

# Ejemplo de aplicación del concepto “Aprendizaje Basado en Proyectos” en estudios de Máster

Unai Hernandez-Jayo  
Facultad de Ingeniería  
Universidad de Deusto  
Bilbao, España  
unai.hernandez@deusto.es

J. Ignacio García  
Facultad de Ingeniería  
Universidad de Deusto  
Bilbao, España  
jigarcia@deusto.es

**Abstract**—En la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Deusto se sigue un modelo pedagógico en el que los contenidos prácticos son una pieza fundamental del proceso de aprendizaje. Es por esta razón por la que los alumnos pasan casi la mitad de sus horas docentes en el laboratorio. Sin embargo, sin una coordinación adecuada, los estudiantes pueden perder la conciencia del “para qué” de una asignatura, siendo su objetivo único el presentar la práctica. Para tratar de añadir un aliciente más y dar un sentido común a lo aprendido, en el Máster Universitario en Automatización, Electrónica y Control Industrial (MUAECI) todas las asignaturas están organizadas en pares, de modo que los alumnos trabajan en proyectos en los que las prácticas de ambas asignaturas están coordinadas y tienen un objetivo común. Así se trata de darles valor añadido mostrando el “por qué” y el “para qué” de lo aprendido en cada asignatura, así como la interdisciplinariedad de la ingeniería. Este artículo presenta uno de estos proyectos en los que se combinan las asignaturas de Control en tiempo real de dispositivos industriales y Sistemas electrónicos de potencia. (Abstract)

**Keywords**— *Electrónica de potencia, control en tiempo real, motor asíncrono, inversor de potencia*

## I. INTRODUCTION

La definición de la Declaración de Bolonia en el contexto de la enseñanza universitaria, ha contribuido a pasar de un modelo educativo universitario tradicional a un nuevo paradigma centrado en el modelo de aprendizaje y no tanto de la enseñanza en sí misma [1]. Así, el proceso de aprendizaje pone su foco principalmente en el estudiante, que es quien debe adoptar una posición activa de búsqueda de conocimientos, siendo el profesor un guía que facilita los medios necesarios para lograr los resultados de aprendizaje requeridos para cada tema.

En este contexto, tal y como se definió en los resultados del proyecto "*Tuning Educational Structures in Europe*" [2], es recomendable que la evaluación del aprendizaje no se base sólo en un examen final, sino que el profesor pueda realizar un seguimiento, tutorización y evaluación durante todo el proceso de aprendizaje desarrollado por el estudiante. De este modo, los resultados del aprendizaje pueden expresarse por medio de competencias, que representan una combinación de conocimientos, habilidades instrumentales, capacidades personales y capacidades sistémicas. La promoción de estas competencias es el objetivo de aprendizaje, tal y como lo establecen el Programa de Acreditación ABET [3] y los criterios de la Agencia Nacional de Evaluación de la Calidad

y Acreditación (ANECA) en España [4]. En este nuevo contexto, educativo los profesores buscan métodos de aprendizaje que permitan conocer y evaluar los resultados de los alumnos sin utilizar los métodos tradicionales basados únicamente en el examen final. Estas metodologías deben facilitar el alineamiento de competencias, métodos y sistemas de evaluación, para lo cual el profesor debe planificar todo el trabajo a llevar a cabo por los alumnos antes de iniciar la asignatura, especificando tanto las actividades como el modelo de evaluación que se llevarán a cabo durante todo el semestre [5].

En el ámbito de la ingeniería se añade la necesidad de proporcionar a los estudiantes un conjunto de competencias genéricas fuertemente ligadas a las habilidades a desarrollar en los laboratorios, por lo que es necesario integrar actividades prácticas en los cursos. Dentro de la electrónica, estas competencias se desarrollan mediante actividades tanto de software como de hardware, siendo en ambos casos prácticamente obligatorio que el estudiante manipule y sienta cómo responden los sistemas a las diferentes situaciones para poder comprender realmente su funcionamiento [6],[7].

En este escenario, este artículo plantea una metodología en la que los alumnos van sumando poco a poco conocimientos en cada una de las dos asignaturas contempladas. Así, la suma de actividades, tanto teóricas como prácticas, planteadas en cada asignatura de manera independiente, les proporciona una serie de conocimientos que deben posteriormente combinar en un proyecto final que es el sumatorio de experiencias de ambas asignaturas. Para ello, ambas asignaturas están basadas en un proceso de aprendizaje activo con una retroalimentación continua por parte del profesor y una combinación de clases teóricas en el aula con ejercicios prácticos en el laboratorio [8]. Por lo tanto, se trata de un método de aprendizaje activo [9], en el que el estudiante va conociendo las diferentes partes del proyecto final, teniendo que ser él finalmente capaz de unirlos para satisfacer los objetivos del proyecto conjunto planteado, siendo el laboratorio de electrónica de potencia y máquinas eléctricas en este caso, el lugar adecuado para ello [10].

El trabajo presentado en este artículo, muestra un ejemplo de aplicación real y práctico del modelo de aprendizaje basado en proyectos (o PBL por sus siglas en inglés - *Project Based Learning*), el cual se propone como un enfoque pedagógico que da a los estudiantes de ingeniería una oportunidad de aprender haciendo y aplicando su formación a problemas del mundo real [11]. Así, durante el proyecto propuesto a los

alumnos, éstos pueden alcanzar resultados de aprendizaje que les ayuden a desarrollar satisfactoriamente competencias específicas de las asignaturas Control en Tiempo Real de dispositivos industriales (CTR) y Sistemas Electrónicos de Potencia (SEP) impartidas en el MUAECI.

Este documento se estructura de la siguiente manera: la Sección II introduce el contexto, la Sección III la maqueta real sobre la que los alumnos testearán los resultados del PBL, mientras que la Sección IV desarrolla el plan de trabajo presentado a los alumnos. La Sección V introduce el sistema de evaluación empleado y, por último, la Sección VI presenta las conclusiones.

## II. ESCENARIO DE DESARROLLO DEL PBL

El Marco Pedagógico implantado en la Universidad de Deusto, recoge, entre otros aspectos, lo que se ha denominado el Modelo de Formación de la Universidad de Deusto (UD), más conocido como MFUD, el cual define una secuencia de aprendizaje basada en cinco etapas: Contexto Experiencial, Observación Reflexiva, Conceptualización, Experimentación Activa y Evaluación. El objetivo de este modelo es ayudar a los profesores a cambiar su metodología de enseñanza, a un paradigma centrado en el aprendizaje [12], tal y como se ha indicado en la introducción. Así, el papel del profesor en el nuevo modelo de aprendizaje autónomo y significativo, se concentran en ser organizador, facilitador, motivador, evaluador, coordinador y líder en el proceso de aprendizaje de los alumnos [13].

En la Facultad de Ingeniería, este modelo se aplica mediante una combinación de clases teóricas y actividades de laboratorio, siguiendo un proceso educativo de "aprender haciendo". De tal manera que, en todas las asignaturas del programa del MUAECI, los alumnos tienen que realizar actividades prácticas complementarias a las clases teóricas impartidas de manera magistral en el aula. Este carácter eminentemente práctico es necesario, ya que el MUAECI tiene como objetivo formar profesionales altamente capacitados para diseñar, desarrollar e implementar sistemas industriales automatizados que aporten valor añadido a los procesos del ámbito de la fabricación avanzada. Desde la implantación del Máster en el año 2015, las asignaturas se encuentran agrupadas de dos en dos, de modo que los profesores de ambas asignaturas han diseñado un PBL específico y adaptado a las competencias de las mismas. El objetivo, además de que los alumnos desarrollen estas competencias específicas y transversales, es ofrecer a los alumnos una visión global en donde comprendan y comprueben la necesidad de combinar el conocimiento de varias asignaturas para abordar proyectos multidisciplinares, tal y como ocurrirá con frecuencia durante su carrera profesional.

Los siguientes apartados ofrecen una visión particular de las dos asignaturas combinadas bajo el PBL que lleva por título "Diseño e implementación del control de un inversor trifásico que alimenta un motor de inducción".

### A. Control en tiempo real de dispositivos industriales

La asignatura Control en Tiempo Real de dispositivos industriales se encuadra en la materia de Electrónica Industrial que tiene por objetivo desarrollar aplicaciones informáticas tanto sobre ordenadores industriales, como autómatas u otros controles programables en escenarios industriales de fabricación avanzada que incorporen los mecanismos de

comunicación necesarios para llevar a cabo tareas que cooperan en tiempo real e interactúan con otros elementos.

El anterior objetivo es abordado por esta asignatura mediante el desarrollo de algoritmos destinados a la adquisición y acondicionamiento de señales eléctricas mediante sensores industriales y mediante el diseño e implementación de sistemas de control de potencia en tiempo real basados en Procesadores Digitales de Señal (DSP).

Para satisfacer este objetivo, los alumnos tienen que desarrollar las siguientes competencias, las cuales se encuentran diferenciadas entre genéricas y específicas:

- Competencia Genérica: Identificar, analizar y definir los elementos que constituyen un problema para resolverlo con criterio y de forma efectiva, proponiendo soluciones que puedan ser contrastadas en equipo y aplicadas en el ámbito de la automatización, electrónica y control industrial a partir de los datos obtenidos.
- Competencia Específica 1: Adquirir y acondicionar señales eléctricas mediante sensores industriales estándar.
- Competencia Específica 2: Diseñar e implementar sistemas de control de potencia en tiempo real basados en un DSP.

El marco teórico-práctico de la asignatura se encuentra dividido en un bloque teórico y en un bloque práctico de implementación. Durante el primero, los estudiantes adquieren los conocimientos básicos de los sistemas en tiempo real (qué son, para que se aplican, tipos, sistemas multitarea etc.), así como de la arquitectura del DSP de *Texas Instruments* TMS320F28335, el cual, al tener integrados los periféricos necesarios para el control de motores, se denomina *Digital Signal Controller* (DSC) que posteriormente usarán durante el bloque de implementación y durante el PBL. También durante esta primera parte teórica se les introduce los conocimientos necesarios para adquirir y acondicionar señales (filtrado, muestreo, *anti-aliasing*, etc.), así como se hace un repaso conceptual tanto de los fundamentos de la conversión electromecánica en un motor asíncrono, como del control escalar tensión/frecuencia (V/f) que posteriormente deben implementar durante el PBL.

En paralelo y alternando con las clases teóricas, durante el segundo bloque práctico de implementación, los estudiantes desarrollan una serie de prácticas tanto con *MatLab/Simulink*® como con el controlador DSC TMS320F28335. El planteamiento de actividades de este bloque responde al desarrollo de un proyecto real de estas características: previo a la implementación sobre una plataforma real, el ingeniero/a debe simular en un entorno controlado que los algoritmos desarrollados son válidos y las señales de control y monitorizadas responden a las especificaciones dadas.

### B. Sistemas electrónicos de potencia

La asignatura Sistemas Electrónicos de Potencia (SEP), que también forma parte de la materia Electrónica Industrial, está enfocada a sistemas de electrónica de potencia existentes en la industria, y pretende dotar al alumno de una amplia capacidad de comprensión y unos sólidos conocimientos básicos y de análisis que le permitan afrontar problemas de control y conversión de energía eléctrica más complejos en el futuro [14].

Alcanzados los objetivos de la asignatura, el estudiante manejará con soltura los conceptos relativos a la conversión electrónica de potencia, sabrá diferenciar y elegir los elementos más adecuados para una aplicación, estará familiarizado con sus valores característicos y su comportamiento en servicio y será capaz de integrarlos en sistemas electrónicos de potencia del ámbito industrial.

Los alumnos tienen que desarrollar las siguientes competencias específicas:

- Competencia Específica 1: Identificar y caracterizar los dispositivos electrónicos para el desarrollo de sistemas de control de electrónica de potencia.
- Competencia Específica 2: Modelizar y simular sistemas industriales de control de potencia avanzados.

La competencia genérica a desarrollar es la misma que la de CTR lo cual favorece la coordinación entre asignaturas estableciendo una metodología enseñanza-aprendizaje común.

Las clases en aula, junto con el trabajo personal de estudio del alumno, constituyen la fase de conceptualización. El profesor complementa el contenido de los apuntes con explicaciones acerca de las características y funcionamiento de los sistemas reales de electrónica de potencia (semiconductores, elementos pasivos, sensores, *drivers* y electrónica de control), su comportamiento en servicio (conmutación, cálculos de pérdidas, análisis térmico, etc.), parámetros de rendimiento, su reacción sobre la red de alimentación en términos de calidad de onda y las técnicas para analizar y diseñar dichos circuitos. El contenido teórico se centra en circuitos de potencia conmutados, desde las topologías asociadas a la conversión de continua (*Buck-Boost*) hasta el inversor trifásico DC-AC, convertidor principal del PBL a desarrollar.

Durante la exposición oral de los temas en el aula, se intercala el planteamiento de ejercicios prácticos, guiados por el profesor. Se plantean y resuelven ejercicios numéricos de aplicación con la recomendación de bibliografía especializada que aborde problemas acordes con los conocimientos y métodos aprendidos.

Las clases prácticas y el trabajo fuera de su horario lectivo en el que el laboratorio está a su disposición, son los medios de realización de las fases de observación reflexiva y experimentación activa. Se plantea como guion de las prácticas la modelización de los circuitos electrónicos de potencia analizados en las sesiones teóricas. Para ello se emplea la herramienta de modelización de sistemas dinámicos *MatLab/Simulink*<sup>®</sup>. Cada práctica implica la modelización y simulación de un sistema real de electrónica de potencia conmutado (modulación por anchura de pulso escalar y vectorial) y la realización y entrega de un informe técnico que recoja el modelo diseñado, el conjunto de simulaciones realizadas y sus resultados validados con experimentación con equipos reales en el laboratorio.

Por tanto, la metodología utilizada consiste en presentar los contenidos teóricos mediante clases expositivas, reforzar los aspectos prácticos mediante clases en el laboratorio y permitir que los estudiantes experimenten por sí mismos estos

contenidos en el desarrollo de diversos ejercicios prácticos y un proyecto.

### III. DESCRIPCIÓN DE LA MAQUETA HVMOTORCTRLT

El PBL diseñado está basado en el kit de Control Digital de Motores de Alto Voltaje (DMC) y Corrección del Factor de Potencia (PFC) proporcionado por *Texas Instruments* bajo la referencia HVMotorCtrlt v1.7/v2.0. Esta maqueta proporciona una base sobre la que los estudiantes pueden aprender y experimentar técnicas de control digital de motores de alto voltaje.



Fig. 1 Maqueta hardware del KIT de desarrollo HVMotorCtrlt v1.7/v2.0 de Texas Instruments

Las características principales de la maqueta, desde el punto de vista hardware son:

- Etapa inversora trifásica (IPM) para el control de motores de alto voltaje.
- 350V<sub>CC</sub> máximo voltaje de entrada y 1kW/1,5kW de carga máxima.
- Entradas QEP y CAP disponibles para la medición de velocidad y posición.
- Preparado para la medición de alta precisión de corriente mediante conversores analógico-digitales, amplificadores operacionales de alta velocidad y uso de voltaje de referencia de alta precisión 3 v 2.0.
- La etapa de corrección del factor de potencia (PFC) con capacidad para 750W, puede utilizarse para aumentar la eficiencia mediante regulación de corriente de CA de entrada y tensión CC del bus del inversor.
- Topología de dos fases intercaladas, 85-132V<sub>AC</sub> / 170-250V<sub>AC</sub> con 400V<sub>CC</sub> de máximo voltaje de salida.
- 750W de potencia máxima con hasta un 96% de eficiencia.
- Frecuencia de conmutación máxima de 200 kHz para la etapa de potencia.

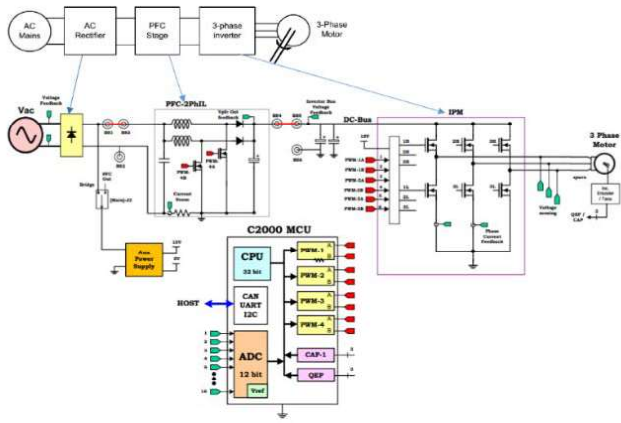


Fig. 2 Esquema electrónico y diagrama de bloques del KIT TMDSHVMTRPFCKIT

IV. PLANTEAMIENTO DEL PBL

Siguiendo las recomendaciones de Hernández-Leo et. al [5] antes de iniciar el desarrollo del PBL con los alumnos, se debe hacer un análisis de los resultados esperados desde el punto de vista educativo, los cuales, para este caso en concreto, se definen en la Tabla I a través de los resultados de aprendizaje esperados para cada una de las competencias específicas que se trabajan en el PBL (las genéricas de ambas asignaturas se evalúan mediante otras actividades complementarias en cada una de ellas).

Esta visión general se les ofrece a los alumnos durante una sesión conjunta en la que ambos profesores de las asignaturas implicadas (los autores del artículo), presentan el PBL y enuncian su objetivo principal, el cual es modelizar y simular el accionamiento eléctrico de un motor de inducción mediante inversor trifásico.

TABLA I. COMPETENCIAS Y RESULTADOS DE APRENDIZAJE ESPERADOS

Asignatura	Competencia Específica	Conceptos trabajados en el PBL	Resultados de Aprendizaje (RA)
Control en tiempo real de dispositivos industriales (5ECTS)	Adquirir y acondicionar señales eléctricas mediante sensores industriales estándar	Adquisición, muestreo y acondicionamiento de señales de tensión e intensidad	RA1: Comprende los mecanismos necesarios para adquirir y caracterizar señales eléctricas empleadas para el control de máquinas eléctricas
	Diseñar e implementar sistemas de control de potencia en tiempo real basados en DSP	Desarrollo de un control V/f para el motor asíncrono en base a una consigna de velocidad dada	RA2 Diseña e implementa bajo un entorno controlado de simulación el control V/f de un motor asíncrono
			RA3 Identifica los parámetros de control necesarios para ejercer el control en tiempo real sobre un motor síncrono
Sistemas electrónicos de potencia (5ECTS)	Identificar y caracterizar los dispositivos electrónicos para el desarrollo de sistemas de control de electrónica de potencia	Cálculo, caracterización y selección de dispositivos de potencia, topologías de convertidor conmutado y tipos de modulación por anchura de pulso (PWM)	RA1: Identifica los parámetros de control necesarios para implementar el control de un convertidor de potencia DC-AC de 2 niveles basado en transistores IGBT
			RA2: Mide, analiza y distingue las señales de modulación asociadas a la conmutación de los dispositivos de potencia
	Modelizar y simular sistemas industriales de control de potencia avanzados	Desarrollo del modelo conmutado de un convertidor DC-AC con modulación PWM escalar e inyección de tercer armónico	RA3: Diseña e implementa bajo un entorno controlado de simulación la operación de un inversor trifásico
			RA4: Diseña e implementa bajo un entorno controlado de simulación el control V/f de un motor asíncrono empleando diferentes técnicas de modulación de convertidores
			RA5: Mide y analiza las capturas de señales realizadas sobre la maqueta real validando el modelo discreto desarrollado
		Desarrollo de un modelo de control discreto de un inversor trifásico que alimenta un motor de inducción	

Para lograr ese objetivo principal, los profesores especifican los siguientes pasos a seguir:

1. Implementar, en bloques *Simulink*<sup>®</sup>, el control discreto tensión-frecuencia sin realimentación de velocidad con un tiempo de control impuesto por la biblioteca de enlace dinámico (DLL) generada en la asignatura CTR.
2. Implementar la inyección de tercer armónico en la modulación senoidal.
3. Implementar un sistema de medidas de intensidades, tensiones y potencias.
4. Validar el control mediante bloques comparando resultados con la experimentación real.

Siendo este el planteamiento, los objetivos operativos que se les plantea conseguir a los alumnos en la parte del PBL correspondiente a la asignatura de CTR, a través de los cuales se desarrollan los resultados de aprendizaje descritos en la Tabla I, se detallan a continuación:

1. Partiendo del modelo *Simulink*<sup>®</sup> para el control de un inversor trifásico, desarrollado en la asignatura SEP, los alumnos deben:

- Implementar el bloque de control del inversor en lenguaje C, diseñando una *S-Function* de forma que la mayor parte del código sea portable a la plataforma DSP (RA2).
- Llevar la rutina de control validada al modelo de inversor trifásico desarrollado en la asignatura SEP y comprobar su funcionamiento (RA2).
- Validar el control mediante *S-Function* comparando resultados con el control mediante bloques que se realizan en la asignatura de SEP (RA4).

2. Una vez realizado el modelo en *Simulink*<sup>®</sup>, y comprobado su funcionamiento, los estudiantes tienen que implementar el control de dicho modelo dentro del DSP TI - F28335 que maneja un inversor real, siguiendo los siguientes pasos:

- Desarrollar las configuraciones necesarias sobre el DSP para llevar a cabo la correcta toma de medidas de tensión y corrientes a controlar sobre el motor asíncrono (RA1).
- Realizar la configuración del DSP, preparando el sistema para disponer de todos los elementos necesarios para ejecutar el mismo código validado en Matlab (RA2).
- Implementar el bloque de control en el DSP, el cual debe ser el mismo que el usado en la *S-Function* (RA3).
- Comprobar la correcta generación de consignas mediante la placa de experimentación y un osciloscopio (RA1).
- Hacer girar el motor de inducción mediante diferentes consignas de velocidad introducidas por el usuario en el entorno de desarrollo (CCS) y comprobar su velocidad real mediante la lectura del *encoder* de velocidad integrado en el eje del motor (RA4).

3. Finalmente, junto con la demostración del control realizado sobre la maqueta real del motor, los alumnos deben entregar un informe que recoge todos los pasos, medidas y desarrollos realizados.

De manera paralela y complementaria, se desarrolla la parte del PBL correspondiente a la asignatura SEP con un proyecto que se divide en dos fases. En una se trabaja el control de un inversor trifásico con modulación senoidal y con posibilidad de inyectar tercer armónico, y en otra, el control tensión-frecuencia de un motor de inducción con variantes opcionales relacionadas con la técnica de modulación empleada (escalar o vectorial) y la posibilidad de control realimentado de velocidad.

Las dos fases del proyecto, y sus tareas asociadas detalladas a continuación, están diseñadas para asegurar la consecución de los resultados de aprendizaje mostrados en la Tabla I.

1. En la primera fase se implementa bajo simulación el control de un convertidor DC-AC trifásico de 2 niveles basado en transistores IGBT. Los alumnos deben cubrir varias etapas:

- Definir y parametrizar los elementos que componen el sistema de potencia para una aplicación con receptor trifásico pasivo (RA1).
- Analizar e implementar, en un modelo basado en bloques, la modulación PWM escalar senoidal, seleccionando varios índices de modulación representativos que aseguren el funcionamiento del convertidor de potencia en las zonas lineal, saturada y onda cuadrada (RA2).
- Desarrollar el modelo conmutado de un convertidor DC-AC con modulación PWM escalar y posibilidad de inyección de tercer armónico, validando el funcionamiento del modelo con las tablas de distorsión armónica analizadas en las sesiones teóricas y disponibles en la documentación de referencia de la asignatura (RA3).
- Al finalizar la primera fase del proyecto, los alumnos presentan su trabajo al profesor entregando los modelos y los resultados comentados en un informe técnico donde se muestren las principales aportaciones realizadas al modelo y donde el análisis de resultados estará basado exclusivamente en resultados de simulación.

2. En la segunda fase se implementa bajo simulación el control V/f de un motor asíncrono empleando diferentes técnicas de modulación de convertidores. Los pasos seguidos por los alumnos son los siguientes:

- Definir y parametrizar los elementos que componen el sistema de potencia para una aplicación de control de velocidad de un motor asíncrono trifásico (RA1).
- Analizar e implementar, en un modelo basado en bloques, las modulaciones PWM escalar senoidal (SPWM), y opcionalmente la vectorial (SVPWM), con índices de modulación representativos que aseguren el funcionamiento del convertidor de potencia en las zonas lineales (RA2).

- Implementar en bloques el modelo del accionamiento eléctrico sin realimentación de velocidad o con control de velocidad en lazo cerrado mediante regulador PI discreto. Para ello, digitalizar todos los procesos y algoritmos de control como paso previo a la experimentación con la maqueta real. El bloque de control presenta las mismas entradas y salidas que la *S-Function* diseñada en la asignatura CTR. De esta manera son fácilmente intercambiables, e incluso, pueden formar parte del mismo modelo para realizar comparativas de funcionamiento. El tiempo de control viene impuesto por la rutina de control validada en el diseño de la *S-Function*. La simulación del modelo de sistema discreto debe confirmar que no hay errores en el proceso de digitalización (RA4).
- Desarrollar el modelo conmutado de un convertidor DC-AC con modulación PWM escalar/vectorial validando el funcionamiento del modelo con las capturas de señales realizadas sobre la maqueta real (RA5).
- Al finalizar la segunda fase del proyecto, los alumnos presentarán el proyecto completo entregando los modelos finales y los resultados comentados en un informe técnico que variará en extensión en función de la técnica de modulación y el tipo de control implementado. En este caso, el análisis de resultados estará basado en la comparativa de resultados con la experimentación con la maqueta real y con el modelo que incluye el bloque de control *S-Function* desarrollado en la asignatura CTR.

A modo de ejemplo, la Fig. 3 muestra la integración de ambas partes del PBL en el entorno de simulación. En el modelo implementado en bloques destaca el doble sistema de control diseñado en las dos asignaturas: en SEP, denominado “controlador PI discreto (V/f), y en CTR, denominado

“controlador S-FUNCTION (V/f). Ambos bloques comparten entradas y salidas, para facilitar su intercambio, y un tiempo de control de 200  $\mu$ s que viene impuesto por la rutina de control validada en el diseño de la *S-Function*. También es destacable el doble bloque de generación de disparos con técnicas de modulación por anchura de pulsos, diseñados ambos en SEP, para facilitar la aplicación de la modulación escalar (SPWM) o vectorial (SVPWM).

En la Fig. 4 se muestra un ejemplo de la validación del control de velocidad desarrollado en cada asignatura con los resultados de experimentación con el inversor real. Se trata de los consumos de corriente en dos fases del motor para una consigna de funcionamiento de 600 r.p.m. El detalle de los máximos de corriente por fase confirma la precisión de los modelos de simulación.

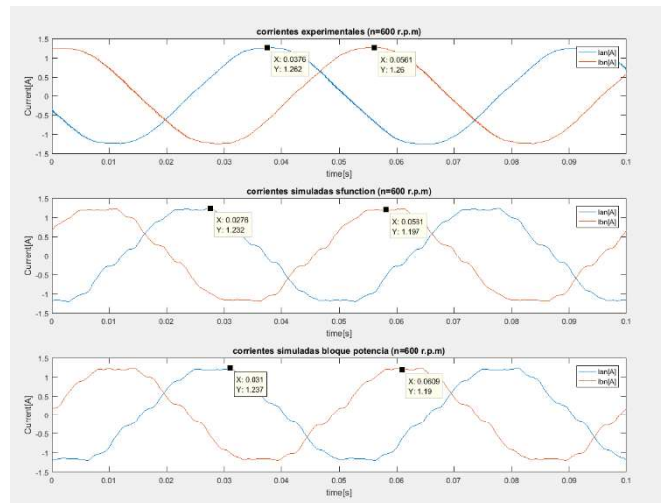


Fig. 4 Ejemplo de validación de resultados para los controles implementados en el PBL

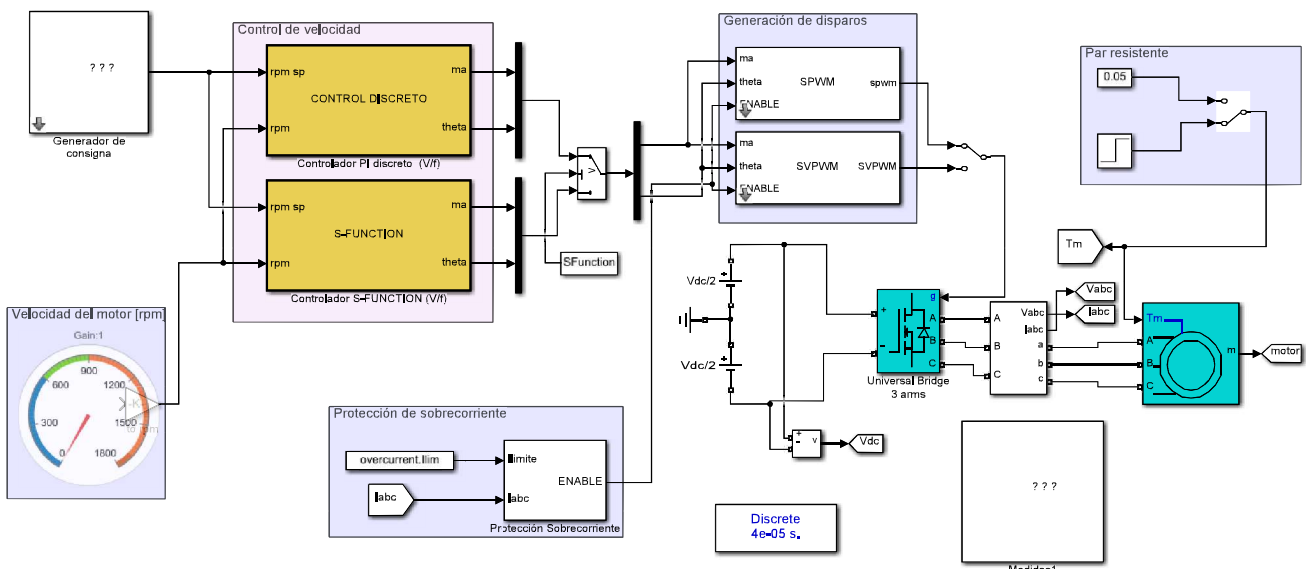


Fig. 3 Integración en el modelo de simulación de los bloques de control diseñados en el PBL.



## V. SISTEMA DE EVALUACIÓN EMPLEADO

Si bien el PBL se plantea como un trabajo en grupos de 3 o 4 alumnos, el sistema de evaluación tiene en cuenta la necesidad de otorgar una nota a cada uno de ellos en cada una de las dos asignaturas en las que se enmarca el proyecto. Así, y con el objetivo de que los alumnos tengan claro el sistema de evaluación, cada profesor muestra a los alumnos cómo se evaluará su asignatura en el marco global del PBL propuesto.

El sistema de evaluación de la asignatura SEP contempla que los resultados obtenidos en el proyecto representan el 40% de la calificación final de la asignatura. Se plantea de la siguiente manera:

- a) Cumplimiento de los objetivos fijados en las dos fases principales del proyecto basadas en modelización, simulación y validación de un inversor DC-AC trifásico (50%). Los alumnos deberán realizar dos presentaciones del trabajo desarrollado al profesor que permitirán evaluar los resultados de aprendizaje presentados en la Tabla I. Se valorará la organización de los contenidos de la presentación, la claridad en las respuestas a las cuestiones y comentarios del profesor y, teniendo en cuenta el grado de cumplimiento de los objetivos propuestos, se realizará una valoración técnica del trabajo realizado.
  - Presentación de la primera fase del PBL (10%). Deberán mostrar el modelo conmutado de un convertidor DC-AC con modulación PWM escalar y posibilidad de inyección de tercer armónico. Permite la evaluación de los resultados de aprendizaje RA2 y RA3.
  - Presentación de la segunda fase del PBL (30%). Deberán mostrar el modelo conmutado de un inversor DC-AC que alimenta un motor de inducción con un control V/f sin captación de velocidad. Permite la evaluación de RA4 y RA5.
  - La correcta definición y parametrización de los elementos que componen los sistemas de potencia desarrollados en ambas fases, en base a las especificaciones fijadas para el proyecto, permitirá evaluar RA1 (10%).
- b) Documentación de las fases del proyecto con los resultados comentados. Serán dos informes con un 20% en el peso final de la nota del PBL. Se valorarán aspectos como la claridad de redacción, la estructura del informe (objetivo, alternativas, resultados, conclusiones), la calidad de los resultados de simulación presentados y las conclusiones obtenidas.
  - Informe técnico de la primera fase del PBL (10%). Basándose exclusivamente en resultados de simulación, incluirá las principales aportaciones realizadas al modelo. Permite la evaluación de RA2 y RA3.
  - Informe técnico de la segunda fase del PBL (10%). Estará basado en la comparativa de resultados con la experimentación con la maqueta real y con el modelo que incluye el bloque de control *S-Function* desarrollado en la asignatura CTR. La nota es compartida con el informe de la asignatura CTR y permite evaluar RA4 y RA5.

- c) Desarrollo, presentación y documentación de opciones adicionales (30%). Como ampliación de la segunda fase del PBL se plantean opciones avanzadas de control de velocidad del motor de inducción, en lazo cerrado mediante regulador PI discreto, y variantes de técnicas de modulación, con especial énfasis en la opción vectorial. Se valorarán especialmente las aportaciones realizadas en la fase opcional que no estén recogidas explícitamente en las especificaciones del proyecto. El desarrollo de las partes opcionales del PBL afianza la obtención de los resultados de aprendizaje RA4 y RA5 y, por tanto, permite complementar su evaluación.

Respecto a la asignatura CTR, el sistema de evaluación empleado para calificar el trabajo de los estudiantes en el PBL, con un peso del 50% en la nota final de la asignatura, es el siguiente:

- a) Cumplimiento de los objetivos: 50% de la calificación del proyecto. Se comprobará que el programa simulado sobre la *S-Function* y que se descarga y ejecuta posteriormente en el DSC, realiza lo que las especificaciones del proyecto indican que debe hacer, es decir cumple los requerimientos mínimos de ejecutar el control V/f sobre el motor, haciéndolo girar la velocidad de consigna definida desde consola por un usuario. De este modo, se evalúa el RA1 de la asignatura.
- b) Informes de descripción del trabajo realizado (15% de la calificación del proyecto):
  - Informe de validación de la rutina de control (10%). Informe completo que debe recoger: la comparación de los resultados obtenidos en simulación mediante control por bloques en tiempo discreto en *Simulink*<sup>®</sup>, control por *S-Function* y resultados reales medidos con osciloscopio sobre la maqueta real. Cuantificación de los errores, origen de las diferencias. Nota compartida con el informe de la asignatura SEP. Se evalúan los resultados de aprendizaje RA1 y RA4
  - Código implementado sobre el DSC (5% de la nota). Se valora el estilo del código fuente: legibilidad y comprensión. Calidad de los comentarios internos del programa, del uso de ficheros de cabecera .h, funciones bien comentadas, estructuras ordenadas, etc. Este concepto evalúa el resultado de aprendizaje RA3.
- c) Implementación de opciones adicionales (15% de la calificación del proyecto). Estas implementaciones son partes opcionales que se ofrecen a los alumnos como posibilidades para obtener más nota y realizar un proyecto más completo, como puede ser la ejecución de un control PID en base a la lectura de la velocidad real del motor. También se valorarán las mejoras personales que el equipo de programación haya incluido por su propia iniciativa, aunque no estén en las especificaciones del proyecto.
- d) Test individual (20%): tras la presentación del proyecto por grupos, se responderá a un test acerca del proyecto entregado de forma individual. En este test se evalúan los 4 resultados de aprendizaje contemplados para la asignatura en el Tabla 1.

## VI. CONCLUSIONES

El artículo aquí presentado muestra el trabajo realizado por los profesores de las asignaturas Control en tiempo real de dispositivos industriales y Sistemas electrónicos de potencia para definir los objetivos de aprendizaje, etapas de desarrollo y sistema de evaluación, que permiten a los alumnos del MUAECI llevar a cabo un PBL compartido en ambas asignaturas.

Este trabajo nace de la necesidad de ofrecer a los alumnos unos objetivos lo más cercanos y similares a los que se van a enfrentar en su vida profesional y en donde deben desarrollar competencias y combinar conocimiento de diferentes asignaturas de manera coordinada.

Si bien los autores no realizan un cuestionario para recoger las impresiones de los estudiantes sobre el planteamiento del PBL, las encuestas globales del máster si revelan que el planteamiento de un máster basado casi íntegramente en un sistema de aprendizaje basado en PBLs combinados entre varias asignaturas, es bien acogido y valorado por los alumnos. Entre las impresiones recogidas, cabe destacar la nota positiva que otorgan a la coordinación entre asignaturas, lo que es mandatorio en el planteamiento de PBLs para su correcto desarrollo. Queda como trabajo futuro el realizar ese análisis de satisfacción del PBL aquí propuesto.

## AGRADECIMIENTOS

El desarrollo de este trabajo ha sido posible gracias a la financiación del proyecto IoTrain (RTI2018-095499-B-C33) por parte del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades.

## REFERENCIAS

- [1] González, J. and Wagenaar, R. (2003), "Quality and European Programme Design in Higher Education". *European Journal of Education*, 38, pp. 241–251.
- [2] González, J. and Wagenaar, R. "Tuning Educational Structures in Europe. Final Report-Phase One", University of Deusto and University of Groningen, 2003
- [3] Accreditation Board for Engineering and Technology, Baltimore, MD, USA, "Engineering criteria 2000," 2011.
- [4] Libro Blanco, Título de Ingeniero en electrónica y automática. Agencia Nacional de Evaluación de la Calidad y Acreditación. Abril 2004
- [5] Hernandez-Leo, D.; Oliver, V.M.; Doderio, J.M.; Pardo, A.; Romero-Tertero, M.; Dimitriadis, Y.; Asensio-Perez, J.I., "Applying Recommendations to Align Competences, Methodology, and Assessment in Telematics, Computing, and Electronic Engineering Courses", *IEEE Revista Iberoamericana de Tecnologías del Aprendizaje*, vol.8, no.1, pp.15,22, Feb. 2013
- [6] Chien-Chou Shih; Lain-Jinn Hwang, "Learning Embedded Software Design in an Open 3A Multiuser Laboratory," *IEEE Trans. Educ.*, vol.54, no.2, pp.279,285, May 2011
- [7] Gustavsson, I.; Nilsson, K.; Zackrisson, J.; Garcia-Zubia, J.; Hernandez-Jayo, U.; Nafalski, A.; Nedic, Z.; Gol, O.; Machotka, J.; Pettersson, M.I.; Lago, T.; Hkansson, L., "On Objectives of Instructional Laboratories, Individual Assessment, and Use of Collaborative Remote Laboratories," *IEEE Trans. Learning. Tech.*, vol.2, no.4, pp.263,274, Oct.-Dec. 2009
- [8] S.A. Ambrose et al., "How Learning Works: Seven Research Based Principles for Smart Teaching," Jossey-Bass/Wiley, 2010
- [9] M. Prince, "Does Active Learning Work? A Review of the Research," *J.Eng. Educ.*, vol. 93, no. 3, pp. 223-232, 2004.
- [10] J. Flores-Arias, A. Moreno-Munoz, F. J. Bellido and M. Linan, "Active learning in power electronics: From classroom to laboratory," *IEEE EDUCON 2010 Conference*, Madrid, 2010, pp. 1451-1454.
- [11] P. A. Sanger and J. Ziyatdinova, "Project based learning: Real world experiential projects creating the 21st century engineer," 2014 International Conference on Interactive Collaborative Learning (ICL), Dubai, 2014, pp. 541-544
- [12] M.J. Bezanilla, "Teaching and learning with ALUD: a course management system that incorporates a pedagogical model", in *Proc. International Conference on Education and New Learning Technologies*, pp. 675-686, 2009
- [13] El modelo de Formación de la Universidad de Deusto (MFUD), Unidad de Innovación Docente, Unidad de Innovación Docente. Universidad de Deusto. 2016
- [14] Rashid, M.H. *Power Electronics: Circuits, Devices & Applications*, 4/E, Pearson Prentice Hall, 2014