

CONSTRUCCIÓN DE UN RELOJ DE AGUA O CLEPSIDRA

WATER CLOCK OR CLEPSYDRA CONSTRUCTION

Recibido: 06/09/07

Aceptado: 24/09/07

RESUMEN

Este reloj se está construyendo en el centro de recepción de visitantes del **Parque Nacional de Doñana**

Los relojes de agua se usaron en el Mundo Antiguo y hasta el siglo XVII en que fueron desplazados por los relojes mecánicos y complementaron a los relojes de sol para las noches y los abundantes días nublados. Este reloj de agua se ha diseñado y construido haciendo uso sólo de los conocimientos del antiguo Museo de Alejandría. La precisión no es una característica de las clepsidras. Es un elemento emblemático que quiere ser didáctico y de aspecto sobrio.

Palabras clave: Clepsidra, reloj de agua, tiempo, sifón

ABSTRACT

It is being built at the Visitor Reception Centre at Doñana National Park

Water clocks were used in the Ancient World and as late as the 17th century, when they were replaced by mechanical timepieces. They were a complement to sundials, for use at night and during long cloudy periods. This water clock was designed and built using only the knowledge found in the ancient Museum of Alexandria. Precision is not a feature of clepsydres. This representative example is intended as an educational item, with a plain, austere, appearance.

Key words: Clepsidra, water clock, time, siphon.

1.- UN POCO DE HISTORIA

Desde tiempos primitivos se han asociado en la imaginación humana el fluir uniforme de una corriente de agua con el transcurso del tiempo, ya que, en ambos casos, el fluir se produce en un solo sentido.

Benigno José Bayán Jardín
Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Confederación Hidrográfica del Guadalquivir
Sevilla



Las civilizaciones más antiguas como Mesopotamia, Egipto y China están ligadas al agua y fueron capaces de construir relojes de agua, al igual que usaron relojes de sol.

El más antiguo de los que conocemos se encontró en la tumba del faraón egipcio **Amenhotep I**, hacia el año 1524 a.C.

Estos relojes tan antiguos consistían en un depósito lleno de agua, que salía gota a gota por un agujero muy fino situado en el fondo. El tiempo que tardaba en vaciarse era el mismo cada vez que se repetía la experiencia por lo que, en principio, lo que se medían eran intervalos de tiempo iguales.

Con el paso de los años, se dieron cuenta de que la velocidad de salida del agua por el agujero del fondo dependía del nivel del agua en el depósito siendo mayor la velocidad al principio cuando el nivel era más alto. Para solucionar este problema de una manera cualitativa, hicieron el depósito de sección variable, como una maceta, para lo cual las paredes laterales, en vez de ser verticales, formaron un ángulo con la horizontal de aproximadamente 70°. Así se compensaba, parcialmente, la mayor velocidad al principio con un mayor volumen a vaciar, y la velocidad de bajada del ni-

vel del agua se acercaba a la uniformidad. No se podía hacer más de lo que se hizo con los conocimientos de aquellos tiempos.

Para conocer de forma cuantitativa y rigurosa la forma de una vasija con un orificio en el fondo en la que el nivel del agua baja al vaciarse con velocidad constante, hubo que esperar al año 1684 en el que **Leibniz** descubrió y publicó el Cálculo diferencial. La forma de la vasija es una parábola de cuarto grado que gira alrededor de su eje vertical.

Volviendo a nuestro relato, diremos que en el año 270 a.C., siendo rey de Egipto **Ptolomeo II Filadelfo**, el ingeniero e inventor **Ctesibio** de Alejandría fabrica clepsidras en el **Museo de Alejandría** en las que consigue hacer constante el caudal que sale por el agujero del fondo del depósito superior manteniendo constante y en lo más alto el nivel del agua en dicho depósito. Para ello abastece el depósito con un caudal superior al de la salida por el fondo y el exceso se va por un derramadero de superficie. El caudal constante que sale de este depósito pasa a otro inferior, de sección constante y paredes verticales, en el que el nivel del agua mide el tiempo. Esta idea es la que hemos usado para nuestra clepsidra.

Ctesibio fue el primero en usar la palabra clepsidra para referirse a un reloj de agua. Clepsidra procede del griego y su traducción literal sería "ladrón de agua", porque roba el agua del depósito superior o fuente para que, al llegar al depósito inferior, el nivel marque la hora.

Hay referencias de algunas clepsidras en las que el agua llegaba suavemente al depósito inferior a través de los ojos de una estatua, que parecía llorar, y así simbolizaba la tristeza por el tiempo que pasa de modo inexorable y cierto.

En aquellos tiempos, para la fabricación de relojes había una dificultad importante que afortunadamente hoy no tenemos, y es que entonces las horas eran desiguales, siendo doce horas diurnas, desde el amanecer hasta el ocaso, y 12 horas nocturnas. **Ctesibio** inventó varias soluciones para este problema, en las que nos parece que no debemos entrar.

Herón de Alejandría, en el año 62 a.C., inventó y fabricó un sifón de funcionamiento automático que vacía con rapidez el depósito de la clepsidra en el que se miden las horas, llevando el agua a otro depósito inferior o a la atmósfera. Este modelo de sifón es el que hemos instalado en nuestra clepsidra y que más adelante explicaremos.

En Atenas, cerca de la entrada a la Acrópolis, construyó el arquitecto macedonio **Andrónico de Cirro**, en el año 45 a.C., la *Torre de los Vientos*, de planta octogonal y fabricada en mármol. En la parte superior había una veleta de bronce con la figura de *Tritón* y en cada una de las ocho caras estaban representados los ocho vientos entonces conocidos. En las paredes había relojes de sol y en el interior había una clepsidra que se alimentaba de una fuente cercana.

Nuestra clepsidra, siguiendo el modelo de **Andrónico** en la *Torre de los Vientos*, también tiene la forma exterior de un prisma recto de base octogonal con una veleta en la parte superior y en cada cara, orientadas con los puntos cardinales, el nombre de los vientos más frecuentes en la actualidad.

Una de las aplicaciones de la clepsidra tanto en Atenas como en Roma era medir el tiempo de intervención de los abogados en los tribunales y poner así freno a su elocuencia. Cuando se consideraba necesario dar más tiempo, se usaba la expresión "dar más agua".

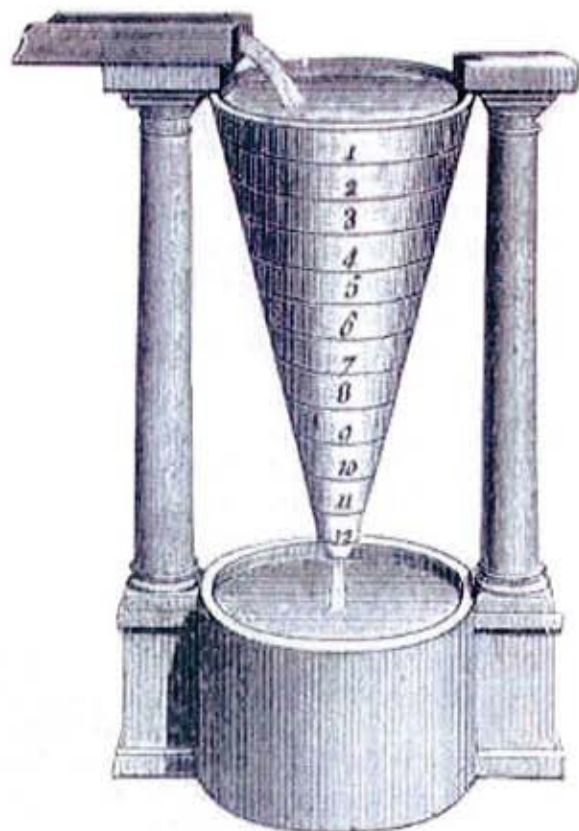
La incontinencia verbal de los abogados vemos que viene de muy

galó al emperador **Carlomagno** el califa **Harem al-Raschid**, el *Justo*, que fue el soberano de la conocida obra literaria *Las mil y una noches*. La clepsidra, instalada en la corte de Aquisgrán, era de cobre y oro, de grandes dimensiones y muy adornada con autómatas y bolas que caían cada hora. Junto con la clepsidra se incluía en el regalo al relojero que construyó el reloj y que se encargaría de por vida de su conservación y mantenimiento.

Otra clepsidra muy famosa en la cultura árabe estaba instalada en la plaza del Mercado de Gaza, coronada por la figura de una gorgona de bronce en la que el movimiento del agua hacía que cada hora moviera los ojos proyectando luces y se abriera una puerta para mostrar cada una de las hazañas de *Heracles* (los romanos cambiaron el nombre de este héroe griego por el de *Hércules*). Hoy llamaríamos a esto un espectáculo de luz y sonido.

Eran relojes con los que se buscaba y se conseguía la admiración y el espectáculo. Nuestro reloj va por otros derroteros y tiene otras pretensiones.

Newton, parafraseando a **Aristóteles**, opinaba que la Naturaleza se complace en la sencillez y, de acuerdo con tan autorizada opinión, hemos querido que el reloj



de agua de Doñana tenga un diseño y un funcionamiento sencillos y fáciles de comprender. Se pretende conseguir así que nuestro reloj cumpla con los objetivos a los que hoy puede aspirar: ser didáctico y de una belleza basada en la sencillez y austeridad. El objetivo de la precisión en la medida del tiempo lo cumplen mucho mejor los modernos relojes de pulsera.

antiguo, y que se mantiene hoy, lo que constituye un ejemplo de buena adecuación a un entorno cambiante que hace innecesaria la evolución. A los tiburones les ocurre lo mismo.

Durante la Edad Media, son los árabes los que perfeccionan el funcionamiento de los relojes de agua.

Una clepsidra muy famosa fue la que, a principios del siglo IX d.C., re-

Los relojes de agua también se conocían con el nombre de relojes de invierno porque era la época del año en que más se usaban ya que las noches son largas y los días suelen estar nublados, con lo que los otros relojes, que eran los de Sol, no podían señalar la hora casi nunca.

En los países nórdicos, por su clima extremadamente frío, nunca se han usado los relojes de agua porque en invierno el agua se congelaba y el reloj quedaba fuera de servicio cuando más falta hacía.

Las clepsidras se usaron hasta el siglo XVII en el que fueron desplazadas por los relojes mecánicos que tenían mayor precisión y eran más fáciles de construir y de transportar, dejando a las clepsidras como un recuerdo del pasado.

Actualmente hay muy pocas clepsidras en el mundo que estén funcionando y suelen ser de funcionamiento discontinuo, como los relojes de arena, con lo que sólo miden intervalos de tiempo.

Hay que hacer la excepción de **Bernard Guilton**, físico y artista francés, que, después de varios años de investigación, ha creado y comercializado un modelo de clepsidra que indudablemente es bello y sorprendente. Hoy hay más de 40 repartidos por todo el mundo que se diferencian entre sí por el tamaño. Su correcto funcionamiento se apoya en los conocimientos actuales de Mecánica y Electrónica, con lo que realmente son modernos y están en la línea de las antiguas clepsidras espectaculares.

2.- NUESTRA CLEPSIDRA EN DOÑANA

2.1.- Generalidades

La forma exterior es la de un prisma recto de base un octógono regular siguiendo el modelo de la *Torre de los Vientos*.

El lado del octógono es 0,671 m la anchura aparente de 1,618 m y la altura es de 2,82 metros.

Las caras verticales de la clepsidra son de vidrio, para que el público pueda ver el nivel y todos los movimientos del agua.

Las aristas verticales de la clepsidra son perfiles huecos de acero inoxidable y están en contacto con las caras de vidrio mediante juntas elásticas.

La clepsidra consiste básicamente en dos depósitos por los que pasa el agua, situados uno sobre el otro. Encima del depósito superior hay una cubierta de acero inoxidable de la que forma parte un faldón de 0,20 m en vertical. Coronando la cubierta hay una veleta, y en el faldón, que también es un octógono, están los nombres de los ocho vientos que coinciden con los cuatro puntos cardinales principales y sus intermedios. Como es lógico, el octógono de la base de la clepsidra se ha orientado con los puntos cardinales cuando se construyó.

2.2.- Depósito superior o fuente

El depósito superior tiene una altura de 40 cm de los que los 10 cm superiores están ocupados por aire bien comunicado con la atmósfera y con una rejilla de protección que evite la entrada de insectos. El faldón de la cubierta oculta la comunicación con la atmósfera para que el aire tenga un camino tortuoso que frene la velocidad del posible viento exterior y permita que el nivel del agua en el depósito sea tranquilo y sin olas.

El depósito superior recibe un caudal de agua que procede de un depósito enterrado que se ha construido próximo a la clepsidra, en el que se ha instalado una bomba sumergida con alimentación eléctrica, un respiradero y una boca de acceso con escalera de pates.⁽¹⁾ Reconocemos que esta bomba y la energía eléctrica son posteriores en bastantes

siglos al antiguo Museo de Alejandría, pero es la única concesión que hemos hecho a los conocimientos actuales y ha sido necesario hacer esta excepción. No sabemos cómo se resolvía este problema en las clepsidras de la Edad Antigua y la Edad Media porque las descripciones que nos han llegado son escasas e incompletas, pero suponemos que el problema se resolvería con la mano de obra de los esclavos.

Entre el depósito enterrado y la clepsidra se forma un circuito cerrado por lo que no hay consumo de agua durante el funcionamiento. Este aspecto positivo se debe resaltar al ser el agua un bien escaso en Doñana y en cualquier otro sitio.

En el depósito enterrado, el nivel del agua varía entre un máximo cuando está vacía la clepsidra, y un mínimo, cuando está llena, mientras que la cota a la que se entrega el agua en el depósito superior de la clepsidra es constante. La bomba funcionará, dentro de su curva característica, entre dos puntos definidos por sus alturas manométricas, que en nuestro caso son 6,5 y 6,1 m, que dan lugar respectivamente a los caudales de 56 y 69 l/min para el caso de la pequeña bomba elegida.

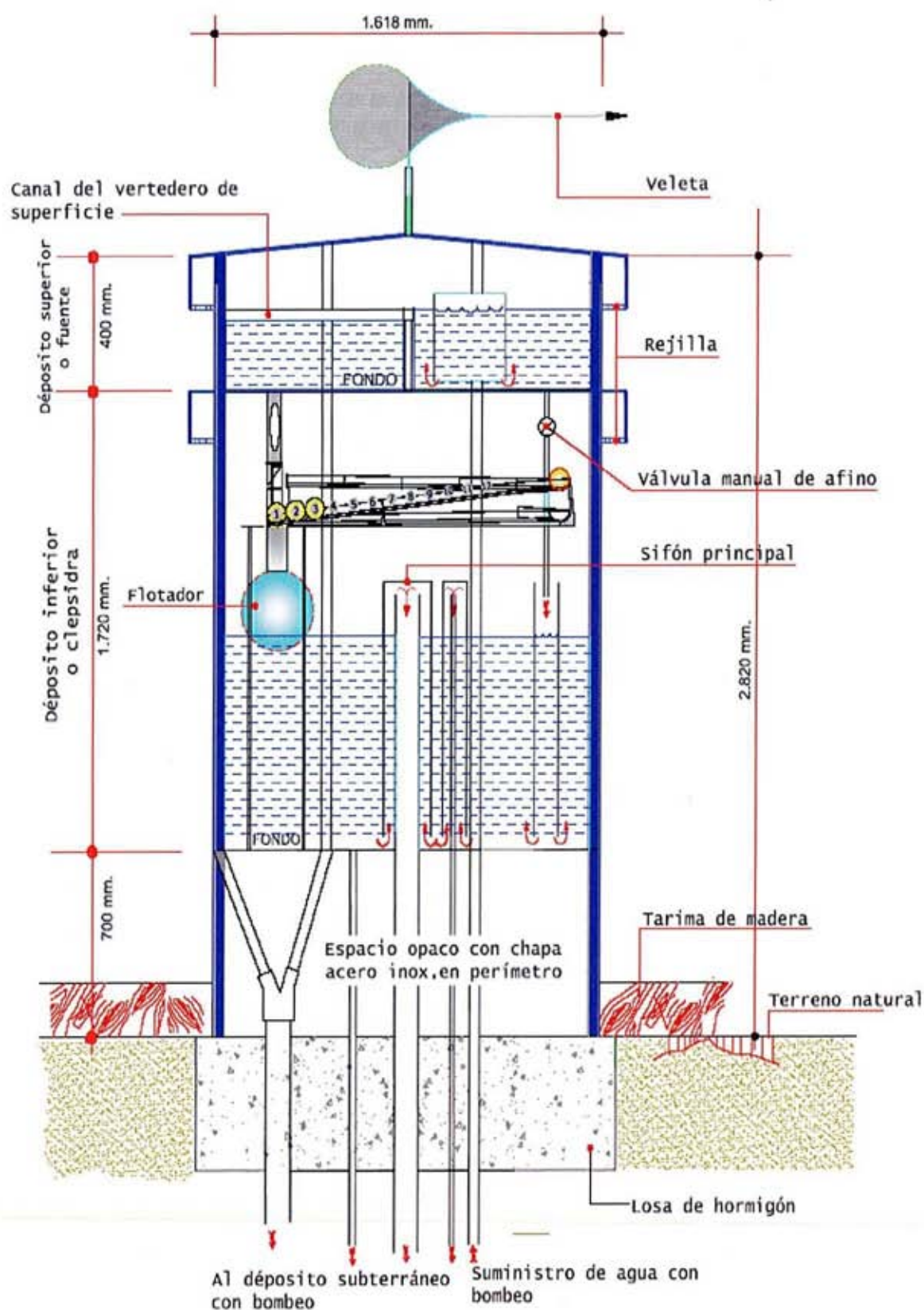
Al agua se le ha añadido sulfato de cobre en proporción de 7 gr/l, que le da un ligero tono azulado para facilitar la observación del nivel y de sus movimientos y evita la aparición de algas.

Si, por alguna avería excepcional, se tuviera que verter el volumen de agua de la clepsidra, previamente se haría el tratamiento preciso para que el agua que se vierte cumpla las exigentes condiciones de calidad de Doñana.

El nivel del agua en el depósito superior o fuente es siempre de 0,30 m sobre su fondo. Para ello el caudal que entra varía entre 56 y 69 l/min y se recibe en un cilindro vertical de

1) La escalera de pates es algo corriente en las obras públicas. Es una escalera fija y rudimentaria que se instala en la pared interior de un pozo para que pueda acceder a su fondo un operario. Cada peldaño, que en este caso se llama pate, está formado por una barra de acero de unos 20 mm de diámetro con la forma de un cuadrado al que le falta un lado. Los dos lados paralelos se empotran parcialmente en la pared interior del fondo, y el otro lado, paralelo a la pared, sirve de peldaño para apoyar los pies o las manos. La distancia en vertical entre los diferentes pates puede ser de 50 cm o similar.

Puede denominarse también escalera fija interior (Nota del autor)



CLEPSIDRA

ALZADO - SECCION

chapa de acero inoxidable de 25 cm de diámetro, que, en la parte superior, supera el nivel del agua, y en la inferior queda 3 cm por encima del fondo del depósito, y el caudal que sale hacia el depósito inferior o clepsidra es de 38 l/min y lo hace a través de un agujero en el fondo de 2 cm de diámetro que está conectado a un tubo vertical de 0,50 m de longitud en el que se intercala una válvula de afino de accionamiento manual. La diferencia entre el caudal que entra y el que sale varía entre 18 y 33 l/min y sale por un vertedero de superficie formado por un canal cuyo borde superior es horizontal y situado a 0,30 m sobre el fondo. Este canal, con pendiente en su fondo, entrega su caudal en dos de los perfiles huecos de acero inoxidable que forman las aristas del reloj de agua, para llegar luego al depósito enterrado.

2.3.- Depósito inferior o clepsidra

Debajo del depósito superior hay una zona de 0,20 m de altura que constituye el fondo del depósito y la estructura de acero inoxidable que la soporta. En la banda perimetral y cilíndrica que cubre esta zona se ha grabado la frase: *"No pierdas el tiempo, es la materia de la que está hecha la vida"* de la que es autor **Benjamín Franklin (1706-1790)**, y a la que nos hemos permitido añadir como resumen *"El tiempo es vida"*, que se puede contraponer a la conocida frase *"El tiempo es oro"*.

El depósito inferior es la clepsidra propiamente dicha, y el caudal constante que recibe, de 38 l/min, descarga dentro de un tubo vertical transparente de metacrilato de 4 cm de diámetro interior, que en la parte superior supera el máximo nivel del agua, y en la inferior está unido al fondo de la clepsidra dejando huecos de comunicación con el agua del depósito. Así se consigue que las variaciones bruscas del nivel del agua, en el punto en que recibe el caudal del depósito superior, queden limitadas al interior del tubo vertical de metacrilato por lo que en el exterior el nivel del agua será estable y así subirá paulatinamente en proporción al tiempo.

La altura entre el fondo del depósito inferior y el depósito superior es 1,72 m. Sobre el fondo de la clepsidra se ha dispuesto un sifón con un diseño singular, sencillo y didáctico que debemos a **Herón de Alejandría**. Está formado por dos tubos de metacrilato concéntricos. El exterior tiene 0,20 m de diámetro, una altura de 1 m, está anclado al fondo pero con huecos en su perímetro que permiten que el agua tenga el mismo nivel en la clepsidra y en la corona circular que forman los dos tubos del sifón. Este tubo exterior tiene una tapa circular en el extremo superior que lo aísla de la clepsidra.

El tubo interior tiene 0,10 m de diámetro, por la parte superior llega a 0,98 m sobre el fondo y está abierto para permitir el paso del agua desde la corona circular a su interior. Este



tubo atraviesa el fondo del depósito, sigue por el espacio no visible situado bajo el fondo con 0,70 m de altura, atraviesa la losa de hormigón de 0,50 m de espesor que sirve de cimentación superficial y continua hasta entrar en el depósito enterrado y en él termina a una cota inferior al nivel mínimo del agua en dicho depósito. Esto garantiza el cierre hidráulico.

2.4.- Funcionamiento y sifón

El caudal constante de 38 l/min que entra en la clepsidra hace que el nivel del agua suba con velocidad uniforme de modo que, con la ayuda de una escala gráfica, nos mide el tiempo transcurrido desde el nivel mínimo hasta el nivel máximo, que viene determinado porque el caudal ceba el sifón y hace que empiece a

funcionar como tal, con lo que el vaciado de la clepsidra se produce en 50 segundos por un caudal de vaciado de 2.320 l/min, consecuencia de la diferencia de nivel entre la boca superior del sifón y el del agua en el depósito enterrado.

El caudal necesario para el cebado de un sifón y su puesta en funcionamiento no se puede determinar por aplicación de tal o cual fórmula de la Hidráulica sino que es necesario determinarlo mediante ensayos en un laboratorio de Hidráulica. En nuestro caso hemos disfrutado de la colaboración del laboratorio de la **Escuela de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC)** con el profesor **José Dolz Ripollés** y su equipo. Incluso nos atrevemos a decir que se han ilusionado tanto como nosotros con este asunto de la clepsidra.

El ensayo se ha hecho a escala real y pronto puso de manifiesto que el caudal de 38 l/min es mucho menor que el necesario para cebar el sifón. Cuando el nivel del agua llega a la boca superior, vierte en su interior con una pequeña altura de lámina de agua, lo que, con el tiempo, daría lugar a un movimiento continuo del agua sin modificar su nivel y la clepsidra no funcionaría.

A continuación se pensaron varias soluciones para cebar el sifón, que expondremos en el punto tercero de este artículo, y nos decidimos por la que a continuación se describe. Consiste en disponer un segundo sifón cerca del principal con igual diseño y altura, pero con diámetros mucho menores. El tubo exterior tiene 40 mm de diámetro y el interior, 8 mm. Este tubo se mantiene paralelo y separado del tubo del sifón principal y termina en el depósito enterrado por encima del nivel máximo del agua. Es tan fundamental como decisivo comunicar los tubos de vaciado de los dos sifones mediante un tubo corto, de 8 mm de diámetro, situado en la boca de acceso al depósito enterrado.

Ahora el caudal de 38 l/min produce el cebado del sifón de 8 mm y su puesta en funcionamiento, y como la velocidad del agua que cae por el tubo es alta se produce una reduc-

ción de la presión, por lo que arrastra, por el tubo de conexión con el tubo del sifón principal, una parte del volumen de aire encerrado en este tubo, que está confinado por tener un cierre hidráulico en el depósito enterrado y otro en el sifón situado en la clepsidra.

El volumen de aire que se extrae aumenta con el tiempo y en 50 segundos el vacío relativo dentro del tubo del sifón principal es lo bastante grande como para producir el cebado y, por tanto, la puesta en funcionamiento de este sifón, que en otros 50 segundos consigue vaciar el depósito de la clepsidra. El vaciado termina cuando el nivel del agua está tan cerca del fondo que se establece contacto con la atmósfera a través de los huecos situados en la unión del tubo exterior del sifón con el fondo, lo que se produce a unos 5 cm de éste. Se cierra así un ciclo de 60 minutos que se pretende que sea exacto. El minuto 60 termina cuando el nivel del agua en la clepsidra llega al nivel de la boca del tubo interior del sifón principal. A continuación hay un periodo de 50 segundos en que sólo funciona el sifón secundario y otro periodo de 50 segundos en que funcionan los dos sifones. Estos casi dos minutos forman parte de la hora siguiente y son la parte dinámica y espectacular. A continuación, los pocos más de 58 minutos son la monotonía del funcionamiento normal. Para que el ciclo completo sea de 60 minutos hay que actuar sobre la citada válvula de afino de accionamiento manual que regula en detalle el caudal que llega a la clepsidra estableciendo pequeñas variaciones sobre los 38 litros por minuto.

Quizás sea el momento de decir que nuestra clepsidra está diseñada y construyéndose mientras que escribimos este artículo para DYNA, pero no está terminada y menos instalada en Doñana, aunque pronto lo estará, quizás al tiempo de publicarse este número de la revista.

La lectura de los minutos, dentro de una hora, se hace directamente de una escala gráfica vertical unida a una de las paredes verticales de vidrio de la clepsidra, en la que el 60 se hace coincidir con el nivel de la boca del tu-

bo interior del sifón principal o secundario ya que tienen el mismo nivel. Luego vienen casi dos minutos de espectáculo y poco más de tres minutos para alcanzar el nivel que en la escala se marca como 5 minutos. En la escala se marcan los minutos de cinco en cinco y con marcas intermedias se estiman los demás minutos.

Con la válvula de afino no sólo podemos establecer desde el principio un ciclo de 60 minutos, sino que también podemos corregir el adelanto o atraso que se presente con el tiempo.

La clepsidra nos ha servido para conocer el número de minutos dentro de una hora y para que el ciclo de funcionamiento se repita cada hora. Para conocer el número de horas, dentro de un día, pasamos al siguiente apartado.

2.5.- Reloj de bolas anafórico

Se llama anafórico a un mecanismo cuyo funcionamiento es consecuencia del movimiento del agua y éste es el caso del reloj de bolas que vamos a describir y que servirá para leer las horas transcurridas dentro de un día.

Las horas se podrán leer entre la una y las 12, ambas inclusive, dejando a la perspicacia del espectador saber si la hora es de la mañana o de la tarde.

El reloj de bolas se sitúa encima de una bandeja, que en planta tiene forma de marco, y que está suspendida del fondo del depósito superior por cuatro tirantes provistos de roscas para conseguir que la bandeja esté horizontal. En las caras Norte y Sur de la clepsidra se disponen ventanas que al abrirlas permiten la extracción del reloj de bolas para el caso de una avería.

La bandeja se sitúa 0,20 m sobre el sifón y el reloj de bolas tiene una altura de 0,28 m.

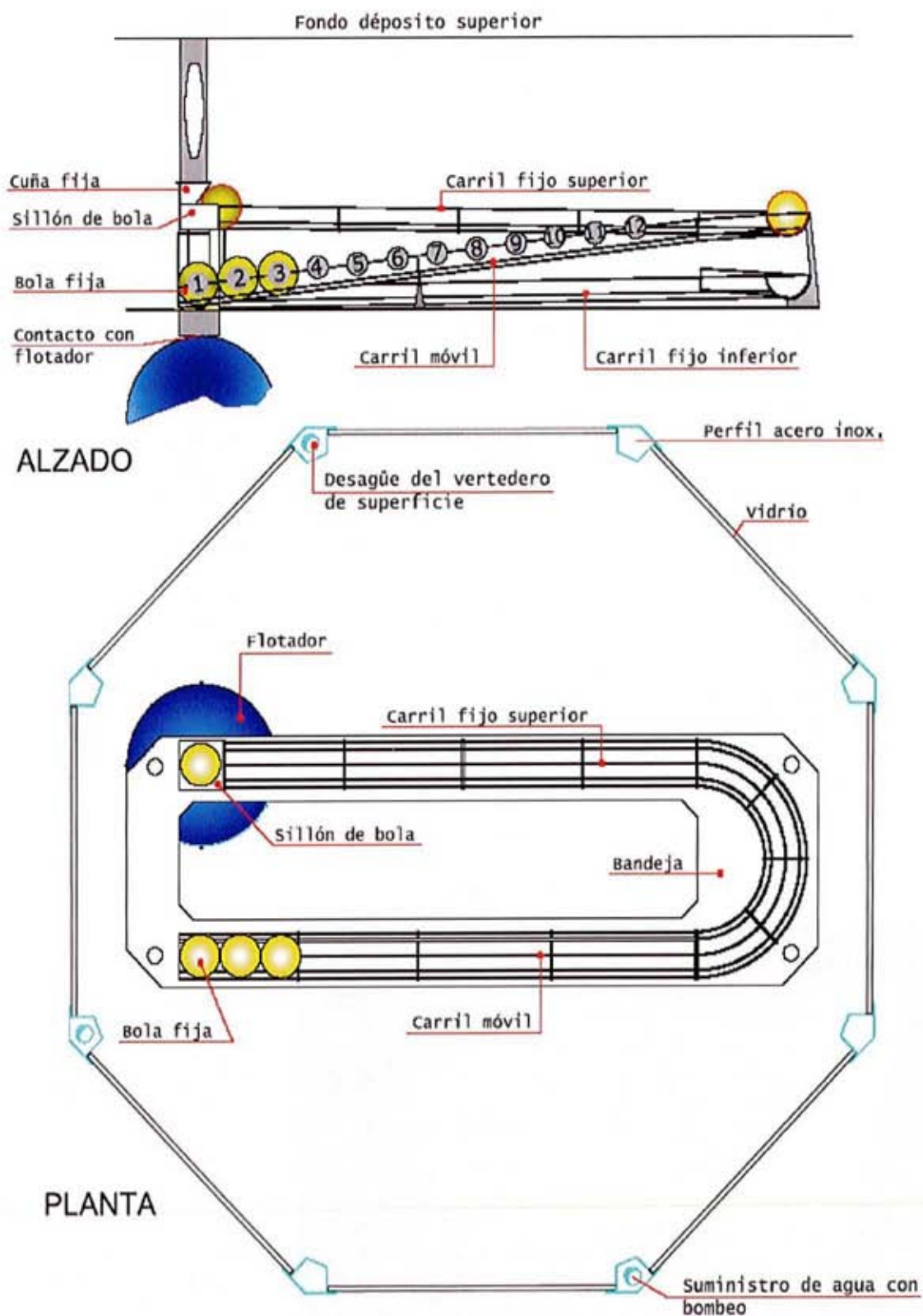
Está formado por tres partes acopladas entre sí, una móvil y las otras dos fijas e iguales. Las tres partes tienen la forma de un carril de sección transversal semicircular y constante, que se consigue con cinco alambres de acero inoxidable que por el exterior se sueldan a semicircunferencias

convenientemente separadas para que cada una de las tres partes sea un sólido rígido e indeformable.

Por el interior del carril pasan rodando bolas macizas de madera de haya pintadas de amarillo fuerte para facilitar verlas, y con 8 cm de diámetro.

El carril móvil ocupa una posición central y es una balanza de brazos iguales, en el que justamente caben trece bolas. En el lateral del carril que mejor ve el público, se fijan pequeñas chapas circulares con los números del uno al doce. La posición normal del carril móvil es que está abajo la mitad izquierda de la balanza, en la que están los números pequeños, y en esta posición está durante 12 horas, en las que cada hora llegará una bola que al ocupar su posición en el carril tendrá delante y en su centro la chapa con el número que indica la hora, para su lectura directa. Cuando llega la bola trece, desequilibra con su peso la balanza, gira para que sea la mitad derecha la que se sitúa abajo, y, en pocos segundos, se vacía de bolas el carril móvil, que inmediatamente vuelve a girar a su anterior posición. La bola correspondiente a la una es la única que se mantiene fija por lo que después de las 12 y del giro y vaciado del carril móvil, pasaremos a la una y dará comienzo otro ciclo de 12 horas.

Los carriles fijos tienen una parte recta y una semicircunferencia. El carril fijo superior recibe una bola cada hora en el extremo de la parte recta, que es la que está a una cota más alta. La bola rueda, debido a la pequeña pendiente del carril, recorriendo la parte recta, luego la parte de semicircunferencia, y finalmente pasa al carril móvil que está en su posición habitual. Cuando llega la bola trece las bolas se vacían y son recibidas por el carril fijo inferior, que también tiene una pequeña pendiente. Entran en la parte que es una semicircunferencia y luego pasan al tramo recto, en el que la primera bola se sitúa en una pieza que puede tener un movimiento vertical. La parte superior de la pieza, que es donde se sitúa la bola, la podemos llamar "sillón de bola", porque tiene un respaldo, dos apoyabrazos y la parte en que reposa la bola con una pequeña pen-



RELOJ DE BOLAS

diente. Bajo el "sillón de bola" la pieza sigue hacia abajo formando un prisma cuadrangular vertical de 17 cm de altura. En la vertical de la pieza hacia abajo, en la clepsidra, se ha colocado un flotador esférico de 30 cm de diámetro y 3,64 kg de peso en el aire, que sube con el nivel del agua y dentro de cuatro guías verticales para que sea ésta la dirección forzada de su movimiento. En su movimiento ascensional el flotador llega a establecer contacto centrado con la pieza que termina en el "sillón de bola", luego durante un tiempo se sumerge un poco más, para que se cumpla el principio de **Arquímedes**, y sigue ascendiendo con la pieza del "sillón de bola" y una bola dentro. Cuando el nivel del agua en la clepsidra llega a su máximo, en el "sillón de bola" se ha introducido una cuña, rigidamente unida al fondo del depósito superior, que transforma el movimiento vertical de la bola en un movimiento horizontal, que saca la bola del "sillón" y la sitúa en la parte alta del carril fijo superior. El resto de los movimientos de la bola ya se han descrito.

Cuando el sifón principal se ceba y entra en funcionamiento, el nivel del agua en la clepsidra baja y también el flotador y la pieza con el "sillón de bola" ya sin bola. Esta pieza tiene un tope que la retiene en la posición adecuada para recibir la siguiente bola del carril inferior.

El hecho de que sea la subida y bajada del nivel del agua en la clepsidra la que mueva el flotador y la pieza es lo que permite que el reloj de bolas se llame anafórico.

3.- OTRAS SOLUCIONES POSIBLES

Una solución alternativa sería que el depósito superior o fuente recibiera el agua mediante una conexión directa con la red de abastecimiento, con lo que no haría falta la bomba en el depósito enterrado para este fin, pero la presión del agua en la red de abastecimiento se debe a una bomba situada más lejos. Por otra parte, el agua que sale de la clepsidra debe ir al depósito enterrado y allí hace falta una bomba para llevarla de nuevo a la red de abastecimiento o, lo que es peor, al alcantarillado. Esta solución no aporta ventaja alguna a la elegida; más bien, lo contrario.

Una segunda solución haría innecesario el sifón secundario y consiste en instalar una pequeña bomba de vacío que se conectaría al interior del tubo interior del sifón principal, y se pondría en marcha y se pararía por la señal que recibiera de dos contactores eléctricos convenientemente situados. La solución funcionaría bien pero, como ya hemos dicho, no queremos hacer uso de la tecnología moderna, mientras la podamos evitar.

La tercera solución consiste en usar el depósito superior o fuente no

sólo para conseguir un nivel de agua constante para suministrar el caudal a la clepsidra, sino también, como un depósito, que, al igual que una cisterna, pueda descargar en muy pocos segundos todo su volumen de agua cuando el nivel está al máximo en la clepsidra. Así, el caudal que llega a la clepsidra se multiplica por cuarenta y se consigue el cebado y funcionamiento del sifón principal. No haría falta el sifón secundario, pero habría que instalar dos flotadores más, también esféricos y de 30 cm de diámetro, uno dentro de la clepsidra y el otro dentro del depósito superior. Este se situaría tapando un agujero del fondo con forma de círculo de 10 cm de diámetro que en la circunferencia de su perímetro tendría silicona flexible para facilitar que el flotador hiciera de tapón. Los dos flotadores estarían guiados para que su movimiento fuera sólo vertical. Cuando el flotador de la clepsidra está en su posición más alta, empuja hacia arriba al otro flotador, con la ayuda de una pieza vertical intermedia, y se produce la descarga rápida de la mitad del volumen del depósito fuente.

Esta solución fue finalista junto con la que hemos adoptado, pero perdió en la final porque el exceso de mecanismos la hace poco fiable en su funcionamiento y complicada para que el público la entienda. Finalmente, todo hay que decirlo, es evidente el parecido de esta solución con una cisterna lo que daría lugar a burlas por parte del público.

4.- BIBLIOGRAFÍA

- AMELKIN, V. V.- *Ecuaciones diferenciales en la práctica* - URSS, 2003.
- LLEDÓ, J.- *Calendario y medidas del tiempo* - Acento, 1999.
- LOMBARDO SOTO, M.- *Clepsidras o relojes de agua*. Tertulia de Geometría, 1990.
- MUÑOZ BOS, F.- *Las medidas del tiempo en la historia* - Universidad de Valladolid, 2003.
- STRANDH, S.- *Máquinas, una historia ilustrada* - Blume, 1982.
- VITRUVIO, M.- *Los diez libros de Arquitectura* - Imprenta Real, 1787. ■

