

DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UN PROTOTIPO A PEQUEÑA ESCALA DE UNA TURBINA DE AIRE, PARA EL APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA MARINA, A BAJO COSTE MEDIANTE TÉCNICAS DE PROTOTIPADO RÁPIDO.

II CONGRÉS UPC SOSTENIBLE 2015

X. Salueña Berna (*), J.A. Ortiz Marzo (**), A. Raso Bautista

Grupo de Tecnología de Fabricación. Dept. Enginyeria Mecànica, ETSEIAT (UPC)
C/ Colom 11
08222 Terrassa (Spain)
Tel.: +34 93 739 87 13.

(*)xavier.saluenaa@upc.edu,(**) jose.antonio.ortiz@upc.edu

Tema del congreso: Sistema energético. Energías marinas.

Tópico/s transversales: Investigación a bajo coste.

RESUMEN

Existen diferentes procedimientos para aprovechar la energía de las olas [1]. El procedimiento que cuenta con mayor rendimiento y menor coste de mantenimiento es el de Columna Oscilante de Agua (OWC). El sistema consiste en la generación del movimiento de una turbina con el aire generado por el vaivén de la olas, con el problema añadido de que el flujo de aire es bidireccional. Actualmente la única turbina que puede girar en un solo sentido independientemente del sentido del flujo de aire es la turbina Wells [2]. Existen pocos estudios teóricos publicados sobre este tipo de turbina.

En este artículo se describe la metodología para desarrollar un prototipo de bajo coste (de aproximadamente 150€) de una turbina Wells, a escala, para poder contrastar los resultados obtenidos experimentalmente con los propuestos de forma teórica. Se analizarán de igual forma tanto las ecuaciones propuestas obtenidas de forma teórica como los resultados experimentales.

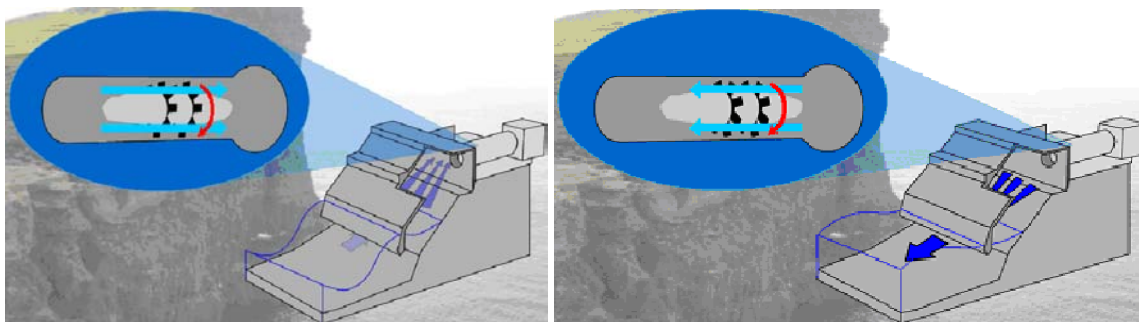


Fig 1. Funcionamiento de un sistema de columna oscilante de agua (OWC)

En el diseño de la turbina se ha partido de unos parámetros fijos: álabes de perfil simétrico NACA 0018, las dimensiones del tubo y el caudal de aire previsto y se han calculado el resto de los parámetros a partir de ecuaciones de aerodinámica [3],[4]. Posteriormente se ha realizado el diseño gráfico con un CAD y se ha fabricado el prototipo mediante sinterizado láser y mecanizado de control numérico. Finalmente se ha montado un motor de corriente continua para determinar la potencia generada en vacío.

Se ha construido el prototipo y se ha determinado la velocidad de giro y la potencia generada en función del caudal de aire circulante por el tubo.

DISEÑO DE UNA TURBINA WELLS A PEQUEÑA ESCALA

Para el aprovechamiento del flujo de aire bidireccional y de poco caudal generado por el vaivén de las olas se necesita un dispositivo aerodinámico (turbina Wells) que gire en una sola dirección, independientemente del sentido de dicho flujo de aire y que optimice al máximo dicho caudal. Para estudiar el comportamiento de una turbina que cumpla con los requisitos de partida con el menor coste posible se realizará un prototipo de pequeñas dimensiones y de baja potencia que permita extrapolar los resultados. Para realizar un pequeño prototipo y que sea posible extrapolar los resultados obtenidos a turbinas de mayor tamaño debe trabajarse con números adimensionales.

Conceptos teóricos, rendimiento de la turbina

En primer lugar deben definirse el perfil de los álabes, la hélice, la geometría y todos los parámetros necesarios para asegurar su funcionalidad. El punto de partida es el caudal de aire necesario en la columna de aire para obtener la velocidad de giro en la turbina para obtener el máximo rendimiento del motor que es de 2500 rpm.

Si P_1 y P_2 son las presiones de los puntos situados antes y después de la turbina, U_1 y U_2 las velocidades del aire correspondientes, ρ la densidad del aire y ΔP la ca da de presión, el Teorema de Bernoulli establece la siguiente relación:

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho \cdot U_1^2 = P_2 + \frac{1}{2} \rho \cdot U_2^2 + \Delta P \quad (1)$$

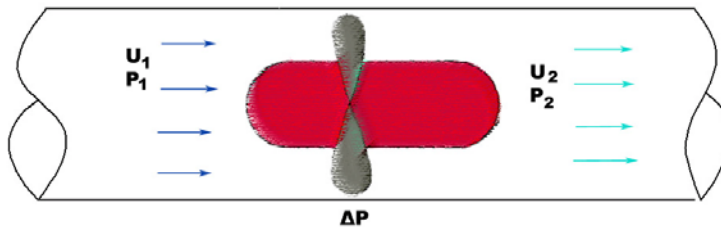


Fig 2. Ca da de presión en una turbina Wells

Siendo Q el caudal del flujo de aire generado, la potencia total (W_{total}) de la turbina Wells es:

$$W_{total} = Q \cdot \Delta P \quad (2)$$

Por otro lado, siendo Ω la velocidad de rotación angular y T el momento (par), la potencia útil de la turbina es:

$$W_{util} = \Omega \cdot T \quad (3)$$

De ambas expresiones, siendo $W_{util} = W_{total} \cdot \eta$, se obtiene el rendimiento de la turbina.

$$\eta = \frac{\Omega \cdot T}{Q \cdot \Delta P} \quad (4)$$

Conceptos teóricos, estudio aerodinámico

El estudio aerodinámico del álabe se utiliza para el cálculo del momento y de la variación de presión en función de la velocidad del aire incidente [5]. La generación de un momento en el rotor de la turbina, implica un cambio en la dirección de la corriente de aire. Este cambio ocurre a través del espesor del disco, provocando una componente de energía cinética rotacional. Dicha componente rotacional o velocidad inducida (U_i) tiene un efecto directo en la acción aerodinámica de la turbina.

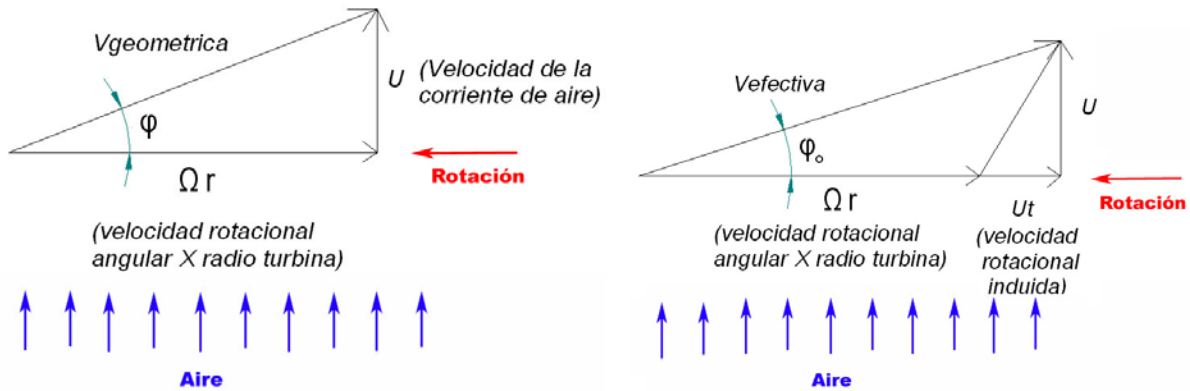


Fig 3. Diagrama de velocidades ideal y real en la turbina Wells

El  ngulo de ataque α , formado entre la cuerda geométrica del ala y la dirección de la velocidad de la corriente de aire, es el mismo que el formado por la bisectriz del ángulo de la velocidad efectiva V_{EFEC} y la velocidad geométrica V_{GEOM} .

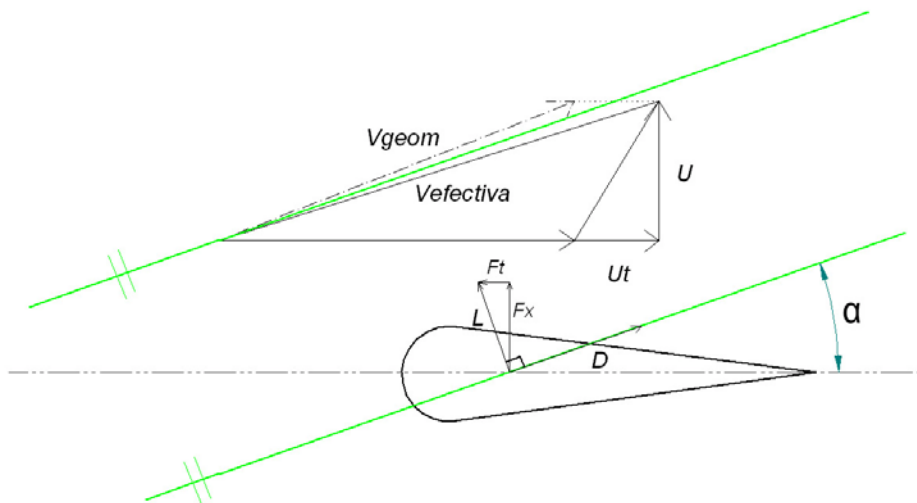


Fig 4. Relación de ángulos entre el diagrama de velocidades y el diagrama de fuerzas sobre el perfil de un álabe.

Si se conoce la velocidad angular de giro del rotor, se determina sobre cualquier aspa de la turbina, la velocidad relativa que experimenta el perfil aerodinámico. Esta velocidad produce las fuerzas sobre el perfil. Mediante esta relación de triángulos de fuerzas y velocidades (Figura 5), se pueden relacionar todos los parámetros.

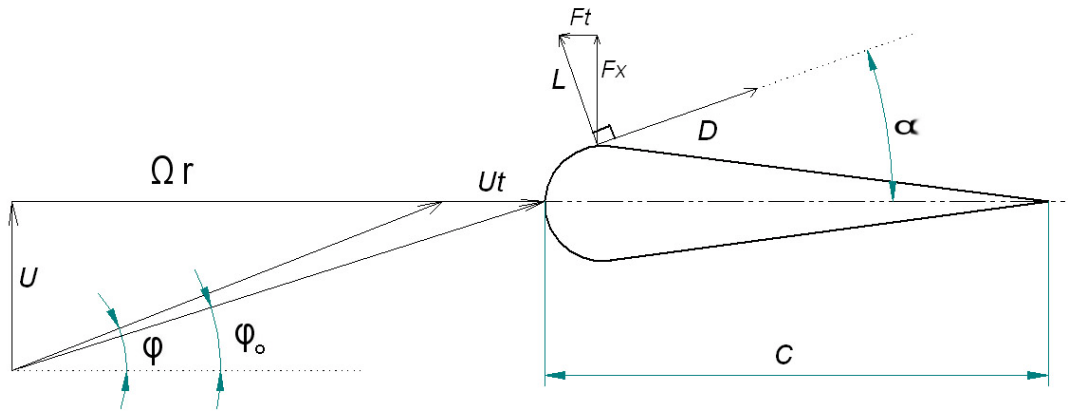


Fig 5. Diagrama de fuerzas y velocidades sobre el perfil de un álabe.

Se determina el momento en el rotor para una distancia r desde el centro de giro en función de las fuerzas de arrastre (Drag) D y de la fuerza de sustentación (Lift) L , proyectadas en la dirección de movimiento del álabe.

$$T = (L \sin \alpha - D \cos \alpha) \cdot r \quad (5)$$

Cuando se utilizan perfiles simétricos como en el caso de la turbina Wells (NACA 00XX), el sentido de la fuerza en la dirección del movimiento F_T es el mismo para valores positivos y negativos del ángulo de ataque, lo cual provoca que se produzca un giro en una única dirección. La componente vertical F_x cambiar  de sentido en función del flujo del aire que circule. La relación entre las componentes en la dirección del movimiento y su normal en función de las fuerzas aerodinámicas vienen dadas por la expresión:

$$\begin{aligned} F_T &= L \sin \alpha - D \cos \alpha \\ F_x &= L \cos \alpha + D \sin \alpha \end{aligned} \quad (6)$$

Las fuerzas aerodinámicas en función de los coeficientes de arrastre y sustentación (C_D y C_L), la longitud de cuerda del perfil (c), la densidad (ρ) y de la velocidad efectiva del aire (V_{EFEC}) son:

$$\begin{aligned} L &= \frac{1}{2} \rho \cdot V_{EFEC}^2 \cdot c \cdot C_L \\ D &= \frac{1}{2} \rho \cdot V_{EFEC}^2 \cdot c \cdot C_D \end{aligned} \quad (7)$$

Los coeficientes C_D y C_L dependen del perfil del álabe y del número de Reynolds, de forma que el flujo sea laminar de baja resistencia aerodinámica [3]. Se debe escoger un perfil NACA, con un ángulo de ataque comprendido entre 7° y 13° , para que la corriente de aire forme una Fuerza F_T suficiente para generar el movimiento rotacional de la turbina. Se ha elegido un perfil simétrico NACA 0018.

A continuación se determina la velocidad rotacional inducida debida a la fuerza F_T en función de la diferencia de presión antes y después del álabe. Se parte del principio de conservación de la energía por unidad de volumen se expresa como:

$$P_1 - P_2 - \frac{1}{2} \rho \cdot U t^2 = \rho \cdot r \cdot \Omega \cdot U_t \quad (8)$$

Considerando sólo la componente que ejerce la sustentación sobre la fuerza horizontal F_T .

$$(P_1 - P_2) = \rho \cdot U \cdot U_t \cot \varphi_o \quad (9)$$

Puede determinarse el ángulo de la velocidad efectiva (φ_o) respecto al plano de rotación de la turbina (figura 3).

$$\cot \varphi_o = \frac{\Omega r + U_t}{U} \quad (10)$$

El diseño óptimo de la turbina se logra considerando que ΔP_o sea constante a lo largo del disco de la turbina.

$$U_T = \frac{P_1 - P_2}{2 \rho \cdot \Omega \cdot r} \quad (11)$$

Considerando la velocidad rotacional inducida de la ecuación 11 y la fuerza horizontal, puede obtenerse el factor de diseño que determina la primera dimensión particular de la turbina, la longitud de cuerda c en función de unos números adimensionales:

$$\frac{B \cdot c \cdot C_L}{4 \pi \cdot r} = \Delta P_o^* \times \frac{1}{\sqrt{1 + (U^*)^2}} \times \frac{1}{\left(1 + \frac{\Delta P_o^*}{2} \cdot \left(\frac{2 + (U^*)^2}{1 + (U^*)^2}\right)\right)} \quad (12)$$

Conceptos teóricos, análisis adimensional

Para determinar las dimensiones preliminares del prototipo a pequeña escala de la turbina Wells se recurre a un análisis adimensional [2]. De esta forma a partir del prototipo se pueden extrapolar los datos a una turbina de dimensiones reales. Se pueden determinar varios grupos adimensionales que caracterizan el funcionamiento de la turbina. Estos grupos son función de la densidad del fluido (ρ), viscosidad cinemática del fluido (ν), la velocidad axial del aire (U), el radio de la turbina (R), la ca da de presión (ΔP_o), la velocidad angular (Ω) y el Momento (T). Los números obtenidos son conocidos como coeficiente de flujo (U^*), coeficiente de presión (ΔP_o^*), coeficiente de par (T^*) y el número de Reynolds (Re). Estos números se convierten en los parámetros iniciales para el diseño de la turbina.

$$\begin{aligned} U^* &= U / \Omega R \\ \Delta P_o^* &= \Delta P_o / \rho \cdot \Omega^2 \cdot R^2 \\ T^* &= T / \rho \cdot \Omega^2 \cdot R^5 \\ Re &= \frac{\left(\sqrt{(\Omega R)^2 + U^2}\right) \cdot c}{\nu} \end{aligned} \quad (13)$$

El término solidez describe la geometría de la turbina a través de la relación entre el área ocupada por las aspas (B es el número de aspas) y el área total descrita por el disco (h es la relación entre diámetros del cubo y del disco). Para el caso de la turbina Wells este valor puede calcularse a través de la siguiente ecuación y se recomienda que su valor sea como mínimo de 0,6 para que pueda arrancar desde el reposo:

$$\sigma = \frac{B \cdot c}{\pi \cdot R \cdot (1 + h)} \quad (14)$$

Dimensionado real del prototipo de la turbina

El punto de partida del cálculo de la turbina Wells será:

- Diámetro del tubo por donde circula el aire: 100mm.
- Perfil del álabe: NACA 0018.
-  ngulo de ataque entre 7 y 13 
- Juego entre el radio de la turbina y el tubo (GAP): 1 mm.
- Solidez de la turbina: 0,65.
- Número de aspas: 6.
- Velocidad angular Ω : 2500 rpm
- Hipótesis de trabajo
 - Fluido incompresible $\rho = \text{cte.}$
 - Régimen permanente (Caudal de entrada igual a caudal de salida)
 - Volumen de control fijo, no deformable e inercial (el volumen de control no variará con el tiempo ni se mover  respecto el sistema de referencia)

A partir de los datos anteriores y optimizando la potencia y los rendimientos se obtiene las dimensiones indicadas en la Figura 6.

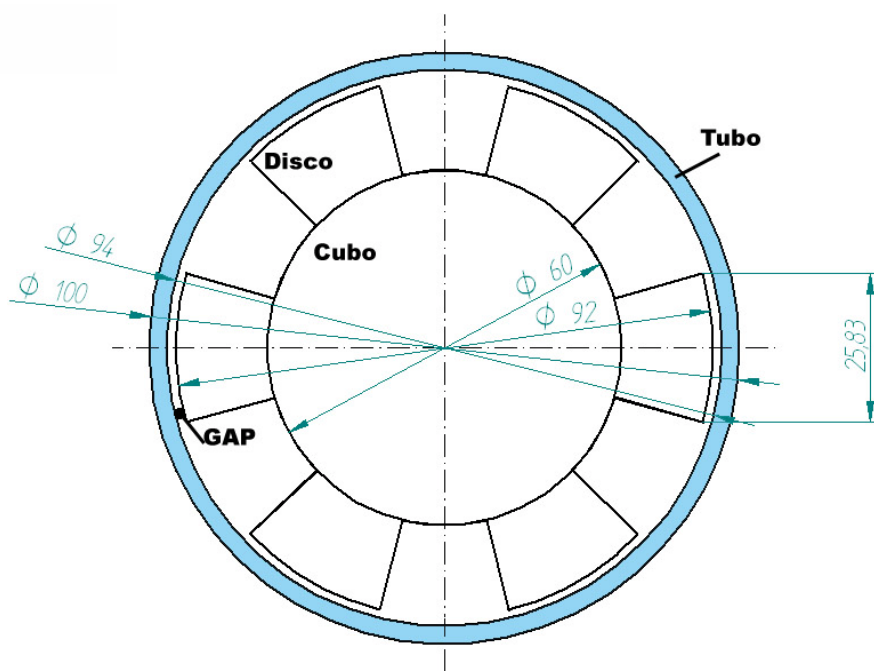


Fig 6. Plano esquemático del prototipo de la turbina Wells (unidades mm)

A partir de las ecuaciones 6, 7, 11 y 13 y las tablas NACA 0018 [3] se obtienen los valores de los coeficientes de arrastre y sustentación $C_L = 0,8$ y $C_D = 0,02$. A partir de la ecuación 11 y 12 se obtiene las variables del prototipo optimizando el rendimiento aerodinámico.

c (m)	0,02583
C_L	0,8
C_D	0,02
B (núm alabes)	6
r_{max}	0,048
r_{min}	0,03
σ solidez	0,65
V_{EFEC} (m/s)	18,6194253
V_{GEO} (m/s)	13,0997584
Φ_0 (deg)	13,0997584
φ (deg)	11,7936426
α (deg)	14,1000017
U (m/s)	3,7
U_t (m/s)	5,66
Ω (rad/s)	261,799388
ΔP (Pa)	170,701578
W_{total} (w)	2,47214891
W_{util} (w)	1,4422

Tabla 1. Variables obtenidas para el prototipo de una turbina Wells.

El caudal mínimo de aire necesario para mover la turbina se puede calcular a partir de su velocidad de entrada o de la ecuación 2.

$$Q = S \cdot U = S' \cdot U' \quad (15)$$

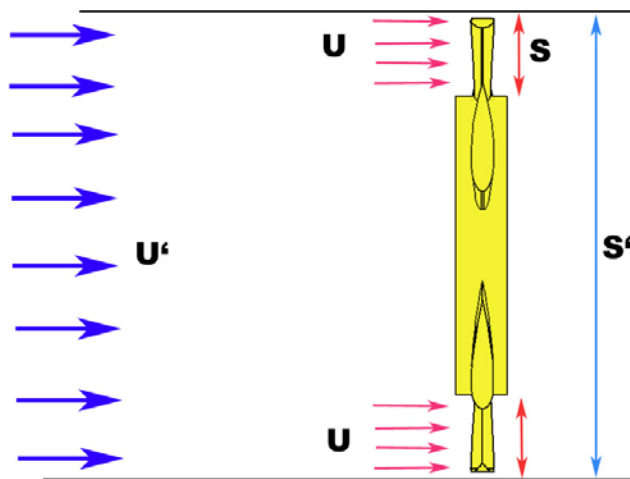


Fig 7. Velocidad del fluido en función de la sección de paso en la turbina.

Se obtiene un caudal de aire necesario y una velocidad de entrada de:

$$U' = 2,25 \text{ m/s}$$

$$Q = 0,0154 \text{ m}^3/\text{s}$$

Diseño y fabricación del prototipo.

Con el fin de evaluar los resultados obtenidos se ha diseñado y fabricado un prototipo de pequeñas dimensiones.

El diseño 3D se ha efectuado en un programa de dibujo (CATIA). La turbina está formada por dos piezas independientes. La parte del rotor la cual contiene una zona central que dirige el aire hacia la zona de los álabes y los seis álabes. La parte del estátor (que se fija a la tubería por la que circula el aire) tiene un alojamiento interior donde se fija un motor de corriente continua a modo de dinamo. Para el diseño de ambas piezas se ha tenido en cuenta la optimización de la posición del centro de masas.

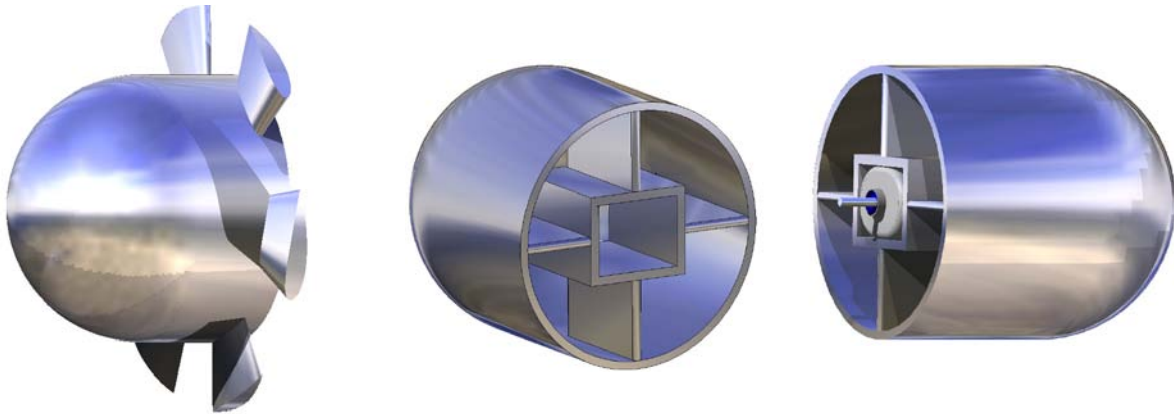


Fig 8. Diseño del prototipo de turbina Wells. Rótor, estátor y ubicación del motor en el estátor.

A partir del dibujo en 3D de las piezas se ha fabricado un prototipo por sinterización láser a partir de polvo de una poliamida PA 2200 por sus propiedades mecánicas y térmicas adecuadas (En un Centro Tecnológico). El coste de los prototipos ha sido de aproximadamente 100 €. El tubo y el motor son materiales de venta en comercios y el soporte de fijación del estátor con el tubo se ha realizado en CAD-CAM en el centro de mecanizado del taller de la ETSEIAT.

Fig 9. Ensayo del prototipo de turbina Wells.

Experimentación del prototipo.

Para la experimentación del prototipo se ha utilizado un compresor de aire y un difusor para simular el flujo de aire generado por las olas marinas en un sistema OWC. Para controlar el caudal y la velocidad del aire en diferentes puntos de la tubería se ha utilizado un anemómetro modelo

TESTO 445 con sonda de velocidad de aire, con una resolución de 0,01 m/s y un rango de medición comprendido entre 0-60 m/s. Para la medición del caudal se ha realizado una medición a 25 cm de los álabes de la turbina, haciendo la media entre 5+5 puntos de una cruz virtual.

Así mismo se ha medido el voltaje e intensidad generada mediante un multímetro.

Se han comprobado los valores reales obtenidos con los teóricos a la velocidad de rotación de 1200 rpm (recalculados a partir de los números adimensionales).

Caudal de aire a la entrada del tubo	35 m ³ /h (0.009722 m ³ /s)
Velocidad del flujo de aire a la entrada del tubo	1,2 m/s
Velocidad de aire incidente en los álabes	3,6 m/s

Tensión generada	0,584 V
Intensidad	0,29 A

Tabla 2. Valores reales obtenidos para el prototipo de una turbina Wells.

Se ha comprobado el buen funcionamiento de la turbina y calculado el coeficiente de corrección del rendimiento experimental respecto al teórico. Respecto al valor de la energía generada debe tenerse en cuenta de que aumenta en función del cuadrado del diámetro de la turbina por lo que será mucho mayor a dimensiones reales (aproximadamente 30 kW).

CONCLUSIONES

Se ha mostrado uno de los proyectos de estudio de energías renovables llevado a cabo en el Grupo de Tecnología de Fabricación de la ETSEIAT, el del prototipaje de una turbina Wells utilizada en la generación de electricidad a partir de la energía de las olas marinas.

Se ha demostrado que es posible modelizar una turbina de grandes dimensiones mediante las fórmulas adecuadas y números adimensionales y construir un prototipo de bajo coste utilizando las técnicas de prototipado rápido.

Referencias:

- [1] Mujal R, Casals J, Boix O, Salue a X, Colom X et al , Fuentes de Energía eléctrica, Edicions UPC (2005).
- [2] Curran, R., Gato, L.M.C., The Energy conversion of several types of Wells turbine designs. Proc. Instn. Mech. Engrs, Part A, (1997).
- [3] Abbott I, Von Doenhoff A, Theory of wing sections, Dover Publications, Inc, USA (1959).
- [4] Raghunathan, S., Beattie, W.C. Aerodynamic performance of contrarotating Wells turbine for wave energy generation. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Vol 4, (1996).
- [5] W.K.Tease, Dynamic Response of a Variable Pitch Wells Turbina, Turbine Department Wavegen, 13a Harbour Road, Inverness, IV1 1SY, Scotland (2007).