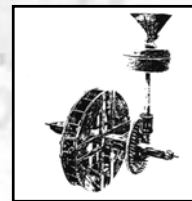


# Molinos de Andalucía

JOSÉ MIGUEL GARRIDO ARANDA



## INTRODUCCIÓN.

Los molinos hidráulicos desde su aparición, aproximadamente entre los siglos I y II a de C., han facilitado al hombre la pesada tarea de la molienda. Estos han tenido una difusión amplia en todo el mundo, fundamentalmente en el área euro-asiática. Una de las primeras referencias sobre los molinos de agua se deben a general romano Pompeyo, que encontró estos ingenios en Cabeira, al NE de Asia Menor (García Tapía y Carricajo 1990), otra cita la encontramos con Vitruvio en el libro X de su obra Arquitectura, fechada en torno al año 25 a C. (Escalera Reyes y Villegas, 1983). A partir de estas fechas existen un sin fin de citas que constatan la existencia de los molinos hidráulicos a lo largo de la historia.

*Los molinos no solo han tenido importancia a lo largo de la historia, sino que han tenido una gran difusión territorial. Centrándonos en España, queda una amplia constancia existencial y bibliográfica en múltiples trabajos que se han realizado sobre los molinos de agua en todas las regiones tanto de la península como insulares. La región andaluza no es ajena a estas circunstancias, pues aún quedan en pie innumerables edificios molineros, tanto es así que aún podemos encontrar molinos en todas las provincias de Andalucía. Los núcleos de molinos se sitúan fundamentalmente en las zonas montañosas o de sierra. Por citar algunas de ellas, tenemos la Comarca de Grazalema en Cádiz, la Comarca de Aracena en Huelva, Comarcas de la Sierra y Valle de los Pedroches en Córdoba, la Serranía de Ronda en Málaga, la Comarca de la Sierra Norte de Sevilla, el entorno de Sierra Mágina en Jaén, el valle del Andarax, la Comarca de los Velez en Almería, la Comarca de Guadix, Valle de Lecrín en Granada. Estas zonas, junto con otras que no se han citado albergan molinos hidráulicos que son fundamentalmente de cubo o de vaso, aunque podemos encontrar otras tipologías.*

## TIPOS DE MOLINOS EN ANDALUCÍA.

La abundancia de ingenios hidráulicos no solo es importante en sus vertientes histórica y territorial, sino por su variada tipología. Vamos a destacar algunos de los tipos existentes en Andalucía y su localización.

La costa atlántica andaluza, en las provincias de Cádiz y Huelva aún quedan **molinos de mareas**, (Derry y Willians, 1977) los cuales utilizaban el movimiento ascendente y descendente de las mareas. Este tipo de molino es muy escaso

El río Guadalquivir alberga aún un tipo de **molino de rueda vertical o aceña**. El ejemplo más ilustrativo es el Molino de la Albolafia, en Córdoba, el cual forma parte del símbolo de la ciudad. De este singular molino queda el majestuoso edificio, que se restauró en la pasada década, y la rueda hidráulica que se reconstruyó completamente. A tenor de la reconstrucción que realizaron de la rueda, ésta en su forma original, tenía dos funciones: una la de elevar agua mediante unos cangilones o vasijas de barro, y otra la de accionar el molino, del cual aún queda una muela.

La Ciudad de los Califas, alberga otros ingenios hidráulicos que solamente vamos a mencionar, estos son: el **Molino de Martos**, a la altura del barrio de la Fuensanta. Bajo el *Puente Romano*, a la misma altura que el Molino de la Albolafia, se emplazan, el **Molino de Enmedio**, el **Molino de Papaloviejo** y el **Molino de San Antonio**. Una vez pasado el *Puente de San Rafael* se sitúan el **Molino de La Alegría** en la margen derecha, y el **Molino de San Rafael** en la margen izquierda (Garrido Aranda J M, 2000).

El siguiente tipo de molino que encontramos en Andalucía es el **molino de regolfo**. De este tipo de molino hemos tenido ocasión de estudiar el anteriormente citado Molino de la Alegría. Este presenta las mismas estructuras que se describen en *Los Vetium Libros de los Ingenios y de las Máquinas de Juanelo Turriano*, con la particularidad que el edificio del molino alberga un total de seis cuerpos de molinos independientes.

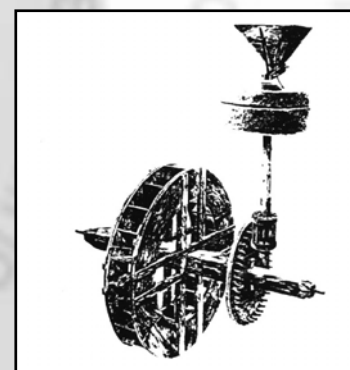
El gran grupo de molinos, que es el más abundante en la Comunidad Andaluza, es el **molino de cubo** o de **vaso**, también conocido como de **rodezno horizontal**. Este tipo se estudiará con mas detalle más adelante.

## FUNCIONAMIENTO.

Nos vamos a centrar en tres de las cuatro tipologías indicadas, por ser las tres más ilustrativas en cuanto al modo de funcionamiento y la ubicación de los mismos dependiendo del relieve y el caudal de agua disponible.

Las aceñas, o molinos de rueda vertical se sitúan en zonas llanas con ríos caudalosos. Estos utilizan la energía del agua utilizando grandes masas de agua, o lo que es lo mismo, un elevado caudal y pequeñas pendientes o desnivel del terreno. Utilizan ruedas hidráulicas de un diámetro considerado para que el agua pueda ejercer a su paso un

**Figura 1:** Maquinaria de un molino de rueda vertical, (Moris, 1995).



momento de giro en la parte inferior de la misma. En la figura 1 se muestran los elementos fundamentales de un molino de rueda vertical

Este tipo de molino, como se observa en la figura, necesita de un engranaje de linterna para alcanzar el régimen de revoluciones en la piedra corredera o piedra móvil.

Los molinos de regolfo también se sitúan en zonas llanas y ríos caudalosos, necesitan grandes caudales de agua y muy poca pendiente.

A diferencia de las aceñas no utilizan una gran rueda vertical, sino que la rueda es de muy pequeño diámetro, en torno a un metro, y se aloja dentro de un cubo o cubete de sección circular, y la posición de la rueda no es vertical sino horizontal.

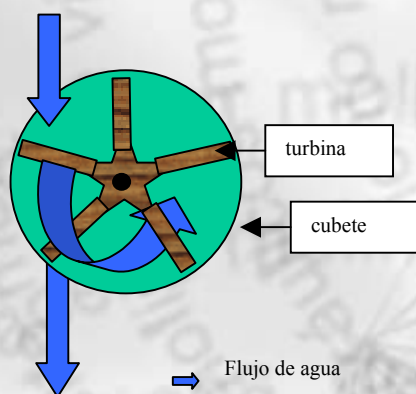
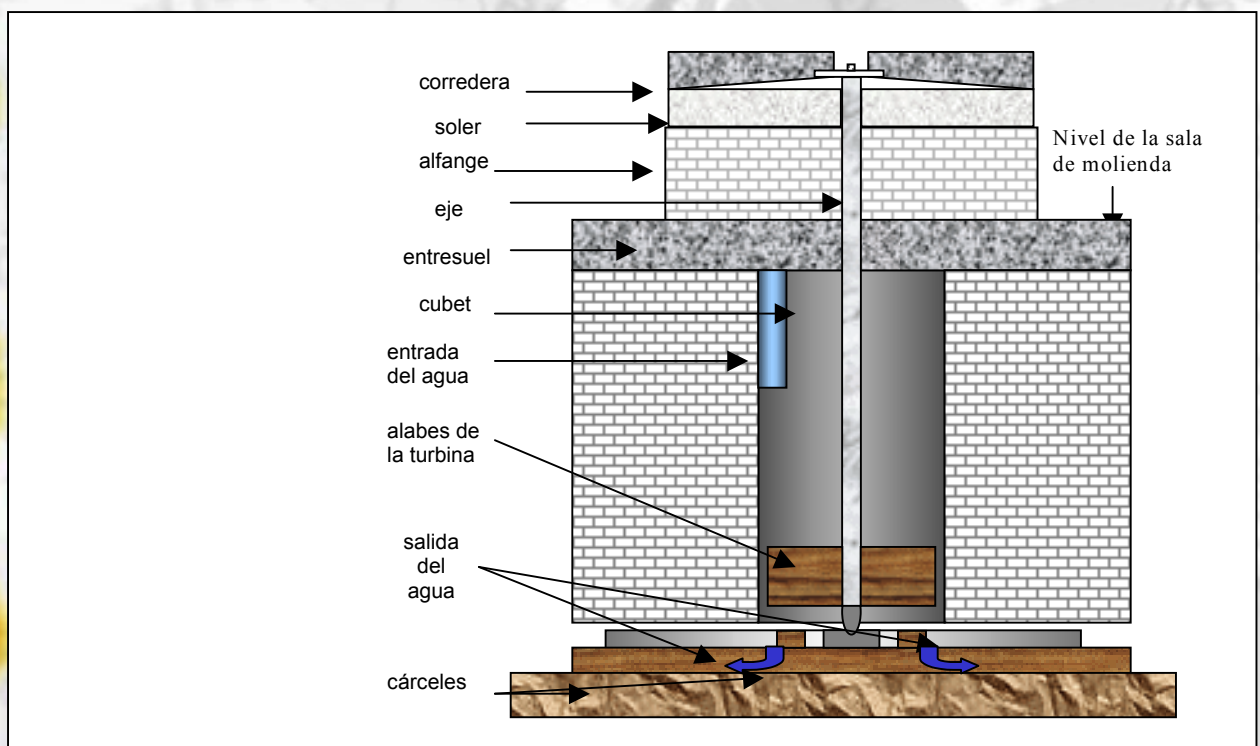


Figura 2: Esquema en planta de la entrada y salida de agua en un molino de regolfo (Garrido Aranda JM, 2000)

Este cubete tiene la entrada de agua por la parte superior del mismo, a través de una ranura tangencial tal como se indican en las figuras 2 y 3. La salida se realiza por la parte inferior ya que el cubete está sobre unos dados, las cárceles, que permiten la salida del agua libremente. El funcionamiento consiste en que el agua entra por la parte superior tangencialmente y realiza un movimiento rotacional o de giro dentro del cubete arrastrando en este movimiento a la turbina en posición horizontal (ver figura 2), la cual acciona la piedra, ya que la turbina y la piedra corredera son solidarios.



El tercer tipo de molino que se va a estudiar a continuación, con más detenimiento, es el molino de cubo o de vaso. Este tipo a diferencia de los dos tipos expuestos anteriormente, funciona con pequeños caudales de agua, del orden de 50 l/s, y además necesita de un desnivel o pendiente del terreno para poder aprovechar de esta forma la energía potencial del agua.

## ESTUDIO DE LOS MOLINOS DE CUBO O DE VASO

El estudio se ha realizado en la provincia de **Granada**, concretamente en el municipio de **La Peza**, que contaba con 14 molinos a mediados del siglo XX, uno de los molinos se transformó en Central Hidroeléctrica a principios del citado siglo, otro de ellos se transformó en aserradero y 4 han desaparecido debido a la construcción de una presa.

El desarrollo del estudio se va a ilustrar tomando un molino característico de la zona, el *Molino de Roseto*. El trabajo se inició midiendo las dimensiones de los elementos que componen la conducción hasta el molino y las estructuras propias del ingenio hidráulico, con el fin de obtener datos para aplicar al molino de cubo o vaso las leyes de la hidráulica. Para el cálculo se han estudiado las pendientes de las conducciones, secciones de paso y caudales que estas conducen. El tipo de conducción original es de sección trapezoidal. Para el sistema hidráulico propio del molino se han utilizado las dimensiones del cubo del molino citado, el saetín que se ha tomado es característico de la zona, sus dimensiones se indican en la figura 5. El rodezno que se ha tomado como tipo de la zona es el utilizado de la zona, formado por cucharas de madera, el estudiado es el indicado en las figuras 6 y 11.

*Los trazados sobre el terreno no se han modificado, y las pendientes de la solera son las originales. Las dimensiones de la sección de la acequia (molino característico), así como la pendiente medidas en el tramo donde se han tomado las lecturas de caudal y la pendiente total de la acequia.*

En la zona se han encontrado tres tipos de cubo: el de sección circular y alzado vertical, el de sección circular y alzado inclinado, y el de sección cuadrada y alzado vertical, el ejemplo se va a estudiar con el de alzado vertical y sección circular (ver figuras 5 y 6). Las dimensiones que se tomaron como referencia son las del molino de Roseto, en las que el diámetro del cubo es de 0.8 m, la altura de 5m, las dimensiones de la tajea la tajea (largo, ancho, calado max.) son: 7,-0.3,-0.45 m respectivamente.

## SISTEMA HIDRAULICO.

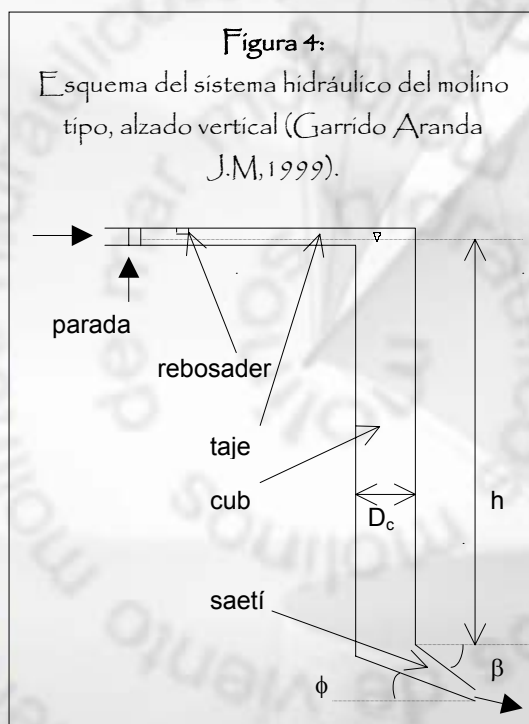
### Descripción del sistema de derivación y del canal de conducción.

El sistema hidráulico de los molinos de agua, se inicia con la captación del caudal necesario por medio de un azud, que en este caso se clasifica como un **azud de selva**, (González Tascón, 1998) ya que predominan la madera como elemento resistente, y los ramajes como elementos impermeabilizantes. También se encuentran piedras y sacos de plástico llenos de arena, para dar más cuerpo a la pequeña presa. No son totalmente estancas permitiendo el paso de agua por la coronación y a través del propio cuerpo de la presa

Tras el sistema de captación, está la conducción de agua a través de un canal o acequia, la cual presenta un **descargadero** o derivación hacia el río situado a pocos metros del azud (15 a 20 m), con el fin de evitar la colmatación de la conducción en caso de avenida, así como para la carga o descarga de la acequia. El canal de conducción consiste en una acequia o caz que para el caso de los molinos de La Peza, los molinos están perfectamente integrados en el sistema de acequias, por lo que estas sirven a la vez para regar y mover los diferentes molinos.

### Descripción del sistema hidráulico del molino: tajea, cubo y saetín.

Del canal o acequia principal se deriva un ramal de iguales dimensiones, el cual conduce el agua hasta la **tajea** o canal de aproximación al molino, que es el tramo final de la conducción (ver figura 4). Esta se inicia en una **parada** o "pará" que permite o no, la



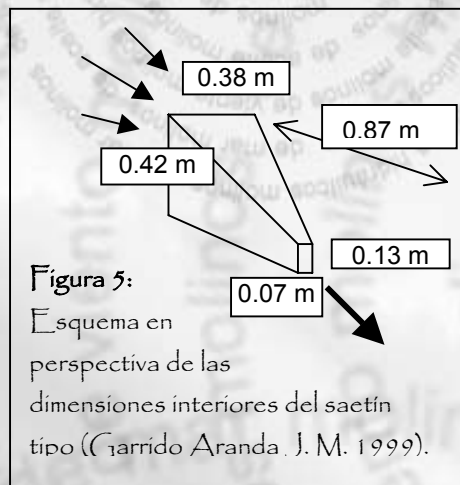
entrada de agua hacia el cubo en caso de avería u operaciones de mantenimiento de la maquinaria del molino.

En este tramo se encuentra un aliviadero con la función de derivar el caudal sobrante fuera del cubo, conduciendo el agua hasta la salida del molino o salida del cárcavo, con el fin de evitar humedades en los paramentos verticales de éste. Este aliviadero está calibrado para el caudal máximo que admite el molino. La tajea termina o desemboca en el **cubo** que es una conducción cerrada de sección circular o rectangular, en alguno de los casos.

El cubo es el elemento más determinante en la energía que nos va a suministrar el molino,

pues la diferencia de cota entre sus extremos es la carga hidráulica teórica que tiene el agua a su salida.

La sección de paso en el cubo es comparativamente mayor que la de la **tajea**.



La finalidad de esta mayor sección de paso es disminuir las pérdidas por rozamiento en las paredes, además de actuar como “depósito regulador”, manteniendo un nivel más o menos constante frente a pequeñas variaciones de caudal.

El agua en el extremo inferior del cubo sufre un cambio de dirección, en el codo, y un estrechamiento, en el saetín. El codo es el elemento de transición entre el cubo y el saetín, ver figuras 4 y 5.

*La salida del agua del saetín es a presión atmosférica con una velocidad determinada, dicha velocidad depende directamente de la altura del cubo y de las pérdidas de carga en el saetín fundamentalmente, como después se comprobará en los cálculos.*

El saetín tiene una orientación precisa mediante los ángulos  $\phi$  y  $\beta$  indicados en la figura 4, para hacer incidir el agua de forma precisa en las cucharas del rodezno.

El cárcavo es una bóveda de aproximadamente 1.5 m de altura y 2 m de profundidad, y está situado al nivel más bajo del molino, en esta “dependencia” se alojan el saetín y el sistema mecánico, junto con los elementos de regulación.

## SISTEMA MECANICO.

El sistema mecánico del molino está compuesto por elementos fijos y móviles, los elementos fijos pueden ser de estructura o soporte y de regulación. El elemento que une el sistema mecánico y el hidráulico es el rodezno (ver figura 6) caracterizado por el diámetro, número de álabes y forma de estos.

Los elementos móviles son: el **rodezno**, la piedra **corredera** y el eje que une a ambos, compuesto a su vez por varias piezas: la **labija**, el **palahierro**, la **maza** y el **gorrón**. Estos elementos están soportados por una viga de madera, la puente, la cual está

apoyada en uno de sus extremos y suspendida por el opuesto por medio de la varilla del alivio (ver figura 8).

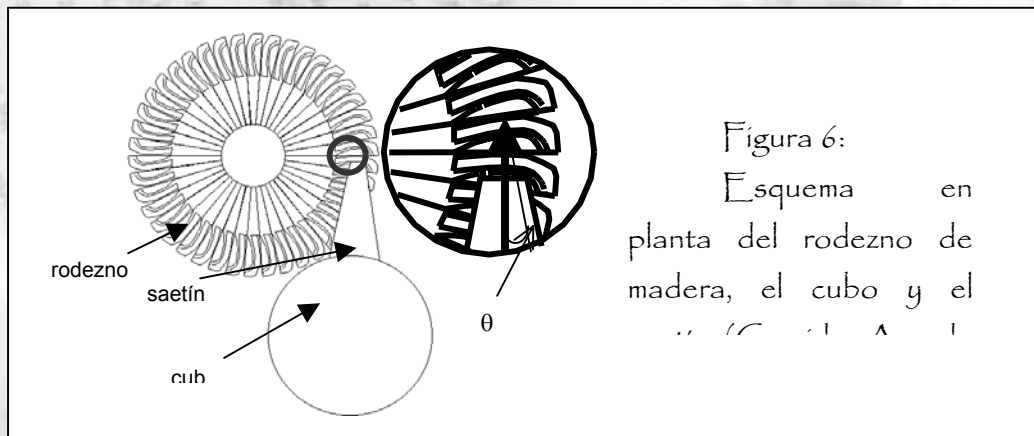


Figura 6:  
Esquema en planta del rodezno de madera, el cubo y el alivio.

Las operaciones de maniobra que podemos realizar son: regulación de la separación entre las piedras con el alivio, regulación del caudal de salida mediante la llave (ver figura 6), y la de marcha-paro que se consigue interponiendo una tabla, la paradera, entre el agua que sale del saetín y los álabes del rodezno (ver figura 7).

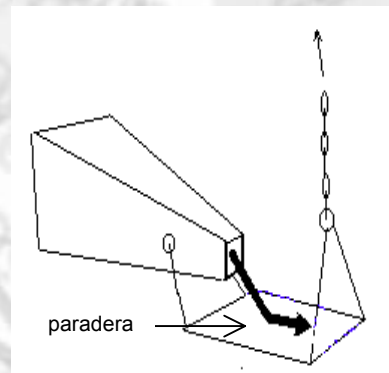


Figura 7:  
Dibujo en perspectiva del saetín y de la paradera (Garrido Aranda JM, 1999).

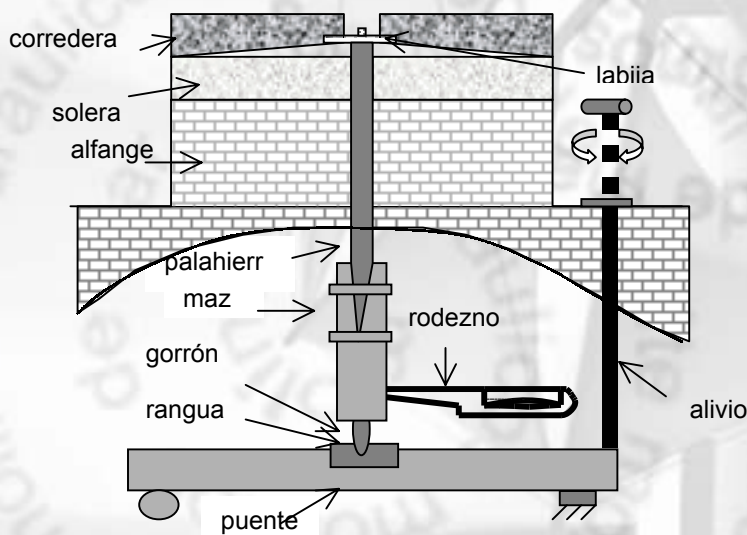


Figura 8:  
Esquema del sistema móvil del molino de rodezno y maza de madera (Garrido Aranda JM, 1999).

## Balance Hidráulico.

Una vez expuestos los principales elementos de un molino de rodezno horizontal se expone el procedimiento del cálculo hidráulico se ha realizado.

La energía potencial teórica, es la que existe entre los puntos 1 y 2 indicados en la figura 9.

Se parte de los siguientes datos: **altura y diámetro del cubo, tipo de material de las paredes, dimensiones y forma del saetín, geometría de los álabes** o cucharas del rodezno y **ángulos de incidencia** del agua en los álabes. Con estos datos se puede determinar el radio del rodezno y los ángulos tanto de incidencia en la cuchara,  $\theta$  (ver figura 6), como de salida del agua en la cuchara,  $\delta$  (ver figura 10).

Se parte del cálculo de las sucesivas pérdidas que se producen a lo largo del recorrido del agua (cubo, codo, saetín), la velocidad con que el agua incide en los álabes y el impulso que trasmite, con estos datos se obtiene un valor del momento que el agua transfiere al rodezno, y por tanto el momento en el eje.

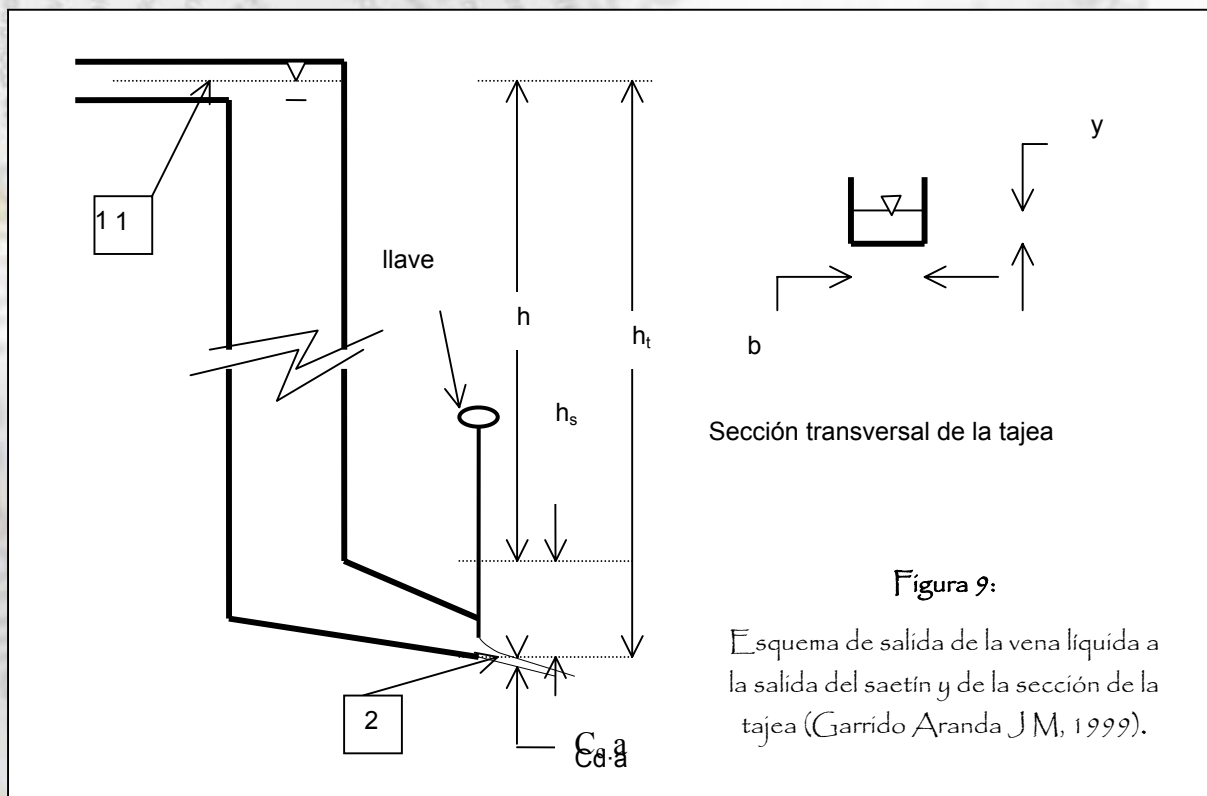
Conocido el momento en el eje, se han de calcular las pérdidas que se producen por rozamiento, calentamiento de las piedras, etc. y el momento necesario para vencer la inercia del sistema en el arranque. En la fase de trabajo, el momento en el eje se invierte en vencer los rozamientos en el cojinete (conjunto de gorrón y rangua), igual que en el caso anterior, y en el rozamiento que se produce a causa de la molienda. En la situación de molienda todo el sistema giratorio se comporta como un volante de inercia, homogeneizando el momento de giro durante la molienda.

Los cálculos que se derivan de la metodología propuesta se realizan bajo la hipótesis de régimen permanente y uniforme, tanto en el caso de conducciones libres (acequías) como en el caso de conducciones forzadas (cubo y saetín), lo que conduce a resultados coherentes.

El cálculo de las fuerzas de rozamiento no se ha podido calcular, por no tener datos suficientes para conocer las condiciones de trabajo del cojinete formado por el **gorrón** y la **rangua**.



## CALCULO DE CAUDALES MAXIMOS Y MINIMOS.



Los caudales máximos y mínimos que circulan por el sistema, vienen determinados por la sección de salida en el saetín, que es regulable por medio de la llave (ver figura 9), desde la abertura máxima a completamente cerrada. Esta maniobra de regulación es para mantener la carga de agua,  $h_t$ , constante frente a variaciones del caudal que llega al molino.

El canal limita el máximo caudal de entrada por medio de la sección y la pendiente, se trata de una conducción libre a la entrada. El caudal que circula el cubo y el saetín se estudiará de manera análoga a una conducción cerrada de sección circular, con sección de salida modificable en su extremo por una compuerta de fondo rectangular abierta a todo lo ancho. La sección de paso por el saetín depende de la apertura de la llave, parámetro  $a$  y el coeficiente de contracción  $C_d$ , indicados en la figura 9.

El caudal que puede circular el canal se mide directamente en la sección considerada, en nuestro caso se han adoptado dos procedimientos, uno a través de un molinete sumergido en la corriente, según se describe en Losada (1995).

El otro método es a partir de la ecuación de Manning; se ha de conocer la pendiente de la conducción ( $I$ ), el radio hidráulico ( $R$ ), y el material para poder estimar su aspereza o factor  $n$  de Manning supuesto régimen uniforme.

Con esto se puede calcular la curva de gasto para el canal en cuestión, y conocer los caudales mínimos y máximos. A partir de un calado mínimo, que se podrá calcular

conociendo el mínimo caudal capaz de poner en marcha el sistema, medido a la salida del saetín a partir de la apertura de la llave de este; y un calado máximo dado por la altura del cajero de la acequia, y el resguardo que se tenga previsto para la misma.

Si se modela el funcionamiento del sistema hidráulico de la figura anterior, como un desagüe en un depósito de nivel constante a través de un orificio en pared delgada de sección variable, siendo esta sección la apertura del saetín, la velocidad de salida,  $u_i$ , se obtiene de:

$$u_i = \sqrt{2 \cdot g \cdot h_t} \quad [1]$$

siendo  $h_t$  la altura total del cubo.

El caudal de salida,  $Q$ , para el caso de desagüe por orificios se expresa por:

$$Q = Cd \cdot \omega_s \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h_t} \quad [2]$$

El factor  $Cd$  es el coeficiente de desagüe a través de orificios función de los diámetros del cubo y del saetín. Incluye también la contracción que se produce en la vena líquida a la salida y las pérdidas por rozamiento,  $\omega_s$  la sección a la salida del saetín,  $g$  valor de la gravedad.

Conocido el caudal y las secciones de entrada y salida, se puede despejar la velocidad en la ecuación [1].

## PERDIDAS DE CARGA.

Las pérdidas que se producen en el cubo, las calculamos utilizando la ecuación de Darcy-Weisbach (Losada., 1995), conociendo previamente velocidad y sección de paso en el cubo o su diámetro,  $D_c$ , la expresión es la siguiente:

$$h_{fc} = f \cdot \frac{h}{D_c} \cdot \frac{u_c^2}{2 \cdot g} \quad [3]$$

el valor  $f$  corresponde al parámetro del mismo nombre del diagrama de Moody

Las pérdidas de carga en el codo se obtienen de:

$$h_{fcd} = k \cdot \frac{u_{cd}^2}{2 \cdot g} \quad [4]$$

donde se ha supuesto un valor de  $k=0.75$  para nuestras condiciones.

Las pérdidas en el saetín se obtienen usando también [4], donde  $k$  se obtiene de:

$$k = f \cdot \left[ 1 - \left( \frac{D_s}{D_e} \right)^2 \right]^2 \quad [5]$$

$f$  en este caso depende de los ángulos de estrechamiento del saetín.

## BALANCE ENERGÉTICO EN LAS CUCHARAS.

El agua transfiere al rodezno una fuerza o impulso, a través de las cucharas, que depende de: el ángulo de ataque del agua en la cuchara,  $\phi$ ; el ángulo de salida del agua en la cuchara,  $\delta$ ; la velocidad de traslación del punto de incidencia del agua; y del brazo o distancia al eje de l punto de incidencia al eje del rodezno.

Conociendo los datos anteriores se puede conocer la fuerza,  $\vec{R}$ , que recibe el rodezno del agua, la figura 7 representa la planta de una cuchara real.

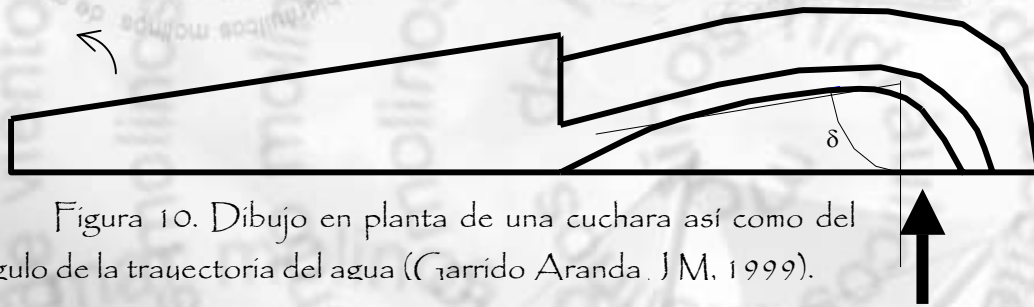


Figura 10. Dibujo en planta de una cuchara así como del ángulo de la trayectoria del agua (Garrido Aranda, J.M., 1999).

A partir de su componente en el eje x, se obtiene el momento de giro en el eje del rodezno:

$$M_{ag} = R_x \cdot r \quad [6]$$

El cálculo de  $\vec{R}$  se hace aplicando la ecuación de Euler:

$$\vec{R} = -(-n_e \cdot N_e + n_s \cdot N_s) \quad [7]$$

donde  $n_e$  y  $n_s$  son los versores de las secciones de entrada y salida y  $N_e$  y  $N_s$  las impulsiones en cada una de las secciones.

$$N_e = \rho \cdot Q \cdot w_e \quad [8]$$

con:  $\rho$  = densidad específica del agua,  $Q$  = caudal que incide sobre la cuchara,  $w_i$  = la velocidad relativa del agua con respecto a la cuchara.

## SISTEMA MOVIL

El sistema móvil está compuesto por tres elementos fundamentalmente, el rodezno, el eje (gorrón, maza y palahierro) y la piedra corredera. En estos elementos el momento de inercia se va a oponer al giro, junto con el rozamiento en el cojínete del que forma parte el gorrón.

El momento de inercia total  $I_t$  sería la suma del momento de inercia de cada una de las piezas que calculamos a continuación:

Para la piedra conocemos el diámetro exterior,  $R_p$ , el diámetro interior,  $r_p$ , el espesor,  $e$ , y la densidad del material,  $\rho_p$ , que generalmente va a ser piedra caliza. El momento de inercia es:

$$I_p = \frac{1}{2}(\pi \cdot R_p^2 \cdot e \cdot \rho_p) \cdot R_p^2 - \frac{1}{2}(\pi \cdot r_p^2 \cdot e \cdot \rho_p) \cdot r_p^2 \quad [9]$$

El rodezno es una pieza que se compone como ya sabemos de cucharas, estos elementos son de geometría irregular, por lo que a efectos de cálculo del momento de inercia, vamos a suponer que se comporta como un disco macizo, la expresión de su momento de inercia sería:

$$I_r = \frac{1}{2}(\pi \cdot r^2 \cdot e_r \cdot \rho_m) \cdot r^2 \quad [10]$$

$r$  es el radio del rodezno,  $e_r$  el espesor de este y  $\rho_m$  es la densidad de la madera mojada, ya que el rodezno está mojado de forma permanente.

El eje no se va a considerar, ya que su momento de inercia se calcula igual que en el caso del rodezno, aunque la densidad es mucho mayor, el radio es muy pequeño, y nos va a dar un valor de  $I$  despreciable frente a los otros dos. Así:

$$I_t = I_p + I_r \quad [11]$$

Para que empiece a girar el molino, el momento que produce el agua ( $M_{ag}$ ) ha de ser superior a la suma del momento de rozamiento ( $M_{roz}$ ) en el cojinete más el momento de inercia del sistema ( $I_t$ ) por su aceleración angular ( $\alpha$ ). La ecuación que podríamos plantear es la siguiente

$$M_{ag} - M_{roz} = I_t \cdot \alpha \quad [12]$$

Una vez que el sistema ha alcanzado su velocidad de régimen en vacío, empieza a caer el grano entre ambas piedras, se produce un rozamiento que hace aparecer un momento que tiende a frenar la piedra, a este momento lo vamos a designar momento de la molienda,  $M_m$ . Ahora la piedra y el rodezno van a funcionar como un volante de inercia que impide que se produzca una deceleración muy acusada, ayudando así a la molienda.

El agua en esta situación ya no incide con la velocidad absoluta, sino con la relativa, por lo que su energía es inferior que en el arranque y produce un momento que designaremos  $M'_{ag}$ .

Además de la molienda del grano la energía del agua se pierde debido a los rozamientos, a la disipación de energía producida por los ruidos, calor etc.. El rozamiento en el eje produce una disminución de la velocidad angular por lo que a la velocidad de régimen ya están incluidas estas pérdidas de energía, el resto de pérdidas estaría englobado en el término  $M_p$  de la siguiente ecuación que proponemos a continuación:

$$M'_{ag} = M_m + M_p \quad [13]$$

## ENERGÍA PRODUCIDA

*Para completar el estudio se necesitaría saber el momento que se produce en la molienda, pero esto solo se podría conocer mediante un ensayo al freno calculando la diferencia entre el molino realizando la molienda y trabajando en vacío. De esta misma forma se podría realizar un experimento con un dinamómetro para conocer los rozamientos que se producen en el arranque.*

La potencia teórica que proporciona el molino de Roseto si gira a 60 r.p.m., es de 1456.4 W, ó 1.97 CV, que en definitiva es la energía que, según esta metodología propuesta, podemos utilizar manteniendo el caudal medido para el presente cálculo.

Suponiendo que este molino estuviese en funcionamiento 16 horas al día, durante 300 días al año, produciría:

$$1456.4 \text{ W} \cdot 10^{-3} \text{ kW/W} \cdot 3600 \text{ s/h} \cdot 16 \text{ h/día} \cdot 300 \text{ días/año} = 25.166 \cdot 10^6 \text{ kW/año.}$$

## Comparación con la Turbina Tipo Pelton.

La primera analogía que encontramos es el inyector del agua el cual es regulable en la sección de paso. La diferencia estriba en el inyector; para el caso del molino es de sección cuadrada, y en la turbina Pelton es circular. El elemento regulador en el molino es una compuerta colocada en el extremo de salida, la llave, y en el caso de la turbina es una aguja colocada en el interior del inyector.

La disposición de la turbina Pelton puede ser horizontal o vertical; la disposición vertical permite una mejor evacuación del agua hacia el socaz, una mejor accesibilidad para las reparaciones, pero es más problemática la colocación de más de un inyector. La disposición horizontal facilita la colocación de la propia turbina así como la instalación de varios inyectores por turbina, pero las reparaciones y evacuación de agua son más dificultosas.

La disposición del rodezno siempre la hemos encontrado horizontal y con un solo inyector o saetín por rodezno. Lo que sí es usual es un inyector bifurcado en dos subinyectores, denominados saetín de calzones para hacer girar dos rodeznos en sentidos opuestos, dentro del mismo cárcavo.

Esta cuchara es de un rodezno con giro levógiro (contrario a las agujas del reloj), en este caso el agua incide en la cavidad frontal de la cuchara (vista en planta). Como se aprecia en la figura 8 solo hay una cavidad en cada cuchara, el agua incide en el extremo derecho y sale por la zona central (parte izquierda de la cavidad).

La turbina Pelton es la que más se asemeja al rodezno de madera, ya que los álabes tienen formas comparables. En la figura 11, se representan las vistas de una cuchara real a la escala indicada, (con trazo discontinuo se representan las líneas ocultas).

La forma de cuchara en la turbina es de doble cavidad, lo cual supone un avance y una mejora en el aprovechamiento del agua. En el rodezno solo tiene una cavidad por cuchara.

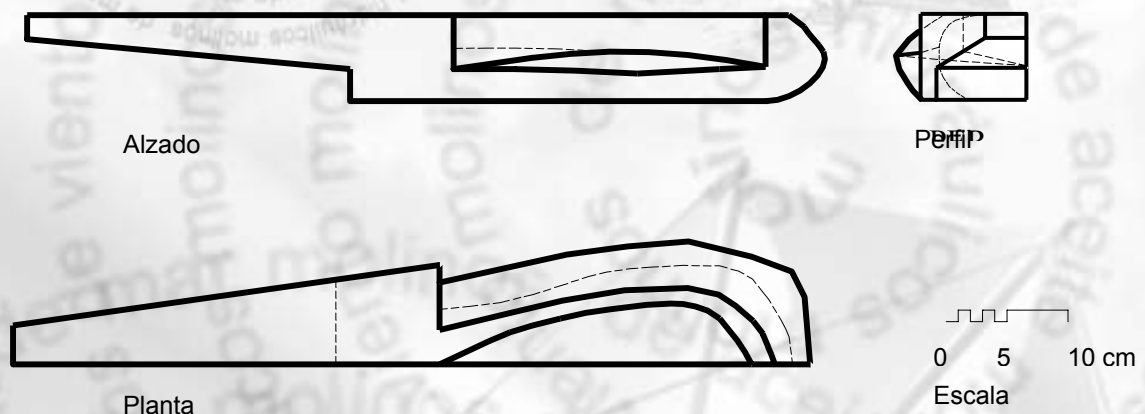


Figura 11: Vistas principales de una cuchara de madera del rodezno (Garrido Aranda JM, 1999).

Los álabes presentan una entalladura, para evitar que el agua incida por la cara posterior de la cuchara. La doble cavidad divide el chorro en dos partes iguales de forma simétrica para evitar empujes diferenciales en la cuchara. El ángulo de estrechamiento del saetín,  $\alpha$ , conviene que sea pequeño para que las pérdidas provocadas por el choque sea mínimo. El ángulo de salida del agua en la cuchara,  $\delta$ , en el caso de la turbina Pelton es muy pequeño, en el caso del rodezno es mayor.

Las cucharas en el rodezno de madera son intercambiables. Para el caso de las turbinas, las hay con cucharas intercambiables y las hay de una sola pieza de fundición.

*El número de álabes para las turbinas Pelton oscila de 17 a 26 por rueda, dependiendo de la velocidad específica, de forma que para una rueda de diámetro determinado por una carga y una velocidad de giro, si la velocidad específica es alta, implica que el gasto es grande lo que requiere un mayor tamaño de las cucharas y por tanto menos álabes (Polo Encinas, 1975).*

El número de álabes del rodezno estudiado, con un diámetro de 1.4 m es de 42.

La incidencia del agua en la turbina es tangencial por la orientación del inyector, en este sentido, el saetín se puede considerar como un inyector, ya que hace las mismas funciones de orientar el chorro de agua y de regular el caudal de salida.

Los resultados obtenidos al comparar algunos de los coeficientes existentes para definir las turbomáquinas demuestran lo anterior. Así la velocidad específica dinámica o de Kammerer,  $n'_s$  (Carlier 1975):

$$n'_s = \frac{N \cdot \left(\frac{P}{\rho}\right)^{\frac{1}{2}}}{(g \cdot H)^{\frac{5}{4}}} \quad [14]$$

que en turbinas Pelton tienen valores entre 3 y 30, alcanza en nuestro molino un valor de 3.73.

También el Coeficiente de velocidad:

$$\phi_v = \frac{v}{\sqrt{2 \cdot g \cdot H}} \quad [15]$$

toma en nuestro caso, el valor de 0.43 lo que concuerda con el valor recogido en la bibliografía para las turbinas Pelton, 0.47 (Polo Encinas M, 1975), para las turbina Kaplan sube a 2.5.

### Conclusiones y Resultados.

El patrimonio molinar de Andalucía, y en concreto el del municipio de La Peza (Granada) ha sido muy importante, está en permanente deterioro y en peligro de desaparición.

El sentido de giro del rodezno es levógiro, circunstancia que coincide con los molinos de regolfo, lo cual se puede atribuir al sentido de giro del agua por la fuerza de Coriolis en el hemisferio norte.

Los elementos de regulación y maniobra funcionan aprovechando la fuerza de la gravedad (ausencia de muelles u otros mecanismos); y en caso de avería el sistema evoluciona hacia detener el molino.

La aplicación de las leyes de la hidráulica en el sistema indica que las mayores pérdidas se producen en el saetín.

El rendimiento del molino, para poder estimarlo con mayor precisión, es necesario realizar experimentación en campo.

La piedra corredera actúa como un volante de inercia que permite un funcionamiento homogéneo del molino.

El rodezno de madera y la turbina Pelton, se pueden clasificar dentro del mismo tipo de máquinas hidráulicas (máquinas de impulso).

## Bibliografía.

Carlier M, 1975. *Machines Hydrauliques*. Ecole National du Genie Rural des Eaux et des Forêts, pp 319-351. Paris.

Derry, T. K. y Williams T. J. 1977. *Historia de la Tecnología*; volumen 1: *Desde la Antigüedad Hasta 1750*, pp 86-372. Siglo XXI de España Eds., S.A., Madrid.

Escalera Reyes, J. y Villegas Santaella, A. 1983. *Molinos y Panaderías Tradicionales*, 173 pp. Ed. Nacional, Madrid.

García Tapia N. Carricajo Carbajo C. 1990. *Molinos de la Provincia de Valladolid*, 350 pp. Ed. Cámara Oficial de Comercio e Industria de Valladolid, Valladolid.

Garrido Aranda, J. M. 1999 *Estudio de los Molinos de Rodezno Horizontal en La Peza (Granada)*. E.T.S. Ingenieros Agrónomos y Montes, Universidad de Córdoba. Córdoba.

Garrido Aranda, J. M. 2000 *Informe Técnico realizado para e Jardín Botánico de Córdoba sobre el Molino de la Alegría*. Córdoba (2 ejemplares, 19 pp).

González Tascón J. 1998 *Obras de regadío en: Los Ingenios y las Máquinas. Ingeniería y Obras Públicas en la Época de Felipe II*, pp 228-230. Editado por Sociedad Estatal para la Commemoración de los Centenarios de Felipe II y Carlos V.

Losada Villasante A, 1995. *El Riego. Fundamentos Hidráulicos*, 431 pp. Ed. Mundi-Prensa, Madrid.

Morís Menendez-Valdés G, 1995. *Ingenios Hidráulicos Históricos: Molinos Batanes y Ferrerías en: Ingeniería del Agua, Vol. 2 N<sup>o</sup> 4 diciembre 1995*, pp25-43. Imprenta Sichert Villareal (Castellón).

Polo Encinas M, 1975. *Turbomáquinas Hidráulicas. Principios Fundamentales*, 261 pp. Ed. Limusa, México.

## AGRADECIMIENTOS

A María, que hoy es ni mujer y la madre de mí Julián, por compartir muchas cosas conmigo, y apoyarme en el tema de los molinos desde el principio.

A Luis Parras Galán, José Roldán Cañas, mis directores de Proyecto Fin de Carrera, sin los que hoy esta comunicación no hubiese tenido el mismo contenido.