

Adaptación de un Banco de Ensayos de un Motor de Ignición por Compresión mediante Trabajos Fin de Grado y Proyectos Fin de Carrera

Raquel Fernández-Ramos¹; Francisco J. Martos-Ramos²; Jose A. Hidalgo-López¹; Francisco J. Rios-Gómez¹; Jose F. Martín-Canales¹; Manuel J. Martín-Vázquez¹; Jorge Romero-Sánchez¹

¹Departamento de Electrónica. Universidad de Málaga, 29071, Málaga, España.

²Departamento de Ingeniería Mecánica, Térmica y de Fluidos. Universidad de Málaga, 29071, Málaga, España
ramos@uma.es;fjmartos@uma.es;jahidalgo@uma.es;fjrrios@uma.es;jfmartin@uma.es;martinv@ctima.uma.es;jromeros@uma.es

Resumen— La colaboración entre diferentes áreas de conocimiento en la realización de los proyectos fin de grado enriquece la formación de los alumnos. En esta comunicación se presenta la experiencia de cooperación entre las áreas de Máquinas y Motores Térmicos y de Electrónica para la realización de Trabajos Fin de Grado (TFG) y Proyectos Fin de Carrera (PFC) encaminados hacia la obtención de los títulos de Grado en Electrónica, Robótica y Mecatrónica y Grado en Ingeniería Mecánica. Todos los trabajos se orientaron hacia la adaptación de un banco de ensayos de un motor de ignición por compresión, tanto en su parte mecánica y energética como electrónica.

Palabras clave— *Motor de Ignición por Compresión; Banco de Ensayo; FPGA; Instrumentación Electrónica Virtual.*

I. INTRODUCCIÓN

Los TFG forman parte como materia o asignatura obligatoria del plan de estudios de los títulos oficiales de Graduado. Deben estar orientados a la adquisición de las competencias generales definidas en la titulación y, en su caso, a aquellas otras recogidas en la ficha descriptiva de la Memoria de Verificación del título [1] [2].

Estos trabajos consisten en un trabajo autónomo e individual que cada estudiante realiza bajo la orientación de un tutor, quien actuará como dinamizador y facilitador del proceso de aprendizaje.

Un TFG podría definirse como la realización de un proyecto, en el que se integren y desarrollen los contenidos recibidos, capacidades, competencias y habilidades adquiridas durante el periodo de docencia del grado.

Por otro lado, gran parte de las asignaturas de electrónica en los últimos cursos de las titulaciones que se imparten en la Escuela de Ingenierías Industriales de la Universidad de Málaga tienen un alto contenido práctico que se realiza en laboratorios. Sin embargo, a pesar del elevado número de prácticas que hace el alumno, éste se queja de la falta de conexión de estas prácticas con los sistemas con los que va a trabajar en su futuro profesional. Esto nos ha llevado a una cooperación entre áreas de conocimiento a través de la

realización de TFG conjuntos sobre una plataforma real y haciendo uso de herramientas que los alumnos emplean en las prácticas de electrónica y que son las mismas que muchos de ellos usarán en su futuro entorno de trabajo.

Todos los trabajos realizados y propuestos están orientados hacia la adaptación de un banco de ensayos de un motor de ignición por compresión en sus diferentes aspectos: mecánicos, energéticos y electrónicos. Siempre con el objetivo último de poder ser usado en prácticas de las asignaturas que imparten ambas áreas en las distintas titulaciones y que permitirán integrar haciendo uso de un sistema real los conocimientos adquiridos en sus estudios.

Para presentar la experiencia que se está llevando a cabo, este artículo se organiza de la siguiente manera: en primer lugar, en la Sección II, se justifica la motivación y los objetivos de la propuesta. En la Sección III, se presentan el contexto en el cual se ha desarrollado la experiencia. En la Sección IV se presenta el resultado de los trabajos que se han desarrollado, destacando dos de ellos que se describen con más detalle. Finalmente, en la Sección V se resumen las conclusiones y discusiones del trabajo realizado hasta la fecha.

II. MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS

A. Motivación

Uno de los principales retos en la enseñanza es conseguir la motivación de los alumnos. En las asignaturas de Instrumentación Electrónica y Control e Instrumentación y Acondicionamiento de Señal, entre otras, se ha venido observando que los alumnos perciben una desconexión entre los sistemas que utilizan en las prácticas de laboratorio y los reales.

Por otro lado, en el área de Máquinas y Motores Térmicos se disponía de una bancada recientemente adquirida de un motor de ignición por compresión con un freno de polvo magnético utilizados para hacer medidas de régimen y par motor, ver Fig. 1. Todo ello con un sistema de control obsoleto y manual.

Se pensó que, si se automatizaba y sensorizaba la bancada, haciendo uso de sistemas electrónicos, se podría sacar mucho partido de ella en asignaturas de instrumentación en forma de prácticas. Al analizar las tareas a realizar, se llegó a la conclusión que muchas de ellas podrían ser realizadas por los propios alumnos con la supervisión de profesores de las áreas de Electrónica y Maquinas y Motores Térmicos. Un marco ideal para realizar esta tarea son los TFG.

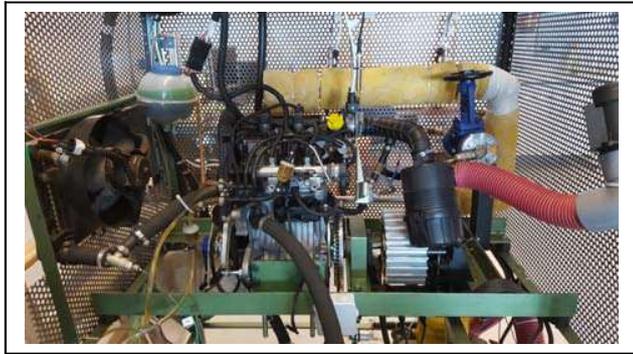


Fig. 1. Motor de Ignición por Compresión.

B. Objetivos

El principal objetivo consiste en desarrollar e implementar un sistema electrónico para la Supervisión y Control de un Banco de Ensayos de un Motor de Ignición por Compresión haciendo uso de los más avanzados dispositivos de lógica programable y reconfigurable mediante FPGAs (*Field Programmable Gate Array*) y orientado a la realización de Trabajos de Fin de Grado/Máster y a prácticas conjuntas entre las áreas de Máquinas y Motores Térmicos y de Electrónica.

Con cada sección del proyecto realizado, el alumno implicado ha obtenido el título correspondiente a los estudios cursados y el resultado se revierte en la realización de prácticas por parte de otros alumnos de últimos cursos en otras titulaciones para que, por un lado, complementen en el laboratorio los conocimientos impartidos en las asignaturas correspondientes y, por otro lado, se fomente el trabajo en equipo.

Al ser trabajos y prácticas multidisciplinares, con alumnos provenientes de distintos grados y con diferentes conocimientos (Máquinas y Motores, Mecánica y Electrónica), el intercambio de conocimiento está garantizado, ya que los TFG y prácticas se realizan en el laboratorio físicamente. Esta forma de trabajar de manera multidisciplinar es común en la industria, por ejemplo, en el sector de la automoción en donde la mecánica y la electrónica van de la mano. De hecho, el uso de sistemas electrónicos embebidos y de lógica reconfigurable forman parte de las campañas de publicidad de los coches anunciados por los medios de comunicación.

Como se ha comentado, el sistema final se utilizará en prácticas, por lo que mientras sea posible, las herramientas empleadas deben ser las mismas que aquellas que usan los alumnos en las prácticas.

III. CONTEXTO

Este trabajo se enmarca dentro de las titulaciones que se imparten en la Escuela de Ingenierías Industriales de la Universidad de Málaga. En concreto en las titulaciones donde imparten docencia las áreas de Máquinas y Motores Térmicos y de Electrónica. En la actualidad, se está realizando esta experiencia en el marco de 2 PIEs (Proyectos de Innovación Educativa), financiados por la propia universidad, en el que participan ambas áreas. El primero fue el PIE15-123 cuyo título es ‘Desarrollo e Implementación de un Sistema SCADA para la Supervisión y Control de un Banco de Ensayos de un Motor Diésel’. Al que continúa el PIE17-049 titulado ‘Adaptación de un Banco de Ensayos de un Motor Diésel mediante Trabajos Fin de Grado y Máster para la realización de prácticas docentes’. Ambos proyectos están orientados a la realización de PFC/TFG y prácticas conjuntas, por medio del uso de una misma plataforma y un banco de ensayos de un motor de ignición por compresión.

La metodología empleada sigue el curso natural de los TFG con el añadido de que todos ellos presentan un grado de interrelación (secuencialidad u ordenación en el tiempo) muy elevado.

Para la elaboración de un TFG se sigue el procedimiento estándar que propone la actual Escuela de Ingenierías Industriales que, en resumen, se podría dividir en las siguientes fases ordenadas en el tiempo:

1) *Planteamiento del problema*: se fija el contexto de estudio, estado del conocimiento y antecedentes, si los hubiera, un posible diseño y elaboración de diagramas de tiempos del trabajo. Este planteamiento se plasma en un anteproyecto que será evaluado exhaustivamente por una comisión que representa todas las áreas de conocimiento que se imparten docencia en la Escuela. Esta comisión aplica los criterios de calidad pre-establecidos y valida la viabilidad del proyecto.

2) *Diseño e implementación de la solución propuesta*: Esta fase es la que se extiende más en el tiempo. En ella se realiza la verificación del correcto funcionamiento del sistema (si es implantable).

3) *Elaboración de la memoria de resultados del TFG*: En ella el alumno realizará el documento que refleja todo su trabajo y deberá defender ante un tribunal.

4) *Defensa del TFG*: Será la fase final de evaluación en la que el alumno expondrá y responderá a las cuestiones planteadas por el tribunal.

Cada TFG ha de seguir este procedimiento que se estima en una duración de 6 meses. Es destacable que, puesto que todos los trabajos están relacionados, se han de ordenar en el tiempo, a no ser que se puedan realizar de forma simultánea (resultados previos de un trabajo para la realización de otro), aunque se ha tratado en lo posible de paralelizar atendiendo a recursos y personal docente todas las tareas de la forma más óptima posible.

IV. RESULTADOS

Los principales resultados que se han obtenido de esta experiencia residen en los TFG abordados, de los cuales destacan dos que serán tratados más ampliamente.

Los trabajos realizados por los alumnos se han orientado para que los resultados puedan ser utilizados por otros alumnos en sus prácticas, por ello siempre que ha sido posible se han empleado las herramientas de diseño y desarrollo que han aprendido a utilizar en asignaturas de electrónica como puede ser Labview[®] o las herramientas de diseño de FPGA de Xilinx y de simulación e implementación de circuitos de Cadence[®].

A. Ejemplos de trabajos realizados

A continuación, se presentan algunos de los trabajos más relevantes realizados hasta la fecha en el contexto de los Proyectos de Innovación Educativa.

1) *Gestión de ECU Marelli SRAE and SRT mediante Lógica Reconfigurable en un entorno basado en LabView:* Con el resultado de este TFG, se puede controlar desde el SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition*) la Centralita Electrónica del motor (en inglés, *Electronic Control Unit* ó ECU). Haciendo uso de los protocolos estándar de comunicaciones de las ECUs comerciales de forma inalámbrica mediante lógica reconfigurable y Bluetooth. El alumno conectó y leyó toda la cartografía (parámetros vitales del motor que gestionan su correcto funcionamiento), dejando preparado, para un futuro TFG, la posibilidad de reprogramar dichos parámetros, con el objetivo de mejorar el rendimiento del mismo.

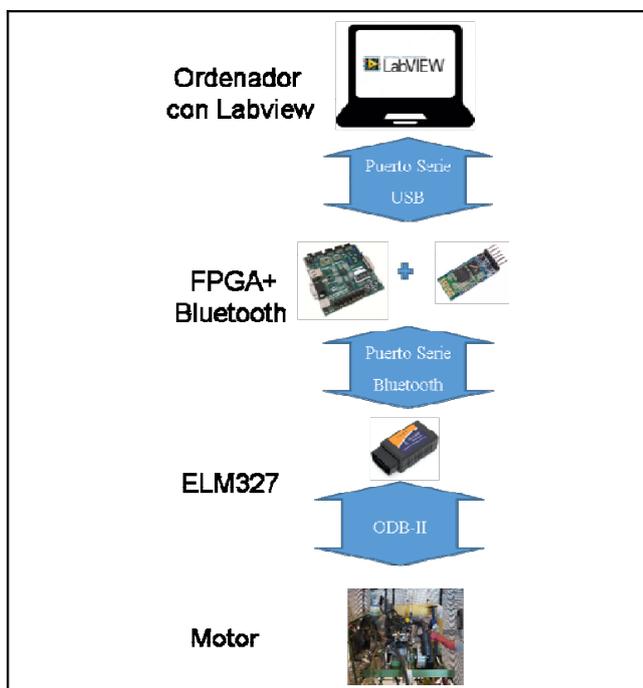


Fig. 2. Elementos principales

El sistema desarrollado a lo largo de este TFG lo formaron 4 partes principales como se puede ver en la Fig. 2: El motor, el interfaz ELM327, la FPGA y el ordenador con Labview [3].

El interfaz ELM327 es un dispositivo que se conecta al puerto OBD (*On-Board Diagnostic*) del motor. Permite acceder a la información que disponen los sensores conectados a la ECU. Se trata de una pasarela CAN-Bluetooth, por lo que la FPGA se encarga de realizar dicha conexión de forma autónoma y transparente de cara a la visualización final de información.

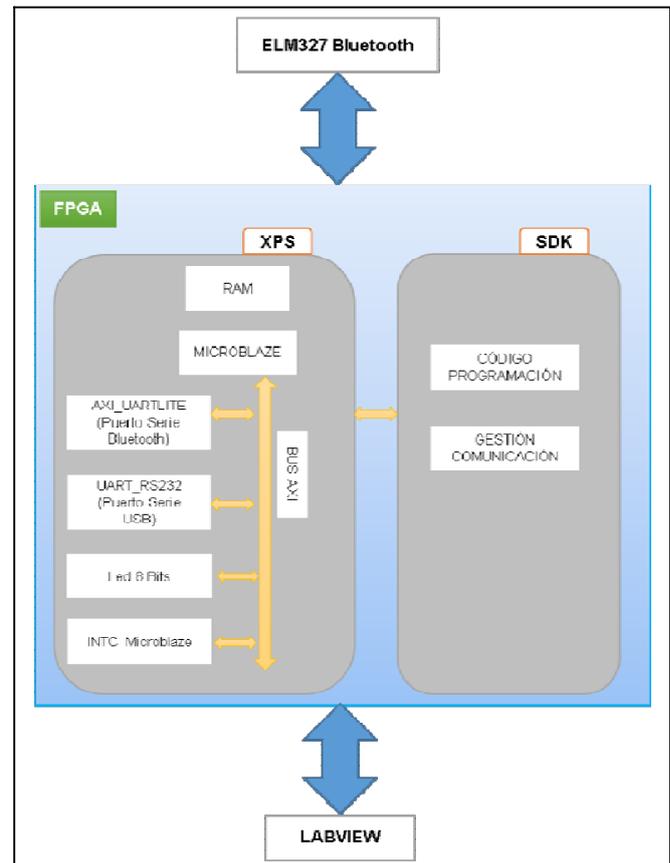


Fig. 3. Diagrama de bloques del sistema desarrollado en la FPGA.

La FPGA empleada es la Spartan-6 LX16 de Xilinx que se encuentra en el sistema de desarrollo utilizado Nexys 3 [4]. La selección de este sistema se debe a que es la que emplean los alumnos en las prácticas de muchas de las asignaturas de electrónica. La FPGA se encarga de gestionar la conexión entre la ECU y el panel de muestra de información en LabView. Para realizar esta función se ha desarrollado un sistema embebido haciendo uso del software de desarrollo EDK de Xilinx (Embedded Development Kit). El EDK tiene 2 partes principales: XPS (Xilinx Platform Studio) usado para el diseño de la parte hardware del Sistema de procesamiento embebido, y SDK (Software Development Kit) para el desarrollo del software que ejecutará el sistema de procesamiento.

El hardware embebido diseñado es un sistema que consta del procesador Microblaze con su memoria y el gestor de

interrupciones, además de los periféricos de comunicación serie y de manejo de los leds. El software desarrollado se encarga de adquirir los datos del motor proporcionados por el ELM327, procesarlos y remitir al PC (*Personal Computer*) la información que se solicite. El esquema de todo el sistema que está implementado en la FPGA se puede ver en la Fig. 3

Labview se utiliza como interfaz con el usuario final, de manera que se pueden consultar los parámetros del motor de manera sencilla. Algunas informaciones a las que se tiene acceso desde LabView son la temperatura del refrigerante del motor, el régimen en revoluciones por minuto del motor, tensión de la batería, la posición del motor o los fallos almacenados en la ECU, entre otros. En la Fig. 4 se muestra el interfaz de usuario del módulo de Labview desarrollado en este TFG. Este trabajo forma parte del sistema SCADA final que integrará a todos los módulos Labview desarrollados en los diferentes TFG.

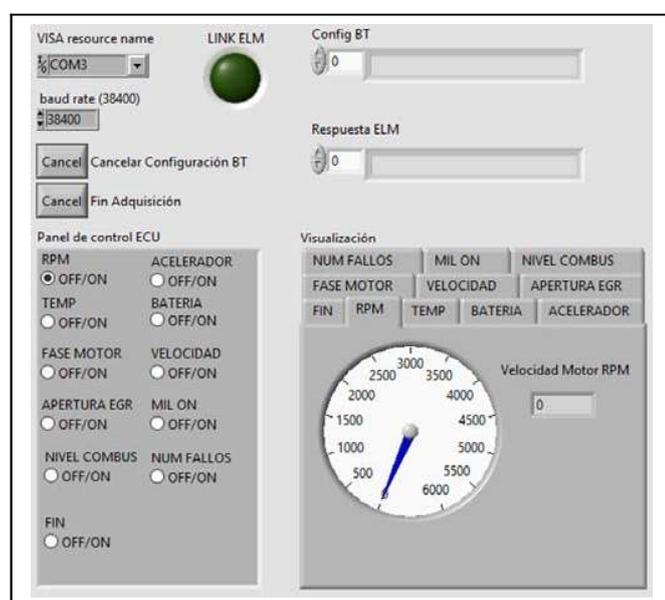


Fig. 4. Interfaz con el usuario en Labview.

El trabajo realizado en este TFG permitirá a alumnos de Instrumentación Electrónica y Control e Instrumentación y Adquisición de Señal de GIERM (Grado de Ingeniería Electrónica, Robótica y Mecatrónica) estudiar la adquisición de datos sobre un motor real desde la plataforma de instrumentación virtual LabView. Además de posibilitar la ampliación del sistema mediante la integración de nuevos elementos del motor.

2) *Gestión Automática de Aceleración y Frenado de un Motor Diésel Mediante Electrónica Reconfigurable en un Entorno Basado en LabView*: En este TFG se realizó otra fase de automatización electrónica del motor con las últimas técnicas de control, mediante instrumentación virtual y lógica reconfigurable del acelerado y freno del motor. Como principal resultado se consiguió eliminar la electrónica obsoleta que se estaba utilizando con control totalmente

manual, pudiéndose de esta forma simplificar el cambio de parámetros de manera totalmente automática y la gestión de las consignas principales del motor, como es la Aceleración-Frenado del motor diésel permitiendo de este modo calcular las curvas par motor-régimen necesarias para el estudio de rendimiento y emisiones del mismo.

El sistema desarrollado a lo largo de este TFG lo formaron 4 partes principales como se puede ver en la Fig. 5: El motor, la FPGA, el ordenador con Labview y la PCB (Printed Circuit Board) diseñada en este TFG.

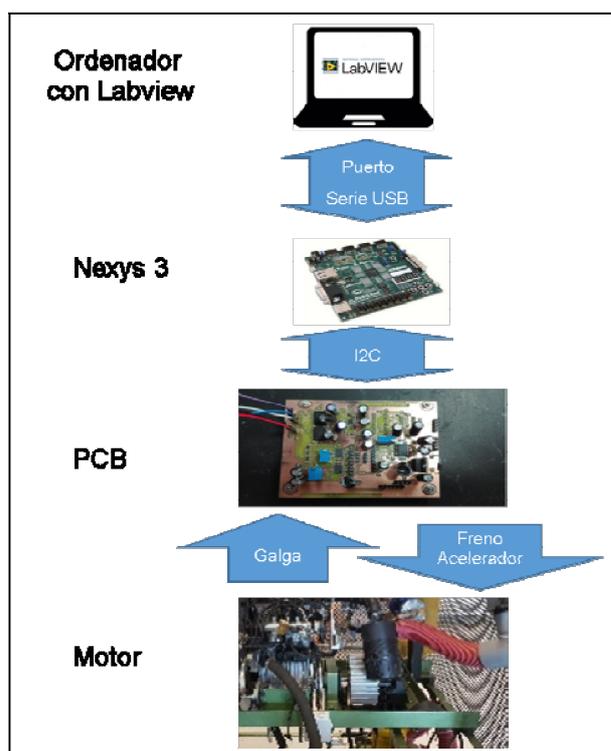


Fig. 5. Elementos principales. Sistema de Aceleración y frenado

En este TFG las partes del motor sobre las que se actúan son el sistema de aceleración y frenado. Actuando sobre ellos se consigue el régimen del motor y el par deseados. El freno del que dispone el motor es un freno de partículas magnéticas las cuales actúan como un fluido hasta que se le aplica un campo electromagnético, compactándose y bloqueando así el giro del cigüeñal. Este freno se utiliza para hacer pruebas con el banco del motor. La aceleración es regulada por un acelerador con dos potenciómetros redundantes que regulan las tensiones entre los terminales que lee la ECU y ésta interpreta la aceleración que debe aportar al motor.

La PCB construida en este TFG lleva a cabo la regulación de la aceleración y el frenado. Enlaza con la ECU y el freno de partículas magnéticas y usa la realimentación de la señal de una galga extensiométrica para regular la frenada mediante un regulador PID, y se conecta al sistema de desarrollo Nexys 3. Permite, por un lado, el control manual de forma paralela al generado desde Labview, pudiéndose seleccionar uno u otro

por medio de conmutadores y, por otro lado, es posible realizar un bypass del PID integrado en la PCB para, de este modo, utilizar uno digital desde Nexys 3. En la Fig. 6 se ilustra el diagrama esquemático diseñado para generar tanto la PCB, como las simulaciones realizadas en el entorno Cadence-OrCAD-PSpice [5].

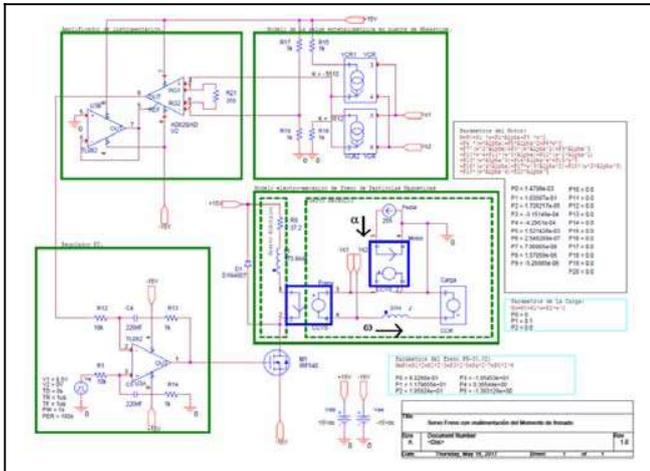


Fig. 6. Esquemático de simulación y PCB

En la Fig. 6 se puede observar el esquema del regulador de frenada implementado y que actúa sobre un modelo matemático del motor de ignición por compresión-freno de polvo magnético, cerrándose el lazo de control por medio una galga extensiométrica en configuración de puente de Wheastone que va conectada a un amplificador de instrumentación y que mide el par de frenada que actúa sobre el cigüeñal del motor. La actuación de aceleración se ha implementado con potenciómetros electrónicos de estado sólido (EEPOT) y la consigna de frenada y señal de error se aplica a través de conversores analógico-digital y digital-analógico (AD/DA).

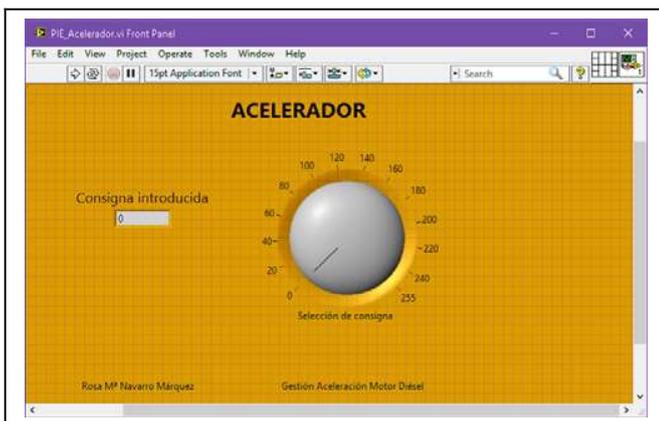


Fig. 7. Interfaz con el usuario en Labview. Sistema de Aceleración

El sistema de desarrollo basado en FPGA, Nexys 3, utilizado en este TFG es el mismo que en el anterior por idénticas razones. También se ha desarrollado un sistema embebido haciendo uso del sistema de desarrollo EDK de

Xilinx, para diseñar tanto el hardware como el software embebido en la FPGA.

El hardware embebido diseñado es un sistema que consta del procesador Microblaze con su memoria y los periféricos de comunicación serie, de manejo del display de siete segmentos y de control del bus IIC (*Inter-Integrated Circuit*). El software desarrollado se encarga comunicarse con la PCB, adquirir y procesar los datos y remitir al PC la información que solicite.

En este TFG se ha desarrollado un nuevo módulo de Labview para poder controlar el sistema de aceleración. Éste se integrará en sistema SCADA para el control y supervisión del motor desarrollados en los diferentes TFG llevados a cabo. En la Fig. 7 se muestra el interfaz de usuario del módulo de Labview desarrollado en este TFG.

B. Resumen de otros trabajos realizados

Se han realizado durante esta experiencia también los siguientes trabajos:

1) *Montaje y ensayo de un motor diésel bicilíndrico*: En este trabajo los alumnos pusieron en marcha el montaje de la bancada y el primer arranque (de forma manual) del sistema de ensayo, añadiendo el panelizado eléctrico y evacuación segura de gases de combustión del motor.

2) *Montaje y Ensayo de un Motor Diésel Bicilíndrico. Acople de un Compresor Centrifugo*: Perteneciente a la clase de TFG de mecánica se incorpora una nueva prestación al motor: el turbocompresor centrífugo que, en los motores diésel mejora la eficiencia de la combustión y que se incorporan de serie en los modelos comerciales.

3) *Efectos de la Sobrealimentación de un Motor Diésel sobre la Morfología del Hollín Producido*: Fue el primer Trabajo de ensayo sobre la bancada construida, abordó uno de los tópicos más importantes relacionados con los motores alternativos: la generación de subproductos procedentes de la combustión que repercuten en la eficiencia y sustancias contaminantes producidas.

4) *Desarrollo en Labview del Interfaz para Realizar Ensayos de Motores*: Este trabajo fue el primer intento de automatizar el banco de ensayos, preparando el terreno para la incorporación de todo el sistema automático de medidas que empezó el año siguiente.

5) *Diseño y Construcción de un Reactor Catalítico para el Motor Bicilíndrico de Raíl común*: Este trabajo desarrolla y monta en el banco para el análisis de diferentes catalizadores de emisiones.

6) *Montaje y Ensayo de un EGR en un Motor Diésel*: Para reducir la emisión de **NO_x** (Óxidos de Nitrógeno), uno de los principales contaminantes emitidos por los motores diésel, se incorporó en el motor un Recirculador de Gases de Escape (en inglés, Exhaust Gas Recirculator ó EGR) que combina parte de los gases de escape con el aire aspirado para reintroducirlos en la cámara de combustión. Su efecto es la reducción de emisiones. Los EGRs se incorporan en prácticamente todos los modelos diésel de serie.

C. Otros trabajos en curso

A continuación, se van a enumerar los trabajos que están actualmente siendo desarrollados en el marco del PIE17-049.

1) *Medidas de Régimen de un Motor Diésel Mediante Electrónica Reconfigurable en un Entorno Basado en LabView*. Diseño de un sistema embebido basado en la placa ZYBO (ZYnq BOard) [6] que se conectará a un PC y que se usará para adquirir señales del motor mediante un sensor óptico.

2) *Implantación del acelerador y Sintonía del PID del servofreno en el motor Diésel*. Diseño de PCB que permita el control de servofreno y el acelerador de forma óptima. Este TFG complementa el realizado en el anterior TFG denominado Gestión Automática de Aceleración y Frenado de un Motor Diésel Mediante Electrónica Reconfigurable en un Entorno Basado en LabView y que se ha detallado anteriormente.

3) *Medidas de Presión en Cámara de Combustión y desarrollo del Circuito Mediante Electrónica Reconfigurable en un Entorno Basado en LabView*. Diseño de un sistema embebido basado en la placa Zybo que se conectará a un PC y que se usará para adquirir señales del motor mediante un sensor de presión piezoeléctrico situado en la cámara de combustión de uno de los cilindros.

4) *Monitorización de Temperaturas del Motor en un Entorno Basado en LabView haciendo uso de una Conexión Ethernet*. Adquisición de datos en Labview de sensores de temperatura conectados por ethernet.

V. CONCLUSIONES Y DISCUSIONES

Como resultado de la experiencia se han leído los 6 TFG y 3 PFC, de los cuales 3 de ellos condujeron a la obtención de la titulación en Ingeniería Técnica Mecánica, 3 al Grado de Ingeniería Mecánica, 2 al Grado en Ingeniería de Tecnología Industriales y uno al Grado de Ingeniería Electrónica, Robótica y Mecatrónica. Todos ellos obtuvieron la calificación de Sobresaliente o Matrícula de Honor. Los alumnos además tuvieron durante el proceso apoyo de profesores de distintas áreas, lo que les ha permitido reforzar e integrar conocimientos adquiridos durante la carrera.

Durante esta experiencia ha habido una serie de dificultades a las que ha habido que enfrentarse y que ha retrasado el desarrollo del sistema. Entre ellas caben destacar las siguientes:

Dificultad para encontrar alumnos que quieran realizar el TFG. Se ha observado que, aunque resulta atractiva la idea de un sistema real, a la vez transmite una idea de dificultad que

provoca el rechazo en parte del alumnado. Ante esto en las nuevas propuestas se ha intentado simplificar y explicar mejor que, aunque hay complejidad, ésta no es insalvable.

Dificultad para cumplir los plazos inicialmente estimados para cada TFG. Dado que esta tarea hay que compatibilizarla con otras asignaturas, el tiempo de dedicación no es el que inicialmente se consideró. Esto ha complicado la secuencialidad de los TFG.

A pesar de las dificultades encontradas, los alumnos manifestaron gran satisfacción con la realización de los TFG. Lo que más valoraron fue el hecho de poder construir un sistema real, con los conocimientos adquiridos durante sus estudios abarcando diferentes disciplinas. Sintióse por un lado orgullosos y por otro sorprendidos del resultado.

En el momento actual, no se han realizado prácticas con la bancada, aunque está previsto incluir su uso en las asignaturas de Instrumentación Electrónica y Control e Instrumentación y Acondicionamiento de Señal de GIERM.

AGRADECIMIENTOS

Esta experiencia está financiada y se realiza en el marco de los proyectos de innovación educativa PIE15-123 y PIE17-049 de las convocatorias de proyectos de innovación educativa PIE2015/2017 y PIE2017/2019 convocados por el Vicerrectorado de Personal Docente e Investigador de la Universidad de Málaga, por ello se quiere agradecer a la Universidad de Málaga la posibilidad de realizar esta experiencia que creemos, sin duda que favorecerá a la formación de los alumnos.

REFERENCIAS

- [1] España. Real Decreto 1393/2007, de 29 de octubre. BOE, 29 de octubre de 2007, núm. 260, p. 44037-44048
- [2] UNIVERSIDAD DE MÁLAGA. Vicerrectorado de Ordenación Académica y del Profesorado, 2013 <<https://www.uma.es/media/files/EPS-ReglamentoUMA-TFG.pdf>> [Consulta: 5 de Febrero de 2018]
- [3] Lajara Vizcaino, J. and Pelegría Sebastián, J. *LabVIEW. Entorno de programación*. Barcelona, Marcombo, 2007.
- [4] DIGILENT, “NEXYS 3 FPGA Board Reference Manual”, 2016. https://reference.digilentinc.com/_media/nexys3:nexys3_rm.pdf. [Consulta: 11 de Febrero de 2018].
- [5] Kraig Mitzner. *Complete PCB Design Using OrCAD Capture and PCB Editor*. Elsevier, 2009.
- [6] DIGILENT, “ZYBO FPGA Board Reference Manual”, 2017 <https://reference.digilentinc.com/reference/programmable-logic/zybo/reference-manual> [Consulta: 11 de Febrero de 2018].