

# CARACTERIZACIÓN TECNOLÓGICA DE LOS MOLINOS DE VIENTO MEDITERRÁNEOS ESPAÑOLES

## TECHNOLOGICAL CHARACTERIZATION OF SPANISH MEDITERRANEAN WINDMILLS

MIGUEL CASTRO-GARCÍA

*Ph.D. (c), Universidad de Jaén, miguelcg@ujaen.es, España*

JOSÉ IGNACIO ROJAS-SOLA

*Ph.D., Universidad de Jaén, jirojas@ujaen.es, España*

MARÍA DEL PILAR CARRANZA-CAÑADAS

*Ph.D., Universidad de Córdoba, carranza@uco.es, España*

Recibido para revisar Septiembre 3 de 2012, aceptado octubre 9 de 2012, versión final octubre 10 de 2012

**RESUMEN:** Desde la dinastía Song en Oriente Medio, alrededor del siglo XII, los molinos de viento han sido protagonistas en la transformación de la energía eólica para ciertos trabajos mecánicos, como la extracción del agua o la molienda del cereal. En consecuencia, a lo largo de la historia se ha investigado sobre esta clase de patrimonio industrial desde diversos enfoques, aunque no siempre desde el punto de vista de la ingeniería. La metodología seguida tras realizar un inventario de los 89 ingenios eólicos ha sido obtener su modelo 3D, caracterizando el viento y finalizando con el estudio mecánico de sus principales parámetros de funcionamiento. El resultado ha sido su idoneidad para trabajar a bajas velocidades produciendo un par elevado gracias a la superficie expuesta del velamen al viento, y que los molinos de viento de Cádiz y Huelva presentaban un rendimiento eólico mayor al estar mejor diseñados que los de Almería.

**PALABRAS CLAVE:** patrimonio industrial, ingenio eólico, estudio eólico, estudio mecánico.

**ABSTRACT:** Since the Song Dynasty in the Middle East, around the twelfth century, the windmills have been protagonists in transforming wind energy to certain mechanical work such as water extraction or milling. Consequently, throughout history this kind of industrial heritage has been researched from various points of view, but not always from the point of view of engineering. After making an inventory of the 89 windmills, the followed methodology have been getting their 3D model, characterizing the wind and finishing with the mechanical study of their main functioning parameters. The result has been on the one hand, their suitability to work at low speeds producing high torque thanks to the exposed surface of the sails to the wind, and on the other hand, windmills of Cadiz and Huelva have a higher wind performance thanks to be better designed than those of Almería.

**KEYWORDS:** industrial heritage, wind engine, wind study, mechanical study.

### 1. INTRODUCCIÓN

La arqueología industrial es una de las disciplinas de corta trayectoria pero con una gran proyección actualmente. Dentro de esta disciplina, el presente artículo completa el conocimiento técnico que presenta un patrimonio industrial como son los molinos de viento mediterráneos. Además, hoy en día toma cada vez mayor importancia el estudio de la evolución tecnológica [1].

Para conseguir este objetivo, se deben estudiar los restos arqueológicos de su actividad industrial, aunque existen estudios muy recientes de las modernas turbinas eólicas para generación de electricidad [2].

#### 1.1. Los molinos de viento

Los molinos de viento son construcciones preindustriales que están condicionadas por las singularidades climáticas de la zona en la que se enclavan y, al mismo tiempo, por el empleo de los materiales constructivos autóctonos [3], adaptadas tanto al medio físico en el que se ubican como a la actividad desarrollada por sus habitantes [4]. En consecuencia, existe un gran abanico de tipologías repartidas en el mundo. Asimismo, otro aspecto a destacar es el importante factor de desarrollo socioeconómico que han representado dentro de las poblaciones donde estuvieron enclavados, habitualmente concentrados en un número de 2 a 4 por localidad.

Asimismo, la caracterización tipológica de los molinos de viento ha sido tratada en diversas ocasiones [5], pero cabe una mención especial en la persona de Fritz Krüger que realizó una completa clasificación de los molinos de viento en 1950 [6], que ha sido utilizada en el presente estudio. En concreto, se han escogido los pertenecientes a la tipología “A” que son los conocidos como molinos mediterráneos. Estos poseen unos rasgos propios diferenciadores, tanto en características arquitectónicas como tecnológicas.

En las primeras destacan la altura del edificio que oscila alrededor de los 10 m, con dos plantas y tres ventanas en su estancia superior. Respecto a las características tecnológicas, poseen un rotor que puede presentar hasta 8 velas latinas, de forma que la regulación de la superficie expuesta al viento ( $9,5 \text{ m}^2$  por vela totalmente desplegada) es rápida, precisando tan sólo enrollar las mismas en funcionamiento, en contraste con los molinos de aspas que poseen 4 lienzos ( $13,9 \text{ m}^2$  por aspa totalmente desplegado), pero con la imposibilidad de replegar los mismos, lo que supone una nula regulación de su superficie además de algunas mejoras mecánicas, como la existencia de un regulador centrífugo para la molienda del cereal.

La presente investigación se centra en el estudio de los 89 molinos de viento encontrados en la región de Andalucía (Figura 1), estando repartidos en cuatro provincias y destacando por número de ejemplares, los de Almería, Huelva y Cádiz. No obstante, tres de estos 89 molinos de vientos son de la tipología *B* de Krüger, y por ende, han sido excluidos de la investigación.



**Figura 1.** Distribución de los molinos de viento en Andalucía (España).

## 1.2. Las máquinas eólicas

Los molinos de viento son máquinas eólicas lentas cuyo funcionamiento se basa en el empuje que ejerce el viento sobre la superficie de la vela o aspas que presenta el rotor de estos ingenios eólicos. Este principio tan simple permitió la aparición de unos generadores eólicos desde tiempos ancestrales, como fueron los molinos de viento de eje vertical para bombeo de agua en el lejano Oriente [7].

Por otra parte, el viento como fuente de energía tiene la ventaja de ser una fuente limpia y gratuita, aunque presenta algunos inconvenientes ya que proporciona una reducida velocidad de giro de la máquina eólica y además variable en el tiempo; de hecho, el número de horas de viento efectivo para su captación puede variar, siendo frecuente encontrar valores de 2500 horas al año. Sin embargo, las máquinas eólicas clasificadas como máquinas lentas, cuya explicación se expondrá más adelante, tienen como característica la gran superficie expuesta al viento al presentar un gran número de palas o aspas [8], y por tanto, el giro del rotor se produce bajo unas condiciones de velocidad de viento mínimas, obteniéndose además un par elevado. En consecuencia, debido a su tecnología y siendo capaces de vencer unas apreciables resistencias mecánicas, se han convertido a lo largo de la historia en máquinas de una singular relevancia en trabajos como la molienda del cereal, el bombeo de agua de un pozo o de diques de mar [9], entre otros.

## 2. INGENIERÍA GRÁFICA

Una vez georreferenciados todos los molinos de viento de Andalucía, se completó la documentación geométrica tanto de la arquitectura como de la maquinaria con el fin de obtener modelos 3D fidedignos mediante diversas técnicas [10]. Gracias a los mismos se pudieron obtener medidas y simulaciones que han permitido comprender su funcionamiento y lograr un análisis técnico detallado y realista.

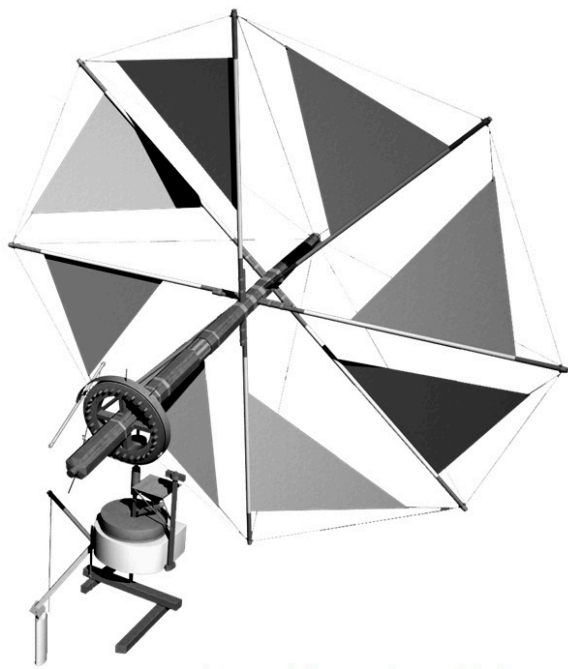
En la Tabla 1 se expone un resumen de las características funcionales más relevantes para este trabajo de investigación, clasificadas por provincias debido a su gran similitud.

**Tabla 1.** Caracterización de los molinos de viento mediterráneos por provincias en Andalucía.

	Almería	Cádiz	Granada	Huelva
Nº ejemplares	42	15	2	27
Dientes linterna	5	6	5	6
Huecos volandera	40	30	40	30
Relación: Dientes-Huecos	8	5	8	5
R (m)	6	7	9	7
$h_2$ (m)	9	10	10	12

donde  $R$  es el radio del rotor y  $h_2$  es la altura del rotor al suelo.

La Figura 2 muestra un ejemplo del modelo 3D obtenido del sistema de molienda a partir de la documentación geométrica en el seno de la fase de ingeniería gráfica realizado, donde se observan los principales elementos mecánicos de los que se compone un molino de viento mediterráneo destinado a la molienda del cereal.



**Figura 2.** Recreación 3D del mecanismo del sistema de molienda de un molino de viento mediterráneo.

A grandes rasgos, un molino de viento mediterráneo se componía de un rotor con una arboladura compuesta por 8 velas latinas enrolladas en palos de madera y arriostradas por un sistema de cuerdas. El empotrado de los palos de las velas se realiza en el eje principal y en el extremo

opuesto se localiza una rueda dentada conocida como rueda catalina. Dicha rueda engranaba con otra rueda con forma de jaula cilíndrica (linterna), logrando de esta manera la transmisión del movimiento convirtiéndolo de horizontal a vertical. Solidario a la linterna se encuentra un eje que se apoya en su extremo inferior en una viga en voladizo y en su zona central se encuentra la piedra volandera (piedra de molienda o móvil), separada unos milímetros de la piedra solera (fija), y entre las cuales se hacía pasar el grano del cereal para su molienda.

### 3. ESTUDIO EÓLICO

#### 3.1. Caracterización eólica

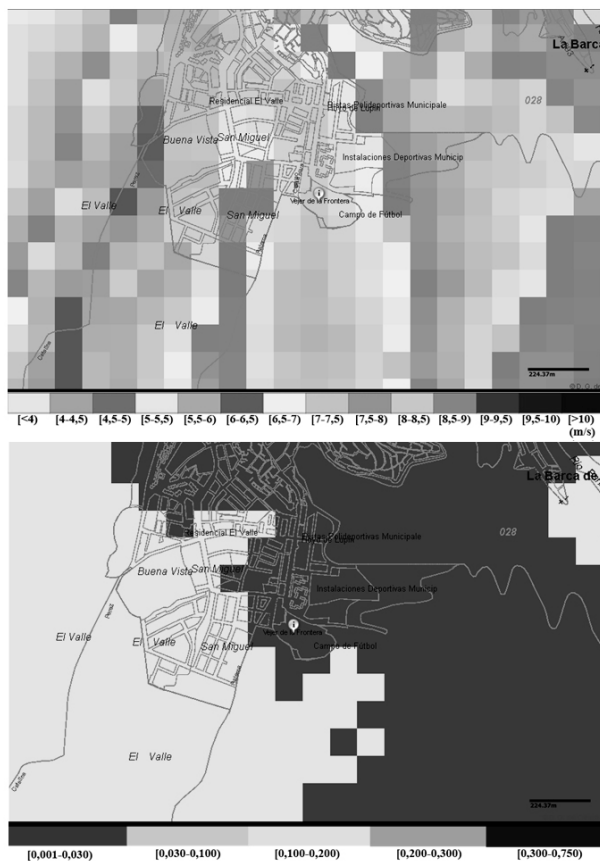
La caracterización del viento es uno de los aspectos más importantes para obtener los datos iniciales de una investigación relacionada con el potencial eólico [11, 12]. Para ello, es necesario acceder al registro de las medidas eólicas que dependen de las estaciones climáticas, siendo un tema que sigue estudiándose y desarrollándose en la actualidad.

En concreto, para este estudio se ha seleccionado como fuente primaria de datos eólicos los ofrecidos por el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), dependiente del Ministerio de Industria, Energía y Turismo del Gobierno de España. Específicamente, se ha utilizado el Atlas Eólico de España [13] en el que se ofrece información fiable tanto de la velocidad a distintas alturas, como de la densidad del aire, el potencial eólico disponible, la topografía o el coeficiente de rugosidad del terreno. Por tanto, se trata de una herramienta muy completa para cualquier investigación en la que intervenga el viento. Todo ello se consulta gracias a un visor que permite explorar los datos bajo la estructura de un Sistema de Información Geográfica (SIG) de consulta pública, siendo una de sus principales características la resolución de mallado de 100 m, que se considera una escala de malla suficiente para el trabajo de investigación planteado.

El Atlas Eólico de España se basa en un modelo de simulación meteorológica y de prospección del recurso eólico a largo plazo, estudiando su interacción con la superficie topográfica. Así, los datos extraídos se obtienen para cada uno de los molinos de viento en estudio, localizados gracias a sus coordenadas UTM en los husos 29 y 30. En el caso que nos ocupa, se han

obtenido la velocidad media anual a 30 m de altura y el coeficiente de rugosidad al viento.

La Figura 3 muestra un ejemplo donde se aprecia el SIG de dicho atlas eólico georreferenciado en el molino de viento de San Francisco situado en la localidad de Vejer de la Frontera (Cádiz), cuyas coordenadas UTM del huso 30 son X: 233634,4966 e Y: 4015563,9194. En el mapa superior se muestran los datos relativos a la velocidad media anual a 30 m de altura y en el mapa inferior el coeficiente de rugosidad del terreno de la zona, dos de los múltiples parámetros que ofrece esta herramienta.



**Figura 3.** Velocidad media anual de viento a 30 m (arriba) y coeficiente de rugosidad del terreno (abajo) en el molino de viento de San Francisco (Vejer de la Frontera, España) identificado a través de una “i” encerrada en un globo blanco (Fuente: IDAE).

### 3.2. Corrección del viento

Una vez registrada la velocidad media anual de cada uno de los molinos de viento es necesario realizar una

transformación para extraer el valor de la velocidad de trabajo ( $v$ ), a la altura del eje principal que sostiene la arboladura del molino de viento mediante la expresión:

$$v = v' (h_2/h_1)^\alpha \tag{1}$$

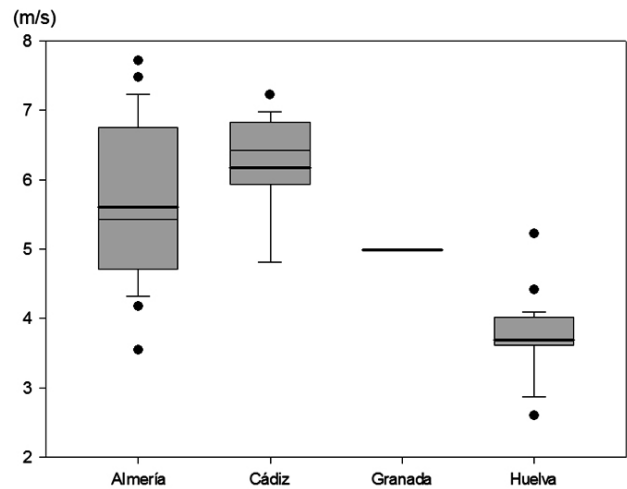
donde:

$v'$ : velocidad media anual leída del Atlas Eólico a 30 m de altura (m/s).

$h_1$ : altura de la velocidad leída del Atlas Eólico (m). En este caso, 30 m.

$\alpha$ : coeficiente de rugosidad del terreno.

Transformadas las velocidades para cada uno de los molinos, se obtiene la distribución de velocidad y la velocidad media por provincias (Figura 4).



**Figura 4.** Distribución de velocidad y velocidad media por provincias de Andalucía.

### 3.3. Rotor eólico de eje horizontal

Para calcular la potencia que una masa de aire en movimiento cede a los álabes de un rotor de eje horizontal, se presupone un tubo de sección variable tal (Figura 5). Se contemplan tres secciones: la central es la que contiene el plano donde se ubica los álabes del rotor del molino de viento, mientras que en la primera y en la última sección se sitúan unos cuantos diámetros de separación de la central para estudiar el flujo en régimen estacionario.

Así pues, para calcular el trabajo desarrollado por los álabes, es necesario calcular la diferencia de energía

cinética del viento antes y después de encontrarse con las velas. La diferencia entre estas dos energías cinéticas es el trabajo que el viento transfiere mecánicamente a los álabes del molino de viento en estudio, sin tener en cuenta las pérdidas aerodinámicas.

Según la ley de la continuidad en un fluido, el caudal que atraviesa cualquier sección de un tubo, es constante en todo momento permitiendo establecer la siguiente relación de caudales:

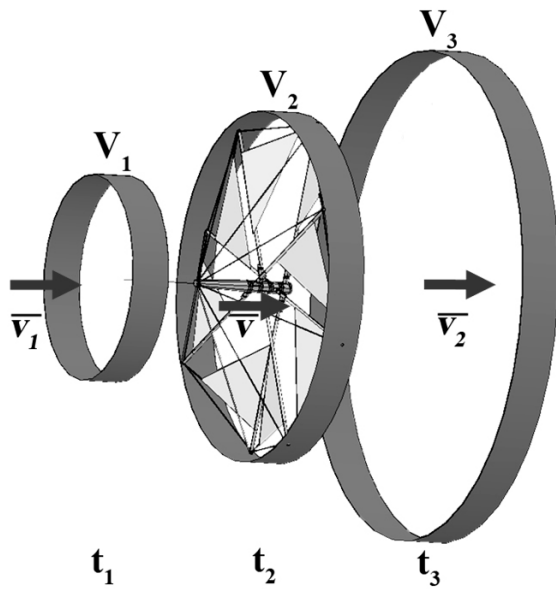
$$S_1 \cdot v_1 = S \cdot v = S_2 \cdot v_2 \quad (2)$$

donde:

$S_x$ : sección escogida en el tubo planteado ( $m^2$ ).

$v$ : velocidad del viento en la sección correspondiente ( $m/s$ ).

$v_2$ : velocidad del viento después ( $m/s$ ).



**Figura 5.** Esquema de tubo de sección al paso de una masa de aire por las velas de un molino de viento.

Una vez establecida esta relación, se calcula la potencia captada por los álabes ( $P$ ), que será la diferencia de las energías cinéticas por unidad de tiempo. Así:

$$Ec_1 - Ec_2 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V \cdot (v_1^2 - v_2^2) \quad (3)$$

$$P = (Ec_1 - Ec_2)/t \quad (4)$$

donde:

$Ec_{1,2}$ : energía cinética del viento antes y después del molino de viento ( $J$ ).

$\rho$ : densidad del aire. En este estudio se han obtenido un rango de densidades  $[1,10-1,25]$  ( $kg/m^3$ ), aplicándose el correspondiente valor para cada molino de viento.

$V$ : volumen de la sección en estudio ( $m^3$ ).

$t$ : tiempo transcurrido ( $s$ ).

### 3.3.1. La potencia

La primera cuestión que sugiere la expresión (4) es encontrar el punto donde la potencia captada es máxima, es decir, donde se cumple la expresión:

$$dP/(dv_2) = 0 \quad (5)$$

Sin embargo, la ecuación (5) no contempla las distintas singularidades geométricas y mecánicas de las velas, rotor y transmisión del movimiento al interior del molino de viento. Así pues, fue el físico alemán Albert Betz el que demostró que existe un máximo teórico de la potencia eólica captada ( $P_{max}$ ) conocido como el Límite de Betz [14]. Este límite viene determinado por la expresión (6), conocida como la ecuación de Betz, que indica que la potencia máxima aprovechable es el 59,3 % de la potencia eólica potencial incidente:

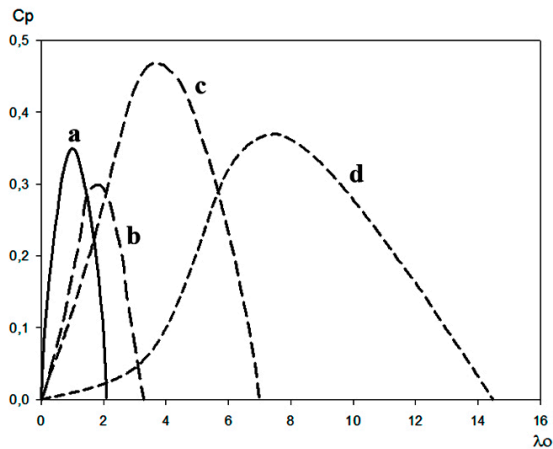
$$P_{max} = 16/27 (1/2 \cdot \rho \cdot S \cdot v_1^3) \quad (6)$$

Sin embargo, el límite aprovechable del 59,3% de la energía eólica potencial incidente no se alcanza ni tan siquiera por los aerogeneradores más perfeccionados de hoy en día que llegan a valores cercanos al 50 % [15], debido a que la teoría propuesta por Betz presenta ciertas limitaciones aerodinámicas que no contempla, como son la resistencia aerodinámica de las velas, la interferencia del giro del rotor de las velas, la pérdida de energía por la estela generada en la rotación y la compresibilidad del aire.

### 3.3.2. El coeficiente de potencia

El coeficiente de potencia ( $C_p$ ) es el encargado de considerar todas las limitaciones aerodinámicas consideradas en el apartado anterior, y depende del tipo de aerogenerador considerado. Para su determinación,  $C_p$  se relaciona con un parámetro fundamental como es la velocidad específica ( $\lambda_0$ ).

En la Figura 6 se recogen distintas máquinas con rotor eólico donde se observan las diversas curvas de  $C_p$  en función de  $\lambda_o$ .



**Figura 6.** Coeficiente de potencia ( $C_p$ ) vs Velocidad específica ( $\lambda_o$ ) de ciertos rotores de eje horizontal. (a) turbina “americana” de bombeo de 16 palas, (b) molino de viento de aspas, (c) aerogenerador moderno 3 palas y (d) aerogenerador moderno de 2 palas.

La clasificación entre máquinas eólicas lentas o rápidas [16], depende de la velocidad específica máxima ( $\lambda_d$ ) que está en función del máximo que presente la curva  $C_p$  vs  $\lambda_o$ , como se observa en la Figura 6. Además,  $\lambda_d$  es inversamente proporcional a la distancia entre aspas y directamente proporcional al par obtenido. Por tanto, se consideran máquinas eólicas lentas las que presentan aproximadamente un  $\lambda_d$  hasta 3. El resto se consideran máquinas eólicas rápidas.

Asimismo,  $\lambda_o$  se determina en función de la expresión:

$$\lambda_o = U_0/v_l \tag{7}$$

siendo  $U_0$  la velocidad periférica del rotor del molino de viento y calculándose gracias a la expresión:

$$U_0 = 2\pi \cdot R \cdot N_R \tag{8}$$

donde  $N_R$  es velocidad angular del eje del rotor (rpm).

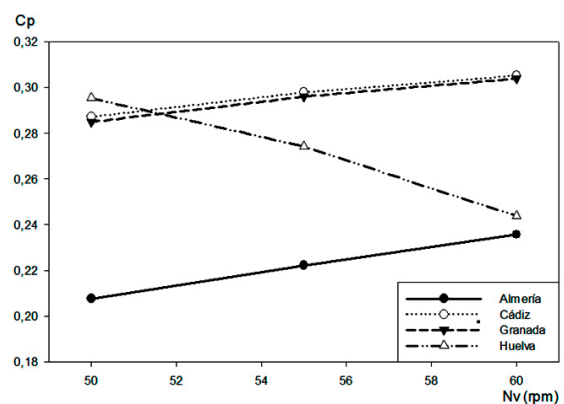
La velocidad angular del eje del rotor está relacionada con la velocidad de viento de trabajo en la zona de estudio y con la velocidad angular óptima de la piedra volandera ( $N_v$ ), siendo importante que se encuentre en

un determinado rango de funcionamiento [50-60] rpm, ya que afecta a la calidad de la harina obtenida. La variación dentro del propio rango de funcionamiento se podía regular en función de la separación de las propias piedras (volandera y solera), y dependía de las características del grano de cereal. Asimismo, un molino podía trabajar con vientos normales e intensos. En presencia de los primeros, estas máquinas eólicas eran capaces de moltar 1000 kg por día, mientras que si se trataba de vientos intensos, su producción se reducía a unos 520 kg por día. Estos datos se han obtenido gracias a los testimonios orales de antiguos molineros, siendo clave esta información en el proceso de la arqueología industrial conocida como la memoria del trabajo.

Así pues, de la expresión (8) se puede obtener otra expresión (9) como una función de trabajo  $C_p = f(\lambda_o)$  que se ajusta a una distribución cuadrática, siendo muy similar a la curva b de la Figura 6, y teniendo en cuenta además otros trabajos previos [17, 18].

$$C_p = -0,0976\lambda_o^2 + 0,322\lambda_o \tag{9}$$

Por tanto, dados los valores característicos expresados en la Tabla 1 de la velocidad anual media y la expresión (9), se obtiene la Figura 7 donde se ilustra la curva característica para cada conjunto de molinos de viento agrupados por provincias en el rango de funcionamiento deseable de la piedra volandera.



**Figura 7.** Coeficiente de potencia respecto a la velocidad de trabajo de la piedra volandera por provincias.

Hay que destacar cómo los molinos de viento pertenecientes a Cádiz y Granada alcanzan prácticamente el máximo  $C_p$  al final de su rango de

funcionamiento de la piedra volandera. Asimismo, los ingenios eólicos de Huelva alcanzan su máximo  $C_p$  con la mínima velocidad angular operativa, y en lo que respecta a los de Almería están lejos de lograr un buen rendimiento eólico.

#### 4. ESTUDIO MECÁNICO

Una vez comentados los distintos parámetros que forman parte del análisis eólico, se calcula la potencia real disponible ( $P_d$ ) para los molinos de viento mediterráneos en estudio según la expresión:

$$P_d = \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot \eta \cdot \rho \cdot S \cdot v_l^3 \quad (10)$$

Asimismo, se ha calculado un rendimiento mecánico ( $\eta$ ) del 60% como cómputo global de todas las transmisiones mecánicas implicadas [19], ya que se producía un gran rozamiento entre los diferentes elementos fabricados con madera y metal, que necesitaban ser engrasados periódicamente. Concretamente, este cálculo se ha llevado a cabo gracias a las masas, momentos de inercias y tipo de apoyos (fricción seca o con lubricante) que se han detectado gracias a la descripción geométrica de los molinos de viento realizada en la sección de Ingeniería Gráfica.

Para el estudio del momento par ( $M_N$ ) que proporciona el viento incidente al eje principal del molino de viento, se debe considerar que la velocidad angular del rotor de un mecanismo de una máquina lenta de eje horizontal no es infinita. Este concepto se desprende de la teoría general del momento realizada por Glauert [20]. A partir de este supuesto, se permite hallar el momento par en el eje de rotor. Su cálculo se obtiene mediante la expresión (11):

$$M_N = \frac{1}{2} \cdot C_m \cdot \rho \cdot S \cdot R^3 \cdot v^2 \quad (11)$$

existiendo un nuevo parámetro ( $C_m$ ) denominado Coeficiente de Momento Par. Para hallar el valor del mismo es necesario recurrir a la expresión (12).

$$C_m = C_p / \lambda_o \quad (12)$$

Así pues, es posible obtener todos los datos mecánicos de funcionamiento por provincias de los molinos de viento mediterráneos de Andalucía. Se resumen en

la Tabla 2, donde  $P_B$  es la Potencia de Betz,  $E$  es la eficiencia de transformación de la potencia eólica máxima de que se puede captar ( $P_{max}$ ) respecto a la realmente aprovechada por los molinos de viento ( $P_d$ ).

**Tabla 2.** Datos mecánicos de funcionamiento de los molinos de viento mediterráneos por provincias.

	$N_v$ (rpm)	$N_r$ (rpm)	$\lambda_o$	$P_{max}$ (KW)	$P_B$ (KW)	$P$ (KW)	$P_d$ (KW)	$E$ (%)	$M_N$ (Nm)
ALMERÍA	50	6,3	0,7	11,1	6,6	2,3	1,4	12,5	3532,3
	52	6,5	0,7	11,1	6,6	2,4	1,4	12,8	3494,2
	54	6,8	0,8	11,1	6,6	2,4	1,5	13,2	3456,0
	56	7,0	0,8	11,1	6,6	2,5	1,5	13,5	3417,9
	58	7,3	0,8	11,1	6,6	2,6	1,5	13,8	3379,8
	60	7,5	0,8	11,1	6,6	2,6	1,6	14,1	3341,7
CÁDIZ	50	10,0	1,2	19,6	11,6	5,6	3,4	17,2	5377,3
	52	10,4	1,2	19,6	11,6	5,7	3,4	17,5	5254,1
	54	10,8	1,3	19,6	11,6	5,8	3,5	17,8	5131,0
	56	11,2	1,3	19,6	11,6	5,9	3,5	18,0	5007,9
	58	11,6	1,4	19,6	11,6	5,9	3,6	18,2	4884,7
	60	12,0	1,4	19,6	11,6	6,0	3,6	18,3	4761,6
GRANADA	50	6,3	0,8	10,8	6,3	2,4	1,5	13,5	9178,6
	52	6,5	0,8	10,8	6,3	2,5	1,5	13,9	9063,8
	54	6,8	0,8	10,8	6,3	2,6	1,5	14,2	8949,0
	56	7,0	0,9	10,8	6,3	2,6	1,6	14,6	8834,2
	58	7,3	0,9	10,8	6,3	2,7	1,6	14,9	8719,4
	60	7,5	0,9	10,8	6,3	2,7	1,6	15,2	8604,6
HUELVA	50	10,0	2,0	6,9	4,1	2,0	1,2	17,7	1179,3
	52	10,4	2,1	6,9	4,1	2,0	1,2	17,3	1105,7
	54	10,8	2,2	6,9	4,1	1,9	1,2	16,7	1032,1
	56	11,2	2,3	6,9	4,1	1,9	1,1	16,1	958,5
	58	11,6	2,3	6,9	4,1	1,8	1,1	15,4	885,0
	60	12,0	2,4	6,9	4,1	1,7	1,0	14,6	811,4

Por último, es muy interesante conocer qué par es generado en un molino de viento mediterráneo en el momento de su puesta en marcha, conocido como par de arranque ( $M_o$ ). Sin embargo, como  $\lambda_o$  es 0 ya que el rotor está parado, no se puede obtener mediante la expresión (11). Por tanto, es necesario recurrir a la fórmula empírica propuesta por Lysen [21] donde  $C_{mo}$  es el conocido como coeficiente de par de arranque.

$$C_{mo} \approx 0,31 / \lambda_d^2 \quad (13)$$

Consecuentemente, se puede hallar el par de arranque gracias a la expresión (14), cuyos resultados por provincias se exponen en la Tabla 3.

$$M_o = C_{mo} \cdot 1/2 \cdot R \cdot S \cdot v^2 \quad (14)$$

**Tabla 3.** Momento de arranque de los molinos de viento mediterráneos por provincias.

	$M_o$ (Nm)
<b>Almería</b>	2301,7
<b>Cádiz</b>	4339,1
<b>Granada</b>	6182,8
<b>Huelva</b>	1549,0

Asimismo, presentan un elevado par de arranque a bajas velocidades, debido a la gran superficie expuesta en función de las velas [22].

## 5. CONCLUSIONES

En el presente artículo se ha realizado el análisis tecnológico de los molinos de viento mediterráneos españoles, como elementos del patrimonio histórico industrial. Con ello, se pretende su difusión y puesta en valor, destacando la importancia que supone para el desarrollo socioeconómico de las zonas donde se enclavan estos ingenios, así también como mostrar la evolución de la técnica e ingeniería.

Asimismo, se han descrito los aspectos más importantes, tanto estructurales como funcionales de un molino de viento mediterráneo, lo que puede ser de gran ayuda para trabajos de reconstrucción.

Por otro lado, dichos ingenios han sido clasificados como máquinas eólicas lentas, comprobándose la idoneidad de su morfología para la molienda del cereal. Así pues, trabajar con velocidades bajas era compatible con el empleo de materiales como la madera asegurándose una menor tasa de fallos y roturas que si se trabajara con una mayor velocidad en el rotor. Asimismo, poseen un elevado par de arranque ( $M_o$ ), aprovechando bajas velocidades de viento, debido a la gran superficie expuesta en función del número de velas.

En este sentido, los molinos de viento mediterráneos españoles podían funcionar con la combinación de velas en número par, es decir, con 2, 4 u 8 velas,

dependiendo de la velocidad del viento, y quedando de esta forma equilibrado aerodinámicamente el rotor. Además, se permitía que las velas estuvieran más o menos desplegadas, obteniéndose una mayor o menor superficie, pudiendo todos orientarse perpendicularmente al viento gracias a la movilidad de su cubierta mediante el palo de gobierno. Por todo ello, la regulación que presentan los molinos de viento mediterráneos es una de las más completas frente al resto de tipologías.

Especialmente interesante, ha resultado el estudio de los molinos de viento por provincias, gracias a la gran similitud entre los mismos en cada una de ellas, observándose cuál es el grado de aprovechamiento obtenido del viento incidente. En concreto, los molinos de vientos almerienses han resultado ser los que presentan un rendimiento eólico más bajo, debiéndose al mal diseño de estos ingenios en esta provincia. Sin embargo, los molinos de viento de Cádiz, Granada y Huelva han alcanzado su rendimiento máximo. No obstante, los molinos de viento de Cádiz y Granada se diferencian de los de Huelva, en que los primeros alcanzan su máximo al final de su rango de funcionamiento y los de Huelva al principio.

## AGRADECIMIENTOS

La investigación expuesta en el presente artículo se ha realizado en el seno del Proyecto de Investigación de Excelencia titulado ‘El Patrimonio Histórico Molinar Eólico de Andalucía (P07-HUM-2485), financiado por la Consejería de Economía, Innovación, Ciencia y Empleo de la Junta de Andalucía, y gracias también al Programa Nacional de Formación del Profesorado Universitario (FPU) del Ministerio de Educación, Cultura y Deporte del Gobierno de España.

## REFERENCIAS

- [1] Rojas, J.I. and Ureña, J.R., Las máquinas de vapor en la obtención del azúcar de caña en España: análisis comparativo, *Dyna-Colombia*, 171, pp. 183-190, 2012.
- [2] Gimenez, J.M., Schweickardt, G. and Gomez, J.C., An overview of wind energy, taking into consideration several important issues including an analysis of regulatory requirements for the connection of wind generation into the power system, *Dyna-Colombia*, 172, pp. 108-117, 2012.



- [3] Agudo, J., Arquitectura tradicional y patrimonio andaluz, *Revista de cultura tradicional*, 31, pp. 13-32, 1999.
- [4] Romero, J., Memoria y arquitectura popular, *Gaceta de Antropología*, 16, pp. 1-5, 2000.
- [5] Shepherd, D.G., Historical Development of the Windmill. NASA Contractor Report. Office of Management, Scientific and Technical Information Division, Washington D.C., 1990.
- [6] Krüger, F., Geographie des traditions populaires en France, *Cuadernos de Estudios Franceses*, 255, 1950.
- [7] Tsung-Yi, L. and Wen-Feng, L., Structure and motion analyses of the sails of Chinese Great Windmill, *Mechanism and Machine Theory*, 48, pp. 29-40, 2012.
- [8] Newman, B.G., Multiple actuator-disc theory for wind turbines, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 24, pp. 215-225, 1986.
- [9] Boomgaard, P., Technologies of a trading empire: Dutch introduction of water and windmills in early-modern Asia, 1650s-1800, *History and Technology*, 24, pp. 41-59, 2008.
- [10] Muñoz, A., González, D., Rodríguez, P. and Mancera, J., Safeguard plan management for heritage buildings: development of a spatial information system, *Dyna-Colombia*, 170, pp. 90-97, 2011.
- [11] Hernandez, Q., Espinosa, F., Saldana, R. and Rivera, C., Evaluación del potencial eólico para la generación de energía eléctrica en el estado de Veracruz, México, *Dyna-Colombia*, 171, pp. 215-221, 2012.
- [12] Realpe, A., Diaz, J.A. and Acevedo, M.T., Electricity generation and wind potential assessment in regions of Colombia, *Dyna-Colombia*, 171, pp. 116-122, 2012.
- [13] IDEA (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía). Atlas Eólico de España. Available: <http://atlaseolico.idae.es/> [citado 17 de Agosto de 2012].
- [14] Betz, A., Introduction to the Theory of Flow Machines, Pergamon Press, Oxford, 1966.
- [15] ABB. Cuaderno de aplicaciones técnicas nº12: Plantas eólicas, ABB, Barcelona, 2012.
- [16] Fraquesa, M., Kleine Windräder. Berechnung und Konstruktion, Bauverlag, Wiesbaden, 1989.
- [17] Kanaki, M.T. and Probert, S.D., Cretan windmills, *Applied Energy*, 5, pp. 215-222, 1979.
- [18] Fleming, P.D. and Probert, S.D., Design and performance of a small shrouded Cretan windwheel, *Applied Energy*, 10, pp. 121-139, 1982.
- [19] Hernández, J., Fundamentos de física mecánica, Servicio de publicaciones e intercambio científico de la Universidad de Jaén, Jaén, 2012.
- [20] Glauert, H., Windmills and Fans. Aerodynamic Theory, Dover Publications Inc., New York, 1963.
- [21] Lysen, E.H., Introduction to wind energy, Grundlagen un Einsatz, Müller, 1983.
- [22] Calvert, N.G., The characteristics of a sail mill, *Journal of Industrial Aerodynamics*, 3, pp. 79-84, 1978.