

TÚNEL DE AGUA PARA PRUEBAS Y CARACTERIZACIÓN DE DISEÑOS EXPERIMENTALES DE TURBINAS HIDROCINÉTICAS

Eduardo Álvarez Álvarez ⁽¹⁾, Aitor Fernández Jiménez ⁽¹⁾, Manuel Rico-Secades ⁽²⁾, Antonio Javier Calleja Rodríguez ⁽²⁾, Joaquín Fernández Francos ⁽¹⁾, Mario Álvarez Fernández ⁽²⁾, Samuel Camba Fernández ⁽²⁾

⁽¹⁾Área de Ingeniería Hidráulica, Campus de Mieres, Calle Gonzalo Gutiérrez Quirós s/n, 33600 Mieres
edualvarez@uniovi.es; jffrancos@uniovi.es; UO216958@uniovi.es

⁽²⁾ Grupo ce3i2-EPI Gijón. Campus de Gijón. Calle Pedro Puig Adam. Edif. 3, 33204 Gijón
mrico@uniovi.es; calleja@uniovi.es; mario.alvarezfdez96@gmail.com; samu_laluz@hotmail.com

Resumen

Este artículo describe el diseño de una infraestructura de tipo túnel de agua que ha sido construida y puesta en marcha en la Escuela Politécnica de Mieres (EPM, Universidad de Oviedo). El túnel ha sido concebido como un equipamiento que permite realizar ensayos de distintos prototipos de turbinas hidrocinéticas.

Incluye un sistema hidráulico calculado para, mediante una recirculación entre dos tanques, lograr velocidades de agua elevadas en un canal, y un sistema de control (hardware y software) que permite ajustar distintos parámetros hidráulicos (velocidad y cota de la lámina de agua) y realizar el control de funcionamiento de la microturbina a ensayar.

Mediante la utilización del túnel se podrán caracterizar distintos diseños de turbina y estrategias de control de las mismas.

Palabras Clave: Túnel de agua, turbina hidrocinética, Electrónica de potencia, Generador de imanes permanentes (PMG).

1 INTRODUCCIÓN

Las turbinas hidrocinéticas generan potencia eléctrica sin precisar de presas u otra estructura, aprovechando directamente las corrientes de agua en ríos, canales o en el mar. Dicha potencia es función de la densidad del agua, sección transversal al flujo del área barrida por las palas, la velocidad de la corriente al cubo y la eficiencia del equipo (Khan et al., 2009).

Para su funcionamiento estas turbinas precisan de un mínimo de velocidad y profundidad de agua, siendo la energía que generan predecible, y por tanto de elevada fiabilidad, por cuanto las corrientes de agua no fluctúan de manera tan intensa como lo hace el viento (Yuce and Muratoglu, 2015).

Las pequeñas unidades de turbinas hidrocinéticas o microturbinas (potencias del orden de Watios o kWatios), instaladas en lugares próximos al consumo eléctrico (corrientes de agua de ríos o estuarios) se presentan como una alternativa viable de generación distribuida para el futuro próximo (Vermaak et al., 2014).

La intensa investigación que actualmente se desarrolla en el ámbito de las microturbinas hidrocinéticas ha impulsado la utilización distintas infraestructuras específicas para evaluación de funcionamiento de pilotos tanto a gran escala (e.j. Centro Europeo de Energía Marina, EMEC en Orkney, Escocia (“The European Marine Energy Centre Ltd,” n.d.)), como a escala de laboratorio (e.j. Emeson cavitation tunnel en la Universidad de Newcastle, Inglaterra (“Emerson Cavitation Tunnel,” n.d.))

En este artículo se presenta una descripción del túnel de agua construido en la Escuela Politécnica de Mieres de la Universidad de Oviedo (Figura 1(a) y (b)) y que ha sido diseñado específicamente para realizar pruebas experimentales de prototipos de microturbinas hidrocinéticas de eje vertical a escala de laboratorio.

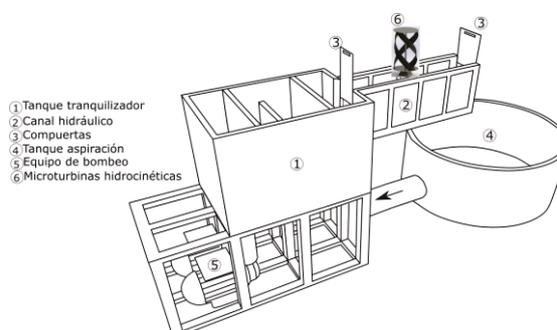


Figura 1(a): Esquema de diseño del túnel de agua



Figura 1(b): Túnel de agua instalado

El diseño del túnel se ha previsto para evaluar microturbinas de eje vertical al ser posible obtener aprovechamientos optimizados de energía mediante disposiciones matriciales de turbinas de este tipo (Alvarez et al., 2016).

El túnel consta de un sistema hidráulico compuesto por canal de flujo rápido, tanque de tranquilización, tanque de aspiración, compuertas de regulación, equipo de bombeo para recirculación (ver Figura 1); y un sistema de control que incluye tanto equipamiento hardware como software que permitirá monitorizar variables, implementar las distintas estrategias de control y realizar distintas pruebas de caracterización de las turbinas. En concreto se describe el procedimiento diseñado para la realización de las pruebas de caracterización del coeficiente de potencia de una microturbina.

El túnel dispone adicionalmente de un sistema que permite la adaptación rápida de distintos componentes del conjunto de la microturbinas de eje vertical.

2 DISEÑO DEL TÚNEL

Para su descripción el túnel de agua se ha dividido en dos sistemas: sistema hidráulico y sistema de control.

2.1 SISTEMA HIDRÁULICO

En la Figura 1(a) se muestra el esquema del sistema hidráulico del túnel identificando sus componentes, que se detallan a continuación.

- 1) Tanque de tranquilización. Este tanque es de acero inoxidable y rectangular, de 1 m³ de capacidad. Recibe agua de las bombas de recirculación y está provisto de un conjunto de deflectores de flujo para rotura de turbulencia, generando un reservorio de agua a velocidad nula antes de su incorporación al canal.
- 2) Canal hidráulico de sección rectangular de 0,5m de alto, 0,3 m ancho y una longitud de 1,5 m. El canal se ha construido mediante cristal transparente sobre estructura de acero,

permitiendo realizar filmaciones de los distintos ensayos a realizar.

- 3) Conjunto de dos compuertas de acero inoxidable planas, rectangulares, que se deslizan sobre guías. Permiten regular tanto el caudal a circular por el canal como la curva de remanso en la finalización del mismo.
- 4) Tanque de aspiración de equipo de bombeo. Este tanque tiene 2 m³ de capacidad y está construido en fibra de vidrio. Recoge el agua proveniente del canal, permitiendo la aspiración del equipo de bombeo.
- 5) Equipo de bombeo. El equipo está compuesto por dos bombas hidráulicas de 300 m³/h y 15 kW de potencia cada una. Estas bombas que aspirarán el agua del tanque de fibra de vidrio enviándolo al tanque metálico situado por encima de su boca de impulsión. Cada una de ellas está alimentada por un variador electrónico (OMRON 3G3Rx-A4220-E1F) que permite el apagado, encendido y la regulación del caudal aportado mediante la variación de frecuencia de alimentación.
- 6) Sistema para colocación de microturbinas hidrocinéticas (ver Figura 2). Está basado en un conjunto de piezas que permiten la adaptación de distintos elementos mecánicos que componen los prototipos de microturbina de eje vertical. Ha sido construido utilizando fundamentalmente metacrilato lo cual permite filmar el flujo desde distintas posiciones.

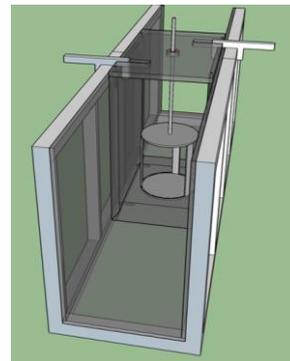


Figura 2: Sistema de colocación de microturbinas en canal

2.2 MONITORIZACIÓN Y CONTROL

El túnel de agua ha sido dotado de un sistema de monitorización y control, denominado Sistema TURTLE (Turbine Test Laboratory Equipment). El sistema permite ajustar automáticamente la velocidad del flujo a un valor requerido, y mantener la cota del agua en el canal en el valor necesario para realizar las pruebas de cada turbina. Asimismo, el sistema realiza el control de los equipos electrónicos encargados de

la producción de energía eléctrica de las turbinas ensayadas. Permite, por tanto, implementar y evaluar distintas estrategias de control y caracterizar el comportamiento de la turbina ante distintas condiciones de flujo.

a) Principio básico de funcionamiento del sistema TURTLE

La Figura 3 recoge el principio básico de funcionamiento del sistema TURTLE. Este consiste en controlar la velocidad del agua en la salida del tanque tranquilizador (v_s), y por tanto la utilizada como referencia en la prueba de la turbina, manteniendo cota de la lámina de agua en un nivel que asegure las pruebas de la turbina.

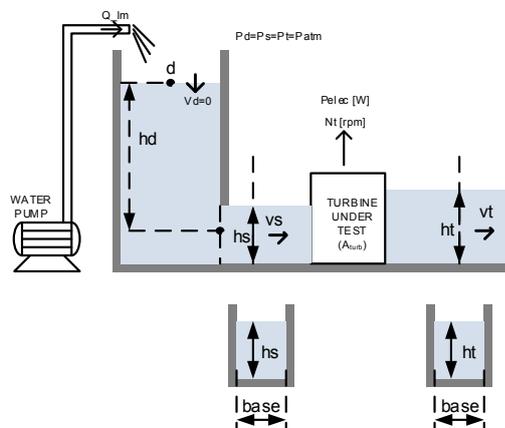


Figura 3: Principio básico de funcionamiento del sistema TURTLE.

Mediante un sistema cerrado de agua se bombea agua desde el tanque de aspiración (referencia 4 de la Figura 1) al tanque tranquilizador (referencia 1 de la Figura 1). Las variaciones de niveles en los tanques donde las bombas aspiran o impulsan prácticamente no afectan al caudal que impulsa cada bomba, fijándose este, mediante ajuste de la frecuencia de alimentación en cada variador.

Conocida la cota del agua en el tanque de tranquilización respecto al punto medio de la profundidad del canal en la boca de salida (hd), es posible calcular la velocidad de salida (ecuación de Torricelli),

$$v_s = \sqrt{hd \cdot g} \tag{1}$$

Donde el valor de g es la aceleración de la gravedad.

Asimismo, se ha de verificar la ecuación de continuidad en el canal:

$$Q = b \cdot h_s \cdot v_s = b \cdot h_t \cdot v_t \tag{2}$$

Donde b es el ancho del canal, h_s y h_t son las alturas del agua antes y después del punto de ensayo de la

turbina y donde v_s y v_t son las velocidades del agua en esos puntos.

Por tanto, la velocidad (v_s) puede ser regulada según dos opciones: utilizando el valor de altura en el depósito de tranquilización (h_d) o utilizando el caudal circulante (Q) y la cota de la lámina de agua antes de la turbina (h_s).

Conocida la dinámica del sistema en distintas pruebas, se decide que la regulación de velocidad se realizará utilizando la compuerta en la descarga del canal para mantener constante la altura h_s (al valor necesario para prueba de turbinas), realizando el ajuste de velocidad mediante variación del caudal circulante (Q).

Así, con un caudal de $300 \text{ m}^3/\text{h}$ ($5 \text{ m}^3/\text{min}$), un ancho del canal de 0.3 m y una altura de la lámina de agua (h_s) de 0.3 m , se obtendría una velocidad de salida de 0.926 m/s . La relación entre caudal en m^3/min y velocidad de salida en m/s se ha representado en la siguiente Figura 4.

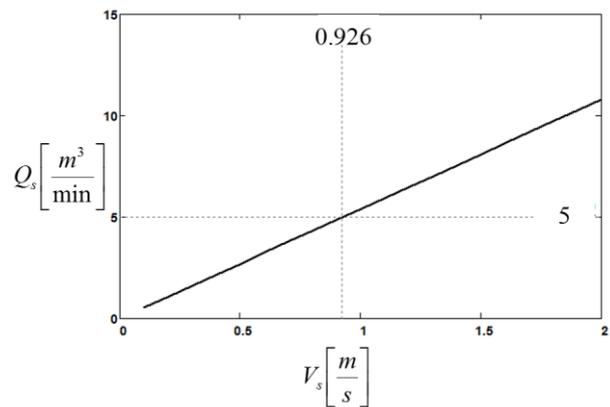


Figura 4: Relación entre caudal en las bombas y velocidad de salida (v_s).

Para la velocidad anteriormente mencionada de 0.926 m/s la altura estimada del depósito de agua respecto a la salida utilizando la ecuación (1) es de 4.371 cm . Al igual que en el caso anterior se muestra una gráfica (Figura 5) que relaciona la altura del depósito (hd) con la velocidad de salida del agua.

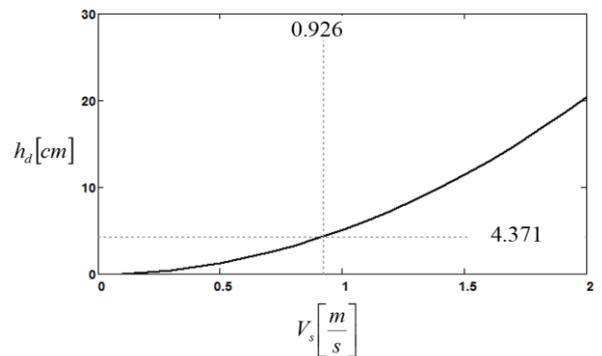


Figura 5: Relación entre la altura de agua del depósito en cm (hd_cm) con la velocidad de salida del agua.

b) Elementos del sistema TURTLE

Para realizar todas las medidas y caracterizaciones indicadas en el apartado anterior, el sistema TURTLE consta de distintos elementos tanto software y hardware indicados en la Figura 6.

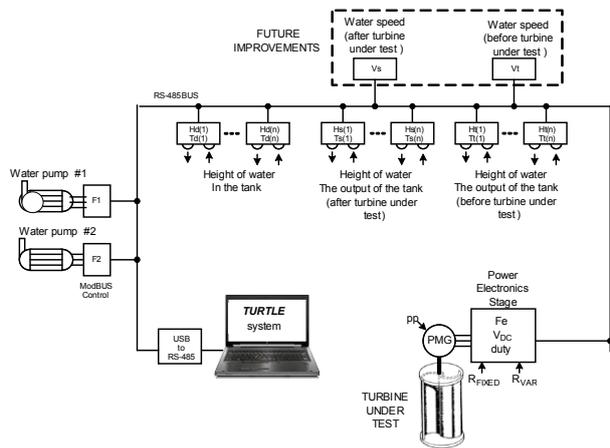


Figura 6: Componentes del sistema TURTLE

Se dispone de sensores ultrasónicos para la medida de nivel de agua tanto en tanque tranquilizador (punto d), como en el canal hidráulico antes del punto de ensayo de la turbina (punto s) como en el mismo canal hidráulico después del punto de ensayo de la turbina (punto t).

En cada punto se realizarán varias medidas para aumentar la precisión en la estimación de la altura de la lámina de agua y promediar las fluctuaciones y turbulencias que se produzcan en esta durante el proceso de ensayo. Las medidas se han denotado como hd (1) hasta hd (n), hs (1) hasta hs (n) y ht (1) hasta ht (n), respectivamente para los puntos d, s y t anteriormente mencionados. Los sensores utilizados permiten también la medida de temperatura ambiental que también estará disponible en distintos puntos del banco de ensayo por si fueran precisas para futuras estimaciones o trabajos.

El sistema también dispone del equipamiento de electrónica de potencia necesario para realizar pruebas a distintos tipos de turbinas; así como conexión con los variadores de velocidad de bombas para ajuste de caudales y medidas de parámetros de funcionamiento de las mismas.

Todos los elementos del sistema TURTLE están conectados a un bus de comunicaciones RS-485 que permite la recogida y procesado de los datos desde un programa informático desarrollado a medida

(TURTLE software) en un entorno IDE de Visual Studio y programado en C#.

3 ENSAYO DE OBTENCIÓN DE LA CARACTERÍSTICA DEL COEFICIENTE DE POTENCIA

El sistema TURTLE permitirá la obtención de la característica del coeficiente de potencia utilizando medidas de parámetros hidráulicos y eléctricos sirviendo ambas medidas de contraste y verificación. Para ambos casos ha de considerarse la potencia hidráulica máxima teórica que puede ser extraída por la turbina y la definición del Coeficiente de Potencia (C_p):

$$P_{teo} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_{turb} \cdot v_s^3 \quad (3)$$

$$C_p = \frac{P_{elec}}{P_{teo}} \quad (4)$$

Siendo, P_{teo} la máxima potencia hidráulica teórica obtenida por la turbina, P_{elec} es la potencia eléctrica generada por la turbina, C_p el Coeficiente de Potencia, A_{turb} el área barrida por las palas de la turbina en dirección transversal al flujo de agua.

Por otro lado, la característica del coeficiente de potencia ha de expresarse para distintas velocidades específicas (Tip Speed Ratio-TSR),

$$TSR = \frac{\omega \cdot R_{tur}}{v_s} \quad (5)$$

Donde ω es la velocidad angular de la turbina, R_{tur} es el radio de la turbina y v_s es la velocidad del fluido en el punto de ensayo.

Para completar pruebas con distintos valores de TSR estos se obtienen variando (mediante el sistema de control) la velocidad angular de giro de la turbina durante el ensayo, manteniendo constante la velocidad del fluido. Esto se realizará utilizando los equipos de electrónica de potencia que dentro de TURTLE realizan el control de la turbina.

La turbina bajo test estará conectada a un generador de imanes permanentes (PMG) de un número de polos conocido. Por tanto, la velocidad angular de giro de la turbina se obtiene, mediante la medida de la frecuencia eléctrica de la señal de tensión del generador, teniendo en cuenta la expresión,

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot Fe}{pp} \quad (6)$$

Donde pp es el número de polos del PMG, y Fe es la frecuencia eléctrica de la señal de tensión.

La tensión trifásica producida por este generador estará conectada al sistema electrónico de potencia de control de turbina. Este está conectado al bus de comunicaciones RS-485 y permite enviar al software de control información relativa a las medidas de potencia y velocidad angular en la turbina bajo ensayo.

a) Medida del coeficiente de potencia mediante parámetros hidráulicos

En este caso se aplica el teorema de Bernoulli y la ecuación de continuidad en los puntos anteriores (s) y posteriores (t) al ensayo de la turbina y, suponiendo que durante el ensayo se extrae una potencia eléctrica (*Pelec*) se obtienen las siguientes ecuaciones:

$$\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot b \cdot h_s \cdot v_s^3 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot b \cdot h_t \cdot v_t^3 + \frac{P_{elec}}{\eta} \quad (7)$$

$$b \cdot h_s \cdot v_s = b \cdot h_t \cdot v_t \quad (8)$$

Donde η representa el rendimiento electro mecánico de la microturbina.

Sustituyendo la ecuación (7) en la (8) y despejando la potencia eléctrica (*Pelec*) se obtiene,

$$P_{elec} = \eta \cdot \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \left(\frac{h_s}{h_t} \right)^2 \right) \cdot \rho \cdot b \cdot h_s \cdot v_s^3 \quad (9)$$

La potencia eléctrica podremos pues calcularla a partir de las cotas de las láminas de agua, anchura del canal, la velocidad de salida del depósito tranquilizador, el rendimiento electro mecánico de la misma.

Asimismo, sustituyendo (9) y (3) en (4) se obtiene,

$$C_p = \frac{\eta \cdot b \cdot h_s}{A_{turb}} \cdot \left(1 - \left(\frac{h_s}{h_t} \right)^2 \right) \quad (10)$$

Se puede por tanto calcular el coeficiente de potencia a partir de las cotas de las láminas de agua en el canal, su anchura, el área barrida por las palas de la turbina y su rendimiento.

A modo de ejemplo, en la Figura 7 se muestra la evolución de la potencia eléctrica en vatios generada en na turbina de $A_{turb}=0.04 \text{ m}^2$, para la velocidad calculada en el apartado anterior de 0.926 m/s, suponiendo una altura de entrada en la lámina de agua (h_s) de 0.3m.

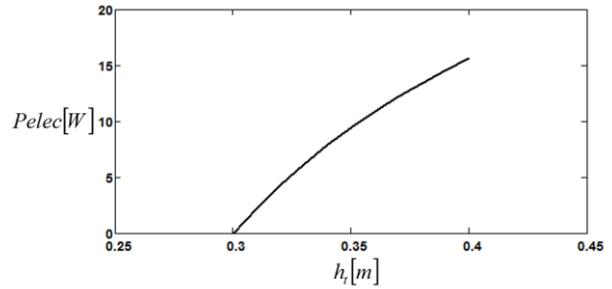


Figura 7: Potencia eléctrica extraída en la turbina bajo ensayo, en función de la altura de la lámina de agua a la salida del ensayo.

De igual forma, en la Figura 8 se muestra la evolución del Coeficiente de Potencia (*Cp*), en valores por unidad, para los mismos datos anteriores.

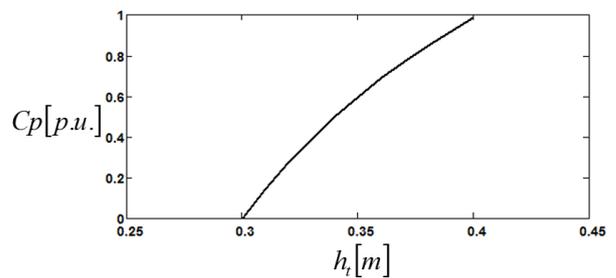


Figura 8: Evolución del coeficiente de potencia (*Cp*) en función de la altura de la lámina de agua a la salida del ensayo.

b) Medida del coeficiente de potencia mediante parámetros eléctricos

Esta medida se basa en obtener mediante parámetros eléctricos la medida potencia eléctrica (*Pelec*) durante el ensayo.

El sistema de potencia realizará su ensayo utilizando una carga de potencia fija (R_{FIXED}) y una variable (R_{VAR}). El ciclo de trabajo (d) del circuito de potencia y la medida de la tensión continua de trabajo (V_{DC}) en el circuito de potencia permitirá fijar la potencia eléctrica extraída en la turbina en el nivel deseado durante el ensayo.

$$P_{elec} = \frac{V_{DC}}{R_{FIXED}} + \frac{V_{DC}}{R_{VAR}} \cdot d \quad (11)$$

La etapa electrónica de potencia estará conectada al sistema informático (TURTLE software) permitiendo a este la recogida de datos eléctricos durante el ensayo o modificar la potencia eléctrica extraída en la turbina, ambas operaciones en tiempo real durante el ensayo. A modo de ejemplo, se muestran en la Figura 9 diferentes ensayos que se pueden realizar para obtener el coeficiente de potencia (*Cp*) de una turbina bajo ensayo y extraer el punto de máxima eficiencia (MPP) que servirá como base para el

diseño del circuito electrónico que optimizará la extracción de energía eléctrica (MPPT-Maximum Power Point Tracking).

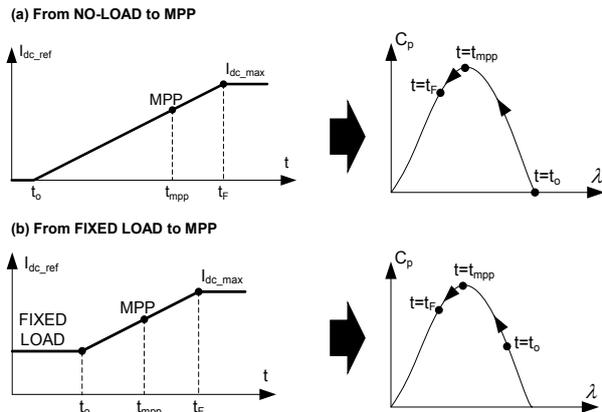


Figura 9: Ensayos para obtención del coeficiente de potencia (C_p) de la turbina bajo ensayo.

c) Descripción de la etapa de potencia para el ensayo de la turbina.

La Figura 10 recoge de manera simplificada la etapa de potencia utilizada para el ensayo de la turbina bajo test.

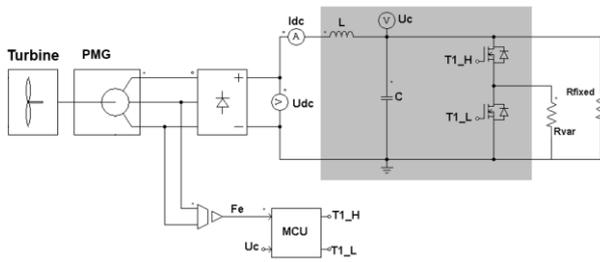


Figura 10: Esquema eléctrico simplificado de la etapa de potencia.

La etapa de potencia consta de un rectificador trifásico, un filtro LC y una rama de transistores Mosfet que conmutan a alta frecuencia (50 kHz). En el trabajo se utiliza su ciclo de conducción (d) como variable de control del sistema.

Una resistencia fija (R_{fixed}) conectada directamente al bus de continua generado por el filtro LC (tensión U_c) y una resistencia (R_{var}) que conectaremos a la rama de transistores Mosfet y que nos permitirá modificar la corriente extraída del rectificador trifásico (I_{dc}).

El análisis dinámico detallado de esta etapa de potencia no ha sido incluido en este trabajo, pero de él se han obtenido los siguientes resultados.

El punto de funcionamiento del sistema está caracterizado por las ecuaciones (12) y (13), que permiten la prealimentación del sistema para llevarlo

de una forma cómoda al entorno del punto de funcionamiento.

$$I_{DC} = \left(\frac{D}{R_{var}} + \frac{1}{R_{fixed}} \right) \cdot U_{DC} \quad (12)$$

$$U_{DC} = U_C \quad (13)$$

La Figura 11 recoge el esquema de regulación completo de la etapa de potencia, que nos permitirá realizar los ensayos de la turbina de una manera precisa.

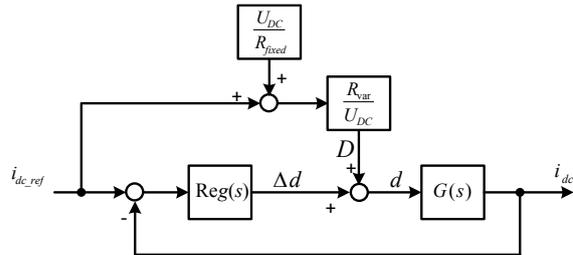


Figura 11: Esquema de regulación de la etapa de potencia.

La función de transferencia del sistema está recogida en la ecuación (14), correspondiendo a un sistema de segundo orden

$$G(s) = \frac{U_{DC}}{L \cdot C \cdot s^2 + L \cdot \left(D + \frac{R_{var}}{R_{fixed}} \right) \cdot s + R_{var}} \quad (14)$$

Para los ensayos, se ha utilizado un regulador digital tipo PI que ha sido implementado en un microcontrolador del Microchip dsPIC30F3012.

Un prototipo de laboratorio de la etapa de potencia está recogido en la figura 12, donde se han rotulado todos los elementos anteriormente descritos.

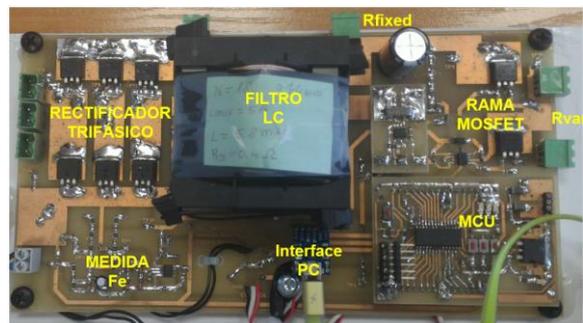


Figura 12: Prototipo de laboratorio de la etapa de potencia.

4 CONCLUSIONES

Se ha presentado y descrito el Túnel de agua recientemente puesto en marcha en la Escuela

Politécnica de Mieres (EPM). Esta infraestructura incluye un sistema hidráulico y un sistema de control, denominado sistema TURTLE.

El túnel ha sido diseñado para poder trabajar con distintos prototipos de turbinas hidrocínicas, permitiendo su caracterización mediante tests automáticos y la implementación/evaluación de distintas estrategias de control de las mismas.

Asimismo, se ha descrito el test automático que permite la obtención de la característica de coeficiente de potencia de una microturbina.

Referencias

Alvarez, E.A., Rico-Secades, M., Suárez, D.F., Gutiérrez-Trashorras, A.J., Fernández-Francos, J., 2016. Obtaining energy from tidal microturbines: A practical example in the Nalón River. *Appl. Energy* 183, 100–112. doi:10.1016/j.apenergy.2016.08.173

Emerson Cavitation Tunnel [WWW Document], n.d. URL <http://research.ncl.ac.uk/cavitation/> (accessed 7.29.17).

Khan, M.J., Bhuyan, G., Iqbal, M.T., Quaicoe, J.E., 2009. Hydrokinetic energy conversion systems and assessment of horizontal and vertical axis turbines for river and tidal applications: A technology status review. *Appl. Energy* 86, 1823–1835. doi:10.1016/j.apenergy.2009.02.017

The European Marine Energy Centre Ltd [WWW Document], n.d. URL http://www.emec.org.uk/wave_energy_devices.asp (accessed 1.4.17).

Vermaak, H.J., Kusakana, K., Koko, S.P., 2014. Status of micro-hydrokinetic river technology in rural applications: A review of literature. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 29, 625–633. doi:10.1016/j.rser.2013.08.066

Yuce, M.I., Muratoglu, A., 2015. Hydrokinetic energy conversion systems: A technology status review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 43, 72–82. doi:10.1016/j.rser.2014.10.037