



Integration of a hybrid laboratory for learning in digital electronics: an educational experience

Father Alexander Rodriguez, Ing., Jhon Jairo Ramirez-Echeverry, Ph.D , and Felipe Restrepo-Calle, Ph.D 
Universidad Nacional de Colombia, Colombia
faarodriguezpi@unal.edu.co, jjramireze@unal.edu.co, ferestrepoca@unal.edu.co

Abstract– This article describes an educational experience in which a hybrid laboratory consisting of two modalities, remote and hands-on laboratory, was used in a digital electronics course focused on learning a hardware description language. A case study is presented which describes the interaction of students with the hybrid laboratory over a period of 10 weeks, including the number of experiments performed, laboratory reports submitted, and days and hours of access to the remote laboratory. In addition, responses to a question asked of students at the end of the experience, in which they were asked to indicate their preferences for the characteristics of the hybrid laboratory, are analyzed. The results show that the flexibility and accessibility of the remote laboratory were positively valued. The implications of these findings for the design of hybrid laboratories and the teaching of digital electronics are discussed

Keywords– Digital electronics, Verilog learning, Hardware description language, FPGA Laboratory, Remote laboratory, Hybrid laboratory.

Integración de un laboratorio híbrido para el aprendizaje en electrónica digital: una experiencia educativa

Father Alexander Rodriguez, Ing., Jhon Jairo Ramirez-Echeverry, Ph.D, and Felipe Restrepo-Calle, Ph.D 
Universidad Nacional de Colombia, Colombia
faarodriguezpi@unal.edu.co, jjramireze@unal.edu.co, ferestrepoca@unal.edu.co

Abstract– Este artículo describe una experiencia educativa en la que se utilizó un laboratorio híbrido compuesto por dos modalidades: laboratorio remoto y laboratorio hands-on (o presencial), en una asignatura de electrónica digital orientada al aprendizaje de un lenguaje de descripción de hardware. Se presenta un estudio de caso que describe la interacción de los estudiantes con el laboratorio híbrido durante un período de 10 semanas, incluyendo el número de experimentos realizados, los informes de laboratorio entregados y los días y horas de acceso al laboratorio remoto. Además, se analizan las respuestas a una pregunta que se les hizo a los estudiantes al finalizar la experiencia, en la que se les pidió indicar sus preferencias sobre las características del laboratorio híbrido. Los resultados muestran que la flexibilidad y accesibilidad del laboratorio remoto fueron valoradas positivamente. Se discuten las implicaciones de estos hallazgos para el diseño de laboratorios híbridos y la enseñanza de la electrónica digital.

Keywords-- electrónica digital, aprendizaje verilog, HDL, laboratorio con FPGA, laboratorio remoto, laboratorio híbrido.

I. INTRODUCCION

Los avances en sistemas complejos que involucran circuitos integrados han transformado distintos ámbitos de la vida diaria: electrónica de consumo, equipos médicos, comunicaciones, etc., a la vez que prometen seguir involucrándose en campos en evolución como el Internet de las cosas (IoT) [1]. Estos desarrollos involucran temáticas relacionadas con electrónica digital, por lo cual las instituciones de educación superior han creado asignaturas orientadas a su enseñanza. El enfoque tradicional de estas asignaturas implica el uso de diagramas, símbolos y diseños esquemáticos [2]. Así mismo, los diseños pueden ser realizados usando un Lenguaje de Descripción de Hardware (HDL, por sus siglas en inglés) como Verilog o VHDL [3], mejorando la eficiencia y posibilitando la verificación de los diseños en dispositivos lógicos programables (PLD, por sus siglas en inglés).

Los PLDs permiten realizar implementaciones reales acordes con el diseño previamente codificado y, al mismo tiempo, permiten elevar la complejidad de los diseños en comparación con los métodos algo más tradicionales [4]. Entre estos dispositivos, las FPGA (Field Programmable Gate Array) han incrementado su popularidad gracias a su disponibilidad y costo accesible [5] [6]. Las FPGA facilitan el prototipado de circuitos sintetizados a partir de los HDL [7].

En este contexto, uno de los desafíos que han enfrentado las instituciones de educación superior que ofrecen asignaturas para el aprendizaje de los HDL ha sido las dificultades que presentan los estudiantes en el aprendizaje de este tipo de lenguajes [8]. En contraparte, se ha encontrado que los estudiantes mejoran sus competencias y habilidades en estas temáticas gracias a las prácticas que realizan en los laboratorios de asignaturas de electrónica digital [9]. Dado lo anterior, las universidades han incrementado las prácticas con FPGA por medio de actividades que los estudiantes realizan en el laboratorio [10].

En este escenario, existen circunstancias que deben ser tenidas en cuenta, tales como: el incremento en el número de estudiantes ha hecho que la disponibilidad de los recursos de laboratorio haya disminuido [14]; los costos asociados al mantenimiento y actualización de laboratorios pueden ser considerables [15]; es necesario considerar a las personas con condiciones de movilidad restringida o estudiantes a distancia [16]; e incluso la ocurrencia de eventos extraordinarios que pueden generar la interrupción de los procesos educativos, como sucedió con la pandemia de COVID-19 [13].

En consecuencia, las instituciones de educación superior, apoyadas en los avances tecnológicos de las TIC, han creado diferentes opciones de laboratorios que se clasifican de acuerdo con variables como disponibilidad, acceso, costos, etc [11]. En [12] se presenta una clasificación que depende de la presencialidad, distinguiendo entre modalidades de laboratorios tradicionales (TL, por sus siglas en inglés) y laboratorios no tradicionales (NTL, por sus siglas en inglés). Dentro de los laboratorios tradicionales (TL), los laboratorios Hands-On o Tradicionales (TL-HO) corresponden a aquellos entornos donde la experimentación es realizada en forma presencial, contando con el equipamiento necesario en el sitio, dentro del mismo espacio físico y en franjas de tiempo comunes [12]. Por su parte, los laboratorios no tradicionales (NTL) involucran modalidades de tipo remoto y virtual. En concreto, el laboratorio remoto (LR) permite la realización de la práctica mediante la operación o manipulación de equipo a distancia, mediado por algún tipo de interfaz que permita transmitir la realidad del experimento al usuario. Suele ser accesible en cualquier tiempo y lugar con condiciones de conexión adecuadas [11] y [12]. Por último, el laboratorio virtual o simulado (LV) presenta características similares al

remoto en lo que a acceso se refiere, con la diferencia de que se basa en simulación de los entornos o experimentos, los cuales son proporcionados al estudiante a través de alguna interfaz gráfica o software en general [11].

Adicionalmente, [11] y [18] presentan una clasificación adicional según la presencialidad incluyendo la posibilidad del laboratorio híbrido, el cual combina características de los NTL y TL, buscando reunir las ventajas de ambos. Una subclasificación provista por [11] divide los laboratorios híbridos en dos clases: *flipped* y *LaaS*. El primero hace alusión al hecho de realizar prácticas de forma alternada, mientras que el segundo indica que la práctica combina las modalidades integrantes del laboratorio híbrido en un mismo experimento.

En este sentido, en contextos de STEMM (Science, Technology, Engineering, Math and Medicine), este tipo de laboratorios han mostrado eficacia en el aprendizaje por experiencia [13], interés y motivación en la solución de problemas [17], así como en la adquisición de habilidades y efectos positivos en dominios psicomotor y cognitivo [13]. De hecho, la modalidad híbrida de los laboratorios que combina *tradicional+remoto* tendría efectos positivos [12][21], de modo que en [17][22][23], se muestran resultados que apoyan su efectividad y utilidad.

Un antecedente temprano de un laboratorio híbrido es el TriLab [31]. En él fueron incorporadas las tres modalidades (*hands-on + virtual + remoto*), dejando registro en la literatura como una de las primeras iniciativas de este tipo. En la organización de un curso de Control de procesos, la modalidad virtual fue dejada opcional para preparación de las prácticas de laboratorio. La modalidad *hands-on* se mantuvo como era usual (obligatoria) y la de tipo remoto fue utilizada en el aula de clase. Se recogieron percepciones de los estudiantes, las cuales permitieron reconocer un impacto positivo a nivel pedagógico en su utilización. También se generó información para aquellos interesados en desarrollar su propio TriLab bajo la arquitectura, esquema y solución de software predefinido en su investigación. El TriLab, por tanto, también es un modelo de laboratorio híbrido que podría ser replicado en otras disciplinas.

En cuanto a investigaciones sobre laboratorios para el aprendizaje de los HDL, se puede mencionar uno basado en modalidad remota que puede ser integrado como complemento a la modalidad *hands-on* [32]. A partir de la experiencia con los estudiantes, los autores destacaron la aceptación y buena recepción del laboratorio como una herramienta adecuada para llevar a cabo el desarrollo de ejercicios prácticos relacionados con su carrera de interés. Cabe indicar que aunque usan FPGA, la finalidad de su uso puede incluir la revisión de conceptos de arquitectura de circuitos, así como temáticas de diseño digital relacionadas con diseño de bajo consumo (*low-power design*) y procesamiento de imagen.

En otro ejemplo se puede mencionar el FPGA-Watertank [18] que combina las características de un laboratorio remoto y virtual, donde los estudiantes destacaron una buena percepción del mismo. Para ellos, la interacción con el laboratorio fue satisfactoria y generó un valor agregado al aprendizaje dentro del curso de electrónica digital en el cual estaban inscritos. Con todo lo anterior, los autores indican que hay necesidad y oportunidad de explorar e indagar sobre la modalidad de laboratorio híbrido en sus distintas conformaciones y variaciones. A pesar de que en los laboratorios híbridos se han explorado nuevas arquitecturas y formas de conformar los mismos [18], aún falta investigación por realizar con el fin de conocer los efectos en el aprendizaje de los estudiantes. Este tipo de investigaciones podría proporcionar información adicional para los docentes y entidades interesadas en disponer de alternativas al laboratorio tradicional por sí solo, buscando facilitar a los estudiantes su proceso de aprendizaje y la adquisición de habilidades prácticas [19].

Dado lo anterior, este trabajo busca aportar a la evaluación del uso de un laboratorio en modalidad híbrida para el aprendizaje de un HDL. En particular, se analizará el uso que hicieron los estudiantes de un laboratorio híbrido con el objetivo de aprender un HDL y su aplicación en dispositivos FPGA en una asignatura de electrónica digital básica. El laboratorio híbrido integró modalidades *hands-on (HO) + remoto (LR)*. Se descartó la modalidad de laboratorio virtual (LV), debido a que no ofrecía un dispositivo real para implementación posterior a la codificación en un HDL. Esto a causa de que una de las características a tener en cuenta para el desarrollo de prácticas relacionadas con un HDL es la posibilidad de realizar pruebas en un dispositivo FPGA real [2]. El estudio fue llevado a cabo en la Universidad Nacional de Colombia - UNAL con un grupo de 17 estudiantes de ingeniería eléctrica, ingeniería electrónica e ingeniería mecatrónica, quienes asistieron 2 horas a la semana, interactuando con las modalidades integrantes del laboratorio híbrido de forma alternada. Así, el laboratorio híbrido resultante fue de tipo *flipped* de acuerdo con la clasificación provista en [11]. La conformación del laboratorio híbrido en su parte *hands-on* se realizó tomando en cuenta la estructura práctica realizada en semestres previos. Asimismo, se hizo una búsqueda y selección de un entorno o herramienta para ajustar la modalidad *remota*, cuya elección fue la de un laboratorio remoto con FPGA provisto por Labsland [20].

Este artículo está estructurado de la siguiente forma: una sección de metodología (II) que describe el laboratorio híbrido propuesto, el diseño de una intervención educativa así como los participantes y generalidades sobre los datos recolectados. La siguiente sección (III) muestra algunos resultados de la participación de los estudiantes en las actividades planteadas en el laboratorio. Finalmente, se muestra la sección de conclusiones para este trabajo.

II. METODOLOGIA

En esta sección se presenta la descripción del laboratorio híbrido conformado mediante la integración de modalidades *hands-on + remoto* escogidas de acuerdo con el escenario planteado para realizar una intervención educativa. De ésta última, se presenta igualmente el diseño y características tenidas en cuenta para su posterior aplicación tales como tiempos, prácticas y temáticas. Finalmente, se mencionan datos sobre la población de estudiantes con quienes se trabajó y detalles adicionales sobre la duración en el tiempo de esta experiencia educativa.

A. Laboratorio Híbrido propuesto

La asignatura de Electrónica Digital 1 ofrecida por el Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica (DIEE) de la Universidad Nacional de Colombia UNAL - sede Bogotá está disponible para estudiantes de carreras de ingeniería eléctrica, ingeniería electrónica e ingeniería mecatrónica. Esta asignatura se divide en dos componentes, uno de ellos es de tipo magistral mientras que el otro es práctico o llevado a cabo en el laboratorio. Usualmente se destinan, semanalmente, cuatro horas para la parte magistral y dos horas para el laboratorio. Las temáticas que se abordan cubren los temas:

- Lógica combinacional.
- Lógica secuencial.
- Máquinas de estado finito.

El objetivo en el segmento de laboratorio en la asignatura Electrónica Digital 1 es el de diseñar, implementar y evaluar circuitos digitales, usando los conceptos mostrados en el segmento magistral. Por tal razón, el trabajo en la asignatura usualmente involucra tanto el aprendizaje de un HDL, como la experiencia de implementar y verificar diseños en una FPGA. El HDL que se imparte a los estudiantes es escogido por el docente de laboratorio. Siguiendo esta idea, la propuesta en la que se sustenta este trabajo se centra en la conformación de un laboratorio *híbrido* que integra las modalidades *hands-on + remoto*. Se busca seguir cumpliendo con el objetivo para el segmento de laboratorio en la asignatura, integrando un laboratorio remoto (LR) junto a la modalidad *hands-on* (HO) que se viene trabajando tradicionalmente. La Tabla 1 muestra la conformación del laboratorio híbrido bajo la integración de las modalidades *hands-on + remoto*, indicando el espacio y equipo utilizado en cada caso. En la siguiente sección se profundizará en cada una de las modalidades del laboratorio híbrido.

TABLA 1

INTEGRACIÓN DE LAS MODALIDADES *HANDS-ON + REMOTO* DENTRO DEL COMPONENTE PRÁCTICO DEL CURSO DE ELECTRÓNICA DIGITAL 1 EN 2022-2. ELABORACIÓN PROPIA.

Laboratorio Modalidad Híbrida Experiencia de laboratorio propuesta	
Modalidad Remota (LR) Entorno Labsland (Tarjetas con FPGAs remotas)	Modalidad Hands-On (HO) Presencial en Espacio UNAL (Tarjetas FPGAs en físico)

a. Modalidad remota - selección de herramienta

El proceso para escoger una herramienta o entorno de laboratorio remoto comenzó con una búsqueda sistemática en la literatura. Las ecuaciones de búsqueda fueron ajustadas para obtener resultados desde el año 2011. Se emplearon términos tales como FPGA, electrónica digital, laboratorio remoto, práctica remota, entre otros. Se realizó un listado de resultados obtenidos, los cuales fueron depurados hasta obtener 25 nombres de laboratorios remotos o entornos que prometían algún tipo de interacción con un dispositivo FPGA. La depuración continuó mediante la verificación de la disponibilidad de cada uno de ellos, la facilidad y condiciones de acceso. La lista se redujo a 4 opciones [23][24][25] dejando a aquellos que estaban activos o permitían el acceso sin mayor restricción (excepto los de pago por acceso). De estas opciones, resultó escogida Labsland [20][26] principalmente debido a su capacidad de acceso por parte de varios usuarios y estabilidad de la plataforma, además del soporte al usuario. Los demás fueron descartados por no permitir un empleo efectivo de una FPGA o porque la temática pensada en el laboratorio híbrido no podía ser aplicada de forma satisfactoria. Una de las opciones presentaba un acceso poco fluido y sin la capacidad de soportar el acceso de varios usuarios de manera concurrente. Otras opciones, aunque estaban plenamente operativas, no permitían acceso directo a una FPGA para la realización de pruebas previo diseño con un HDL; en otro caso, los experimentos estaban previamente definidos a tal punto que no existía un margen de maniobra respecto a la codificación en un HDL.

Labsland [20] es una plataforma de pago que integra servicios de laboratorios remotos en diversas áreas de conocimiento, entre ellas electrónica digital. Cuenta con modelos de FPGA disponibles para implementación y verificación de diseños codificados en lenguajes HDL como VHDL y Verilog. El código puede ser introducido y verificado como se observa en el editor de la Fig. 1 antes de ser sintetizado y enviado a un dispositivo ubicado en la red de laboratorios asociados en varias partes del mundo. El estudiante tiene la opción de realizar las pruebas desde un navegador web, observando el dispositivo FPGA mediante una cámara, con un tiempo disponible de 2:30 minutos. La interfaz de observación del resultado en la FPGA se presenta en la Fig. 2. Hay

disponibilidad de acceso a cualquier hora y es posible realizar sucesivas pruebas y verificaciones sin restricción, acorde con la licencia adquirida.



Fig. 1 Editor de Verilog en el entorno de trabajo Labsland [29]



Fig. 2 Tarjeta FPGA remota en el entorno de trabajo Labsland [29].

El flujo de trabajo típico con esta herramienta consiste en realizar la codificación en un HDL usando la interfaz del editor. Una vez se construye el código, se trabaja en los posibles errores que puedan generarse justo después de terminada la verificación por parte del software. Cuando el código está listo y libre de errores, la herramienta permite el envío del código sintetizado a la FPGA. Inmediatamente después de realizada la implementación en la tarjeta con FPGA, mediante la interfaz mostrada en la Fig. 2, el usuario puede realizar las pruebas y verificaciones del funcionamiento del diseño previamente codificado usando los botones y pulsadores allí dispuestos.

Por otra parte, los datos recolectados gracias a la interacción de los estudiantes en el laboratorio remoto con FPGA provisto por Labsland [20] están clasificados en dos tipos de interacción: *ide* y *experimento*. En este contexto, un *ide* (entorno de desarrollo integrado) se refiere al acceso y actividad del estudiante en el editor de código presentado por Labsland (Fig. 1). Este se crea cuando el estudiante ingresa al entorno de Labsland, mediante un enlace web a través de un

navegador. Cuando el estudiante realiza la síntesis del código en verilog sin errores, puede solicitar el acceso a una FPGA para la implementación y verificación del diseño codificado. Es allí donde comienza un *experimento*, el cual consiste en el acceso a una FPGA con el diseño cargado y en funcionamiento para que el estudiante pueda realizar pruebas y verificación. La FPGA está alojada en alguna parte del mundo perteneciente a la red de Labsland. Cuando el estudiante interactúa con la FPGA y realiza las pruebas, es cuando el *experimento* está siendo llevado a cabo. Una vez el estudiante termina de probar su diseño, vuelve al *ide* para realizar ajustes al mismo o bien puede terminar la sesión web. No obstante, es posible que en ocasiones el estudiante haya ingresado solamente al editor de código *ide* sin realizar el *experimento* con FPGA.

b. Modalidad Hands-on (HO)

La práctica en el componente de laboratorio de Electrónica Digital 1 en la Universidad Nacional de Colombia UNAL usualmente ha sido llevada a cabo con equipos desplegados de manera presencial, organizando grupos de trabajo o *equipos* de 3 integrantes. Se cuenta con FPGAs de distintos fabricantes, entre las cuales se encuentran las de Intel (antes Altera) [27]. Asimismo, se cuenta con herramientas de software de tipo *freeware* o *shareware* compatibles con la implementación en las tarjetas de desarrollo FPGA disponibles en el inventario del laboratorio. Un ejemplo de software es Quartus, provisto por Intel [28], el cual permite trabajar a los estudiantes las temáticas propuestas para la asignatura. Adicionalmente, se tiene acceso a instrumentos de medición tales como multímetros y osciloscopios. La Fig. 3 muestra el entorno de trabajo típico para esta modalidad.

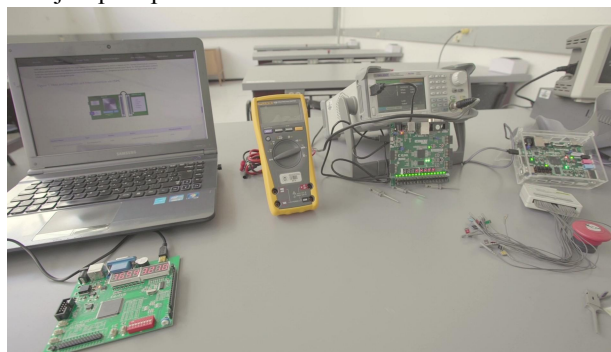


Fig. 3 Laboratorio de prácticas en entorno de trabajo tradicional (Hands-on) en la Universidad Nacional de Colombia - UNAL [30].

El flujo de trabajo típico en la modalidad *hands-on* consiste en la codificación con un HDL de un circuito usando un software de diseño asistido adecuado para la tarea. Se realizan verificaciones respecto a la sintaxis del código, para proceder luego con simulaciones del funcionamiento del circuito descrito. Una vez han finalizado las simulaciones, se realiza la síntesis del código y el posterior envío de información a la FPGA en físico. Es en esta etapa de implementación donde se

realizan las pruebas y verificación del circuito propuesto y descrito usando un HDL.

B. Diseño del estudio

La experiencia fue planteada bajo el diseño de un estudio de caso que permitió la recolección de datos sobre la actividad de los estudiantes en el laboratorio remoto y sobre las preferencias de los estudiantes por las características que se encuentran en las modalidades que integran el laboratorio híbrido. El tipo de muestreo fue por conveniencia, no probabilístico, dado que la experiencia fue diseñada para ser desarrollada con los estudiantes de la Universidad Nacional de Colombia - UNAL, sede Bogotá, inscritos en la asignatura “Electrónica Digital 1”. En relación con las prácticas, se dispuso de la realización de 6 prácticas de laboratorio, desarrollando una por semana (como máximo 2 semanas según circunstancias).

Las prácticas de laboratorio incorporaron codificación en el lenguaje Verilog, simulación de los diseños codificados independiente de la modalidad de laboratorio para cualquier práctica e implementación en FPGA acorde a la modalidad adscrita a la misma (*remota* o *hands-on*). Los estudiantes tenían libertad respecto de la modalidad de laboratorio a usar, pero se les sugería constantemente el uso de la modalidad de laboratorio respectiva para cada una de las prácticas. La Tabla 2 presenta las 6 prácticas que fueron realizadas, cada una con su modalidad sugerida y temática correspondiente.

TABLA 2

ORGANIZACIÓN DE PRÁCTICAS CON LAS MODALIDADES INSCRITAS DENTRO DEL LABORATORIO HÍBRIDO PROPUESTO (HO: HANDS-ON, LR: LABORATORIO REMOTO). ELABORACIÓN PROPIA.

Nro Práctica	Temática	Modalidad sugerida
1	Lógica Combinacional Sumador 1bit - 4bit	HO
2	Lógica Combinacional Decodificador hexadecimal a 7 segmentos	LR
3	Lógica Secuencial PWM	LR
4	Lógica Secuencial Contador 00-59	HO
5	Máquinas de Estado Finito Implementación básica	HO
6	Máquinas de Estado Finito Aplicación conteo de entrada de un Parking	LR

Antes de las 6 prácticas mostradas en la Tabla 2, hubo 3 sesiones de instrucción en las que se presentó a los estudiantes el flujo de trabajo para la modalidad *hands-on* y *remota*. En la primera modalidad, una sesión se destinó para la presentación de las herramientas de trabajo como programas de diseño asistido (Quartus Software [28]), tarjetas FPGA disponibles en inventario y conexión de la tarjeta FPGA. En la segunda sesión se mostraron los métodos de simulación y los circuitos iniciales básicos de entrenamiento e iniciación a Verilog. Por lo tanto, se mantuvo la estructura y forma de trabajo tradicional para ser inscrita como modalidad *hands-on* dentro del laboratorio en modalidad híbrida. En la segunda modalidad, en la tercera sesión de instrucción, se presentó el entorno Labsland [20], la creación de usuarios, ingreso a la herramienta y la forma de interactuar con la FPGA remota, al igual que se realizó una prueba básica con Verilog a modo de introducción para los estudiantes.

Las prácticas fueron realizadas por los estudiantes organizados en *equipos* de trabajo con tres integrantes. Con el fin de analizar la interacción de los estudiantes con las herramientas del laboratorio remoto, se recolectaron datos sobre la dispersión de los experimentos en el tiempo de la experiencia (10 semanas), número de experimentos por equipo y duración de experimentos por equipo. De igual forma, se recolectaron datos de acceso en el tiempo al laboratorio (días y horas preferentes en las que cada equipo ingresó) y la dispersión de accesos a lo largo del tiempo desde el comienzo hasta el final de la experiencia. En cuanto al laboratorio usando la modalidad *hands-on*, se analizaron datos a partir de los entregables hechos por cada equipo.

Adicionalmente a los datos de interacción de los estudiantes con el laboratorio remoto, se hizo una recolección de datos mediante un formulario en línea que buscaba conocer las preferencias de los estudiantes por alguna característica del laboratorio remoto y *hands-on* (o una de sus componentes). El formulario fue enviado a los estudiantes una vez la experiencia finalizó. De acuerdo con su percepción, ellos podían seleccionar una o varias opciones a la siguiente pregunta:

¿Qué elementos o características del laboratorio híbrido te llamaron más la atención?

Sobre el laboratorio remoto:

1. Acceso desde cualquier equipo con conexión a Internet
2. Acceso en cualquier momento del día.
3. Uso del Laboratorio Remoto sin necesidad de instalación de programas.
4. Interfaz gráfica del editor de Verilog en el Laboratorio Remoto.
5. Interfaz de la tarjeta remota y sus componentes virtuales (interruptores, displays, etc).
6. Posibilidad de practicar la codificación verilog en cualquier momento.

Sobre el laboratorio hands-on:

7. Interfaz gráfica del editor de Verilog en el software Quartus.
8. Interacción con la tarjeta en físico y sus componentes (interruptores, displays, etc).
9. Interfaz de trabajo con software Quartus en su propio computador.
10. Posibilidad de realizar una simulación antes de implementarla.
11. Medición de voltajes, corrientes o cualquier variable eléctrica en la tarjeta en físico.

C. Aplicación de la intervención educativa

En esta experiencia educativa participaron 17 estudiantes de la asignatura 'Electrónica Digital 1' de la Universidad Nacional de Colombia - UNAL sede Bogotá, organizados en grupos de trabajo o *equipos* de 3 integrantes, para un total de 6 equipos de trabajo. El horario destinado al componente práctico presencial de la asignatura (modalidad *hands-on*) fue los días jueves de 11 AM a 1 PM. Los estudiantes inscritos en la asignatura pertenecen a los programas de ingeniería eléctrica, electrónica y mecatrónica. La edad de los estudiantes participantes va desde los 19 a los 25 años. De ellos, 14 eran hombres y 3 mujeres. Las prácticas diseñadas fueron aplicadas en los meses de septiembre, octubre y las primeras dos semanas de noviembre de 2022, correspondiente al segundo semestre académico, con un total de 10 semanas.

Los datos obtenidos de la experiencia en el laboratorio remoto fueron recolectados gracias a la colaboración del equipo de Labsland, quien ha proporcionado datos sobre el acceso al laboratorio remoto por parte de los estudiantes.

III. RESULTADOS

A. Interacción con el laboratorio remoto y el laboratorio hands-on durante la experiencia

La recopilación de datos procedentes de ambas modalidades permitió contrastar la regularidad de acceso al laboratorio remoto y la presentación de prácticas usando recursos del laboratorio hands-on. Esto se observa en la Fig. 4, donde los estudiantes hicieron uso del laboratorio remoto desde 2022-09-15, fecha en la que realizaron un experimento inicial. En esa fecha cada equipo ingresó a realizar verificaciones de funcionamiento de la cuenta asignada, así como a conocer la interfaz de Labsland y el procedimiento para realizar la síntesis y prueba de un código de demostración.

En la Fig. 4 también se puede observar que los estudiantes, luego del primer contacto con el laboratorio remoto (fecha: 2022-09-15), comenzaron a usarlo a partir de la segunda práctica de la asignatura (2022-09-29). La primera práctica fue

planteada para que los estudiantes la realizaran en el laboratorio hands-on (2022-09-22). Vale mencionar que, aunque se hizo la sugerencia de usar determinada modalidad de laboratorio en función de la práctica a realizar (Ver Tabla 2 - Metodología), los equipos emplearon los recursos de las dos modalidades a conveniencia.

En general, se puede observar que los estudiantes realizaron experimentación con una FPGA remota de manera frecuente hasta el final de la intervención educativa, exceptuando los estudiantes del equipo 5. El gráfico de dispersión (Fig. 4) también muestra que la distribución de los experimentos es relativamente homogénea en el tiempo aunque varían en número en función de la dinámica de cada equipo de trabajo. Los equipos 3 y 4 presentan un número de experimentos mayor en comparación con los equipos restantes, pero conservando relativa homogeneidad en la dispersión de los mismos. Adicionalmente, a partir del análisis de los informes de las prácticas entregados por los estudiantes, se evidenció que los estudiantes lograron hacer la implementación de la mayoría de las prácticas; sólo dos equipos no lograron alcanzar esta etapa en dos prácticas de laboratorio.

B. Experimentos con la FPGA en el laboratorio remoto

Los datos provistos gracias a la interacción de los estudiantes en el laboratorio remoto permiten indagar sobre la dinámica relacionada con el número de experimentos por equipo, duración de los mismos, al igual que otros datos de interés sobre el día y hora de acceso por parte de los estudiantes.

La Fig. 5 muestra el número de experimentos total de cada equipo de trabajo. El equipo 5 realizó el menor número de experimentos (28 en total), mientras que el equipo 4 contó con el mayor número de ellos, 162 en total. La duración promedio de cada experimento, teniendo en cuenta todos los experimentos realizados por todos los equipos de trabajo, fue de 91 segundos aproximadamente. Los experimentos del equipo 5 presentan el mayor valor (134.8 segundos) y los experimentos de los equipos 1 y 3 duraron en promedio 82 y 85 segundos respectivamente.

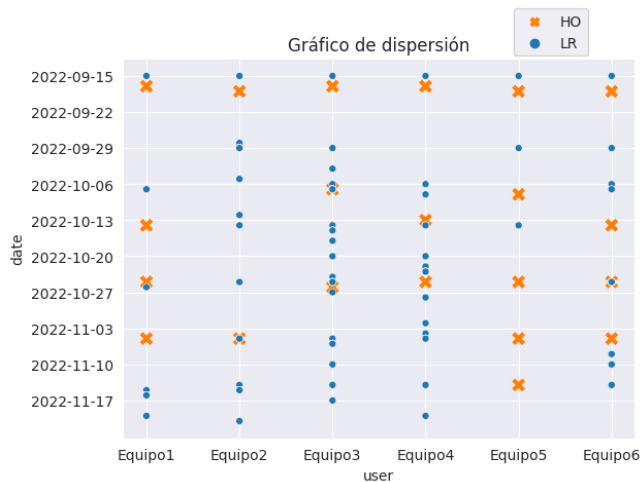


Fig. 4 Accesos a experimentos realizados en el laboratorio remoto (LR) y presentación de prácticas de laboratorio usando el laboratorio presencial (HO) - desde septiembre 15 a noviembre 20 de 2022. Elaboración propia.

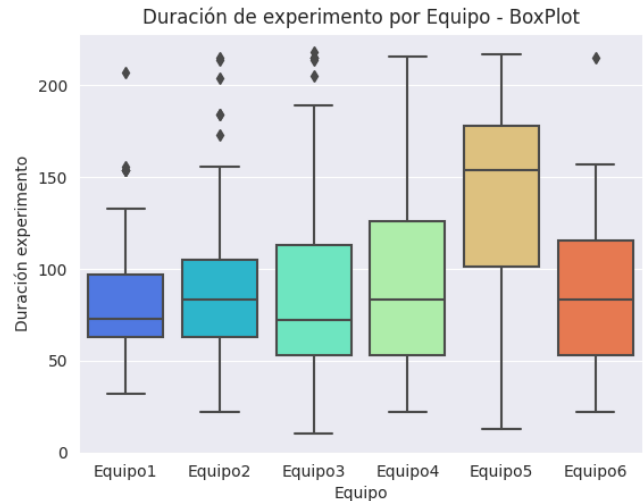


Fig. 6 Diagrama de cajas de la duración de experimentos por equipo. Elaboración propia.

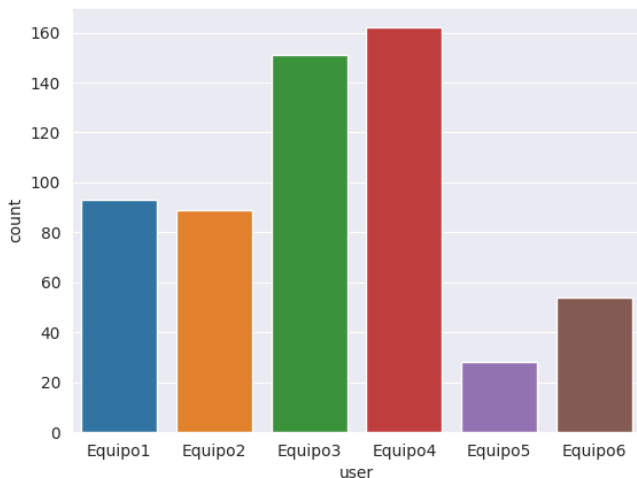


Fig. 5 Número de experimentos registrados por equipo de trabajo. Elaboración propia.

La Fig. 6 muestra la distribución de la duración de los experimentos realizados por cada equipo de trabajo. Para el equipo 5 indica que el 50% de sus experimentos presentan valores de duración mayores a 100 segundos y menores a 175 segundos. El equipo 1 presenta la menor dispersión de la duración de sus experimentos. A medida que se recorren los equipos desde el 1 hasta el 6, la dispersión de la duración del experimento va aumentando. No obstante, el equipo 5 es el que presenta mayor dispersión de estos valores. Los equipos 1, 2 y 3 presentan un mayor número de valores atípicos (outliers), pero la dispersión de sus datos se concentra entre valores mayores a 50 segundos y menores a 110 segundos, aproximadamente.

Entretanto, las preferencias de días de acceso de los estudiantes al laboratorio remoto se muestran en la Fig. 7. Los días de acceso a experimentación menos preferidos fueron los días martes y domingo, mientras que el día viernes presentó la mayor preferencia para la experimentación. Esto podría deberse a la solicitud de la entrega de informes de práctica para el día viernes en dos ocasiones. Las prácticas solicitadas para ese día de la semana fueron la #2 y #3, que estaban pensadas para ser realizadas en la modalidad remota. Este hecho da indicios sobre el manejo del tiempo por parte de los estudiantes: realizaron estas dos prácticas el día límite en que debían hacer las entregas de la práctica remota. Adicionalmente, una cuota importante en el número de experimentos fue realizada el día jueves, en coincidencia con el día en que los estudiantes asistían a la clase presencial de práctica de la asignatura (laboratorio hands-on).

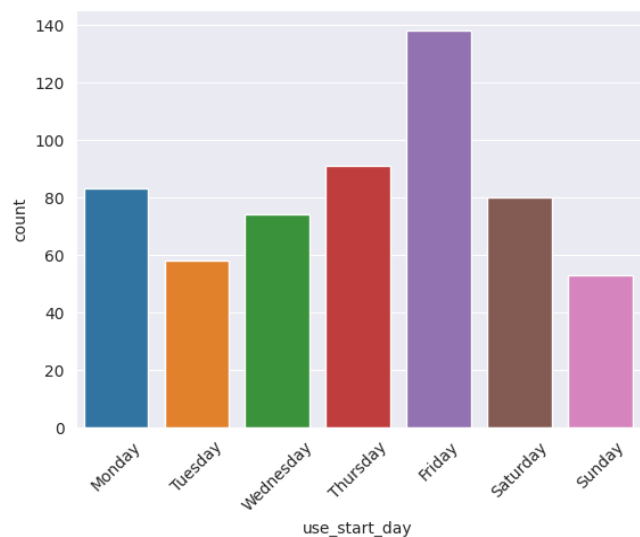


Fig. 7 Frecuencia de uso de experimento por día. Elaboración propia.

En lo que concierne a franjas de horario preferidas en el día para el acceso al laboratorio remoto, se presenta una preferencia de acceso importante en franjas horarias previstas entre las 6 PM y las 12 de la medianoche, como lo muestra la Fig. 8. Se constituye así un bloque de tiempo en el cual los estudiantes trabajaron de manera importante. Esto es, los equipos de trabajo accedieron en buena medida al laboratorio remoto en horas extraclase, teniendo en cuenta que tenían acceso a préstamo de FPGA a modo de práctica libre según disponibilidad del recurso entre las 7 AM y 6 PM.

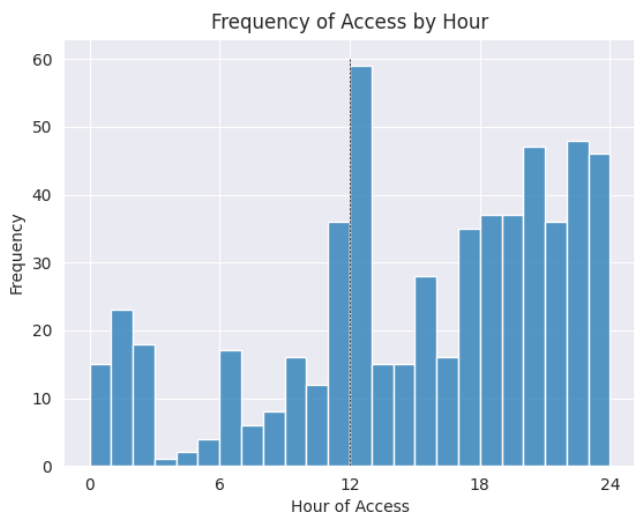


Fig. 8 Franjas de acceso por hora para experimentación en el laboratorio remoto. Elaboración propia.

La contribución a los experimentos realizados desde la medianoche hasta las 6 AM puede ser explicada por el hecho de que los estudiantes iniciaron sesiones de trabajo en la franja de la noche y continuaron realizando alguna actividad de experimentación pasada la medianoche. La hora con mayor número de experimentos fue registrada desde las 12 del mediodía hasta la 1 PM los días jueves, en coincidencia con el horario de práctica de laboratorio de la asignatura en la universidad.

C. Percepción de los estudiantes sobre el laboratorio híbrido

Los resultados de la pregunta de percepción sobre las características del laboratorio híbrido mostraron que la totalidad de estudiantes (17 participantes) valoraron positivamente la facilidad de acceso que brindó el laboratorio remoto sin importar la hora del día o equipo usado para el ingreso al mismo (ver Fig. 9). Así mismo, 16 estudiantes valoraron el hecho de no tener que instalar programas para el acceso. A pesar de que las características que se asocian al laboratorio remoto ganaron la mayor atención de los estudiantes, 14 de ellos estimaron provechoso el hecho de tener acceso e interacción con una tarjeta de desarrollo FPGA en físico (pregunta 8), algo ligeramente por encima de la

valoración dada a la interfaz del laboratorio remoto con FPGA mostrada a través de la cámara de manera remota (pregunta 5). De hecho, la dispersión de los experimentos mostrados en la Fig. 4 muestra que aún con las bondades de acceso del laboratorio remoto, los equipos escogieron presentar varias prácticas en modalidad hands-on.

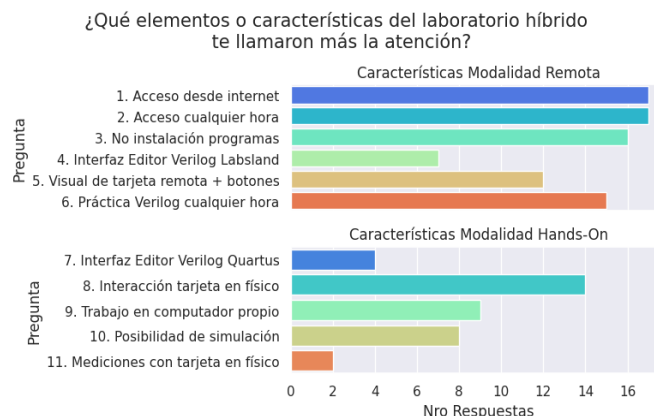


Fig. 9 Resultado a la pregunta sobre las preferencias de las características del laboratorio híbrido por parte de los estudiantes. Elaboración propia.

Finalmente, llama la atención que aún cuando los estudiantes involucrados en la experiencia están cursando carreras que exigen la habilidad para realizar mediciones de manera competente en varias asignaturas, la última opción sobre la medición de variables eléctricas con tarjeta en físico (pregunta 11) no fue tan valorada como era esperable.

IV. CONCLUSIONES

La finalidad de este trabajo fue proponer un laboratorio en modalidad híbrida para el aprendizaje de un HDL y reportar la experiencia de su uso en la asignatura de electrónica digital en la Universidad Nacional de Colombia. El uso del laboratorio híbrido permitió mostrar la actividad e interacción de los estudiantes en las modalidades *remota* + *hands-on*. Los datos de interacción con el laboratorio remoto fueron provistos por la plataforma de Labsland. Las preferencias de los estudiantes hacia determinadas características del laboratorio híbrido se obtuvieron por medio de una encuesta.

Entre los resultados se destaca el número de experimentos por equipo y la duración de los mismos. De igual forma, se mostraron resultados sobre el acceso al laboratorio remoto en el tiempo y la presentación de prácticas en modalidad hands-on. Los días y horas de acceso preferidas por los estudiantes para el ingreso también fueron relacionadas en el presente trabajo. En cuanto a la participación en esta experiencia educativa, se puede concluir que los estudiantes hicieron uso del laboratorio remoto a pesar de que tenían la posibilidad de usar el laboratorio hands-on, teniendo en cuenta

la información sobre los accesos y experimentos realizados por cada equipo de trabajo.

Acercas de la ejecución de las actividades, los equipos de trabajo cumplieron en su gran mayoría con el flujo de trabajo propuesto, ya que todos ellos realizaron implementaciones en una FPGA remota o en la modalidad hands-on. Así, se dió cumplimiento a la etapa de implementación y verificación del diseño en una FPGA, previa codificación en un HDL, como parte del objetivo de aprendizaje del componente práctica o laboratorio de la asignatura Electrónica Digital 1. Sólo en dos entregas no se alcanzó esta etapa del flujo de trabajo por parte de dos equipos de trabajo.

Los resultados cuantitativos sobre el uso del laboratorio remoto concuerdan con una de las características que los estudiantes valoraron de manera positiva en las respuestas a la encuesta: la posibilidad de conectarse al laboratorio remoto vía Internet a cualquier hora. Esto significa que el laboratorio remoto se convirtió en un complemento al laboratorio presencial para el aprendizaje de los estudiantes en horarios extraclase. Sin embargo, dados algunos datos sobre la interacción de los estudiantes con la herramienta remota, es posible que existan inconvenientes en la administración del tiempo extraclase por parte de los estudiantes. Esta conclusión, no obstante, requiere de evidencias adicionales para asegurar las características y posibles causas acerca de la administración del tiempo de estudio.

El laboratorio remoto no sólo resultó una herramienta útil para la práctica extraclase, sino también durante la clase de componente práctica o laboratorio de la asignatura. Dados los datos de acceso al laboratorio remoto, se puede concluir que éste fue usado como complemento para mejorar la práctica y por ende, el aprendizaje de los estudiantes. Lo anterior debido a que el amplio acceso al laboratorio remoto no impidió que los equipos hayan presentado prácticas cuyo resultado fue verificado y probado usando tarjetas FPGA en físico, aún en prácticas planteadas para que su realización fuera usando el laboratorio remoto.

Como trabajo futuro se podría diseñar un estudio para conocer las estrategias de administración del tiempo para la presentación de tareas por parte de los estudiantes. Así mismo, se podría complementar el estudio de caso involucrando otras variables tales como el desempeño académico y dar razón sobre el efecto de usar la modalidad híbrida. Además, se podría ampliar la recolección de datos cualitativos para acceder a información que permita argumentar respecto a variables como la motivación en el aprendizaje. Finalmente, sería de interés evaluar otras experiencias similares en otras instituciones y con distintas temáticas, para establecer la utilidad y pertinencia de esta clase de alternativas en la organización de un laboratorio híbrido.

Los resultados de esta experiencia han proporcionado evidencia empírica de la utilización de un laboratorio híbrido para aprender un HDL. La combinación de modalidades remota + hands-on puede ser beneficiosa para los estudiantes, en vista de los resultados obtenidos sobre el acceso al laboratorio remoto, preferencias de acceso en el tiempo y características señaladas como importantes por parte de los estudiantes. Estos hallazgos sugieren que el uso de laboratorios híbridos podría ser una herramienta útil para mejorar el aprendizaje de la electrónica digital en contextos educativos.

REFERENCIAS

- [1] Cano-Quiveu, G., Ruiz-De-Clavijo-Vazquez, P., Bellido-Diaz, M. J., Guerrero-Martos, D., Viejo-Cortes, J., & Juan-Chico, J. An Integrated Digital System Design Framework With On-Chip Functional Verification and Performance Evaluation. *IEEE Access*, 9, 161383–161394. 2021. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3132188>
- [2] Donzellini, G., & Ponta, D.. Digital design laboratory. *Proceedings of the Biennial Baltic Electronics Conference, BEC, 2016-November*, 67–70. 2016. <https://doi.org/10.1109/BEC.2016.7743730>
- [3] Harris, D. M., & Harris, S. L. Digital design and computer architecture. In *Digital Design and Computer Architecture, 2nd Edition* (Second). Morgan Kaufmann. 2012.
- [4] Boluda, J. C., Peiro, M. A., Torres, M. A. L., Girones, R., & Palero, R. J. C.. An active methodology for teaching electronic systems design. *IEEE 2006 Transactions on Education*, 49(3), 355–359. <https://doi.org/10.1109/TE.2006.879247>
- [5] Ellervee, P., Reinsalu, U., Arhipov, A., Ivask, E., Tammemäe, K., Evarston, T., & Sudnitson, A. HDL-s and FPGA-s in digital design education. *19th EAEIE (European Association for Education in Electrical and Information Engineering) Annual Conference - Formal Procs*, 37–41. 2008. <https://doi.org/10.1109/EAEIE.2008.4610155>
- [6] Cifredo-Chacón, M. D. L. Á., Quirós-Olozábal, Á., & Guerrero-Rodríguez, J. M. . Computer architecture and FPGAs: A learning-by-doing methodology for digital-native students. *Computer Applications in Engineering Education*, 23(3), 464–470. 2015. <https://doi.org/10.1002/cae.21617>
- [7] Suryawan, F. A project-based approach to FPGA-aided teaching of digital systems. *2017 4th International Conference on Electrical Engineering, Computer Science and Informatics (EECSI)*, 1–6. 2017. <https://doi.org/10.1109/EECSI.2017.8239177>
- [8] Becker, K. A web based tool for teaching hardware design based on the plain simple hardware description language. *2014 IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON)*, 01, 957–960. 2014.
- [9] Jiménez-Fernández, C. J., Oliva, C. B., Fernández, P. P., Potestad-Ordóñez, F. E., & Valencia-Barrero, M. An Academic Approach to FPGA Design Based on a Distance Meter Circuit. *IEEE Revista Iberoamericana de Tecnologías Del Aprendizaje*, 15(3), 123–128. 2020. <https://doi.org/10.1109/RITA.2020.3008343>
- [10] Petrescu, I., Păvăloiu, I.-B., & Drăgoi, G. Digital Logic Introduction Using FPGAs. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 180, 1507–1513. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2015.02.299>
- [11] Velosa, J. D. *Diseño de laboratorios híbridos para la enseñanza de ingeniería de manufactura* [Tesis de doctorado, Universidad EAN]. 2020. <http://hdl.handle.net/10882/10110>.
- [12] Brinson, J. R. Learning outcome achievement in non-traditional (virtual and remote) versus traditional (hands-on) laboratories: A review of the empirical research. *Computers and Education*, 87, 218–237. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2015.07.003>
- [13] Bhute, V. J., Inguva, P., Shah, U., & Brechtelsbauer, C. Transforming traditional teaching laboratories for effective remote

delivery—A review. *Education for Chemical Engineers*, 35, 96–104. 2021. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ece.2021.01.008>

[14] Amine Moulay, T., Ernesto, F., Abdelmoula, A., Naima, T., & Abdessamad, M. Comparative Study of Traditional, Simulated and Real Online Remote Laboratory: Student's Perceptions in Technical Training of Electronics. *Int Journal Online Biomed Eng*, 17(05), 33–48. 2021.

[15] Esposito, G., Mezzogori, D., Reverberi, D., Romagnoli, G., Ustenko, M., & Zammori, F. Non-Traditional Labs and Lab Network Initiatives: A Review. *International Journal of Online and Biomedical Engineering (IJOE)*, 17(5). 2021. <https://doi.org/10.3991/ijoe.v17i05.21949>

[16] Post, L. S., Guo, P., Saab, N., & Admiraal, W. Effects of remote labs on cognitive, behavioral, and affective learning outcomes in higher education. *Computers & Education*, 140, 103596. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2019.103596>

[17] Abdulwahed, M. *Towards enhancing laboratory education by the development and evaluation of the "TriLab": a triple access mode (virtual, hands-on and remote) laboratory*. Loughborough University. 2010. <https://hdl.handle.net/2134/6355>

[18] Rodriguez-Gil, L., Garcia-Zubia, J., Orduña, P., & López-de-Ipiña, D. Towards New Multiplatform Hybrid Online Laboratory Models. *IEEE Transactions on Learning Technologies*, 10(3), 318–330. 2017. <https://doi.org/10.1109/TLT.2016.2591953>

[19] Korud, V., Hamola, O., Rendzinyak, S., & Gajduchok, O. The advantages of the hybrid laboratory work on electrical engineering. *2015 16th International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE)*, 81–83. 2015. <https://doi.org/10.1109/CPEE.2015.7333343>

[20] *LabsLand - Sobre nosotros*. Retrieved December, 2022, from <https://labsland.com/es/about>

[21] Ayodele, K. P., Inyang, I. A., & Kehinde, L. O. An iLab for Teaching Advanced Logic Concepts With Hardware Descriptive Languages. *IEEE Transactions on Education*, 58(4), 262–268. 2015. <https://doi.org/10.1109/TE.2015.2395996>

[22] AbuShanab, S., Winzker, M., Brück, R., & Schwandt, A. A study of integrating remote laboratory and on-site laboratory for low-power education. *2018 IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON)*, 405–414. 2018. <https://doi.org/10.1109/EDUCON.2018.8363259>

[23] Winzker, M., & Schwandt, A. Open Education Teaching Unit for Low-Power Design and FPGA Image Processing. *2019 IEEE Frontiers in Education Conference (FIE)*, 1–9. 2019. <https://doi.org/10.1109/FIE43999.2019.9028694>

[24] Kloda, R., & Piwiński, J. E2LP remote laboratory: Evolution of the system and lessons learned. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 543, 799–809. 2017. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48923-0_85

[25] Morgan, F., O'Loughlin, D., Audiger, J., Boyer, Y., Timlin-Canning, N., Kępa, K., Cawley, S., Gallivan, I., Bakó, L., & Callaly, F. Vicilogic 2.0: Online Learning and Prototyping of Digital Systems Using PYNQ-Z1/-Z2 SoC. *2018 International Symposium on Rapid System Prototyping (RSP)*, 76–82. 2018. <https://doi.org/10.1109/RSP.2018.8631990>

[26] Orduña, P., Rodriguez-Gil, L., Garcia-Zubia, J., Angulo, I., Hernandez, U., & Azcuenaga, E. LabsLand: A sharing economy platform to promote educational remote laboratories maintainability, sustainability and adoption. *2016 IEEE Frontiers in Education Conference (FIE)*, 1–6. 2016. <https://doi.org/10.1109/FIE.2016.7757579>

[27] Intel, N. Intel Completes Acquisition of Altera. Intel. <https://newsroom.intel.com/news-releases/intel-completes-acquisition-of-altera/>. 2015

[28] Intel. FPGA design software - Intel® quartus® prime. Intel. Retrieved February 2023, from <https://www.intel.com/content/www/us/en/products/details/fpga/development-tools/quartus-prime.html>

[29] LabsLand. Labsland.com. Retrieved February 2023, from <https://labsland.com/es/labs/fpga-llstd1>

[30] Universidad Nacional de Colombia - Facultad de ingeniería. INGENIERÍA ELECTRÓNICA - Laboratorio de Electrónica Digital y Microprocesadores. Facultad de Ingeniería UNAL. 2020. <https://ingenieria.bogota.unal.edu.co/es/formacion/pregrado/ingenieria-electronica.html>

[31] Abdulwahed, M., & Nagy, Z. K. Developing the TriLab, a triple access mode (hands-on, virtual, remote) laboratory, of a process control

rig using LabVIEW and Joomla. *Computer Applications in Engineering Education* 21 (4), 614–626. 2013. <https://doi.org/10.1002/cae.20506>

[32] Winzker, M., & Schwandt, A. (2019). Open Education Teaching Unit for Low-Power Design and FPGA Image Processing. *IEEE Frontiers in Education Conference (FIE)*, 1–9. 2019. <https://doi.org/10.1109/FIE43999.2019.9028694>