Master en Ingeniería Medioambiental y Gestión del Agua 2007/2008

Módulo IV: Abastecimiento y Saneamientos Urbanos

INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL

AUTOR: RICARDO GONZÁLEZ IGUALADA

Sumario

INTRODUCCIÓN 4

PARTE PRIMERA - INSTRUMENTACIÓN 6

INSTRUMENTACIÓN 6
Vía de recepción (→) 6
Vía de transmisión (←) 6
PARÁMETROS A MEDIR 6
Presiones, Volúmenes y Caudales 6
1. Presiones. 6
1.1. Tipos de sensores: 6
1.2 Tipos de transductores: 6
2. Volúmenes. 6
2.1 Escalas o limnímetros. 6
2.2 Instrumentos de flotador. 6
2.3 Limnimetros de tipo hidrostático. 6
2.4 Limnímetros de tipo neumático. 6
2.5 Equipos de medida de altura por ultrasonido. 6
2.6 Equipos de medida de altura por sensor de cuarzo. 6
2.7 Equipos de medida de alturas por el principio piezoresistivo. 6
3. Caudales. 6
3.1 Aforo por método volumétrico. 6
3.2 Aforos por vertedero. 6
3.2-a. En pared delgada. 6
3.2-b. En pared gruesa. 6
3.3 Aforos por estrangulación de la corriente. 6
3.4 Aforos por molinete. 6
3.5 Cálculo de caudales por compuertas. 6
a) De tipo deslizante. 6
b) De tipo sector. 6
3.6 Cálculo de caudales por válvulas. 6
3.7 Medida de caudales en conducciones forzadas. 6
a) Diafragma o placa orificio. 6
b) Tubo Venturi. 6
c) El tubo Pitot. 6
d) Medidor ultrasónico. 6
3.8 Calculo de caudal por medio de turbinas y bombas. 6
3.9 Medidores de caudal mecánicos (contadores). 6
SEÑALIZACIÓN 6
1. Señal de estado. 6
2. Máximos y mínimos. 6
METEOROLOGÍA 6
Datos meteorológicos 6
PROTECCIÓN DE EQUIPOS 6
Instrumentación para protección contra las sobretensiones 6

PARTE SEGUNDA – CONTROL 6

AVISOS Y ALARMAS 6
REGISTRO Y CONTROL 6
1. Captación 6
2. Aducción 6
3. Almacenaje 6

©: Quedan reservados todos los derechos. (Ley de Propiedad Intelectual del 17 de noviembre de 1987 y Reales Decretos).
Documentación elaborada por el autor/a para EOI.
Prohibida la reproducción total o parcial sin autorización escrita de EOI.

4. Red de distribución *6*
5. Centrales hidroeléctricas *6*
6. Riegos *6*
EJEMPLO PRÁCTICO DE UN PROCESO Y SU CONTROL 6
EJERCICIO PRÁCTICO DE INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL 6

©: Quedan reservados todos los derechos. (Ley de Propiedad Intelectual del 17 de noviembre de 1987 y Reales Decretos).
Documentación elaborada por el autor/a para EOI.
Prohibida la reproducción total o parcial sin autorización escrita de EOI.

Introducción

La necesidad humana de ejercer un control eficaz sobre un elemento como el agua es absolutamente indiscutible.

Por un lado, es un bien escaso y como tal hay que aprovecharlo al máximo para cualesquiera de sus múltiples usos.

Por otro, y como elemento natural que es, representa un peligro potencial que se pone de manifiesto en ciertas ocasiones, como son las inundaciones por desbordamiento de los ríos, lluvias torrenciales, etc.

Este comportamiento tan dispar ha significado que a lo largo de siglos, el hombre haya venido desarrollando técnicas para alcanzar el control y aprovechamiento óptimos de este preciado bien.

En cualquiera de los aprovechamientos del agua (regadíos, energéticos, abastecimientos a poblaciones, etc.) hay que realizar un control suficientemente eficaz y fiable, basado en múltiples puntos de medida situados en los diversos elementos estructurales que configuran el proceso que nos ocupe, desde las fuentes de captación hasta el uso que se la dé.

Estos puntos de medida estarán dotados de los instrumentos necesarios que nos faciliten los datos solicitados en cada uno de los referidos puntos. El abanico de instrumentación es muy amplio, ya que puede ir desde la más simple escala graduada para medir un cierto nivel de agua, al más sofisticado equipo de ultrasonido capaz de medirnos, con gran precisión, el caudal circulante por una conducción.

Pero no basta con medir simplemente los datos requeridos, hay que transmitirlos, recibirlos, elaborarlos, integrarlos, actuar en consecuencia de los resultados obtenidos y finalmente guardarlos en las bases de datos que nos servirán para la elaboración de estadísticas y programas de actuación sobre el proceso.

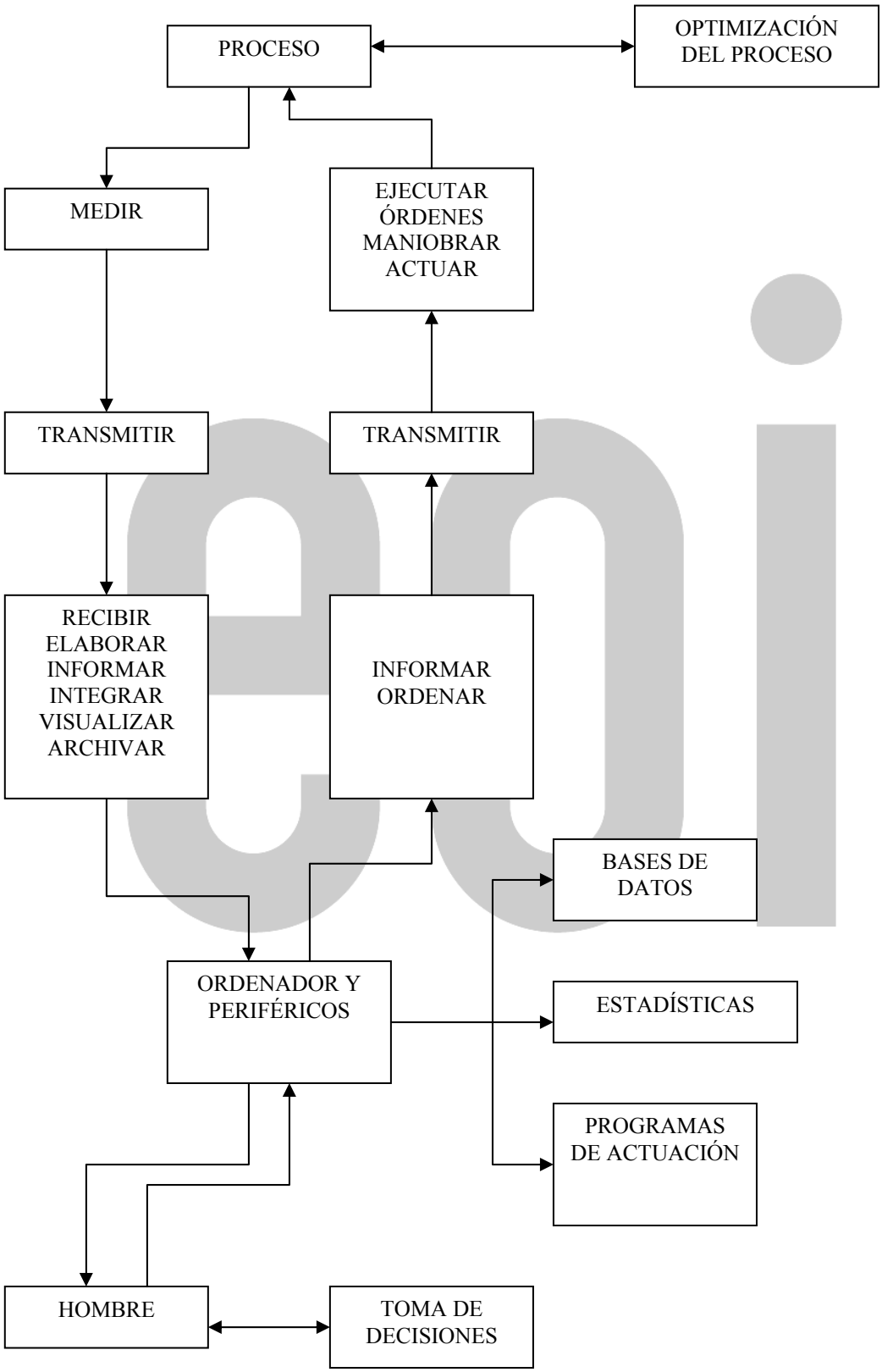
Hoy en día, es absolutamente imprescindible conocer en tiempo real el comportamiento del proceso controlado, para actuar rápida y eficazmente en las modificaciones que sean precisas en cada momento.

Los avances técnicos en los campos de la electrónica, telecomunicación, informática, robótica, etc. nos van a facilitar enormemente esa vigilancia exhaustiva del proceso, pero también vamos a tener que utilizar constantemente las clásicas e invariables fórmulas de la hidráulica y de la física.

La comunicación hombre/proceso tiene que ser absolutamente fiable y eficaz, con la suficiente garantía tanto en la toma de datos, como en todo su posterior tratamiento. Así mismo, los programas que estén desarrollándose en cada momento, tendrán que ser lo suficientemente accesibles para efectuar en ellos las variaciones de parámetros y las correcciones necesarias que permitan actuar sobre las desviaciones acaecidas respecto las previsiones.

Todas estas actuaciones tiene como único fin la optimización del propio proceso.

©: Quedan reservados todos los derechos. (Ley de Propiedad Intelectual del 17 de noviembre de 1987 y Reales Decretos).
Documentación elaborada por el autor/a para EOI.
Prohibida la reproducción total o parcial sin autorización escrita de EOI.



©: Quedan reservados todos los derechos. (Ley de Propiedad Intelectual del 17 de noviembre de 1987 y Reales Decretos).
Documentación elaborada por el autor/a para EOI.
Prohibida la reproducción total o parcial sin autorización escrita de EOI.

PARTE PRIMERA - INSTRUMENTACIÓN

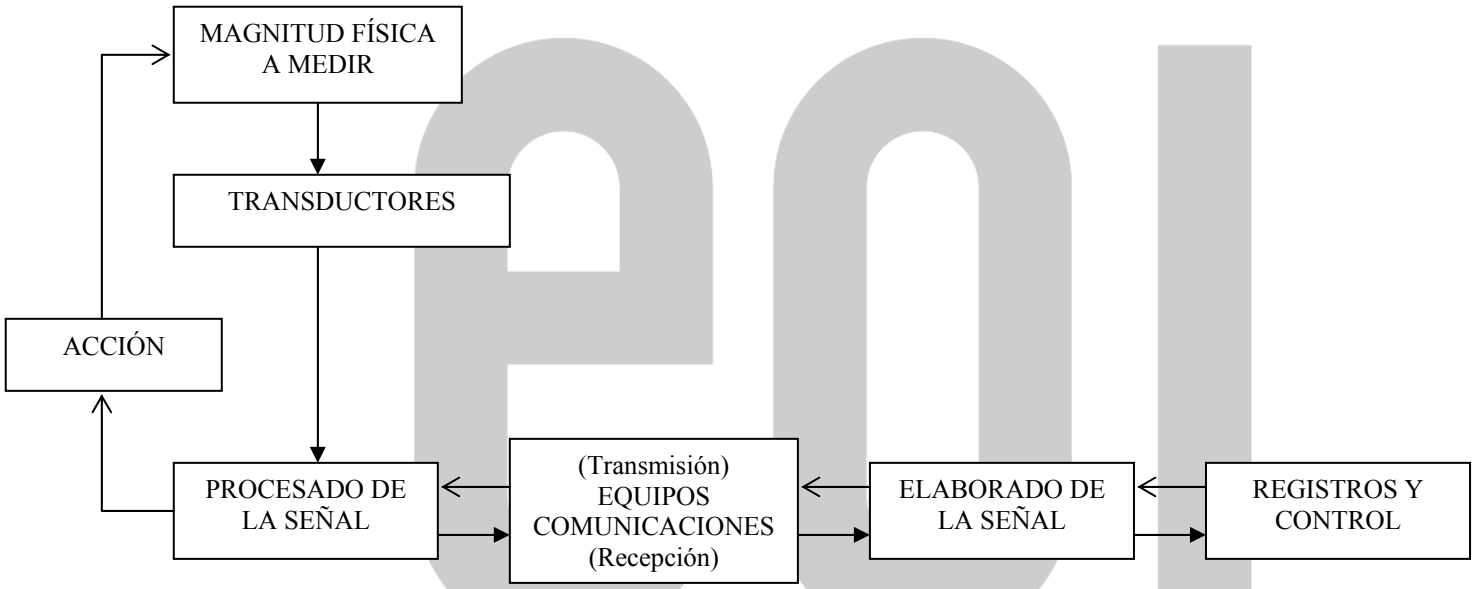
©: Quedan reservados todos los derechos. (Ley de Propiedad Intelectual del 17 de noviembre de 1987 y Reales Decretos).
Documentación elaborada por el autor/a para EOI.
Prohibida la reproducción total o parcial sin autorización escrita de EOI.

Instrumentación

Podemos definir la Instrumentación como la Tecnología que nos permite medir magnitudes físicas, convertirlas en magnitudes eléctricas y transmitirlas a los dispositivos de registro y control.

En nuestro caso vamos a ocuparnos de la instrumentación necesaria para medir los parámetros más significativos que intervienen en cualquier proceso de control de la gestión del agua.

El esquema de un sistema de instrumentación responde a:



Vía de recepción (→)

1. TRANSDUCTORES.- Son dispositivos que convierten una señal física de entrada en una salida de tipo eléctrico.

   Necesitan una alimentación eléctrica externa para extraer información de la magnitud física a medir.

2. PROCESADO DE LA SEÑAL.- La salida del transductor se convierte en una información de tipo analógico, es decir, esencialmente continua (de 4 a 20 mA), o en información de tipo digital, representada por una serie de impulsos discontinuos (código binario).

3. EQUIPOS DE COMUNICACIONES (Recepción).- Se encargan de la transmisión de la información analógica o digital, mediante la utilización de alguna de las siguientes vías:

   – Líneas de alta tensión

©: Quedan reservados todos los derechos. (Ley de Propiedad Intelectual del 17 de noviembre de 1987 y Reales Decretos).
Documentación elaborada por el autor/a para EOI.
Prohibida la reproducción total o parcial sin autorización escrita de EOI.

- Cables multipares
- Radio
- Fibra óptica
- Líneas telefónicas (contratada)
- Vía Satélite (contratada)

4. ELABORADO DE LA SEÑAL.- Se decodifica la señal analógica o digital recibida, y la estandariza a un protocolo legible.
5. REGISTROS Y CONTROL.- Una vez que son legibles las medidas recibidas se elaboran, se integran en el proceso y se registran en las bases de datos correspondientes.

   En este punto habrá que realizar el control sobre la medida recibida, lo que conllevará la toma de decisiones que corresponda.

   Para este tratamiento hay que disponer de un equipo de ordenadores y periféricos (impresoras, pantallas gráficas y alfanuméricas, etc.) que trabaje en tiempo real; además el software será el adecuado para realizar las tareas necesarias para el control del proceso.

Vía de transmisión (←)

1. ELABORADO DE LA SEÑAL.- Codifica el protocolo legible en información analógica o digital.
2. EQUIPOS DE COMUNICACIÓN (Transmisión).- Transmite la información en sentido inverso al de Recepción y por las mismas vías.
3. PROCESADO DE LA SEÑAL.- Convierte la información analógica o digital en una señal de tipo eléctrico, que se manda al mecanismo (compuerta, válvula, etc.) encargado de regular la magnitud física primaria.
4. ACCIÓN.- Consiste en la realización de la maniobra, encargada desde el control, sobre el elemento o mecanismo regulador de la magnitud física que queremos controlar (presión, caudal, etc.)

Parámetros a medir

Presiones, Volúmenes y Caudales

En cualquier control del empleo del agua que hagamos, nos vamos a encontrar con la necesidad de evaluar ciertas masas estáticas por su volumen, tal es el caso del agua en embalses y depósitos; mientras que en otros momentos del proceso tendremos que controlar el agua en movimiento y por lo tanto el caudal (volumen/tiempo) que ello representa.

©: Quedan reservados todos los derechos. (Ley de Propiedad Intelectual del 17 de noviembre de 1987 y Reales Decretos).
Documentación elaborada por el autor/a para EOI.
Prohibida la reproducción total o parcial sin autorización escrita de EOI.

Pero, tanto en un caso como en el otro conocer la presión que ejerce la masa líquida sobre las paredes que la contienen y sobre sus propias moléculas, va a ser un parámetro , muy a tener en cuenta, gracias al cual y a la relación existente entre la altura de una columna de agua y la presión ejercida sobre su base, podremos establecer una equivalencia entre unidades de presión y de altura de columna de agua que nos llevará a determinar fácilmente volúmenes, caudales y cotas piezométricas.

Las unidades utilizadas para la presión serán el metro de columna de agua (m. c. a.) y el Kg./cm², indistintamente; para medir volúmenes emplearemos el m³., y para caudales el m³/s.

1. Presiones.

La presión es un concepto mecánico que se puede expresar en función de las magnitudes primarias: masa y longitud. La presión se representa como una fuerza por unidad de área. En el Sistema Internacional de unidades, la presión se mide en N/m^2., denominándose a esta unidad Pascal (Pa). Sin embargo, existe una gran variedad de unidades adicionales que se utilizan frecuentemente en la práctica. Por su facilidad de conversión, las más utilizadas son: 1 Kg/cm^2 = 10 metros de columna de agua (m.c.a.).

La presión es una de las propiedades significativas de un fluido, y consiste en un esfuerzo de compresión ejercido uniformemente en todas las direcciones. Cuando el fluido está en equilibrio, la presión en un punto es la misma en todas direcciones y es independiente del tiempo; es lo que definiremos como presión estática. Cuando el fluido está en movimiento, pueden existir diversos componentes de presión que pueden variar con el tiempo; diremos que existen presiones dinámicas.

La presión estática no es difícil medirla con gran exactitud; sin embargo, las mediciones de las presiones dinámicas son mucho más difíciles de obtener con gran precisión, debido a las propias características del fluido y a la configuración del instrumento de medida.

Actualmente, existe una gran variedad de transductores de presión, en función del rango de la magnitud a medir. El tipo más difundido utiliza un elemento elástico como sensor mecánico, que se deforma por la acción de la presión. Dichos sensores pueden ser de: diafragma, cápsula, fuelle y tubo de Bourdon. La salida utiliza el desplazamiento para actuar sobre un sensor eléctrico. Los principios de transducción utilizados pueden ser: resistivos, inductivos, capacitivos o que midan el cambio en la frecuencia de resonancia natural de un elemento en tensión. Los transductores se clasifican como: potenciométricos, de bandas extensométricas, piezoresistivos, inductivos, LVDT, capacitivos, piezoeléctricos y de elemento vibrante.

1.1. Tipos de sensores:

a) Diafragmas elásticos.- El diafragma o membrana es una placa delgada circular, que está sujeta en su periferia. La membrana puede ser plana u ondulada.

©: Quedan reservados todos los derechos. (Ley de Propiedad Intelectual del 17 de noviembre de 1987 y Reales Decretos).
Documentación elaborada por el autor/a para EOI.
Prohibida la reproducción total o parcial sin autorización escrita de EOI.

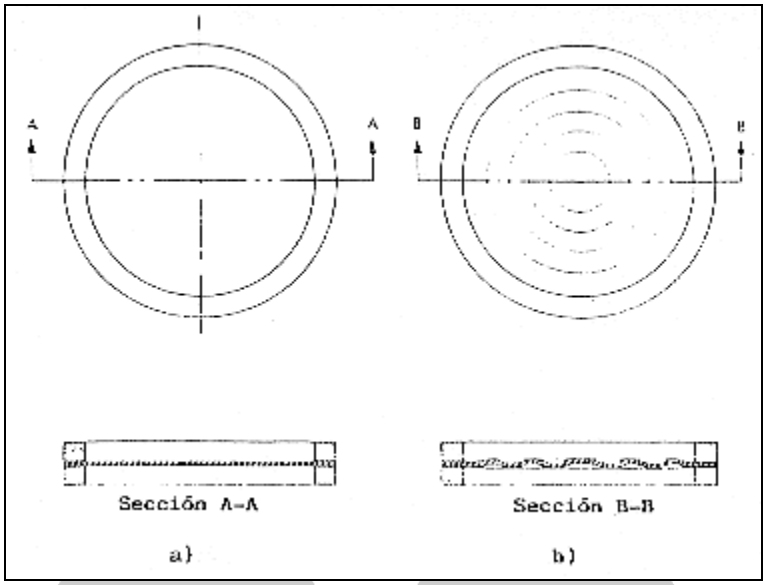


FIGURA 1.1

Tiene alta precisión y excelente respuesta dinámica, con un rango de valores comprendidos entre pocos milímetros y varias atmósferas, por lo que su uso es muy grande en los aparatos de medida de presión.

Las características principales de los diafragmas son: flexibilidad, estabilidad, fiabilidad, baja histéresis y buena respuesta dinámica.

Los diafragmas se construyen con aleaciones metálicas elásticas como el bronce, bronce fosforoso, acero inoxidable o aleaciones especiales.

b) Cápsulas y fuelles.- Las cápsulas, también denominadas aneroides, consisten en dos diafragmas onduladas anulares con las curvaturas de la ondulación en oposición y selladas por su periferia.

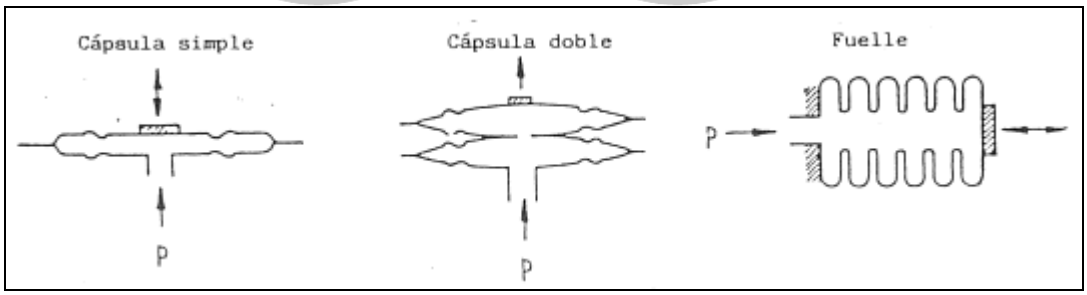


FIGURA 1.2

En el caso de cápsulas simples, uno de los diafragmas presenta una abertura central para la entrada de la presión y el otro tiene un refuerzo externo unido a una varilla de accionamiento, cuyo desplazamiento es proporcional a la diferencia entre la presión interior y exterior.

©: Quedan reservados todos los derechos. (Ley de Propiedad Intelectual del 17 de noviembre de 1987 y Reales Decretos).
Documentación elaborada por el autor/a para EOI.
Prohibida la reproducción total o parcial sin autorización escrita de EOI.

Los fuelles están formados por tubos de paredes finas que forman una serie de pliegues, estando cerrado uno de los extremos. El fuelle se desplaza axialmente cuando se aplica una presión en la abertura del lado opuesto.

c) Tubo de Bourdon.- Constituye el tipo de manómetro clásico. Consiste en un tubo que forma un anillo casi completo, cerrado por un extremo. Al aplicar presión al extremo abierto, el tubo tiende a enderezarse y el movimiento es transmitido a la aguja indicadora, gracias a un sector dentado y un piñón.

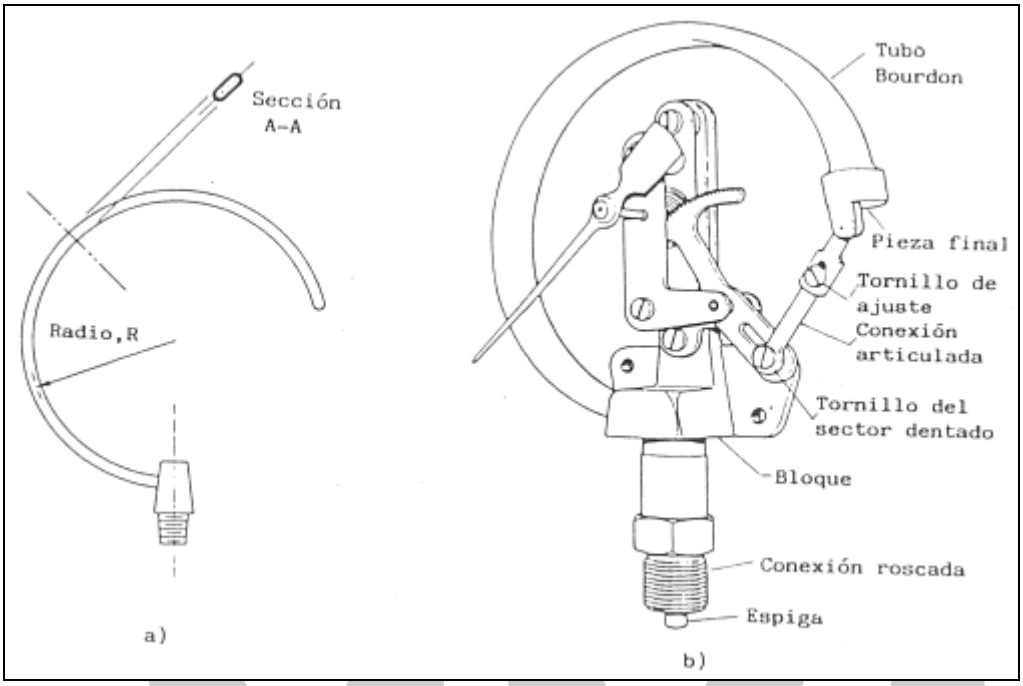


FIGURA 1.3

La ley de deformación del tubo de Bourdon es bastante compleja y ha sido determinada empíricamente en base a numerosos ensayos.

El tubo se suele construir en acero inoxidable, cobre o aleaciones especiales. El acoplamiento entre el tubo y la rueda dentada es tal que se logra una linealidad óptima y mínima histéresis; además, sirve para compensar los efectos de desgaste producidos por el uso.

En el mercado existen tubos de Bourdon que emplean tubos trenzados y también formando espirales y hélices.

1.2 Tipos de transductores:

a) Potenciométricos.- El transductor de presión potenciométrico es uno de los más antiguos.

En esencia consiste en un cursor que se mueve accionado por una cápsula o un tubo de Bourdon.

©: Quedan reservados todos los derechos. (Ley de Propiedad Intelectual del 17 de noviembre de 1987 y Reales Decretos).
Documentación elaborada por el autor/a para EOI.
Prohibida la reproducción total o parcial sin autorización escrita de EOI.

El cursor, formado por una escobilla, hace contacto sobre un elemento resistivo, obteniéndose una tensión variable que es función de los cambios de presión. Dependiendo del diseño del elemento resistivo que constituya el potenciómetro, la tensión de salida puede ser lineal, cuadrática o cualquier otra función de la presión aplicada.

La principal ventaja de este transductor es su amplio rango y simple instrumentación. Sus inconvenientes: gran tamaño y vida limitada.

b) Con galgas extensométricas.- Utilizan como sensor primario los diafragmas, a los que se les pegan cuatro bandas extensométricas. Por medio de cuatro galgas extensométricas de un puente de Wheatstone se miden las deformaciones radiales y tangenciales del diafragma debidas a las variaciones de presión.

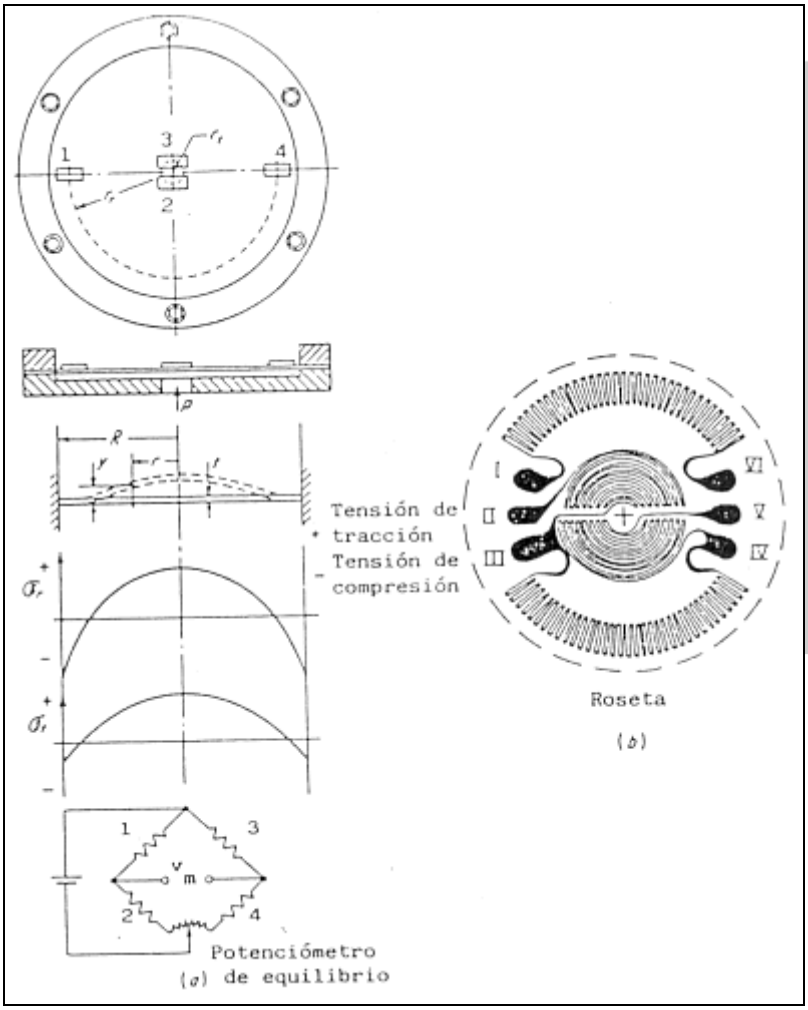


FIGURA 1.4

c) Inductivos.- Se incluyen en esta categoría a los de reluctancia variable y los que utilizan transformador diferencial (LVDT).

©: Quedan reservados todos los derechos. (Ley de Propiedad Intelectual del 17 de noviembre de 1987 y Reales Decretos).
Documentación elaborada por el autor/a para EOI.
Prohibida la reproducción total o parcial sin autorización escrita de EOI.

Los primeros utilizan como sensor los diafragma o los tubos de Bourdon, y los segundos cápsulas, fuelles y tubos Bourdon.

En los transductores de reluctancia variable y con diafragma, éste es de material ferromagnético y se coloca en medio de dos núcleos ferromagnéticos circulares, sobre el que se bobinan dos devanados, uno a cada lado.

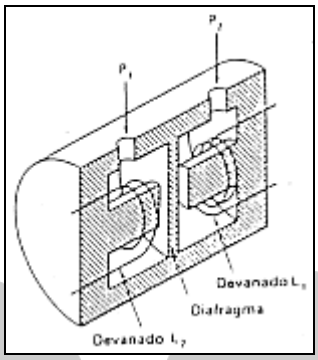


FIGURA 1.5

Se constituyen así dos recintos independientes que reciben las entradas de presión p_1 y p_2. La diferencia de presión entre ambas secciones hace que el diafragma se deforme, lo que provoca un cambio en la separación entre las piezas polares y el diafragma. Este cambio modifica la reluctancia del circuito magnético de cada bobina, con lo que se obtiene una variación en las inductancias de las mismas que son de la misma magnitud y sentido contrario.

La sensibilidad de estos transductores es muy alta, por lo que son muy adecuados para la medida de bajas presiones.

Cuando se utiliza un tubo de Bourdon como elemento sensor, se emplea un tubo trenzado en cuyo extremo se fija un material ferromagnético (armadura) y las inductancias cambian simultáneamente con dirección opuesta, debido al cambio de flujo provocado por el cambio de posición entre la armadura y los dos devanados.

En los transductores inductivos tipo LVDT (linear variable differential transformar), se utiliza un conjunto de tres devanados, uno actúa como devanado primario y los otros dos como devanados secundarios de un transformador conectado de manera diferencial, pero están bobinados en un tubo hueco en el interior del cual, el núcleo de material ferromagnético se mueve axialmente, actuando por un tubo de Bourdon o una cápsula.

©: Quedan reservados todos los derechos. (Ley de Propiedad Intelectual del 17 de noviembre de 1987 y Reales Decretos).
Documentación elaborada por el autor/a para EOI.
Prohibida la reproducción total o parcial sin autorización escrita de EOI.

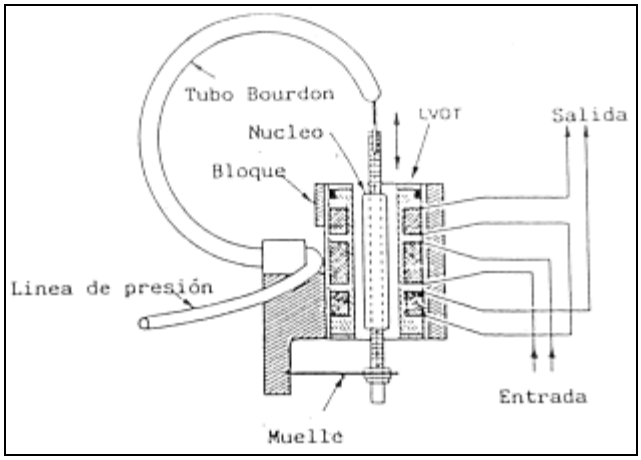


FIGURA 1.6

El desplazamiento del núcleo a través de los devanados secundarios modifica las tensiones inducidas, al cambiar el acoplamiento magnético con el primario.

Están muy indicados para medir grandes presiones.

d) Capacitivos.- Los transductores capacitivos de presión admiten dos tipo de diseño:

– Como condensador simple
– Como condensador doble en montaje diferencial

En el primer caso, la presión se aplica sobre un diafragma que se mueve en relación a un electrodo estacionario. El diafragma hace de armadura móvil de un condensador y el electrodo representa la armadura fija.

En el caso del condensador doble, la presión se aplica sobre un diafragma soportado entre dos armaduras fijas.

Al deformarse el diafragma por aplicación de la presión, varía la capacidad del condensador. Midiendo esta variación de capacidad mediante un puente de corriente alterna, se podrá calcular el valor de la presión aplicada.

e) Piezoeléctricos.- Generalmente los cristales piezoeléctricos empleados son de cuarzo o de mezcla cerámica. El cuarzo es más utilizado debido a que su módulo de elasticidad es elevado, con una frecuencia resonante alta, buena linealidad y baja histéresis.

El diafragma sensor de presión actúa sobre una serie de discos de cuarzo apilados, que emiten la tensión de salida. Realmente, al actuar la presión se genera en el cuarzo una carga que es convertida a tensión. La magnitud de la carga depende de la presión, tamaño del cristal y orientación de sus ejes cristalográficos.

f) Tipo servo.- Son más complejos que los otros transductores, pero proporcionan una mayor precisión.

©: Quedan reservados todos los derechos. (Ley de Propiedad Intelectual del 17 de noviembre de 1987 y Reales Decretos).
Documentación elaborada por el autor/a para EOI.
Prohibida la reproducción total o parcial sin autorización escrita de EOI.

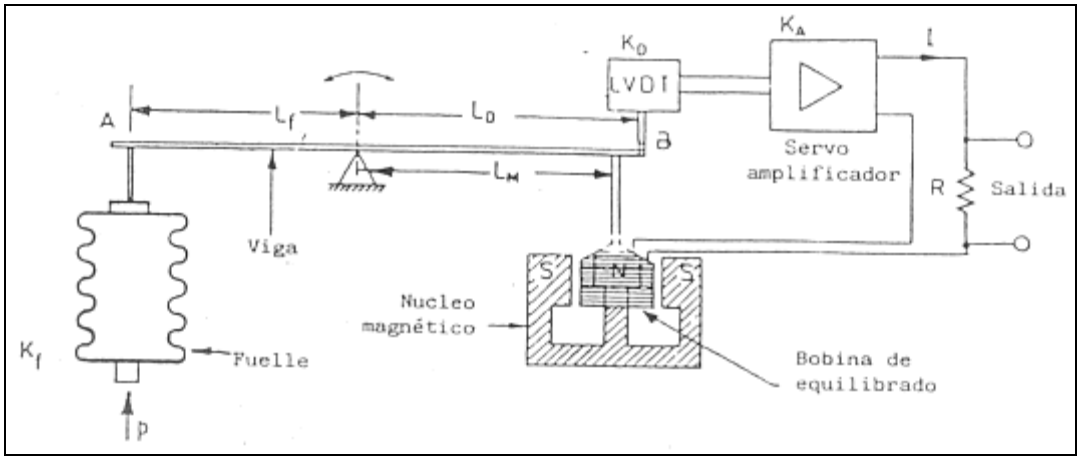


FIGURA 1.7

Cualquier diferencia de presión entre el interior y el exterior del fuelle, provoca una fuerza F sobre el punto A. El desplazamiento resultante de los brazos de balanza, se detecta mediante una transductor de desplazamiento, tipo LVDT, colocado en el punto B. La salida eléctrica del LVDT se amplifica, produciendo una corriente I que se lleva a una bobina de equilibrado sujeta a una brazo de la palanca.

En la posición de equilibrio, la fuerza electrodinámica ejercida por la bobina se opone a la fuerza producida por el fuelle, y la corriente I necesaria para conseguir el equilibrio será una medida de la presión desconocida que actúa sobre el fuelle.

Este transductor presenta una excelente precisión y sensibilidad y por ello se utiliza como patrón secundario de presiones.

g) De hilo vibrante .- Esta técnica fue desarrollada originalmente en EEUU para aplicarla a investigaciones oceanográficas.

Los transductores de presión de hilo vibrante, utilizan un diafragma como sensor primario de presión, el cual tiene un hilo muy fino (wolframio) unido en su centro. El otro extremo del hilo está fijado mecánicamente y aislado eléctricamente. El cable está situado en el campo magnético producido por un imán permanente. Cuando a través del hilo pasa una corriente éste se mueve a través del campo, proporcionando una corriente inducida en él. La fuerza electromotriz debida a la corriente inducida se amplifica y se realimenta al cable para mantener su oscilación. La salida de este circuito oscilador se amplifica posteriormente

©: Quedan reservados todos los derechos. (Ley de Propiedad Intelectual del 17 de noviembre de 1987 y Reales Decretos).
Documentación elaborada por el autor/a para EOI.
Prohibida la reproducción total o parcial sin autorización escrita de EOI.

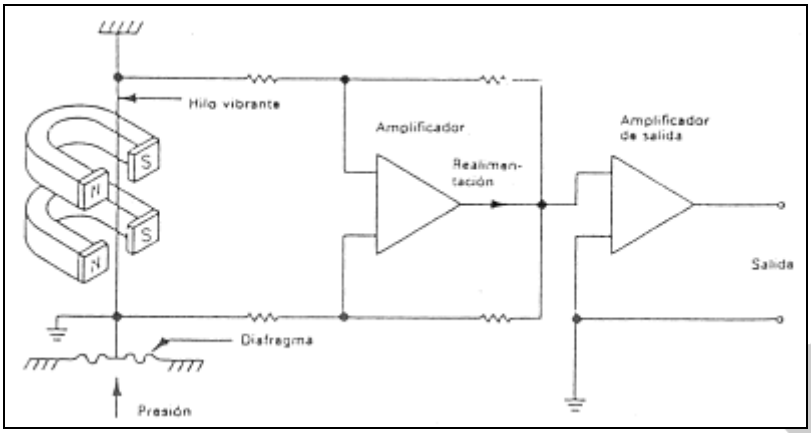


FIGURA 1.8

El transductor está diseñado de forma que un incremento de presión produzca una disminución en la tensión del hilo, y por consiguiente una reducción en su frecuencia de oscilación.

La frecuencia de salida permite una digitalización sin error de conversión, de modo que se consigue una buena sensibilidad y resolución. El inconveniente más importante es la variación de sensibilidad con la temperatura.

2. Volúmenes.

Para medir el volumen de una masa de agua en reposo tenemos que determinar el del sólido que determina, ya sea de forma regular (depósitos) o irregular (embalses).

En ambos casos, el volumen será función del área de las distintas superficies delimitadas por las líneas de nivel, y de la altura existente entre dos de esas superficies consecutivas.

©: Quedan reservados todos los derechos. (Ley de Propiedad Intelectual del 17 de noviembre de 1987 y Reales Decretos).
Documentación elaborada por el autor/a para EOI.
Prohibida la reproducción total o parcial sin autorización escrita de EOI.

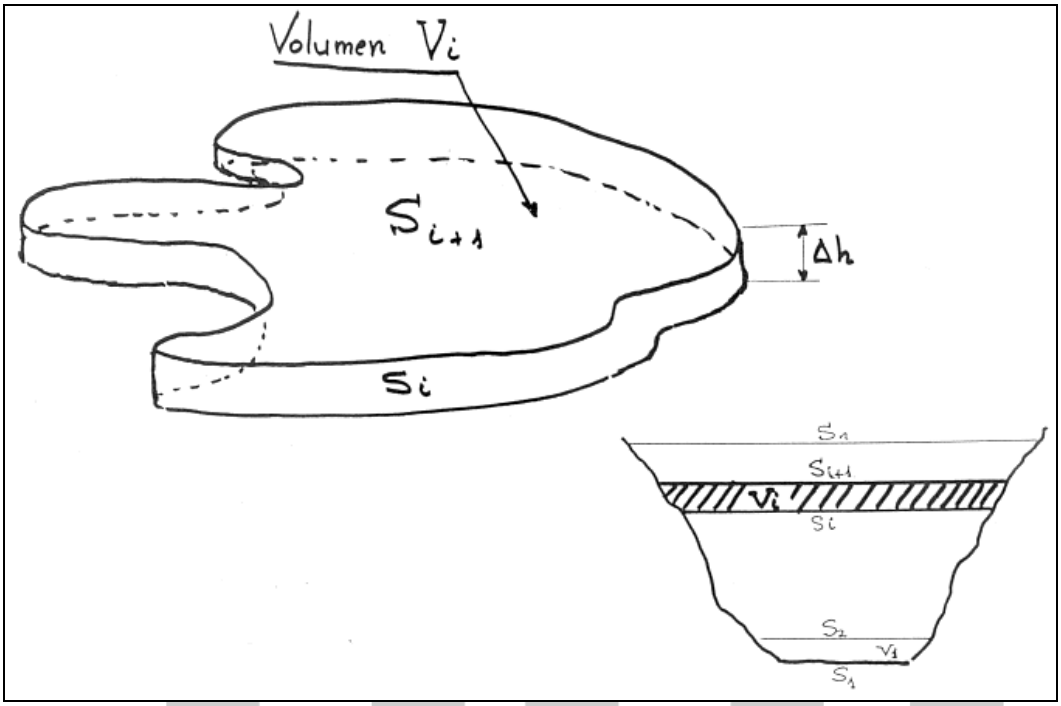


FIGURA 2.1

Si consideramos el sólido de la figura como un prismatoide, su volumen será:

$$V_i = \frac{(S_{i+1} + S_i)}{2} \times \Delta h.$$

Si consideramos n prismatoides, desde el nivel 0 hasta el nivel n, el volumen de toda la masa de agua valdrá:

$$V = V_1 + V_2 + \cdots V_i + \cdots + V_n$$

es decir,

$$V = \sum_{i=1}^{i=n} V_i$$

Por tanto, el volumen del sólido es función del nivel a que se encuentra la lámina superficial, es decir, de la altura sobre el nivel cero.

El método anterior es de fácil aplicación para los depósitos de agua con formas geométricas, mientras que para cubicar los vasos de los embalses se recurre a métodos más complejos, que no vamos a detallar aquí; solamente indicar que en todos ellos hay que determinar las curvas de altura/superficie y altura/volumen, para poder detener el volumen correspondiente a una altura cualesquiera.

©: Quedan reservados todos los derechos. (Ley de Propiedad Intelectual del 17 de noviembre de 1987 y Reales Decretos).
Documentación elaborada por el autor/a para EOI.
Prohibida la reproducción total o parcial sin autorización escrita de EOI.

En consecuencia, antes de proceder a la instalación de cualquier aparato de medida de nivel tendremos que determinar las curvas h/s y h/v del depósito o del embalse en cuestión.

A continuación describiremos la instrumentación capaz de medir alturas de lámina de agua:

2.1 Escalas o limnímetros.

Son los instrumentos más elementales para medir calados.

Se colocan en puntos fijos donde la lectura sea fácil y no estén afectados por la corriente. Se sitúan en muros, paramentos, taludes o en el terreno del vaso del embalse, empleando los elementos de fijación y amarre necesarios como para que las escalas no sufran desplazamientos. Pueden ser de madera dura, creosotada o preservada con pintura; de fundición; de aluminio; de hierro esmaltado; de azulejos o de sillería. Los números o divisiones pueden ser pintados, o en relieve.

Pueden ser verticales o inclinadas. Las primeras se colocan con las divisiones ya hechas. Las segundas hay que graduarlas después de colocadas.

Las divisiones se hacen en metros, decímetros y centímetros, de modo que la lectura sea fácil y sin peligro de equivocación.

El cero de las escalas debe colocarse al mismo nivel de la solera de los depósitos, o en la cota del lecho del río en los embalses. Hay que relacionarlo con un punto invariable del terreno referido a su vez a un punto de la nivelación de precisión del Instituto Geográfico Catastral.

A veces, cuando la altura total a medir es muy grande y no disponemos de un paramento plano donde fijar la escala (presas, bóvedas), hay que recurrir a instalar una serie de escalas, de no mucha altura para evitar alabeos, y cuyo extremo superior rebase en unos centímetros el origen de la siguiente para tener la garantía de que no perderemos la lectura de ningún nivel de agua.

Las escalas, al no disponer de transmisiones de datos, solamente se suelen utilizar para lecturas de comprobación de limnímetros que sí estén equipadas de transmisión, o como lectura de sustitución en caso de avería de éstos.

El error de lectura puede llegar a ser de varios centímetros, cuando hay oleaje en la superficie. En cualquier caso la lectura depende del grado de apreciación del sujeto encargado de su lectura.

2.2 Instrumentos de flotador.

Consisten en un flotador situado en el seno del líquido y conectado exteriormente a un indicador de nivel. El flotador suele ser una esfera metálica hueca o discos de material sintético.

A través de un cable , una polea y un contrapeso, los desplazamientos del flotador se señalan en una escala graduada.

Existen instrumentos de flotador que permiten una medida eléctrica directa, convirtiendo la variación del nivel del agua en un desplazamiento, el cual se transforma en

©: Quedan reservados todos los derechos. (Ley de Propiedad Intelectual del 17 de noviembre de 1987 y Reales Decretos).
Documentación elaborada por el autor/a para EOI.
Prohibida la reproducción total o parcial sin autorización escrita de EOI.

una señal eléctrica por medio de transductores eléctricos de desplazamiento (potenciómetros, etc.).

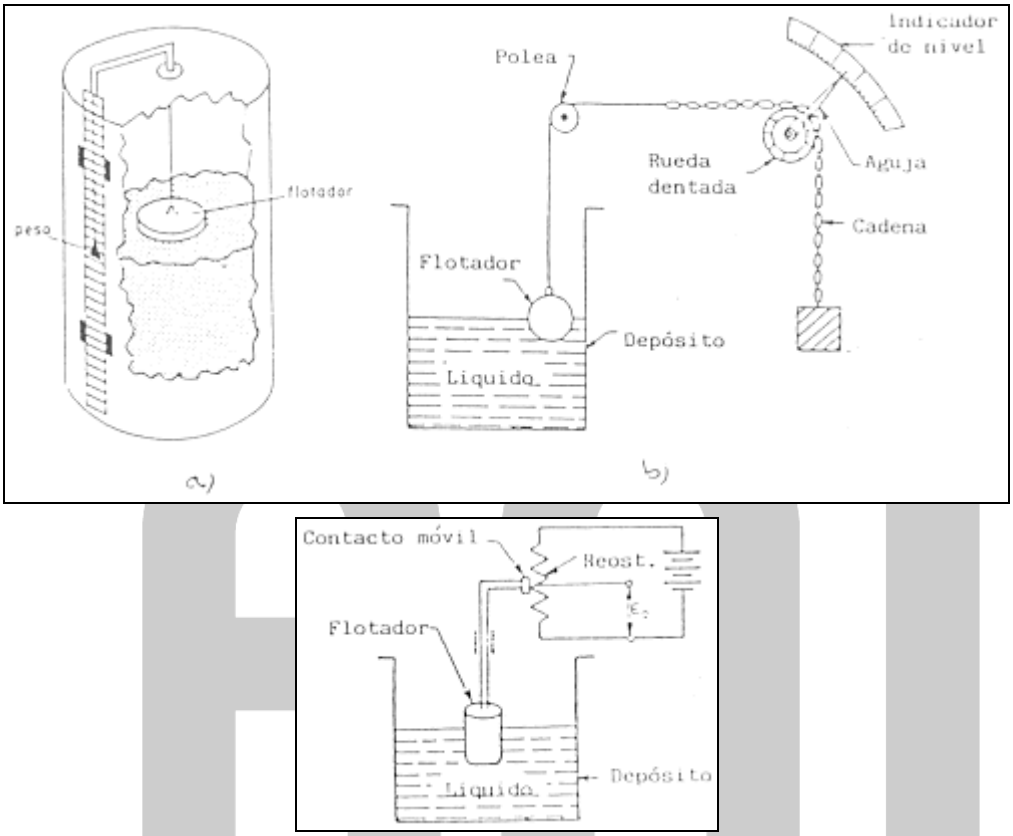


FIGURA 2.2

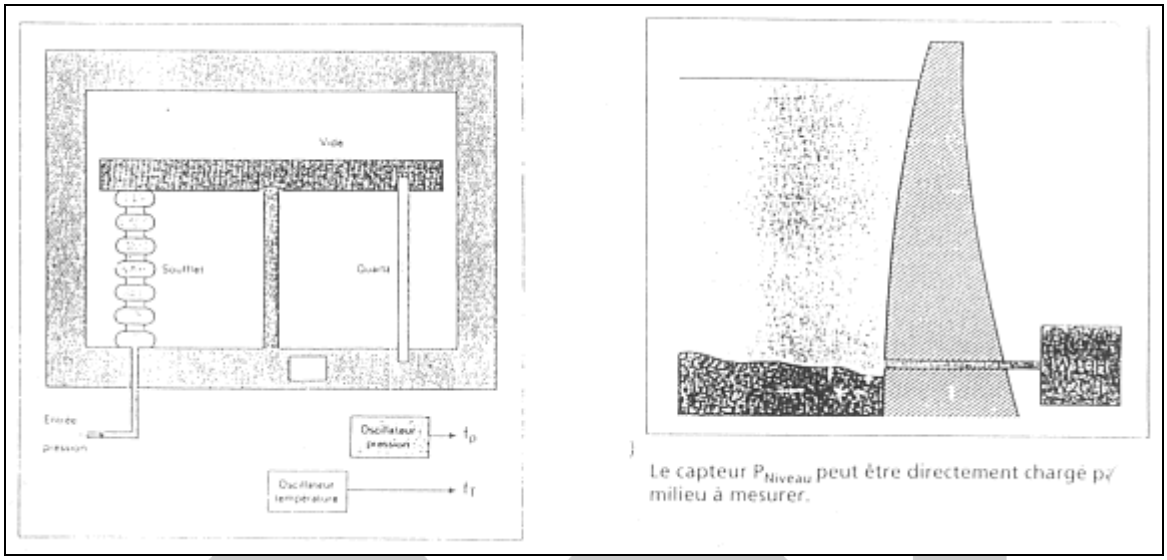
Estos instrumentos pueden ser utilizados en medidas de nivel que no requieran gran precisión (azudes de derivación).

2.3 Limnimetros de tipo hidrostático.

Se emplean para realizar la medida de nivel con gran precisión. Se fundamentan en que la presión de la columna líquida a medir se aplica directamente sobre el sensor.

La presión de la columna de agua actúa sobre un fuelle metálico de precisión, prácticamente sin histéresis, que la transforma en una fuerza. Esta fuerza se transmite mediante un brazo de palanca a un oscilador de cuarzo instalado bajo vacío; la variación de presión provoca una modificación en la frecuencia de resonancia, la cual es medida con alta precisión por la electrónica de tratamiento

©: Quedan reservados todos los derechos. (Ley de Propiedad Intelectual del 17 de noviembre de 1987 y Reales Decretos).
Documentación elaborada por el autor/a para EOI.
Prohibida la reproducción total o parcial sin autorización escrita de EOI.



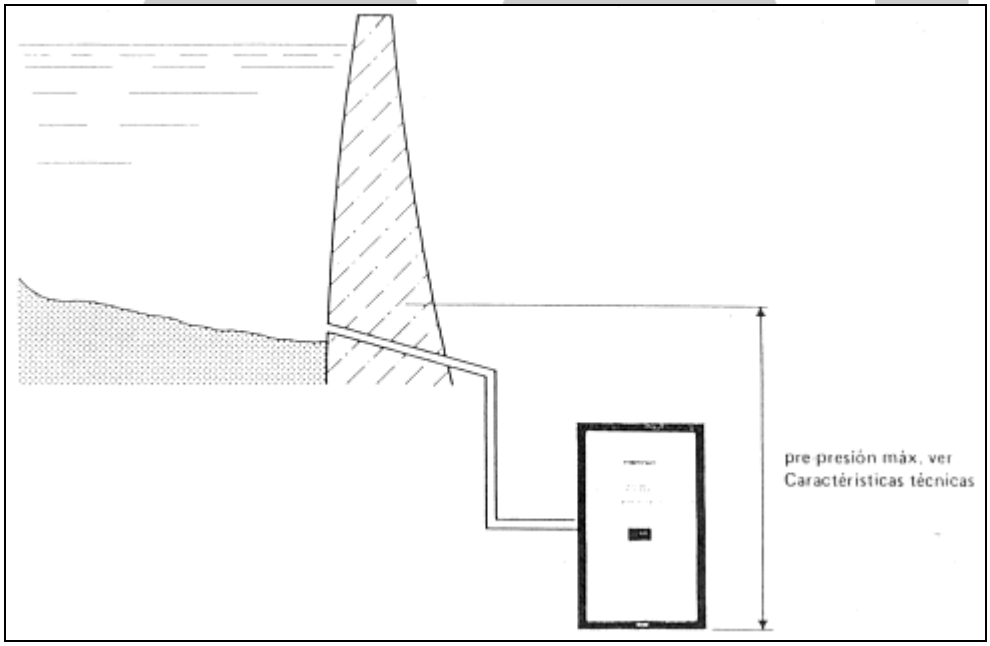


FIGURA 2.3

Se incorpora internamente un sensor de temperatura que actúa sobre la electrónica de tratamiento, corrigiendo las posibles diferencias de medida derivadas de la variación de la temperatura.

Al equipo se le incorpora un microprocesador para ofrecer la posibilidad de tomar la señal bien en código BCD, o bien en código GRAY. También puede sacar la señal analógica (de 0 a 20 m A) aunque no suele utilizarse por la escasa precisión que da en los altos rangos a medir.

©: Quedan reservados todos los derechos. (Ley de Propiedad Intelectual del 17 de noviembre de 1987 y Reales Decretos).
Documentación elaborada por el autor/a para EOI.
Prohibida la reproducción total o parcial sin autorización escrita de EOI.

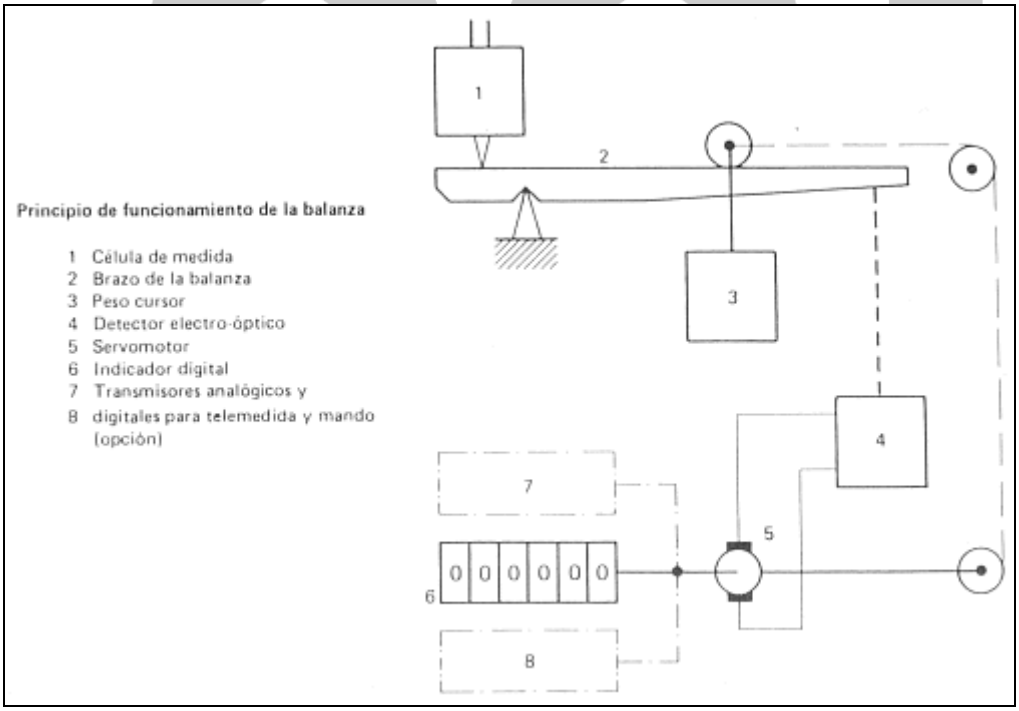
Para las salidas en BCD o en GRAY, el equipo incorpora 26 bits utilizables. Dado que el código BCD utiliza 4 bits por cada dígito, se pueden representar hasta 6 dígitos, con lo que tendríamos lectura hasta los milímetros, no obstante, se limita a los centímetros para evitar demasiadas oscilaciones.

La precisión del equipo se sitúa en el 0,015%.

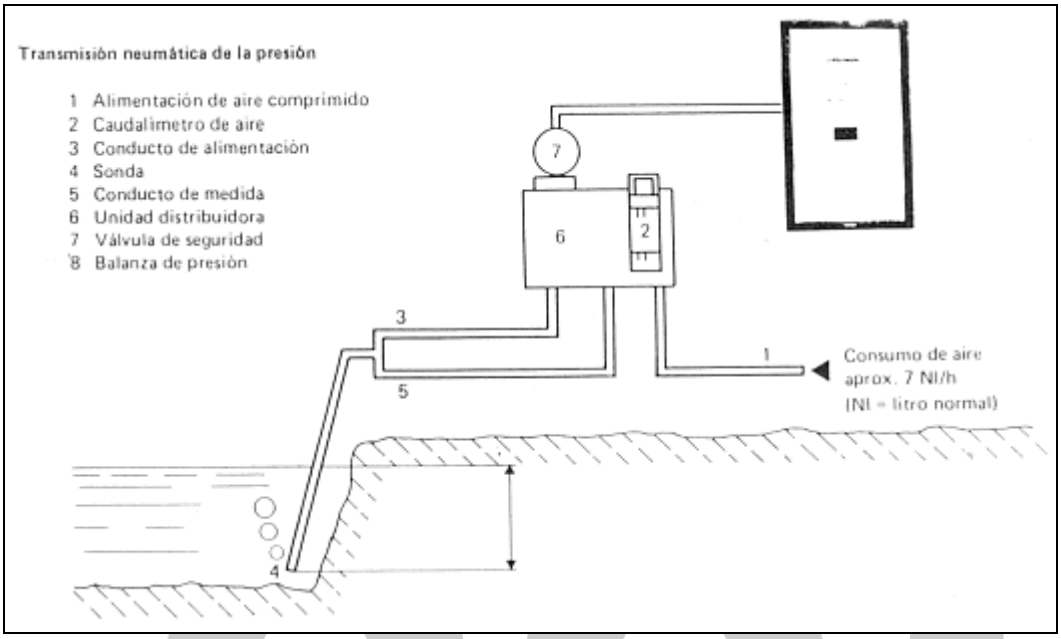
La balanza se tiene que situar muy próxima al nivel mínimo a medir, por ello, su utilización está expresamente indicada en embalses que disponen de torre de toma, ya que si se sitúa en un desagüe de fondo, su medida se altera notablemente al circular el agua por dicho conducto.

2.4 Limnímetros de tipo neumático.

El método en que se basan estos instrumentos es básicamente igual que los de tipo hidrostático. La diferencia esencial consiste en que el sensor no está en contacto directo con el medio a medir, siendo necesario un compresor auxiliar que genere la presión suficiente para vencer la ejercida por la columna líquida e iniciar el burbujeo.



©: Quedan reservados todos los derechos. (Ley de Propiedad Intelectual del 17 de noviembre de 1987 y Reales Decretos).
Documentación elaborada por el autor/a para EOI.
Prohibida la reproducción total o parcial sin autorización escrita de EOI.



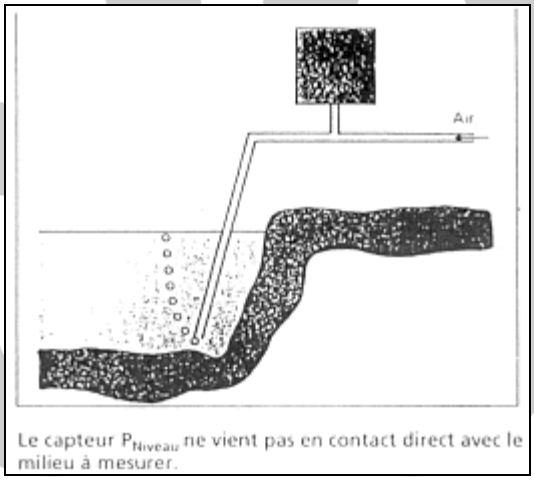


FIGURA 2.4

Tiene la ventaja sobre los de tipo hidrostático de poderse situar la balanza tanto por encima del nivel máximo como por debajo del nivel mínimo a vigilar.

Admite distancias horizontales y verticales de varios cientos de metros entre el equipo y el punto de medida.

Tiene las mismas características que el sistema hidrostático en cuanto al sensor se refiere, corrección de temperatura, microprocesador, códigos de salida y precisión.

Su utilización está muy indicada en embalses de gran altura, aunque no tengan torre de toma, facilitándonos el nivel con error menor al cm.

©: Quedan reservados todos los derechos. (Ley de Propiedad Intelectual del 17 de noviembre de 1987 y Reales Decretos).
Documentación elaborada por el autor/a para EOI.
Prohibida la reproducción total o parcial sin autorización escrita de EOI.

2.5 *Equipos de medida de altura por ultrasonido.*

Se basan en la emisión de un impulso ultrasónico hacia la superficie libre del agua por medio de un transmisor. El impulso se refleja en la superficie del agua y es detectado por un receptor .

El tiempo transcurrido entre la emisión del sonido y la recepción del eco depende de la altura de la lámina superficial del agua. Los sensores trabajan con una frecuencia ligeramente superior a 20 KHz.

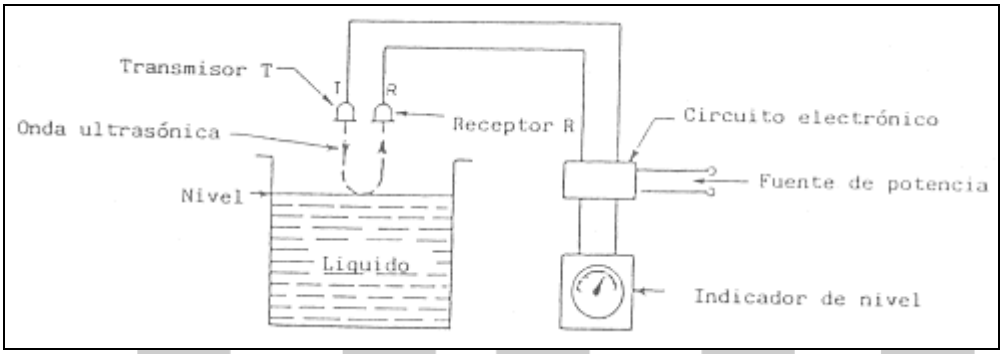


FIGURA 2.5

La precisión del aparato está en torno al 0,25%. Pueden dar señales erróneas si la superficie del agua tiene espuma, ya que se producen ecos falsos de los ultrasonidos . Su utilización está indicada en depósitos.

2.6 *Equipos de medida de altura por sensor de cuarzo.*

Constan de un manómetro digital de cuarzo con alta precisión en la medida de presiones, y de sus variaciones, ejercidas sobre el oscilador de cuarzo por un sistema de microleva. La señal digital de frecuencia se trata electrónicamente para darle salida digital, analógica, en código GRAY o binario, según necesidades. El efecto de la temperatura se compensa captando ésta en el propio sensor mediante un termistor. El valor se emite como señal de frecuencia y se introduce en la electrónica para el cálculo correcto de la presión y por tanto de altura de columna de agua.

Se utiliza para medir hasta 10 m. c. a., ya que su precisión está en el 0,5%, con lo que el error sería menor a 1 cm.

2.7 *Equipos de medida de alturas por el principio piezoresistivo.*

Basados en la transformación de la dimensión mecánica presión en una magnitud eléctrica. Esta transformación se realiza a partir de la curvatura elástica de una membrana de silicio cristalino. La membrana actúa con su deformación sobre un puente de Wheatstone, el cual varía su resistencia. Este cambio es evaluado por un microprocesador, que compensa la influencia de la temperatura. El convertidor electrónico de medida trata a continuación la señal proporcional a la presión y la transmite a la unidad electrónica como señal digital.

©: Quedan reservados todos los derechos. (Ley de Propiedad Intelectual del 17 de noviembre de 1987 y Reales Decretos).
Documentación elaborada por el autor/a para EOI.
Prohibida la reproducción total o parcial sin autorización escrita de EOI.

Se utiliza en rangos reducidos de lámina con menos de 10 m. de altura ya que el error es del 0,5%.

Su coste es unas 10 veces menor que los limnímetros hidrostáticos o neumáticos.

3. Caudales.

Cuando necesitemos conocer los recursos hidráulicos de una cuenca, la capacidad de una conducción, las demandas de los usuarios, etc. es decir, el caudal disponible o requerido en diversos puntos del sistema, será preciso realizar una serie de aforos para determinar el caudal que circula por cada uno de dichos puntos, y en función de sus características emplearemos el método más adecuado. Aunque hay múltiples métodos para aforar, aquí sólo vamos a reseñar los más utilizados normalmente y que mejores resultados ofrecen.

3.1 Aforo por método volumétrico.

Es el más exacto, con la condición de que el depósito sea bastante grande y conozcamos su capacidad del modo más preciso posible (formas geométricas), y podemos valorar con certeza las pérdidas por evaporación y filtración, en caso de que las haya.

Se hace desembocar la corriente en el depósito y dividiendo el volumen llenado V (m^3) entre el tiempo t(s) transcurrido, tendremos el caudal Q de entrada expresado en m^3/s.

En el caso de ríos con embalses, estos constituyen un excelente punto para aplicar este método, con tal de que se conozca bien la relación volumen/altura del vaso y además las pérdidas por desagües, filtraciones y evaporación. El caudal de aportación del río en el embalse vendrá dado por el algoritmo:

Q río = (Δ volumen embalse)/tiempo + $\sum$ Q salidos.

Es importante insistir en la homogeneidad de las unidades empleadas, que deberán ser el m^3 para los volúmenes y el m^3/s. para los caudales. Si tuviéramos el caudal de alguna filtración expresado en litros/minutos, hay que pasarlo a m^3/s. para no incurrir en errores.

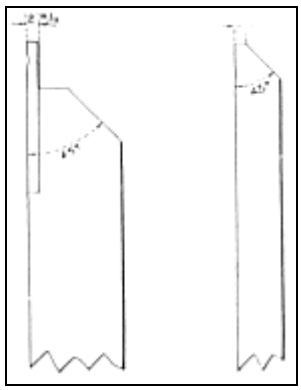
Podemos observar que el parámetro a controlar en este sistema de aforo es la variación de la altura, ya sea del depósito, ya del embalse, en un tiempo determinado; por lo que los instrumentos de medición vistos en el apartado 2.1.- Volúmenes, son de plena aplicación a este sistema de aforos. Al tener que controlar el tiempo, también necesitamos un cronómetro.

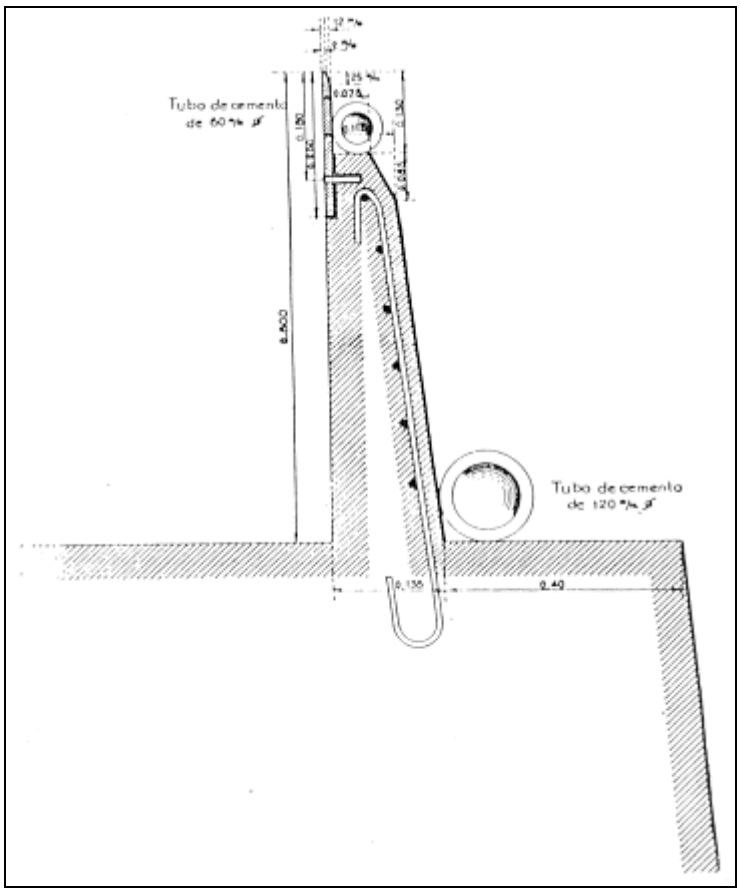
3.2 Aforos por vertedero.

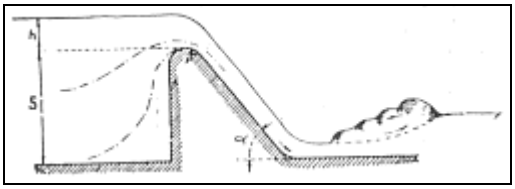
Un vertedero es una obstrucción colocada en un canal que obliga al agua a retenerse detrás y verter por encima de él. Midiendo la altura de la superficie del agua, aguas arriba del vertedero, se puede determinar el caudal circulante por el canal.

Si la lámina del agua sólo toca en una arista de la cresta, se le llama vertedero en pared delgada; y en cambio si toca en una parte de la cresta, se le llama vertedero en pared gruesa.

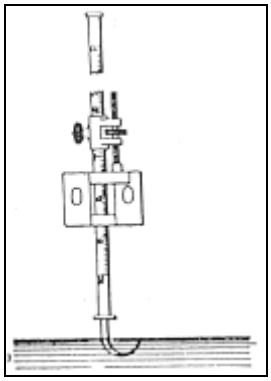
©: Quedan reservados todos los derechos. (Ley de Propiedad Intelectual del 17 de noviembre de 1987 y Reales Decretos).
Documentación elaborada por el autor/a para EOI.
Prohibida la reproducción total o parcial sin autorización escrita de EOI.

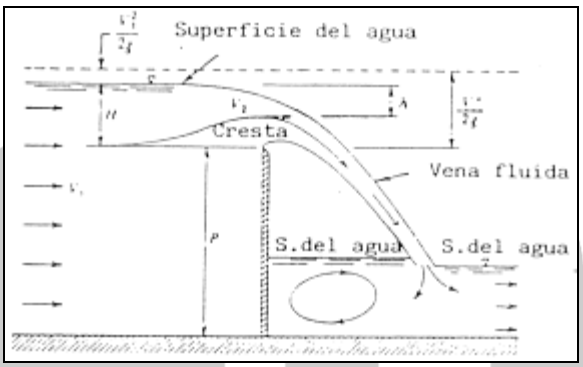


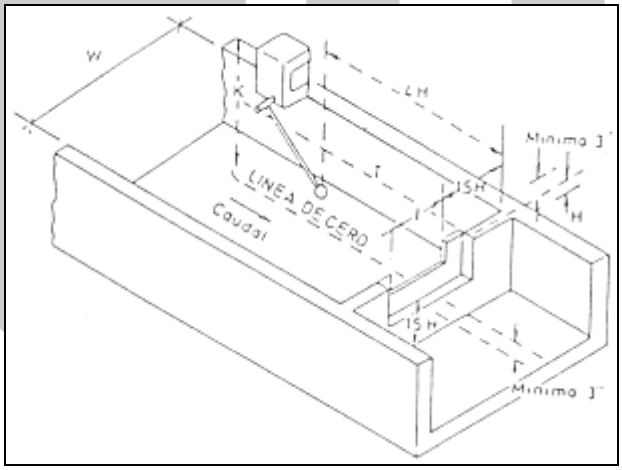




©: Quedan reservados todos los derechos. (Ley de Propiedad Intelectual del 17 de noviembre de 1987 y Reales Decretos).
Documentación elaborada por el autor/a para EOI.
Prohibida la reproducción total o parcial sin autorización escrita de EOI.







©: Quedan reservados todos los derechos. (Ley de Propiedad Intelectual del 17 de noviembre de 1987 y Reales Decretos).
Documentación elaborada por el autor/a para EOI.
Prohibida la reproducción total o parcial sin autorización escrita de EOI.

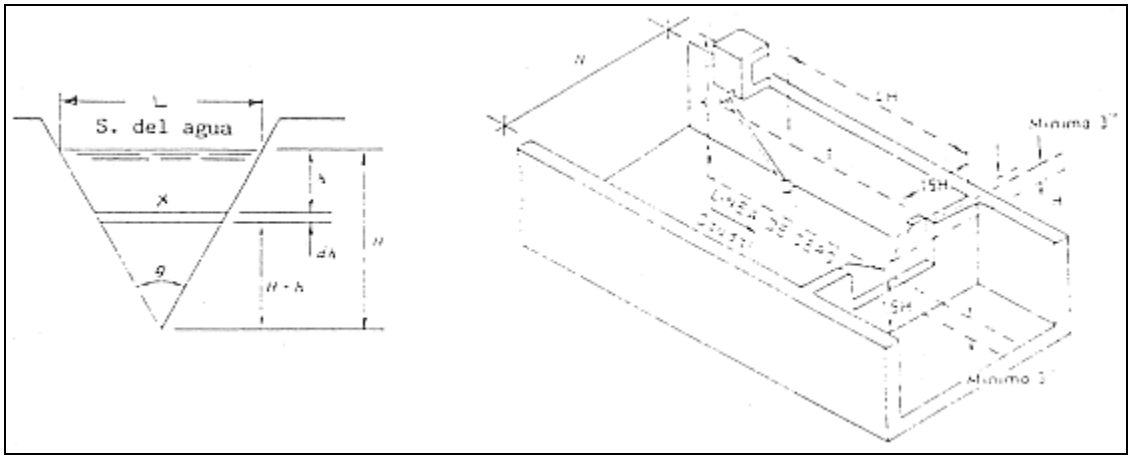


FIGURA 3.1

3.2-a. En pared delgada.

Se ha de disponer en lámina libre, de forma que en la parte inferior se establezca la presión atmosférica; si el vertedero tiene contracción lateral la ventilación se crea naturalmente, pero si es sin contracción lateral hay que proporcionarle artificialmente la suficiente aducción de aire.

El vertedero ha de construirse perpendicularmente al eje del caudal, y su labio horizontal. Si es de contracción lateral, la escotadura rectangular se coloca en el centro de la pantalla. Aguas arriba del vertedero el canal debe ser rectilíneo en una distancia ∃ 10 veces su anchura.

La fórmula clásica de los vertederos es:

$Q = 2/3\ \mu\ b\ h\ (2gh)^{1/2}$

siendo:

Q = caudal en m³/s.

μ = un coeficiente de descarga < 1

b = ancho del vertedero en m.

h = espesor en m. de la lámina vertiente, medida antes de producirse la depresión superficial.

g = 9,8 m/s².

El coeficiente de descarga μ tiene en cuenta los rozamientos y la contracción de la vena líquida por encima del vertedero, y su valor varía entre 0,62 y 0,75 en relación entre la altura de la vena líquida h frente a la altura propia del vertedero P. Cuando el vertedero rectangular no ocupa toda la anchura del caudal, aparecen contracciones laterales en la vena líquida, que hacen que la anchura efectiva a considerar sea b - 0,2 h, ya que existe una reducción de la vena líquida de 0,1 h en cada lado de la misma.

©: Quedan reservados todos los derechos. (Ley de Propiedad Intelectual del 17 de noviembre de 1987 y Reales Decretos).
Documentación elaborada por el autor/a para EOI.
Prohibida la reproducción total o parcial sin autorización escrita de EOI.

Teniendo en cuenta todos estos factores y tomando un valor medio de 0,6234 para μ se llega a la expresión práctica de :

$Q = 1,84 (b - 0,2 h) h^{3/2}$

Como la anchura b es conocida de antemano, sólo tendremos que medir la altura h para obtener el caudal. Para realizar las medidas de h son muy indicados los equipos por ultrasonido, por sensor de cuarzo o piezoresistivos. Los vertederos rectangulares son muy adecuados para medir caudales comprendidos entre 0,100 m³/s. y 2,500 m³/s.

Para caudales más pequeños de 0,1 m³/s. se deben utilizar vertederos triangulares.

3.2-b. En pared gruesa.

Estos vertederos dan mucha menos exactitud que los de pared delgada, debido a que el coeficiente de descarga μ depende en gran manera del perfil transversal de la pared. Tanto es así, que en un vertedero con sección transversal rectangular μ puede valer del orden de 0,55, mientras que si redondeamos la cresta y ponemos el paramento de aguas abajo inclinado 45E, μ subirá hasta valores próximos a 0,83. Se acude a este sistema de aforo aprovechando algún azud o presa existente en el río, porque nunca se va a construir una estación de aforo con este sistema.

La fórmula a aplicar es la misma que en el caso de la pared delgada, únicamente el coeficiente μ variará sensiblemente.

Los aparatos para medir h, pueden ser los mismos que se han indicado para los vertederos en pared delgada, aunque creemos que debido a la poca exactitud del propio aforo, sea excesivo dedicar un aparato costoso, pudiendo ir bastante bien en esos casos una simple escala.

3.3 Aforos por estrangulación de la corriente.

Consisten en un estrechamente lateral del canal y un escalón en forma de rampa en el fondo. Por su parecido con el aforo "Venturi" en tuberías, también se les llama "Venturi" en canales.

El más conocido es el aforador norteamericano "Parshall", basado en estudios experimentales profusos que han conducido a una fórmula empírica del caudal:

$Q = 0,37 b (3,28 h)^{1,567 b 0,026}$

Siendo Q el caudal en m³/s., b el ancho del estrechamiento en metros, y h la altura del agua en el punto de observación.

©: Quedan reservados todos los derechos. (Ley de Propiedad Intelectual del 17 de noviembre de 1987 y Reales Decretos).
Documentación elaborada por el autor/a para EOI.
Prohibida la reproducción total o parcial sin autorización escrita de EOI.

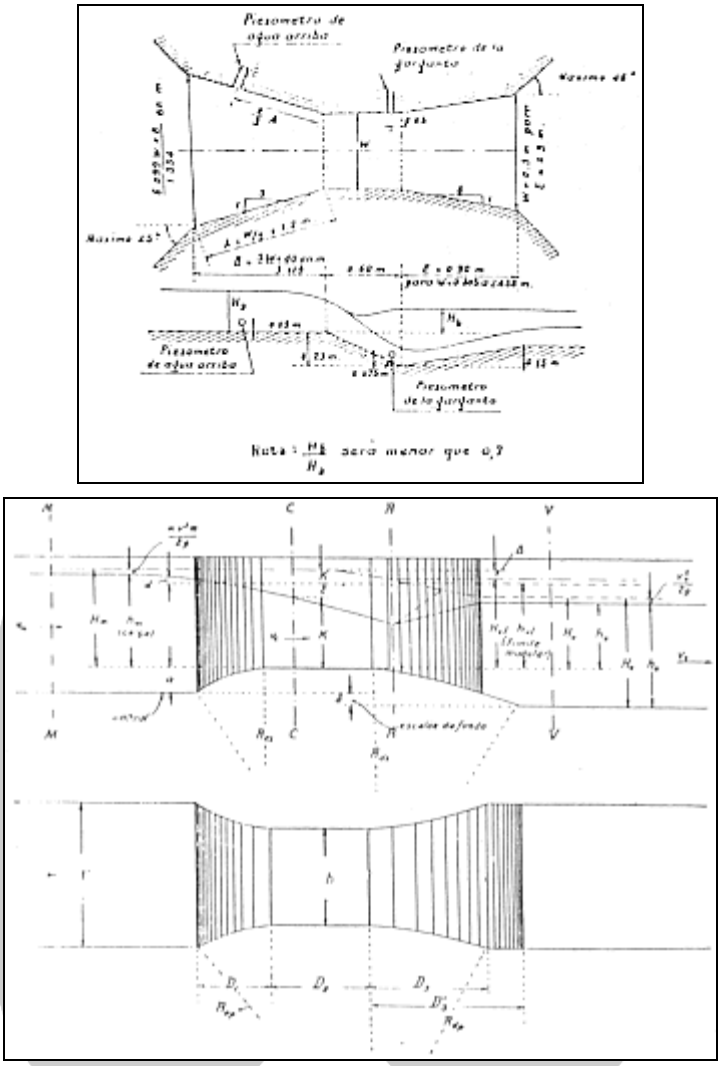


FIGURA 3.2

Presentan la ventaja sobre los vertederos de tener menos pérdida de carga y no existir órganos delicados ni fáciles de alterar. Ha de construirse de acuerdo con las características y medidas tipo.

Su empleo está muy indicado en el tratamiento de aguas residuales, ya que en un vertedero los sólidos arrastrados se decantarían detrás del muro, mientras que en el Parshall son arrastrados por la propia corriente.

3.4 Aforos por molinete.

Constituyen un método de aforo excelente de gran exactitud. Están condicionados a que el molinete pueda ser introducido en la corriente.

El molinete consiste en una rueda hélice, que gira por la presión debida a la velocidad del agua; la rueda se orienta en la dirección de los filetes líquidos por un timón. El

©: Quedan reservados todos los derechos. (Ley de Propiedad Intelectual del 17 de noviembre de 1987 y Reales Decretos).
Documentación elaborada por el autor/a para EOI.
Prohibida la reproducción total o parcial sin autorización escrita de EOI.

eje de esta rueda transmite su movimiento, a través de engranajes, a un excéntrico que establece sucesivos contactos en un circuito eléctrico (alimentado por pilas) que transmite las indicaciones a un contador de vueltas.

La velocidad del agua se determina en función del número de vueltas, en virtud de una ecuación propia de cada aparato.

En esencia, los aforos con molinete consisten en determinar la velocidad del agua en una sección de control de la corriente y en función de estos dos paramentos determinar el caudal (Q = S x V).

La sección de control no presenta problema alguno en canales regulares cuya sección transversal se mantiene constante; sin embargo, en los ríos hay que establecer la sección de control en un lugar donde el curso del río sea estable, es decir, con pequeños cambios en el fondo y en las laderas del lecho de la corriente, y en el que nos sea fácil determinar la forma de dicha sección.

Tanto en un caso como en otro, hay que "barrer" la sección del control con una serie de lecturas de velocidad del agua en diversos puntos de esta sección situados en los de cruce de una retícula de horizontales y verticales.

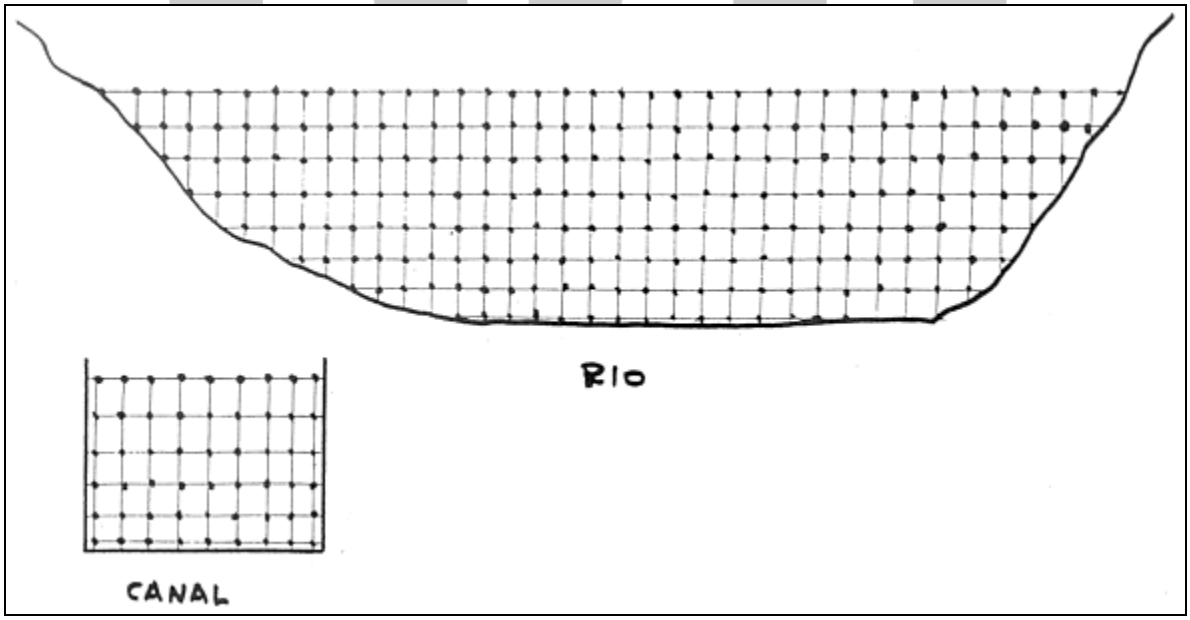


FIGURA 3.2 A

Por cada vertical se tomará la velocidad en diversos puntos de la misma, al objeto de determinar la velocidad media de esta vertical.

©: Quedan reservados todos los derechos. (Ley de Propiedad Intelectual del 17 de noviembre de 1987 y Reales Decretos).
Documentación elaborada por el autor/a para EOI.
Prohibida la reproducción total o parcial sin autorización escrita de EOI.

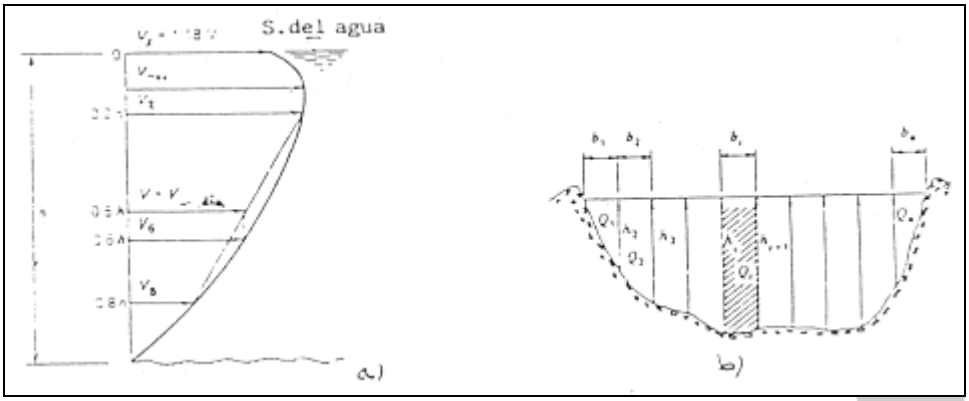


FIGURA 3.3

El perfil típico de velocidades indica que la distribución de velocidades es parabólica, con una velocidad máxima que se produce a una determinada profundidad de la corriente. La velocidad en la superficie es del orden de 1,18 veces la velocidad media de dicha vertical. Esta velocidad media se produce en un punto ligeramente más bajo que la profundidad media (0,6 H aproximadamente). Por ello, una forma de calcular la velocidad media es considerar que es la media aritmética de las velocidades medidas a profundidades 0,2 H y 0,8 H, obteniéndose resultados muy aceptables.

Para medir el caudal en la sección de control se utiliza el método de dividir la sección transversal en bandas verticales. En cada banda obtendremos su velocidad media y conoceremos su altura y la distancia a la banda inmediata. El caudal determinado por dos bandas verticales lo calcularemos tomando como velocidad media, la media de las correspondientes a cada banda y de igual modo con la altura media. Así, el caudal en la zona rayada de la figura 3.3-b será:

$$Q_i = b_i \left(\frac{h_i + h_{i+1}}{2} \right) \left(\frac{V_i + V_{i+1}}{2} \right)$$

Y el caudal total se la sección será la suma de los obtenidos con las diferentes bandas:

$$Q = \sum_{i=1}^{i=n} Q_i$$

Es evidente que para obtener el caudal con precisión es necesario realizar las medidas de velocidad en un gran número de puntos.

Una vez realizados gran número de aforos en la sección de control, se determinará la curva de gasto (altura/caudal) de la misma, la cual nos servirá para determinar el caudal circulante con sólo medir el dato de la altura o calado de la corriente.

Resulta imprescindible contar con Estaciones de Aforo en ríos y canales, en las que por lectura directa de la altura de la lámina de agua, por medio de cualquiera de los

©: Quedan reservados todos los derechos. (Ley de Propiedad Intelectual del 17 de noviembre de 1987 y Reales Decretos).
Documentación elaborada por el autor/a para EOI.
Prohibida la reproducción total o parcial sin autorización escrita de EOI.

instrumentos existentes al efecto, tengamos el caudal circulante en un determinado momento. En estas Estaciones de Aforo se suelen construir pozos tranquilizadores, laterales a la corriente y comunicados con ella, en los que se instalan los instrumentos de medida de nivel, al objeto de amortiguar las turbulencias superficiales del agua y de ese modo lograr una mayor exactitud en la medida.

En aquellas estaciones de aforo cuya lectura no sea necesaria obtenerla en tiempo real, se puede instalar un "limnígrafo" que es un medidor que deja registrada la altura en un gráfico. Presenta el inconveniente de que hay que cuidar de cambiar el papel periódicamente y de que la plumilla no se atasque. Hay en día solamente se utiliza por razones económicas, ya que cualquiera de los medidores de altura que se encuentran en el mercado es mucho más fiable.

3.5 Cálculo de caudales por compuertas.

Las compuertas situadas en los aliviaderos y desagües de los embalses o de los canales, controlan la salida del agua de éstos y por lo tanto constituyen un instrumento de medida del caudal evacuado.

Una compuerta determina una sección de desagüe S, en función de su ancho B que es constante, y de la apertura h que tenga en un momento determinado. El caudal que es capaz de desaguar con dicha apertura, también dependerá de la altura H o carga de agua sobre el centro de gravedad de la sección de desagüe, ya que :

$Q = S \times V$; $V = (2gH)^{1/2}$; $S = B \times h$

Por lo tanto, tendremos que tomar dos medidas para obtener el caudal que desagua la compuerta, la apertura de ésta y la carga del agua sobre ella.

La carga de agua sobre la compuerta es de fácil obtención, ya que por un lado, conoceremos la cota a que está situado su umbral, y por otro estamos midiendo a que cota se encuentra el nivel superficial del agua con cualquiera de los aparatos indicados para tal efecto.

Para medir la apertura de la compuerta hay que considerar el tipo de la misma, ya sea:

a) De tipo deslizante

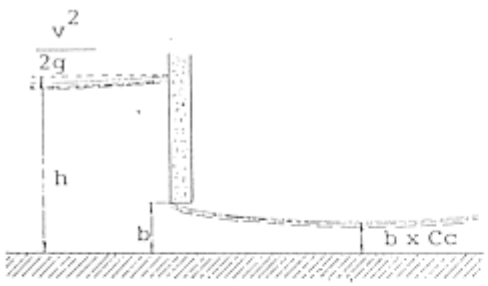
b) De tipo sector.

a) De tipo deslizante.

Habrá que medir el desplazamiento vertical h sobre el umbral en que apoya. El caudal desaguado viene dado por:

$$Q = \frac{\mu \times h}{(1 + \mu h / H)^{1/2}} \times B \times (2gH)^{1/2}$$

©: Quedan reservados todos los derechos. (Ley de Propiedad Intelectual del 17 de noviembre de 1987 y Reales Decretos).
Documentación elaborada por el autor/a para EOI.
Prohibida la reproducción total o parcial sin autorización escrita de EOI.



$$Q = \frac{Cc \times b}{\sqrt{1 + Cc \times \frac{b}{h}}} \times B \times \sqrt{2 \times g \times h}$$

Cc = coeficiente de contracción

b = apertura de compuerta

B = ancho de la compuerta

h = nivel aguas arriba

FIGURA 3.4

b) De tipo sector.

Hay que medir el desplazamiento angular α y transformarlo en el vertical h. El caudal desaguado será:

$$Q = \mu \times B \times h(2g(H - \mu h))^{1/2}$$

©: Quedan reservados todos los derechos. (Ley de Propiedad Intelectual del 17 de noviembre de 1987 y Reales Decretos).
Documentación elaborada por el autor/a para EOI.
Prohibida la reproducción total o parcial sin autorización escrita de EOI.

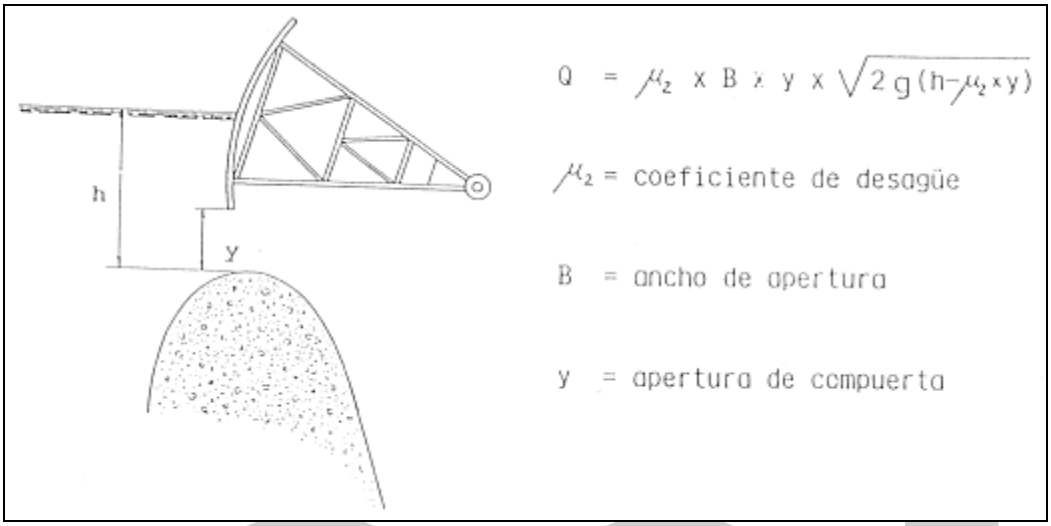


FIGURA 3.5

En ambos casos hay que captar el desplazamiento lineal o angular y transformarlo en un % del desplazamiento total de la compuerta.

3.6 Cálculo de caudales por válvulas.

Las válvulas reguladoras de caudal tienen un obturador que regula la sección de paso del agua en la conducción. En función del grado de apertura de ese regulador se obtendrán distintos caudales. Las válvulas más empleadas para regular caudal son:

- De mariposa
- Honel-Bunger o chorro hueco
- Larner Johnson o de aguja

Para todas ellas, el fabricante facilita una curva característica de la válvula que permite obtener el caudal.

$Q = f(P, \alpha)$

Siendo P la presión que ejerce el agua en la válvula y α la posición o apertura de la válvula.

3.7 Medida de caudales en conducciones forzadas.

Para obtener el caudal circulante en un conducción forzada o en carga, existen una serie de instrumentos que determinan el caudal. Los más usados y precisos son:

a) Diafragma

b) Tubo Venturi

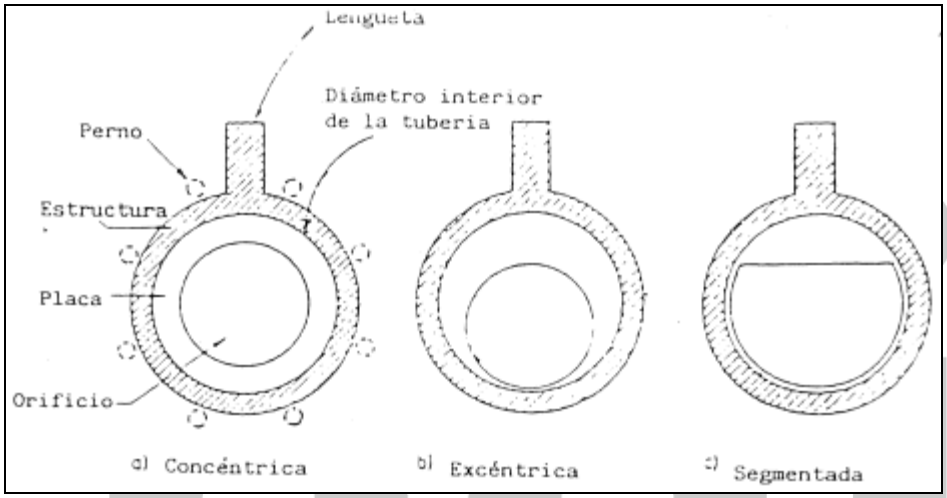
c) Tubo Pitot

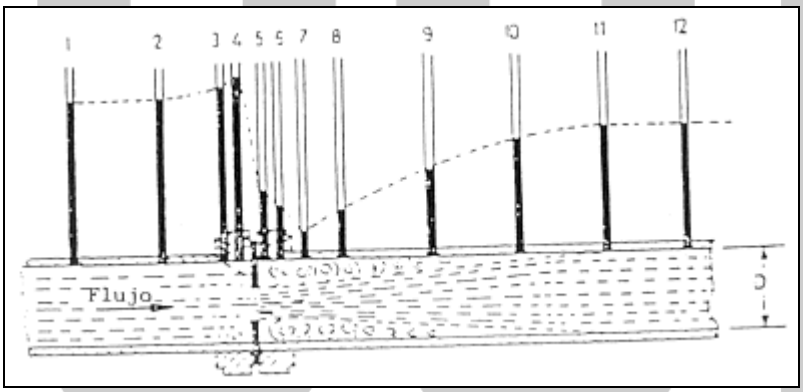
d) Medidor ultrasónico

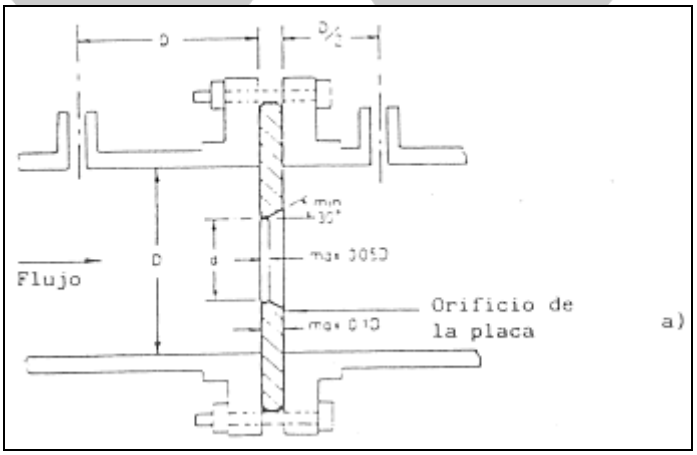
a) Diafragma o placa orificio.

©: Quedan reservados todos los derechos. (Ley de Propiedad Intelectual del 17 de noviembre de 1987 y Reales Decretos).
Documentación elaborada por el autor/a para EOI.
Prohibida la reproducción total o parcial sin autorización escrita de EOI.

Es un medidor de caudal por obstrucción, consistente en una placa orificio colocada en la tubería que provoca un incremento en la velocidad del agua con una reducción en la presión.







©: Quedan reservados todos los derechos. (Ley de Propiedad Intelectual del 17 de noviembre de 1987 y Reales Decretos).
Documentación elaborada por el autor/a para EOI.
Prohibida la reproducción total o parcial sin autorización escrita de EOI.

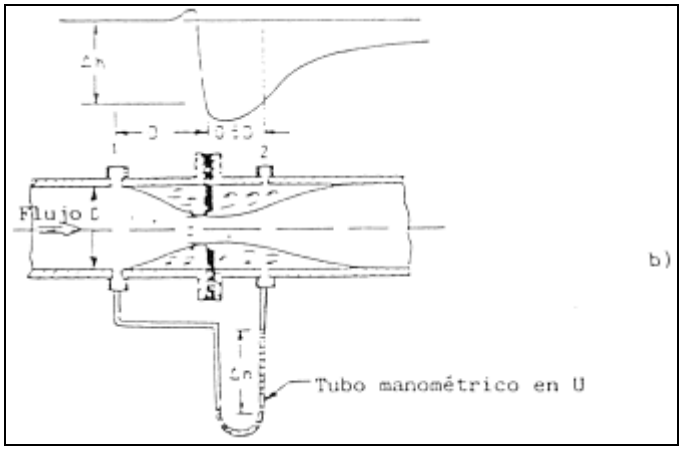


FIGURA 3.6

La sección transversal del flujo se reduce detrás de la placa orificio donde se tiene la velocidad máxima y la presión mínima (vena contraída).

El diafragma es una placa metálica delgada, que presenta una perforación en su superficie. De acuerdo con la forma del agujero se clasifican en : concéntricas, excéntricas y segmentadas. El tipo concéntrico es el más utilizado.

Las tomas de presión, para tuberías Ǿ > 0,05 m., se colocan a distancia D y D/2 por delante y por detrás, respectivamente, de la placa orificio, siendo D el diámetro de la tubería. Se puede considerar que la toma situada detrás de la placa esté ubicada prácticamente en la zona de la vena contraída.

El caudal que pasa por la tubería será:

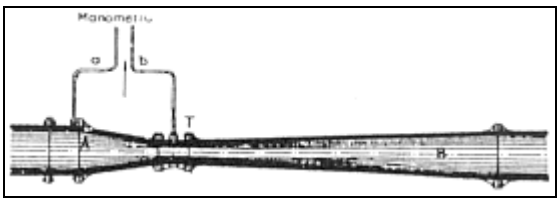
$Q = C\ A_o\ (2g\ \Delta\ h)^{½}$

siendo C un factor llamado coeficiente de orificio, A_o el área del orificio y Δh la diferencia de presión entre las dos tomas.

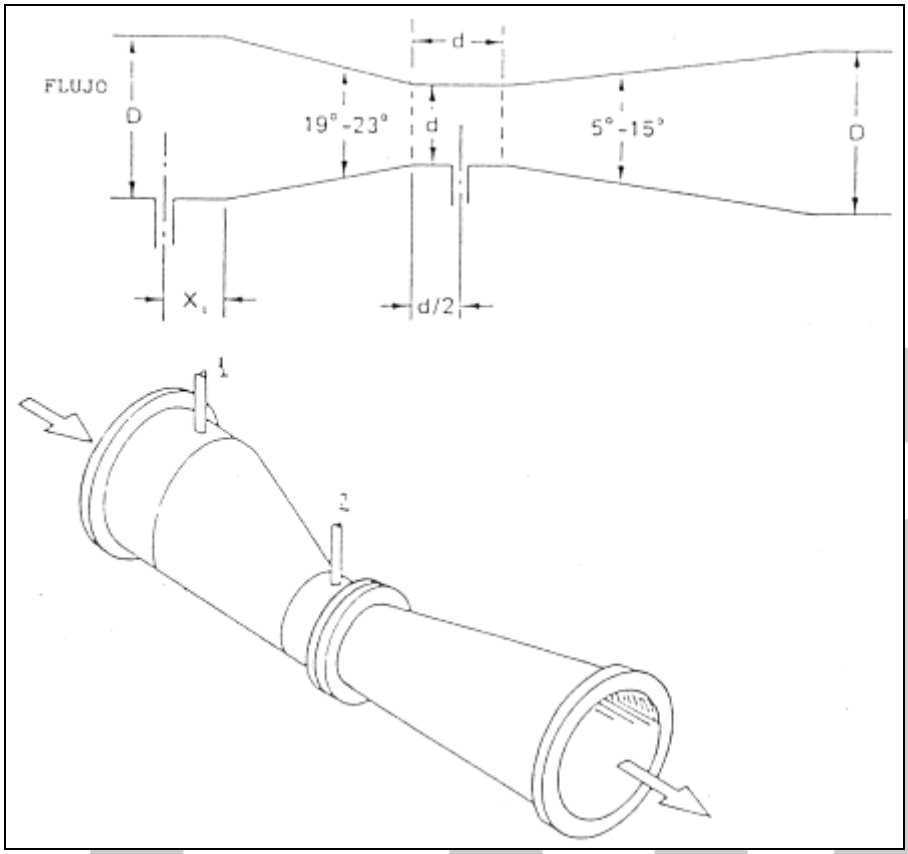
El coeficiente de orificio depende del coeficiente de descarga C_d, del coeficiente de contracción C_c y de la relación de superficies A_o/A_t (A_t sección de la tubería).

b) Tubo Venturi.

Está formado por dos troncos de cono, uno convergente A y otro divergente B, unidos por la sección más estrecha mediante manguito cilíndrico; además dispondrá de dos tomas de presión, una antes del tronco de cono A y otra en el cilindro M.



©: Quedan reservados todos los derechos. (Ley de Propiedad Intelectual del 17 de noviembre de 1987 y Reales Decretos).
Documentación elaborada por el autor/a para EOI.
Prohibida la reproducción total o parcial sin autorización escrita de EOI.



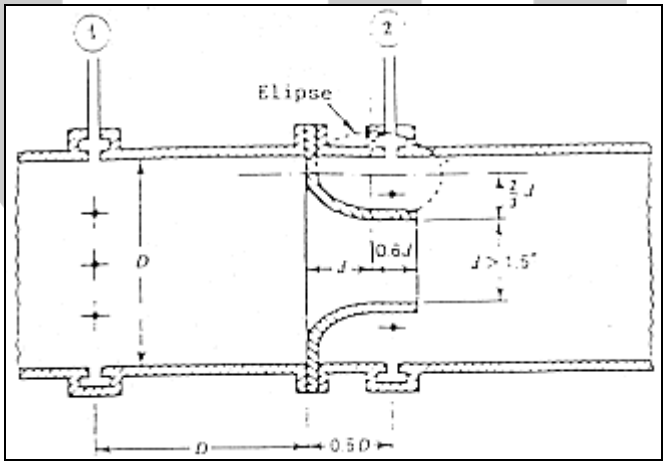


FIGURA 3.7

La medida de caudal se fundamente en el teorema de Bernouilli, por el que tendremos:

$$\frac{V_1^2}{2g} + P_1 = \frac{V_2^2}{2g} + P_2 + \lambda$$

©: Quedan reservados todos los derechos. (Ley de Propiedad Intelectual del 17 de noviembre de 1987 y Reales Decretos).
Documentación elaborada por el autor/a para EOI.
Prohibida la reproducción total o parcial sin autorización escrita de EOI.

siendo V_1 y V_2 las velocidades respectivas en las secciones S_1 y S_2, P_1 y P_2 las presiones y λ la pérdida de carga entre las dos secciones.

Como el caudal es constante a lo largo de todo el conducto:

$S_1 V_1 = S_2 V_2$

haciendo $h = P_1 - P_2$ y $K = \left(\frac{h-\lambda}{\lambda}\right)^{1/2}$

tendremos que la velocidad V_1 en la sección S_1 es:

$$V_1 = \frac{S_1 \times S_2}{(S_1^2 - S_2^2)^{1/2}} K(2gh)^{1/2}$$

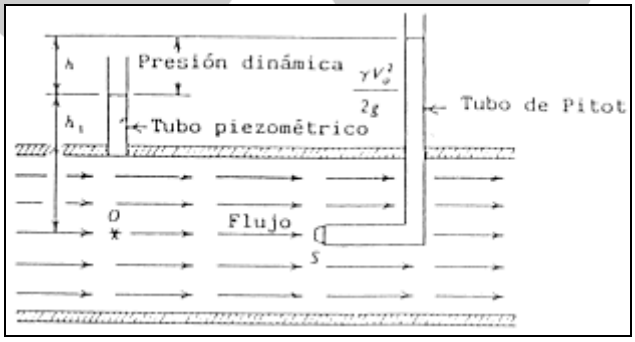
y por lo tanto el caudal circulante:

$Q = S_1 \times V_1$

Cada tubo Venturi viene calibrado de fábrica, ya que K es un coeficiente experimental propio de cada aparato. El caudal se lee directamente en un medidor que incorpora el aparato; lógicamente sólo mide caudales circulantes en el sentido S_1 6 S_2. Para que la lectura sea lo más exacta posible, el tubo debe instalarse en un tramo de conducción que sea rectilíneo y no presente elementos que alteren el régimen (válvulas, bifurcaciones, etc.) en unas distancias mayores o iguales a 20 y 10 veces el diámetro de la conducción, aguas arriba y aguas abajo, respectivamente. El error se sitúa en 0,5%.

c) El tubo Pitot.

Consiste en una sonda cilíndrica que se coloca dentro del agua en movimiento y permite medir su velocidad. La ventaja del Pitot es que puede medir velocidades puntuales dentro del fluido, lo que permite determinar el perfil de distribución de velocidades en la sección transversal de la tubería.



©: Quedan reservados todos los derechos. (Ley de Propiedad Intelectual del 17 de noviembre de 1987 y Reales Decretos).
Documentación elaborada por el autor/a para EOI.
Prohibida la reproducción total o parcial sin autorización escrita de EOI.

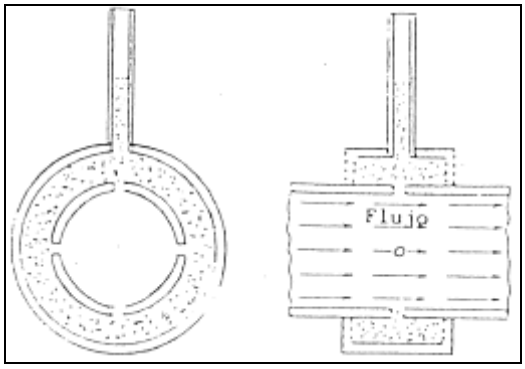


FIGURA 3.8

Conociendo las velocidades en una sección y la geometría de la misma, calcularemos el caudal integrando la velocidad en el área considerada. En este aparato, la altura cinética se convierte en una presión de impacto, de modo que la diferencia entre la presión estática y la de impacto nos da la velocidad del agua.

Aplicando Bernouilli al filete líquido AB, llegaremos a que la velocidad en el punto A valdrá:

$V_A = (2g\,(P_B - P_A))^{1/2} = (2gh)^{1/2}$

Para tener buena exactitud hay que medir la presión estática con gran precisión, mediante un anillo piezométrico.

Generalmente los tubos Pitot miden en único dispositivo las presiones estáticas y de choque, lo que elimina los errores de medida. La figura 3.9 muestra un esquema simplificador de un tubo Pitot comercializado.

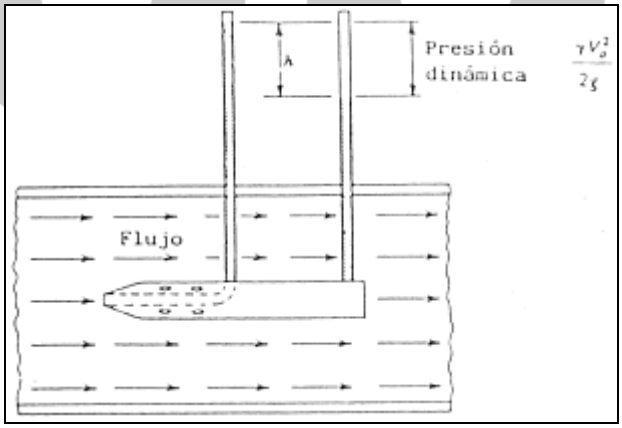


FIGURA 3.9

Ventajas:

- Sencillo y barato
- No provoca pérdidas de carga apreciables en la corriente del agua

©: Quedan reservados todos los derechos. (Ley de Propiedad Intelectual del 17 de noviembre de 1987 y Reales Decretos).
Documentación elaborada por el autor/a para EOI.
Prohibida la reproducción total o parcial sin autorización escrita de EOI.

- Facilidad de colocación, taladrando la tubería
- Muy útil para comprobar medidas hechas con Venturi

Inconvenientes:

- No es adecuado para bajas velocidades debido a la dificultad de leer la presión diferencial P_B - P_A
- Sensible a la falta de alineación de la sonda respecto a la velocidad del agua
- No es adecuado para medidas de velocidades que fluctúen rápidamente.

A semejanza del Venturi solamente lee caudales en el sentido A → B, y requiere unas distancias sin perturbaciones aguas arriba y aguas abajo de 20 y 10 veces el diámetro de la tubería, respectivamente.

d) Medidor ultrasónico.

Se basa en el cambio aparente de la velocidad de propagación de una serie de impulsos de presión sonora en el agua, con el cambio en la velocidad del flujo. Una frecuencia típica en los impulsos de presión sinusoidal es 10 MHz.

Los transductores empleados son básicamente cristales piezo-eléctricos de cuarzo.

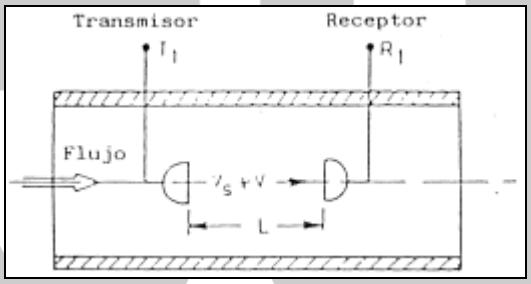


FIGURA 3.10

La figura 3.10 muestra un sencillo esquema de un sistema receptor-transmisor. Cuando la corriente del agua es nula, el tiempo que tarda un impulso para pasar del transmisor al receptor es:

$t_o = L/V_s$

donde L es la distancia entre transmisor y receptor, y

V_s la velocidad del sonido en el agua.

Si el agua se mueve con velocidad V, el tiempo de tránsito es:

$$t = \frac{L}{V_s + t_v}; t \approx \frac{L}{V_s}(1 - \frac{V}{V_s})$$

donde $V << V_s$

si llamamos $\Delta t = t_o - t$ tendremos:

©: Quedan reservados todos los derechos. (Ley de Propiedad Intelectual del 17 de noviembre de 1987 y Reales Decretos).
Documentación elaborada por el autor/a para EOI.
Prohibida la reproducción total o parcial sin autorización escrita de EOI.

$$\Delta t = \frac{L}{V_s} - \frac{L}{V_s}(1 - \frac{V}{V_s}) = \frac{LV}{V_s^2}$$

por lo que conociendo V_s y L, y midiendo el Δt podremos calcular la velocidad V del agua.

El medidor ultrasónico es más tolerante que los Venturi y Pitot, en cuanto a distancias sin perturbaciones se refiere, ya que los fabricantes les cifran en 10 diámetros aguas arriba y 5 aguas abajo.

Este tipo de instrumento permite medir el flujo del agua en los dos sentidos.

Error en el 1%, siempre que funcione por encima del 10% del rango de medida.

3.8 Calculo de caudal por medio de turbinas y bombas.

Si en la conducción se dispone de una central hidroeléctrica que consuma toda la energía que pueda producir el caudal circulante, y se conocen los rendimientos de las turbinas, el caudal se puede obtener por la fórmula:

$$N = \frac{Q \times 1000 \times H}{75} \times R\,; \quad Q = \frac{75 \times N}{1000 \times H \times R}$$

en la que N es la potencia en CV, H la altura del salto en metros, R el rendimiento de la turbina y Q el caudal en m^3/s.

Para el caso de un bombeo la fórmula anterior es válida, teniendo en cuenta que H es la altura a la que se eleva y R el rendimiento de la bomba.

En ambos casos es muy aconsejable, si la instalación lo permite, disponer de otro aparato de medida de mayor precisión para obtener el caudal circulante.

3.9 Medidores de caudal mecánicos (contadores).

Son dispositivos que se colocan dentro del fluido provocando el movimiento de una parte móvil, de tal modo que el desplazamiento conseguido es proporcional al caudal. Existen gran número de tipos y variedades diferentes, siendo los más populares los denominados de desplazamiento positivo y los de turbina.

Los medidores de desplazamiento positivo miden el caudal integrando volúmenes separados del líquido. Dentro de los de este tipo, los más comunes son los de disco giratorio, que pueden medir hasta 600 litros por minuto, con una precisión del 1 al 2%. Se fabrican para pequeños diámetros de turbina y se emplean en los contadores de agua domésticos.

©: Quedan reservados todos los derechos. (Ley de Propiedad Intelectual del 17 de noviembre de 1987 y Reales Decretos).
Documentación elaborada por el autor/a para EOI.
Prohibida la reproducción total o parcial sin autorización escrita de EOI.

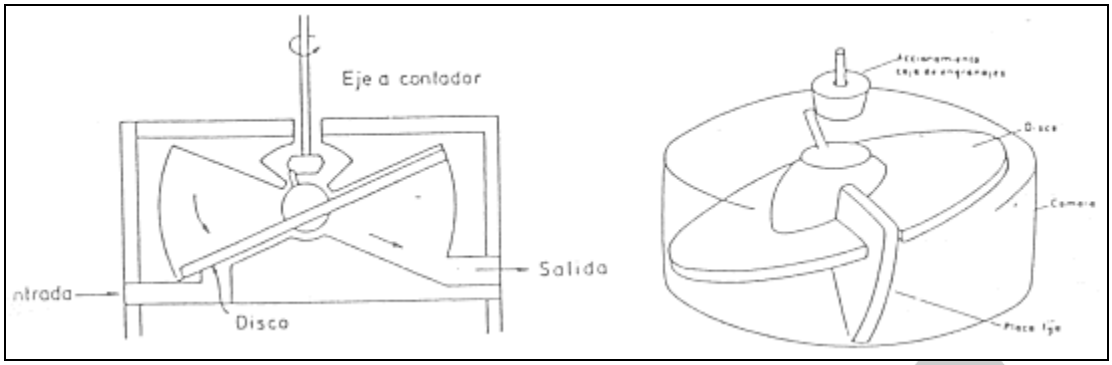


FIGURA 3.11

Señalización

1. Señal de estado.

De todos los órganos de cierre, de aislamiento y de regulación, así como de las bombas y de las turbinas, es necesario conocer en todo momento el estado de funcionamiento en que se encuentran:

Cierre

- Cerrado
- Intermedio
- Abierto

- Bombas
  - On
  - Off

según se trate de un tipo de órgano u otro.

En los de cierre y de regulación (compuertas y válvulas), hay que instalar en los finales de carrera del vástago o mecanismo de apertura, unos contactos eléctricos que se activarán según esté abierto o cerrado; estos contactos a través de circuitos lógicos darán origen a una señal identificativa del estado en que se encuentran. Mediante un procesado de la señal, se convertirá a medida digital (código binario) para ser transmitida al control del proceso.

Igual método se emplea para las bombas y turbinas, sólo que aquí al no haber finales de carrera, solamente se manda la señal de estar en marcha o parada.

Un código bastante utilizado para representar el estado de estos órganos, es hacerlo mediante color en el panel o pantalla gráfica de control, pudiendo ser:

©: Quedan reservados todos los derechos. (Ley de Propiedad Intelectual del 17 de noviembre de 1987 y Reales Decretos).
Documentación elaborada por el autor/a para EOI.
Prohibida la reproducción total o parcial sin autorización escrita de EOI.

Cerrado	=	Rojo
Intermedio	=	Amarillo
Abierto	=	Verde
ON	=	Verde
OFF	=	Rojo

En las válvulas y compuertas que regulan caudal, además de esta señalización de estado, hay que dotarlas del correspondiente medidor del grado de apertura, como ya vimos anteriormente.

2. Máximos y mínimos.

En diversas instalaciones que forman parte de un proceso de control del agua, es necesario mantener una cierta medida entre unos valores máximos y mínimos, de tal forma que cuando estos valores estén próximos a ser rebasados, o incluso lo sean, se genere un aviso o alarma que nos permita actuar sobre el proceso y corregir la situación que ha originado la alarma.

Los parámetros que hay que mantener entre unos determinados límites son:

a) Presión.- En los bombeos, para controlar la presión mínima en la aspiración de forma que se eviten cavitaciones en la bomba por vacío.

También se controlará la presión máxima en la elevación, para no rebasar la cota de elevación consignada y evitar sobrecargas en la bomba.

En ambos casos se dispondrá un presostato calibrado para la cota piezométrica requerida, de tal forma que cuando se llegue a los valores máximos y mínimos consignados, los grupos de elevación se paren automáticamente.

b) Nivel de Agua.- En embalses, depósitos, pozos y canales, es necesario, disponer sensores de nivel que detecten cuando el agua alcanza el máximo o mínimo preestablecido.

En el caso de instalaciones que almacenan agua, nos interesa controlar el nivel de agua de forma que ni la vertamos, ni llegue a faltar para el suministro, por lo que habrá que señalizar los niveles de:

- Vertido (nivel en que se inicia el vertido)
- Prevertido (por debajo del anterior con el resguardo estimado como suficiente para poder actuar).
- Mínimo de explotación (nivel que consideremos que no debe rebajarse en ningún momento, y que garantice el abastecimiento).

En los canales hay que establecer unos niveles límites para su explotación, que estarán determinados por la capacidad máxima del canal y el mínimo necesario para un determinado régimen de abastecimiento.

Por tanto, establecemos:

- Límite superior.

©: Quedan reservados todos los derechos. (Ley de Propiedad Intelectual del 17 de noviembre de 1987 y Reales Decretos).
Documentación elaborada por el autor/a para EOI.
Prohibida la reproducción total o parcial sin autorización escrita de EOI.

- Límite inferior.

que podrán ser modificados de acuerdo con las necesidades de cada momento.

Los distintos niveles se detectan por medio de sondas formadas por un cable en cuyo extremo lleva un detector metálico que mide la conductividad del agua entre una sonda común (la situada más abajo) y las demás. Mediante una electrónica lógica se interpreta cual es la situación del nivel del agua.

En todos los casos, se dispondrá por cada nivel la correspondiente señal luminosa que se actuará cuando el agua moje el sensor o lo deje seco

Meteorología

Datos meteorológicos

Para el aprovechamiento hidrológico de una cuenca o tramo de un río, nos es necesario conocer con la mayor aproximación posible el régimen de precipitaciones y aportaciones de la misma. Desgraciadamente, no se suele disponer de antemano de los datos de aforo durante un período de tiempo lo suficientemente largo (25 años como mínimo), en el tramo de río o cuenca que se trate de aprovechar, que nos permitan conocer con exactitud máximas avenidas, caudales de estiajes, etc., siendo preciso hacer un estudio de las precipitaciones, aportaciones y pérdidas por evaporación una vez que el sistema esté en explotación.

Para ello, es indispensable conocer a diario los datos relativos a:

- Precipitación
- Temperatura máxima y mínima
- Evaporación en la superficie del embalse

Para medir las precipitaciones diarias se emplea el pluviómetro, que consiste esencialmente en un embudo cuya boca tiene una superficie determinada, no inferior a 200 cm^2 y que desagua en un recipiente de suficiente capacidad para recoger la lluvia caída en un día, rodeado de una caja metálica que dificulte la evaporación. La medida debe tomarse al menos una vez por día a una hora fijada, vertiendo el agua del recipiente en una probeta graduada cuya superficie esté en relación sencilla con la superficie de captación, dando la precipitación en milímetros de altura o, lo que igual, en litros metro cuadrado de superficie.

Es conveniente situar los pluviómetros a una altura sobre el suelo de 1,00 a 1,50 metros, y en lugar resguardado del viento pero procurando evitar la sombra de edificios u otros obstáculos, que puedan impedir la entrada de lluvia en el pluviómetro cuando el viento sople en una determinada dirección.

Para casos que se necesite conocer la intensidad de la lluvia en cada momento, como puede ser el del cálculo de riadas, se emplean los pluviómetros registradores o pluviógrafos, en los que un flotador transmite por medio de una plumilla la gráfica correspondiente a un papel registrador, movido por mecanismo de relojería.

©: Quedan reservados todos los derechos. (Ley de Propiedad Intelectual del 17 de noviembre de 1987 y Reales Decretos).
Documentación elaborada por el autor/a para EOI.
Prohibida la reproducción total o parcial sin autorización escrita de EOI.

Se debe disponer de más de un pluviómetro, repartidos por diversos puntos de la cuenca del embalse, ya que suele ser mayor la precipitación en la cola que en el muro de presa, debido a que generalmente aquella está más próxima a zonas de mayor cota sobre el nivel del mar.

Para medir las temperaturas extremas diarias, nos bastaría con un termómetro de máxima y mínima, que al igual que el pluviómetro debe ser leído una vez al día y a una hora determinada. El termómetro se dispondrá dentro de una construcción aislada, ventilada y protegida del sol, para evitar la influencia de éste y tratar de medir con la mayor exactitud de temperatura del aire.

La evaporación en la superficie del embalse o depósito si es descubierto, es otro parámetro a tener muy en cuenta, debido a que en nuestro país suele alcanzar valores entre 1.000 y 2.000 milímetros de altura de agua evaporada por año, lo que representa una importante pérdida cualquiera que sea el destino que se dé al agua.

La evaporación del agua en la superficie libre sigue la ley de Dalton:

$$V = \frac{CS}{P} \quad (F - f)$$

en la que V es la cantidad de agua evaporada en la unidad de tiempo; S, la superficie de evaporación; C, un coeficiente; P, la presión atmosférica; F, la tensión de saturación correspondiente a la temperatura del agua en la superficie, y f, la tensión del vapor en el ambiente.

Como el cálculo de la evaporación por la fórmula anterior ofrece alguna dificultad, lo habitual es disponer de 12 coeficientes medios diarios, correspondientes a los 12 meses del año, de evaporación de la zona y aplicarlos a la superficie libre que tiene el agua diariamente. De ese modo tendremos el volumen diario que perdemos por el efecto de la evaporación en nuestras instalaciones.

A título de ejemplo, indicamos las evaporaciones medias anuales observadas en varias estaciones meteorológicas de la Península:

Alicante	2.168 mm
Barcelona	1.095 mm
Bilbao	1.090 mm
Ciudad Real	1.314 mm
Coimbra	2.054 mm
Coruña	1.240 mm
Lisboa	1.642 mm
Madrid	1.606 mm
Santander	1.240 mm
San Fernando	1.788 mm
San Sebastián	803 mm
Valencia	2.336 mm

©: Quedan reservados todos los derechos. (Ley de Propiedad Intelectual del 17 de noviembre de 1987 y Reales Decretos).
Documentación elaborada por el autor/a para EOI.
Prohibida la reproducción total o parcial sin autorización escrita de EOI.

Protección de equipos

Instrumentación para protección contra las sobretensiones

El creciente equipamiento de componentes electrónicos en la gestión del agua, exige medidas particulares para la protección contra los daños ocasionados por sobretensiones originadas por:

- Rayos
- Acoplamientos fortuitos con una línea de alta tensión vecina
- Conexiones con cargas inductivas

En el mercado existen diversos tipos de esta instrumentación que nos proporcionan protección contra las sobretensiones, elevando la seguridad de explotación de las instalaciones y equipos de sistemas de medida, circuitos de mando, dispositivos de regulación, circuitos de alimentación eléctrica, etc., contra sobretensiones inadmisibles o impulsos perturbadores, teniendo en cuenta que el origen y contenido de los mismos en las líneas de alimentación y señalización son muy diversos.

©: Quedan reservados todos los derechos. (Ley de Propiedad Intelectual del 17 de noviembre de 1987 y Reales Decretos).
Documentación elaborada por el autor/a para EOI.
Prohibida la reproducción total o parcial sin autorización escrita de EOI.

PARTE SEGUNDA – CONTROL

©: Quedan reservados todos los derechos. (Ley de Propiedad Intelectual del 17 de noviembre de 1987 y Reales Decretos).
Documentación elaborada por el autor/a para EOI.
Prohibida la reproducción total o parcial sin autorización escrita de EOI.

Avisos y alarmas

En todo proceso de aprovechamiento hidráulico además de conocer en tiempo real los valores que tienen los distintos parámetros, es necesario, controlar sus posibles variaciones sobre los consignados y actuar en consecuencia.

A tal efecto, habrá que establecer en el software del ordenador encargado del proceso, un programa de alarmas que genere un aviso cuando el parámetro controlado cambie su valor de consigna o por el contrario, no responda a una orden de cambio emitida desde el centro encargado del control del proceso.

Podemos hacer la distinción entre aviso y alarma en virtud de la importancia del suceso de que se trate. Un aviso siempre será sobre algo que esté próximo a suceder y todavía tenemos capacidad de reacción, por ejemplo un prevertido. Una alarma será la confirmación de que un fenómeno no previsto está ocurriendo, por ejemplo el vertido de un depósito.

Los avisos y alarmas los podemos clasificar, según su procedencia:

- Gradientes en las medidas
- Cambios de estado en órganos de cierre y regulación
- Maniobras realizadas no previstas
- Superación de límites

Los gradientes en las medidas controladas deben aparecer como un aviso o alarma cuando rebasen al valor de consigna en un margen previamente establecido, este margen tendrá la suficiente amplitud para que no se estén generando continuamente avisos por un pequeño cambio en el valor medido, pero también nos garantizará el conocimiento de un cambio de cierta consideración. El tiempo en el que se produce la variación de la medida es un factor determinante para la generación de alarma por gradiente, no es lo mismo que el consumo de una gran arteria aumente 1 m^3/s. a lo largo de 30 minutos, que se produzca en 3 minutos; en el primer caso se trata de una evolución normal del consumo a cierta hora del día, mientras que el segundo la rotura de la conducción es casi segura.

En los procesos controlados por ordenador, donde la recepción de valores de cada medida se produce cada 5 ó 10 segundos, por término medio, el gradiente se establece en función de que la diferencia entre dos valores consecutivos no sea mayor que un tanto por ciento de la propia medida, establecido previamente. En función del tipo de parámetro a medir y su rango, se determinará el límite de la variación, que una vez rebasado generará el correspondiente aviso de gradiente.

Los cambios de estado en órganos de cierre y regulación, deben generar el aviso correspondiente en el sistema de control, aún cuando dichos cambios hayan sido ordenados desde el propio sistema. De esta forma, comprobaremos que la orden de accionamiento ha sido realizada en el elemento y tiempo establecido. Por contra, si el órgano ha sido manipulado indebidamente, sin existir una orden al efecto, se generará una alarma de maniobra realizada no prevista, que nos hará decidir y ordenar las acciones precisas para

©: Quedan reservados todos los derechos. (Ley de Propiedad Intelectual del 17 de noviembre de 1987 y Reales Decretos).
Documentación elaborada por el autor/a para EOI.
Prohibida la reproducción total o parcial sin autorización escrita de EOI.

su modificación tanto en el órgano maniobrado como en todos los que se relacionen con él. Este tipo de alarma puede emplearse como verificación de que efectivamente se realiza una maniobra que ha sido ordenada desde el control, pero que no se ha incorporado al proceso como maniobra prevista.

Como ya vimos en la primera parte, en ciertas instalaciones hay que establecer unos límites máximos y mínimos en los valores de ciertos parámetros (niveles de agua, presión, etc.) para la correcta explotación del sistema. Cuando estos valores establecidos como máximos y mínimos se alcanzan, se ha de generar el correspondiente aviso o alarma en función de la importancia del límite rebasado.

Todos los avisos y alarmas que se produzcan en el proceso, tienen que ser recibidos y registrados en el centro encargado del control, mediante los siguientes efectos:

- Luminosos, con parpadeo de la representación gráfica del elemento donde se produce la alarma.
- Cambio de color, en dicha representación, del órgano origen de la alarma.
- Registro escrito en impresora, automáticamente por software, con indicación detallada del tipo de aviso o alarma, elemento y momento en que se produce (se debe destinar una impresora exclusivamente para el tratamiento de alarmas).

Cuando por parte del personal encargado del control del proceso, se reconozca el aviso o alarma cesarán los parpadeos y volverá a su color habitual de representación del órgano afectado; así mismo en la impresora se registrará automáticamente el reconocimiento de dicha alarma con indicación expresa del tipo, elemento y momento en que se produce dicho reconocimiento. De esta forma, se podrá controlar, a su vez, al propio controlador del sistema y saber si actúa con la debida rapidez y eficacia.

Registro y control

En cualquier proceso de aprovechamiento hidráulico, hay que determinar qué parámetros se medirán en cada una de las instalaciones que forman parte del proceso.

Una vez que los parámetros se han medido, procesado, transmitido, elaborado y recepcionado en el control del proceso, habrá que proceder a registrar los datos recibidos y someterlos al control adecuado en cada caso.

Suponiendo un aprovechamiento del agua en el que su infraestructura esté constituida por:

1. CAPTACIÓN:
   - Azudes
   - Embalses
   - Bombeos
2. ADUCCIÓN:
   - Canales

©: Quedan reservados todos los derechos. (Ley de Propiedad Intelectual del 17 de noviembre de 1987 y Reales Decretos).
Documentación elaborada por el autor/a para EOI.
Prohibida la reproducción total o parcial sin autorización escrita de EOI.

3. ALMACENAJE:
   - Depósitos
4. RED DE DISTRIBUCIÓN:
   - Arterias
   - Estaciones elevadoras
5. CENTRALES HIDROELÉCTRICAS
6. RIEGOS

Los parámetros que tenemos que medir en cada una de ellas serán:

1. Captación

- Azudes o presas de derivación.- Este tipo de construcción se destina fundamentalmente a captar el caudal de un río y derivarlo por un canal o acequia. Solamente nos interesará conocer el nivel del agua en el vaso del azud y controlar el vertido al río, aprovechando el máximo caudal que sea posible transportar por el canal. En consecuencia mediremos el nivel de agua y lo mantendremos entre unos límites de explotación.

  La propia obra del azud puede servirnos como estación de aforo, para calcular caudales de aportación del río cuando toda el agua aportada salta por encima del muro y funciona con vertedero en pared gruesa.

- Embalses.- El cometido de estas instalaciones es almacenar una masa de agua para cualquiera de sus usos y laminar avenidas del río.

  Por tanto, la medida fundamental será la altura del nivel del agua sobre el lecho del río y el volumen que ésta representa. En función del tipo de presa se determinará el tipo de instrumento a instalar para medir dicha altura.

  Será imprescindible establecer unos límites de explotación, controlados por los consiguientes avisos y alarmas, que nos señalen:
  - Nivel de vertido (umbral del vertedero más alto)
  - Nivel de prevertido
  - Nivel máximo de explotación
  - Nivel mínimo de explotación

  Además hay que medir y controlar:
  - Caudal vertido por desagües de fondo e intermedios
  - Caudal vertido por aliviaderos
  - Caudal derivado por tomas para abastecimiento
  - Caudal derivado por tomas para riegos
  - Caudal turbinado
  - Caudal bombeado desde el embalse

©: Quedan reservados todos los derechos. (Ley de Propiedad Intelectual del 17 de noviembre de 1987 y Reales Decretos).
Documentación elaborada por el autor/a para EOI.
Prohibida la reproducción total o parcial sin autorización escrita de EOI.

- Caudal trasvasado desde/a otras cuencas
- Filtraciones
- Pérdidas en elementos de cierre y regulación
- Evaporación
- Precipitación
- Temperatura máxima y mínima

A partir de estas medidas y la variación de volumen del embalse, se determinará por el método volumétrico el caudal que aporte el río.

Es muy interesante disponer de estaciones de aforo en los afluentes de la cuenca, situados aguas arriba de la presa, que nos ayudarán a determinar las distintas procedencias del caudal total de entrada al embalse.

También se controlará el estado de todos los elementos de cierre y regulación existentes en el embalse.

- Bombeos.- Este tipo de captación se realiza desde:

  a) Pozos

  b) Aguas superficiales

  a) Cuando el bombeo se hace desde pozos, hay que controlar el nivel freático del mismo, de modo que siempre se mantenga por encima de un mínimo preestablecido en función de las características del acuífero explotado (tiempos de recarga, volumen disponible, etc.).

  Se dispondrá un medidor de nivel que nos dé lecturas del mismo y un sensor para detectar el mínimo nivel que no debe ser rebasado. además, se contará con un caudalímetro en la impulsión y los correspondientes presostatos de las bombas y manómetros.

  b) En el caso de aguas superficiales, el bombeo se realiza desde el vaso de un azud o embalse, o bien desde un lago natural. En ambos casos tenemos que controlar el nivel del agua en el estanque y el caudal que circula por la tubería de la impulsión.

  En todas las impulsiones, registraremos las horas de funcionamiento de las bombas al objeto de controlar el grado de explotación de la instalación.

2. Aducción

- Canales.- Los canales son los elementos estructurales encargado de conducir, con fines diversos, masas de agua captadas en los ríos, lagos, embalses artificiales o del subsuelo mediante la obra adecuada.

  Los canales, en función de destino, los podemos clasificar en:

  - Industriales
  - De abastecimiento a poblaciones
  - De riego

©: Quedan reservados todos los derechos. (Ley de Propiedad Intelectual del 17 de noviembre de 1987 y Reales Decretos).
Documentación elaborada por el autor/a para EOI.
Prohibida la reproducción total o parcial sin autorización escrita de EOI.

- Navegables
- De mejora de terrenos:
    - Drenaje
    - Sedimentación artificial

En cualesquiera de ellos, vamos a tener que controlar el nivel del agua que transporta, y por lo tanto, su caudal.

En función del tipo de canal, o de las características de alguno de sus tramos, estableceremos el método para medir el caudal que circula por él.

Así, distinguiremos si el canal, o tramo del mismo, es:

- De agua rodada
- En carga

En el primero de los casos tendremos que establecer estaciones de aforo y limnímetros de trayecto a lo largo de la conducción para determinar el caudal en función de la altura de la lámina de agua sobre la solera del canal.

Además, se dispondrán en estos puntos de medida de los sensores correspondientes para avisar cuando se alcanzan los límites máximos y mínimos establecidos para la explotación del canal.

Con la medida del nivel del agua controlaremos el caudal y el adecuado funcionamiento hidráulico del canal, sin correr el riesgo de ponerlo en carga y evitando vertidos inútiles.

Cuando se trata de conducciones en carga, como es el caso de un sifón o una impulsión, el parámetro a medir y controlar será directamente el caudal que circula a través de la tubería que forma la conducción.

A semejanza de los embalses, tenemos que controlar el estado en que se encuentran todas las compuertas y válvulas existentes en los canales.

3. Almacenaje

En alguno de los procesos de aprovechamiento hidráulico, por ejemplo en abastecimiento a poblaciones, existe la necesidad de crear almacenamientos de agua encargados de regular las diferencias entre el caudal uniforme aportado por los canales y el caudal variable de la demanda; además, estos almacenes serán la garantía de reserva de agua frente a posibles averías en los elementos de captación y aducción.

Estos elementos de almacenaje son los que conocemos con el nombre de depósitos.

Los depósitos, si se destinan al abastecimiento a poblaciones además de los dos anteriormente mencionados tienen los fines de:

- Preservar de la contaminación a las aguas que almacenan.
- Dar presión a la red abastecida.

©: Quedan reservados todos los derechos. (Ley de Propiedad Intelectual del 17 de noviembre de 1987 y Reales Decretos).
Documentación elaborada por el autor/a para EOI.
Prohibida la reproducción total o parcial sin autorización escrita de EOI.

- Evitar la acción de los rayos del sol sobre el agua, para no dar lugar a la proliferación de algas.

En función de su misión dentro del proceso, variará la complejidad de la obra de fábrica que constituye el depósito. Los depósitos reguladores de turbinas o acequias de riego, no hará falta construirlos cubiertos, mientras que para un abastecimiento a población la cubierta es un elemento indispensable.

Igual ocurre con los parámetros a controlar, que se limitarán a la altura del depósito en el caso más simple, mientras que en el caso de un abastecimiento a población tendremos que disponer, además de la correspondiente medida del nivel del agua en el depósito y el volumen almacenado, los siguientes elementos de señalización y control:

- Alarma de vertido
- Aviso de prevertido
- Alarma de mínimo nivel de explotación
- Caudal de entrada al depósito
- Caudal de salida del depósito
- Estado de los elementos de cierre y aislamiento de los distintos compartimentos del depósito.
- Estado de los elementos de regulación de caudal en entradas y salidas.
- Indicación de los compartimentos en servicio

4. Red de distribución

Al agua que sale de un depósito se le da el destino para el que fue captada. Si nos centramos en el caso de abastecimiento a población, este suministro se realiza mediante un sistema más o menos complicado de grandes arterias y otras conducciones más pequeñas, conocido como Red de Distribución.

Esta red está formada por las grandes arterias que nacen en los depósitos y toman el agua de ellas, y por una malla o red de tuberías de menor diámetro que las arterias, conectada a éstas y entre sí, de tal manera que distribuyen el agua desde los depósitos a todos los usuarios.

Los elementos fundamentales a controlar en una red son:

- Caudales circulantes por las grandes arterias y tuberías importantes de la red.
- Estado de válvulas divisorias
- Estado de válvulas reductoras de presión
- Presión en puntos estratégicos de la red.

Otro elemento muy importante en una red de distribución son las posibles centrales elevadoras que puedan existir en dicha red.

Estas elevadoras pueden funcionar con agua tomada desde un depósito y elevada a la red, o bien impulsándola directamente desde una gran arteria a la red.

©: Quedan reservados todos los derechos. (Ley de Propiedad Intelectual del 17 de noviembre de 1987 y Reales Decretos).
Documentación elaborada por el autor/a para EOI.
Prohibida la reproducción total o parcial sin autorización escrita de EOI.

En ambos casos, necesitaremos controlar:

- Caudal bombeado
- Presión en toma
- Presión de impulsión
- Horas de funcionamiento

además, las bombas irán protegidas con los correspondientes presostatos.

5. Centrales hidroeléctricas

Aprovechando la energía potencial del agua almacenada en embalses o en los tramos de canales con grandes desniveles, se instalan centrales hidroeléctricas al objeto de darle otro uso añadido al agua, en el caso de que el fin primordial de la instalación no será precisamente dicho aprovechamiento energético.

En cualquier caso, deberemos conocer y controlar el caudal que utiliza la turbina para su funcionamiento, instalando el instrumento adecuado en la conducción forzada de entrada a la turbina. Además controlaremos las horas de dicho funcionamiento.

6. Riegos

Cuando el agua se destina a este servicio, el parámetro a medir será el caudal circulante por las distintas conducciones, que generalmente son de cielo abierto y dotadas con compuertas para la distribución de caudales a los distintos regantes.

La altura de la lámina de agua en distintos puntos de la acequia principal y el grado de apertura de las diversas compuertas, nos permitirán conocer los caudales principales y derivados a lo largo del sistema.

©: Quedan reservados todos los derechos. (Ley de Propiedad Intelectual del 17 de noviembre de 1987 y Reales Decretos).
Documentación elaborada por el autor/a para EOI.
Prohibida la reproducción total o parcial sin autorización escrita de EOI.

Ejemplo práctico de un proceso y su control

Una vez que hemos analizado los parámetros a medir y los controles a realizar sobre ellos, estudiaremos sobre un hipotético modelo de aprovechamiento hidráulico, cuales serán los parámetros que necesitaremos medir en cada instalación del sistema, cuales serán los instrumentos más adecuados en cada caso y que tipos de avisos y alarmas será necesario generar para controlar el proceso.

Dado el carácter del ejercicio, éste se realizará fuera del horario de clases, partiendo del esquema adjunto de instalaciones que comprende:

- Embalses
- Azudes
- Transvases
- Captaciones por bombeo:
  - De aguas Superficiales
  - De pozos
- Centrales eléctricas
- Canales:
  - De agua rodada
  - Conducción forzada
- Acequias
- Estaciones de tratamiento de agua potable
- Depósitos:
  - De regulación de canales
  - De regulación de consumo
- Red de Distribución
  - Estaciones elevadoras
  - Grandes arterias
  - Válvulas divisorias
- Estaciones de tratamiento de aguas residuales

y sobre el que se irán situando los distintos elementos de medida y control del proceso.

©: Quedan reservados todos los derechos. (Ley de Propiedad Intelectual del 17 de noviembre de 1987 y Reales Decretos).
Documentación elaborada por el autor/a para EOI.
Prohibida la reproducción total o parcial sin autorización escrita de EOI.

Ejercicio práctico de instrumentación y control

Enunciado:

En el gráfico se representa esquemáticamente el sistema de abastecimiento de agua potable, a dos núcleos urbanos, con recursos de las cuencas A y B y reforzado en épocas de sequía por un campo de pozos.

La cuenca A está regulada por los embalses 1 y 2. De la torre de toma de este último, nace el Canal A que, posteriormente, se bifurca al Canal de Derivación y al propio Canal A; ambos son conducciones de agua rodada, salvo el tramo en "sifón" del Canal A. Para aprovechameinto hidroeléctrico, existe una turbina en el origen de dicho canal.

La cuenca B no tiene regulación, salvo la efectuada por el pequeño azud situado en la misma, que es aprovechada, en épocas de aportaciones abundantes, mediante el bombeo de caudales no superiores a 2 m3/s. Que son impulsados hasta el Depósito de Reunión, al que también aporta sus aguas el Canal A.

Por su parte, el Canal de Derivación alimenta al Depósito Superior, que al encontrarse 150 m. Más lato que el Depósito Inferior, se une a éste a través de una conducción en carga, denominada "Rápido", que termina en una turbina que aprovecha energéticamente el desnivel entre ambos depósitos.

Los tres depósitos mencionados anteriormente, son descubiertos y tienen un solo compartimento cada uno.

La ETAP 1 (Estación de Tratamiento de Aguas Potables), está alimentada desde el Depósito de Reunión, a través del Canal A1 de agua rodada, que se prolonga desde la salida de la ETAP, hasta el Depósito Urbano 1.

Del Depósito Inferior nace el Canal B que, antes de llegar a la ETAP 2, incorpora las aguas del Campo de lámina libre, en todo su recorrido, entregando el agua tratada al Depósito Urbano 2.

El Núcleo urbano 1 se alimenta por gravedad desde los Depósitos 1 y 2, a través de al Arterias 1, 2 y 3. Con la manipulación de las distintas válvulas divisorias existentes en la red de distribución, se determinan los sectores del municipio que se alimentan desde cada depósito.

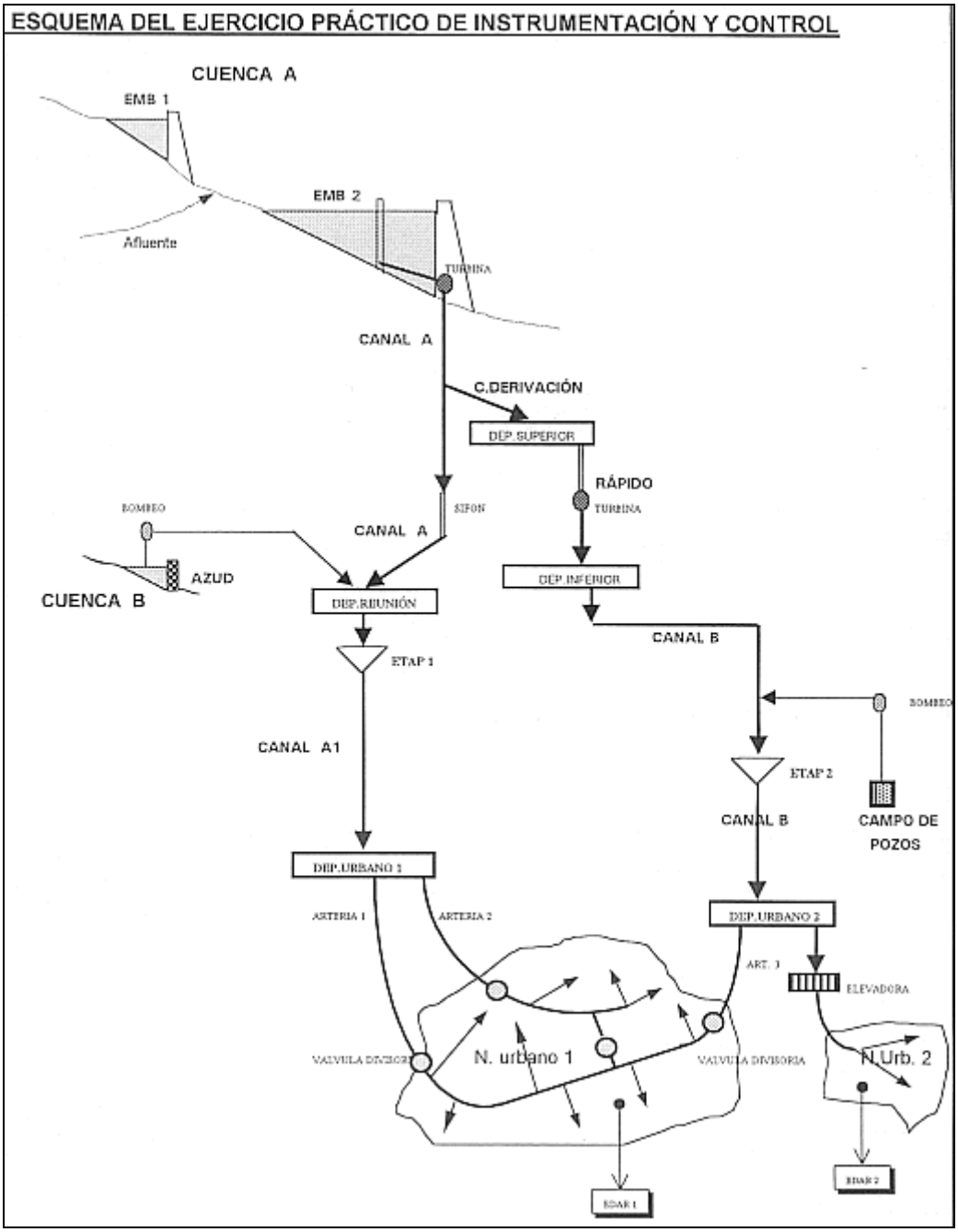
El Núcleo urbano 2 se alimenta desde el Depósito 2, a través de la Elevadora que impulsa el agua hasta la red de esta población, en la que no existen válvulas divisorias.

Finalmente, existe una EDAR (Estación Depuradora de Aguas Residuales) en cada núcleo urbano, encargada de depurar las aguas residuales procedentes de su respectiva población.

Se pide:

Indicar la situación y el tipo de los aparatos de medida y control que considere necesarios para la correcta explotación controlada del sistema de abastecimiento descrito anteriormente y cuyo esquema se acompaña.

©: Quedan reservados todos los derechos. (Ley de Propiedad Intelectual del 17 de noviembre de 1987 y Reales Decretos).
Documentación elaborada por el autor/a para EOI.
Prohibida la reproducción total o parcial sin autorización escrita de EOI.



©: Quedan reservados todos los derechos. (Ley de Propiedad Intelectual del 17 de noviembre de 1987 y Reales Decretos).
Documentación elaborada por el autor/a para EOI.
Prohibida la reproducción total o parcial sin autorización escrita de EOI.