



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

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.	<i>DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN VEHÍCULO DE BAJO CONSUMO PARA COMPETICIONES DE AUTOMOVILISMO EFICIENTE</i>	<i>1</i>
2.	<i>EXPERIENCIA PILOTO DE TRABAJO COLABORATIVO PARA EL DESARROLLO DE DETRABAJOS FIN DE GRADO EN EL ÁMBITO DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA INDUSTRIAL</i>	<i>12</i>
3.	<i>APRENDIZAJE COMPETENCIAL EN FUNDAMENTOS FÍSICOS DE LA INGENIERIA: USO DE TECNOLOGÍAS DE PARTICIPACION ACTIVA EN EL AULA</i>	<i>29</i>
4.	<i>ANÁLISIS DE RECURSOS ONLINE APLICADOS A ACTIVIDADES DOCENTES COLABORATIVAS EN GRADOS DE INGENIERÍA</i>	<i>40</i>
5.	<i>APRENDIZAJE BASADO EN PROYECTOS MEDIANTE EL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE PROTOTIPOS DE TURBINAS EÓLICAS</i>	<i>52</i>
6.	<i>INSTRUMENTOS DE LABORATORIO DE BAJO COSTE: ARDUINO SHIELDS</i>	<i>64</i>
7.	<i>MEDIDA DE LA CARGA DE TRABAJO PERCIBIDA POR LOS ESTUDIANTES DEL GRADO EN INGENIERÍA ELÉCTRICA (UMH). RELACIÓN CON LOS RESULTADOS ACADÉMICOS Y SU SATISFACCIÓN</i>	<i>75</i>
8.	<i>INNOVACION EDUCATIVA EN INGENIERIA. CASO DE ÉXITO DE LA RAMA IEEE DE ESTUDIANTES UMH</i>	<i>91</i>
9.	<i>TEST INVULNERABLES ANTE LA COPIA</i>	<i>100</i>
10.	<i>METODOLOGÍA DE APRENDIZAJE BASADO EN PROYECTOS PARA EL DISEÑO DE TURBINAS HIDRÁULICAS EN GRADOS DEL ÁMBITO INDUSTRIAL</i>	<i>112</i>

METODOLOGÍA DE APRENDIZAJE BASADO EN PROYECTOS PARA EL DISEÑO DE TURBINAS HIDRÁULICAS EN GRADOS DEL ÁMBITO INDUSTRIAL

J. Ruiz¹, A. Gil², D. Crespí¹, M. Ballesta², M. Lucas¹

¹Dpto. de Ingeniería Mecánica y Energía. Universidad Miguel Hernández de Elche. j.ruiz@umh.es

²Dpto. de Ingeniería de Sistemas y Automática. Universidad Miguel Hernández de Elche.

En este artículo se presenta una acción de innovación docente orientada hacia la búsqueda de la motivación del estudiante en el estudio de las turbinas hidráulicas. El proyecto está relacionado con las asignaturas de Sistemas Fluidomecánicos y Energía Eólica e Hidráulica presentes en los Grados en Ingeniería Mecánica y en Ingeniería Eléctrica de la Universidad Miguel Hernández de Elche, que tienen como denominador común el estudio de la energía hidráulica aplicada (turbinas hidráulicas). Las titulaciones en el ámbito industrial se han caracterizado tradicionalmente por su carácter eminentemente práctico. En consecuencia, las sesiones prácticas realizadas en el laboratorio adquieren máxima importancia para ayudar al estudiante la adquisición de las competencias descritas en las guías docentes de las asignaturas. En la acción docente presentada aquí se propone una actividad de aprendizaje basada en proyectos donde se indica a los estudiantes que diseñen y construyan una turbina hidráulica. La construcción de la turbina es posible gracias al uso de tecnología de impresión 3D. Los prototipos así construidos por los estudiantes son comprobados en el laboratorio en términos de eficiencia y potencia generada. Se ha comprobado que esta metodología despierta un gran interés en el estudiante, pues se obtiene un resultado tangible y a escala de una central de generación hidráulica. De esta manera, el estudiante puede observar directamente el resultado de su diseño como (futuro) ingeniero o ingeniera y así entender instantáneamente la importancia de las decisiones de diseño que ha tomado. Se presentan resultados que demuestran que los estudiantes que participan en la actividad, obtienen tasas de rendimiento superiores a aquellos que no lo hacen. En todos los escenarios analizados (3 cursos académicos y 2 indicadores de rendimiento), los estudiantes implicados en la acción de innovación superan a los compañeros y compañeras que no lo hacen. Además, se ha observado que esta metodología promueve activamente el desarrollo de competencias transversales de gran importancia en el estudiantado, como la creatividad, la capacidad para la resolución de problemas y el trabajo en equipo.

1. Introducción

La generación de energía eléctrica utilizando fuentes renovables, en términos de potencia instalada, constituye un 51,9% del total de potencia instalada en España, según datos de 2018 de Red Eléctrica Española (Las energías renovables, 2019). Este aprovechamiento se realiza usando fuentes eólicas (24%), hidráulicas (16,3%), solares (fotovoltaica 3,5% y térmica 2%).

El 1% restante está generado mediante técnicas que incluyen biogás, biomasa, geotérmica, hidráulica marina, hidroeólica y residuos renovables. Queda, por tanto, patente, que la energía extraída a partir de fuentes hidráulicas constituye un porcentaje importante del total y esto precisa que desde el ámbito universitario se formen profesionales que puedan trabajar en el diseño, construcción y mantenimiento de sistemas de generación de energía basados en energía hidráulica.

La Universidad Miguel Hernández de Elche (UMH) instauró sus titulaciones de Grado en el curso académico 2010/2011, fruto de la entrada en vigor de la legislación en materia de educación universitaria derivada del tratado de Bolonia. Entre la oferta de carreras técnicas, y más concretamente en titulaciones relacionadas con el ámbito industrial, la Escuela Politécnica Superior de Elche (EPSE) ofrece las actualmente las titulaciones de Graduado en Ingeniería Mecánica, Ingeniería Eléctrica e Ingeniería Electrónica y Automática. Dichas titulaciones, así como sus predecesoras, se han caracterizado tradicionalmente por su carácter eminentemente práctico debido a la alta tasa de egresados integrados en el mercado laboral.

Las asignaturas Sistemas Fluidomecánicos y Energía Eólica e Hidráulica, de los Grados en Ingeniería Mecánica y en Ingeniería Eléctrica de la Universidad Miguel Hernández de Elche, respectivamente, tienen como denominador común el estudio de la energía hidráulica aplicada (turbinas hidráulicas). En estas asignaturas se fijan los siguientes objetivos de aprendizaje: caracterizar los distintos tipos de turbinas hidráulicas, describir el funcionamiento de sus partes principales, establecer los parámetros fundamentales para el diseño y la selección de una turbina en un emplazamiento determinado. Sin embargo, y a pesar de la naturaleza aplicada de estos objetivos, las prácticas de laboratorio de dichas asignaturas se ciñeron, en sus primeros años, a la realización de prácticas de informática, bien para la modelización de estos equipos, bien para el diseño de los mismos de manera teórica. Esta metodología se justificó por el elevado precio de algunos equipos de prácticas de laboratorio, así como la relativa reciente puesta en marcha de las mismas (nótese que ambas se imparten en los últimos cursos de dichas titulaciones).

Bien por el hecho anterior, bien porque el diseño de una turbina hidráulica es un problema complejo que requiere la comprensión de las ecuaciones de conservación de la masa, energía y momentos lineal y cinético en forma integral aplicadas a la misma, durante la docencia de la asignatura en los primeros años, el equipo docente involucrado en la misma, localizó dificultades en la adquisición de estos conceptos (competencias) por parte de los estudiantes. Este hecho constituyó la principal motivación de la presente actividad de innovación docente.

En las carreras técnicas, el laboratorio es el lugar donde los estudiantes son capaces de obtener un conocimiento profundo de los conceptos mencionados durante las sesiones de teoría y comprender los aspectos prácticos de la tecnología. Aunque esta afirmación es generalmente correcta, algunos docentes han cuestionado esta metodología tradicional, o al menos, la forma en la que teoría y prácticas se combinan en la mayoría de asignaturas (Las energías renovables, 2019), (Santos-Martin, 2012). Así, por ejemplo, en (Saavedra-Montes, 2010) se destaca que frecuentemente las sesiones de laboratorio tradicionales son ineficientes y no promocionan el desarrollo de competencias fundamentales en los estudiantes. En concreto, destacan que los guiones de prácticas, generalmente, están diseñados por los docentes de forma inadecuada: se limitan a describir una serie de operaciones que deben llevarse a cabo para llevar a cabo un experimento u obtener la respuesta de una máquina (bien un equipo real o bien un equipo simulado). De esta manera se limita la creatividad de los estudiantes y no se fomenta su curiosidad. Algunos autores (Saavedra-Montes, 2010) fomentan que los estudiantes diseñen sus

propias prácticas de laboratorio, lo que resulta en unas prácticas de laboratorio más creativas, entretenidas y motivadoras. Las prácticas de laboratorio se pueden basar en plataformas físicas (reales) o virtuales. En el pasado se han hecho esfuerzos en proporcionar laboratorios virtuales a los estudiantes (Saavedra-Montes, 2010). De esta manera los estudiantes pueden realizar experimentos en una plataforma simulada usando, frecuentemente, una aplicación web fácil de usar en cualquier momento (Einwächter, 2014). La utilización de los laboratorios físicos o reales también sigue siendo frecuente (Santos-Martin, 2012) que se suele acompañar de una estrategia denominada “manos a la obra” (hands-on-experiments approach). Los beneficios del uso de ambos tipos de laboratorios (virtuales y reales) se analizó en (Tourou, 2013), donde se reporta que una combinación secuencial de prácticas utilizando laboratorios virtuales y reales proporciona los mejores resultados en términos de adquisición de conocimiento por parte de los estudiantes.

Frecuentemente, las prácticas de laboratorio tanto sobre plataformas virtuales como reales se realizan sobre una base experimental diseñada y preparada por los profesores de la asignatura (Santos-Martin, 2012), (Kapici, 2019), (Mills, 2003), (Bayati, 2017), (Lee, 2016) y (Suwan, 2012). De esta manera no es posible realizar cambios en la plataforma experimental, donde la turbina a ensayar es fija (bien real o simulada). En consecuencia, los estudiantes se concentran únicamente en llevar a cabo los pasos necesarios para llevar a cabo un experimento en concreto y obtener la respuesta de la máquina. De esta manera, se reporta (Manwell, 2009) que la realización de las prácticas no promueve el aprendizaje y la motivación del estudiante (Saavedra-Montes, 2010).

El aprendizaje basado en problemas y el aprendizaje basado en proyectos son dos metodologías diferentes pero que cuentan con puntos en común. El proyecto es una unidad de trabajo típicamente usada en el ámbito de la ingeniería que puede consistir en un conjunto de problemas a resolver cumpliendo, generalmente, con unas especificaciones técnicas. Los proyectos motivan al estudiante a trabajar en la aplicación del conocimiento adquirido, mientras que el aprendizaje basado en problemas está enfocado en la adquisición de nuevo conocimiento. La aplicación de ambas metodologías docentes en el ámbito de la ingeniería se trata en (Mills, 2003), donde la efectividad y relevancia de cada metodología también son analizadas. El aprendizaje basado en proyectos beneficia el proceso de aprendizaje de acuerdo con muchos autores (Einwächter, 2014), (Santos-Martin, 2012), (Mills, 2003) y (Manwell, 2009), quienes reportan el incremento en la motivación de los estudiantes, la activación de mecanismos de co-aprendizaje y el desarrollo de la independencia en el proceso de aprendizaje. En relación con las prácticas de laboratorio, en (Martínez, 2011) se presenta una actividad basada en proyectos para laboratorio. Este tipo de actividades se perciben, comúnmente, como más interesante que el trabajo rutinario de laboratorio donde los estudiantes siguen paso a paso los guiones preparados por el profesor. La duración y extensión del proyecto en el contexto de una asignatura de informática fueron analizados en (Chu, 2017), donde se propone la combinación de proyectos largos y cortos.

De acuerdo a la revisión bibliográfica realizada, la hipótesis principal de este trabajo es que, mediante el empleo prácticas de laboratorio “personalizables” conjuntamente con una metodología basada en proyectos, el estudiantado es capaz de adquirir un conocimiento más profundo en los aspectos o contenidos deseados. En este sentido, el principal objetivo de este trabajo es el de implementar una acción de innovación que utiliza un método de aprendizaje novedoso en el ámbito de la ingeniería hidráulica. La acción se centra en una actividad basada en proyectos en la que se propone a los estudiantes el diseño y fabricación de una turbina hidráulica de acción (tipo Pelton) a escala. Bajo unas premisas comunes de tamaño y punto

nominal de funcionamiento, cada grupo de estudiantes debe suministrar una propuesta CAD de diseño de turbina hidráulica de acción basándose en los contenidos teóricos. Los diferentes diseños propuestos por equipos de estudiantes se construyen mediante una impresora 3D y se ensayan en una máquina de ensayo construida a tal efecto. De esta manera, los estudiantes son partícipes del proceso ingenieril completo, que implica el diseño, la construcción, el ensayo y el análisis. Los rodets fabricados se ponen a prueba en una instalación experimental diseñada a tal efecto (prácticas de laboratorio “personalizadas”) obteniendo las curvas de par y eficiencia de las diferentes turbinas diseñadas bajo las mismas condiciones. Además, esta metodología se complementa con una forma novedosa de evaluación por competición. La combinación de diseño, construcción y competición atrae fuertemente a los estudiantes y los anima a invertir tiempo y esfuerzo. El factor competitivo es un acicate que motiva especialmente al alumnado que intenta explorar soluciones y maneras para batir a sus compañeros (o a sus diseños, al menos). El hecho de construir y ver funcionar la turbina hidráulica induce en los estudiantes de la asignatura un sentimiento de consecución y logro. Este sentimiento no siempre se alcanza en otras asignaturas que limitan el proceso de aprendizaje a una simulación de ordenador o a un problema resuelto en la pizarra.

El presente artículo se estructura como sigue. En la Sección 2, se plantean las ecuaciones que rigen la operación de este tipo de máquinas hidráulicas motoras para una mejor interpretación de los experimentos propuestos en la Sección 4. En la Sección 3, se describe el equipo construido, listando los componentes y características técnicas de éstos. Se presentan en la Sección 4 los antecedentes de una de las asignaturas donde se ha puesto en práctica la acción de innovación piloto, así como el cometido de la misma. En la sección 5 se recopilan los resultados del concurso llevado a cabo desde los cursos académicos 2016-2017 hasta el 2019-2020. Finalmente, en la Sección 6, se recogen las conclusiones más significativas del trabajo.

2. Antecedentes: análisis del funcionamiento de una turbina Pelton

Con objeto de interpretar los resultados de la competición expuestos en la Sección 4, se describe aquí de manera resumida un análisis del funcionamiento de una turbina Pelton.

Las turbinas tipo Pelton son las turbinas hidráulicas de impulso de uso más común en la actualidad. Su uso es frecuente en grandes saltos de agua. Las turbinas de acción son máquinas hidráulicas motoras en las que el intercambio de energía entre el rodete y el fluido se produce principalmente por impulso o acción. Aquí un chorro de agua a alta velocidad es deflectado por un conjunto de álabes dispuestos alrededor del rodete, que, como consecuencia de la variación del momento cinético del fluido, genera un par que lo hace girar. La turbina Pelton es el tipo de turbina hidráulica de impulso de uso más común en la actualidad. El mecanismo de funcionamiento de este tipo de turbinas consiste en hacer incidir tangencialmente uno o varios chorros de agua a alta velocidad sobre los álabes dispuestos equiespaciadamente en la periferia del rodete. La energía del agua a la entrada del rotor es en forma de energía cinética del chorro, no existiendo prácticamente variaciones de altura estática en el fluido a través del rodete. En este tipo de turbinas la presión en el rodete se mantiene constante y esto provoca que el fluido no invada toda la cavidad entre los alabes. La variación del momento cinético del agua en el rodete produce sobre éste un par que lo hace girar. El agua sale de los álabes con una energía cinética residual relativamente baja y es dirigida hacia el canal de desagüe. Debido a que en cada

instante el chorro o los chorros de agua sólo inciden sobre algunos de los álabes, las turbinas Pelton son obviamente de admisión parcial. En la Figura 1 (a) se muestra una representación esquemática de una instalación de turbinación con una turbina de acción. Tal y como se puede apreciar los elementos que componen la turbina son dos: el inyector y el rodete. La diferencia de energías mecánicas específicas entre la entrada y la salida del rodete o la altura neta, se puede expresar como,

$$gH_n = \left[\frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} + gz \right]_s^e = \frac{p_e}{\rho} \quad (1)$$

siendo p_e la presión a la entrada de la turbina, antes del inyector. La conversión total de la energía de presión en energía cinética proporciona el valor teórico de la velocidad ideal del chorro, $v_{1,máx}$,

$$v_{1,máx} = \sqrt{\frac{2p_e}{\rho}} = \sqrt{2gH_n} \quad (2)$$

La potencia hidráulica disponible (potencia neta) se puede expresar como el producto del gasto másico de agua inyectado (ρQ) y su contenido energético asociado (gH_n). El rendimiento de la máquina se define como el cociente entre la potencia generada, producto del par y la velocidad de giro ($M\Omega$) y la potencia disponible,

$$\dot{W}_n = \rho g Q H_n = p_e Q \quad (3)$$

$$\eta = \frac{\dot{W}_{eje}}{\dot{W}_n} = \frac{\dot{W}_{eje}}{\rho g Q H_n} = \frac{M\Omega}{p_e Q} \quad (4)$$

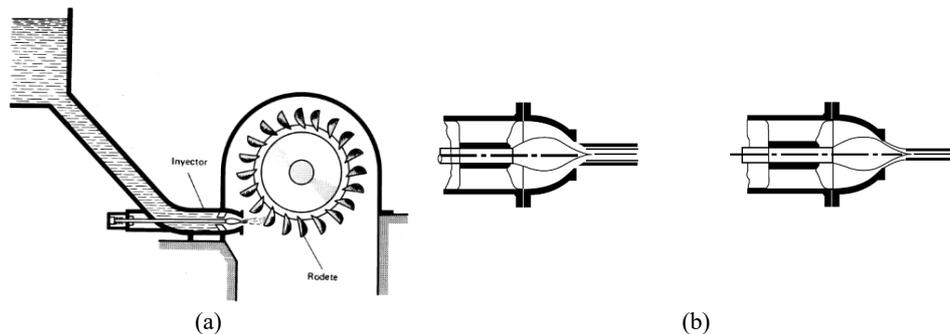


Figura 1. (a) Esquema instalación turbinación con turbina Pelton. (b) Elemento inyector: descripción gráfica de su funcionamiento. Izquierda, carga total. Derecha, carga parcial. Adaptado de Hernández Krahe (2005).

El elemento inyector en una turbina Pelton es el órgano regulador del caudal del chorro. Esencialmente consta de una válvula de aguja o punzón cuya posición (carrera) determina el grado de apertura de la tobera, Figura 1 (b). La modificación del caudal lograda gracias al punzón del inyector permite la modulación de la potencia producida por la máquina si ésta opera a velocidad de giro constante (máquina síncrona). Las pérdidas en este elemento se deben a la fricción con el fluido. Por tanto, la presión a la salida del inyector será menor que p_e y, por tanto, se reducirá la velocidad de descarga. Para cuantificar estas pérdidas se define el coeficiente de velocidad en las toberas de los inyectores C_v ,

$$v_1 = C_v \sqrt{\frac{2p_e}{\rho}} = C_v \sqrt{2gH_n} \quad (5)$$

Obviamente C_v es función del diseño del inyector y su valor suele oscilar entre 0,97 y 0,99 en turbinas convencionales. La velocidad absoluta a la salida del inyector (entrada al rodete) v_1 ,

sirve para determinar el caudal trasegado por la turbina y se puede escribir de acuerdo a la sección del chorro supuesta circular y dicha velocidad (ecuación de continuidad),

$$Q=v_1 A=v_1 \frac{\pi d_0^2}{4} \quad (6)$$

De acuerdo a las ecuaciones (1) y (2) se pueden estimar las pérdidas en dicho elemento como,

$$H_{L,iny}=(1-C_v^2)H_n \quad (7)$$

Por su parte, el rodete de las turbinas de acción está compuesto por la rueda Pelton y un conjunto de álabes (denominados cucharas) acopladas sobre la periferia de la misma. Las cucharas son cazoletas semiesféricas y simétricas que disponen de una arista central que divide el chorro en dos partes iguales que deslizan por el intradós de las dos semicazoletas y salen desviadas con un ángulo β_2 . La deflexión del chorro produce una fuerza sobre el álabe que, multiplicada por la distancia al eje de la rueda, produce el par que hace girar el eje. Las pérdidas mecánicas en los álabes como consecuencia del rozamiento con el fluido, son proporcionales a un factor de pérdida de carga adimensional y la energía cinética relativa del fluido en la entrada de la cuchara, y se pueden estimar como la diferencia entre las energías cinéticas relativas entre la entrada y la salida del álabe. La velocidad residual a la salida de la turbina se suele considerar como una pérdida de la propia turbina, (Hernández, 2005), por lo que se engloba dentro del rendimiento hidráulico. Por este motivo, la altura neta se puede simplificar como se ha mostrado en la Ecuación (1). Las curvas características de una turbina Pelton se pueden presentar para salto constante y para salto variable. Lo más común es obtener la característica a salto constante, pues se corresponde con la operación real de este tipo de turbinas.

3. Descripción del equipo de ensayos

El equipo de ensayo de turbinas tiene la doble finalidad de ensayar las turbinas de los grupos de estudiantes que participan en el concurso además de ser un equipo de prácticas de laboratorio para aquellos que no lo hacen. La financiación necesaria para su construcción se obtuvo a través de las convocatorias del Vicerrectorado de Investigación e Innovación a través de las convocatorias INNOVA 2015 (referencia INNOVA+UMH-INNOVA2015/13) y del Programa de Innovación Educativa Universitaria PIEU-UMH 2016-17 (referencia PIEU-2016/15). El equipo consta de 3 partes principales: la maqueta a escala de turbina Pelton con su caja estanca y eje, el sistema de bombeo y sistema de adquisición de datos y control electrónico de operación, Figura 2(a).

La maqueta a escala de turbina Pelton se alberga dentro de una caja estanca de PET de 6 mm de espesor de dimensiones 15 x 15 x 15 cm. La caja se encuentra anclada a un depósito de agua de 45 l de capacidad. El ensamblaje entre caja y tapa de depósito permite que el modelo de turbina se pueda cambiar/reemplazar con cierta facilidad. Las maquetas a escala realizadas por los alumnos y por las alumnas se fabrican en Poliacido Láctico (PLA), mediante impresión 3D y a partir del diseño que los estudiantes generan en un entorno CAD (exportado a la impresora en formato.stl).

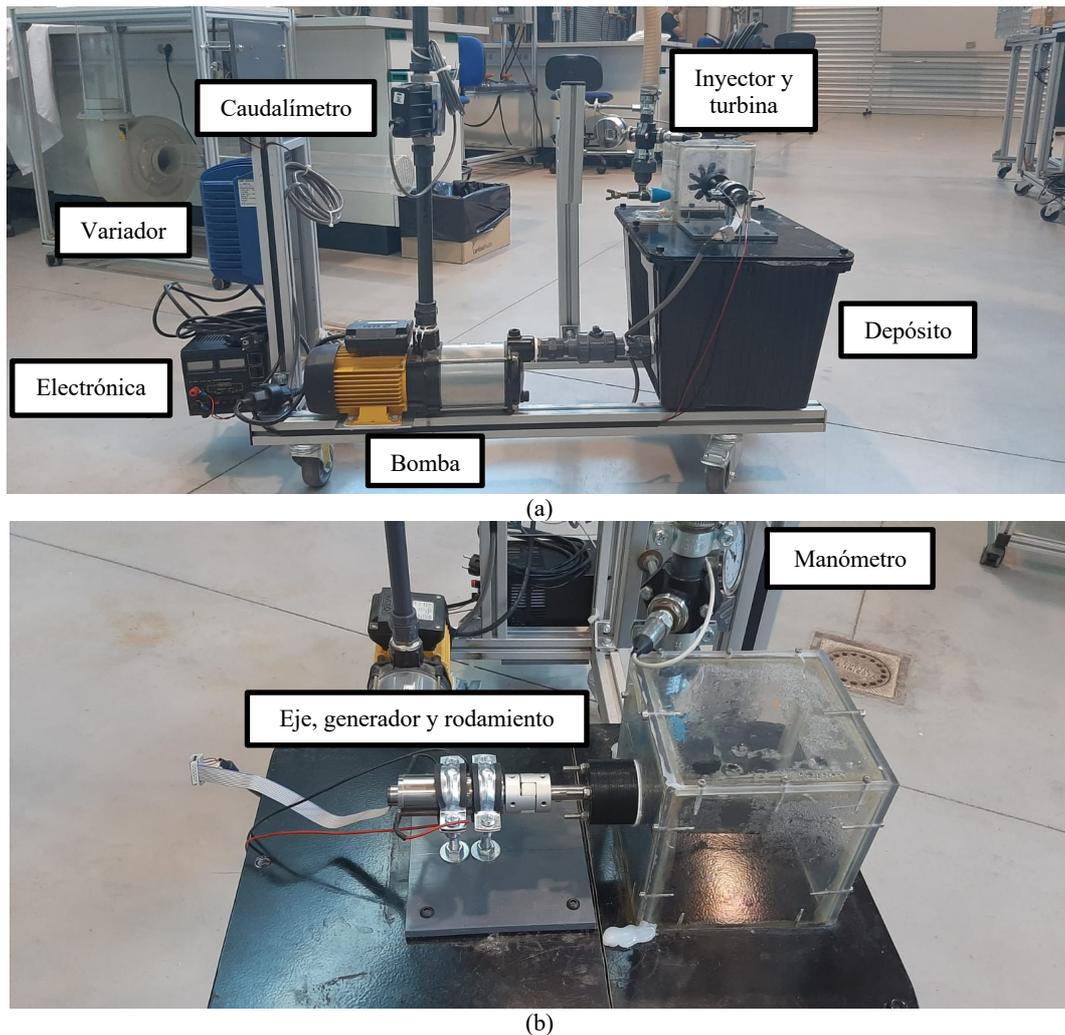


Figura 2. (a) Equipo de ensayo para turbinas Pelton construido. (b) Turbina acoplada a eje con rodamiento.

Las especificaciones básicas para poder ser ensayada dentro del equipo de medida son unas dimensiones (diámetro x anchura) de $7 \times 3 \text{ cm}$. Asimismo debe preverse un chavetero de forma hexagonal en el cubo de la maqueta para la transmisión de potencia al eje (Figura 2 (b)). El diseño de las cucharas (número e inclinación de las cucharas, ángulo de salida de los álabes, etc) es libre. Son parámetros de diseño con los que debe trabajar el estudiante en su prototipo. El elemento inyector está fabricado en latón a partir de un sistema de fumigación comercial al cual se le ha reemplazado el eje existente por una válvula de aguja cónica con un ángulo de 20° y longitud de 30 mm y una tobera cilíndrica con sección de salida de $19,63 \text{ mm}^2$ (diámetro de chorro $d_0 = 5 \text{ mm}$). El sistema de bombeo está compuesto por una bomba centrífuga multietapa modelo ESPA PRISMA 15 3M que aspira desde la parte inferior del tanque de agua e impulsa el fluido hacia el inyector. El sistema de bombeo simula las condiciones del salto hidráulico en la instalación de turbinación. La bomba se encuentra conectada a un variador de frecuencia monofásico ARCHIMEDE IMM1.1W que permite fijar la presión de consigna del bombeo (en intervalos de $0,5 \text{ bar}$) independientemente del caudal impulsado. Para ello, la velocidad de giro de la bomba se controla mediante un sensor de presión dispuesto a la entrada del inyector en paralelo con un manómetro para verificar el correcto funcionamiento. Para determinar el caudal impulsado por la bomba se dispone de un caudalímetro de turbina de la casa comercial OMEGA, modelo FTB792 con display para lectura in situ y salida $4\text{-}20 \text{ mA}$ para conexión con el sistema de

adquisición de datos. El circuito hidráulico se ha construido en tubería de PVC de 20 mm de diámetro salvo por la conexión entre caudalímetro e inyector en la que se ha usado tubería flexible del mismo calibre.

La determinación de la presión y el caudal de entrada a la turbina determinan la potencia disponible para su conversión en potencia mecánica. La conversión de la potencia hidráulica a mecánica dependerá de las condiciones de funcionamiento del rodete que pueden ser modificados a través del sistema de control y la interfaz gráfica de usuario. Concretamente, el sistema de control se ha seleccionado ex profeso para esta maqueta y se compone de cuatro partes fundamentales:

- Generador de escobillas MAXON DCX32L con tacómetro incorporado.
- Resistencia shunt DSR 70/30 para disipación de potencia.
- Placa de adquisición y control ESCON 50/5.
- PC de control con interfaz para la monitorización y control.

En la Figura 3 se presenta un esquema de conexión de todos estos elementos. La potencia hidráulica transmitida al eje se emplea para mover un motor/generador de corriente continua, de 102 W de potencia pico. La tensión producida por el motor/generador depende de la velocidad de rotación del rodete Pelton, mientras que el par ejercido por la turbina es proporcional a la corriente que circula por los devanados del motor en cada momento. La electrónica de control ESCON 50/5 permite dos tipos de control diferentes: control de par y control de velocidad. En el primero, control de par, la placa de control es capaz de activar su electrónica para hacer que la corriente se acerque lo más posible al valor comandado (o bien se limite a ese valor máximo). En este caso, la velocidad de la turbina evolucionará hasta un valor final que dependerá de las condiciones de flujo hidráulico. El segundo modo de control permite controlar la velocidad de la turbina en un valor deseado. Para ello, la electrónica de control ESCON 50/5 varía la corriente por el motor (y así el par resistente en la Pelton) usando un control PID ajustable.

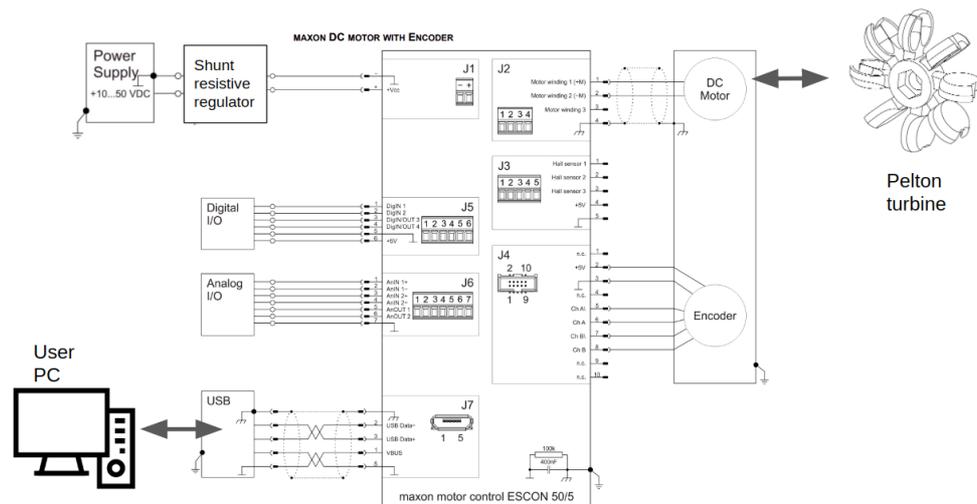


Figura 3. Esquema de conexión de los elementos del sistema de control.

En los ensayos se trabaja en el modo de control de corriente. Usando la interfaz de usuario del controlador ESCON 50/5, se indica una corriente máxima en el motor, que es proporcional al par resistente en la turbina Pelton. Esto da como lugar una velocidad de giro en la turbina que es

registrada gracias a un encoder. En cada paso del ensayo se puede obtener la potencia eléctrica generada por el equipo como producto del voltaje y la corriente. En este paso se consideran despreciables algunas pérdidas de energía, que incluyen: pérdidas de tipo Joule en los devanados del motor, rozamiento viscoso y rozamiento de Coulomb, entre los más importantes. Variando la consigna de corriente se pueden obtener las curvas de par, potencia y rendimiento frente a velocidad de giro. Se puede observar, en la Figura , que el sistema está alimentado mediante una fuente de alimentación de laboratorio a la tensión nominal de la placa de control. En efecto, cuando la placa Pelton está parada, no se genera potencia y es necesario mantener la alimentación del equipo de control. Sin embargo, cuando la turbina está en marcha, la fuente de alimentación, principalmente, debe absorber la potencia generada. Generalmente, las fuentes de laboratorio no están diseñadas para este propósito y son capaces de ceder potencia a un circuito, pero no de absorberla. En consecuencia, se precisa la instalación de un equipo Shunt. El equipo Shunt está compuesto internamente por una resistencia de potencia donde se deriva la corriente cuando el voltaje supera un determinado límite.

4. Metodología docente y acción de innovación

La asignatura donde se puso en práctica la acción de innovación docente piloto fue la asignatura Sistemas Fluidomecánicos. Se trata de una asignatura obligatoria de 3º curso del Grado en Ingeniería Mecánica de la Universidad Miguel Hernández de Elche. La asignatura se ubica en el primer cuatrimestre del curso (15 semanas) y consta de 6 créditos ECTS. El temario de la misma se divide en dos unidades didácticas: flujo en conductos (35%) y turbomáquinas hidráulicas (65%). La actividad descrita en este artículo está relacionada con la segunda unidad didáctica (turbomaquinaria). La actividad de innovación no sólo se limitó a esta asignatura, sino que, además, se hizo extensiva a la asignatura Energía Eólica e Hidráulica de 4º curso del Grado en Ingeniería Eléctrica de la UMH.

Tradicionalmente, la evaluación del curso se realiza teniendo en cuenta la entrega de los guiones de prácticas (una de las cuales consiste en la obtención de curvas características de una turbina Pelton usando la instalación descrita en la Sección 3) y un examen escrito (20 y 80%, respectivamente). Desde el curso 2015-2016, se les planteó a los estudiantes como actividad voluntaria, el diseño y construcción, mediante impresión 3D, de una maqueta de turbina Pelton en grupos de 2-3 personas. El objetivo de la actividad planteada consiste en obtener la mejor eficiencia para unas condiciones de trabajo preestablecidas (presión y caudal). Entre las cuestiones a resolver para llevar a cabo el diseño, se encontraban la justificación de la selección del número de cucharas y su forma.

Una vez confeccionados los grupos de trabajo de entre los estudiantes que voluntariamente se prestaron para la realización de la actividad, se diseñaron las turbinas utilizando cualquier herramienta CAD. Por ejemplo, la Figura 4 (a) muestra el diseño en una herramienta CAD (Austodesk Inventor®) de una turbina Pelton. A continuación, se exportaron los diseños a un formato stl admisible por una impresora 3D. Esta tecnología de construcción aditiva tiene una serie de limitaciones que los estudiantes deben conocer. Fue importante indicar a los estudiantes que la unión entre las diferentes capas de impresión es frágil. Así pues, la dirección de la impresión debe realizarse en base a las fuerzas y momentos que se espera tener en los álabes. La Figura 4 (b) muestra el proceso de impresión de las turbinas usando una impresora estándar y material PLA. Se muestra la posición más adecuada de la turbina para su impresión.

Los diseños de diferentes grupos de estudiantes se ensayaron de forma pública en una competición llevada a cabo en la Jornada de Puertas Abiertas de la Escuela Politécnica Superior de Elche. Los ensayos se realizan en la misma instalación de prácticas empleada en la docencia en la asignatura. Los resultados registrados durante los tests abarcaron la medida del par y de la velocidad de giro. De acuerdo a la Ecuación (4), éstas son suficientes (conocidas presión y caudal de entrada) para calcular la eficiencia.

5. Resultados

Se presentan en esta sección los resultados registrados durante los concursos realizados durante los años 2017, 2018 y 2019. Asimismo, se discuten las tasas de rendimiento de los más de 40 estudiantes que participaron en el concurso durante las 3 ediciones frente al resto de estudiantes que cursó la asignatura en el mismo año académico.

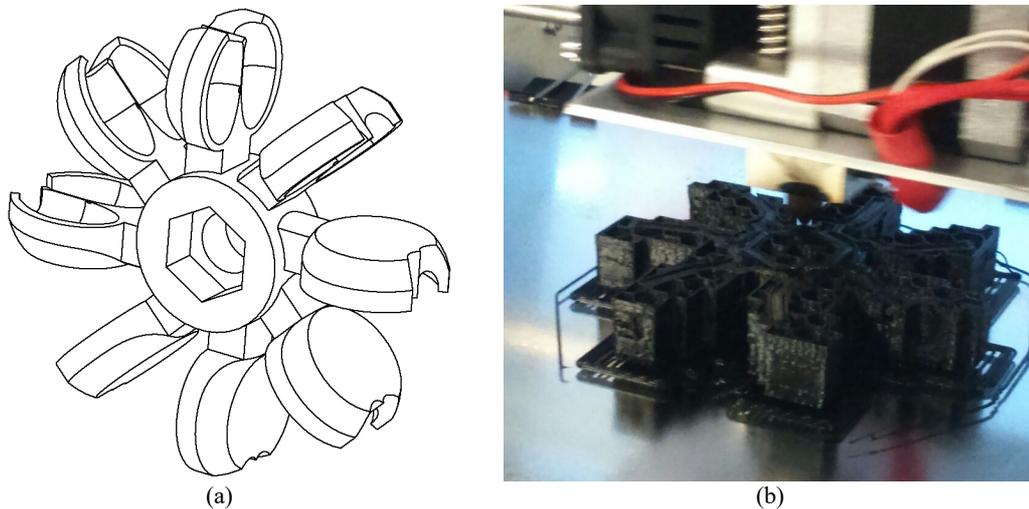


Figura 4. (a) Diseño de turbina Pelton en Autodesk Inventor. (b) Turbina impresa.

La Figura 5 muestra, a modo de ejemplo, los resultados de 2 de las 3 competiciones realizadas. En términos generales, la mayoría de grupos diseñó turbinas con rendimientos aceptables. Nótese que un rendimiento del 10-20% podría considerarse bajo. Este hecho se debe a que el valor de la eficiencia engloba la eficiencia de la turbina como conjunto de inyector y rodete, siendo el rendimiento del inyector proporcional a C_v^2 ($\approx 0,48^2$). Teniendo en cuenta la eficiencia del inyector, se alcanzan rendimientos de los diseños de turbinas de hasta el 86%.

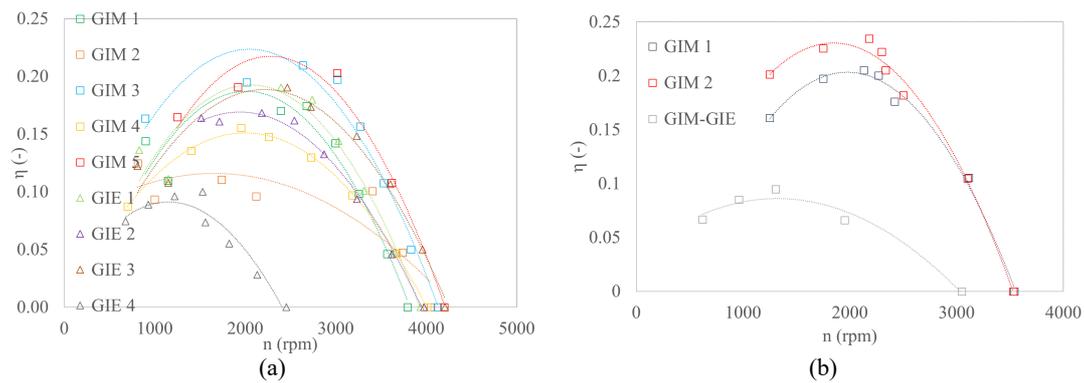


Figura 5. Resultados de las competiciones de diseño de turbinas Pelton. (a) Año 2017. (b) Año 2019.

El proceso de identificación de errores en el diseño también forma parte del proceso de aprendizaje. Por ejemplo, en el año 2017, el grupo GIE 4 (Grado en Ingeniería Eléctrica), diseñó unas cucharas semiesféricas. Esto hecho penaliza la operación ya que el chorro se defleca sobre el dorso de la siguiente cuchara, frenando la turbina. Otro ejemplo llamativo es el del grupo mixto GIM-GIE en el año 2019. Su diseño presentaba un número insuficiente de álabes por lo que se perdía el contacto entre chorro y cuchara en numerosas ocasiones, ocasionando el bajo valor de rendimiento mostrado.

La Tabla 1 muestra la comparativa de resultados entre las calificaciones de los estudiantes participantes en la actividad de innovación y el resto de estudiantes del mismo curso académico en el examen escrito de la convocatoria de febrero (nótese que es la convocatoria de examen inmediatamente posterior a cuando se planteaba la actividad). Para realizar una comparativa justa, se presentan parámetros estadísticos (media, μ , y desviación típica, σ) relativos a la calificación normalizada obtenida en el problema escrito de la parte de turbinas (no en todas las convocatorias de febrero ha aparecido un problema de Pelton en el examen), así como la calificación obtenida en la parte del examen. También se incluye la ratio de presentados sobre matriculados y el de aprobados frente a presentados para cada grupo. Dicha comparativa se realiza entre los distintos grupos de estudiantes analizados. Los resultados mostrados se corresponden con las tasas de la asignatura Sistemas Fluidomecánicos.

Tabla 1: Resultados estadísticos de las tasas de rendimiento en el examen de los distintos grupos de estudiantes considerados para los años 2017, 2018 y 2019.

Año	2017		2018		2019	
	Pelton	Resto	Pelton	Resto	Pelton	Resto
Tam. muestra	10	66	12	64	7	56
μ prob. turb.	5,25	4,30	4,50	2,11	4,98	2,17
σ prob. turb.	4,10	4,13	3,28	2,71	4,64	2,80
μ examen	5,13	4,78	4,83	3,40	5,33	3,13
σ examen.	1,35	2,15	1,36	2,40	3,38	1,84
% presentados	100	40,49	100	49,34	80	43,65
% aprobados	100	63,6	66,6	34,4	60	25

Se puede comprobar que, con independencia de la dificultad del examen, el resultado es siempre superior en el grupo de estudiantes que han participado en la acción de innovación (grupo Pelton). Esto se observa tanto en el examen en global como en la parte específica de turbinas en todos los cursos académicos. Esta diferencia ha evolucionado con los años en los rangos 22,22-129,02% en la parte de problemas de turbinas y 7,34-69,89% en el examen.

Las desviaciones típicas indican que la dispersión es, lógicamente, siempre mucho mayor si se analiza sólo un problema frente a si se analiza el resultado del examen. Esto se debe a que algunos estudiantes no completan todos los problemas en el tiempo del examen. Si se comparan las dispersiones entre los grupos analizados, se observa que en el grupo Pelton la desviación típica es menor. Conjuntamente con la mayor media, este indicador muestra que la preparación (adquisición de competencias) es mayor. Sólo en el caso de 2019, donde 2 de los 7 estudiantes evaluados después de participar en el concurso no resolvieron el problema de turbinas (no se trataba de una turbina Pelton) esta dispersión se hace mayor que si se compara con el resto de estudiantes.

Finalmente, dos de los datos más llamativos son las tasas de estudiantes presentados frente a matriculados y de aprobados del total presentado. Los estudiantes que se involucran en la actividad se presentan al examen en una proporción muy alta. Además, se puede apreciar como la tasa de aprobados siempre es mayor para el grupo Pelton. Con ello se consigue un doble beneficio: por un lado, se aumenta la tasa de estudiantes que se presentan al examen (tradicionalmente inferior al 50%) y por el otro, se aumenta el número de aprobados. Los datos de la Tabla 1 se representan en la Figura 6.

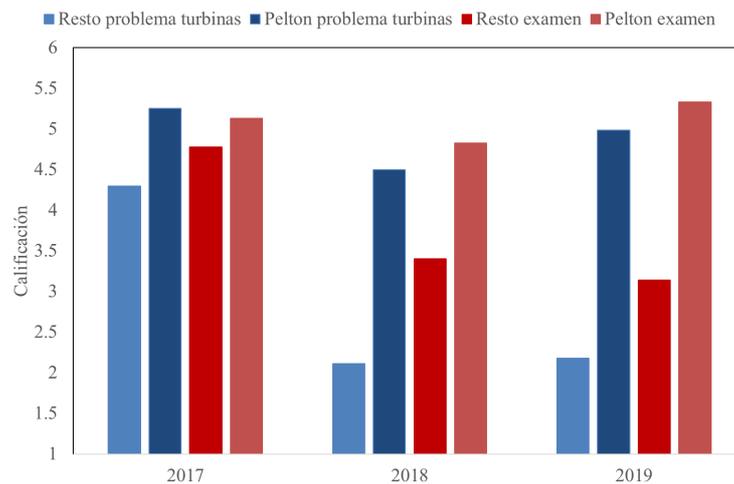


Figura 6. Resultados estadísticos de las tasas de rendimiento en el examen de los distintos grupos de estudiantes considerados para los años 2017, 2018 y 2019.

6. Conclusiones

En este artículo se ha presentado una experiencia docente basada en una metodología práctica basada en proyectos. El proyecto consiste en la construcción práctica de una turbina Pelton a escala para la generación de energía hidráulica. Los estudiantes diseñan y construyen sus propias turbinas usando tecnología de impresión 3D.

La baja tasa de éxito de los estudiantes en la adquisición de algunas competencias de la asignatura usando una metodología tradicional, constituyó la principal motivación de la presente actividad de innovación docente. Este hecho se ha visto refrendado en los resultados obtenidos. La hipótesis de partida fue que una acción de innovación basada en aprendizaje en

proyectos conjuntamente con unas prácticas de laboratorio “personalizables”, aumentaría el número de estudiantes que adquiriesen las competencias descritas en la guía docente de la asignatura.

Se ha observado que, esta aplicación en particular de una metodología basada en proyectos al aprendizaje, estimula el aprendizaje autónomo al plantear un reto real como es el diseño de un rodete real. Se han presentado los resultados de las eficiencias en el examen y en los problemas de examen de la parte de turbinas, entre estudiantes que participan y que no participan en la actividad. Los valores medios indican que los estudiantes que participan en la actividad obtienen un rendimiento superior a los que no en un 39,67% de media para los años observados. De esta forma se corrobora la hipótesis inicial.

Un dato significativo es la tasa de presentados de entre los estudiantes que participan en la actividad es del 93,33%. Este dato es muy superior al dato cosechado mediante la metodología tradicional (inferior al 50%). Además, la tasa de aprobados frente a presentados para este mismo grupo es muy superior a la del resto. De media, un 75,55% de los estudiantes que participan superan el examen frente al 41% en la metodología tradicional. Estos datos sugieren que la actividad se convierta en obligatoria para todos los estudiantes del curso en cursos académicos posteriores. Con ello, no sólo se aumentaría la tasa de estudiantes que se presentan al examen, sino que, además, de acuerdo a los datos, la tasa de aprobados sería superior.

Se reporta también un incremento en la independencia del estudiante en el proceso de enseñanza-aprendizaje lo que, les prepara mejor para su futuro profesional. Adicionalmente, se considera que los estudiantes han aumentado su capacidad para el trabajo en equipo. Los resultados sugieren que el método de evaluación, mediante competición directa entre los estudiantes (competitive learning), incrementa la motivación de los estudiantes y ayuda a incrementar el esfuerzo de estos para alcanzar los mejores resultados.

7. 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 INNOVA+UMH-INNOVA2015/13 (convocatorias INNOVA 2015) y PIEU-2016/15 (Programa de Innovación Educativa Universitaria PIEU-UMH 2016-17).

8. Referencias

- 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*.
- 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.
- F. 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)*.

Gil, P. (2017). "Short Project-Based Learning with MATLAB Applications to Support the Learning of Video-Image Processing". *J Sci Educ Technol* 26, 508–518. <https://doi.org/10.1007/s10956-017-9695-z>.

Hernández Krahe, J.M.. *Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas*, Servicio de publicaciones de la UNED, 2005. ISBN: 84-362-3201-1.

Kapici, H.O., Akcay, H. and de Jong, T. (2019). "Using Hands-On and Virtual Laboratories Alone or Together—Which Works Better for Acquiring Knowledge and Skills?". *J Sci Educ Technol* 28, 231–250. <https://doi.org/10.1007/s10956-018-9762-0>.

Las energías renovables en el sistema eléctrico español 2018. Red Eléctrica de España (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*, 149, 17-29.

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. y 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*.

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. and Erlich, I. (2012). "Educational experimental rig for Doubly-Fed Induction Generator based wind turbine". *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, San Diego, CA, 2012, 1-8.

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, 2013, 126-131.