI

FASCÍCULO TÉCNICO

*EQUILIBRADO DINÁMICO DE LOS CIRCUITOS
HIDRÓNICOS*

ESTABILIZADOR AUTOMÁTICO DE CAUDAL

AUTOFLOW®

CLAUDIO ARDIZZOIA

WALTER SCHINCARIOL

ÍNDICE

CIRCUITOS EQUILIBRADOS

Equilibrado manual y bomba de velocidad constante **pág. 4**

Ejemplo	4
Carga parcial	9
Consumos energéticos	12

El dispositivo AUTOFLOW® **pág. 13**

Relaciones de equilibrio con AUTOFLOW®	13
Geometría del paso de fluido con AUTOFLOW®	14
Dimensiones de AUTOFLOW®	15
Funcionamiento de AUTOFLOW®	16
Tolerancias de los caudales	18

Equilibrado con AUTOFLOW® y bomba de velocidad constante **pág. 19**

El equilibrado continuo.....	19
Diseño con AUTOFLOW®.....	20
Ejemplo.....	20
Carga parcial	21

Equilibrado manual y bomba de velocidad variable **pág. 24**

Regulación constante	24
Regulación proporcional	26

Equilibrado con AUTOFLOW® y bomba de velocidad variable **pág. 28**

Δp mínimo de trabajo.....	28
Ahorro de energía	29

Aplicaciones de los circuitos con AUTOFLOW® **pág. 30**

Notas introductorias

El objetivo de este fascículo es explicar las ventajas que ofrece el uso del estabilizador automático de caudal AUTOFLOW® en los circuitos hidráulicos.

AUTOFLOW® permite realizar un equilibrio dinámico y continuo de los circuitos en los cuales se instala. El análisis siguiente destaca los aspectos técnicos más sencillos, remitiendo a los apéndices finales para un estudio más profundo.

En particular, se consideran los circuitos cerrados de los sistemas de climatización, para extender luego las conclusiones a otras aplicaciones.

Las referencias bibliográficas se indican con la notación [n°].

CIRCUITOS EQUILIBRADOS

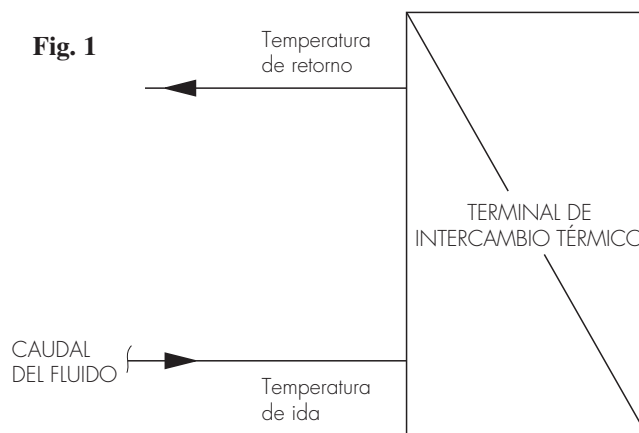
Los sistemas modernos de climatización deben cumplir dos requisitos fundamentales: **garantizar un elevado confort térmico y limitar el consumo de energía.**

Para que esto sea posible, es necesario suministrar a los terminales de la instalación la cantidad adecuada de fluido caloportador para que puedan calentar, refrigerar y deshumidificar dentro de los valores de diseño.

Según las leyes físicas del intercambio térmico, **la emisión o sustracción de calor** por parte de los terminales **depende del caudal de fluido** que los atraviesa (Fig. 1).

Por tal motivo, para asegurar la eficacia de una instalación, es preciso determinar con precisión el caudal que se envía a cada terminal. Si los terminales reciben el **caudal adecuado de fluido**, pueden funcionar en las condiciones nominales para las cuales han sido dimensionados.

En este caso se dice que el **circuito hidráulico está equilibrado.**



Si un circuito está bien equilibrado:

- Los terminales funcionan correctamente.
- Se evitan velocidades del fluido demasiado elevadas, que pueden causar ruidos y acciones abrasivas.
- Se impide que las electrobombas funcionen en condiciones de bajo rendimiento y se sobrecalienten.
- Se limitan las presiones diferenciales que actúan sobre las válvulas de regulación, asegurando el funcionamiento correcto de estos dispositivos.

Equilibrado manual y bomba de velocidad constante

En las instalaciones medianas o pequeñas de caudal constante, un buen dimensionamiento de las conducciones puede ser suficiente para que el circuito esté equilibrado.

En los sistemas muy ramificados o de caudal variable, para asegurar el equilibrado de los circuitos es necesario montar dispositivos que regulen el flujo.

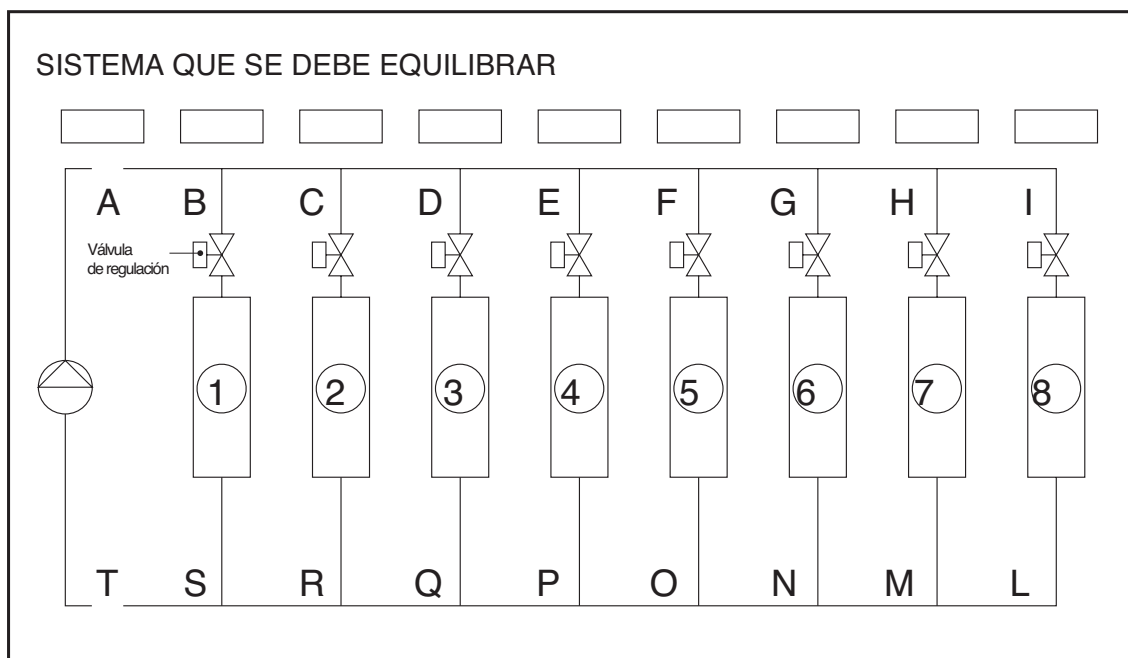
Entre ellos, se analizará en primer lugar el comportamiento de las válvulas de equilibrado manuales cuando están montadas en un sistema inicialmente no equilibrado.

Este es el método clásico de equilibrado de una instalación.

Ejemplo

Para definir mejor la situación, **daremos un ejemplo numérico** y lo volveremos a utilizar luego para otras consideraciones.

Esquema 1

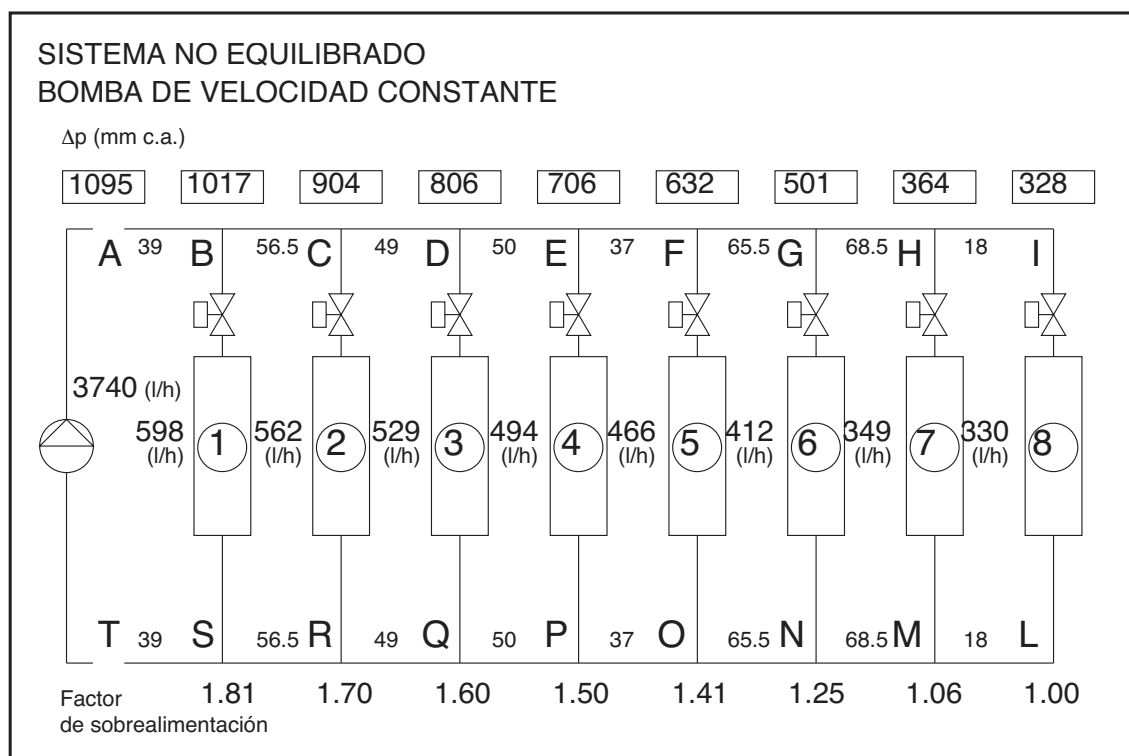


El Esquema 1 **ilustra una instalación** con ocho circuitos que salen de una línea principal común. **Cada circuito** tiene montado un fan coil que se desea alimentar con **un caudal nominal de 330 l/h** y que provoca una pérdida de carga de 150 mm c.a.

Los cálculos para determinar las condiciones finales de funcionamiento (Esquema 2) se indican en la página 11 del segundo volumen de los Cuadernos Caleffi.

Por mayor claridad, se ha optado por utilizar datos concretos y habituales.

Esquema 2



Generalmente, el caudal se determina en función de las condiciones de intercambio térmico y de las variaciones de temperatura del agua de alimentación.

Si se considera el terminal más desfavorecido y se procura alimentarlo con su caudal de diseño, los demás terminales resultarán **sobrealimentados**, ya que están sometidos a Δp más elevados por la presencia de troncos comunes.

La finalidad de este ejemplo es demostrar que, si se intenta enviar el caudal nominal al terminal más alejado (8), se crea una sobrealimentación en los terminales anteriores.

La sobrealimentación de los terminales aumenta al alejarse del número 8 y acercarse a la bomba.

En un sistema no equilibrado, si se desea **garantizar al menos el caudal nominal a todos los terminales**, se genera una sobrealimentación que, en el primer terminal, llega al 81%.

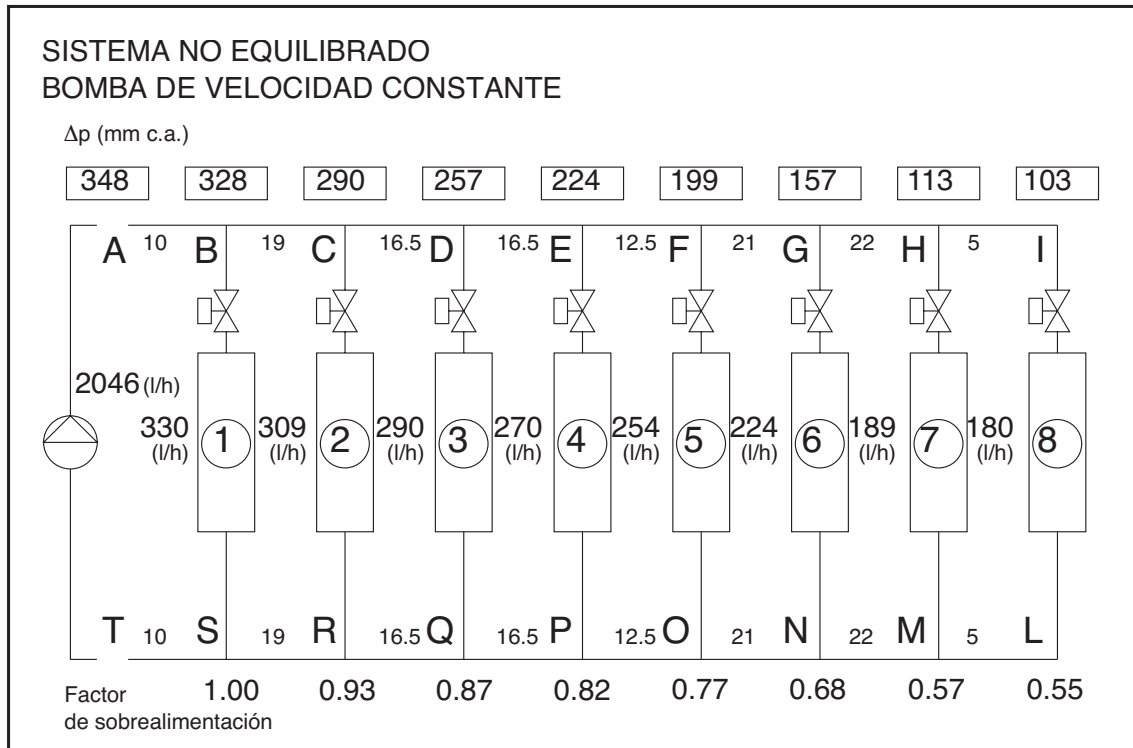
El caudal total aumenta del valor teórico de 2640 l/h a 3740 l/h, lo que supone un incremento de 42%.

Esto se traduce en un aumento de la potencia absorbida por la bomba, ruidos molestos debidos al mayor flujo, erosión de los componentes por la velocidad más alta del fluido y problemas de funcionamiento de los dispositivos de regulación.

Por el contrario, si se intenta alimentar el terminal más cercano (1) con su caudal de diseño, reduciendo por ejemplo la altura manométrica y el caudal de la bomba, los otros terminales resultan **subalimentados** (Esquema 3).

También esta situación es desventajosa, puesto que no se obtiene el intercambio térmico necesario en los terminales.

Esquema 3

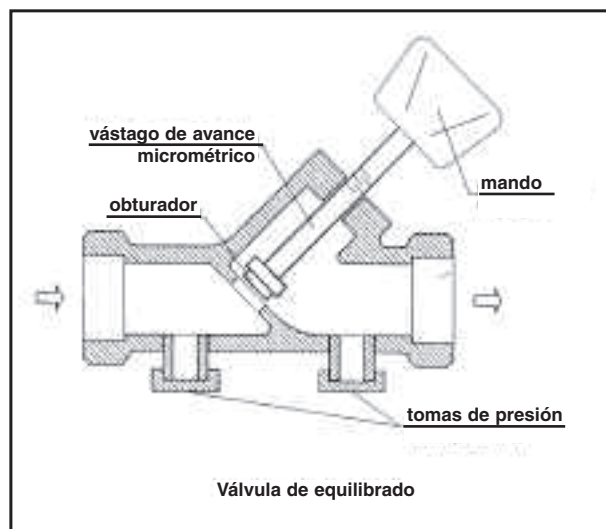


El caudal total disminuye del valor teórico de 2640 l/h a 2046 l/h.

Para evitar estos problemas, en los circuitos se instalan válvulas de equilibrado que garantizan el caudal de diseño en toda la instalación (Fig. 2).

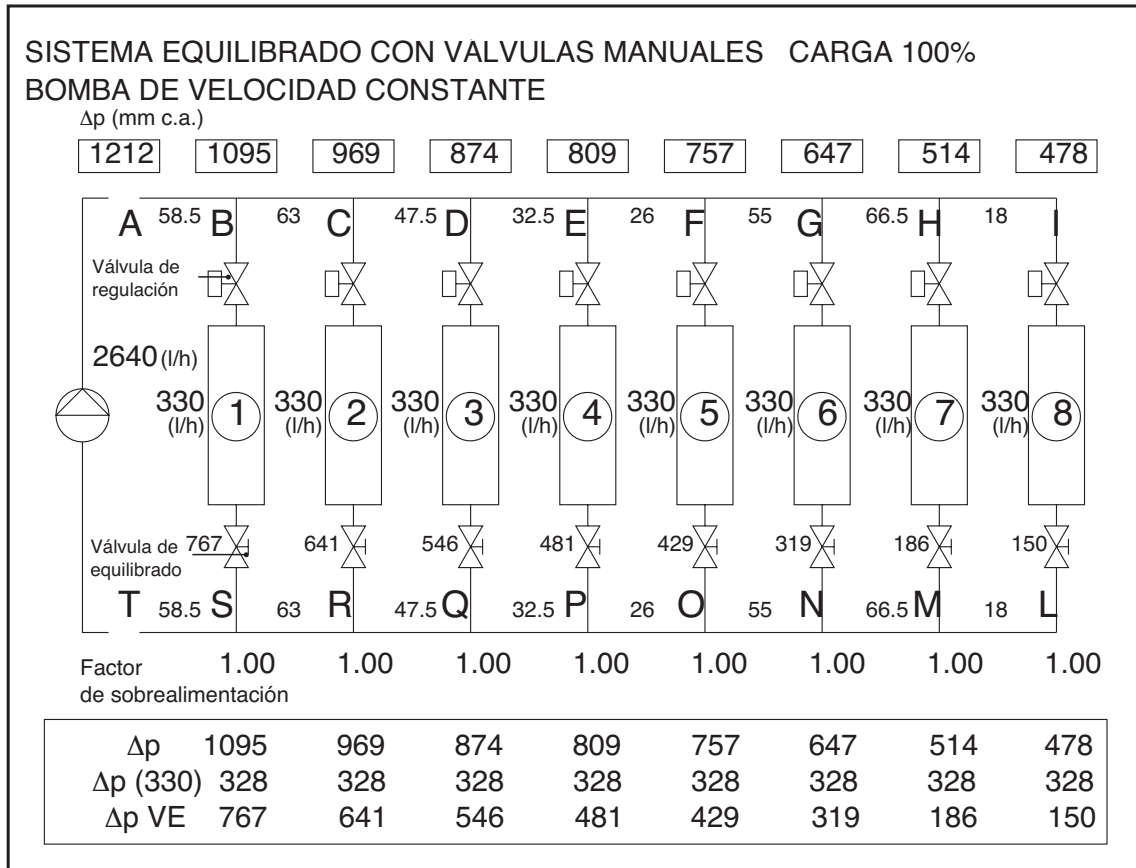
El caudal se regula mediante el mando de la válvula, de acuerdo con el Δp medido en las tomas de presión.

Fig. 2



A continuación se ilustra la misma instalación con el empleo de **válvulas de equilibrado** para controlar el caudal en los circuitos de salida (Esquema 4).

Esquema 4



Como se observa, la pérdida de carga entre los puntos I y L es de 328 mm c.a. con un caudal de 330 l/h en el terminal 8.

El objetivo es lograr, mediante el equilibrado, un caudal de 330 l/h en cada terminal.

En dicha situación, el caudal total será: $330 \cdot 8 = 2640$ l/h.

Para ello se monta una válvula de equilibrado en cada terminal y se las regula para un caudal de 330 l/h.

El último circuito de salida está provisto de una válvula de equilibrado totalmente abierta que provoca una pérdida de carga de 150 mm c.a.

Luego, el Δp en la última salida es de $328 + 150 = 478$ mm c.a.

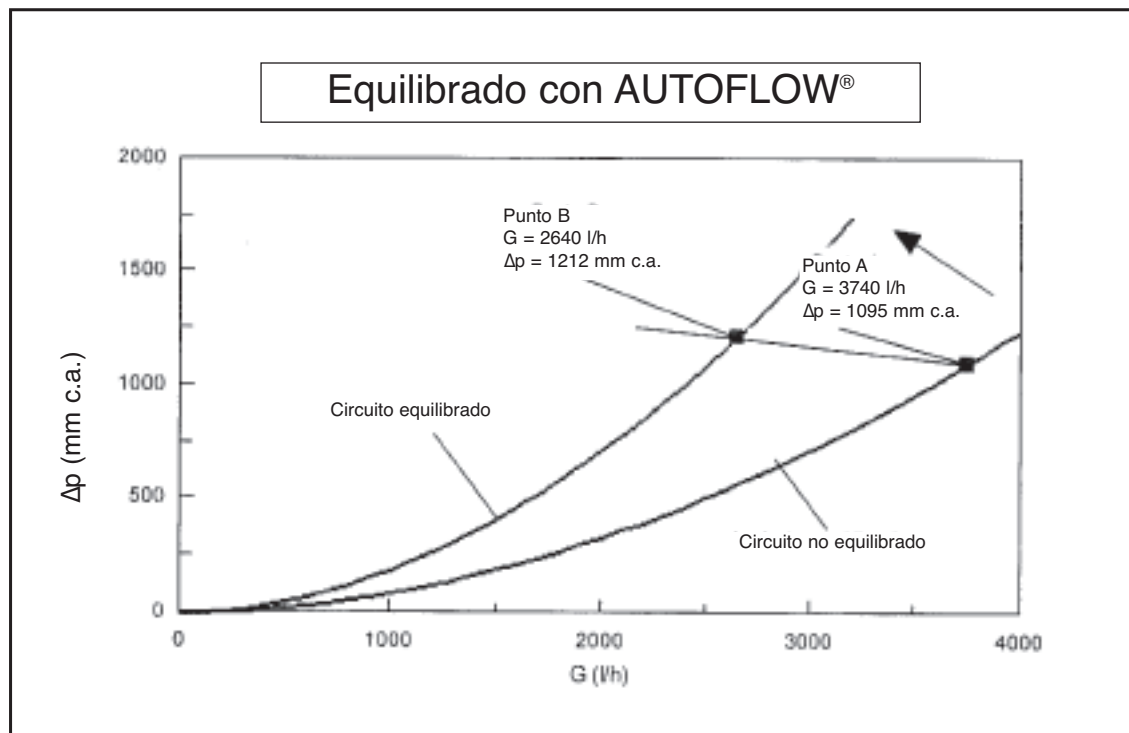
Tras calcular las pérdidas de carga en esta instalación equipada con válvulas de equilibrado manuales (VW), se puede calcular el Δp que se debe crear con cada válvula para garantizar el caudal de 330 l/h.

Las válvulas de equilibrado crean una situación que permite **garantizar el caudal de diseño en cada terminal**.

Las dos situaciones de funcionamiento se pueden representar de forma gráfica como en la figura 3.

Puntos de funcionamiento: circuito equilibrado y circuito no equilibrado.

Fig. 3



El valor de la curva característica del circuito equilibrado es superior al de la curva del circuito no equilibrado (ver apéndice). Esto explica que la curva característica del circuito se desplace hacia arriba.

El montaje y el ajuste de las válvulas de equilibrado han aumentado las pérdidas de carga en los circuitos de salida y, por lo tanto, la pérdida total del sistema.

Nota: Se supone conocida la curva característica de la bomba que representa la altura manométrica y los caudales.

Pero esta es **una situación estática** que no suele verificarse en la realidad.

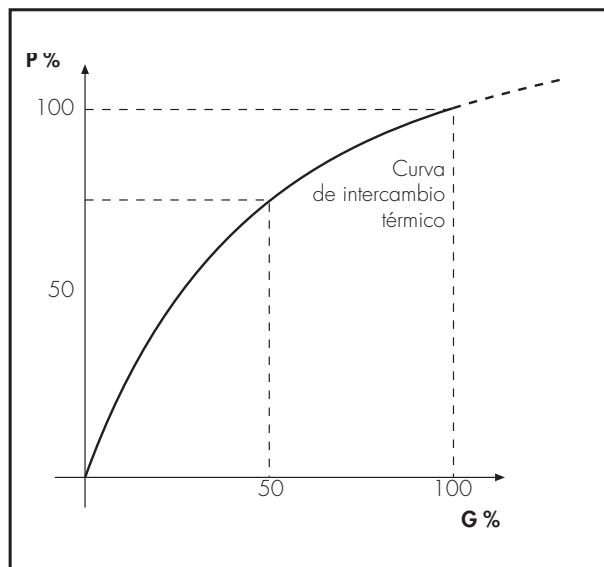
En efecto, en cada terminal dotado de **válvulas de regulación** se puede **hacer que el caudal de alimentación varíe automáticamente en función de la demanda térmica**.

En el gráfico se puede ver una curva típica que relaciona el caudal con el intercambio térmico realizado por un terminal (Fig. 4). [4]

En respuesta a una señal de temperatura, la válvula de regulación reduce automáticamente el caudal y, por lo tanto, el intercambio térmico efectuado por el terminal. De este modo se modifica el caudal cuando varía la carga térmica de la instalación.

Como consecuencia se crea una nueva situación de funcionamiento del circuito, a la cual está asociado **un nuevo punto de equilibrio**.

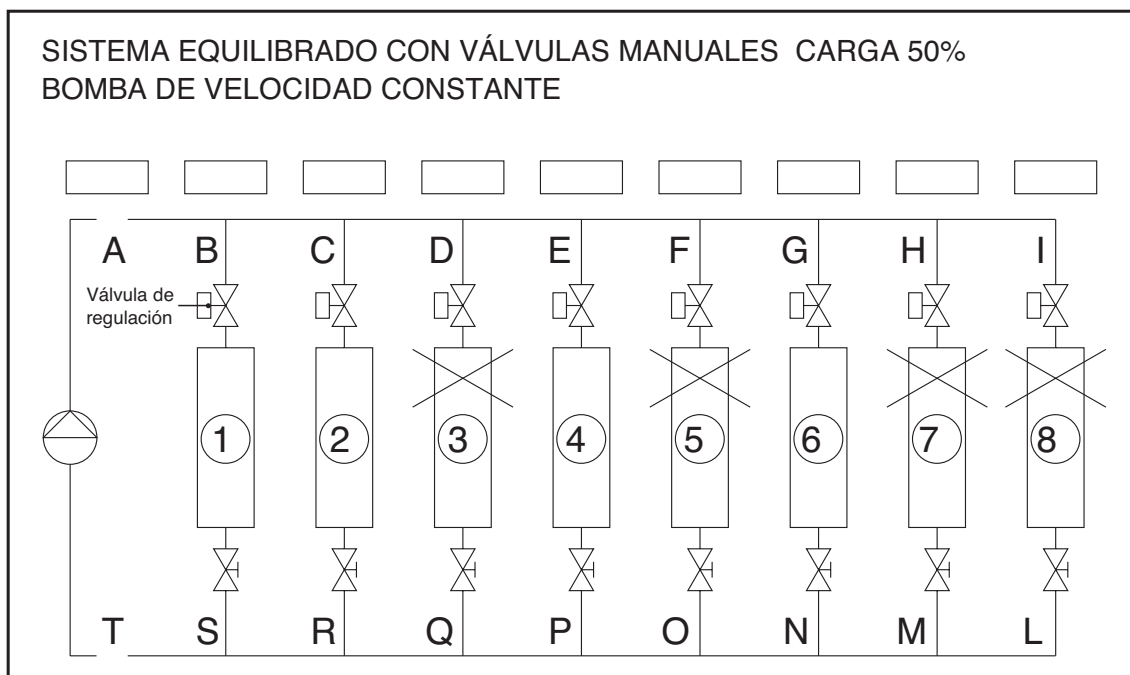
Fig. 4



Carga parcial

Para comprender mejor lo que sucede cuando se efectúa un **cierre parcial del circuito**, supongamos que se cierran algunos terminales del ejemplo anterior (Esquema 5).

Esquema 5

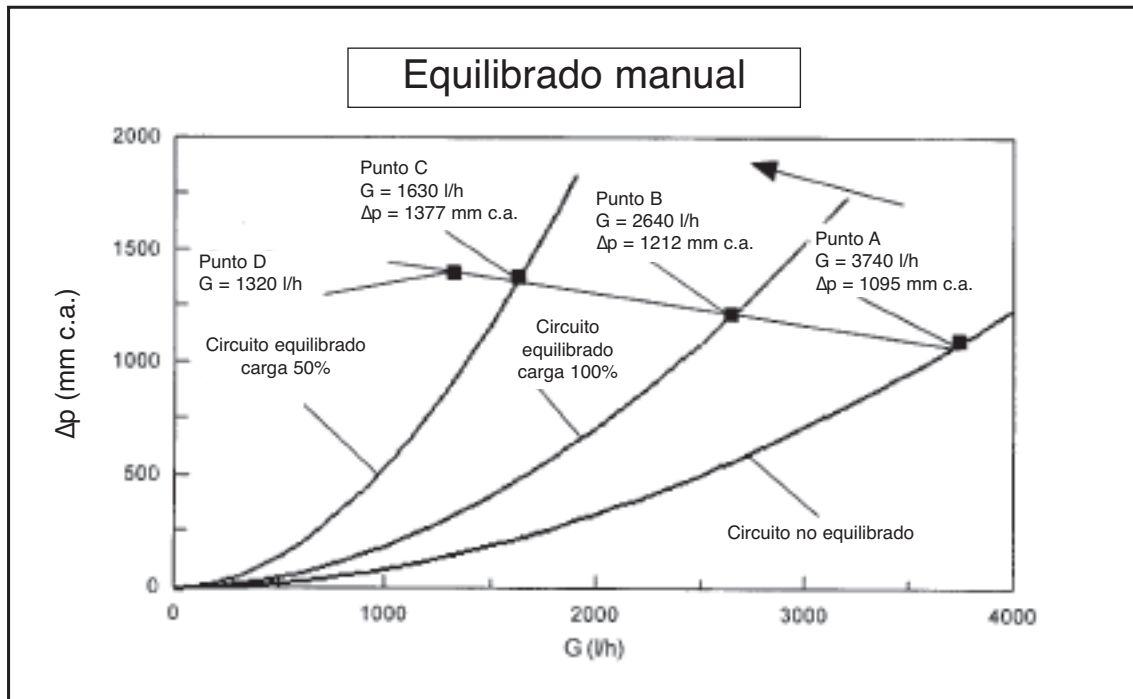


La nueva condición de funcionamiento crea un nuevo punto de equilibrio entre la curva de la bomba y la curva del circuito.

La nueva condición de funcionamiento con carga parcial se puede representar con un punto en el gráfico (Fig. 5).

Puntos de funcionamiento: carga total y carga parcial

Fig. 5



La intersección con la curva de la bomba es el nuevo punto de equilibrio C. En él se verifican los siguientes valores:

$$G = 1630 \text{ l/h}$$

$$\Delta p = 1377 \text{ mm c.a.}$$

El caudal total en estas nuevas condiciones ya no tiene el valor nominal deseado, puesto que es de 1630 l/h en vez de $4 \cdot 330 = 1320$ l/h (punto D). La variación del caudal es de **+ 23%**.

Consumos energéticos

A mayor caudal le corresponde mayor absorción de potencia por parte de la bomba (ver apéndice). Si calculamos esta potencia en los diversos casos del ejemplo anterior, resulta lo siguiente (Tabla 1):

Potencia absorbida por la bomba

Tabla 1

CASO	% Carga	G (l/h)	Δp (mm c.a.)	Rend.	% Potencia
1	100%	2640	1212	0,8	100%
2	50% (real)	1630	1377	0,7	81%
3	50% (teórico)	1320	1400	0,6	75%

Se puede observar que, en el caso 2, la potencia absorbida es 6% superior a la que se consumiría en la instalación, con carga parcial, reequilibrada a su caudal teórico (caso 3).

El consumo debe considerarse en función de los caudales y las alturas manométricas, no es posible establecer un valor absoluto porque se trata de una magnitud relacionada con otros factores.

Lo que se desea destacar es **el mayor consumo energético** respecto a la situación teórica, lo que constituye otra desventaja de este tipo de equilibrado.

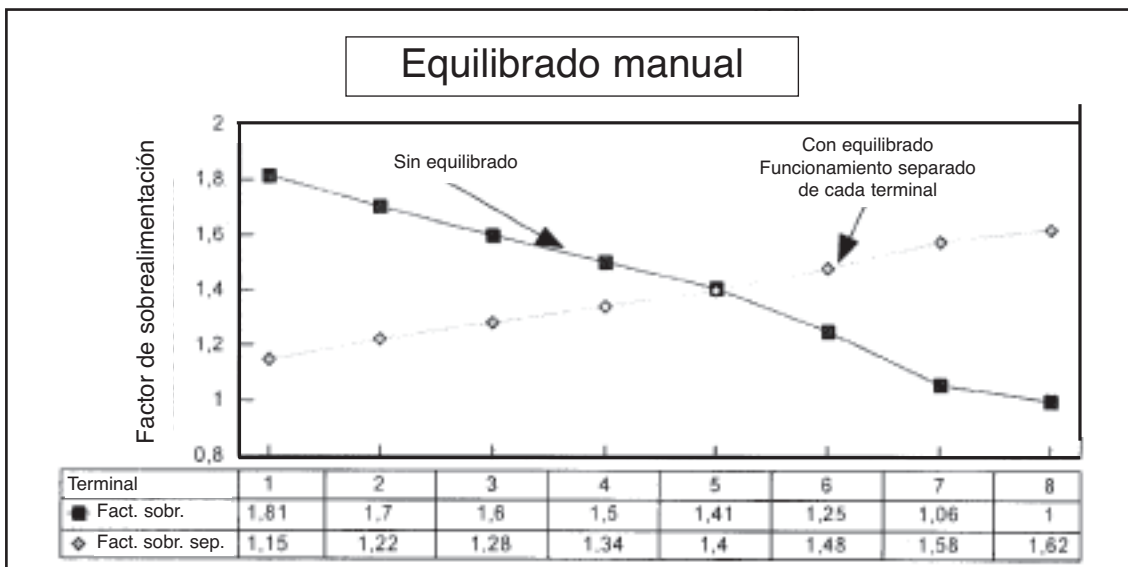
A continuación se ilustran las **condiciones extremas de carga parcial** (Fig. 6).

Haciendo funcionar solo un terminal por vez, se obtienen los factores de sobrealimentación correspondientes.

Los factores de sobrealimentación crecen en dirección al terminal que inicialmente se consideraba más desfavorecido, el cual experimenta un aumento en torno al 60%.

Condiciones extremas de carga

Fig. 6



Paralelamente crece también el incremento porcentual de la potencia absorbida respecto al valor teórico, hasta llegar a un máximo de aproximadamente **10%**.

Se puede decir, entonces, que una instalación perfectamente equilibrada con los valores de diseño tiene **limitaciones de funcionamiento en caso de carga parcial**.

Con las válvulas de equilibrado manuales **no se pueden controlar los sobrecaudales** que se producen inevitablemente, por lo cual se verifica un consumo superior al esperado.

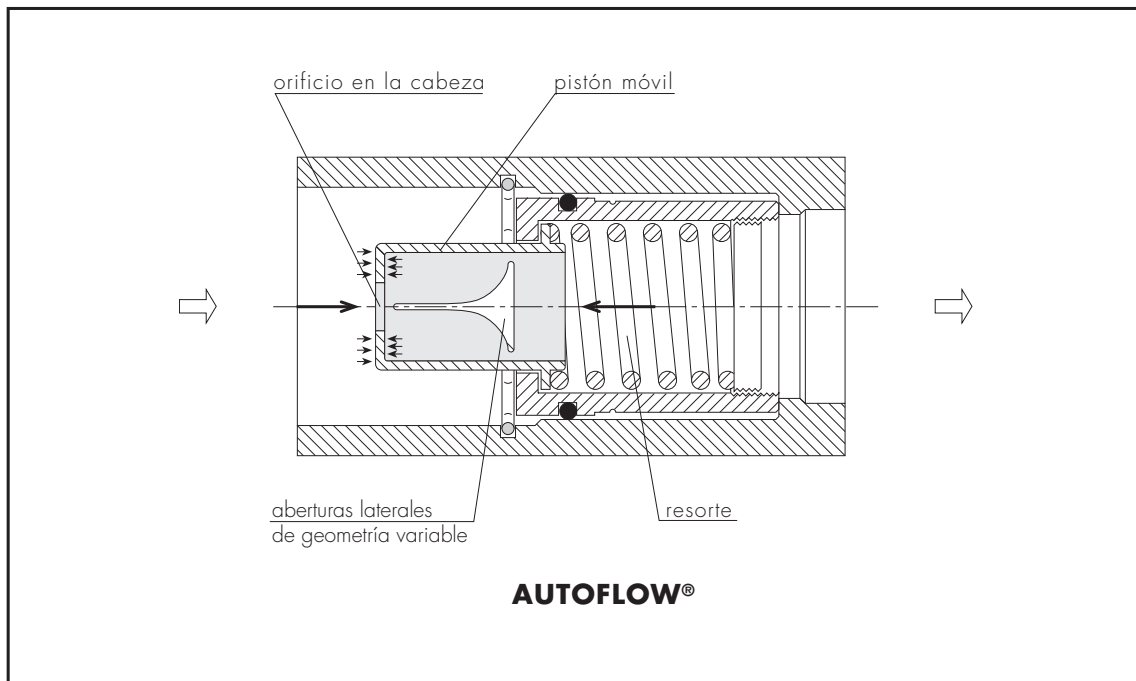
El dispositivo AUTOFLOW®

AUTOFLOW® es un estabilizador automático de caudal que mantiene el flujo constante aunque varíe la presión antes o después de él.

El elemento regulador de AUTOFLOW® está formado esencialmente por dos partes (Fig. 7):

1. Un pistón que tiene un orificio en la cabeza y aberturas laterales de geometría variable, por los cuales pasa el líquido.
2. Un resorte que se opone al empuje del fluido sobre el pistón.

Fig. 7



El equilibrio se verifica cuando la fuerza del resorte es igual a la fuerza ejercida en la cabeza del pistón por la diferencia de presión que hay entre la entrada y la salida del dispositivo.

Relaciones de equilibrio con AUTOFLOW®

	Relación	Descripción	Donde:
1	$G=K \cdot A \cdot \Delta p^{0,5}$	Caudal - Δp	G =Caudal de fluido K =Coeficiente de equilibrio
2	$F=\Delta p \cdot A0$	Fuerza - Δp	A =Sección de paso del fluido F =Fuerza
3	$F=Ks \cdot X$	Fuerza del resorte- desplazamiento	Δp =Presión diferencial A0 =Superficie de la cabeza del pistón Ks =Constante característica del resorte X =Desplazamiento del pistón

Geometría del paso de fluido con AUTOFLOW®

Mediante las fórmulas anteriores se puede definir la geometría que debe tener la sección de paso del fluido para que el caudal permanezca constante cuando cambia la presión diferencial.

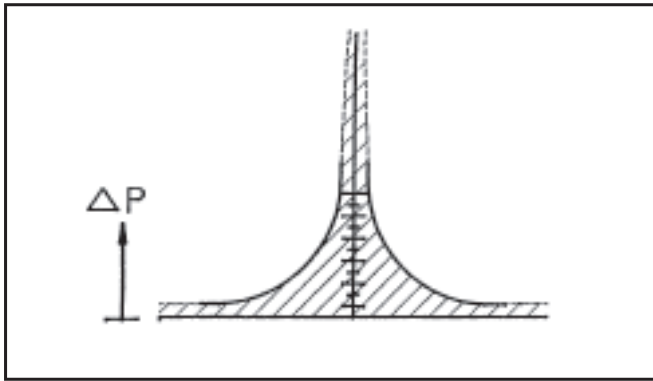
En el gráfico de la Fig. 8 se representan las secciones de paso necesarias para mantener el caudal constante con distintos valores de Δp .

$$A = f(\Delta p) \quad \text{con } G = \text{constante}$$

A = sección variable de paso del fluido

Curva de sección de paso- Δp

Fig. 8



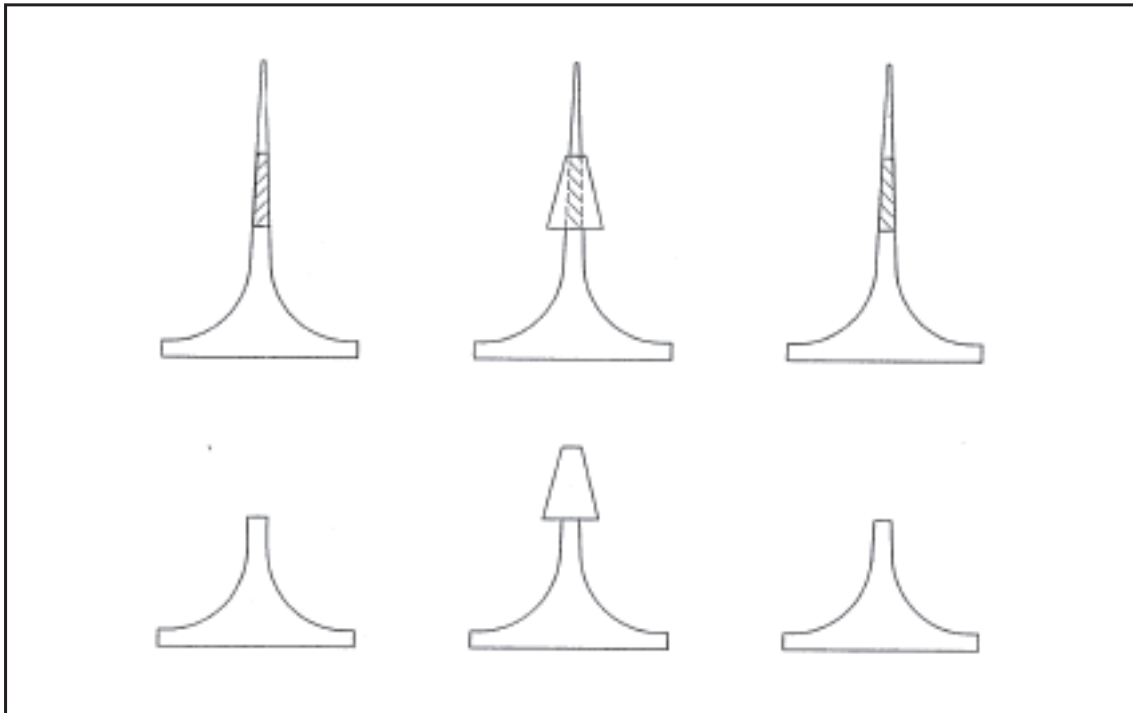
La zona con líneas oblicuas representa la sección de paso del fluido en función del Δp y, por lo tanto, del desplazamiento del pistón hacia dentro del cuerpo.

Cuanto más se desplaza el pistón hacia dentro, menor es el área.

Más abajo se ilustran algunas geometrías típicas (Fig. 9) obtenidas mediante un desarrollo bidimensional de la superficie lateral del pistón. Las áreas laterales pequeñas se representan juntas en una única área central.

Composición de las geometrías

Fig. 9



Dimensiones de AUTOFLOW®

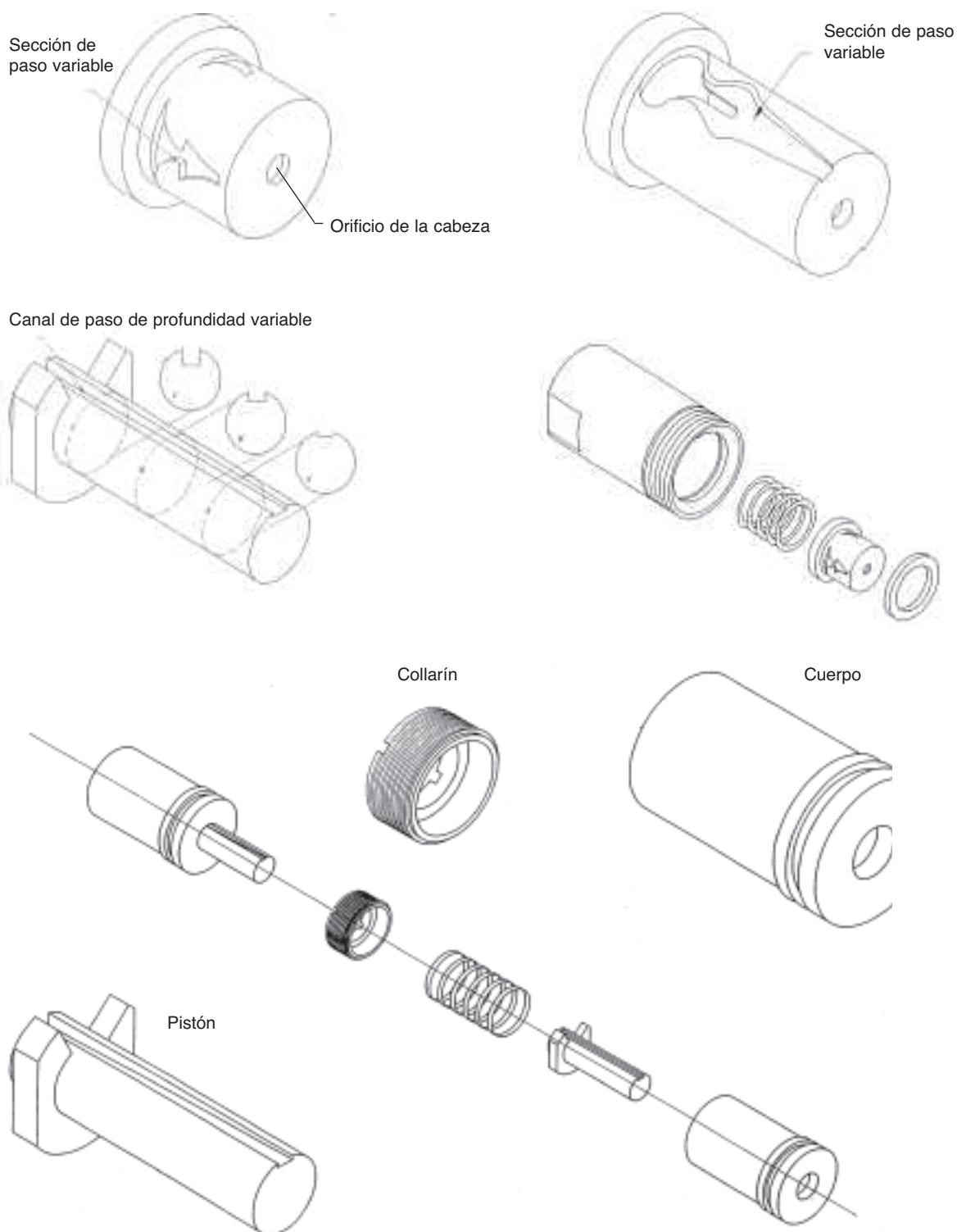
La forma y el tamaño de la sección de paso cambian en función del caudal nominal y del campo de presión diferencial de trabajo.

Naturalmente, también dependen de las dimensiones del regulador.

Por este motivo, los reguladores AUTOFLOW® se fabrican con distintas formas y dimensiones (Fig. 10).

Formas geométricas de los reguladores AUTOFLOW®

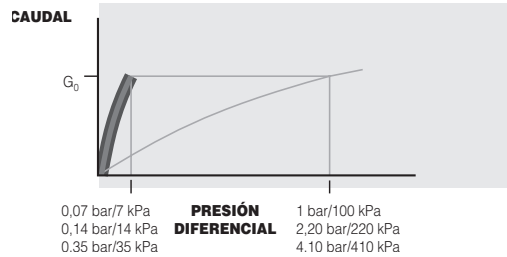
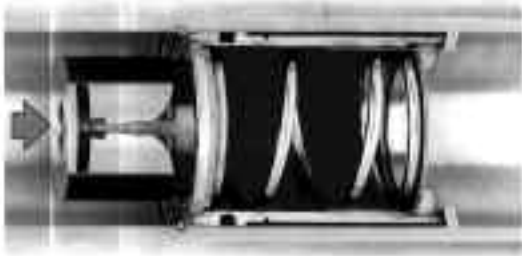
Fig. 10



Funcionamiento de AUTOFLOW®

El funcionamiento de AUTOFLOW® se comprende mejor observando la curva Δp -G y el esquema del dispositivo en las diversas condiciones.

POR DEBAJO DEL CAMPO DE TRABAJO



En este caso, el pistón de regulación permanece en equilibrio sin comprimir el resorte y ofrece al fluido la máxima sección libre de paso.

El pistón actúa como un regulador fijo, por lo cual el caudal que atraviesa el AUTOFLOW® depende solo de la presión diferencial.

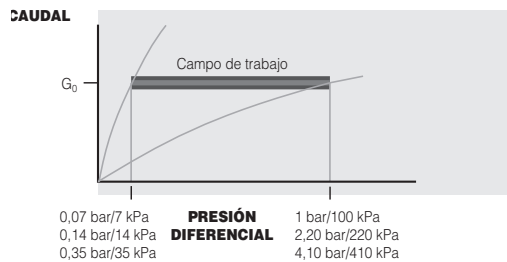
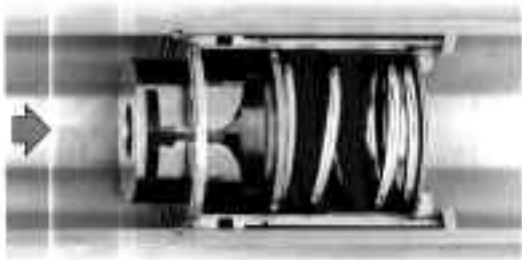
Rango Δp 7÷100 kPa: $K_{v_{0,01}} = 0,378 * G_0$

Rango Δp 14÷220 kPa: $K_{v_{0,01}} = 0,267 * G_0$

Rango Δp 35÷410 kPa: $K_{v_{0,01}} = 0,169 * G_0$

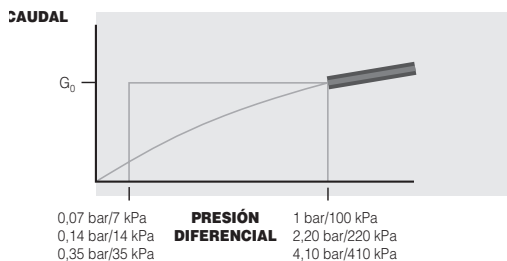
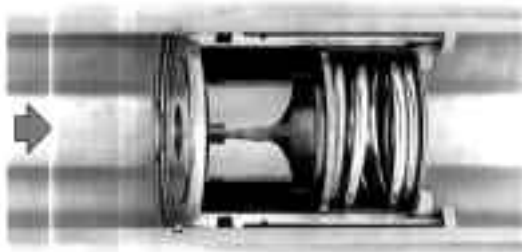
donde G_0 = caudal nominal

DENTRO DEL CAMPO DE TRABAJO



Si la presión diferencial está comprendida en el campo de trabajo, el pistón comprime el resorte y ofrece al fluido la sección de paso necesaria para obtener el caudal deseado.

POR ENCIMA DEL CAMPO DE TRABAJO



En estas condiciones, el pistón comprime totalmente el resorte y deja solo el orificio de la cabeza como vía de paso para el fluido. Al igual que en el primer caso, el pistón actúa como un regulador fijo.

El caudal que atraviesa AUTOFLOW® depende solo de la presión diferencial.

Rango Δp 7÷100 kPa: $K_{v_{0,01}} = 0,1 * G_0$

Rango Δp 14÷220 kPa: $K_{v_{0,01}} = 0,067 * G_0$

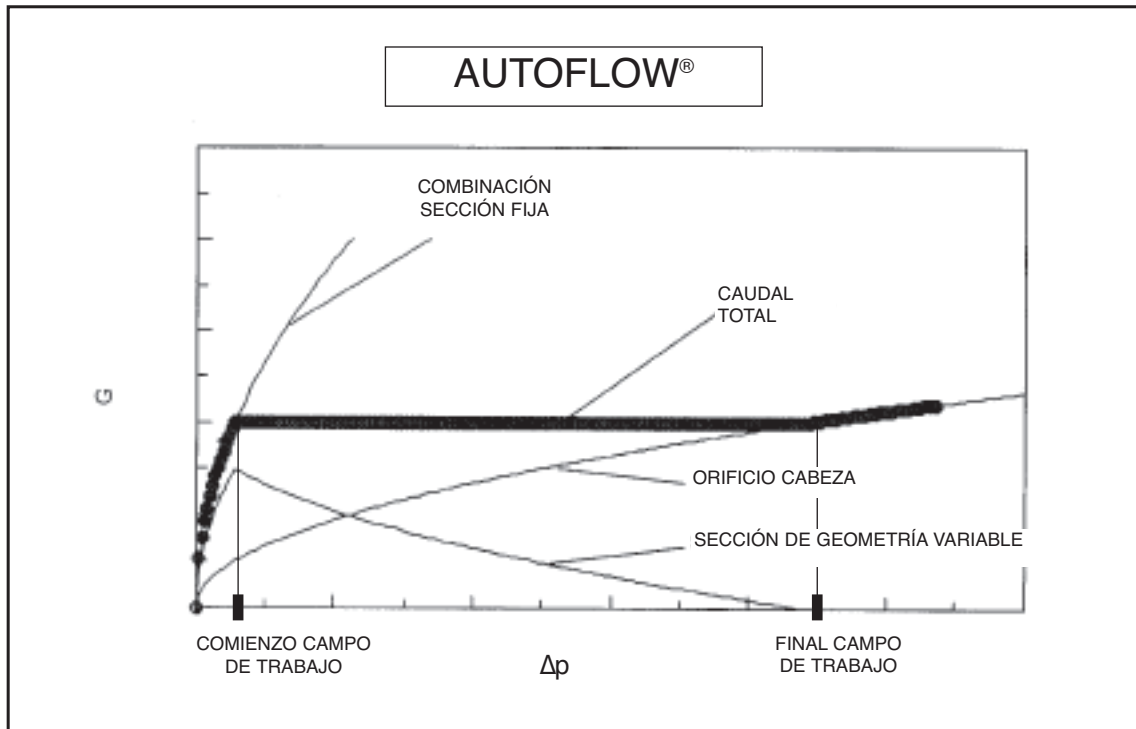
Rango Δp 35÷410 kPa: $K_{v_{0,01}} = 0,049 * G_0$

donde G_0 = caudal nominal

En el gráfico siguiente se representan los caudales correspondientes a las diversas secciones de paso y a su composición, para distintos valores de Δp (Fig. 11).

Composición de los caudales con AUTOFLOW®

Fig. 11



El caudal total es la suma de los caudales que pasan a través del ORIFICIO DE LA CABEZA y las aberturas laterales de GEOMETRÍA VARIABLE.

Consideraciones

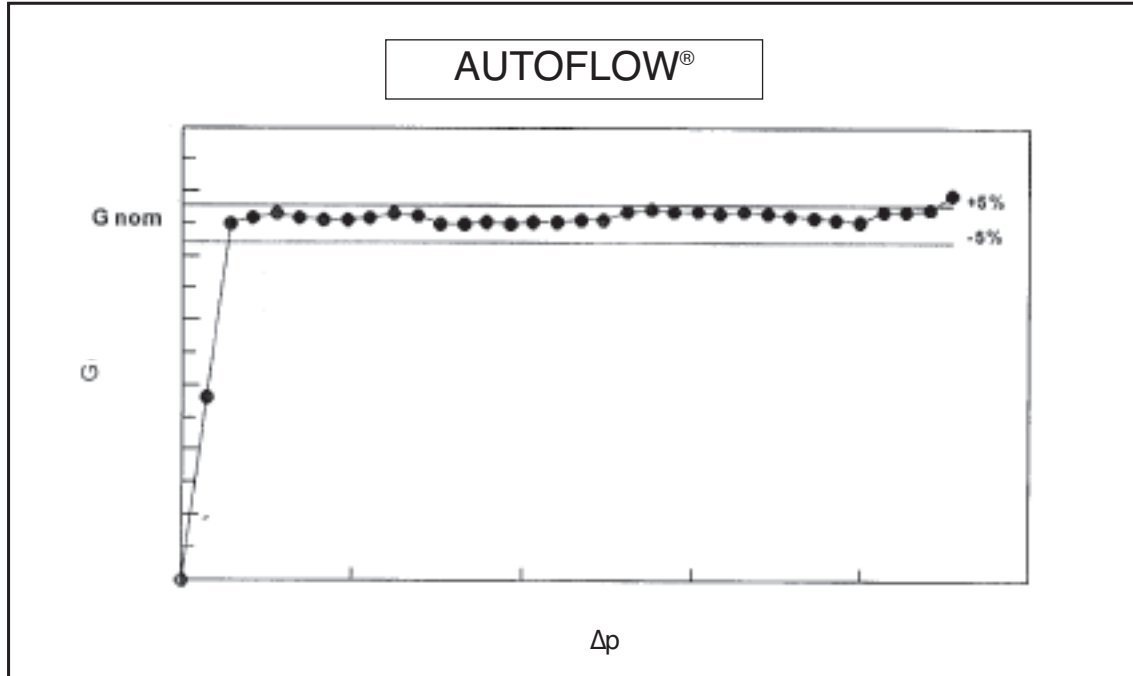
Queda demostrado que el campo de trabajo de estos dispositivos es muy amplio y capaz de satisfacer las necesidades de la mayoría de las instalaciones.

Además, están disponibles distintos intervalos de presión diferencial (por ejemplo 14÷220 kPa y 35÷410 kPa) para extender aún más las posibilidades de regulación.

Tolerancias de los caudales

El caudal se mantiene en el valor nominal con una tolerancia de $\pm 5\%$.

Fig. 12



Esto permite obtener los valores aconsejados para que los terminales y los dispositivos de regulación funcionen correctamente.

Dichos límites dependen del uso de la instalación (calefacción o aire acondicionado) y de las temperaturas de diseño del fluido caloportador.

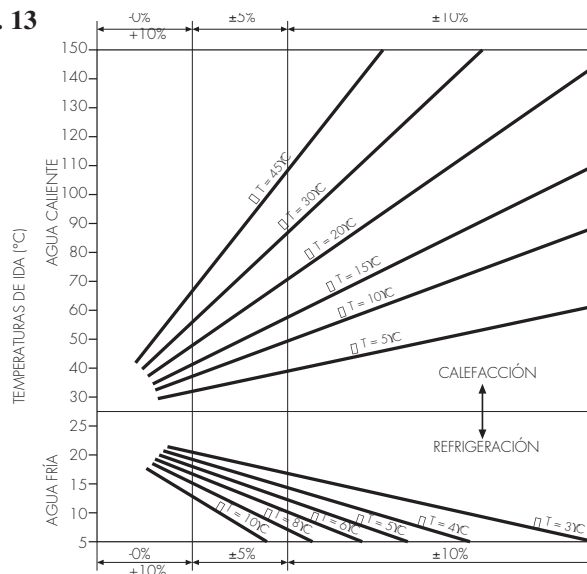
En general, se puede decir que la tolerancia aconsejada para el caudal nominal de agua caliente es $\pm 10\%$, llegando a $\pm 5\%$ en el caso de agua refrigerada (Fig. 13).

Tolerancias de los caudales en calefacción y refrigeración

La relación entre la emisión térmica y el caudal se puede representar de forma gráfica.

Esto puede ser útil para definir las tolerancias de los caudales. [6] [4]

Fig. 13



Equilibrado con AUTOFLOW® y bomba de velocidad constante

Como ya se ha visto, el sistema tradicional de equilibrado con válvulas de calibración garantiza un caudal constante solo en **condiciones** de funcionamiento idénticas a las de diseño, **que son aquellas para las cuales se han tarado las válvulas**.

En el caso de carga parcial de la instalación, la curva característica del circuito cambia y es necesario hacer un nuevo equilibrado para obtener los caudales de diseño en los diversos componentes. La carga parcial determina siempre un sobrecaudal en los terminales.

En la práctica es imposible recalibrar las válvulas de regulación manuales, por lo cual se recurre a otros dispositivos de equilibrado.

Estos dispositivos deben ser de tipo dinámico y capaces de garantizar el caudal de diseño en todas las condiciones normales de funcionamiento.

1. El equilibrado continuo

Si la instalación no está equilibrada, para mantener el caudal nominal en los terminales se debe absorber el exceso de presión diferencial que hay en ellos.

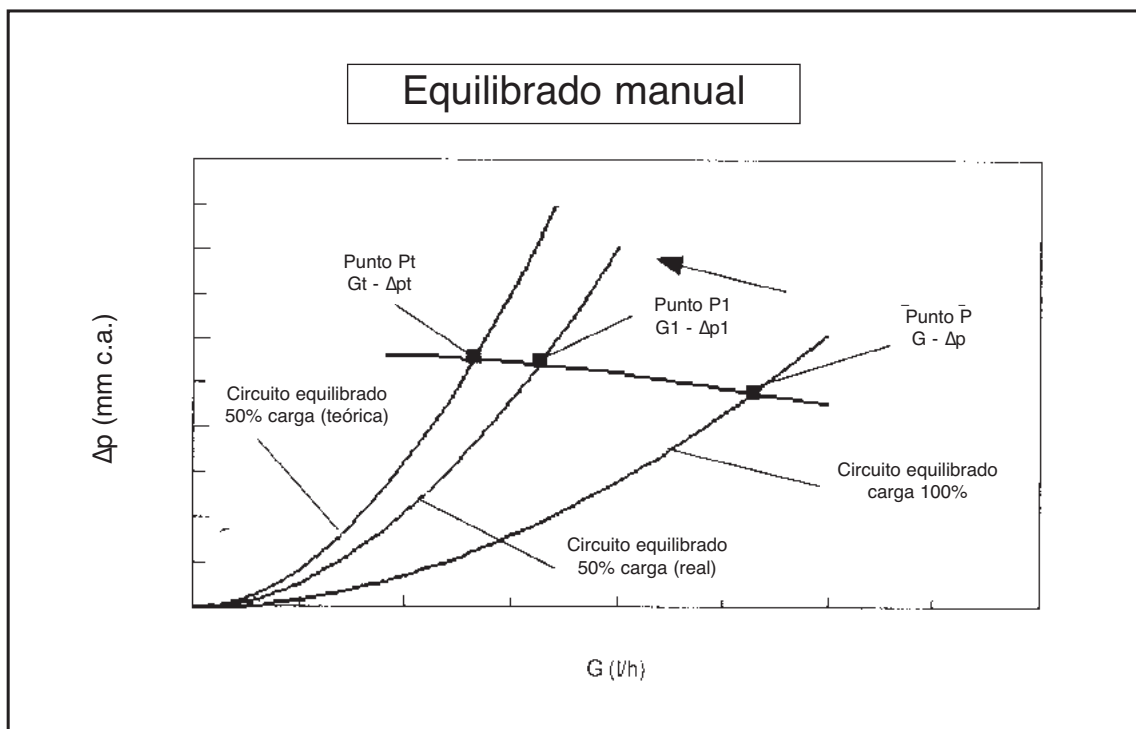
Una vez equilibrados los terminales, el cierre parcial de las válvulas provoca sobrepresiones a causa del desplazamiento hacia arriba de la curva característica del circuito.

El nuevo valor determina un nuevo punto de funcionamiento del circuito (P1).

A este punto de funcionamiento le corresponde un caudal G_1 que es superior al valor G_t teórico para carga parcial (Fig. 14).

Puntos de funcionamiento de la instalación: carga total y carga parcial

Fig. 14



Para garantizar los caudales deseados se debería recalibrar el circuito de forma que se absorban las sobrepresiones y se restablezca el caudal total G teórico.

Por su construcción, AUTOFLOW® puede absorber estas sobrepresiones sin modificar el caudal que lo atraviesa.

Por esto se lo puede considerar un **estabilizador de caudal de tipo dinámico y continuo**.

2. Diseño con AUTOFLOW®

Las condiciones de diseño deben asegurar que el circuito más desfavorecido, provisto de AUTOFLOW®, se alimente siempre con el caudal nominal.

Si el circuito desfavorecido no estuviera dotado de AUTOFLOW®, recibiría una sobrealimentación en caso de cierre parcial de la instalación.

En este circuito, AUTOFLOW® está sometido a una presión diferencial más baja que en los otros (las leyes para calcular las pérdidas de carga son siempre las mismas).

La bomba debe garantizar que en el AUTOFLOW® de este circuito haya una presión diferencial mínima suficiente para que el dispositivo realice su función reguladora del caudal.

Los sucesivos cierres a carga parcial provocarán las sobrepresiones ya mencionadas, que en este caso serán absorbidas por AUTOFLOW®.

A la hora de escoger la bomba, la altura manométrica se debe calcular como la suma de las pérdidas de carga del circuito más desfavorecido y la presión diferencial mínima de trabajo del dispositivo AUTOFLOW®.

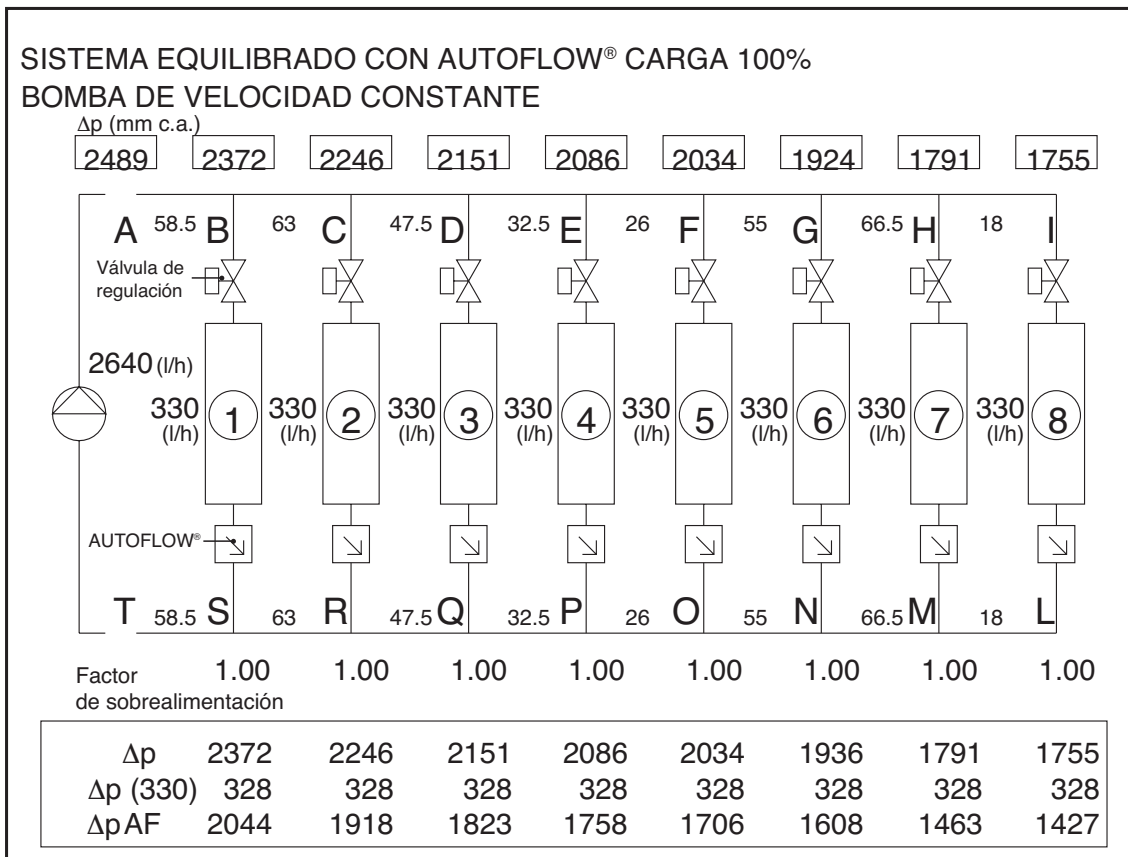
Ejemplo

Consideremos nuevamente la instalación del ejemplo anterior. Pero en este caso, en lugar de las válvulas de equilibrado manuales, se utilizan dispositivos AUTOFLOW®.

Por analogía, se indican solamente los datos relativos a las condiciones finales de funcionamiento (Esquema 7).

En la página 48 del segundo volumen de los Cuadernos Caleffi figuran los cálculos necesarios para dimensionar la instalación también en este caso, los cuales son mucho más sencillos que en el caso anterior.

Esquema 7



Con AUTOFLOW® se ha obtenido un **circuito perfectamente equilibrado**.

Consideraciones

El Δp del AUTOFLOW® del último circuito de salida es de 1427 mm c.a., o sea que AUTOFLOW® está en el comienzo del campo de trabajo.

Cuanto más cerca de la bomba está una salida, mayor es el Δp al que se somete su AUTOFLOW®.

El resorte de los AUTOFLOW®, en estas condiciones, está siempre comprimido.

$G = 2640 \text{ l/h}$

$\Delta p = 2489 \text{ mm c.a.}$

En este caso, la altura manométrica total del sistema ha aumentado por la presencia de los AUTOFLOW®.

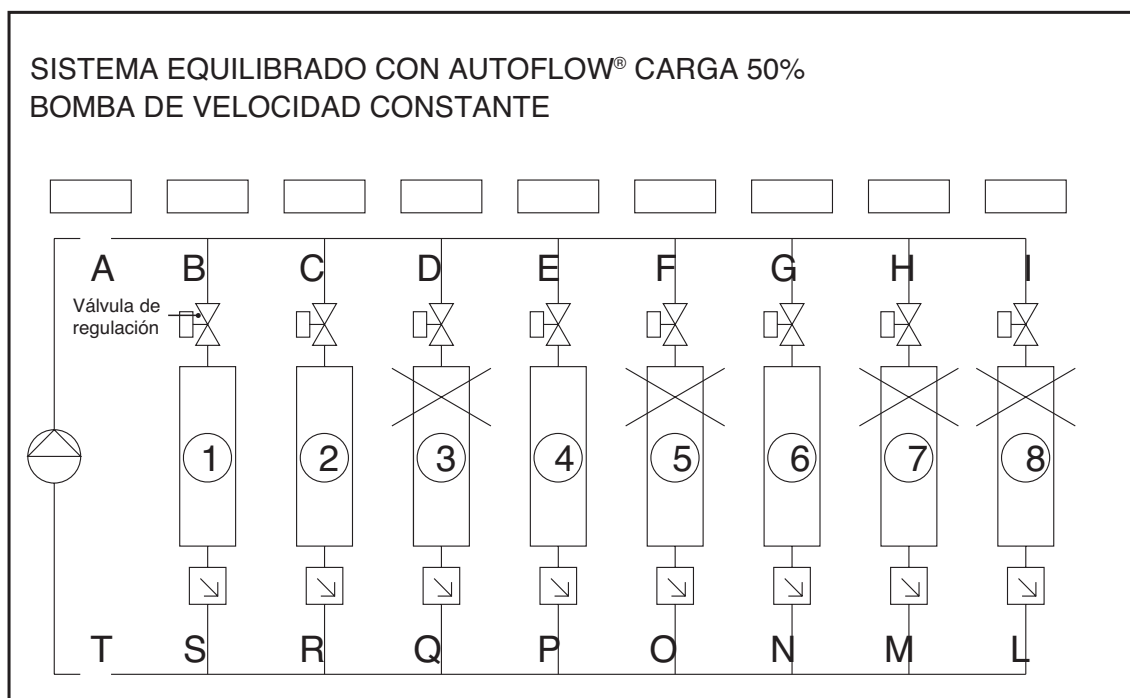
El efecto de este aumento se debe calcular en función del tamaño de la instalación.

Carga parcial

Veamos qué sucede cuando la instalación funciona con carga parcial.

Se accionan las válvulas de regulación simulando el cierre de los mismos terminales del ejemplo anterior (Esquema 8).

Esquema 8

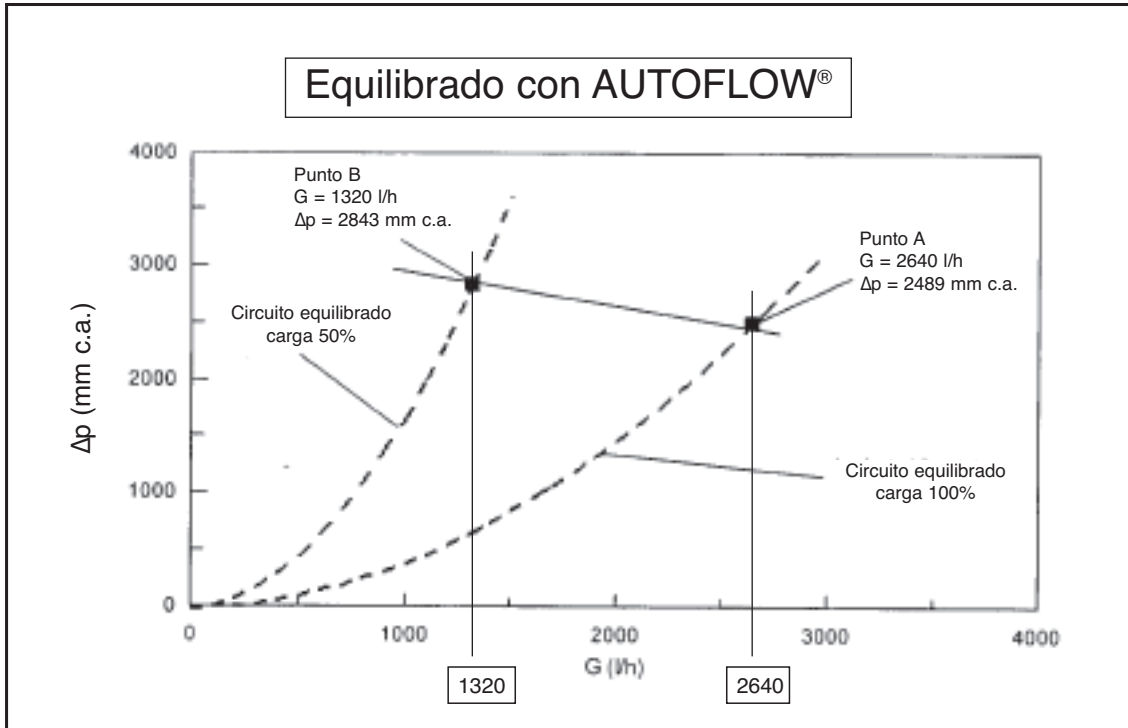


El gráfico de la figura 15 ilustra los diversos puntos de funcionamiento.

Nota: Naturalmente, en este ejemplo con AUTOFLOW® la curva característica de la bomba es distinta de la anterior con válvulas manuales, ya que los puntos de funcionamiento nominales Δp -G son diferentes.

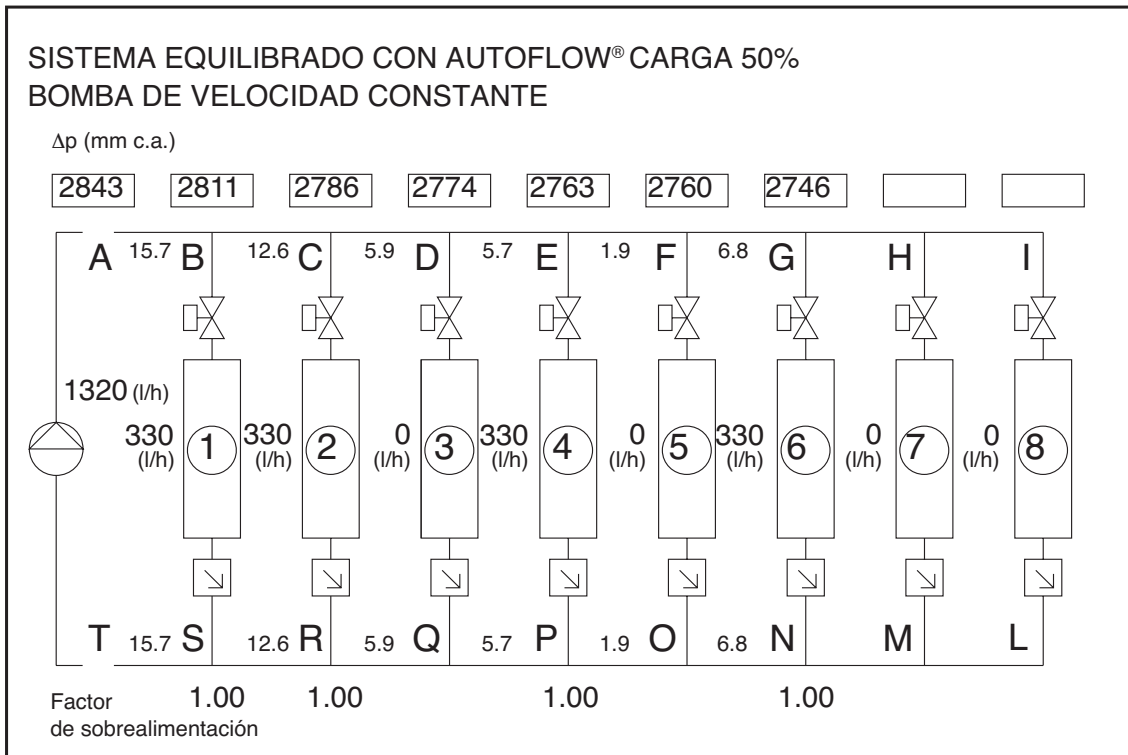
Puntos de funcionamiento del sistema con AUTOFLOW®: carga total y carga parcial

Fig. 15



A continuación se describe la nueva condición de funcionamiento del sistema equilibrado dinámicamente con AUTOFLOW® (Esquema 9).

Esquema 9



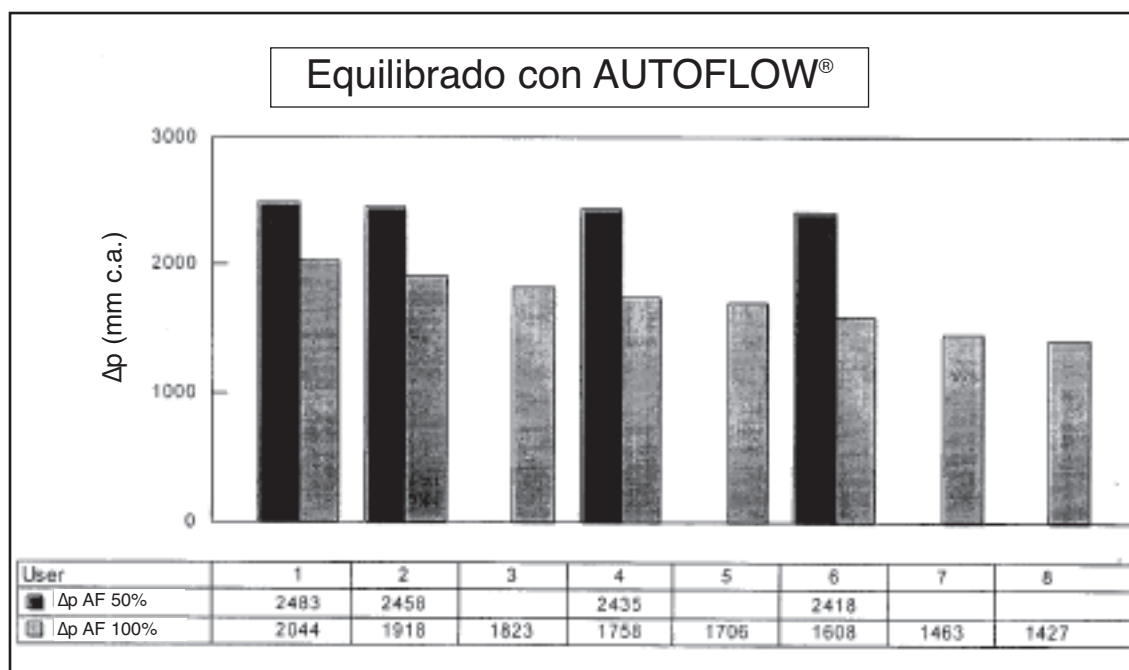
Nótese que el caudal permanece constante en su valor nominal.

AUTOFLOW® ha absorbido el exceso de presión diferencial generado por el cierre de las válvulas de regulación (Fig. 16).

En el gráfico siguiente se ilustra de forma sinóptica la variación de dichas sobrepresiones.

Δp absorbidos por AUTOFLOW®

Fig. 16



Consideraciones

El incremento del Δp absorbido por AUTOFLOW® (AF) con carga parcial es mayor en el circuito 6 que en el circuito 1. Luego:

- A menor número de circuitos conectados, mayor es la presión diferencial que debe absorber AUTOFLOW®.
- A mayor número de circuitos conectados, menor es la presión diferencial máxima que debe absorber AUTOFLOW®.

$$D = \Delta p_{\text{máx}} - \Delta p_{\text{mín}}$$

con carga al 50%: $D = 2483 - 2418 = 65 \text{ mm c.a.}$

con carga al 100%: $D = 2044 - 1427 = 617 \text{ mm c.a.}$

- A mayor número de circuitos conectados, mayor es la diferencia D entre las presiones diferenciales de los diversos AUTOFLOW® ($617 > 65$).

Equilibrado manual y bomba de velocidad variable

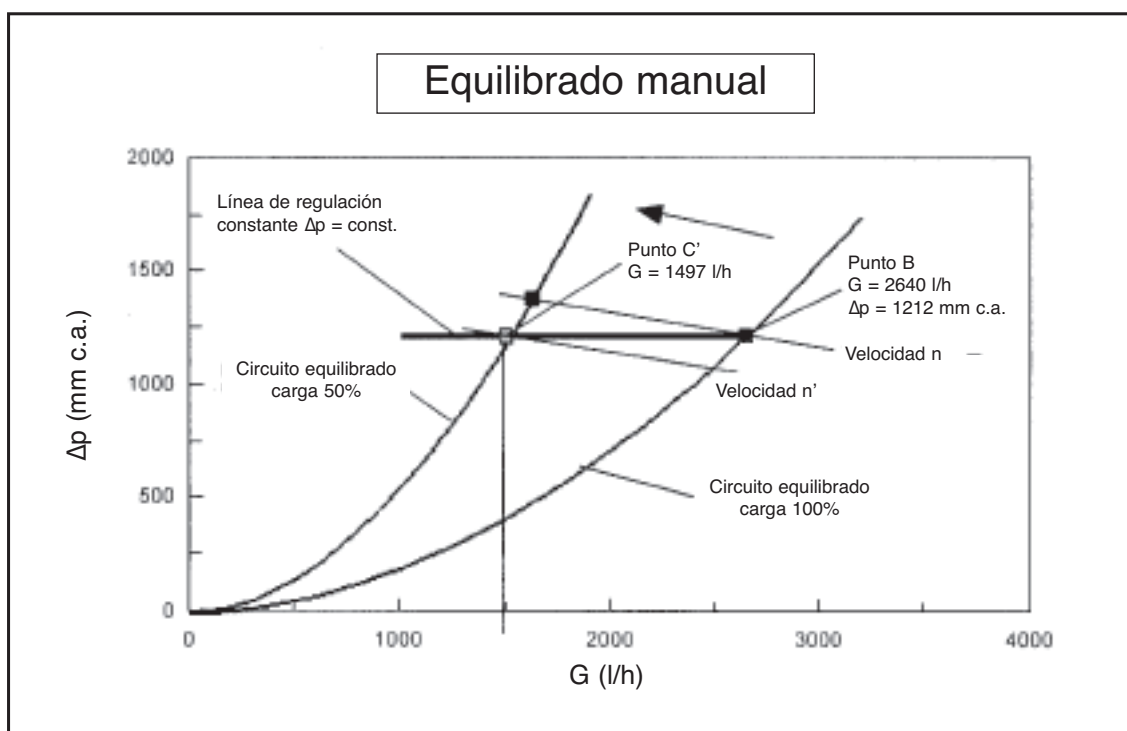
En un circuito equilibrado con válvulas manuales y dotado de una bomba capaz de modificar su velocidad de rotación para adecuarse a la carga parcial del sistema, se producen las siguientes situaciones.

Caso 1 - Regulación constante

La bomba reduce su velocidad y por consiguiente el caudal manteniendo el Δp constante. Este método se denomina de **regulación constante** (Fig. 17).

Bomba de velocidad variable con regulación constante

Fig. 17



La nueva velocidad de la bomba es n' .

El nuevo punto de funcionamiento es C' , con un Δp de 1212 mm c.a.

Este es el mismo valor del punto B correspondiente al circuito equilibrado con el 100% de la carga.

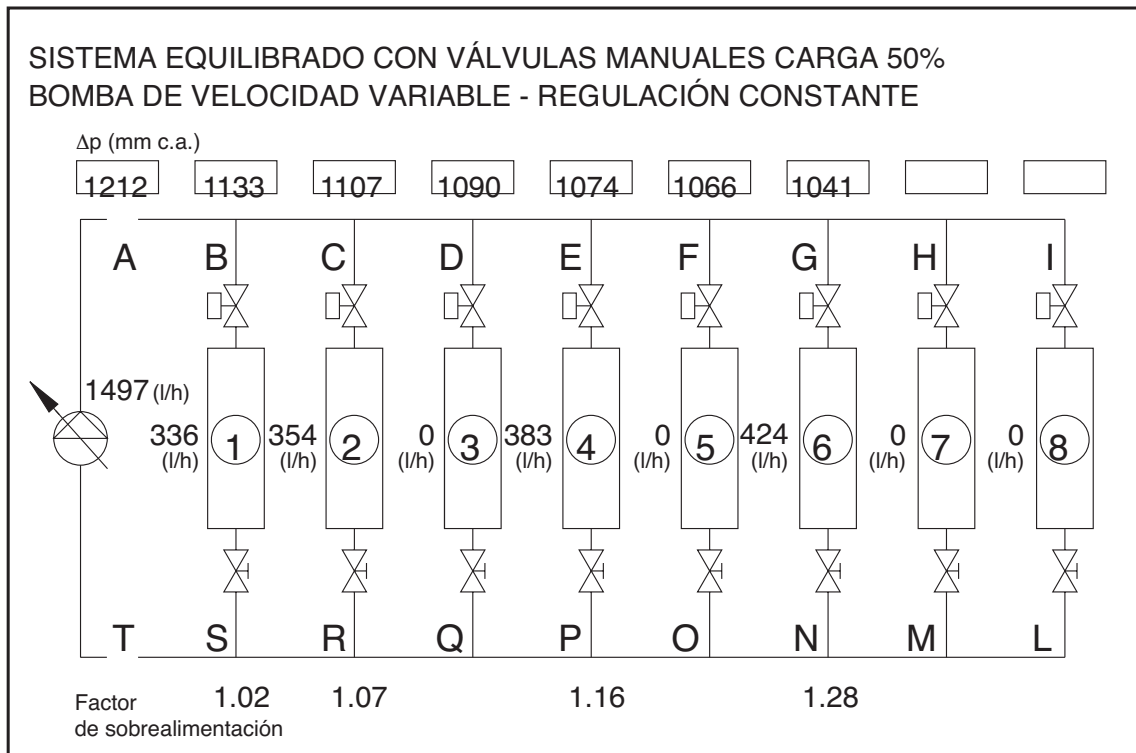
El caudal en el punto C' está determinado por la intersección entre la curva del circuito con carga parcial y la línea de Δp constante.

Su valor es $G = 1497$ l/h.

Caudal

En el Esquema 10 se indican los caudales de los circuitos de salida en estas nuevas condiciones.

Esquema 10



Los factores de sobrealimentación disminuyen, lo que significa una ventaja respecto a la bomba de velocidad constante. No obstante, son siempre > 1 .

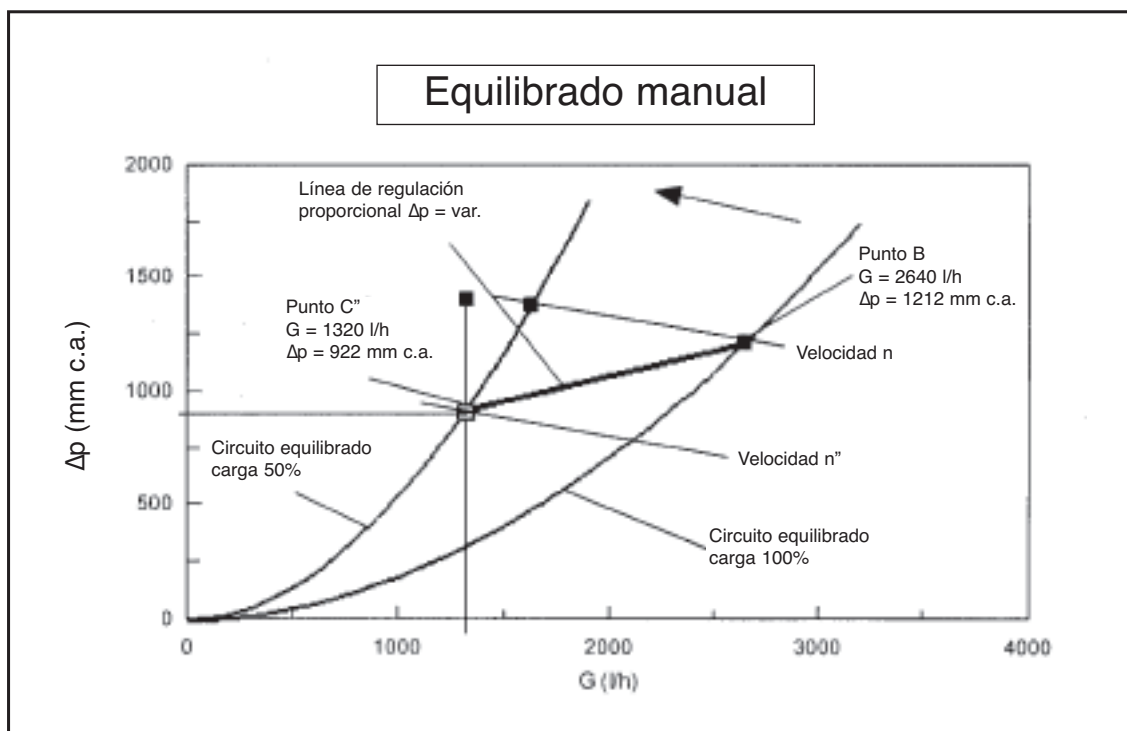
También en esta situación, el equilibrado manual no permite mantener los caudales de diseño en las diversas salidas.

Caso 2 - Regulación proporcional

La bomba modifica su velocidad de rotación para **reducir el caudal y la altura manométrica** disponible. Este método se denomina de **regulación proporcional** (Fig. 18).

Bomba de velocidad variable con regulación proporcional

Fig. 18



Supóngase que, en estas condiciones, se desea enviar a los circuitos de salida el caudal total nominal correspondiente a una carga parcial de 50%.

Es decir, $G = 1320 = 330 \cdot 4$ l/h.

El nuevo punto C'' se encuentra en la intersección de la curva de carga parcial con la línea de caudal constante $G = 1320$ l/h.

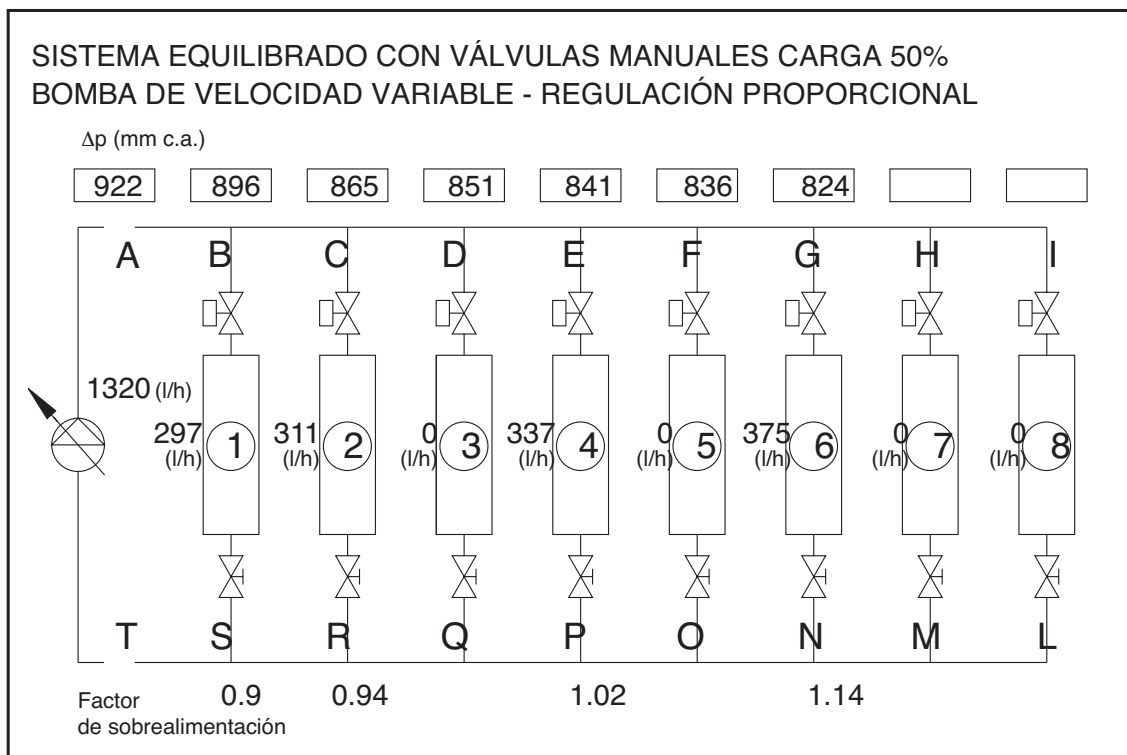
Como consecuencia se obtiene un nuevo valor de Δp : $\Delta p = 922$ mm c.a.

La nueva velocidad de la bomba es n''.

Caudal

También en este caso es posible obtener los nuevos caudales de salida (Esquema 11).

Esquema 11



En esta situación no se obtienen los caudales de diseño en los circuitos de salida. Es más, no se presentan solamente problemas de sobrealimentación, sino también de **subalimentación** en los primeros terminales. El motivo es que hemos equilibrado manualmente los circuitos en función de los valores nominales de caudal y Δp .

Por ejemplo, en el primer circuito de salida, con carga completa había un $\Delta p = 1095$ mm c.a., mientras que ahora tenemos solo un $\Delta p = 896$ mm c.a.

Como consecuencia, el caudal se reduce en un 10%.

Cuantos menos circuitos permanecen abiertos, más acentuadas son estas variaciones de caudal respecto a los valores nominales.

En este ejemplo se ha supuesto el uso de una bomba provista de un sensor interno que mide la diferencia de presión entre la entrada y la salida.

La posición del sensor de Δp modifica el tipo de regulación. En particular, se observa que, si el sensor de Δp se instala entre los extremos del circuito más desfavorecido (entre I y L), se obtiene una regulación con la máxima economía energética pero con problemas de subalimentación en los terminales más alejados de la bomba. [8]

Por lo tanto, aunque se utilice una bomba de velocidad variable en una instalación equilibrada manualmente, no es posible mantener el caudal de diseño cuando varían las condiciones de funcionamiento.

Equilibrado con AUTOFLOW® y bomba de velocidad variable

Si se utiliza el dispositivo AUTOFLOW® en lugar de las válvulas de equilibrado manuales, estos problemas no se presentan.

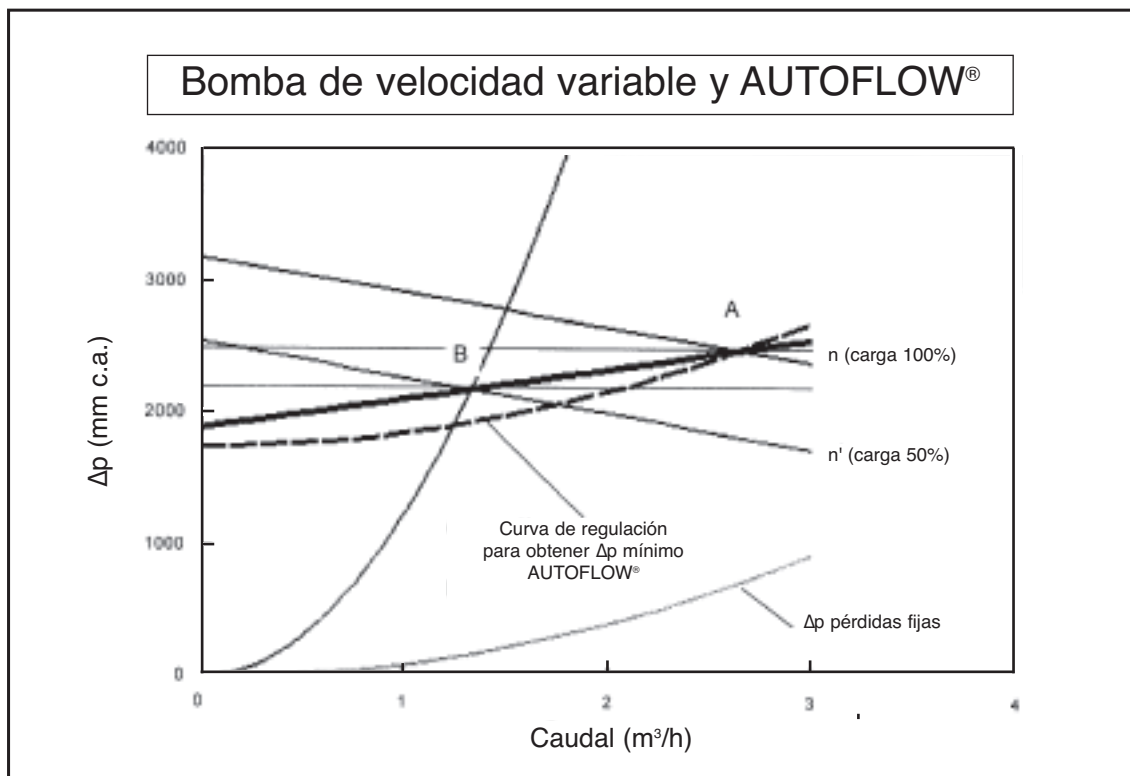
AUTOFLOW® se **adapta automáticamente** a las nuevas condiciones de carga, **comprimiendo el resorte si el Δp aumenta o soltándolo si el Δp disminuye** a fin de mantener siempre el mismo caudal en el circuito de salida. La única condición es escoger un AUTOFLOW® cuyo Δp mínimo de actuación sea compatible con la disminución de la altura manométrica de la bomba en condiciones de carga parcial.

Se debe hacer que, cuando la bomba reduce la velocidad, AUTOFLOW® esté siempre sometido a un Δp comprendido en su campo de trabajo.

En la práctica, es suficiente garantizar que el AUTOFLOW® del circuito más alejado de la bomba tenga el Δp mínimo de trabajo en cualquier condición de carga (Fig. 19).

Δp mínimo de trabajo

Fig. 19



En el gráfico, el punto que representa la nueva condición de carga (**B**) debe estar siempre **por encima de la curva de trazo discontinuo**. La curva se construye con referencia al circuito más alejado y de modo que en él se mantenga siempre el mismo Δp (Δp pérdidas fijas = 328 mm c.a. + Δp mínimo AUTOFLOW® = 1400 mm c.a.).

Si el Δp de un circuito se mantiene constante, el caudal también es constante.

Si en AUTOFLOW® se verifica el Δp mínimo de trabajo, el caudal tiene el valor nominal.

Luego, si el AUTOFLOW® del circuito más lejano está sometido al Δp mínimo de trabajo, el Δp de todos los demás está dentro del campo de trabajo.

También en este caso, en todos los AUTOFLOW® el caudal permanece constante en su valor nominal.

Ahorro de energía

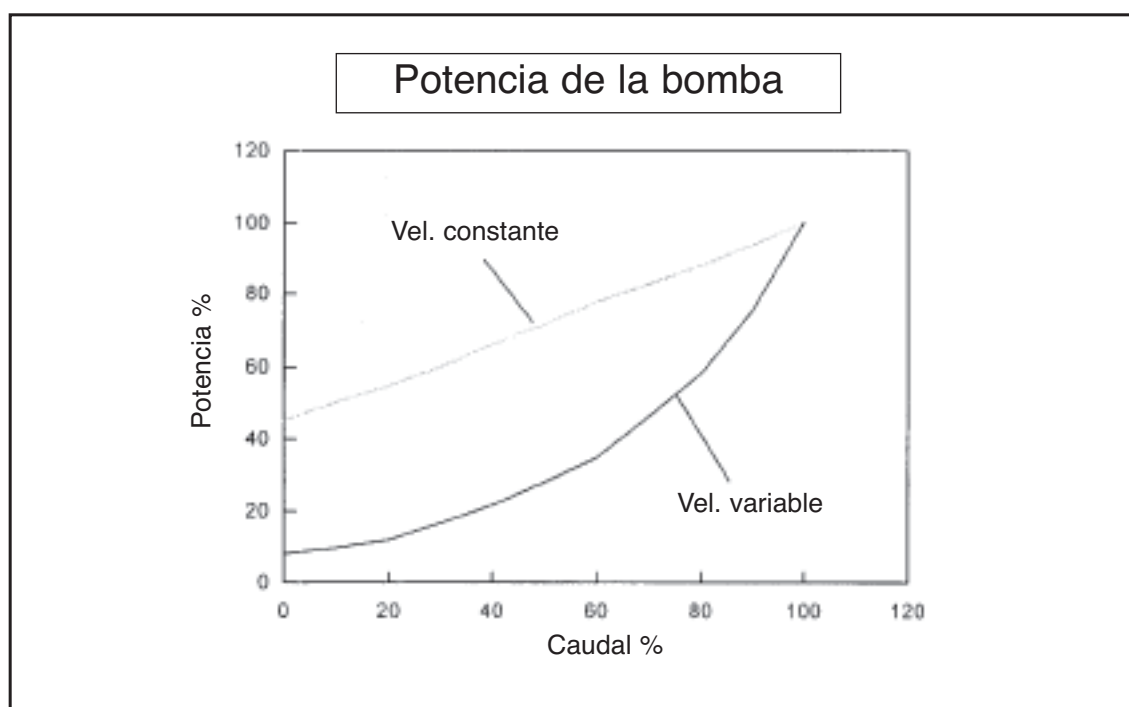
En cualquier caso, el uso de una bomba de velocidad variable permite disminuir la potencia absorbida cuando se reduce la carga en la instalación.

Esta disminución se puede representar gráficamente, registrando la potencia absorbida con distintos valores de caudal y con la bomba a velocidad constante o variable (Fig. 20).

Por ejemplo, supongamos un caudal que tiene el 50% del valor nominal. A velocidad constante, la bomba absorbe el 75% de la potencia que consume a plena carga, mientras que a velocidad variable absorbe solo el 30%.

Comparación entre bomba a velocidad constante y variable

Fig. 20



Conclusiones

En la tabla siguiente se indican de forma sinóptica las consideraciones sobre el equilibrado de estos circuitos.

Tipo circuito	Tipo bomba	Condición de carga	Factor de sobrealim. total	Factor de sobrealim. máxima salida	Porcentaje de potencia absorbida
No equilibrado	Veloc. constante	100%	1,42	1,81	168%
Equilibrado válv. manuales	Veloc. constante	100%	1,00	1,00	100%
Equilibrado válv. manuales	Veloc. constante	50%	1,23	1,40	81%
Equilibrado con AUTOFLOW®	Veloc. constante	100%	1,00	1,00	100%
Equilibrado con AUTOFLOW®	Veloc. constante	50%	1,00	1,00	75%
Equilibrado válv. manuales	Veloc. variable	50%	1,00	0,9-1,14	30%
Equilibrado con AUTOFLOW®	Veloc. variable	50%	1,00	1,00	30%

Aplicaciones de los circuitos con AUTOFLOW® en las instalaciones

Los esquemas siguientes son típicos de los sistemas de climatización donde se instalan los estabilizadores AUTOFLOW®.

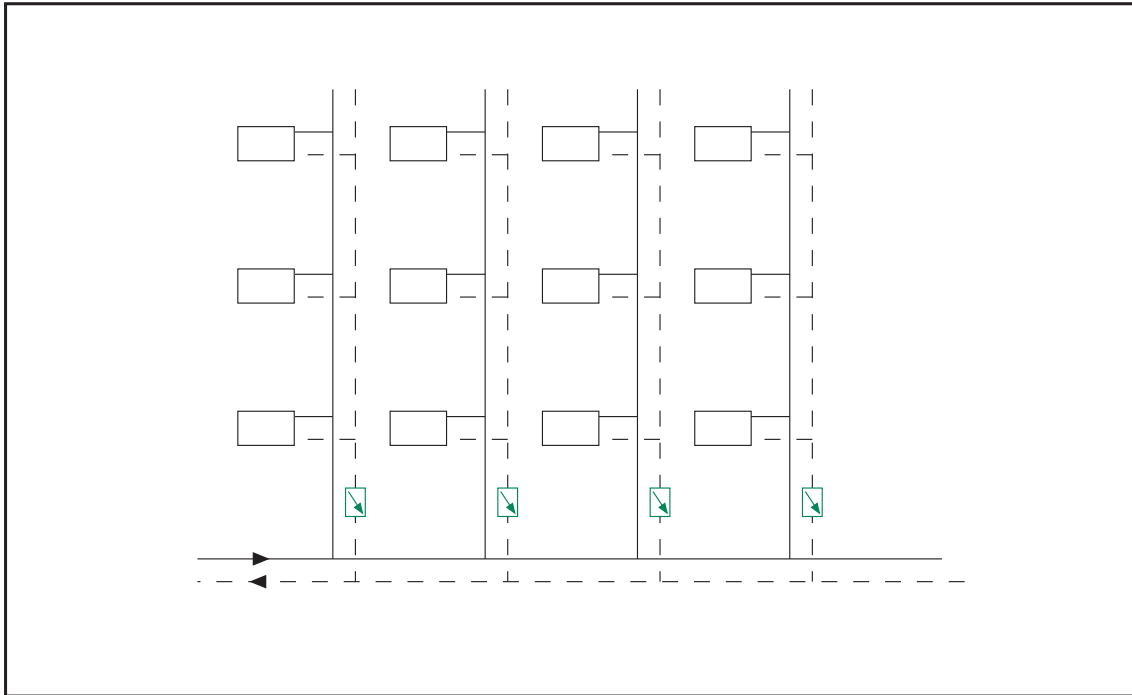
En todos ellos se demuestra la necesidad de mantener el caudal constante en determinados puntos del circuito para satisfacer las exigencias típicas de estas instalaciones.

Los mismos esquemas de principio, con las debidas variaciones, se pueden utilizar para aplicaciones distintas de los sistemas tradicionales de climatización, como plantas de proceso, de refrigeración industrial, de dosificación química o distribución hidráulica.

En los sistemas de climatización, los circuitos con AUTOFLOW® se utilizan sobre todo para asegurar los caudales necesarios a las columnas, a las salidas de zona o a los terminales. Se pueden combinar con válvulas de regulación de dos o tres vías, en circuitos de caudal constante o variable.

Equilibrado con AUTOFLOW® a pie de columna

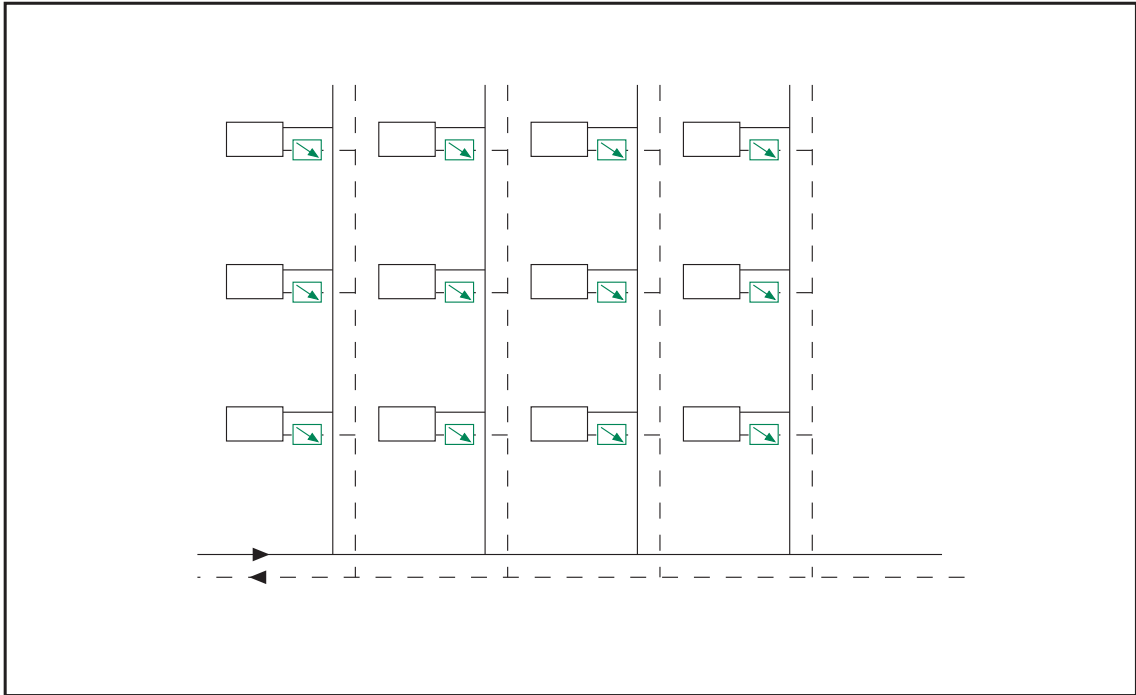
Fig. 21



Los dispositivos AUTOFLOW® se instalan en el tubo de retorno del circuito.

Su función es hacer que pase la cantidad necesaria de fluido a través de cada columna.

De todos modos, se puede verificar un reparto desigual de los caudales en las columnas por los motivos descritos en el análisis de los circuitos simples. Por tal razón, estos circuitos se utilizan normalmente en edificios de cinco o seis plantas como máximo.

Equilibrado con AUTOFLOW® en cada terminal**Fig. 22**

Los dispositivos AUTOFLOW® se instalan en el tubo de retorno del circuito.

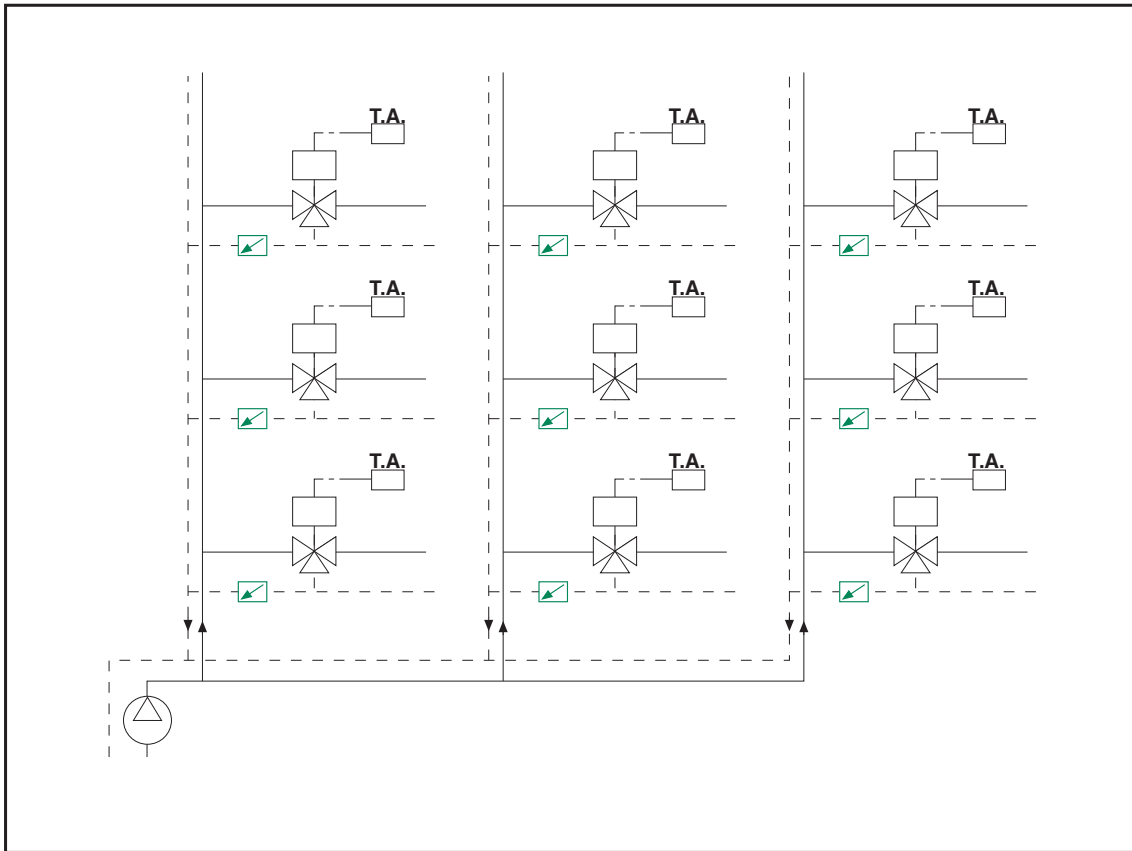
Hacen que pase la cantidad necesaria de fluido a través de cada terminal.

Dado el amplio campo de trabajo de AUTOFLOW®, en este caso no es necesario equilibrar las columnas entre sí.

Si se utilizaran válvulas manuales, habría que montar una en cada columna para lograr el equilibrio.

Sistemas con válvulas de tres vías: equilibrado con AUTOFLOW®

Fig. 23

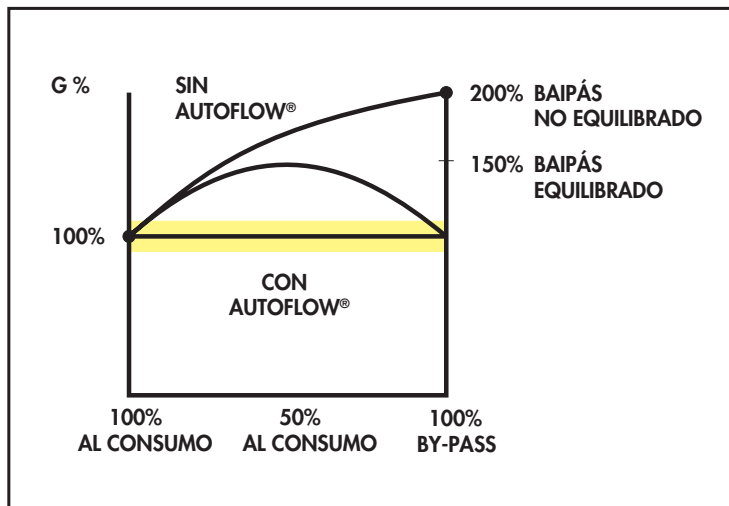


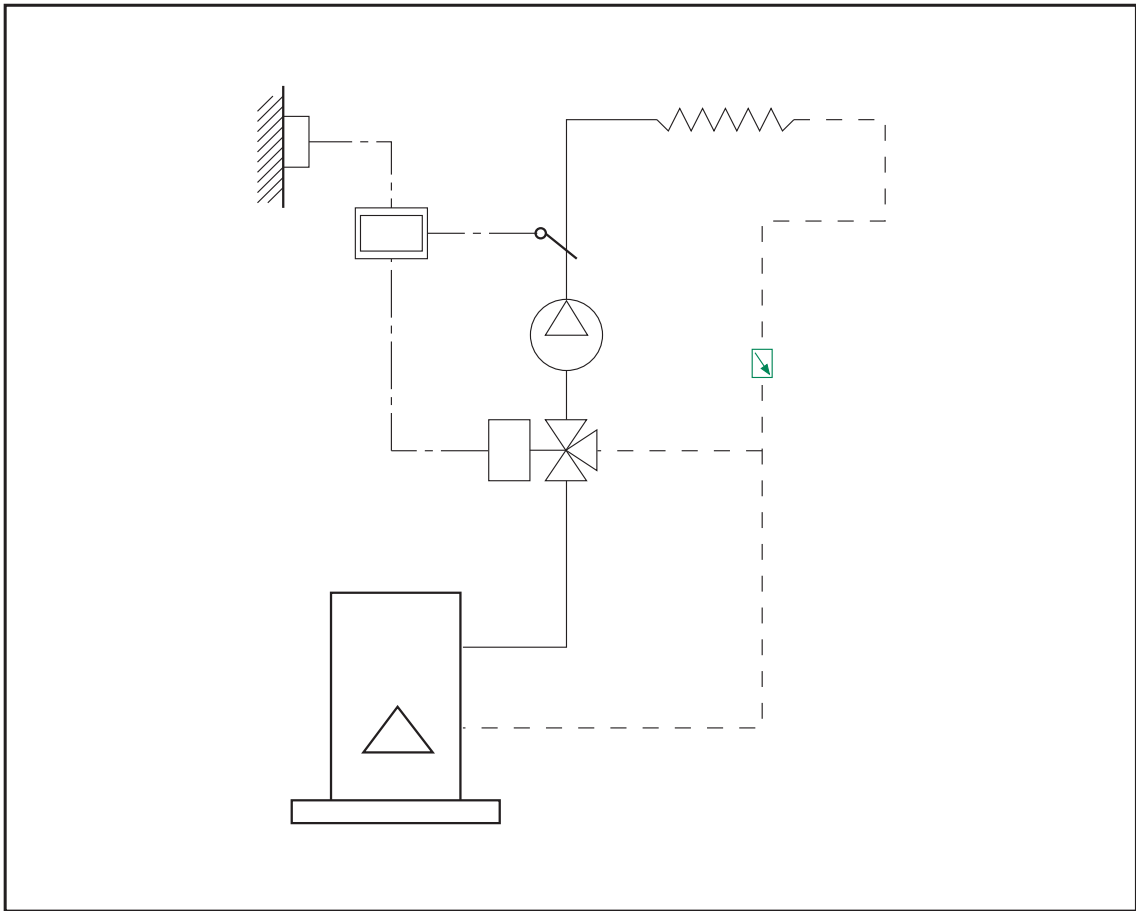
Los AUTOFLOW® instalados en el retorno de las salidas de zona mantienen constante el caudal de cada salida ya sea con las válvulas abiertas o cerradas.

En este caso no es necesario equilibrar las vías de baipás de las válvulas de tres vías, puesto que AUTOFLOW® absorbe automáticamente las eventuales variaciones de pérdidas de carga entre la vía abierta hacia el terminal o abierta hacia el baipás.

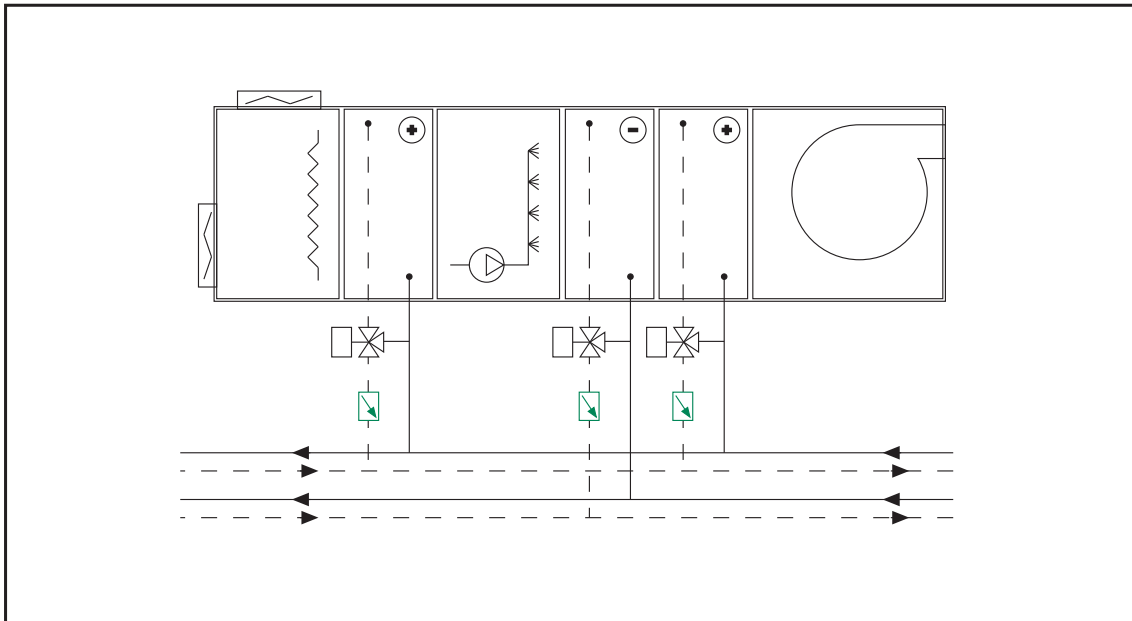
En el caso de válvulas de tres vías modulantes, AUTOFLOW® mantiene constante el caudal total incluso con el obturador de la válvula en las posiciones intermedias. [5]

Fig. 24



Regulación climática: Equilibrado con AUTOFLOW®**Fig. 25**

AUTOFLOW® mantiene constante el caudal del circuito de servicio, ya sea con la válvula abierta o cerrada.

Regulación de las baterías con válvulas de tres vías: equilibrado con AUTOFLOW®**Fig. 26**

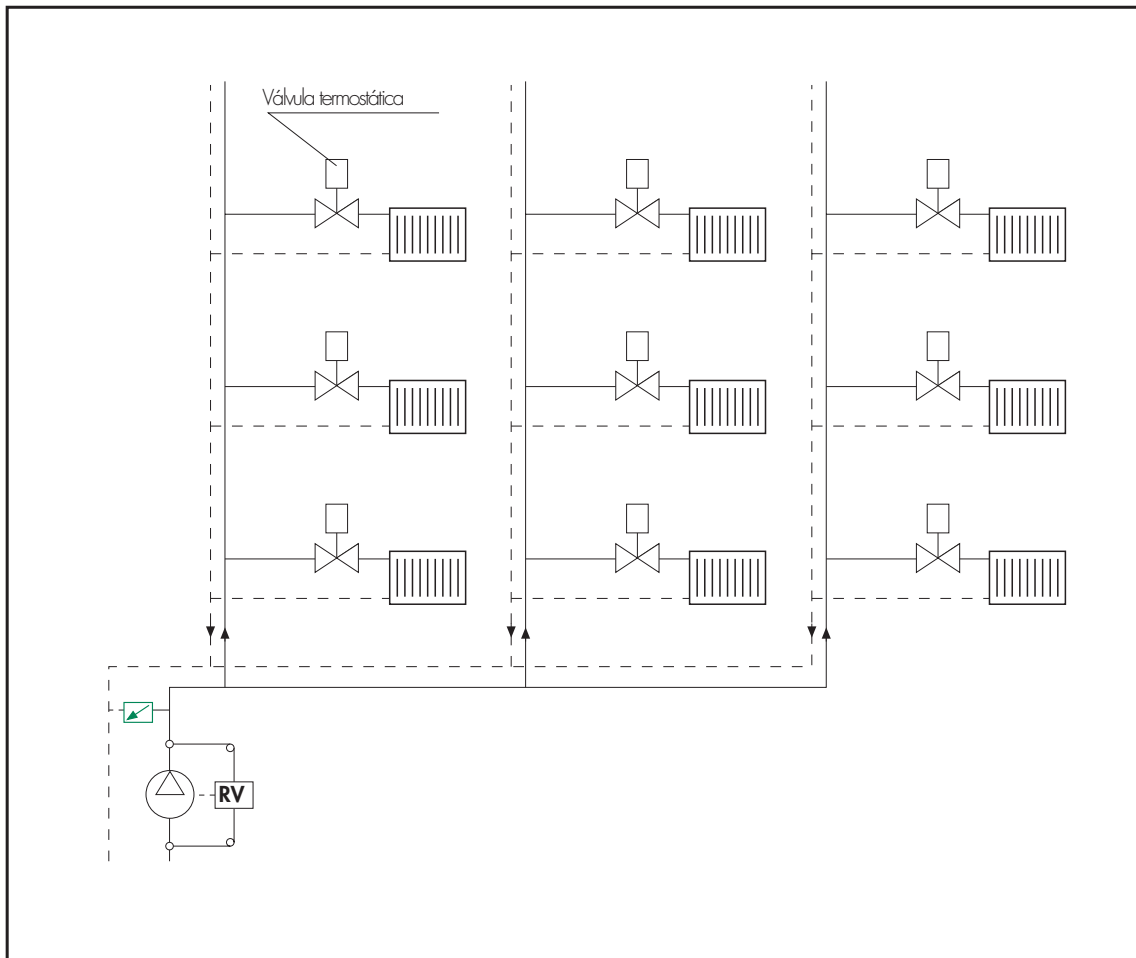
Los dispositivos AUTOFLOW® se instalan en el tubo de retorno del circuito.

Los AUTOFLOW® mantienen constantes los caudales de los circuitos de distribución, ya sea con las válvulas abiertas o cerradas.

En el caso de válvulas de tres vías modulantes, AUTOFLOW® mantiene constante el caudal total incluso con el obturador de la válvula en las posiciones intermedias.

Limitador de presión diferencial montado en la base del circuito y by-pass con AUTOFLOW®

Fig. 27



Esta configuración, como la que se describe en la página contigua, se utiliza principalmente en instalaciones pequeñas de radiadores con válvulas termostáticas.

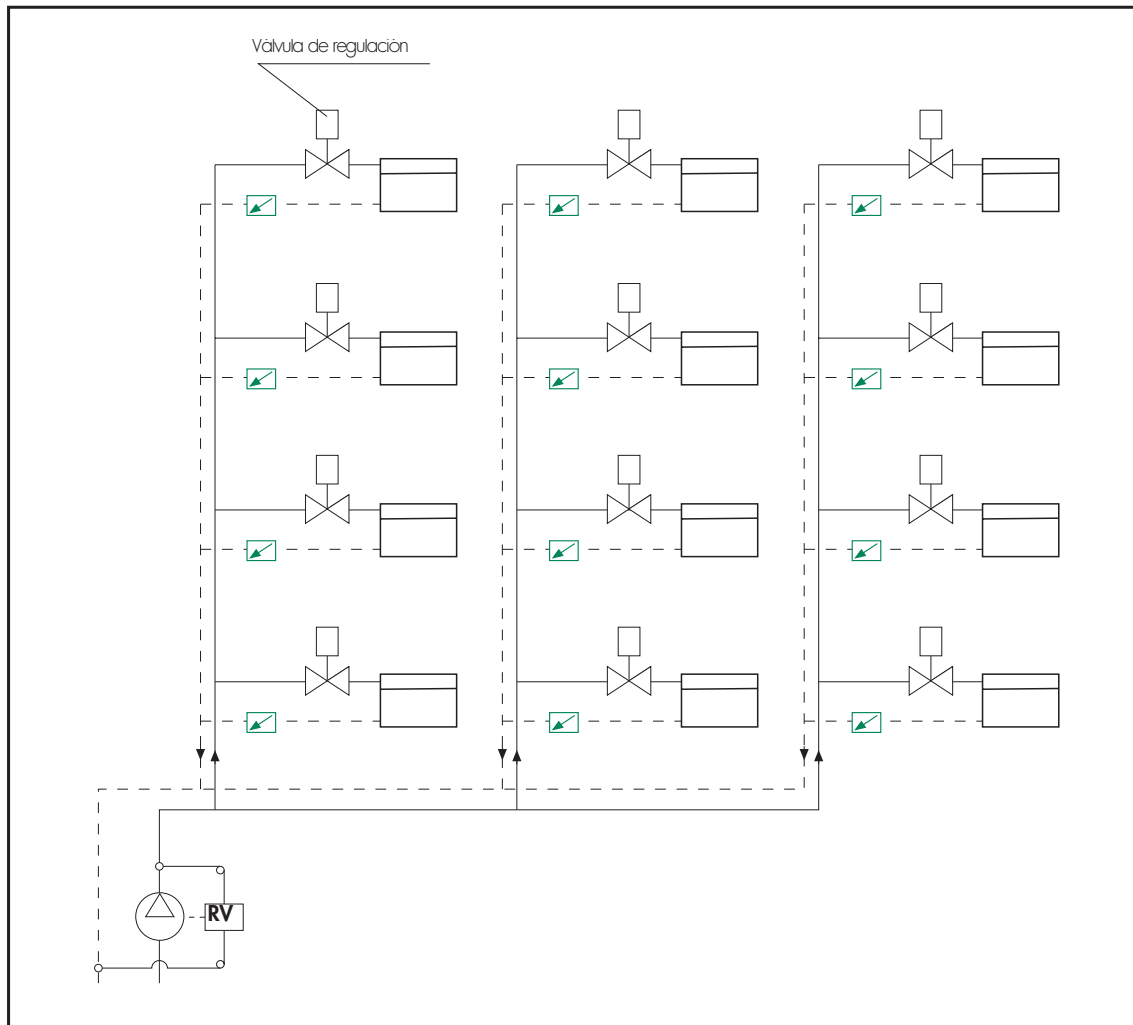
- Valor de consigna del limitador de presión:
se aconseja que este valor sea aproximadamente 10% superior a la presión diferencial necesaria (con las válvulas abiertas) entre los dos puntos del circuito donde están instaladas las tomas de control del limitador.

Nota:

El by-pass con AUTOFLOW® garantiza el caudal mínimo también con las válvulas cerradas. Dicho caudal es necesario para evitar que la inercia térmica del generador provoque sobrecalentamientos localizados del fluido y la consiguiente actuación de los termostatos de bloqueo o los dispositivos de seguridad, por ejemplo las válvulas de corte de combustible o de descarga térmica.

Regulación con válvulas de dos vías y bomba de velocidad variable: equilibrado con AUTOFLOW®

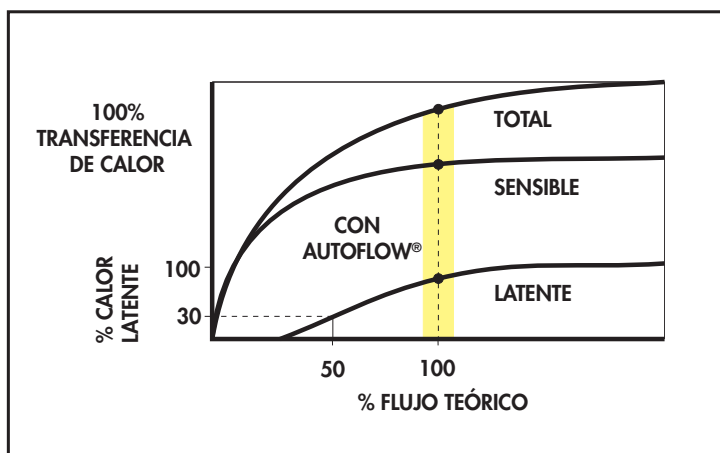
Fig. 28



Los dispositivos AUTOFLOW® se instalan en el tubo de retorno del circuito. Esta configuración se utiliza sobre todo en instalaciones con fan coils y válvulas de regulación modulantes. Los AUTOFLOW® estabilizan la cantidad de fluido que pasa a través de los terminales.

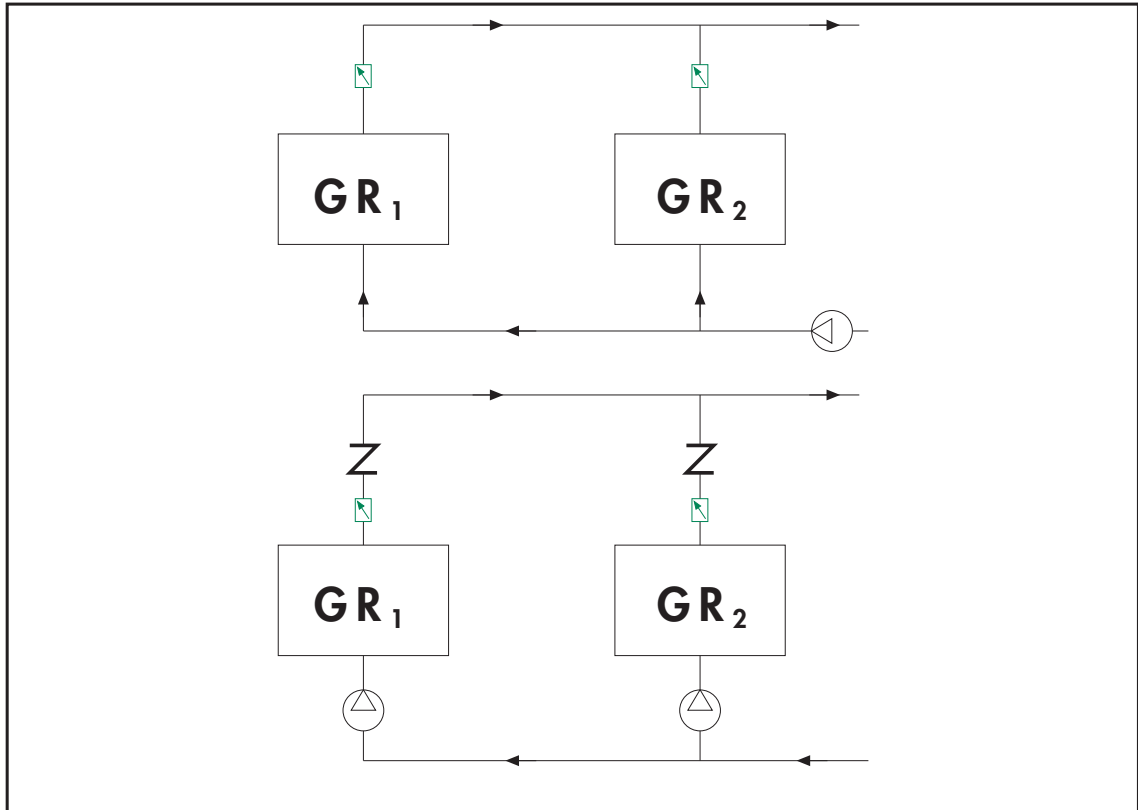
En un sistema con válvulas de dos vías y bomba de velocidad variable, sin reequilibrado automático a carga parcial (es decir, sin AUTOFLOW®), algunos terminales pueden recibir un flujo insuficiente. Esta situación reduce de modo considerable, por ejemplo, la capacidad de los terminales de deshumidificación. [6]

Fig. 29



Centrales de producción de agua refrigerada: equilibrado con AUTOFLOW®

Fig. 30

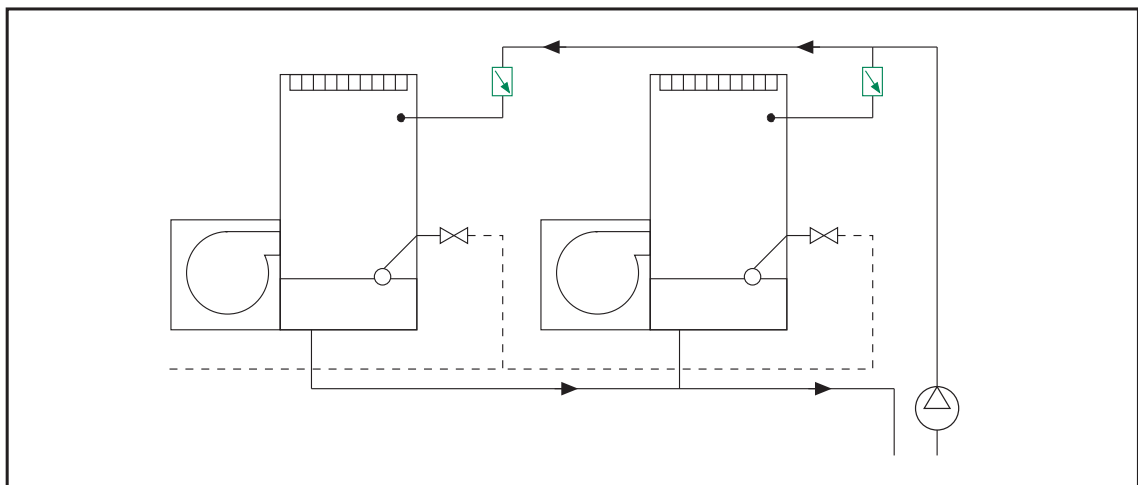


Los dispositivos AUTOFLOW® se instalan en el tubo de retorno del circuito.

Para equilibrar circuitos que abastecen evaporadores o condensadores de grupos refrigerantes; el caudal en los intercambiadores se mantiene constante aunque se cierren algunos grupos, con la consiguiente optimización de las prestaciones.

Torres de refrigeración: equilibrado con AUTOFLOW®

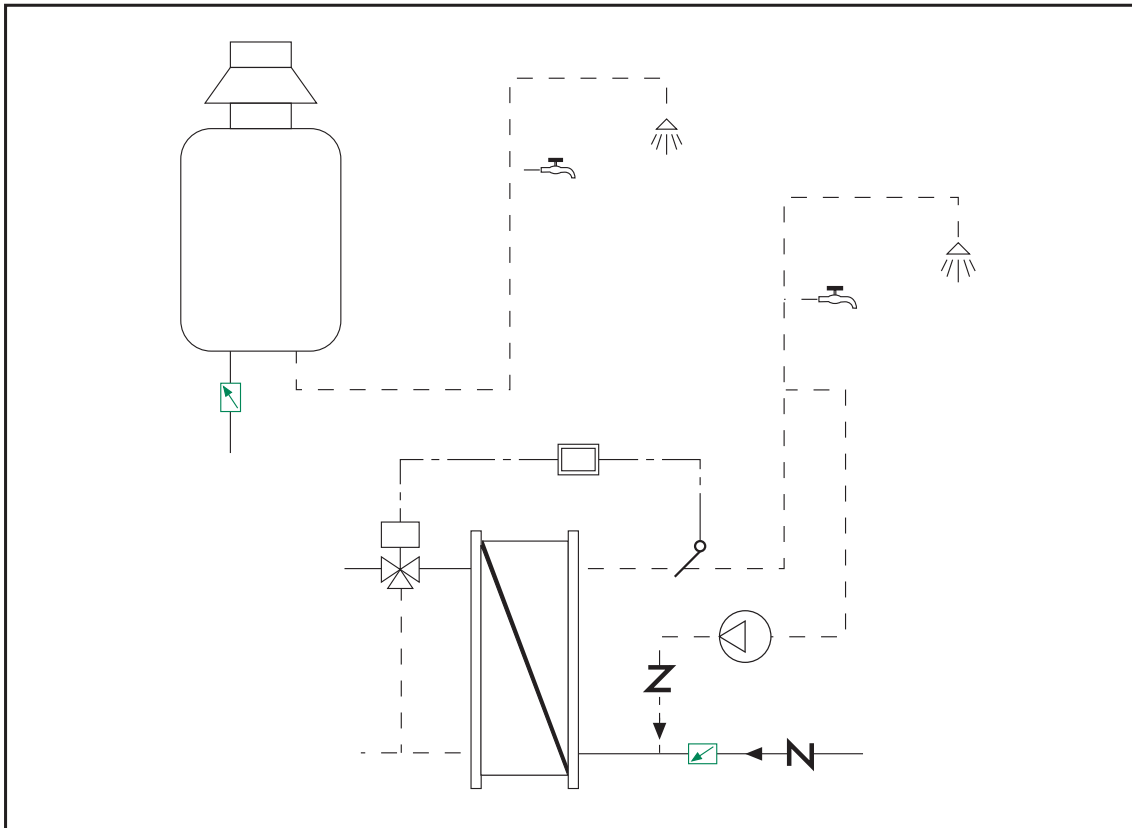
Fig. 31



Para equilibrar circuitos que abastecen torres de refrigeración.

Producción de agua sanitaria: limitación con AUTOFLOW®

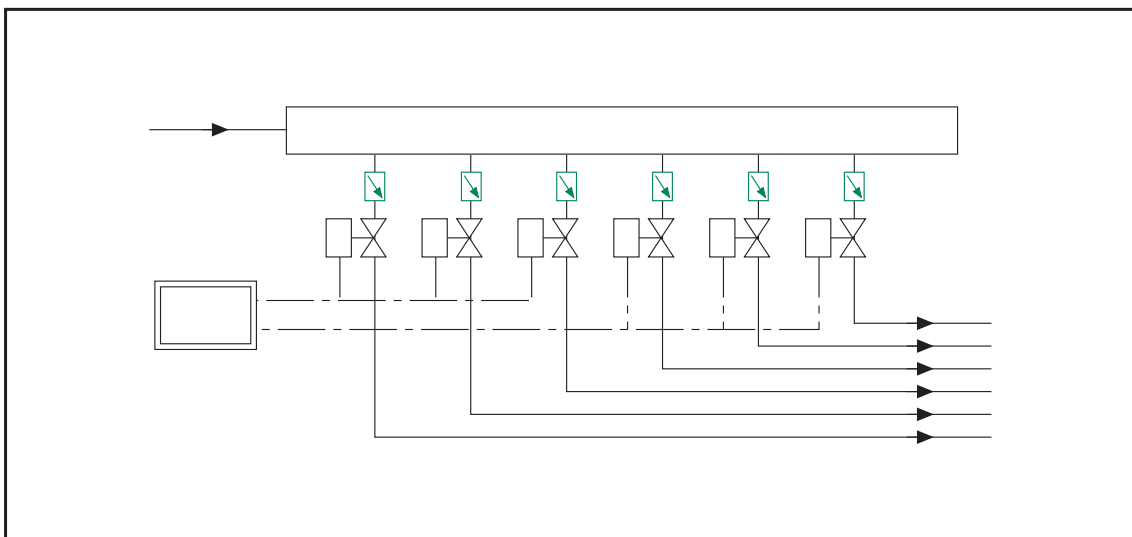
Fig. 32



Para limitar el caudal de agua caliente suministrable en los sistemas de producción instantánea o baja capacidad.

Sistemas de distribución de agua: limitación con AUTOFLOW®

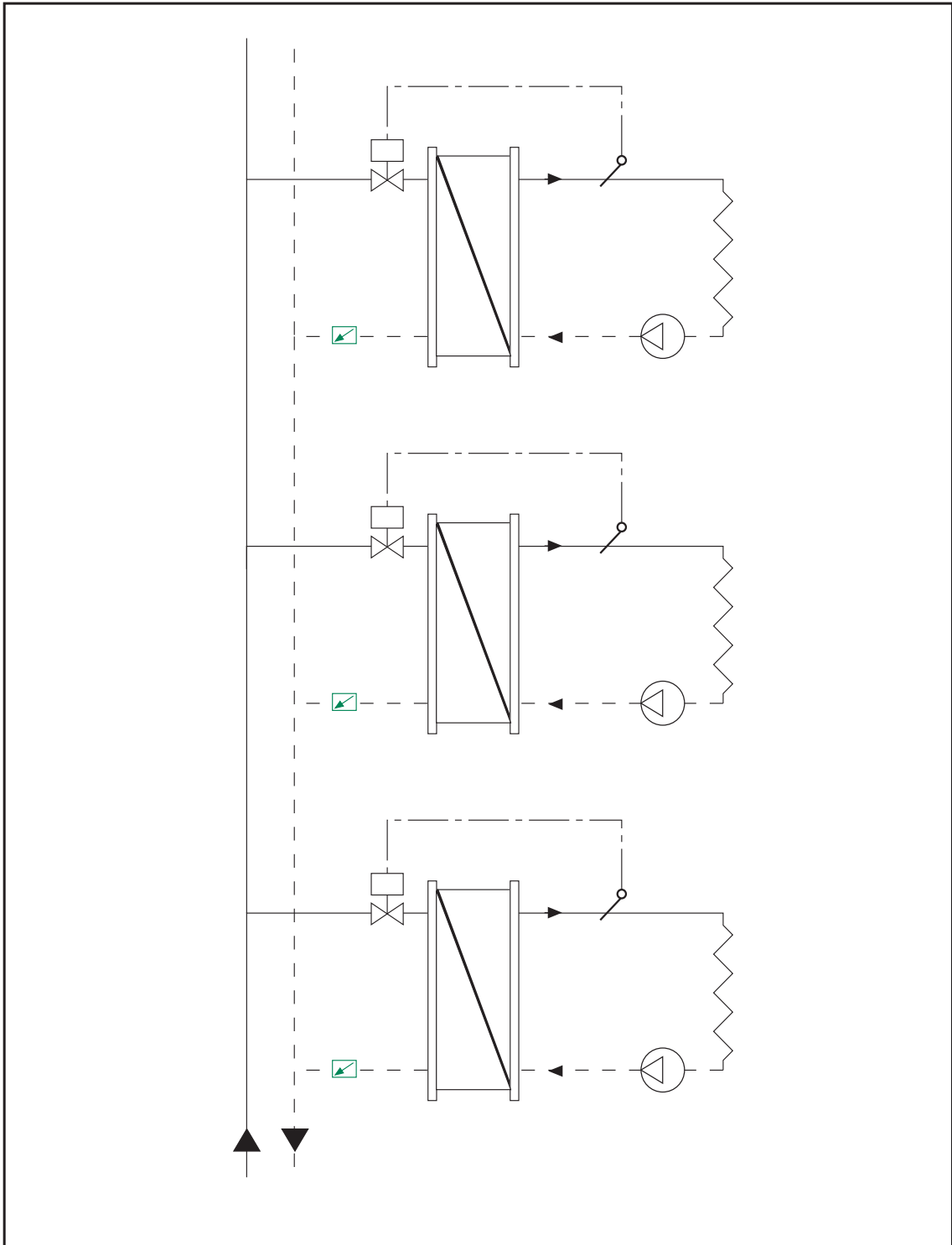
Fig. 33



Para controlar la cantidad de agua suministrada y equilibrar los distintos circuitos de un sistema de riego.

Sistemas de calefacción a distancia: equilibrado con AUTOFLOW®

Fig. 34



Los dispositivos AUTOFLOW® se instalan en el tubo de retorno del circuito. En los sistemas de telecalefacción, para equilibrar las diversas subcentrales y limitar su potencia térmica al valor nominal. De este modo se aseguran las condiciones ideales de funcionamiento de los intercambiadores de calor.

APÉNDICE DEL FASCÍCULO TÉCNICO

*EQUILIBRADO DINÁMICO DE LOS CIRCUITOS
HIDRÓNICOS*

ESTABILIZADOR AUTOMÁTICO DE CAUDAL

AUTOFLOW®

Índice

1ª PARTE

Características de los circuitos **pág. 44**

Curvas características	44
Comportamiento del flujo en un circuito	45
Cálculo de la característica de un circuito	46
Estabilidad de un circuito	48
Desequilibrio relativo	49
Interdependencia	49
Autoridad	49

Características de las bombas **pág. 50**

Curvas características	50
Curvas accesorias	51

Funcionamiento del conjunto bomba-circuito **pág. 53**

Punto de funcionamiento	53
Desplazamiento del punto de funcionamiento	54
Punto teórico y punto real	55

Bomba de velocidad variable **pág. 56**

Funcionamiento	56
----------------------	----

2ª PARTE

Circuito equilibrado con válvulas manuales en situación de carga parcial **pág. 57**

Cálculo del coeficiente Z de la instalación con carga parcial	58
Nuevo punto de funcionamiento	59
Cálculo de los caudales	59

Circuito equilibrado con AUTOFLOW® en situación de carga parcial **pág. 60**

Sobrepresiones con AUTOFLOW®	61
------------------------------------	----

Bibliografía **pág. 62**

1ª Parte

Características del circuito

Curvas características

El agua que fluye por un circuito, al pasar por los tubos y a través de los diversos componentes sufre **una pérdida de carga**.

La pérdida de carga es la diferencia entre la presión existente en el punto inicial del tubo de ida y la presión que hay en el punto final del tubo de retorno.

Está directamente relacionada con el caudal de agua, mediante una fórmula de este tipo:

$$\Delta p = Z * G^2$$

donde: Δp = pérdida de carga
 G = caudal

En esta ecuación, **Z es la característica del circuito**. La característica depende exclusivamente de la composición del circuito. [3]

Ejemplo

Para un tubo de longitud l: $Z = z * l$

donde z es un coeficiente que depende solo del diámetro del tubo

para una resistencia concentrada x: $Z = x * m$

donde m es un coeficiente que depende solo del diámetro del tubo

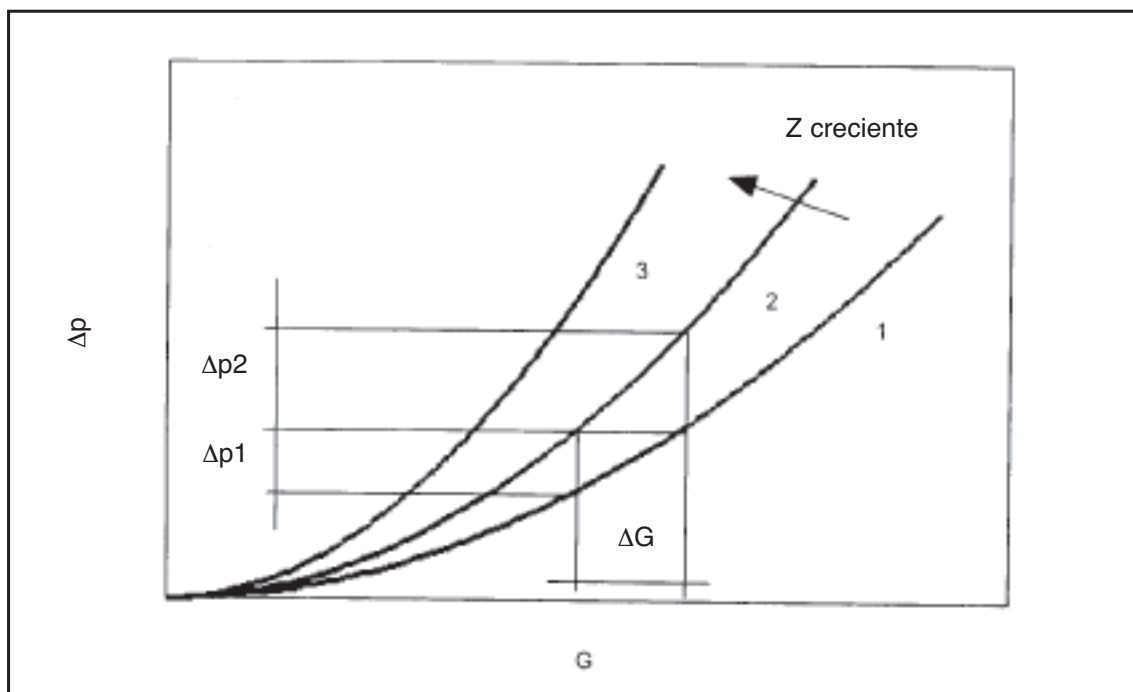
Conociendo un punto de funcionamiento Δp -G de un circuito, se puede construir la curva (parábola) que representa la variación del Δp en función de G para una determinada característica Z del circuito. Para un circuito cerrado, la parábola tiene el vértice en el origen de los ejes.

Esta curva tiene el siguiente **significado práctico**:

manteniendo invariadas las demás condiciones del sistema, se puede encontrar la pérdida de carga para cada valor del caudal.

El valor Z permanece constante y es el coeficiente característico de esa curva.

Fig. 1



En cambio, si se varía por ejemplo la apertura de las válvulas, se genera una nueva condición del sistema con otro valor de Z .

Un cierre, o sea un estrechamiento de la sección útil de paso de fluido, provoca un aumento de la resistencia del circuito y, por lo tanto, también de Z .

Como se puede ver en el gráfico de la Fig. 1, cuando más bajo es el valor de Z , menos influyen las variaciones del caudal en la pérdida de carga del circuito.

En efecto, a igualdad de variación de caudal ΔG , se verifica $\Delta p_1 < \Delta p_2$.

El problema que puede plantear esta situación es encontrar el modo de calcular las nuevas características del circuito para cada posición de los dispositivos de cierre o regulación.

Comportamiento del flujo en un circuito

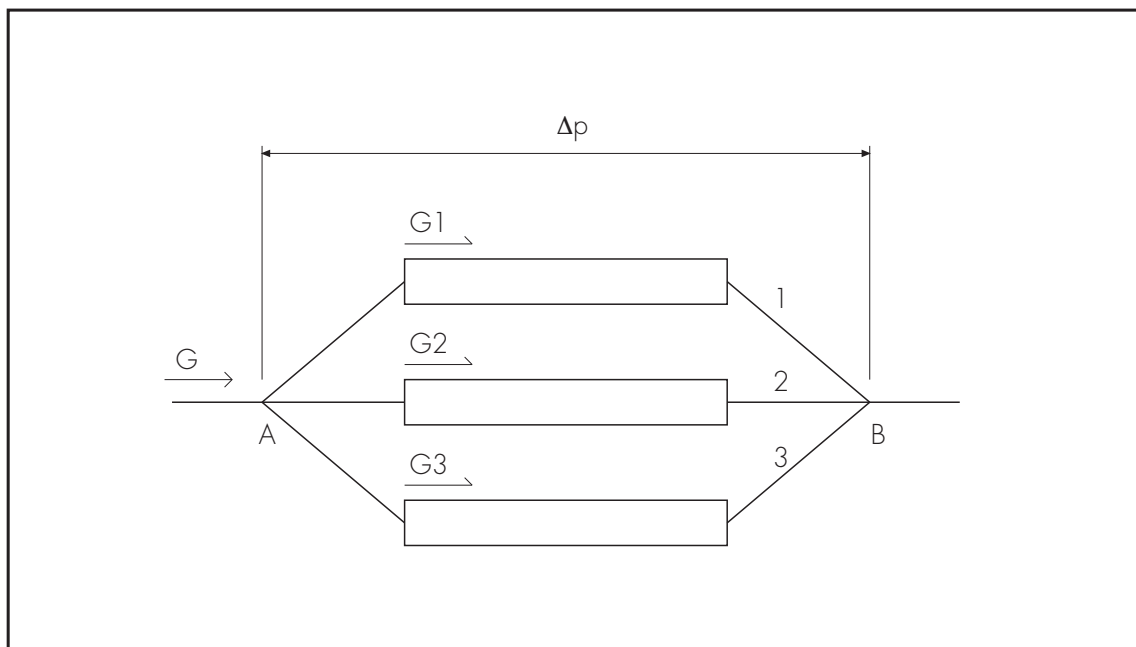
Puede ser útil recordar las leyes fundamentales que regulan el comportamiento de un fluido en un circuito (Fig. 2): [4]

- 1) La suma de los caudales que entran en un nudo es igual a la suma de los que salen.
- 2) La caída de presión entre dos nudos tiene el mismo valor cualquiera que sea el recorrido.

También cabe tener en cuenta lo siguiente:

- 1) El flujo entre dos nudos comunicantes (A y B) se puede dividir de distintos modos, pero en todos los casos la pérdida de carga es la misma.
- 2) La variación de la característica de uno o más ramales causa siempre una variación de la característica total y de la distribución de los caudales.

Fig. 2



$$\Delta p = \Delta p_1 = \Delta p_2 = \Delta p_3$$

$$G = G_1 + G_2 + G_3$$

Cálculo de la característica de un circuito

La característica de un circuito se puede calcular de distintos modos.

El que proponemos a continuación no es un método riguroso pero es fácil de comprender y de implementar.

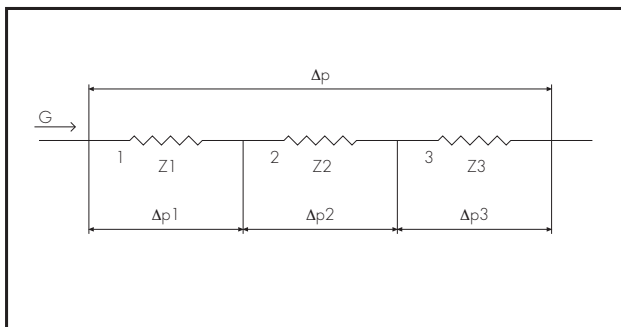
En particular, permite controlar bastante rápidamente los desequilibrios hidráulicos que se crean al cerrar o abrir los dispositivos de regulación.

Para calcular la característica Z de un circuito, este se divide en varios troncos elementales.

Cada tronco puede considerarse, por analogía con la electrotecnia, como una composición de elementos en serie o en paralelo.

Elementos en serie

Fig. 3



Esto significa que, para calcular el valor de Z de un tronco formado por varios elementos en serie, solo hay que sumar los Z de los diversos elementos (Tabla 1).

Tabla 1

Serie
$\Delta p = Z \cdot G^2$
$G = G_1 = G_2 = G_3$
$\Delta p = \Delta p_1 + \Delta p_2 + \Delta p_3 =$
$Z_1 \cdot G^2 + Z_2 \cdot G^2 + Z_3 \cdot G^2 =$
$(Z_1 + Z_2 + Z_3) \cdot G^2 =$
$Z \cdot G^2$
$Z = Z_1 + Z_2 + Z_3$

Elementos en paralelo

Fig. 4

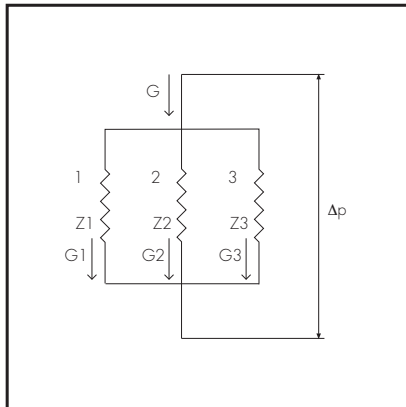


Tabla 2

Paralelo
$\Delta p = \Delta p_1 = \Delta p_2 = \Delta p_3$
$G = G_1 + G_2 + G_3$
$\Delta p = Z_1 \cdot G_1^2 \quad G_1 = (\Delta p / Z_1)^{0,5}$
$\Delta p = Z_2 \cdot G_2^2 \quad G_2 = (\Delta p / Z_2)^{0,5}$
$\Delta p = Z_3 \cdot G_3^2 \quad G_3 = (\Delta p / Z_3)^{0,5}$
$\Delta p = Z \cdot G^2$
$G = (\Delta p / Z_1)^{0,5} + (\Delta p / Z_2)^{0,5} + (\Delta p / Z_3)^{0,5} =$ $\Delta p^{0,5} \cdot (1 / Z_1^{0,5} + 1 / Z_2^{0,5} + 1 / Z_3^{0,5})$
$G = (\Delta p / Z)^{0,5} = \Delta p^{0,5} \cdot 1 / Z^{0,5}$
$1 / Z^{0,5} = 1 / Z_1^{0,5} + 1 / Z_2^{0,5} + 1 / Z_3^{0,5}$

En este caso, para el cálculo de Z hay que considerar el recíproco de los varios términos (Tabla 2). Conociendo el Δp y el caudal del tronco, y las características del tronco y de un elemento, se puede calcular **el caudal que fluye por dicho elemento**.

Tabla 3

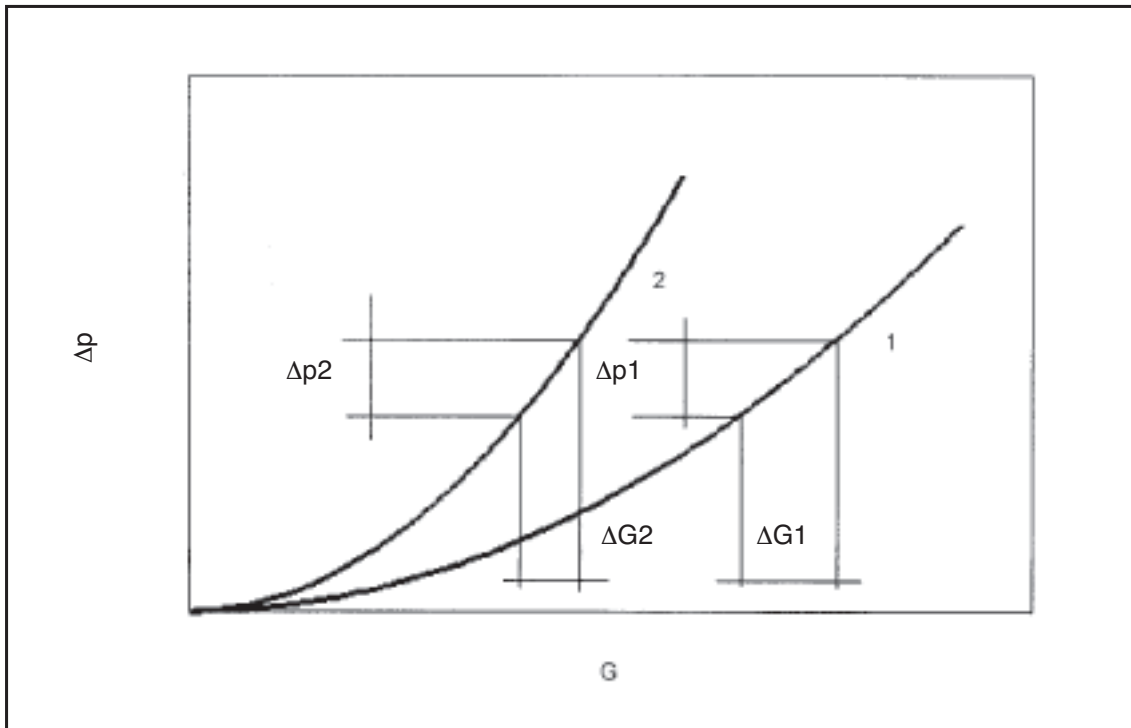
Caudal
$G_i / G = (\Delta p / Z_i)^{0,5} / (\Delta p / Z)^{0,5} = (Z / Z_i)^{0,5}$
$G_i = G \cdot (Z / Z_i)^{0,5}$

A partir de esto es posible conocer también el nuevo caudal que pasa por un elemento si varía el caudal total en el tronco sin haber modificado los valores de Z del tronco y del elemento (Tabla 3).

Estabilidad de un circuito

Un circuito es más estable que otro si la misma variación de pérdida de carga Δp le provoca una variación de caudal ΔG inferior (Fig. 5).

Fig. 5



En el gráfico se aprecia que:

$$\Delta p_1 = \Delta p_2 \quad Z_2 > Z_1$$

$$\Delta G_1 > \Delta G_2$$

El sistema 2 es más estable

Desequilibrio relativo

En el caso de circuitos en paralelo, el desequilibrio relativo entre ellos cuando varía la presión diferencial disponible es menos apreciable cuando dichos circuitos tienen características similares (Z aproximadamente iguales).

Si los circuitos en paralelo tienen el mismo valor de Z , la variación de caudal de cada elemento tiene el mismo valor relativo.

Interdependencia

En los circuitos en paralelo, el riesgo de que se desequilibre un elemento es mayor si el tronco común tiene una pérdida de carga relativamente alta (Z elevado).

En estas condiciones, los circuitos son muy interdependientes.

Por el contrario, si el tronco común tiene una pérdida de carga despreciable respecto a la que tienen los diversos circuitos en paralelo, no hay ningún riesgo de desequilibrio relativo. En este caso, el funcionamiento de cada circuito es casi independiente del de los otros.

Autoridad

La autoridad hidráulica de un elemento es la relación entre la pérdida de carga de ese elemento y la pérdida de carga total del circuito (como veremos más adelante, esta última es igual a la altura manométrica de la bomba).

Cuanto más alta es la autoridad de un elemento, más independiente es su funcionamiento.

El equilibrado y la regulación de ese elemento se realizan más fácilmente porque no se ven perturbados por el equilibrado y la regulación de los otros elementos.

Por ejemplo, consideremos un terminal con válvula de regulación que tenga una autoridad hidráulica general baja.

Si el terminal forma parte de un circuito en el cual se cierran todas las válvulas de regulación menos la que estamos considerando, el funcionamiento de esta resultará muy perturbado a causa del aumento de la presión diferencial disponible que se verificará en el circuito.

En cambio, si el elemento tiene autoridad alta, el funcionamiento de la válvula es más estable porque el aumento de presión diferencial es limitado.

Características de las bombas

La bomba de una instalación de calefacción, refrescamiento o aire acondicionado tiene la función de hacer circular el agua desde el generador (caldera o grupo frigorífico) hasta el terminal de uso.

La bomba debe suministrar un caudal de agua cuya presión sea suficiente para vencer las resistencias a lo largo del circuito de distribución.

Aquí analizaremos el comportamiento de las bombas centrífugas, que son las más utilizadas en estas aplicaciones.

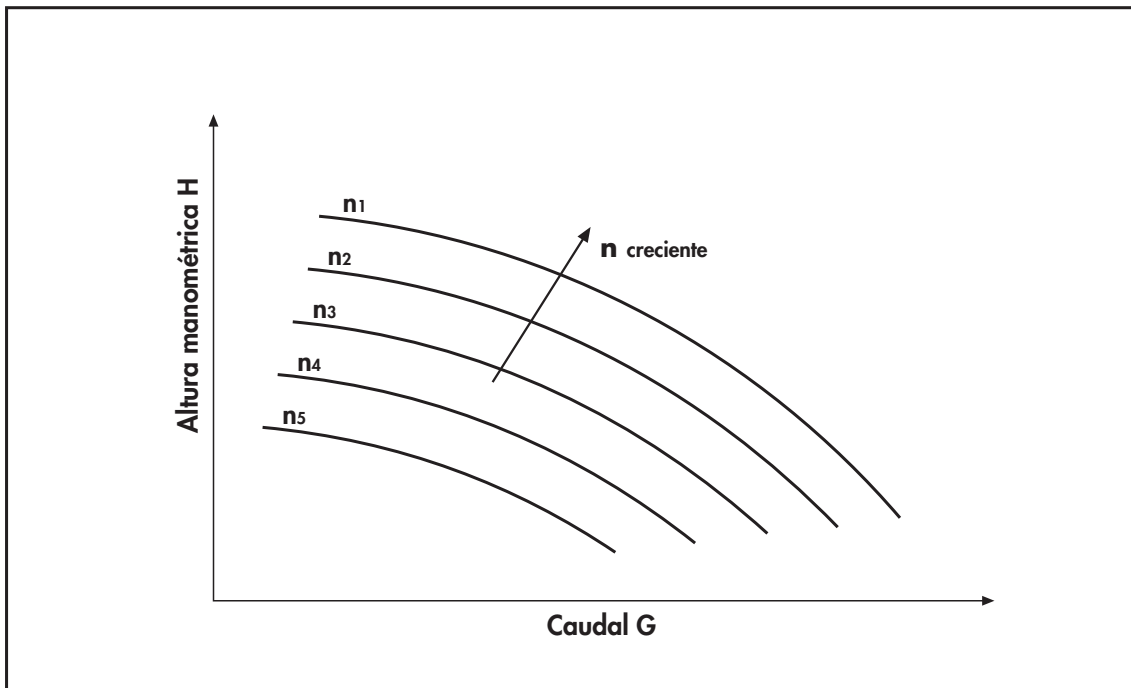
Los fabricantes suministran gráficos con las características de las bombas, determinadas de forma experimental.

Curvas características

La curva característica de la bomba describe la **relación entre la altura manométrica y el caudal**, dato que permite escoger la bomba más adecuada para cada instalación. La altura manométrica de una bomba es una magnitud, expresable también como presión, que permite valorar la energía suministrada al fluido. [4]

Para cada velocidad de rotación n hay una curva característica.

Fig. 6



Nótese que, si la velocidad se reduce, también disminuyen la altura manométrica máxima y el caudal máximo (de n1 a n5).

Cualquiera de las curvas puede obtenerse de otra por simple traslación.

Curvas accesorias

El fabricante también determina experimentalmente, en función del caudal, las curvas relativas a otras magnitudes, para dar al proyectista una visión más completa del comportamiento de la bomba en las diferentes condiciones de funcionamiento (Fig. 7).

Curva de potencia absorbida-caudal

La potencia absorbida depende de las características de trabajo, del caudal y de la altura manométrica de la bomba. Es la potencia que se consume para accionar el eje de la bomba.

$$P = \frac{\rho \cdot G \cdot H}{367,2 \cdot \eta}$$

Donde: P = potencia absorbida por la bomba, kW

ρ = masa volúmica del fluido, kg/dm³

G = caudal, m³/h

H = altura manométrica, m c.a.

η = rendimiento, adimensional

Curva de rendimiento-caudal

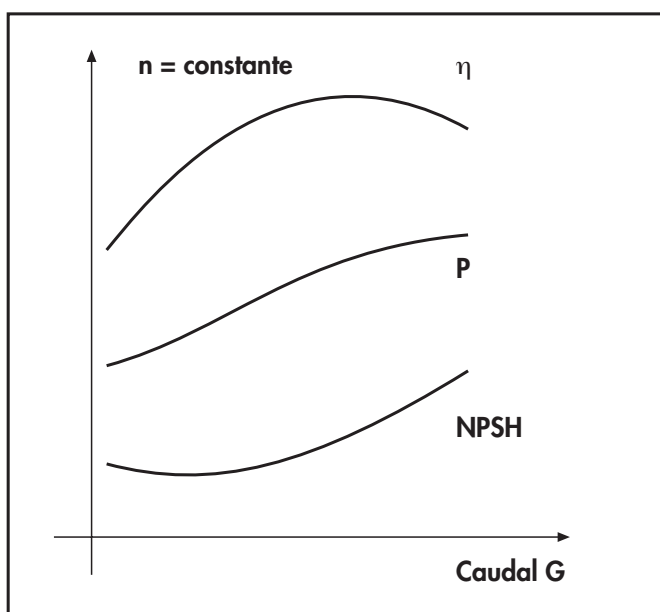
El rendimiento de una bomba es la relación entre la potencia suministrada al fluido (para generar el caudal y la altura manométrica) y la potencia absorbida por el eje.

$$\eta = \frac{P_{\text{SUMINISTRADA}}}{P_{\text{ABSORBIDA}}}$$

Curva NPSH-caudal

El NPSH (Net Positive Suction Head, o altura neta positiva en la aspiración) es la presión mínima que debe haber en la entrada de la bomba para evitar fenómenos de cavitación.

Fig. 7



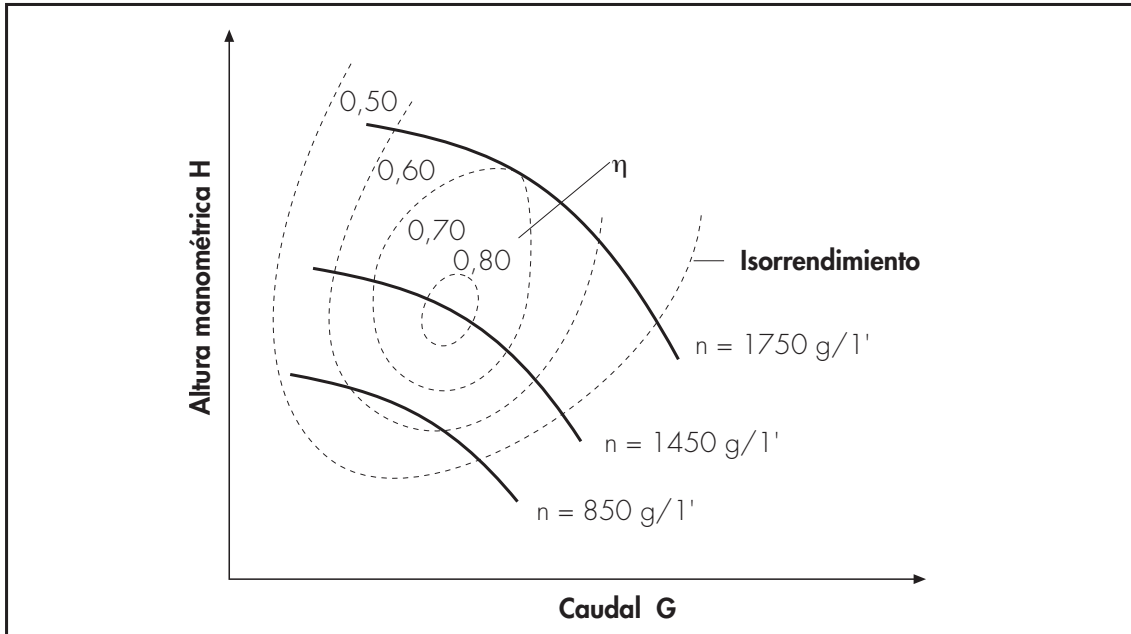
Se puede apreciar que, si la velocidad de rotación n se mantiene constante, la curva de la **potencia absorbida P aumenta con el caudal G**.

El rendimiento η , en cambio, tiene un máximo en presencia de un determinado caudal G y disminuye cuando el caudal G se hace superior o inferior a dicho valor.

Curvas de isorrendimiento

Puede ser útil representar en un mismo gráfico las curvas características que ilustran la variación del rendimiento de la bomba en función de la velocidad de rotación, del caudal y de la altura manométrica. Estas curvas, denominadas de isorrendimiento, delimitan zonas en las cuales el rendimiento tiene el mismo valor (Fig. 8).

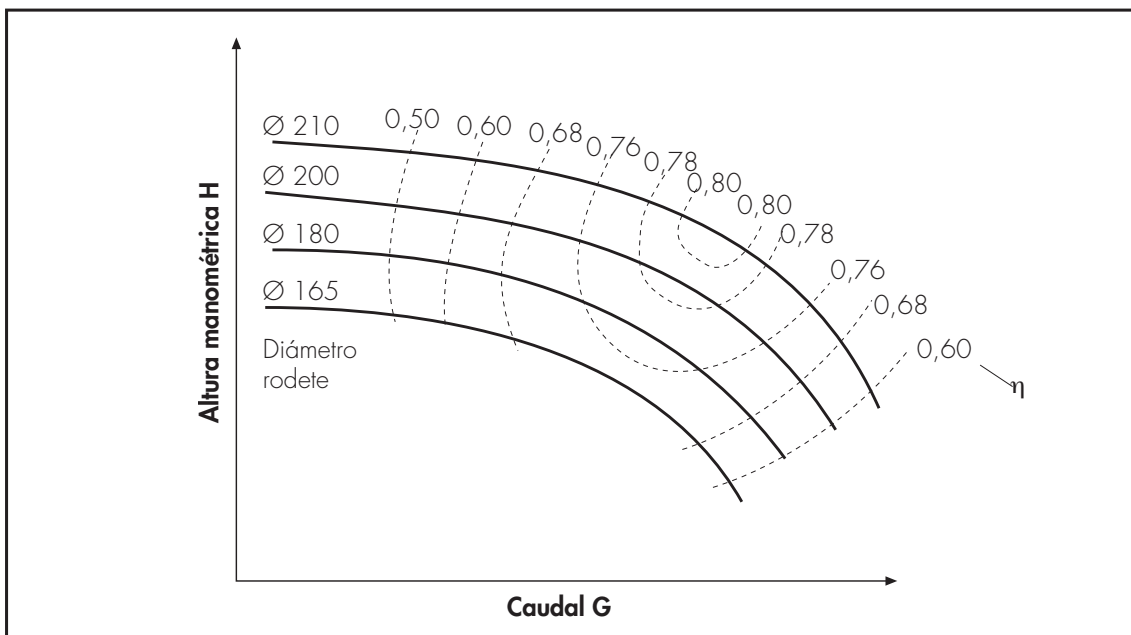
Fig. 8



Se puede observar que el campo de rendimiento máximo es muy estrecho, y que el rendimiento se reduce en cuanto se aleja de dicho valor máximo, ya sea que el caudal aumente o disminuya.

En muchos casos, los fabricantes también proporcionan las curvas características de la bomba para distintos diámetros del rodete a igual velocidad de rotación (Fig. 9).

Fig. 9



Funcionamiento del conjunto bomba-circuito

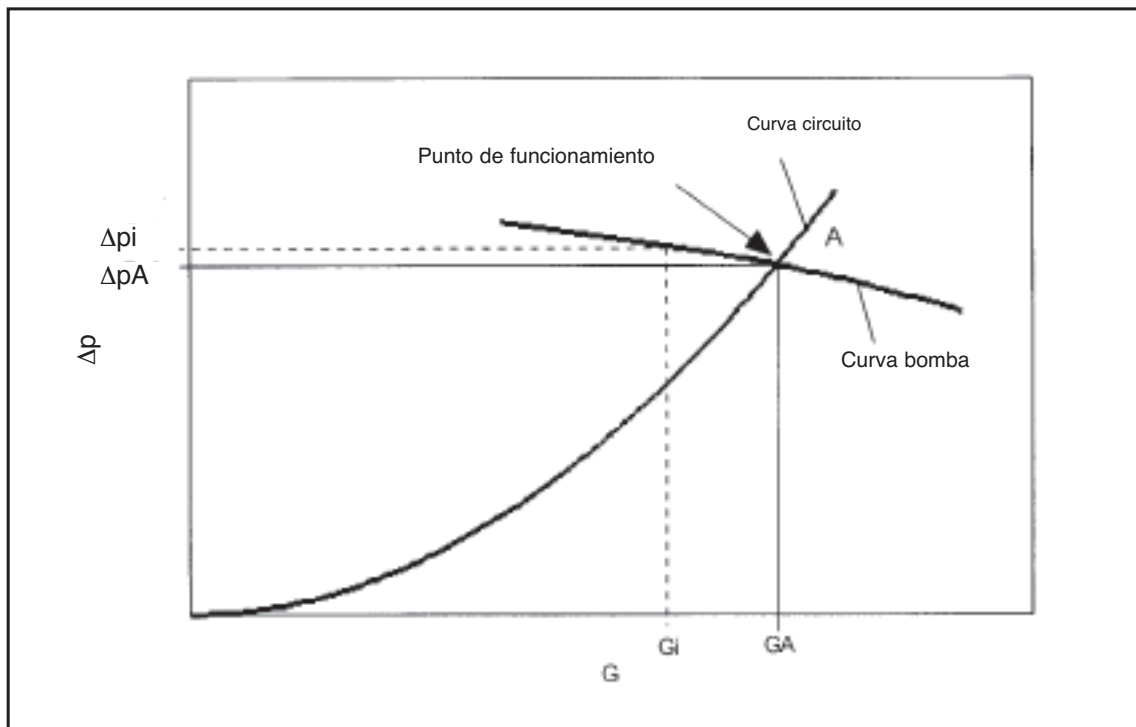
Punto de funcionamiento

Como se ha mencionado, las bombas tienen una curva característica de funcionamiento que expresa la relación entre el caudal y la altura manométrica.

El fabricante determina estas curvas de forma experimental, midiendo la altura manométrica para diferentes caudales.

Las variaciones de caudal se obtienen modificando la resistencia ejercida sobre el impelente de la bomba. Cuando se instala una bomba en un circuito, este se puede considerar como la resistencia antes mencionada.

Fig. 10



Cuando se conecta la bomba al circuito, el punto de funcionamiento A de ambos es el que indica la posición de equilibrio (Fig. 10). En él se verifican:

$$\Delta p_{\text{bomba}} = \Delta p_{\text{circuito}}$$

$$G_{\text{bomba}} = G_{\text{circuito}}$$

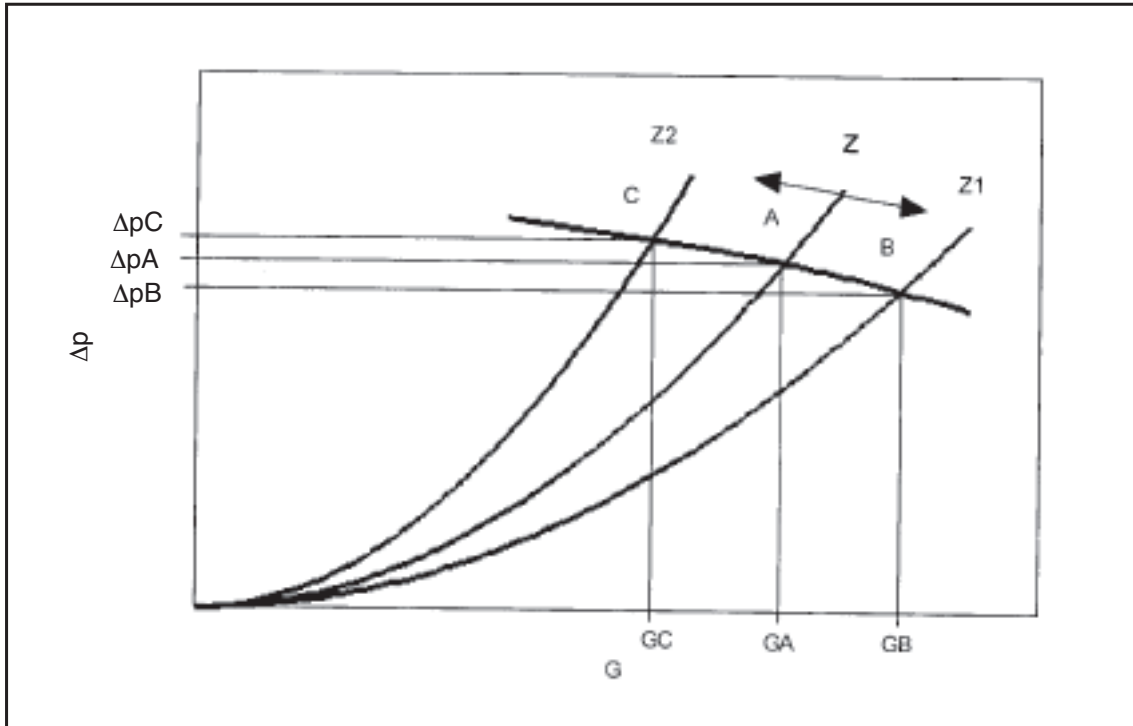
Si se conocen las curvas características de la bomba y del circuito, determinar el punto de equilibrio es muy fácil porque se encuentra en la intersección de ambas.

Desplazamiento del punto de funcionamiento

Si se modifica la posición de cualquiera de los dispositivos de cierre o regulación, la curva característica del circuito se desplaza en función del nuevo valor de Z .

Esta operación lleva a determinar un nuevo punto de funcionamiento (Fig. 11).

Fig. 11



El punto de funcionamiento se desplaza de A a B o C determinando los caudales y las alturas manométricas correspondientes:

de A a B apertura de las válvulas ($Z_1 < Z$)

de GA a GB $GB > GA$ $\Delta p_B < \Delta p_A$

se necesita menos presión diferencial disponible para garantizar el caudal GB;

de A a C cierre de las válvulas ($Z_2 > Z$)

de GA a GC $GC < GA$ $\Delta p_C > \Delta p_A$

se necesita más presión diferencial disponible para garantizar el caudal GC.

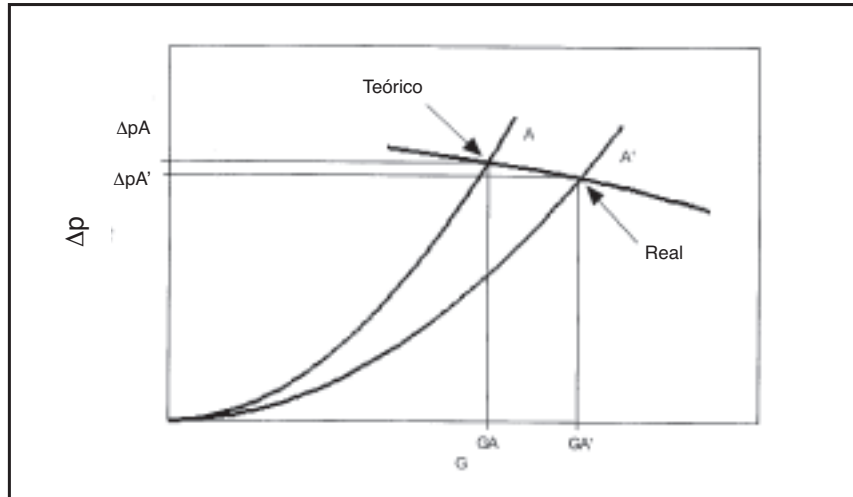
Punto teórico y punto real

A la hora del diseño, los Δp suelen calcularse con un factor de seguridad.

Por lo general, una vez realizada la instalación, la pérdida de carga es inferior a la calculada y esto da por resultado un desplazamiento del punto de funcionamiento hacia la derecha.

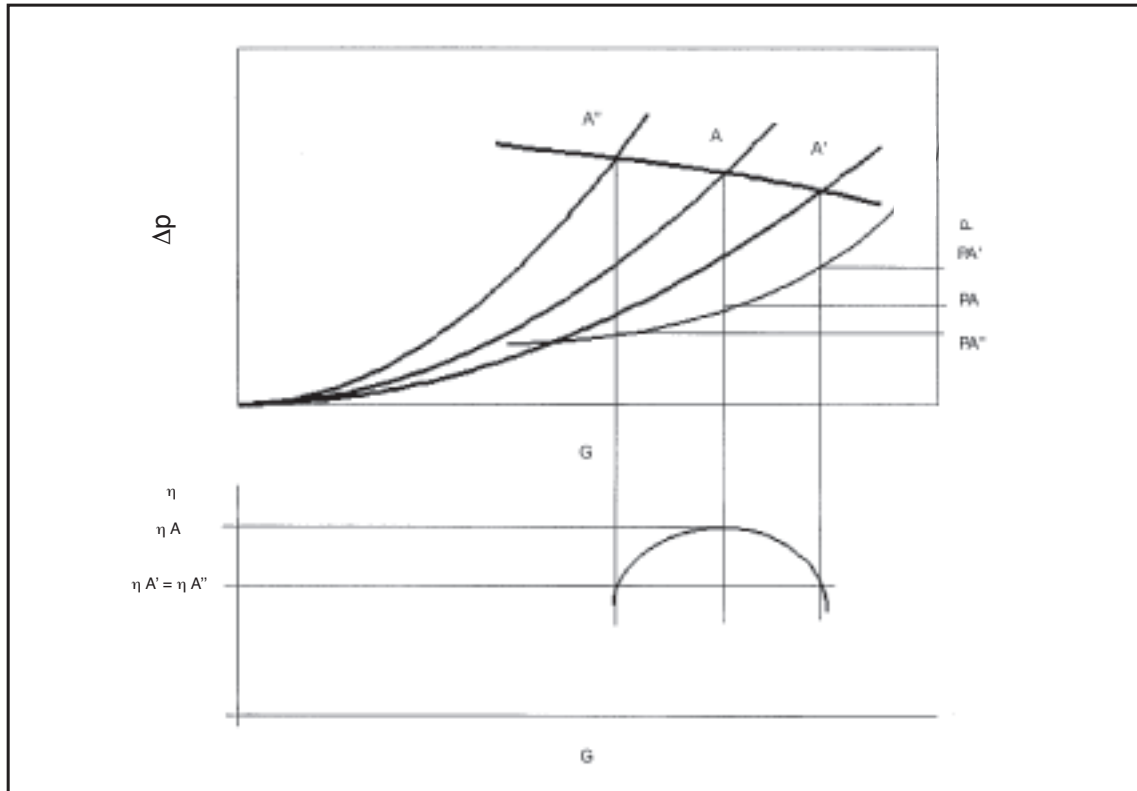
El caudal real es mayor que el caudal de diseño (Fig. 12).

Fig. 12



Esto no es deseable porque hace que la bomba funcione en una zona de menor rendimiento y mayor consumo energético (Fig. 13).

Fig. 13



Observando los puntos A' y A'' se puede ver que $\eta_{A'} = \eta_{A''}$.

Sin embargo, en el punto de funcionamiento A'' la potencia absorbida, o sea el consumo, es más baja que en el punto A' . $P_{A''} < P_{A'}$

Bomba de velocidad variable

Funcionamiento

Puesto que la zona de mejor rendimiento es bastante limitada, en algunos casos puede ser conveniente hacer funcionar la bomba a menor velocidad para **disminuir el caudal y la altura manométrica** tras una reducción de carga de la instalación.

La velocidad de la bomba se reduce por vía electrónica mediante una señal enviada por un sensor de Δp instalado en el circuito. En este caso, la bomba puede suministrar una altura manométrica más baja que cuando funciona a velocidad constante (Fig. 14).

La potencia absorbida es inferior.

Fig. 14

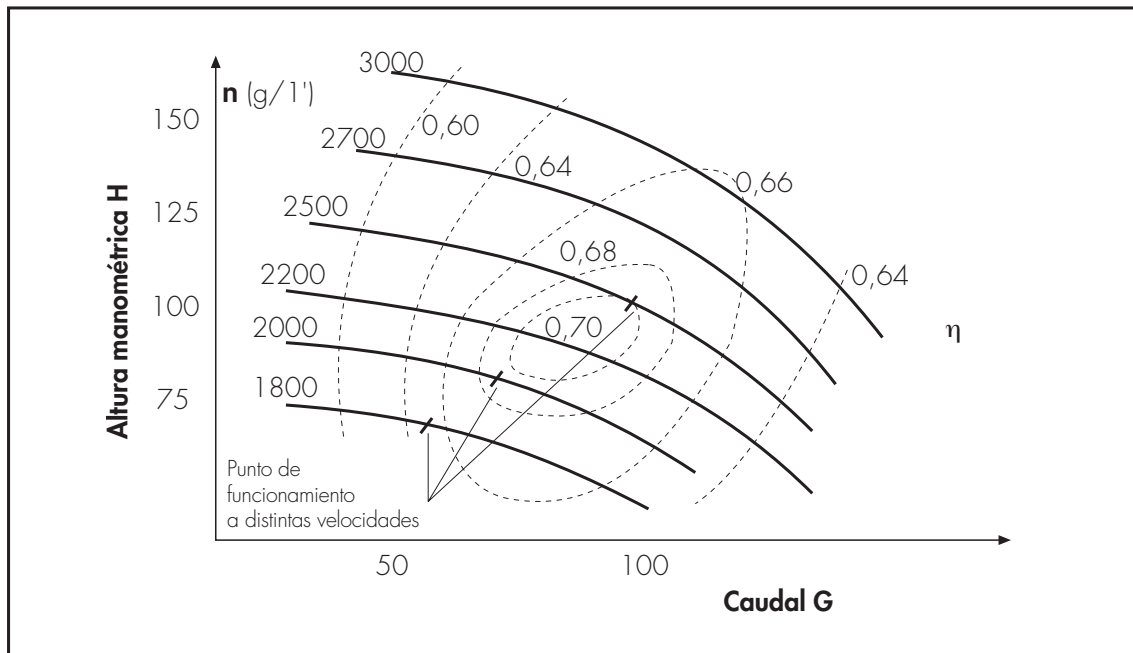
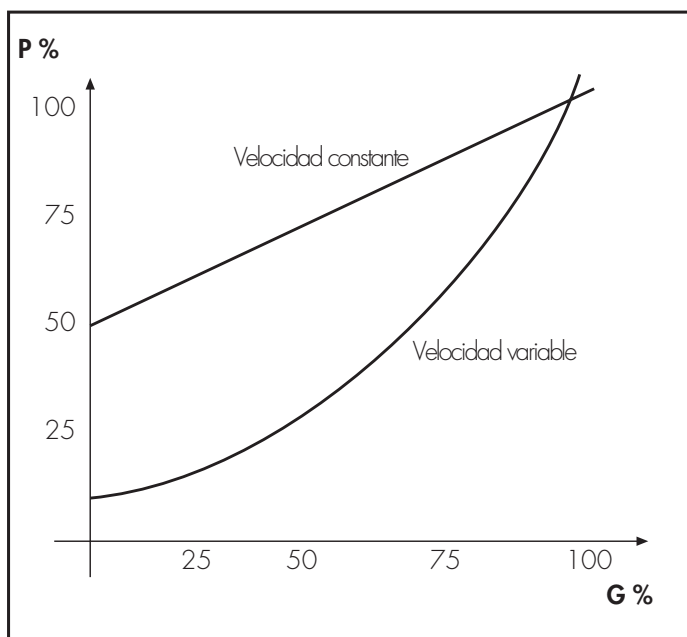


Fig. 15



El ahorro energético se puede apreciar en un gráfico que expresa la variación de la potencia absorbida en función del caudal, con la bomba a velocidad constante o variable (Fig. 15).

Ejemplo

$$G = 50\%$$

$$P_{var} = 30\%$$

$$P_{const} = 75\%$$

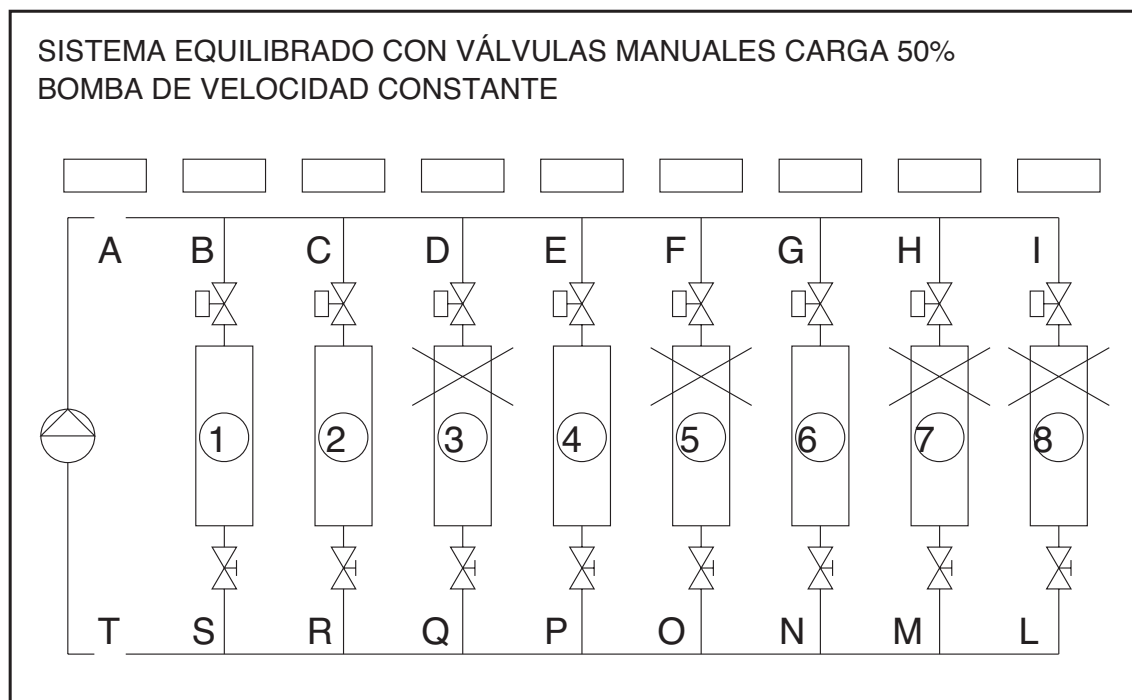
Las mediciones se efectúan con el sensor de Δp que acciona la bomba, instalado en el circuito más desfavorecido que es donde se garantiza el menor coste operativo de bombeo. [8]

2ª Parte

Circuito equilibrado con válvulas manuales en situación de carga parcial

Para comprender mejor lo que sucede cuando se verifica una reducción de carga de la instalación, supongamos que se cierra una parte de los terminales del ejemplo anterior.

Esquema 1



Para conocer las nuevas condiciones de funcionamiento (el punto de intersección de la curva de la bomba con la curva del circuito) es necesario conocer el valor de Z correspondiente a la nueva situación.

Los cálculos realizados para dimensionar la instalación permiten obtener los valores de Z en función de Δp y G en cada salida y en cada tronco común.

Los valores de Z se obtienen con la fórmula $\Delta p = Z * G^{1,9}$ (Tabla 1).

(En este caso se utiliza el exponente 1,9, determinado experimentalmente, porque es más representativo de la situación real del sistema). [3]

Valores Z de la instalación

Tabla 1

SALIDA	Δp (mm c.a.)	G (l/h)	Z	TRONCO	Δp (mm c.a.)	G (l/h)	Z
1	1095	330	0,017957159	AB-ST	58,5	2640	1,8454E-05
2	969	330	0,01589055	BC-RS	63	2310	2,5614E-05
3	874	330	0,014332928	CD-QR	47,5	1980	2,5883E-05
4	809	330	0,013266978	DE-PQ	32,5	1650	2,5041E-05
5	757	330	0,012414218	EF-PO	26	1320	3,0611E-05
6	647	330	0,01061303	FG-NO	55	990	0,00011186
7	514	330	0,008429205	GH-MN	66,5	660	0,00029221
8	478	330	0,007838832	HI-LM	18	330	0,00029519

Cálculo del coeficiente Z de la instalación con carga parcial

El coeficiente Z correspondiente a la nueva situación de funcionamiento se puede calcular con las fórmulas ya utilizadas para los circuitos en serie o en paralelo.

Estas fórmulas son las mismas que se han empleado para determinar los valores de Z en la instalación equilibrada y sin equilibrar.

A título de ejemplo se presenta el cálculo para el caso de carga parcial.

En los circuitos con caudal 0, $Z = \infty$ (infinito).

Tabla 2

TRAMO	COMPOS.	CÁLCULO	$1/Z^{0.525}$	Z (Compuesto)
6				0.0106103
FG-6-ON	Serie	$Z+ZFG+ZON=0.0106103+2 \cdot 0.00011185$		0.010834
EF-OP	Serie	$Z+ZEF+ZOP=0.01083400+2 \cdot 0.00003061$		0.001089522
4	Paralelo	$1/Z^{0.525}+1/Z4^{0.525}=1/0.01089522^{0.525}+1/0.0132675^{0.525}$	20.398952	0.003202645
DE-PQ	Serie	$Z+ZDE+ZPQ=0.003202645+2 \cdot 0.00002504$		0.003252725
CD-QR	Serie	$Z+ZCD+ZQR=0.003252725+2 \cdot 0.00002588$		0.003304485
2	Paralelo	$1/Z^{0.525}+1/Z2^{0.525}=1/0.003304485^{0.525}+1/0.015891^{0.525}$	28.86468	0.00165329
BC-RS	Serie	$Z+ZBC+ZRS=0.00165329+2 \cdot 0.00002561$		0.00170451
1	Paralelo	$1/Z^{0.525}+1/Z1^{0.525}=1/0.00170451^{0.525}+1/0.017957^{0.525}$	36.657465	0.00104868
AB-TS	Serie	$Z+ZAB+ZTS=0.00104868+2 \cdot 0.00001845$		0.00108558

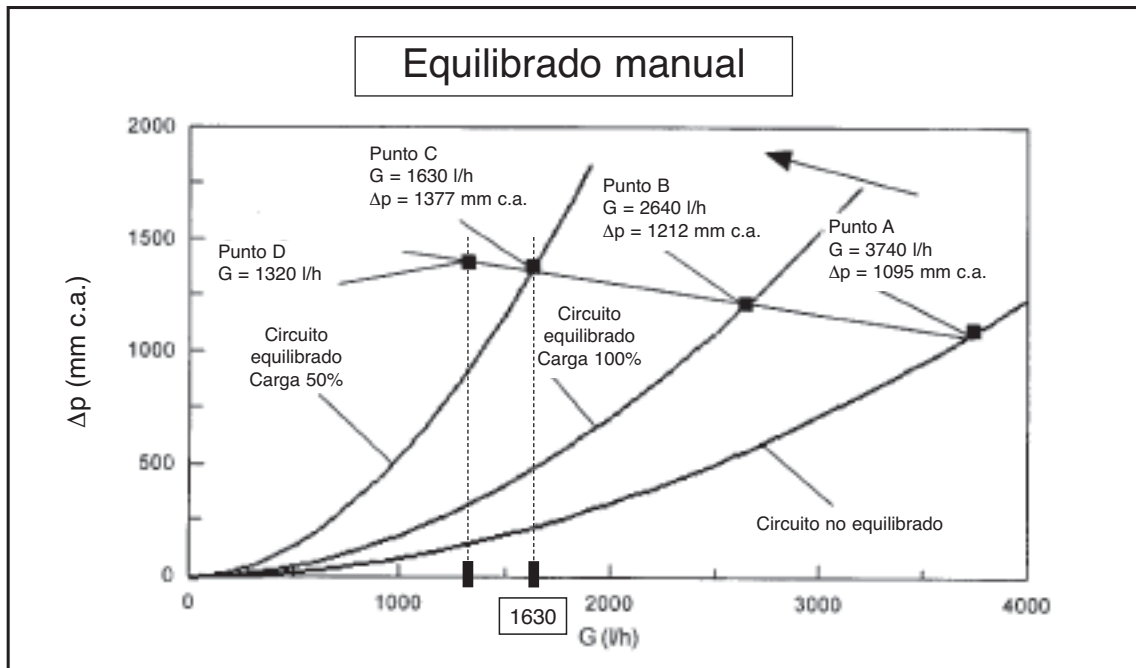
ZTOT	0.00108558
------	------------

Nuevo punto de funcionamiento

Una vez determinado el coeficiente Z característico de la nueva situación, es posible trazar la curva correspondiente.

Puntos de funcionamiento: carga total y carga parcial

Fig. 1



La intersección con la curva de la bomba es el nuevo punto de equilibrio C.

En él se verifican los siguientes valores:

$$G = 1630 \text{ l/h}$$

$$\Delta p = 1377 \text{ mm c. a.}$$

Cálculo de los caudales

Conociendo el caudal total y los coeficientes Z de cada tramo, se pueden calcular los nuevos caudales para cada tronco y para cada salida que ha quedado abierta.

Se recorre el circuito hacia atrás y, para cada salida, se aplica la fórmula de la tabla 3.

Tabla 3

FÓRMULA
$G_i = G \cdot (Z/Z_i)^{0.525}$

SALIDA	CÁLCULO	G (l/h)
1	$1630 \cdot (.00104868 / .017957)^{0.525}$	367
2	$1263 \cdot (.00165329 / .015891)^{0.525}$	384
4	$879 \cdot (.003202645 / .013267)^{0.525}$	417
6	879-417	462

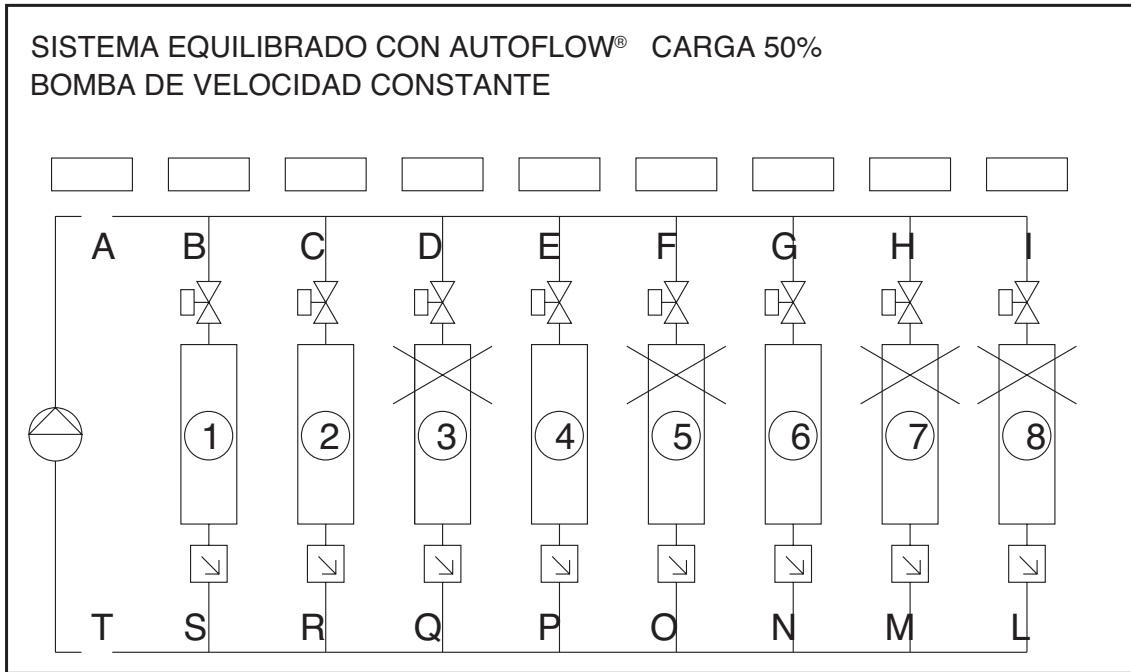
Los nuevos caudales se introducen en el esquema de la instalación.

Circuito equilibrado con AUTOFLOW® en situación de carga parcial

Veamos qué sucede cuando la instalación funciona con carga parcial.

Se accionan las válvulas de corte simulando el cierre de los mismos terminales del ejemplo anterior.

Esquema 2

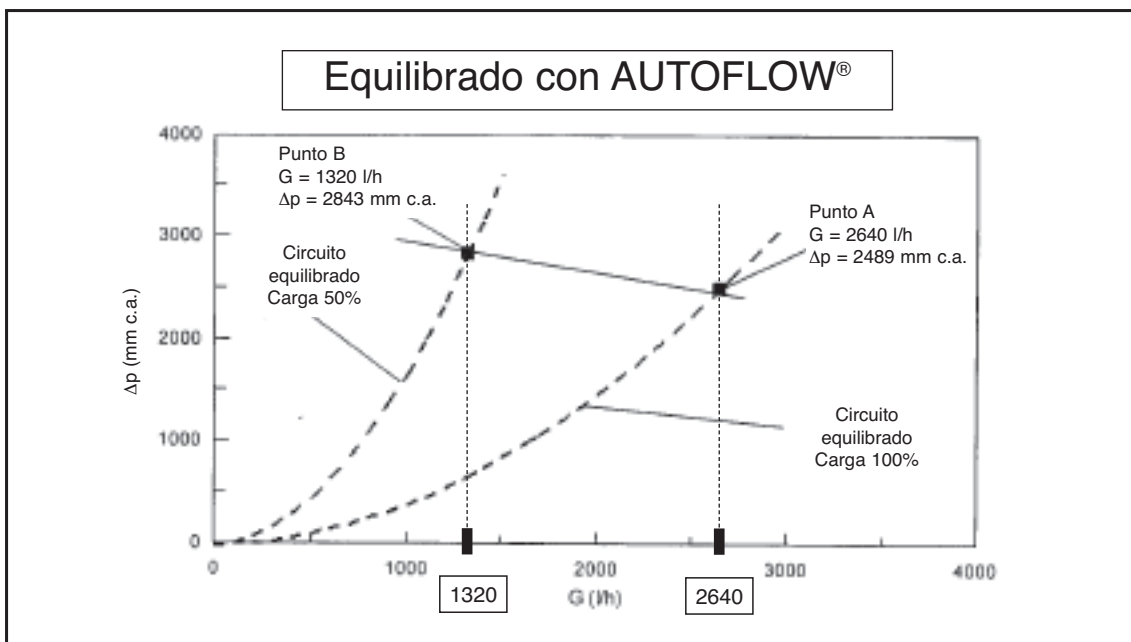


También para este caso se incluye el gráfico que contiene los distintos puntos de funcionamiento.

Naturalmente, en este ejemplo la curva característica de la bomba es distinta de la anterior porque los puntos de funcionamiento nominales $\Delta p - G$ son diferentes.

Puntos de funcionamiento del circuito con AUTOFLOW®: carga total y carga parcial

Fig. 2



Con las fórmulas siguientes se puede calcular la **sobrepresión que debe absorber AUTOFLOW® para devolver la instalación a las condiciones de diseño.**

A diferencia de lo que sucede en una instalación equilibrada con válvulas manuales a carga parcial, la naturaleza dinámica de AUTOFLOW® no permite hacer consideraciones sencillas sobre los valores de Z. En cambio, permite conocer exactamente el caudal correspondiente a la reducción de carga deseada. Una vez conocido este dato, se puede encontrar el nuevo punto de funcionamiento en la curva de la bomba y obtener las nuevas presiones diferenciales de cada circuito de salida.

Sobrepresiones con AUTOFLOW®

Tabla 4

Cálculo de las sobrepresiones con AUTOFLOW®

$\Delta p_{AT}=2843$	
$\Delta p_1=\Delta p_{AT}-2\cdot\Delta p_{AB}=\Delta p_{AT}-2\cdot Z_{ABG}^{1.9}=2843-2\cdot 15.7=$	2811
$\Delta p_2=\Delta p_1-2\cdot\Delta p_{BC}=2811-2\cdot 12.60=$	2786
$\Delta p_4=\Delta p_2-2\cdot\Delta p_{CD}-2\cdot\Delta p_{DE}=2786-2\cdot 5.9-2\cdot 5.7=$	2763
$\Delta p_6=\Delta p_4-2\cdot\Delta p_{EF}-2\cdot\Delta p_{FG}=2763-2\cdot 1.9-2\cdot 6.8=$	2746

Δp AUTOFLOW®

Tabla 5

SALIDA	Δp circuito (mm c.a.)	Δp salida (mm c.a.)	Δp AF (mm c.a.)	Δp AF (100%) (mm c.a.)	Δp AF extra (mm c.a.)
1	2811	328	2483	2044	439
2	2786	328	2458	1918	540
4	2763	328	2435	1758	677
6	2746	328	2418	1608	810

Los resultados del cálculo se introducen en el esquema de la instalación.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Mario Doninelli
LA RED DE DISTRIBUCIÓN (en italiano)
Cuadernos Caleffi n° 1
- [2] Mario Doninelli
LOS CIRCUITOS Y LOS TERMINALES DE LOS SISTEMAS DE CLIMATIZACIÓN
(en italiano)
Cuadernos Caleffi n° 2
- [3] Pierre Fridmann
EQUILIBRAGE THERMO-HYDRAULIQUE DES INSTALLATION DE CHAUFFAGE
Les Edition Parisienne Revue Chaud Froid Plomberie
- [4] MISURE, BILANCIAMENTO E COLLAUDO DEI CIRCUITI ...
CIP Corsi Istruzione Permanente AICARR
- [5] TECHNICAL ASPECTS OF BALANCING HYDRONIC SYSTEMS
Fascículo técnico Flow Design Inc.
- [6] SYSTEM & EQUIPMENT 1992
APPLICATIONS 1995
ASHRAE Handbooks
- [7] THE PROS AND CONS OF BALANCING A VARIABLE WATER ...
ASHRAE Journal October 1990
- [8] VARIABLE SPEED/VARIABLE VOLUME
Fascículo técnico ITT

2ª Edición - Enero 2000

