

Diseño de experimentos con FPGA'S en cursos de ingeniería relacionados con motores de corriente continua

Iván Antonio García-Pacheco, Enrique Guzmán-Ramírez, Esteban Osvaldo Guerrero-Ramírez, Carla Leninca Pacheco-Agüero
 Universidad Tecnológica de la Mixteca.

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/7049>

1. INTRODUCCIÓN Y ADOPCIÓN DE PBL EN CURSOS DE INGENIERÍA

El uso de motores de CD en la industria se debe principalmente a que son capaces de mantener un rendimiento alto en un amplio margen de velocidades, a que tienen una alta capacidad de sobrecarga, y que presentan la facilidad de inversión de marcha de los motores grandes con cargas de gran inercia, al mismo tiempo que devuelven energía a la línea actuando como generador, lo que ocasiona el frenado y la reducción de velocidad. Las características mencionadas hacen del motor de CD apropiado para diversas aplicaciones como, trenes, tranvías, micro-motores, máquinas herramientas, máquinas extractoras, elevadores, unidades lectoras de CD, discos de almacenamiento magnético, juguetes, etc.



Más información en: http://www.revistadyna.com/documentos/pdfs/_adic/7049_2.pdf

2. DESCRIPCIÓN DE LA HERRAMIENTA PROPUESTA

La herramienta propuesta trabaja bajo es un entorno web cliente-servidor.

Con la finalidad de optimizar los recursos, el servidor administra un conjunto de sistemas llamados “Convertidor CD-CD con Control Digital basado en FPGA” (CCD-CD/CDF) que pueden ser accedidos por los estudiantes (clien-

das por la tecnología FPGA al diseño de controladores digitales. La ejecución de procesos en forma concurrente es la característica más destacada de esta tecnología ya que permite obtener altas velocidades de procesamiento. Para cumplir con su tarea, el control digital debe monitorear y procesar ciertos parámetros del convertidor CD-CD, para conseguirlo este subsistema cuenta con un conjunto de convertidores analógico-

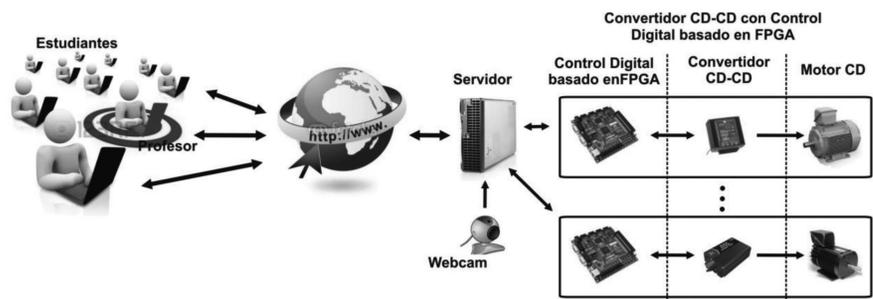


Fig. 2: Diagrama de bloques de la herramienta

tes) vía Internet. La Fig. 2 muestra el diagrama de bloques de la herramienta propuesta. En la figura también se puede apreciar que cada sistema CCD-CD/CDF consiste de dos sub-sistemas: el convertidor CD-CD y el control digital basado en FPGA.

El sub-sistema convertidor CD-CD está formado por un motor de CD y un convertidor CD-CD. El motor y la topología del convertidor usado en el sistema dependen de las especificaciones del experimento dictadas por el profesor. En este sentido, los estudiantes pueden interactuar con varias topologías, administradas por el servidor, mediante un ambiente web. La herramienta incluye las topologías básicas de convertidores Buck, Boost y Buck-boost. La adición de nuevas topologías a la herramienta es una tarea simple. Por su parte, el sub-sistema control digital basado en FPGA tiene como elemento central de procesamiento al dispositivo Spartan-3E de la compañía Xilinx, lo que permite al estudiante aplicar las ventajas ofreci-

digital que tienen por función entregar al FPGA los parámetros discretizados. El último elemento incluido en este subsistema es un controlador USB que permite establecer una comunicación con el servidor a través de un puerto USB, la cual es empleada por el estudiante para interactuar en tiempo real con la herramienta.

Estos elementos pueden ser accedidos a través de una interfaz web, permitiendo a los estudiantes seleccionar el sistema que utilizarán en su práctica, también pueden configurar al FPGA con la ley de control seleccionada por el profesor, y pueden visualizar los parámetros que les permitan evaluar el desempeño del sistema en estudio (ver Fig. 1).

Finalmente, y considerando que el sistema CCD-CD/CDF tiene una estructura fija “está formado por un motor de CD, un convertidor CD-CD y un control digital basado en FPGA conectados en lazo cerrado” la metodología incremental de co-diseño hardware/

software propuesta en [18] fue adaptada a la herramienta propuesta para llevar a cabo el proceso que permite al estudiante diseñar un nuevo convertidor de CD-CD, implementar la ley de control correspondiente, conformar el sistema CCD-CD/CDF y verificar su desempeño (ver Fig. 3).

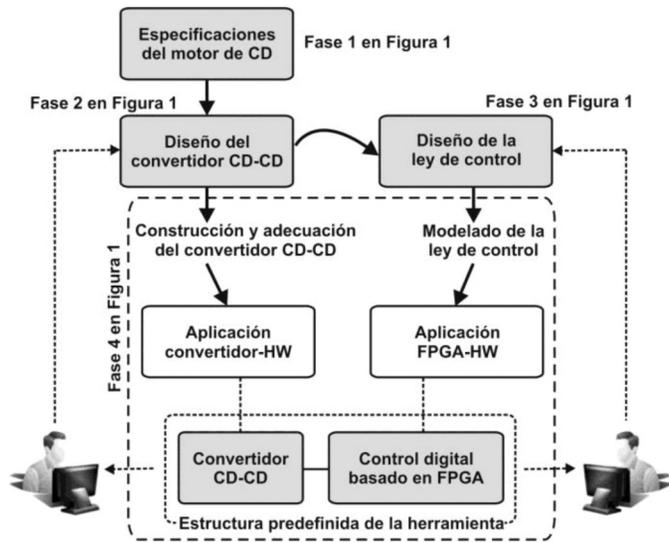


Fig. 3: Adaptación de la metodología incremental de co-diseño hardware/software a la herramienta propuesta

En este sentido y acorde a la orientación de la herramienta propuesta, el uso de estas herramientas facilita al estudiante el desarrollo de aplicaciones enfocadas al control de sistemas de potencia. El profesor solamente debe establecer la ley de control que el estudiante debe modelar e indicar cuál enfoque debe utilizarse, para finalmente configurar el sub-sistema Control Digital basado en FPGA.

3. EJEMPLO DE EXPERIMENTACIÓN CON FPGA'S

Siguiendo el enfoque PBL, mostrado en la Fig. 1, y su adaptación a la metodología de la Fig. 3, un experimento práctico comienza con la asignación del proyecto a través de la herramienta basada en la web como se explica a continuación.

3.1. DESCRIPCIÓN DE FASES

Fase 1. Definición del problema.

Todos los proyectos son cargados por el profesor en la sección de Experimentos y éstos deben de ser desarrolla-

dos por equipos de hasta cinco integrantes. La Fig. 4 muestra la pantalla principal de LabWeb donde los estudiantes pueden revisar algunos aspectos teóricos correspondientes al curso y acceder al área de experimentos.

Así, los estudiantes reciben las especificaciones del motor de CD y obtienen

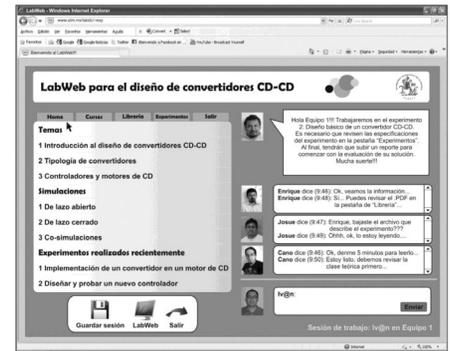


Fig. 4: Pantalla principal para la experimentación remota

especificaciones nominales y los parámetros de diseño del motor y, en general, recibir soporte durante el experimento, LabWeb ofrece conocimiento teórico soportado por modelos 3-D que favore-

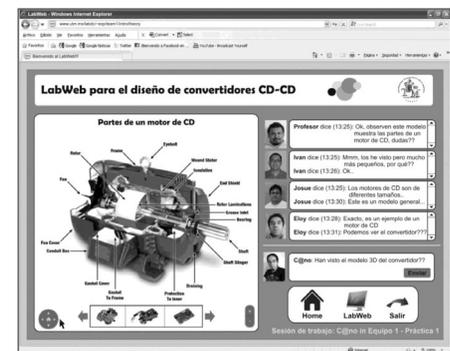


Fig. 5: Soporte teórico con modelos 3-D y sesión de chat

su modelo matemático para proceder a la siguiente fase (ver Tablas 1 y 2).

Para solventar cualquier problema presentado con respecto a las especi-

Motor de CD de excitación separada	
Datos nominales	
Potencia nominal	175 W
Voltaje	120 V
Corriente de armadura	3.0 A
Corriente de campo serie	3.0 A
Corriente de campo paralelo	0.4 A
Velocidad nominal	1800 RPM

Tabla 1: Especificaciones nominales del motor de CD

Parámetros de diseño			
Parámetros	Símbolo	Valor	Unidad
Resistencia de armadura	R_a	11.58	Ω
Inductancia de armadura	L_a	76.30	mH
Resistencia de campo	R_f	259	Ω
Inductancia de campo	L_f	37.00	mH
Constante de fuerza magnetomotriz	K_m	0.36	N.m/A
Coefficiente de fricción viscosa	B	5.45E-3	N.m.s
Inercia de motor	J	2.02E-3	Kg.m ²

Tabla 2: Parámetros de diseño del motor de CD

cen el entendimiento de cómo trabajan internamente los elementos físicos (ver Fig. 5). Este conocimiento, que puede ser fácilmente actualizado de acuerdo al tópico de estudio, incluye la información de diferentes tipos de motores, convertidores CD-CD y del hardware relacionado con el proyecto.

Así, con base en la información contenida en las Tablas 1 y 2, el modelo matemático del motor de CD es obtenido por los estudiantes a través de las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} L_a \frac{di_a}{dt} &= v - R_a i_a - K_m w \\ J \frac{dw}{dt} &= K_m i_a - Bw \\ L_F \frac{di_F}{dt} &= E_2 - I_F R_F \end{aligned} \quad (1)$$

Donde: i_a es la corriente de armadura, v es el voltaje de armadura, w es la velocidad del motor, I_F es la corriente de campo y E_2 es el voltaje de campo. Una vez que los estudiantes han obtenido el modelo matemático del motor de CD, se puede dar inicio al diseño del convertidor CD-CD (Fase 2).

Fase 2. Diseño del convertidor.

El diseño del convertidor CD-CD inicia con la definición del convertidor que debe ser diseñado, para este caso se trata de un convertidor *Buck*. El diseño requiere del voltaje nominal y de la resistencia de armadura del motor de CD. El voltaje de entrada del convertidor es el voltaje nominal de la armadura del motor. Teniendo por objetivo controlar el motor con un valor mínimo de 120 Volts (a 1800 rpm) las ecuaciones que el estudiante debe obtener son la función de transferencia, la inductancia mínima para la corriente permanente y la ecuación para el cálculo del capacitor. En este sentido, la función de transferencia es la relación entre los voltajes de entrada y salida y está definida por la expresión:

$$V_o = D * V_s \quad (2)$$

Donde: V_o es el voltaje de salida, V_s es el voltaje de entrada y D es el ciclo de trabajo.

La inductancia mínima para la corriente permanente es importante debido a que un convertidor Buck no trabaja en modo discontinuo. Este parámetro está definido por la siguiente expresión:

$$L_{min} = \frac{(1 - D)R}{2f_s} \quad (3)$$

Donde: R es la resistencia de carga del convertidor y f_s es la frecuencia de conmutación del convertidor.

El cálculo del capacitor está definido por la relación existente entre el voltaje y la corriente del capacitor a través de la siguiente expresión:

$$C = \frac{(1 - D)}{8Lf_s^2 \left(\frac{\Delta V_o}{V_o} \right)} \quad (4)$$

Donde: L es la inductancia del convertidor y ΔV_o es el voltaje de rizo de salida.

Así, utilizando las ecuaciones del convertidor y las especificaciones del motor, los estudiantes deben diseñar el convertidor Buck y mostrar sus resultados al profesor mediante el entorno web. Los resultados obtenidos en la Fase 2 para el caso en estudio se muestran en la Tabla 3. Con estos resultados, los estudiantes deben desarrollar una simulación a lazo abierto usando

la herramienta Matlab/Simulink/SimPower-System.

En esta simulación se integran los modelos del motor de CD y del convertidor CD-CD. Estos modelos son creados de forma colaborativa por los estudiantes a través de turnos, es decir, cada estudiante contribuye con una idea (elemento en el diagrama) la cual es evaluada y/o corregida por el resto del equipo antes o después de la simulación (ver Fig. 6, número 1). Los estudiantes disponen de una barra de herramientas programada con el método drag and drop (ver Fig. 6, número 2). Esto es posible a través de Simulink®, un entorno de diagrama de bloques para la simulación y diseño multidominio basado en los modelos que son construidos por los estudiantes. Simulink® es compatible con la simulación, generación automática de código, y verificación continua de los sistemas embebidos implementados con LabWeb. Así, los modelos creados a través de la colaboración de los estudiantes son enviados en tiempo real a un servidor web de Matlab® que es utilizado para recibir datos y gráficos a través de Internet, procesarlos y devolver información para mostrar en LabWeb, similar al trabajo realizado por Irmak et al. [13]. A pesar de esta colaboración, siempre es necesario que el responsable del equipo, designado por el profesor a través de permisos otorgados en LabWeb, someta a revisión todos los entregables del proceso ilustrado en la Fig. 1. Finalmente, los estudiantes deben trabajar también colaborativamente en LabWeb para generar conclusiones acerca de los resultados obtenidos en la simulación. Estas conclusiones tie-

Resultados			
Parámetros	Símbolo	Valor	Unidad
Inductancia	L	300	μH
Capacitancia	C	470	μF
Resistencia	R	11.58	Ω
Frecuencia de conmutación	f _s	100	kHz

Tabla 3: Resultados obtenidos en el diseño del convertidor Buck

¹ La idea de que el dialogo es fundamental para conseguir un proceso enseñanza-aprendizaje exitoso está bien establecida en la literatura educativa. Por ejemplo, Laurillard [19] define cuatro características que sustentan un dialogo efectivo: debe ser adaptativo, es decir, depende de las necesidades de los estudiantes; debe ser discursivo, comunicación abundante en ambas vías; debe ser interactivo, vinculado a acciones relacionadas con la tarea objetivo; y debe ser reflexivo, estimular a profesores y estudiantes a reflexionar sobre el ciclo 'objetivo-acción-realimentación'. El propósito de la realimentación en la Fig. 7 es auxiliar a los estudiantes en la comprensión de conceptos e ideas y aplicar su conocimiento en las tareas de aprendizaje.

nen que ser discutidas por los integrantes del equipo antes de ser enviadas al profesor. Posteriormente, el diagrama esquemático y los resultados de la simulación son enviados por el responsable al profesor a través de LabWeb (ver Fig. 7, número 1). Mediante este entorno, el profesor puede solicitar a los estudiantes desarrollar nuevas simulaciones variando algunos parámetros de diseño (inductancia, capacitancia, resistencia, y frecuencia de conmutación). Así, cada estudiante debe proveer realimentación¹ con base en los resultados obtenidos en las simulaciones a través del entorno web. En este sentido, la formulación de observaciones escritas sobre las asignaciones de los estudiantes (ver Fig. 7, número 2) se ve como una característica importante del proceso de realimentación en la enseñanza de la ingeniería [20]. Bajo el entorno propuesto de experimentación basada en la web, la realimentación se conceptualiza como un proceso dialógico y contingente de dos sentidos que involucra la interacción coordinada profesor-estudiante y entre pares (peer-to-peer), así como un compromiso de aprendizaje activo.

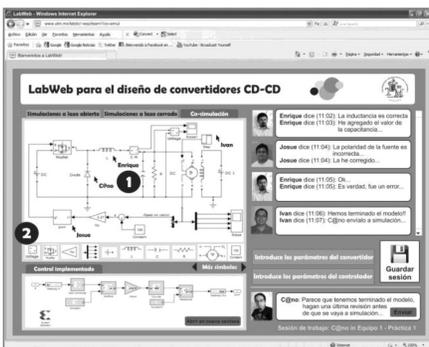


Fig. 6: Diseño colaborativo de modelos

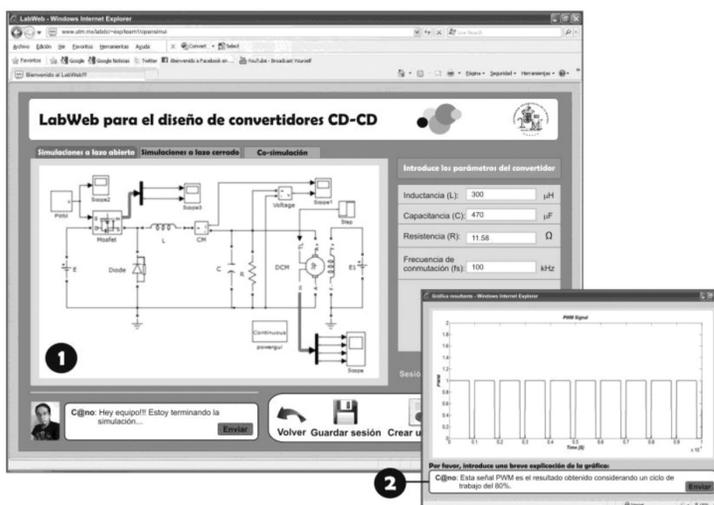


Fig. 7: Simulación a lazo abierto a través del entorno web

Fase 3. Diseño de la ley de control.

Una vez que el profesor considera que los resultados de esta fase son satisfactorios, los estudiantes pueden dar inicio al diseño de la ley de control (Fase 3), para lo cual deberán considerar las especificaciones establecidas por el profesor y el modelo matemático de todo el sistema (integración del motor de CD y el convertidor CD-CD), dicho modelo está definido por las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned} L \frac{di}{dt} &= Eu - v \\ C \frac{dv}{dt} &= i - i_a - \frac{v}{R} \\ L_a \frac{di_a}{dt} &= v - R_a i_a - K_m w \\ J \frac{dw}{dt} &= K_m i_a - Bw - \tau_L \end{aligned} \quad (5)$$

Donde: E es el voltaje de entrada del convertidor Buck, i es la corriente del inductor, T_L es el par de carga y u es la entrada de control que simboliza el interruptor que puede tomar el conjunto de valores de forma discreta en el intervalo $\{0,1\}$.

Aplicando la transformada de Laplace a la Ec. 5, los estudiantes obtienen la función de transferencia del sistema a lazo abierto que se define por la siguiente expresión:

$$\frac{\omega(s)}{u(s)} = \frac{EK_m}{LC} \frac{1}{\lambda_4 s^4 + \lambda_3 s^3 + \lambda_2 s^2 + \lambda_1 s + \lambda_0} \quad (6)$$

con

$$\begin{aligned} \lambda_0 &= \frac{\tau_L R_a}{\omega LC} + \left(\frac{BR_a + K_m^2 + B}{LC} \right) \\ \lambda_1 &= \left(\frac{\tau_L R_a}{\omega RC} + \frac{L_a}{LC} + \frac{1}{C} \right) + \left(\frac{BR_a + K_m^2 + B}{RC} \right) + \left(\frac{JR_a + BL_a + J}{LC} \right) \\ \lambda_2 &= \left(\frac{\tau_L L_a}{\omega RC} + R_a \right) + \left(\frac{JR_a + BL_a + J}{RC} + \frac{JL_a}{LC} + BR_a + K_m^2 + B \right) \\ \lambda_3 &= \frac{\tau_L L_a}{\omega} + \frac{JL_a}{RC} + JR_a + BL_a + J \\ \lambda_4 &= JL_a \end{aligned} \quad (7)$$

Considerando un controlador proporcional y aplicando su ecuación característica sobre la Ec. 6, se obtiene la función de transferencia del sistema a lazo cerrado como:

$$H(s) = \frac{EK_m K_p}{LC} \frac{1}{\lambda_4 s^4 + \lambda_3 s^3 + \lambda_2 s^2 + \lambda_1 s + \lambda_0 + \frac{EK_m K_p}{LC}} \quad (8)$$

Donde: K_p es la ganancia proporcional del controlador.

Por lo tanto, el polinomio característico a lazo cerrado es equivalente a:

$$P(s) = \lambda_4 s^4 + \lambda_3 s^3 + \lambda_2 s^2 + \lambda_1 s + \lambda_0 + \frac{EK_m K_p}{LC} \quad (9)$$

Así, la ganancia del controlador se obtiene sintonizando el polinomio característico a lazo cerrado por medio de un polinomio Hurwitz de cuarto orden definido por la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} P(s) &= (s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2) \\ P(s) &= s^4 + 4\zeta\omega_n s^3 + (4\zeta^2\omega_n^2 + 2\omega_n^2) s^2 + (4\zeta\omega_n^3) s + \omega_n^4 \end{aligned} \quad (10)$$

Este proceso tiene por objetivo garantizar que el error de seguimiento de velocidad será exponencialmente estable a través de su convergencia a cero. Por consiguiente, al igualar coeficientes, se tienen las siguientes expresiones:

$$\omega_n^4 = \frac{1}{\lambda_4} * \left(\lambda_0 + \frac{EK_m K_p}{LC} \right) \quad (11)$$

y

$$K_p = \frac{JL_a LC}{EK_m} \left(\omega_n^4 - \frac{1}{JL_a LC} \left(\frac{\tau_L R_a}{\omega} + BR_a + K_m^2 + B \right) \right) \quad (12)$$

Finalmente, la ley de control queda definida por la siguiente expresión:

$$u(t) = K_p e(t) \quad (13)$$

Una vez que se ha obtenido el modelo matemático de la ley de control, los estudiantes deben desarrollar su modelado y simulación a lazo cerrado usando Matlab/Simulink/Sim-Power-System, además de una co-simulación hardware/software. Para este fin, Matlab/Simulink/Sim-Power-System permite modelar el comportamiento dinámico del motor de CD y del convertidor Buck, mientras que la ley de control es modelada mediante el software Xilinx System Generator®. Una nueva discusión relacionada con estos resultados debe ser realizada por los estudiantes. Así, los resultados de las simulaciones y el reporte correspondiente se envían al profesor a través del entorno web. Con este material, el profesor realizará la evaluación de esta fase. Una vez que el profesor ha dado su aprobación, los estudiantes pueden comenzar con la Fase 4.

Fase 4. Implementación.

En esta fase se corroboran los resultados obtenidos de las simulaciones en las fases anteriores mediante su implementación e integración en el sistema CCD-CD/CDF. Es necesario considerar que el sistema CCD-CD/CDF tiene una estructura fija y que los sub-sistemas que lo constituyen ya están construidos. En este sentido, y considerando que la herramienta está diseñada como un entorno web cliente-servidor, los usuarios pueden interactuar con la herramienta de dos formas:

1. Configuración del sistema. Una vez que el alumno (cliente) ha modelado la ley de control, utilizando el software Xilinx System Generator®, procede a generar el archivo de configuración del FPGA (archivo .bit), enviarlo al servidor y hacerle la petición para realizar el proceso de configuración del FPGA que forma parte del sub-sistema control digital basado en FPGA. Para cumplir esta tarea, el servidor responde realizando un llamado o invocación local al programa “djtgcfg.exe” que cumple la función de cargar la nueva configuración al FPGA (ver Fig. 8).
2. Control de parámetros y visualización de desempeño. La interfaz

web permite al estudiante modificar algunos parámetros, como la velocidad de referencia, lo cual se realiza mediante el envío del nuevo parámetro y la petición de actualización de velocidad, en respuesta el servidor simplemente canaliza el nuevo valor de velocidad al sub-sistema control digital basado en FPGA (ver Fig. 8). Además, el sistema permite visualizar el comportamiento y velocidad del motor del Sistema Electromecánico de Entrenamiento Lab-Volt 0.2 kW (ver Fig. 9a) mediante una cámara que forma parte del entorno web (ver Fig. 9b); para lograr este fin, el estudiante envía la petición que le permita acceder a la información de la cámara, el servidor responde enviándole dicha información (ver Fig. 8).

Como paso final de esta fase, los estudiantes entregan un reporte final y reciben valoraciones del profesor para mejorar su trabajo y desempeño en problemas futuros.

Por otro lado, el entorno web para la experimentación establece una librería colaborativa como un mecanismo asíncrono de edición y colaboración que facilita la escritura de los reportes, la integración del conocimiento y el intercambio de información. Esta librería electrónica es introducida para apoyar las actividades de colaboración entre los estudiantes comprometidos y motivados en completar la experimentación específica asignada por el profesor mediante la realización de diversas prácticas (ver Fig. 10). Con el concepto de “librería electrónica”, los estudiantes de ingeniería conceptualizan la idea de compartir conocimiento con otros estudiantes que pueden poseer un nivel diferente de conocimiento.

3.2. ANÁLISIS DE RESULTADOS DE EVALUACIÓN CON ESTUDIANTES

El estudio para evaluar esta herramienta fue aplicado durante del año académico 2011/2012 a un total de 52 alumnos matriculados en el curso “Motores de CD” dentro del programa de In-

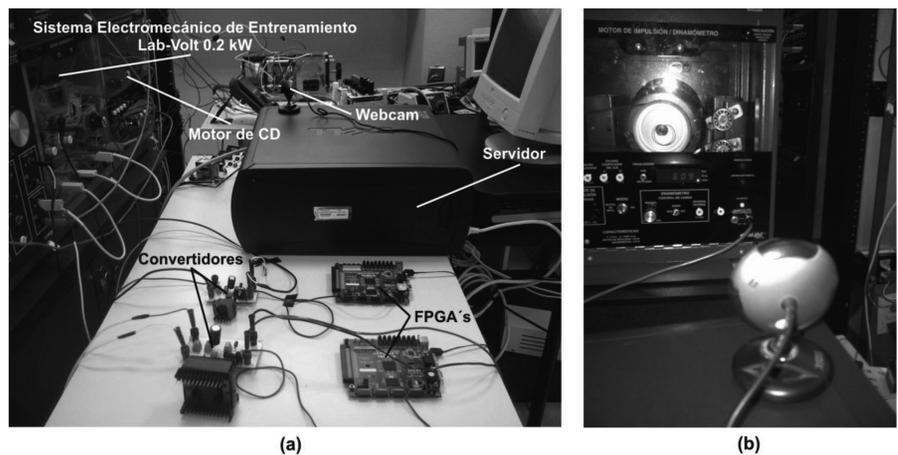


Fig. 9: (a) Contexto experimental de la herramienta propuesta, (b) Información mostrada por la cámara que forma parte del entorno web

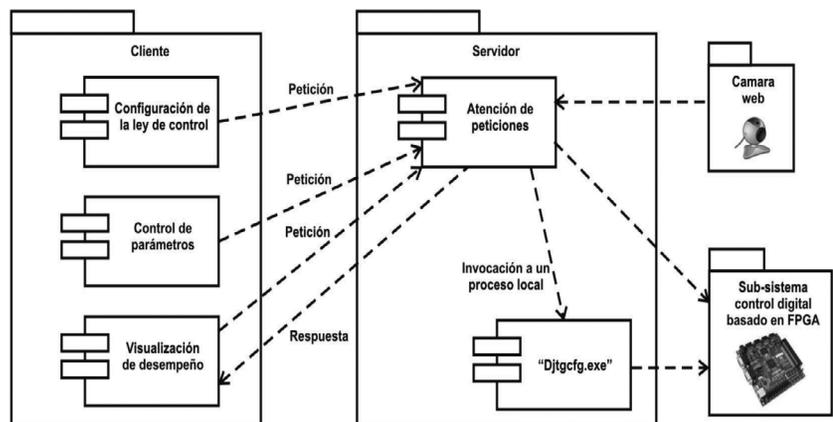


Fig. 8: Diagrama de componentes de la interacción entre el estudiante y la herramienta

geniería Electrónica de la Universidad Tecnológica de la Mixteca (UTM), en México. Todos los estudiantes estaban cursando el cuarto año del programa y realizaron los mismos experimentos



Fig. 10: Librería electrónica para compartir la experiencia entre alumnos y experimentos

prácticos. El estudio se implementó en dos grupos diferentes (control y experimental) de estudiantes universitarios que para este estudio conformaron una sola muestra. La evaluación consistió en la aplicación de una escala de estimación de 14 ítems o afirmaciones agrupadas en tres metacategorías (aprendizaje, cooperación, y motivación) a los 52 alumnos - 26 (grupo control) que utilizaron el método clásico en un laboratorio físico supervisado, y otros 26 (grupo experimental) que utilizaron la herramienta basada en web bajo el enfoque de PBL, con el objetivo de caracterizar el grado de importancia que dicho conjunto de alumnos concedía a la utilización de esta herramienta en el desarrollo de un curso tradicional (véase Tabla 4).

Como se mencionó anteriormente, las opiniones de los alumnos fueron recogidas a través de los 14 ítems mostrados en la Tabla 4, con posibles respuestas de valores comprendidos entre 1: “Totalmente en desacuerdo”, 2: “En desacuerdo”, 3: “Neutral”, 4: “De acuerdo”, y hasta 5: “Totalmente de acuerdo”. En cuanto a la muestra y procedimiento de muestreo, dicha escala fue administrada a los dos grupos, es decir, a un total de 52 estudiantes (26 del grupo de control + 26 del grupo experimental). Por la naturaleza cuantitativa de los datos recogidos, se implementaron tres técnicas de análisis de carácter descriptivo: Media aritmética (MA), Análisis de Conglomerados (AC) y Análisis Factorial (AF). Una vez

Afirmaciones	Opinión de los estudiantes											
	Grupo de control						Grupo experimental					
	TD	D	N	A	TA	MA	TD	D	N	A	TA	MA
S1. He aprendido sobre las partes de los motores eléctricos utilizando modelos e imágenes interactivas.												
S2. Los experimentos en tiempo real me han facilitado el aprendizaje sobre los convertidores CD-CD.												
S3. Todas las preguntas que realicé sobre los experimentos prácticos fueron respondidas en tiempo y forma a través de la herramienta.												
S4. El método experimental utilizado es más seguro y efectivo que el basado únicamente en lecciones teóricas.												
S5. Me siento motivado a repetir voluntariamente un experimento cuantas veces sea necesario.												
S6. Las explicaciones del profesor durante la experimentación colaborativa me han facilitado el aprendizaje.												
S7. Me sentí cómodo con la manera de realizar y monitorear los experimentos a través de Internet.												
S8. Mis compañeros de equipo han adquirido confianza en sí mismos durante los experimentos prácticos.												
S9. Considero que el número de cursos apoyados por la tecnología debe incrementarse en mi educación de ingeniero.												
S10. En mi opinión, la realización de experimentos prácticos es bastante motivante para nuestra formación de ingenieros.												
S11. Considero que experiencias prácticas similares deben ser creadas para otros cursos técnicos.												
S12. Durante los experimentos prácticos, me he logrado concentrar más en la operación que en la construcción física de los convertidores.												
S13. Me siento confiado al saber que las conexiones físicas y el cableado del sistema mínimo empleado en los experimentos prácticos fueron realizados por mí.												
S14. Es muy importante para mí observar todas las posibles fallas durante los experimentos prácticos.												

Tabla 4: Afirmaciones aplicadas a los alumnos en relación al uso de LabWeb

Criterios de clasificación y etiquetado	
•	Medias aritméticas obtenidas de los 14 ítems por parte de los dos grupos (control y experimental) → MA_{gc+ge} : Grupo de control. Afirmaciones con mayor gravedad aquellas con una media =2. Grupo experimental. Afirmaciones con mayor gravedad aquellas con una media <2.
•	Cálculo de análisis factorial a las dos matrices de datos de los dos grupos (control y experimental) conjuntamente → AF_{gc+ge} : Grupo de control. Afirmaciones con mayor gravedad aquellas que integran el factor 1. Grupo experimental. Afirmaciones con mayor gravedad aquellas que integran el factor 2.
•	Cálculo de análisis de clúster jerárquico a las dos matrices de datos de los dos grupos (control y experimental) → AC_{gc+ge} : Grupo 1. Categorías de problemas de mayor gravedad las que constituyen el clúster 2. Grupo 2. Categorías de problemas de menor gravedad las que configuran el clúster 1.

Tabla 5: Criterios de clasificación

Metacategorías	MA_{gc+ge}	AF_{gc+ge}	AC_{gc+ge}
Aprendizaje	2	2	2
Cooperación	1	1	2
Motivación	2	2	2

Tabla 6: Resultados de la clasificación

obtenidos los resultados estadísticos de los tres diferentes niveles, se realizó la triangulación y se etiquetaron en las categorías congruentes con el objetivo planteado (véase Tabla 5). Una vez que se establecieron los criterios de clasificación para las tres metacategorías mencionadas anteriormente, éstos fueron clasificados en uno de los dos niveles de gravedad propuestos (1: mayor gravedad, 2: menor gravedad), según las técnicas estadísticas utilizadas. Así, se obtuvo la tabla clasificatoria mostrada en la Tabla 6.

Los resultados de la triangulación indican que existió una diferencia significativa en el aprendizaje de ambos grupos de estudiantes, ya que ésta fue mayor después de trabajar bajo el enfoque de PBL a través de la herramienta basada en la web. De igual forma, se pudo observar con los datos obtenidos que el entorno web proporciona las condiciones para que los estudiantes fueran capaces de trabajar cooperativamente con los miembros de su grupo virtual.

Así mismo respecto a la motivación, algunos estudiantes creyeron que sus dudas se solucionaron dedicando más tiempo que lo destinado a experimentos prácticos en laboratorios reales. En este sentido, al inicio de este artículo se estableció que este enfoque se centra en enseñar a los estudiantes cómo diseñar convertidores CD-CD antes de ponerlos en práctica. Del mismo modo, la mayoría de los estudiantes indicaron

que apoyar al aprendizaje con modelos interactivos y animaciones hace que la herramienta basada en web sea atractiva para el aprendizaje comprensible y efectivo. Los resultados de esta evaluación demostraron que el realizar experimentos en tiempo real a través de Internet, también es importante para obtener un mejor y más rápido aprendizaje, mientras que se adquiere experiencia diferente utilizando tecnologías recientes para obtener un conocimiento más específico. Los estudiantes consideran que la experimentación en tiempo real es más atractiva que la realizada en un laboratorio verdadero, de hecho la mayoría de los estudiantes indicó que los experimentos basados en la web propician entornos más seguros y relajantes que los creados por laboratorios reales. Por último, los estudiantes indicaron que la monitorización de la configuración experimental y de los entornos de laboratorio en tiempo real mediante cámaras web, les ayudó a comprender la importancia de un entorno experimental de forma más concisa. En este sentido, así como Colak et al. [12] indicaron, se podría considerar que el uso de dispositivos visuales y sensoriales, como las cámaras y los micrófonos, es importante para los sistemas educativos basados en la web.

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En este estudio, se creó una herramienta alternativa basada en web para el diseño de convertidores CD-CD con el objetivo de mejorar el aprendizaje de los estudiantes universitarios a través de la implementación de un enfoque PBL

para la experimentación a distancia dentro de una institución de educación superior en México. La herramienta propuesta también ofrece la posibilidad de que los estudiantes que no tienen la oportunidad de aprender mediante la experiencia con convertidores CD-CD y experimentos con motores de CD en laboratorios convencionales, puedan realizar prácticas a través de Internet. Con el fin de evaluar la utilidad de la herramienta, se realizó un estudio cualitativo en un curso de “Motores de CD” a través de un enfoque experimental similar al aplicado por Yeung y Huang [21]. Todas las presentaciones teóricas relacionadas con el motor de CD fueron preparadas y presentadas en el entorno web creado. En este sentido, los modelos 3D interactivos y las salas de chat fueron utilizadas como soporte teórico para facilitar el aprendizaje.

Además, los estudiantes han desarrollado diseños basados en la web en tiempo real para aprender cómo funciona un convertidor CD-CD. Los estudiantes pueden utilizar en sus diseños la topología básica de los convertidores CD-CD de potencia y controladores clásicos, y tienen la opción de crear su propio controlador para probarlo en experimentos remotos cambiando diferentes parámetros y diferentes técnicas de control para observar los comportamientos transitorios y estacionarios del motor. Esto podría proporcionar importantes beneficios al permitir a los estudiantes realizar sus prácticas sin ninguna restricción de tiempo y lugar. Por último, con el fin de mostrar el impacto del artículo se presentaron la realización de un experimento a distancia con un motor de CD y los resultados de un estudio cualitativo con 52 estudiantes.

Tal y como se mencionó, la incorporación del enfoque PBL y el sopor-

te del co-diseño incremental del hardware/software proporciona importantes beneficios que se pueden resumir de la siguiente manera. Aunque se encontraron similitudes entre los dos grupos de estudio, en relación al uso de las prácticas experimentales en su enseñanza de la ingeniería, las puntuaciones medias resultantes indicaron una diferencia significativa. Esta diferencia fue mayor para el grupo experimental; por lo tanto, los estudiantes de este grupo, quienes fueron expuestos al enfoque PBL, tuvieron más éxito en la realización de los experimentos. A lo largo del semestre, los estudiantes del grupo experimental fueron expuestos al enfoque PBL mediante prácticas experimentales que debían realizar y documentar a través de reportes. La diferencia entre los grupos podría tener su origen en el hecho de que los proyectos PBL soportados por la herramienta propuesta hacen que los estudiantes sean más activos, y tengan más deseos de estudiar y aprender mientras que trabajan de forma colaborativa. Estos hallazgos coinciden con los obtenidos en la investigación de Baturay y Bay [22], que argumentó que los proyectos bajo un enfoque PBL mejoran la educación basada en la web.

Los profesores observaron que incluso cuando un alumno no quería participar en el experimento práctico, el entusiasmo o la ayuda de los otros miembros del equipo lo animaron a completar sus responsabilidades en el proyecto. Por otra parte, los estudiantes fueron conscientes de que el profesor estaba observando su comunicación a través de las salas de chat, lo que pudo haber ocasionado que estuvieran más activos y alerta de su trabajo. Esta conclusión es apoyada por el meta-análisis de Johnson et al. [23], que llegaron a la conclusión de que la cooperación entre los estudiantes tiene un impacto significativo positivo en su rendimiento.

A pesar de estimular la realimentación a través de las respuestas de evaluación los estudiantes, es necesario analizar algunos inconvenientes importantes y limitaciones del enfoque presentado en este artículo. Por ejemplo, la herramienta basada en la web requiere que los estudiantes descarguen e instalen Matlab/Simulink y Xilinx ISE Design Suite. Como la mayoría de los sistemas basados en la web, puede experimentarse un tiempo lento de res-

puesta en función de la velocidad de red y las peticiones al servidor. Sin embargo, para minimizar esta desventaja la herramienta propuesta utiliza FPGA's para procesar y registrar todo el procesamiento de los estudiantes, evitando el uso de la PC para llevar a cabo esta función. Por otra parte las interfaces web para realizar los experimentos en tiempo real están diseñadas tan simple como es posible y, como consecuencia, son mostradas con mayor rapidez. En este sentido, otro inconveniente está relacionado con el sistema de hardware mostrado en la Fig. 9, ya que, hasta ahora, se utilizan cinco dispositivos FPGA para apoyar las prácticas experimentales con un máximo de 5 equipos de estudiantes, que abarca el aprendizaje simultáneo de 25 estudiantes por semestre.

PARA SABER MÁS

- [1] Stankovski, S. Tarjan, L. Škrinjar, D. Ostojic, G. and Senk, I. "Using a didactic manipulator in mechatronics and industrial engineering courses". , 53(4), pp. 572-579, 2010.
- [2] Popovic, B. Popovic, N. Mijic, D. Stankovski, S. and Ostojic, G. "Remote control of laboratory equipment for basic electronics courses: a LabVIEW-based implementation". , 21(1), pp. 110-120, 2013.
- [3] Sun, K. Lin, Y. and Yu, C. "A study on learning effect among different learning styles in a web-based lab of science for elementary school students". , 50(4), pp. 1411-1422, 2008.
- [4] Chisholm, C. U. Harris, M. S. G. Northwood, D. O. and Johrendt, J. L. "The characterisation of work-based learning by consideration of the theories of experiential learning". , 44(3), pp. 319-337, 2009.
- [5] Jarmon, L. Traphagan, T. Mayrath, M. and Trivedi, A. "Virtual world teaching, experiential learning, and assessment: an interdisciplinary communication course in second life". , 53(1), pp. 169-182, 2009.
- [6] Cox, M. F. Cekic, O. and Adams, S. G. "Developing leadership skills of undergraduate engineering students: perspectives from engineering faculty". , 11(3-4), pp. 25-36, 2010.
- [7] Litzinger, T. A. Lattuca, L. R. Hadgraft, R. G. and Newstetter, W. C. "Engineering education and the development of expertise". , 100(1), pp. 123-150, 2011.
- [8] Hurley, W. G. and Lee, C. K. "Development, implementation, and assessment of a web-based power electronics laboratory". , 48(4), pp. 567-573, 2005.
- [9] Rangel-Magdaleno, J. d. J. Rivera-Guillen, J. R. Romero-Troncoso, R. d. J. and Osornio-Rios, R. A. "FPGA-Matlab-based open core for three-time controllers in automatic control applications". , 21(1), pp. 132-140, 2013.
- [10] Bayilmis, C. "Development of a web-based educational interface using MATLAB builder NE with web figure for digital modulation techniques". , 20(4), pp. 604-610, 2012.
- [11] Ayasun, S. and Karbeyaz, G. "DC motor speed control methods using MATLAB/Simulink and their integration into undergraduate electric machinery courses". , 15(4), pp. 347-354, 2007.
- [12] Colak, I. Demirbas, S. Sagiroglu, S. and Irmak, E. "A novel web-based laboratory for DC motor experiments". , 19(1), pp. 125-135, 2011.
- [13] Irmak, E. Bayindir, E. Colak, I. and Soysal, M. "A remote laboratory experiment for 4-quadrant control of a DC motor". , 19(4), pp. 747-758, 2011.
- [14] Bingol, O. and Aydogan, O. "Web based remote controlled electrical motor laboratory used as educational tool". , 88(6), pp. 342-346, 2012.
- [15] Tekin, A. Ata, F. and Gökbulut, M. "Remote control laboratory for DSP-controlled induction motor drives". , 20(4), pp. 702-712, 2012.
- [16] Mioduser, D. and Betzer, N. "The contribution of project-based learning to high-achievers' acquisition of technological knowledge and skills". , 18(1), pp. 59-77, 2008.
- [17] Gö, Ö. and Nafalski, A. "Collaborative learning in engineering education". , 11(2), pp. 173-180, 2007.
- [18] Schaumont, P. A. "A senior-level course in hardware-software codesign". , 51(3), pp. 306-311, 2008.
- [19] Laurillard, D. . London: RoutledgeFalmer, 2002.
- [20] Nicol, D. "From monologue to dialogue: improving written feedback processes in mass higher education". , 35(5), pp. 501-517, 2010.
- [21] Yeung, K. and Huang, J. "Development of a remote-access laboratory: a DC motor control experiment". , 52(3), pp. 305-311, 2003.
- [22] Baturay, M. H. and Bay, O. F. "The effects of problem-based learning on the classroom community perceptions and achievement of web-based education students". , 55(1), pp. 43-52, 2010.
- [23] Johnson, D. W. Johnson, R. T. and Stanne, M. B. Cooperative learning methods: a meta-analysis, University of Minnesota. Retrieved January 2013, <<http://www.tablelearning.com/uploads/File/EXHIBIT-B.pdf>>.