

## Evolución tecnológica en los molinos hidráulicos de rodete horizontal

T. Pujol, L. Montoro, J. Velayos, J.R. González

*Dpto. Ingeniería Mecánica y de la Construcción Industrial, Escola Politècnica Superior, Universitat de Girona*  
toni.pujol@uudg.edu

---

### Resumen

*La importancia histórica de los molinos hidráulicos es ampliamente reconocida pues, en las sociedades preindustriales, fueron una herramienta esencial para el cambio de una economía de subsistencia a una economía de mercado. Ya en la revolución industrial, la disponibilidad de fuentes de energía más eficientes, constantes y autónomas produjo la casi total desaparición de estos mecanismos. Contraria a la visión general de artilugios obsoletos con un funcionamiento elemental, nuestro estudio de campo ha revelado la existencia de una evolución tecnológica significativa en los molinos hidráulicos de rodete horizontal. Así, la incorporación de canales de conducción presurizados con múltiples inyectores incidentes en rodetes modificados permitió superar, incluso, los rendimientos hidráulicos ofrecidos por molinos de rodete vertical alcanzando valores del 81%. Aquí, estos rendimientos hidráulicos han sido calculados mediante complejas simulaciones de dinámica de fluidos computacional (DFC) con modelos de última generación. El estudio comparativo con dispositivos clásicos confirma el gran salto tecnológico sufrido por algunos de estos mecanismos que, sin duda, les permitió sobrevivir en pleno funcionamiento hasta la actualidad.*

---

### INTRODUCCIÓN

Técnicamente, los molinos hidráulicos convierten la energía potencial del agua acumulada en un embalse o pequeño estanque en energía cinética de un rodete cuyos álabes reciben el impacto de un chorro de agua. Esta transformación de energía hidráulica en mecánica es posteriormente utilizada para múltiples propósitos, donde el más común corresponde moler grano para la producción de harina.

La Fig. (1) muestra diferentes tipologías de molinos hidráulicos [1]. Históricamente se considera el tipo de rodete horizontal como el precursor de la utilización de la energía hidráulica en molinos pues referencias de su uso ya se encuentran en la Grecia y Roma clásicas. Esta configuración utiliza una transmisión fija solidaria con la muela móvil que se encuentra en una sala situada a una altura superior a la del rodete. Por su parte, la configuración vertical (casos b-d en la Fig. (1)) requiere engranajes y transmisiones para modificar el sentido de giro y aprovechar, así, la energía mecánica del rodete. Los molinos de rodete horizontal (también conocidos como molinos de tipo griego) son comunes en regiones próximas a la cuenca Mediterránea mientras que los de rodete vertical predominan en el resto de Europa.

Diversos autores han calculado, tanto de forma experimental como teórica, el rendimiento hidráulico máximo de los molinos de rodete vertical, alcanzando valores del 65% (canal inferior), 71% (canal superior) y 66% (caída libre). Estimaciones para molinos clásicos de rodete horizontal, sin embargo, alcanzan cifras de sólo el 50%. Estos valores son substancialmente inferiores al rendimiento de turbinas hidráulicas (del orden del 90%). Por ello, algunos molinos hidráulicos de rodete horizontal fueron reemplazados por turbinas hidráulicas o, simplemente, desaparecieron.

Sin embargo, las turbinas hidráulicas requieren un caudal elevado y, por ello, no son adecuadas en ubicaciones lejos del lecho fluvial. Así, nuestro trabajo de campo consistente en la catalogación de los molinos hidráulicos de las comarcas próximas ha revelado que en algunos molinos de rodete horizontal con poca disponibilidad de agua, se llevaron a cabo modificaciones técnicas importantes que incrementaron de forma apreciable su rendimiento hidráulico.

Los cálculos del rendimiento hidráulico se han realizado, aquí, mediante simulaciones de la dinámica de fluidos computacional (DFC) con el software comercial STAR-CCM+ de CD-Adapco. Esta metodología, consistente en realizar una simulación virtual del comportamiento del modelo, se ha realizado tanto para una versión clásica de un molino de rodete horizontal situado en Besalú (Girona) como para una versión claramente más avanzada tecnológicamente situado en Gaserans (Girona). Los resultados revelan como, en efecto, las mejoras introducidas elevan de forma muy apreciable el rendimiento hidráulico del mecanismo.

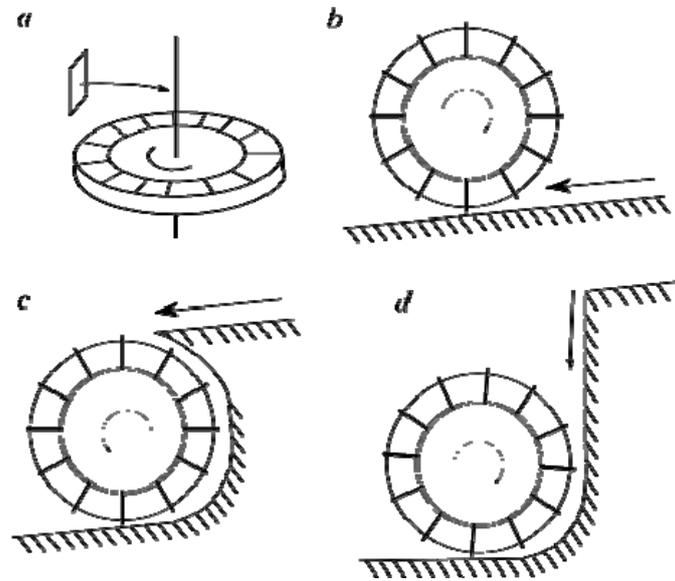


Fig. 1. Diferentes tipologías de molinos hidráulicos: rodete horizontal (a), rodete vertical de canal inferior (b), rodete vertical de canal superior (c) rodete vertical de caída libre (d) [1].

La estructura del artículo es la siguiente. A continuación estudiamos un molino de rodete horizontal clásico para, en la siguiente sección, dedicarnos al estudio de un molino de rodete horizontal con importantes modificaciones tecnológicas. La sección de discusión compara los resultados obtenidos para cada molino, mostrando, además, valores para otros sistemas de producción de energía. El artículo finaliza con las principales conclusiones del presente trabajo.

## MOLINO DE RODETE HORIZONTAL CLÁSICO (BESALÚ)

### Principio de funcionamiento

En esta sección analizamos el molino hidráulico de rodete horizontal situado en Besalú (Girona) que se encuentra a la orilla norte del río Fluvià. Este molino fue abandonado en 1965 debido a unas inundaciones parciales y se recuperó en el período 2008-2009. Actualmente reconstruido, su estructura es común a la mayoría de molinos de rodete horizontal, mostrándola en la Fig. (2). Así, la parte hidráulica está localizada en la parte inferior o cárcavo. Allí una pequeña abertura conduce a un canal que es alimentado por una balsa o estanque, generalmente artificial. La altura que alcanza el nivel de agua en este estanque en referencia a la abertura de salida es proporcional a la energía potencial disponible. El rodete es el órgano móvil que permite intercambiar la energía cinética del fluido incidente en energía mecánica de rotación. Así, el empuje ejercido por el chorro de agua incidente sobre los álabes del rodete se traduce en un par motriz.

El rodete horizontal está directamente conectado a la muela (o piedra) móvil que se encuentra en la sala superior mediante un eje. Como la muela móvil está situada encima de una muela (o piedra) estática, la fricción entre ambas permite moler el producto que se introduce por la parte superior central de la muela móvil y se recoge por la periferia una vez ha sido expulsada por la interficie entre ambas piedras. Para determinar el grado de finura del material molido, así como para reducir el par resistente en el instante de arranque, el molinero puede variar la separación entre las dos muelas mediante un tirante vertical conectado a la viga inferior que soporta el peso de todo el conjunto. Elementos auxiliares como la grúa para el mantenimiento de la piedra móvil, etc., no son explicados en detalle por irrelevantes para el propósito de este trabajo.

Bajo un funcionamiento regular, el par resistente provocado por el proceso de molido más el asociado a las pérdidas mecánicas debe igualar el momento motriz ejercido por el rodete. En condiciones usuales, la velocidad de rotación del mecanismo es de unas 75 rpm.



Fig. 2. Representación virtual del molino hidráulico de rodete horizontal de Besalú. [1]. Las principales partes están definidas en el texto.

### Estudio de DFC

Para el estudio de dinámica de fluidos computacional (DFC) del rodete horizontal clásico del molino de Besalú es necesaria una aproximación virtual lo más exacta posible del mecanismo real. Para ello, hemos realizado una representación virtual en programas CAD/CAE del cárcavo incluyendo el principal elemento hidráulico del sistema: el rodete. Éste se muestra en la fig. 3. Debido al mal estado de conservación del molino de Besalú, el rodete se ha reconstruido virtualmente a partir de piezas de fundición todavía existentes como, por ejemplo, los álabes. Asimismo se recuperó el aro metálico exterior y, mediante fotografías anteriores a 1965, se pudo determinar el número de álabes (30) y su orientación.

Nótese que otros autores han realizado excelentes estudios virtuales cualitativos sobre el funcionamiento general de todo el mecanismo [2-3]. Nuestro objetivo, sin embargo, es obtener resultados cuantitativos sobre el rendimiento hidráulico y, por ello, se manifiesta nuestro interés en obtener una representación virtual exclusiva de la parte hidráulica.

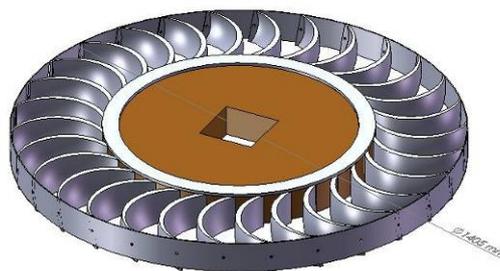


Fig. 3. Representación virtual del rodete horizontal de Besalú. [1]. El diámetro exterior es de 1480 mm.

La DFC requiere una discretización en pequeños elementos (o malla) del volumen de fluido a estudiar así como de las superficies de contorno incluyendo los elementos sólidos móviles como el rodete. El dominio de fluido (ya sea aire o agua) se muestra en la Fig. (4) (derecha) mientras que la discretización de las superficies del rodete se muestran en la Fig. (4) (izquierda). Téngase en cuenta que el programa comercial de DFC Star-CCM+ emplea el método de los volúmenes finitos para simular el comportamiento de la dinámica de fluidos. Así, sobre cada volumen (y superficie) de control, se aplican las ecuaciones de Navier-Stokes para fluidos incompresibles. Para ello es muy importante la realización de una malla suficientemente fina para obtener resultados precisos sin

comprometer, sin embargo, las necesidades de computación.

Aquí, la medida máxima de los elementos de superficie del rodete es de 10 mm, realizando una zona de mallado más intensivo en el subvolumen por donde circulará el chorro de agua (tamaño máximo de los elementos de volumen en esta zona de 15 mm). En la Fig. (4) (derecha) se puede apreciar un mayor número de elementos para esta región, pues uno de sus contornos coincide con la boca de entrada rectangular del fluido en el cárcavo. Para asegurar la independencia de la solución en función del tipo de malla, se ha realizado un análisis de sensibilidad con mallas de diferente número de elementos ( $1.2 \times 10^6$ ,  $1.7 \times 10^6$ ,  $2.9 \times 10^6$ ).

Las condiciones de contorno aplicadas en la simulación (superficies de la Fig. (4)) consisten en paredes sólidas para todos los dominios exceptuando la pared superior (aire) y la entrada de fluido (agua) para la superficie rectangular que representa la obertura que comunica con el canal de entrada. Cálculos analíticos aquí no mostrados (véase [1]) muestran como la velocidad de salida del chorro de agua es de  $6 \text{ m s}^{-1}$  para una altura de nivel de agua en el estanque de 5.2 m. La anterior velocidad es introducida como una condición de contorno del sistema.

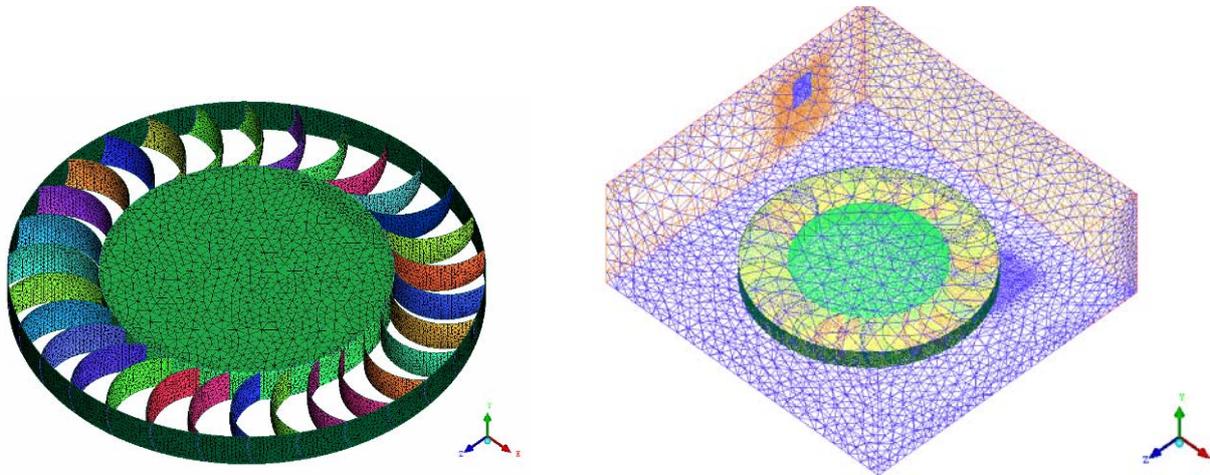


Fig. 4. Discretización en elementos finitos de las superficies del volumen virtual (dcha.) y del rodete (izda.) para el molino de rodete horizontal de Besalú. [1].

Las simulaciones se realizan para flujos bifásicos (aire y agua) incompresibles. Además, el proceso es transitorio pues aplicamos un movimiento de rotación del rodete (parte sólida) que gira a una determinada velocidad angular de rotación. También hemos incluido el efecto gravitatorio (esencial para una correcta descripción del recorrido del chorro de agua incidente) y los fenómenos turbulentos mediante un modelo SST  $k-\omega$  estándar [1].

Las simulaciones se realizan para diferentes velocidades de giro. Las escogidas son 0, 30, 45, 60, 75 y 90 rpm. Nótese que 0 rpm corresponde a la situación inicial de arranque (rodete en reposo). Una vez determinada la velocidad de giro del rodete, la simulación transitoria realiza 10 iteraciones internas para cada iteración externa cuyo paso de tiempo equivale a un giro del rodete menor de  $1^\circ$ . Para obtener los resultados cuantitativos que se detallaran más adelante, se necesitan un mínimo de 5000 iteraciones para cada simulación. Éstas se llevan a cabo mediante PCs con 4Gb de RAM.

Para el caso de 60 rpm y en un instante determinado, la Fig. (5) muestra un corte vertical (izquierda) trazado por el plano de simetría de la compuerta que libera el fluido y un corte horizontal (derecha) a la mitad del rodete. Un elemento de volumen todo agua corresponde al color rojo, de acuerdo con la escala mostrada en la Fig. (5). Nótese que no hay datos para el interior del rodete puesto que está región no contiene un fluido de interés. Especialmente remarcable en estas visualizaciones es la observación del efecto del anillo exterior en donde impacta parte del flujo de agua incidente, repercutiendo negativamente en el rendimiento del sistema. La ubicación vertical del rodete, sin embargo, es la más favorable pues se sitúa en una posición donde la incidencia del chorro impacta sobre un mayor número de álabes.

La Fig. (5) corresponde a una visualización del flujo de agua para un instante determinado. Para nuestro objetivo de obtener resultados cuantitativos, hemos definido unas funciones de usuario que nos permiten recuperar el histórico del par (respecto al eje de rotación) ejercido por el impacto del chorro de agua sobre el rodete. A nivel de la simulación, estos resultados se obtienen a partir del cálculo de las fuerzas ejercidas sobre las superficies de control en que se ha discretizado el rodete. Una vez el sistema ha alcanzado un funcionamiento regular, se hace

un promedio temporal para obtener los valores de par que, multiplicados por la velocidad angular de rotación, permitirán conocer la potencia hidráulica, tal y como se verá en la sección de resultados y discusión.

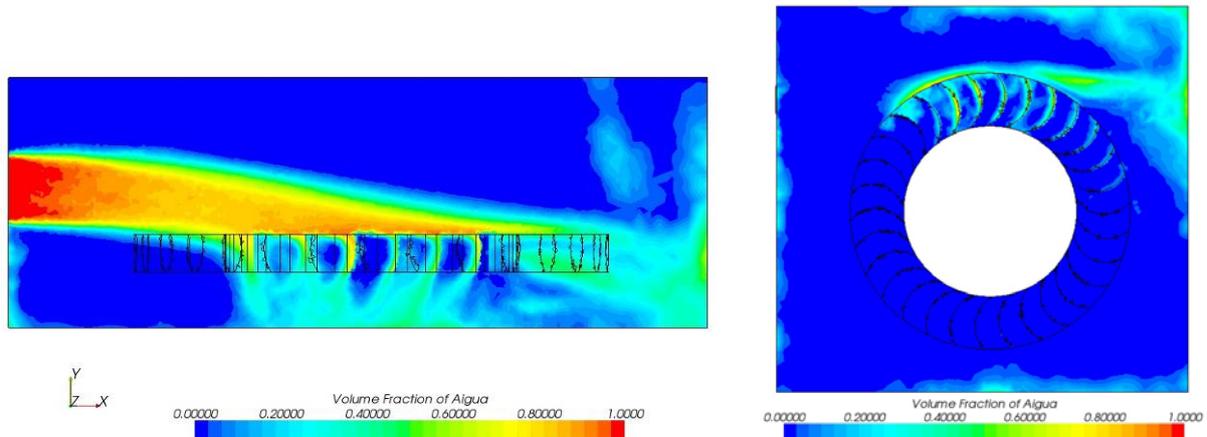


Fig. 5. Visualización de la fracción en volumen de agua en un instante determinado para un rodete a una velocidad de giro de 60 rpm. Corte vertical a través de la compuerta de salida (izda.), corte horizontal por la mitad del rodete (dcha.).

## MOLINO DE RODETE HORIZONTAL MODIFICADO (GASERANS)

### Principio de funcionamiento

En esta sección analizamos el molino hidráulico de rodete horizontal situado en Gaserans (Girona) que se encuentra a unos 4,5 km de la riera de Arbúcies. Este molino estuvo en uso hasta el 2005, año de retiro del molinero. Actualmente, el estanque de aprovisionamiento de agua está completamente seco debido, principalmente, a la falta de mantenimiento de la acequia proveniente de la riera. Estrictamente, el molino de Gaserans disponía de tres rodetes horizontales, dos idénticos que todavía están en condiciones de uso (véase la Fig. (6)) más uno de características más clásicas parecido al comentado en la sección anterior. Éste último se utilizaba para la producción de energía básica (alumbrado, etc.), mientras que los otros dos rodetes idénticos se dedicaban a moler grano.

El funcionamiento de la parte superior del molino (sistema mecánico) es idéntico al comentado en la sección anterior. La mayor innovación en comparación con el rodete clásico arriba estudiado consiste en el apartado hidráulico. En efecto, como observamos en la Fig. (6), la compuerta de salida del chorro de agua se sustituyó por un canal presurizado de sección rectangular (la abertura frontal en la Fig. (6) se cierra en condiciones de uso) con 8 pequeños canales de descarga en su parte inferior. Estos canales o inyectores impulsan chorros de agua que impactan sobre un rodete de fundición de diámetro 1280 mm (menor que el correspondiente al molino de Besalú) que contiene 63 álabes pequeños cuya sección de entrada coincide exactamente con la de salida de los inyectores. Además, la separación vertical entre los inyectores (estáticos) y el rodete (móvil) es de tan solo 12 mm.

Es importante remarcar que el conducto presurizado permite acoplar dos piezas adicionales cada una con 8 inyectores idénticos al conducto principal. Estas piezas se colocan a continuación de la sección rectangular al final del conducto y, la otra, al principio del conducto que lo ramifica en forma de Y. En los dos rodetes idénticos, uno dispone del acoplamiento en Y con un total de 16 inyectores mientras que el otro mantiene la configuración original de sólo 8 inyectores. La opción de 24 inyectores, según el molinero, producía una gran cantidad de par pero aumentaba apreciablemente el caudal usado, descartándose definitivamente por los reiterados problemas de abastecimiento de la finca.

Cabe destacar que las anteriores modificaciones hidráulicas (cambio de rodete e incorporación de un conducto presurizado con diversos inyectores) se realizaron con anterioridad a 1940 motivados, según el molinero, por la necesidad de reducir el consumo de agua y aumentar la producción.



Fig. 6. Rodete y conducto del molino de Gaserans. En condiciones de uso, la sección rectangular al final del conducto está cerrada [4].

### Estudio de DFC

Las etapas para la realización del estudio de DFC son idénticas a las expuestas anteriormente para el molino hidráulico de rodete horizontal clásico. La Fig. (7) es una representación virtual de una parte del mecanismo hidráulico consistente en el rodete y el conducto de presurización. Nótese que, en el rodete, se ha ocultado el aro interior para una mejor visualización de los álabes. Asimismo se han ocultado unas paredes del conducto de presión para observar con detalle los 8 canales de inyección que se encuentran en su base. Especialmente remarcable es el reducido espacio libre entre rodete (móvil) e inyector (fijo) de unos 12 mm. Ello permite un diseño hidráulico muy favorable para el conjunto inyector – álabes pues el intercambio de momento entre el chorro incidente y el rodete se realiza con unos ángulos de incidencia y salida casi opuestos.

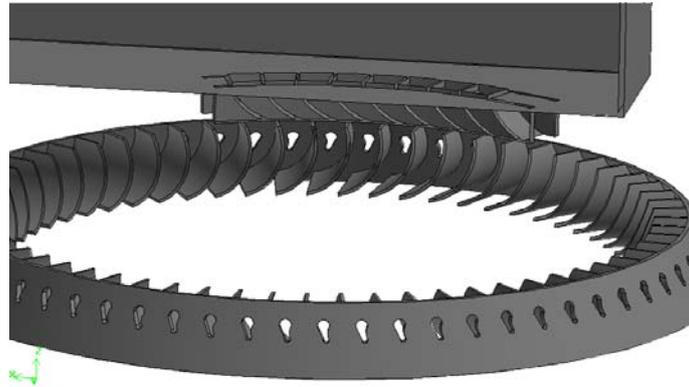


Fig. 7. Visualización virtual del rodete y del conducto del molino de Gaserans [4].

A diferencia de la sección anterior, aquí también se ha simulado el volumen de agua contenido en el embalse y que descarga en el conducto horizontal debido a que las velocidades de salida en el inyector son difíciles de evaluar. De acuerdo con nuestras observaciones de campo, la altura útil disponible es de 5 m, muy parecido al del molino de Besalú.

En el apartado de discretización del volumen de fluido en pequeños elementos, y en comparación con la sección anterior, ahora es necesario un tamaño característico menor pues tanto los álabes como la distancia entre ellos tienen unas dimensiones más reducidas. Así, la medida mínima de los elementos en la superficie de los álabes es de 5 mm y de 15 mm para el volumen. En total se utilizan  $3.4 \times 10^6$  elementos para definir todo el volumen virtual. Un detalle de la malla de superficie se muestra en la Fig. (8). Para asegurar la independencia de los resultados en función del tipo de discretización también se han llevado a cabo simulaciones con una malla más refinada ( $4.7 \times 10^6$  elementos) y una más basta ( $1.4 \times 10^6$  elementos).

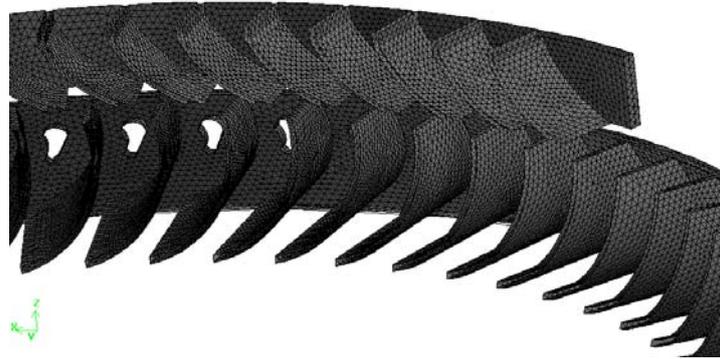


Fig. 8. Detalle de la discretización de las superficies de los álabes en el rodete y de los canales de inyección en la parte inferior del conducto a presión [4].

Las condiciones de contorno aplicadas en la simulación son similares a las del caso clásico exceptuando la condición de presión atmosférica en la superficie del embalse. Como en el caso anterior, las simulaciones se realizan para flujos bifásicos (aire y agua) incompresibles, situación transitoria, efecto de la gravedad y flujo turbulento mediante un modelo  $k-\varepsilon$  estándar [4].

Aquí las simulaciones se realizan para las siguientes velocidades de giro: 1, 30, 45, 60, 75, 90, 105, 120 y 150 rpm. La simulación de 1 rpm se utiliza para determinar el par de arranque. Para una determinada velocidad de rotación, seleccionamos un paso de tiempo correspondiente a un giro del rodete menor de  $0.1^\circ$  con 20 iteraciones internas. Los resultados cuantitativos que se comentan en la siguiente sección corresponden a la media de 5 periodos una vez el sistema ha alcanzado un funcionamiento regular. En cualquier caso, los residuales de las simulaciones son inferiores a  $10^{-4}$  para las ecuaciones de momento y  $10^{-3}$  para la de continuidad.

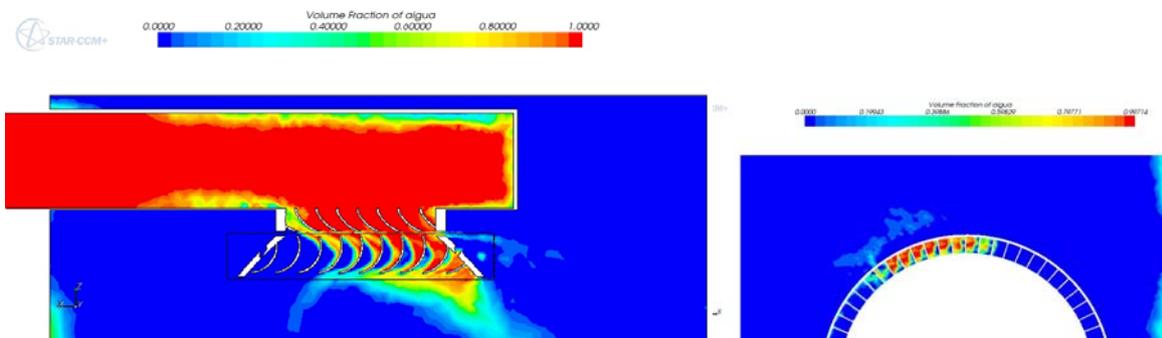


Fig. 9. Visualización de la fracción en volumen de agua en un instante determinado para un rodete a una velocidad de giro de 90 rpm. Corte vertical a través del conducto de presión (izda.), corte horizontal por la mitad del rodete (dcha.).

La Fig. (9) detalla la cantidad de agua en un corte vertical (izquierda) a través del conducto de presión y en un corte horizontal (derecha) a través de la mitad del rodete para el caso de 90 rpm en un instante determinado. La visualización muestra el canal de conducción totalmente presurizado que libera agua mediante los inyectores de su base hacia los álabes (Fig. (9) izquierda). Además, se constata que todo el volumen de agua liberado circula por el intradós del álabe (Fig. (9) derecha) aprovechando al máximo el caudal disponible.

Los resultados cuantitativos para una configuración con 8 inyectores y otra con 16 se detallan a continuación, donde se comparan con los obtenidos para la simulación del rodete clásico de Besalú.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Fig. (10) muestra el par y la potencia de los rodetes horizontales en función de su velocidad de rotación obtenidos en los dos apartados anteriores. El caso clásico corresponde al molino de Besalú y los casos con

diferentes inyectores corresponden a las diferentes configuraciones observadas en los dos rodets existentes en el molino de Gaserans.

De la Fig. (10) observamos, como era de esperar, una curva de par y potencia más elevada para el caso de 16 inyectores que para el de 8. Sin embargo, a medida que la velocidad de giro aumenta, estas diferencias se reducen ya que, a tales velocidades, las interacciones del fluido con el extradós del siguiente álabe empiezan a ser relevantes, especialmente para la configuración con muchos inyectores. Aquí cabe destacar el elevado par de arranque alcanzado con la configuración de 16 inyectores. Para la configuración de 8 inyectores, en cualquier caso, el par es superior al del rodete horizontal clásico del molino de Besalú.

Especialmente remarcable es la capacidad que muestra el diseño modificado de alcanzar elevadas velocidades de giro en comparación con la configuración clásica.

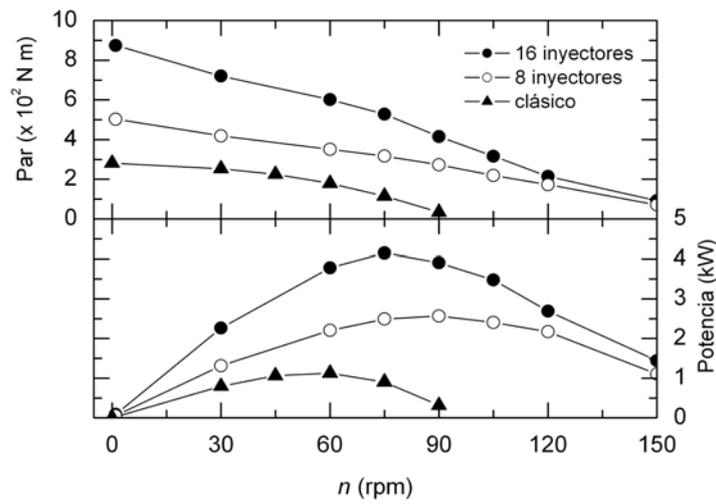


Fig. 10. Par y potencia de los rodets horizontales en función de las velocidades de rotación obtenidos mediante simulación DFC. El caso clásico corresponde al rodete horizontal estándar de Besalú. Los casos de 8 y 16 inyectores corresponden a las dos configuraciones observadas para el molino de Gaserans. La altura disponible es de 5.2 m para el caso clásico y de 5 m para el resto [4].

Por otra parte, la Fig. (10) muestra como la potencia máxima extraída por la configuración con 16 inyectores alcanza 4,1 kW, muy superior a la ofrecida por la configuración estándar que tan sólo llega a los 1,1 kW. Además, el punto de máxima potencia se alcanza cerca de la velocidad de giro óptima para moler el grano (unos 75 rpm). Esto es especialmente relevante ya que los molinos de rodete horizontal disponen de una transmisión directa sin posibilidad de variación, así que la velocidad de giro del rodete está sujeta a las necesidades operativas del proceso.

Para el caso de 8 inyectores, las simulaciones muestran que se alcanza una potencia de 2,5 kW y que se mantiene cerca del máximo en un amplio rango de velocidades de giro.

La Fig. (11) muestra el rendimiento hidráulico (%) en función de la velocidad específica. Ésta es un parámetro común en el análisis de turbomaquinaria puesto que únicamente depende de la configuración del sistema [4]. En la Fig. (11), los círculos blancos (negros) muestran los resultados para las simulaciones con el molino modificado de Gaserans en la configuración de 8 (16) inyectores. Por su parte, los triángulos corresponden al molino clásico de Besalú. Las barras de error hacen referencia al rango estimado de incertidumbre de los resultados una vez aplicado el análisis de sensibilidad empleando diferentes discretizaciones. Para la definición del rendimiento hidráulico y de la velocidad específica véanse las Refs. [1] y [4].

La Fig. (11) muestra como la configuración con 8 inyectores alcanza rendimientos del orden del 81% y, por tanto, muy por encima del modelo clásico y, también, de la configuración con 16 inyectores. Ello es debido a que la configuración de 8 inyectores consume la mitad del caudal utilizado en la de 16 inyectores pero produce más de la mitad de la potencia (véase la Fig. (10)). En efecto, el molino de Besalú consume  $168 \text{ l s}^{-1}$  por sólo  $75 \text{ l s}^{-1}$  del molino de Gaserans con la configuración de 8 inyectores y  $151 \text{ l s}^{-1}$  con la de 16.

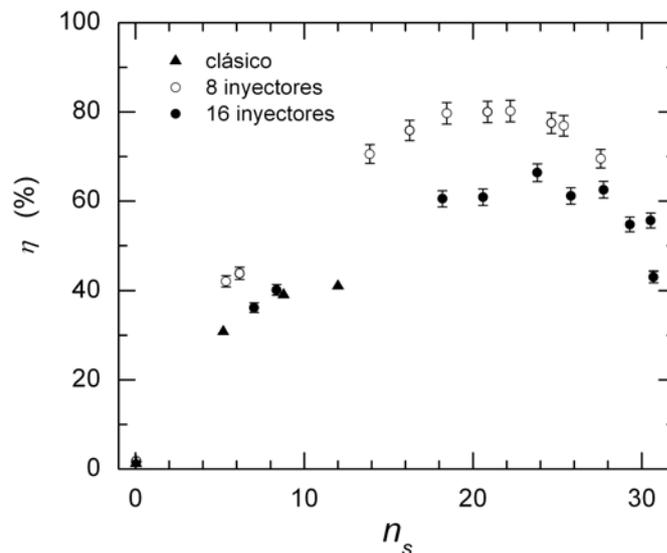


Fig. 11. Rendimiento hidráulico en función de la velocidad específica para los casos analizados en la Fig. (10).

La Tabla (1) detalla los principales resultados del presente estudio comparando, también, con valores usuales para turbinas de reacción y rodetes verticales.

Tabla 1. Potencia máxima alcanzada  $P_{max}$ , par a la potencia máxima  $M_{P_{max}}$ , rendimiento hidráulico  $\eta$  y caudal  $Q$  para rodetes hidráulicos y una turbina Francis común [4].

	$P_{max}$ (kW)	$M_{P_{max}}$ (Nm)	$\eta$ (%)	$Q$ ( $m^3 s^{-1}$ )
Turbina Francis	31,2	169	95	0.245
Rodete horizontal (Gaserans)	2,5 ÷ 4,1	266 ÷ 528	67 ÷ 81	0.151 ÷ 0.075
Rodete vertical canal superior			71	
Rodete vertical canal inferior			50 ÷ 65	
Rodete vertical caída libre			58 ÷ 66	
Rodete horizontal clásico (Besalú)	1,1	179	40	0.168

A partir de los valores de la Tabla (1) se pueden calcular el consumo de agua por energía extraída. Así, para una turbina Francis de las características de la Tabla (1), se necesitan  $8 l kJ^{-1}$ . En comparación, el molino técnicamente avanzado de Gaserans requiere  $30 \div 37 l kJ^{-1}$ , mientras que en un molino clásico como Besalú se necesitan  $153 l kJ^{-1}$ . Esto es, el molino de Besalú necesita unas 5 veces más de agua para producir la misma energía que el molino de Gaserans.

## CONCLUSIONES

Aproximaciones analíticas al molino hidráulico de rodete horizontal realizadas por diversos autores muestran un rendimiento hidráulico muy reducido (inferior al 50%). Así, el incremento en la demanda de fuentes de energía fiables y autónomas, ya en la revolución industrial, inició el declive de estos mecanismos que paulatinamente se substituyeron por turbinas hidráulicas mucho más eficientes, por máquinas de vapor, por motores de combustión o, simplemente, desaparecieron.

Sin embargo, nuestro estudio de campo ha revelado la existencia de importantes innovaciones tecnológicas que se introdujeron en los molinos hidráulicos de rodete horizontal con el propósito de incrementar su rendimiento. En comparación con el diseño clásico, que permaneció en uso durante siglos, hemos observado la utilización de grandes conductos presurizados con varios inyectores, rodetes de fundición con un número elevado de pequeños

álabes, etc., que acercaban el mecanismo a los principios de funcionamiento de las turbinas hidráulicas.

Aquí hemos analizado cuantitativamente estos avances tecnológicos mediante el estudio de dos molinos hidráulicos reales de rodete horizontal: uno de diseño clásico situado en Besalú (Girona) y otro que contiene las innovaciones arriba comentadas situado en Gaserans (Girona). Más allá de las aproximaciones analíticas adecuadas a cada diseño y que se encuentran en las Refs. [1] y [4], nuestra principal aportación consiste en la aplicación de técnicas de simulación de la dinámica de fluidos para obtener las curvas características de estas máquinas. Así, mediante la representación virtual de los elementos que forman los mecanismos, hemos realizado una serie de complejas simulaciones numéricas (flujo bifásico, partes sólidas en rotación, turbulencia, etc.) con modelos de dinámica de fluidos computacional (DFC).

Los resultados muestran cómo las innovaciones tecnológicas implementadas en algunos de estos molinos aumentaron considerablemente el rendimiento hidráulico, llegando a valores del 81% en comparación con valores inferiores al 50% para los diseños clásicos. Además, el consumo de agua por unidad de energía extraída alcanzaba una cifra 5 veces inferior a la correspondiente al diseño clásico. De esta forma, las innovaciones tecnológicas aquí estudiadas eran especialmente adecuadas para molinos alejados de los principales cursos fluviales, tal y como manifestó nuestro estudio de campo.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo no se hubiera podido llevar a cabo sin la colaboración de Francisco Avellana, molinero de Gaserans y Jordi Solà, técnico de la reconstrucción del molino de Besalú. Este trabajo ha sido parcialmente financiado por la Generalitat de Catalunya con el proyecto 2009-SGR-374, el MICINN con el proyecto FIS-2009-13050 y la Comisión Europea con el proyecto NEST-28192-FEPRE.

## REFERENCIAS

- [1] T. Pujol, J. Solà, L. Montoro, M. Pelegrí, *CHydraulic performance of an ancient Spanish watermill*, *Renew. Energ.*, 35 (2010), 387-396.
- [2] JI. Rojas-Sola, R. López-García, *Engineering graphics and watermills: ancient technology in Spain*, *Renew. Energ.*, 32 (2007), 2019-2033.
- [3] JI. Rojas-Sola, J. Domene-García, *Engineering and computer-aided design: study of watermills in southeastern Spain*, *Interciencia*, 12 (2005), 745-751.
- [4] T. Pujol, L. Montoro, *High hydraulic performance in horizontal waterwheels*, *Renew. Energ.*, 35 (2010), 2543-2551.