Acciones de innovación y coordinación docente en ingeniería

Escuela Politénica Superior de Elche

UNIVERSITAS Miguel Hernández

Acciones de innovación y coordinación docente en Ingeniería

Coordinación:
Manuel Lucas Miralles
Concepción Parejo Prados
Miguel Ángel de la Casa Lillo

Revisores/as

Ernesto Ávila Navarro
Mónica Ballesta Galdeano
Nuria Campillo Davó
Vicente Galiano Ibarra
Haroldo Maestre Vicente
Patricia Mazón Canales
Antonio Peñalver Benavent
Ramón Peral Orts
Alberto Rodríguez Martínez
José María Sabater Navarro

ISBN:
978-84-18177-00-2

Fecha de edición:
15/11/2020

Editorial:
Universidad Miguel Hernández de Elche

Maquetación:
Servicio de Innovación y Planificación Tecnológica (SIPT) UMH

Nota de la editorial:
Los textos de esta publicación y su revisión ortográfica son responsabilidad de los/as autores/as

UNIVERSITAS Miguel Hernández

INDICE DE AUTORES (por orden alfabético)

Abellán, D.

Aguilar, F.J.

Álvarez, J.C. 75, 100

Andreu, M.E.

Ávila, E.

Ballesta, M. 52, 75, 112

Campello, H.

Campillo, N. 40, 75

Crespí, D. 52, 112

Cuadrado, O.

Cuesta, M.J.

De La Casa, M.A. 75, 100

Galiano, V.

Garrigós, A.

Gil, A. 52, 112

Lucas, M. 12, 75, 112

Maestre, H.

Marroquí, D.

Martínez, O.

Mazón, P.

Molina, J.

Oliva, M.A.

Parejo, C. 75, 100

Peñalver, A.

Peral, R. 40, 75

Rodríguez, A.

Ruiz, J. 12, 52, 112

Sabater, J.M.

Valiente, D.

Velasco, E

PRÓLOGO:

La innovación y la mejora educativa se han convertido, durante los últimos años, en prioridades dentro de la actividad docente desarrollada por el profesorado de la Escuela Politécnica Superior de Elche de la Universidad Miguel Hernández (EPSE). Con diferentes propuestas orientadas a la transferencia del conocimiento atendiendo a la realidad profesional, a través de metodologías activas, como el aprendizaje basado en proyectos, el aprendizaje cooperativo o el estudio de casos, se pretende que nuestros estudiantes alcancen un aprendizaje activo y más profundo. Este documento recopila diferentes proyectos innovadores, en consonancia con las tendencias, desafíos y desarrollos tecnológicos actuales, desarrollados todos ellos por profesoras y profesores de nuestra Escuela. Los trabajos seleccionados muestran proyectos encaminados a la mejora de los procesos de enseñanza-aprendizaje y de evaluación en asignaturas de titulaciones oficiales de grado y máster de la EPSE. Asimismo, se recogen trabajos con metodologías cooperativas orientadas al desarrollo de Trabajos Fin de Grado (TFG) y Trabajos Fin de Máster (TFM).

Este documento muestra algunos proyectos colaborativos desarrollados en la EPSE que han formado parte del programa de Innovación Educativa Universitaria PIEU-UMH promovido desde el Vicerrectorado de Estudios de la Universidad Miguel Hernández de Elche. El conjunto de trabajos abarca desde la incorporación de tecnologías de participación activa en el aula y su evaluación por medio de Tecnologías de la Información y comunicación (TIC), el diseño de laboratorios virtuales y remotos que promueven el aprendizaje autónomo y semipresencial del estudiantado, el aprendizaje basado en proyectos a través del diseño de aerogeneradores o turbinas hidráulicas para la generación de energía empleando tecnología de impresión 3D o el desarrollo de instrumentos de laboratorio para electrónica basados en plataformas de hardware libre.

Además, se recogen trabajos que han sido financiados a grupos de estudiantes de la EPSE en la convocatoria de “Ayudas para el desarrollo de proyectos grupales realizados por estudiantes de las titulaciones de Grado y Máster tanto en el ámbito de las TIC (Telecomunicaciones e Informática) como en el ámbito Industrial de la Escuela Politécnica Superior de Elche”. Estos capítulos describen los trabajos de los equipos *Equip UMH* con su vehículo de bajo consumo Dátil, el equipo *ELXergy UMH* con su propuesta de la mejora de la eficiencia energética industrial o las actividades de la Rama de Estudiantes del Institute of Electrical and Electronics Engineers (*IEEE*).

Se incluye también un capítulo dedicado a mostrar una acción piloto coordinada por la dirección de la EPSE para evaluar la medida de la carga de trabajo percibida por los estudiantes del Grado en Ingeniería Eléctrica. Los resultados obtenidos han servido para identificar posibles desviaciones respecto a la carga de trabajo prevista y facilitar así el desarrollo de los procedimientos de coordinación horizontal. Los resultados se relacionan con los índices de satisfacción mostrados por los estudiantes en las encuestas y diferentes tasas académicas.

Con todo ello queremos dejar constancia de la intensa actividad y el interés que muestran nuestros profesores y profesoras en la mejora de calidad docente, animándolos a continuar en esa dirección.

M.A. De La Casa
M. Lucas
C. Parejo

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1. *DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN VEHÍCULO DE BAJO CONSUMO PARA COMPETICIONES DE AUTOMOVILISMO EFICIENTE* *1*

2. *EXPERIENCIA PILOTO DE TRABAJO COLABORATIVO PARA EL DESARROLLO DE DETRABAJOS FIN DE GRADO EN EL ÁMBITO DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA INDUSTRIAL* *12*

3. *APRENDIZAJE COMPETENCIAL EN FUNDAMENTOS FÍSICOS DE LA INGENIERIA: USO DE TECNOLOGÍAS DE PARTICIPACION ACTIVA EN EL AULA* *29*

4. *ANÁLISIS DE RECURSOS ONLINE APLICADOS A ACTIVIDADES DOCENTES COLABORATIVAS EN GRADOS DE INGENIERÍA* *40*

5. *APRENDIZAJE BASADO EN PROYECTOS MEDIANTE EL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE PROTOTIPOS DE TURBINAS EÓLICAS* *52*

6. *INSTRUMENTOS DE LABORATORIO DE BAJO COSTE: ARDUINO SHIELDS* *64*

7. *MEDIDA DE LA CARGA DE TRABAJO PERCIBIDA POR LOS ESTUDIANTES DEL GRADO EN INGENIERÍA ELÉCTRICA (UMH). RELACIÓN CON LOS RESULTADOS ACADÉMICOS Y SU SATISFACCIÓN* *75*

8. *INNOVACION EDUCATIVA EN INGENIERIA. CASO DE ÉXITO DE LA RAMA IEEE DE ESTUDIANTES UMH* *91*

9. *TEST INVULNERABLES ANTE LA COPIA* *100*

10. *METODOLOGÍA DE APRENDIZAJE BASADO EN PROYECTOS PARA EL DISEÑO DE TURBINAS HIDRÁULICAS EN GRADOS DEL ÁMBITO INDUSTRIAL* *112*

APRENDIZAJE BASADO EN PROYECTOS MEDIANTE EL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE PROTOTIPOS DE TURBINAS EÓLICAS

D. Crespí[1], A. Gil[2], M. Ballesta[2], J. Ruiz[1]

[1]Dpto. de Ingeniería Mecánica y Energía. Universidad Miguel Hernández de Elche. dcrespi@umh.es
[2]Dpto. de Ingeniería de Sistemas y Automática. Universidad Miguel Hernández de Elche.

La energía eólica es uno de los principales recursos de energía renovable en España. El auge de esta tecnología hace necesario aumentar la formación de estudiantes en las áreas de especialización de generación de dicha energía. Acometer el diseño de una turbina es un problema extremadamente complejo; esta tarea requiere de una profunda comprensión de la mecánica de fluidos y su aplicación a turbomáquinas. En los cursos que se lleva impartiendo docencia en las asignaturas de Energía Eólica e Hidráulica, de 4º del Grado de Ingeniería Eléctrica, y de Energía Eólica en el Máster Universitario de Energía Solar y Renovables, el profesorado ha percibido una gran dificultad por parte del alumnado en la comprensión de estos conceptos teóricos. Esta situación ha llevado a trabajar en un proyecto de innovación que mejore la capacidad de aprendizaje del alumnado. Así, la motivación del presente trabajo ha sido involucrar al estudiantado en el proceso de aprendizaje del diseño del rotor de una turbina eólica.

El objetivo principal perseguido ha sido llevar a cabo una metodología de aprendizaje basado en proyectos a través de un proyecto de innovación que involucra al estudiantado en el diseño de aerogeneradores para la generación de energía. Durante el desarrollo de las prácticas de laboratorio, el estudiantado debe diseñar y construir sus propios aerogeneradores con tecnología de impresión 3D. Posteriormente, cada turbina eólica construida de esta manera se prueba y se compara con los diseños de otros/as compañeros/as de clase bajo las mismas condiciones de operación. Este enfoque práctico involucra activamente al estudiantado en el estudio de los principales conceptos teóricos involucrados en el diseño de los álabes de la turbina eólica, aumentando así su conocimiento y comprensión. Además, se ha introducido un factor competitivo en la metodología que motiva al estudiantado a explorar diferentes formas de superar el diseño realizado por sus compañeros/as de clase.

1. Introducción

La tecnología basada en turbinas eólicas es a día de hoy una fuente importante de energía renovable a nivel mundial. En España, la energía eólica se ha convertido desde 2008 la segunda fuente de energía eléctrica. Considerando la cantidad total de energía instalada, España está actualmente clasificada en quinto lugar, después de China, Estados Unidos, Alemania e India (Global Wind Report, 2018) en cuanto a potencia instalada. Como resultado, la necesidad de profesionales en esta área de especialización ha motivado a las universidades españolas a integrar más materias relacionadas con la energía eólica en los cursos de Máster y Grado.

Actualmente, en la Universidad Miguel Hernández de Elche (España), las asignaturas de energía renovable están incluidas en tres asignaturas de grado y dos de máster. La enseñanza de la tecnología basada en turbinas eólicas para la generación de energía necesita abordar un amplio conjunto de conceptos heredados de diferentes disciplinas. Estos conceptos se pueden clasificar principalmente en dos apartados a) el diseño de la turbina eólica y b) el diseño del parque eólico. La primera parte incluye conceptos como el diseño de los álabes, el estudio de los mecanismos de engranajes y el estudio de la electrónica de potencia involucrada en la conversión de la energía, entre otros. La segunda parte abarca conceptos que involucran el estudio del viento, la conexión a la red y la interacción, la predicción de las condiciones del viento, etc. Algunas de estas áreas de especialización han sido abordadas por (Durán, 2012). En dicho trabajo se hace uso de una técnica de enseñanza novedosa que utiliza la energía eólica como hilo conductor para introducir otros sistemas electrónicos de conversión de potencia.

En cualquier asignatura de ingeniería, las sesiones de laboratorio tienen un papel importante en la formación de futuros/as ingenieros/as. Solo en este entorno práctico, el estudiantado puede obtener una comprensión profunda de los conceptos mencionados durante las clases teóricas y, lo más importante, tomar conciencia de la aplicación práctica de cualquier tecnología. Las prácticas de laboratorio pueden basarse en plataformas reales o virtuales. En el pasado se han realizado esfuerzos para proporcionar laboratorios virtuales a los estudiantes (Einwächter, 2014). Como resultado, los estudiantes pueden realizar experimentos en una plataforma simulada con una aplicación web de manejo sencillo (Tourou, 2013). Los laboratorios reales también se utilizan con frecuencia (Santos-Martin, 2012), lo que permite un enfoque práctico.

Sin embargo, recientemente, la metodología tradicional de la combinación clase magistral-práctica ha sido cuestionada (Santos-Martin, 2012), (Saavedra-Montes, 2010). Por ejemplo, en (Saavedra-Montes, 2010) los autores afirman que la mayoría de las sesiones de laboratorio son ineficientes y no promueven el desarrollo de habilidades importantes en el estudiantado. Identificaron que el método tradicional para llevar a cabo cursos de laboratorio se basa en guiones prácticos de laboratorio diseñados por profesores que describen principalmente un conjunto de operaciones que el alumnado debe seguir para realizar un experimento u obtener la respuesta de una máquina. Este hecho limita el desarrollo de la creatividad y las habilidades para resolver problemas. En (Saavedra-Montes, 2010) se utiliza un enfoque de diagrama de *Vee* para diseñar sus sesiones prácticas, lo que resulta, según los autores, en un conjunto de prácticas de laboratorio más divertidas, creativas y motivadoras. En (Santos-Martin, 2012) se aplica una perspectiva de aprendizaje basada en problemas a los estudios de ingeniería, en el contexto de los sistemas de conversión de energía. Los autores proponen al estudiantado el problema de encontrar la respuesta de una turbina eólica a una falla de la red. Esto provoca que los/las estudiantes adquieran la información necesaria para resolver el problema, desarrollando así independencia e iniciativa.

El aprendizaje basado en problemas y el aprendizaje basado en proyectos son dos metodologías similares. Un proyecto es una unidad de trabajo típicamente utilizada en ingeniería que puede consistir en varios problemas. Los proyectos motivan al estudiantado a trabajar hacia la aplicación del conocimiento, mientras que el aprendizaje basado en problemas se enfoca en la adquisición de conocimiento. Ambos métodos se discuten en (Saavedra-Montes, 2010) donde también se analiza la efectividad y relevancia de cada metodología. La metodología basada en proyectos beneficia el proceso de aprendizaje según numerosos autores (Einwächter, 2014), (Santos-Martin, 2012), (Mills, 2003), (Martínez, 2011), que informaron del aumento de la motivación del estudiantado, la activación de mecanismos de aprendizaje colaborativo y el

desarrollo de independencia en el proceso de aprendizaje y habilidades de trabajo grupal. La enseñanza de laboratorio basada en proyectos (Chu, 2008) a menudo se percibe como más interesante que el "trabajo de laboratorio rutinario" y motiva principalmente al estudiantado a aprender y comprender. Sin embargo, en todos estos enfoques, el banco de pruebas experimental utilizado a lo largo del curso está diseñado y preparado por el profesorado (Einwächter, 2014), (Santos-Martin, 2012), (Suwan, 2012), (Chu, 2008), (Bayati, 2017), (Lee). En esos casos, no es posible hacer cambios en el diseño y el rotor y las palas son fijos.

Teniendo en cuenta estos antecedentes, el objetivo principal de este trabajo ha sido implementar una iniciativa de aprendizaje basada en proyectos que involucre al estudiantado en el diseño, construcción y prueba de una turbina eólica. La motivación fue incluir al estudiantado en el proceso de aprendizaje del diseño. En el enfoque presentado en este documento y, contrariamente a las estrategias tradicionales, se alienta a los estudiantes a diseñar, construir y probar sus propias turbinas por medio de un enfoque práctico. El proceso de construcción se logra mediante el uso de tecnologías de impresión 3D. Posteriormente, el rotor y las palas construidas por diferentes grupos de estudiantes se prueban para obtener diferentes respuestas en las mismas condiciones. Además, los resultados obtenidos por cada aerogenerador se comparan entre todos los grupos en una competición anual y se otorgan tres premios principales a los mejores diseños. El factor competitivo que se ha introducido en la metodología motiva aún más al alumnado, que se involucra explorando formas de superar el diseño de sus compañeros/as de clase. Además, la construcción real de sus diseños, induce al estudiantado a un sentimiento de consecución: a menudo sus experiencias de aprendizaje terminan con una simulación por computadora o incluso un bolígrafo y papel.

Este artículo se ha estructurado como se describe a continuación. El apartado 2 se centra en los materiales y métodos utilizados a lo largo del curso. Este apartado también incluye la descripción del banco de pruebas. Se presta especial atención al método utilizado para la fabricación y prueba de las palas del rotor. El tercer apartado describe la competición entre el alumnado del curso. El apartado 4 describe los resultados obtenidos durante la iniciativa. Finalmente, en el apartado 5 se presentan las principales conclusiones de esta actividad de innovación docente.

2. Metodología

La asignatura de *Energía Eólica e Hidráulica* se imparte en el cuarto curso del Grado en Ingeniería Eléctrica, mientras que la asignatura de *Energía Eólica* se imparte en el Máster Universitario de Energía Solar y Renovables de la Universidad Miguel Hernández de Elche (España). La actividad descrita en este documento está relacionada con la materia de energía eólica que ambas asignaturas comparten, la cual se describen en mayor detalle en el apartado 2.2.

2.1 Motivación

El diseño de las palas de un rotor eólico es un problema extremadamente complejo. Requiere una comprensión profunda de la mecánica de fluidos y su aplicación en turbomáquinas. Esto, a su vez implica saber aplicar las ecuaciones de conservación de flujo para la masa, la cantidad de movimiento y el momento cinético al rotor de la turbina, así como dominar conceptos como el rendimiento de las superficies de sustentación, el comportamiento tridimensional del flujo y

entender la complejidad del recurso eólico. Tal es la complejidad del problema, que su solución completa solo puede abordarse analíticamente cuando se consideran una serie de simplificaciones (condiciones de estado estable, flujo bidimensional, etc.) (Manwell, 2009). De hecho, un comportamiento realista del rotor en condiciones reales de funcionamiento, solo podría llegar a conocerse mediante la simulación del flujo mediante metodología CFD y/o experimentación.

Durante 6 años de enseñanza (de 2013 a 2019) se han identificado dificultades significativas para que los estudiantes comprendan los conceptos teóricos involucrados en el diseño de las palas del rotor: triángulos de velocidad, fuerzas que actúan sobre la pala de la turbina, el efecto de tales fuerzas, comportamiento de la superficie de sustentación, etc. En consecuencia, para mejorar la experiencia y los resultados de aprendizaje, se ha involucrado al estudiantado en el proceso de aprendizaje, desafiando al grupo con un proyecto real: diseñar, construir y probar su propio rotor eólico, para participar en una competición.

2.2 Diseño del curso

Ambas asignaturas se imparten en el ámbito de la docencia en ingeniería, que comprende entre otros contenidos, la asignatura de Mecánica de Fluidos, la cual cubre el conocimiento específico que se requiere para emprender este curso: propiedades y fundamentos de fluidos, ecuaciones de conservación de flujo, regímenes de flujo y sus características, así como aerodinámica básica. En ambas asignaturas se sigue un temario similar, aunque varía el grado de profundidad del estudio y existen algunos temas específicos y evaluaciones adicionales en la asignatura de máster. En el presente apartado se describe el contenido común impartido y el método de evaluación del mismo.

El curso, después de una lección introductoria que aborda con un enfoque genérico una introducción a las turbomáquinas y la aplicación de ecuaciones de conservación, se adentra en el contenido específico de la energía eólica, con el siguiente contenido:

1. Introducción.
2. Estudio del recurso eólico.
3. Aerodinámica aplicada a aerogeneradores.
4. Descripción del sistema de aerogeneradores.
5. Diseño de rotor de turbina eólica.

También se incluyen tres sesiones prácticas con una duración de 3 horas cada una:

- P1: Estudio del recurso eólico (Lección 2).
- P2: Curvas características de turbinas de eje horizontal (Lecciones 4-5).
- P3: Introducción al diseño de la pala del rotor (Lección 5).

Finalmente, el alumnado, trabajando en grupos de 2-3 personas, se enfrenta al diseño de un rotor eólico. El proyecto consiste en obtener el mejor rendimiento posible bajo un conjunto de condiciones controladas preestablecidas.

La evaluación de esta unidad didáctica se lleva a cabo mediante la evaluación de los ejercicios prácticos P1 y P2, para los cuales se entrega un informe, y la evaluación del diseño de la pala del rotor, que incluye:

- La presentación de su diseño al resto del aula, justificando la selección de perfiles aerodinámicos, número de palas del rotor y coeficiente de potencia esperado para el mismo. Este ejercicio es evaluado por el resto de compañeros.
- Los resultados obtenidos durante la competición (medición en el banco de pruebas) en términos de *Coeficiente de potencia* del rotor eólico.

2.3 Banco de pruebas

Se ha construido un banco de pruebas para ensayar rotores de turbinas eólicas de pequeña escala con fines didácticos como en (Bayati, 2017), (Lee, 2016). Para tal fin, es necesario un flujo de aire axial relativamente uniforme. Para replicar el funcionamiento de turbinas eólicas en condiciones reales de trabajo, el flujo de aire no debe confinarse en el interior de un túnel de viento tradicional, o bien la sección transversal del túnel debe ser significativamente mayor que el área circular cubierta por el rotor (Bottaso, 2014). Para cumplir con estas condiciones, el banco de pruebas ha sido diseñado como se muestra en la Figura 1. Se ha dispuesto un túnel de viento de 6 m de largo aguas abajo de un ventilador axial de velocidad variable de 1.5 kW, que junto con el uso de filtros de panal de abeja (*honeycomb*) aguas abajo del mismo, permite obtener las condiciones de flujo requeridas. La velocidad de flujo en la sección del rotor se mide por medio de un anemómetro de hilo caliente. El uso de un variador de frecuencia para alimentar el ventilador axial, permite ajustar su velocidad de rotación para controlar la velocidad del flujo de aire en la sección del rotor de la turbina eólica.

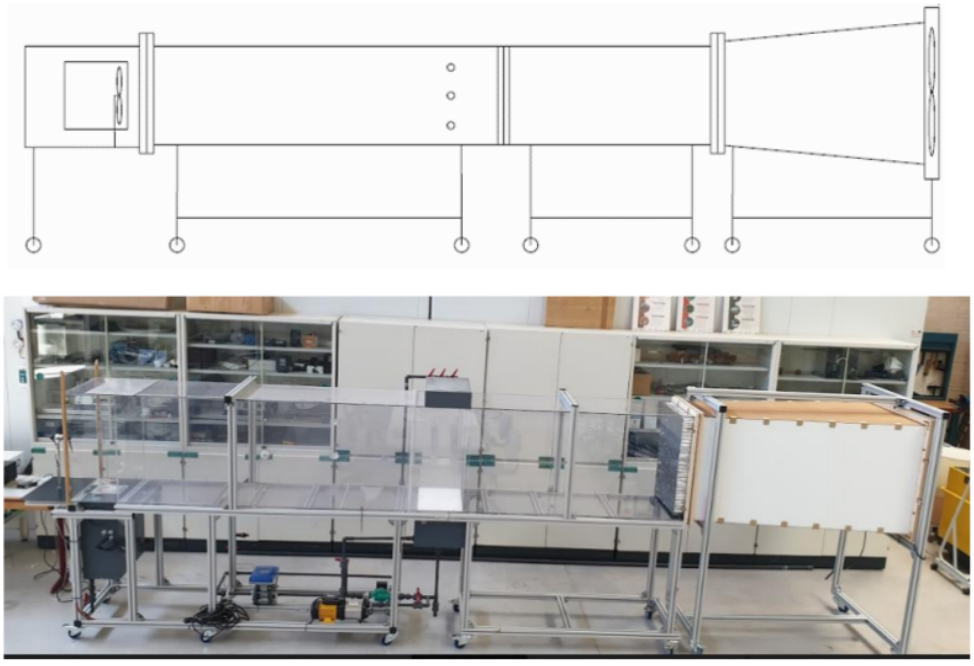

***Figura 1**. Banco de pruebas. La turbina eólica se sitúa aguas abajo (izquierda) del túnel de viento. El ventilador, situado en el extremo derecho, impulsa el caudal de aire por el túnel, pasando por el filtro de panel de abeja que se observa aguas arriba de la sección transparente del túnel.*

El rotor de la turbina eólica se ubica fuera del túnel de viento, aguas abajo del mismo, donde el flujo puede expandirse libremente, imitando las condiciones reales de trabajo de una turbina Monteiro, 2013). Alrededor de la turbina eólica impresa en 3D, se coloca una jaula de malla para evitar cualquier accidente en caso de rotura del rotor.

2.4 Sistema de control

En el banco de ensayos, un generador DC Maxon DCX35L está conectado coaxialmente con la turbina eólica. Así, el par de reacción generado por el viento se transmite directamente a él. El generador está equipado con un tacómetro integrado para medir con precisión la velocidad de giro. Se controla a través de una tarjeta controladora ESCON 50/5 que permite disipar la energía que se genera y, además, realiza dos tipos de control principal: control de corriente (par) y control de velocidad. La Figura 2 muestra el subsistema de control y las conexiones entre el controlador, el generador, la fuente de energía del laboratorio de la turbina y la computadora.

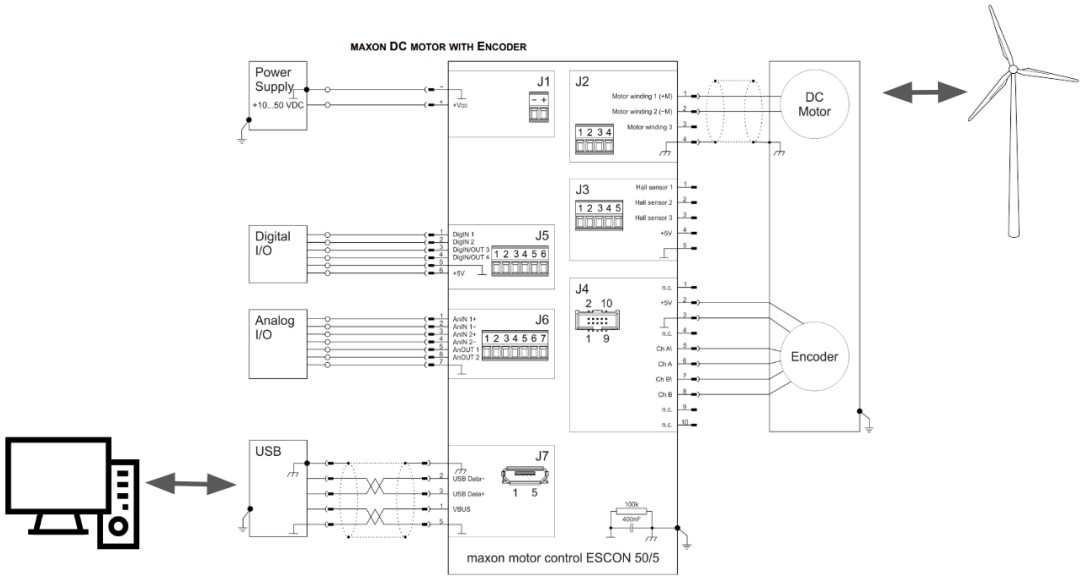

***Figura 2**. Sistema de control. La figura muestra las conexiones entre el controlador, el motor, la turbina, la fuente de alimentación y el cálculo.*

2.5 Conceptos principales para el diseño del rotor

El alumnado se enfrenta al diseño completo de las palas de la turbina eólica utilizando un software CAD 3D. Su diseño debe cumplir los siguientes requisitos:

- Un diámetro máximo del rotor de 14 cm.
- Una velocidad de viento constante de trabajo de 10,2 m/s.
- Una velocidad máxima del rotor de 6670 rpm (límite del generador).

El alumnado debe trabajar en grupos para abordar las cuestiones implicadas en el diseño, que incluyen:

- Selección del número de palas en la turbina (limitado a 2-4 palas debido a restricciones de construcción).
- Selección del perfil o perfiles aerodinámicos que se utilizarán en el diseño de las palas.
- Diseño de la *cuerda* y *ángulo de calado* de los perfiles aerodinámicos a lo largo de la pala.

El diseño de la pala propuesto por los/las estudiantes debe basarse en los conceptos teóricos cubiertos durante las clases teóricas. Antes de que el alumnado emprenda esta tarea, es necesario que adquiera una comprensión significativa del contenido general del curso y especialmente del llamado "método del elemento de pala" (Manwell, 2009). Éste consiste en la aplicación de las ecuaciones de conservación (masa, momento lineal y angular) al flujo que atraviesa el rotor de la turbina, así como la "teoría del elemento de pala", que estudia el comportamiento del perfil aerodinámico dentro de un flujo de aire bidimensional.

El perfil o los perfiles aerodinámicos utilizados para diseñar las palas del rotor son de suma importancia. En lugar de diseñarlos desde cero, se alienta a los estudiantes a seleccionar un perfil estándar de una base de datos pública, como (Airfoiltools). Posteriormente, diseñan los valores de *cuerda* y *calado* en función de la posición radial a lo largo de la pala, tal y como se muestra en la Figura 3. Finalmente, en la herramienta de diseño CAD 3D, se realiza una operación de solevación, que crea la superficie de la pala a partir de los perfiles aerodinámicos diseñados por los estudiantes.

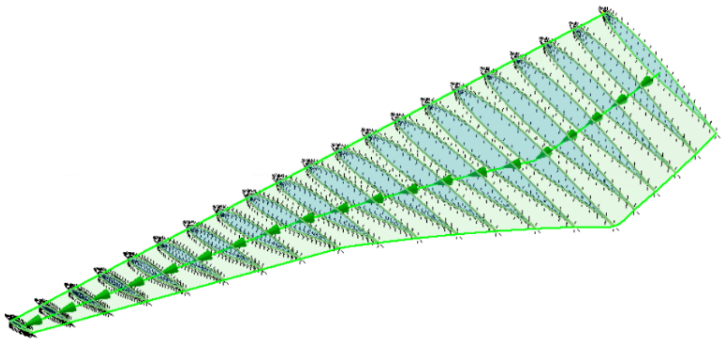

***Figura 3**. Perfiles aerodinámicos que componen la estructura principal de una pala del rotor.*

2.6 Fabricación de los álabes del rotor

Después de diseñar la turbina eólica con una herramienta CAD 3D, los estudiantes deben generar un archivo gráfico para construir su prototipo en una impresora 3D. Esta tecnología de fabricación aditiva tiene algunas limitaciones que los/las estudiantes deben tener en cuenta, como la resistencia del material o la geometría. Vale la pena señalar que la unión entre capas puede ser frágil y, por lo tanto, la dirección de impresión está determinada por la dirección de las fuerzas y los momentos en el álabe. La figura 4 muestra el proceso de impresión de los álabes utilizando una impresora 3D estándar y material PLA. Además, en la imagen se muestra el posicionamiento adecuado de la cuchilla en la superficie de la impresora 3D, apoyándose en el borde de ataque de la pala. Aunque este método de fabricación es lento, se pueden imprimir varias palas simultáneamente, lo que acelera el proceso.

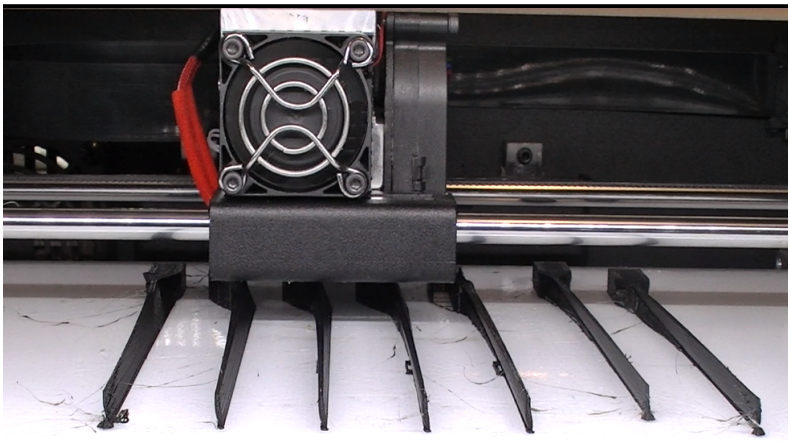

Figura 4*. La figura muestra un momento de impresión de los álabes del prototipo de turbina eólica.*

3. Competición

Los diseños de la turbina eólica se evalúan mediante una competición por equipos. Cada equipo, formado por 2-3 estudiantes, debe presentar su diseño al resto de los estudiantes mediante una presentación en clase. Posteriormente, los diseños se imprimen en 3D y los equipos participan en la competición que se lleva a cabo en el laboratorio utilizando el banco de pruebas descrito en la Sección 2.3 (ver Figura 1). Las turbinas diseñadas por los diferentes equipos se ensayan bajo las mismas condiciones de flujo. Durante cada prueba, se genera una curva que compara la velocidad de rotación (Ω) frente al coeficiente de potencia C_p. El coeficiente de potencia se define como la relación entre la potencia extraída, $\dot{W}_g$, sobre la potencia cinética total del viento, $\dot{W}_w$:

$$C_p = \frac{\dot{W}_g}{\dot{W}_w} = \frac{M\Omega}{\eta_e 0.5\rho S V^3} = \frac{I k_m \Omega}{\eta_e 0.5\rho S V^3} \quad (1)$$

donde I es la corriente continua producida por el generador, k_m es la constante de conversión entre la corriente producida y el par del rotor, η_e es la eficiencia del generador, ρ es la densidad del aire, S es la superficie cubierta por el rotor cuando gira y V es la velocidad del viento.

Para obtener estas curvas de prueba, el sistema de control se utiliza para realizar variaciones en el par resistente M (proporcional a la corriente generada). Esto emula una turbina eólica bajo diferentes estados de carga eléctrica. Primero, el sistema de control ordena una situación I = 0 A, entonces el rotor gira libremente (en ausencia de par resistente) y alcanza la velocidad de rotación máxima para un valor fijo de la velocidad del viento V. Dado que el torque generado es nulo, el coeficiente de potencia también es cero y corresponde al punto más bajo de la curva de prueba. A continuación, la corriente aumenta en pequeños pasos de 0.05 A. Para cada paso, la turbina tiene que superar un par distinto de cero, por lo tanto, su velocidad de rotación disminuye. Para cada valor de Ω e I, el coeficiente de potencia se calcula utilizando la Ecuación (1), que conduce a los resultados presentados en la Figura 6. En aras de la practicidad, la prueba se detiene cuando ya se ha obtenido el C_p máximo y se detecta una disminución en la curva C_p vs. Ω.

La figura 6 presenta los resultados de las competiciones realizadas durante el curso 2019/2020 en las asignaturas de grado, *Energía Eólica e Hidráulica* (Figura 6(a)) y de máster, Energía Eólica (Figura 6(b)). Cada curva presenta los valores coeficiente de potencia C_p para cada diseño a diferentes velocidades de rotación Ω. El objetivo principal de los equipos competidores es maximizar el valor de C_p. En la figura se observan diferencias significativas entre las eficiencias medidas de los diseños, especialmente en la asignatura de grado (Figura 6(a)). Este hecho se discutirá en la Sección 4.

La evaluación del diseño se basa en la potencia máxima producida por las turbinas, que coincide con el valor máximo de C_p. El grupo ganador obtiene la puntuación máxima y el resto de ellos serán calificados en proporción al ganador, utilizando el valor de la potencia máxima que han logrado producir.

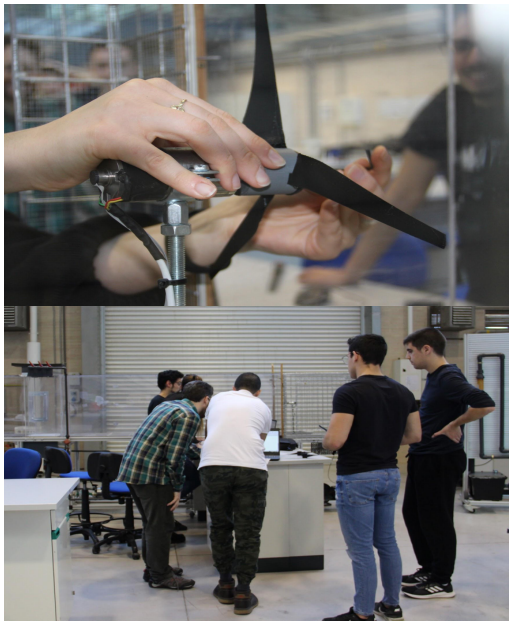

Figura 5 *Momentos de una competición de turbinas eólicas.*

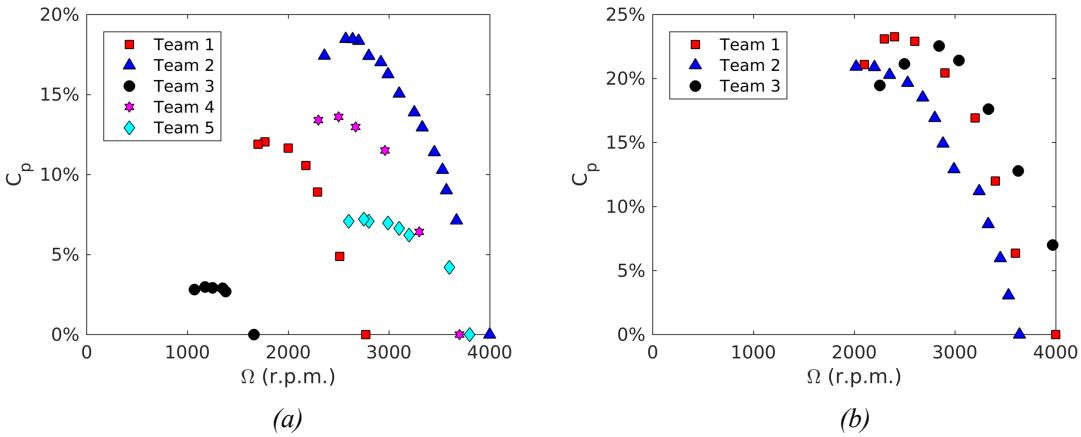

Figura 6*. Valores de Cp para diferentes velocidades de giro. Resultado de la competición entre varios equipos. Curso 2019-2020. (a) Energía Eólica e Hidráulica, Grado de Ingeniería Eléctrica. (b) Energía Eólica, Máster Universitario en Energía Solar y Renovables.*

4. Resultados

Los resultados en términos de C_p de cada turbina se comprueban de forma pública durante el concurso, según se muestra en la Figura 6. En consecuencia, cada equipo es capaz de comparar sus resultados de forma instantánea con las de otros grupos. Esto brinda la oportunidad de resaltar la necesidad de tener un proceso de diseño adecuado y cuidadoso, y genera un debate en torno a las fortalezas y flaquezas de cada diseño.

Se ha observado que el proceso de reconocer los fallos es importante en el proceso de aprendizaje y permite al resto de grupos poner en valor sus aciertos. Por ejemplo, en la competición representada en la Figura 6(a), los equipos 3 e 5 cometieron errores muy importantes en el diseño de sus turbinas. Esto dio lugar a unos desempeños bajos de sus turbinas, pero además generó una discusión entre los alumnos sobre los principales fallos cometidos en cada diseño. También los resultados del resto de equipos generaron debate, unos porque deseaban mejorar su desempeño y otros explicando cuales pensaban que eran sus aciertos. Además, se dio un proceso muy interesante desde el punto de vista del aprendizaje. Uno de los grupos de alumnos tuvo un fallo bastante grave en los ángulos de calado (posición de los perfiles aerodinámicos respecto al plano de rotor), donde cambió el signo del mismo. Esto les hizo obtener unos resultados catastróficos, pero tras un proceso de profunda reflexión sobre el funcionamiento de los perfiles aerodinámicos de la pala, decidieron rotar la pala 180º con respecto a su eje y ensayar otra vez. La solución no era perfecta, porque el perfil seguía sin funcionar de forma óptima, pero los resultados mejoraron drásticamente. Se trata del equipo 4, que quedó en segundo lugar.

5. Conclusiones

Se ha presentado una experiencia docente centrada en un enfoque basado en proyectos. El proyecto consiste en el diseño práctico de aerogenerador para generación de energía. Los/las estudiantes diseñan y construyen sus propias turbinas eólicas utilizando la tecnología de impresión 3D.

Se ha observado que esta aplicación particular de una metodología de aprendizaje basada en proyectos ha estimulado la exploración activa al trabajar en un desafío del mundo real, como el diseño de una turbina eólica. Esta metodología ha mejorado significativamente la motivación de los estudiantes para estudiar profundamente los principales conceptos teóricos involucrados en el diseño de las cuchillas. Además, han ganado independencia en el proceso de aprendizaje, induciendo así una mayor preparación para su futuro profesional. Además, los estudiantes han aumentado sus habilidades de trabajo en equipo y gestión de recursos.

La percepción por parte del profesorado del aprendizaje de los alumnos ha mejorado drásticamente respecto a cursos precedentes. Se han detectado resultados notables en términos de aprendizaje, motivación y satisfacción con esta experiencia. Los estudiantes ahora pueden asimilar conceptos teóricos complejos involucrados en el diseño y construcción de las palas del rotor de una turbina eólica. Finalmente, la forma en que se ha abordado la evaluación, es decir, por medio de una competencia, aumenta la motivación de los estudiantes y sus esfuerzos para lograr el mejor resultado. Así mismo esta evaluación proporciona una etapa

adicional de aprendizaje, mediante la asimilación de errores propios y ajenos y en algún caso la superación de los mismos.

6. Agradecimientos

Los autores quieren agradecer la al Vicerrectorado de Investigación e Innovación de la Universidad Miguel Hernández de Elche por la financiación recibida a través de la concesión de los proyectos con referencia PIEU2017/30, PIEU2018/04 y PIEU2019/16 en los Proyectos de Innovación Educativa Universitaria de los referidos años.
Al grupo de Ingeniería Mecánica (Hector Campello, Nuria Campillo, Miguel Fabra y Francisco Simón) por su colaboración en el proyecto, especialmente en cuanto a la creación de modelos 3D y asistencia en el proceso de fabricación de los prototipos.

7. Referencias

AIRFOILTOOLS. Disponible en: www.airfoiltools.com

Bayati, I., Belloli, M., Bernini, L., Zasso, A. (2017). “Aerodynamic design methodology for wind tunnel test of wind turbine rotors”. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics.

Bottasso, C.L., Campagnolo, F., Petrović, V. (2014). “Wind tunnel testing of scaled wind turbine models: Beyond aerodynamics”. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics.

Chu, R.H., Lu, D.D. and Sathiakumar, S. (2008). "Project-Based Lab Teaching for Power Electronics and Drives". IEEE Transactions on Education, 51, no. 1, 108-113.

Durán, M.J., Barrero, F., Guzmán, H., Guzmán, F. y Pozo, A. (2012). "Wind energy conversion system course for electrical engineers. Part 1: Theoretical background". Technologies Applied to Electronics Teaching (TAEE), Vigo, 148-153.

Einwächter, F. et al. (2014). “Interactive Virtual Experiments for web-based education on wind energy”. Ninth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER).

Global Wind Report 2018, Global Wind Energy Council, April 2019.

Lee, M.H., Shiah, Y.C., Bai, C.J. (2016) “Experiments and numerical simulations of the rotor-blade performance for a small-scale horizontal axis wind turbine”. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics.

Manwell, J.F., McGowan, J.G., Rogers, A.L. (2009). “Wind Energy Explained: Theory, Design and Application”. Second Edition. Wiley. ISBN: 978-0-470-01500-1

Martínez, F., Herrero, L.C. and De Pablo, S. (2011). "Project-Based Learning and Rubrics in the Teaching of Power Supplies and Photovoltaic Electricity". IEEE Transactions on Education, 54, no. 1, 87-96.

Mills, J.E. and Treagust, D.F. (2003). “Engineering Education - Is problem-based or project-based learning the answer?”. Australasian Journal of Engineering Education.

Monteiro, J.P., Silvestre, M.R., Piggott, H., André, J.C. (2013). “Wind tunnel testing of a horizontal

axis wind turbine rotor and comparison with simulations from two Blade Element Momentum codes". Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 123-A, 99-106. ISSN 0167-6105, DOI: 10.1016/j.jweia.2013.09.008.

Saavedra-Montes, A.J. et al. (2010). "How to Motivate Students to work in the Laboratory: A new approach for an Electrical Machines Laboratory". IEEE Trans. on Education. 53(1), 490-496.

Santos-Martin, D. et al. (2012). "Problem-Based Learning in Wind Energy Using Virtual and Real Setups". IEEE Trans. on Education. 55(1), 126-134.

Suwan, M., Neumann, T., Feltes, C., Erlich, I. (2012). "Educational experimental rig for Doubly-Fed Induction Generator based wind turbine". 2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting.

Tourou,P., Einwächter, F. and Sourkounis, C. (2013). "Web-based virtual experiment for teaching doubly-fed induction generator in the context of wind energy conversion". 7th IEEE International Conference on e-Learning in Industrial Electronics (ICELIE), Vienna, 126-131.