

Sistema de Monitorización Automática del Pulso Cardíaco como Experiencia ABP

N. Medrano, B. Calvo, A. Márquez, J. Pérez-Bailón,
A. Martínez-Nieto

Departamento de Ingeniería Electrónica y Comunicaciones
Universidad de Zaragoza
Zaragoza, España

{nmedrano,becalvo,amarquez,jorgepb,almartinez}@unizar.es

D. Antolín

Departamento de Electrónica
Escuela Universitaria Politécnica de La Almunia
La Almunia de Doña Godina, España
dantolin@unizar.es

Abstract—Este trabajo presenta una experiencia de aprendizaje basado en proyectos desarrollada en tercer curso del Grado en Física de la Universidad de Zaragoza. Los alumnos integran los conocimientos teóricos y experimentales adquiridos en la asignatura Técnicas Físicas II, completando todos los pasos para diseñar un sistema de medida automatizada de una señal biométrica como es el pulso cardíaco: sensor, acondicionador, sistema de adquisición, procesamiento y visualización de resultados, con especial hincapié en la extracción de información gracias a la automatización del proceso de medida y su procesado matemático mediante técnicas avanzadas como es la transformada de Fourier, todo ello empleando herramientas software de dominio público y código abierto.

Keywords—ABP, sistema de medida, instrumentación inteligente, Python

I. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de las tecnologías electrónicas ha dado lugar en los últimos años a la proliferación de procesos de supervisión y medida en laboratorios científico-tecnológicos, industriales e incluso en entornos públicos, monitorizando multitud de parámetros físicos y químicos para su seguimiento, control o actuación. Empleando dichas tecnologías es posible desarrollar sistemas cada vez más compactos y precisos, que requieran menor consumo de energía y permitan transmitir la información empleando diversos protocolos de comunicaciones tanto por cable como inalámbricos.

Desde el punto de vista técnico, introducirse en el mundo de los sistemas de instrumentación y medida implica la adquisición de conocimientos y habilidades en diferentes ámbitos, que abarcan el diseño y caracterización de circuitos electrónicos de calibrado y acondicionamiento de sensores, manejo de instrumentación específica o desarrollo de algoritmos de extracción de información a partir de los datos obtenidos por el sistema de medida.

El Grado en Física que se imparte en la Universidad de Zaragoza combina contenidos teóricos con instrumentales [1]; dentro de estos últimos participa el Área de Electrónica, con el objetivo de proporcionar al estudiante las herramientas necesarias para poder abordar con éxito cualquier tipo de problema experimental. En este sentido, usualmente, el alumno de Grado cuenta con unas condiciones de contorno que fijan de forma clara el recorrido a seguir para completar la actividad encomendada por el profesorado, en ocasiones incluso asignando específicamente responsabilidades a los propios estudiantes, en caso de trabajos en grupo. Con ello, los grados de libertad que tiene el estudiante en el proceso de resolución de un problema experimental son restringidos,

limitando la capacidad de decisión, selección de posibles soluciones y actuación para un problema concreto, habilidades que les serán demandadas en el futuro desempeño de su actividad laboral. El proyecto propuesto pretende corregir estas ausencias, proponiendo una actividad en la cual los estudiantes deberán llevar a cabo la implementación y validación experimental de un sistema de medida electrónico a partir de unas especificaciones básicas. Todo ello, introduciendo al alumno en el proceso completo de desarrollo de un producto definitivo, que incluye desde la definición de especificaciones iniciales, diseño teórico, verificación de comportamiento por simulación software, búsqueda y selección de componentes comerciales, construcción del prototipo, comprobación de su funcionamiento y desarrollo de un sistema de adquisición automático por computador con visualización gráfica de la información.

La experiencia ha sido implementada en el primer cuatrimestre de la asignatura anual *Técnicas Físicas II* del tercer curso del Grado en Física y del Programa Conjunto en Física y Matemáticas, durante el curso 2019-2020. Está basada en una estrategia de aprendizaje por proyectos [2-8], y tiene como finalidad el desarrollo de un sistema completo de medida automatizada del pulso cardíaco, incluyendo sensor, acondicionador, adquisición automatizada por computador, procesamiento y visualización de resultados. El proyecto requiere la integración y aplicación de todos conocimientos adquiridos durante el transcurso de la asignatura, y se ha diseñado reproduciendo los pasos del método científico que el alumno deberá aplicar en su actividad profesional [9]: definición del problema y búsqueda de soluciones viables; selección de componentes, diseño, simulación, montaje y validación, así como el desarrollo de la automatización del proceso de adquisición y tratamiento de datos. El hecho de tomar como referencia una señal biométrica permite enmarcar el proyecto dentro de una aplicación real, con una señal con unas características (amplitud débil, baja relación señal-ruido) que ponen de manifiesto la necesidad y ventajas de realizar una adquisición automatizada que permita la extracción de información (pulsaciones/minuto, en este caso) aún en condiciones de muy elevado nivel de ruido, gracias a su procesado matemático mediante técnicas avanzadas como la transformada de Fourier. Así, con la experiencia diseñada se pretende que los alumnos sean capaces de abordar un problema complejo, que integre diversas actividades similares a las realizadas en un entorno profesional, donde además de aprender a trabajar en equipo, desarrollen el autoaprendizaje mediante una metodología activa. Al haber un producto final real y cercano a ellos, la motivación y el interés de los alumnos hacia la actividad se incrementa, logrando así un aprendizaje más profundo [10], estrategia ya utilizada con éxito por los

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el Vicerrectorado de Política Científica (PIIDUZ_19_360).

autores anteriormente en esta asignatura con el diseño y caracterización de un ecualizador [11].

Además, dentro de la apuesta de la Universidad de Zaragoza por el software libre, las actividades desarrolladas, tanto de simulación de los circuitos electrónicos como el diseño de la plataforma de caracterización, test y medida automatizada se llevan a cabo con herramientas de dominio público y código abierto. Ello además permite a los estudiantes disponer de las aplicaciones necesarias en sus computadoras sin ninguna restricción, de forma que puedan avanzar en el desarrollo del proyecto de manera individual (cada grupo y/o estudiante) favoreciendo el trabajo asíncrono.

Este artículo ha sido organizado de la siguiente manera: La Sección II contextualiza el trabajo, la Sección III presenta las líneas básicas de la propuesta de proyecto, así como la metodología a seguir por parte de los estudiantes. La Sección IV describe los pasos llevados a cabo por éstos, para en la Sección V presentar los resultados obtenidos. Finalmente, la Sección VI propone las conclusiones del trabajo junto con algunas líneas de trabajo futuro.

II. CONTEXTO

El Grado en Física de la Universidad de Zaragoza consta de 240 créditos, se desarrolla en cuatro años e integra cinco módulos: básico, métodos matemáticos, física clásica, estructura de la materia y técnicas físicas, además de asignaturas optativas específicas y el trabajo fin de Grado.

El módulo de Técnicas Físicas, de 24 ECTS, se distribuye en tres asignaturas obligatorias, impartidas en los tres últimos cursos del grado. En Técnicas Físicas I (8 créditos ECTS), en segundo curso, se adquieren las competencias básicas en sistemas de medida y tratamiento de datos de sistemas físicos. Impartida por las Áreas de Electrónica (E, 6 créditos) y Física Atómica, Molecular y Nuclear (FAMN, 2 créditos). Los objetivos específicos consisten en comprender los fundamentos teóricos de la instrumentación electrónica (E); analizar y diseñar circuitos electrónicos para la realización de medidas básicas (E); diseñar experimentos con instrumentación electrónica básica (E); evaluar la calidad de las medidas (FAMN); y llevar a cabo y/o verificar procesos de calibración (FAMN). Tras cursar la asignatura, los estudiantes dispondrán de los conocimientos necesarios para seleccionar y saber utilizar adecuadamente la instrumentación básica de un laboratorio de medida electrónica.

Técnicas Físicas II, en tercer curso, constituye un paso adelante, profundizando en el análisis y diseño de sistemas de medida y adquisición de datos con control automatizado de instrumentación electrónica, que permiten el desarrollo de trabajos experimentales en las distintas áreas de la Física. De carácter anual, cuenta con una duración de 10 créditos ECTS, cuya impartición está asignada a las Áreas de Electrónica (4 ECTS, primer cuatrimestre), Física Aplicada, FAMN, Física de la Materia Condensada y Física Teórica (1.5 ECTS cada una en el segundo cuatrimestre). Entre las competencias específicas de esta asignatura se encuentran adquirir conocimiento sobre fundamentos físicos y criterio para la selección de sensores de magnitudes físicas (E); analizar y diseñar el acondicionamiento de señales de un sistema de medida (E); comprender los fundamentos del muestreo y cuantificación de señales (E); conocer y saber elegir entre los diferentes sistemas de automatización de medidas, empleando herramientas informáticas para la adquisición, automatización y procesado de las medidas (E); y manejar instrumentación

básica de medida y control en diversas áreas experimentales de la física: acústica, fluidos, interacción radiación-materia y propiedades de la materia (resto de Áreas).

Finalmente, Técnicas Físicas III, en cuarto curso, es la aplicación de instrumentación específica de medida y control en diversas áreas experimentales de la Física. Consta de 6 créditos ECTS en primer cuatrimestre, estructurados en cuatro experiencias de 1.5 ECTS cada una con el objetivo de desarrollar competencias experimentales relacionadas con el diseño de un montaje experimental, su puesta a punto, aplicación a un problema concreto y evaluación de sus prestaciones, aplicándolas en diferentes áreas de la Física a las que están, por tanto, vinculadas.

El proyecto propuesto se enmarca dentro la asignatura Técnicas Físicas II. Tras adquirir en Técnicas Físicas I de segundo curso del Grado las competencias adecuadas para seleccionar y utilizar instrumentación electrónica básica, en la asignatura de tercer curso se presentan los fundamentos de sistemas de medida, adquisición y procesado de datos, profundizando en cada uno de sus bloques: sensores, acondicionadores, convertidores de señales, adquisición, procesado y control, secuenciando adecuadamente conocimientos teóricos y experiencias de laboratorio para lograr los resultados de aprendizaje previstos. Las experiencias de laboratorio se encuentran distribuidas en cinco sesiones S1-S5 de dos horas de duración cada una, que se llevan a cabo en grupos de dos alumnos, dedicadas a S1: Amplificación; S2: Filtrado 1; S3: Filtrado 2; S4: Muestreo y Digitalización y S5: Sistema completo de medida. Las dos primeras sesiones están dedicadas a conceptos básicos de acondicionado (amplificación, filtrado, incluyendo simulación y caracterización experimental), mientras que en las tres últimas sesiones los alumnos ya deben automatizar los procesos de adquisición de datos y tratamiento de medidas empleando las herramientas (SCPI para programación de instrumentos, Python como lenguaje de desarrollo y control) presentadas en las sesiones teórico-experimentales destinadas a ello, programadas para ser llevadas en paralelo con los contenidos teóricos. Así, en S3 se automatiza la caracterización del filtro diseñado en S2, controlando el generador-osciloscopio DSO-X2002A de Agilent [12] conectado con el PC a través de su puerto USB; mientras que S4 está destinada a conceptos de muestreo, cuantificación y representación espectral, haciendo uso de una tarjeta de adquisición de datos (USB6008 de National Instruments, NI [13]). Una vez realizadas estas primeras cuatro actividades regladas de laboratorio, a los estudiantes se les propone la última actividad, consistente en el desarrollo completo de un sistema automatizado de medida del pulso cardíaco, para la que disponen de la última sesión S5 de laboratorio, más hasta un máximo de 20 h pertenecientes al bloque de trabajos de la asignatura.

Para llevar a cabo esta actividad, los 74 alumnos de la asignatura durante el primer semestre del curso 2019-2020 se han distribuido en grupos de dos personas (no necesariamente coincidentes con los de prácticas). Constituye la actividad o proyecto final, puesto que integra tanto los contenidos teóricos como las destrezas adquiridas en instrumentación electrónica actual y automatización de procesos para la consecución de un sistema completo.

III. METODOLOGÍA

A. Definición del proyecto

El proyecto propuesto consiste en el desarrollo de un sistema de lectura del pulso cardíaco basado en la transmisión de la luz a través de los tejidos de un dedo de la mano, y su monitorización empleando un sistema de adquisición por computador. La actividad principal se lleva a cabo en las últimas tres semanas de la asignatura, asegurando de esta forma que los alumnos disponen de todos los conocimientos para su desarrollo. En él, los estudiantes deben resolver el sistema planteado a partir de la definición de especificaciones, y desarrollar todos los pasos requeridos en el diseño y puesta en marcha de un sistema de adquisición y procesamiento basado en instrumentación controlada por computador. Para ello, deberán analizar el problema propuesto, incorporando las limitaciones impuestas en cuanto a disponibilidad de material; proponer un circuito de acondicionamiento inicial que deberá ser simulado y verificado eléctricamente; una vez depurado, el sistema de acondicionamiento diseñado será implementado físicamente para su verificación experimental; finalmente, se desarrollará un sistema de adquisición de las medidas basado en la tarjeta de adquisición de datos de bajo coste (NI-USB6008) previamente utilizada en la sesión práctica S4, que permita su procesamiento en un PC y la extracción de la información (pulsaciones por minuto, en este caso) a través de la información en frecuencia de la señal adquirida.

Las herramientas informáticas necesarias (simulación eléctrica y lenguaje de programación para control de instrumentación y acondicionamiento de medidas) están a disposición de los alumnos, que tienen la posibilidad (ampliamente recomendada por el equipo docente) de instalarse en sus ordenadores portátiles de forma gratuita para que puedan utilizarlas en el momento que más les convenga. En el caso de la herramienta de simulación electrónica, se propone el uso del simulador Tina-TI [14], de Texas Instruments. Este simulador dispone de manera gratuita de las opciones necesarias para la simulación de sistemas electrónicos de tamaño medio, y puede descargarse desde la web o bien a través de un enlace proporcionado por el profesorado a una unidad de almacenamiento en red proporcionada por la propia universidad. El software de automatización de medidas, acondicionamiento de datos y representación gráfica escogido es una distribución de Python 3.7 Spyder [15]. Este lenguaje de programación de alto nivel de dominio público se encuentra ampliamente extendido en muy diversos ámbitos de la Ciencia, Tecnología e Industria, y dispone de multitud de librerías especializadas de acceso gratuito para el desarrollo de aplicaciones de procesamiento de datos, control de instrumentación por computador, desarrollo de aplicaciones microcontroladas, simulación de procesos en física computacional o *deep learning*, entre otros, por lo que resulta especialmente atractivo para los alumnos del Grado en Física. Como en el caso del simulador eléctrico, la descarga de esta aplicación puede hacerse desde la unidad de almacenamiento en la nube proporcionada por Unizar.

B. Organización de las actividades

El proyecto ha sido programado en diferentes actuaciones, distribuidas a lo largo del calendario del cuatrimestre. La primera de ellas, de una duración de 2 h, es la presentación de la actividad, seguida de los fundamentos básicos de la medida del pulso cardíaco (Figura 1), y las diferentes metodologías para ello.

Como dispositivo sensor de bajo coste se les propone el empleo de una resistencia tipo LDR (*Light Dependent Resistor*, Figura 2) conectado en un divisor resistivo que hará la transducción de variaciones de intensidad de luz recibida por el sensor procedente de una fuente de luz blanca, en variaciones de tensión en el divisor. El dispositivo propuesto como etapa de amplificación es un Amplificador Operacional (O_{pamp}) $\mu A741$, polarizado con tensión simétrica de $\pm 12 V$, y como fuente de luz se dispone de una bombilla de luz blanca de 12 V. Tanto el sensor, emisor de luz y O_{pamp} escogidos son dispositivos de propósito general y bajo coste. Su selección ha obedecido, más que a su idoneidad para la actividad propuesta, a su manejabilidad, disponibilidad y bajo coste, asumible para realizar la experiencia manteniendo los 37 montajes en placa blanca simultáneamente durante la realización. Además, la sensibilidad del sensor de luz a un amplio rango de longitudes de onda, que incluyen el rango visible, hacen que su respuesta se vea altamente sometida a interferencia externa, ensuciando la señal bajo estudio. Con ello es posible valorar por parte del estudiante la eficacia del análisis espectral de una señal (su estudio en frecuencia en lugar de su análisis temporal, más frecuente), donde es posible discriminar la señal de interés del resto de señales interferentes.



(a)

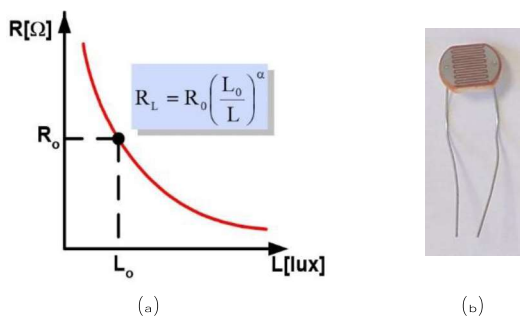


(b)

*Pulsaciones por minuto	Adulto Sedentario	Adulto en forma	Deportista
Reposo	70 - 90	60 - 80	40 - 60
Ejercicio aeróbico	110 - 130	120 - 140	140 - 160
Ejercicio intenso	130 - 150	140 - 160	160 - 200

(c)

Fig. 1. (a), (b) Sistema médico de medida del pulso cardíaco y (c) valores de referencia de pulsaciones



Parámetro	Valores típicos
R₀	2K-200K @ 10lux
α	0,7-1,5
Tensión máxima	100V-150V
Potencia máxima	50mW-1W

(c)

Fig. 2. LDR: (a) Comportamiento resistencia-iluminación y modelo, (b) dispositivo y (c) valores típicos

La segunda actividad, de una duración de 5 horas, consiste en la elección de una etapa de acondicionado adecuada para la realización del sistema de lectura del pulso, de acuerdo a las especificaciones propuestas y la determinación de los elementos que lo componen de acuerdo a unas directrices previas. Para ello los equipos emplean el simulador eléctrico gratuito Tina-TI, de Texas Instruments, analizando y comprobando el comportamiento de las estructuras seleccionadas, empleando como magnitud de entrada una señal eléctrica con un perfil similar al de la señal eléctrica producida por el divisor resistivo que es proporcionada por el equipo docente, formado por seis personas, tres profesores y tres investigadores en formación con actividad docente asignada, de forma que cada uno de los grupos de dos estudiantes es tutorizado por un equipo profesor-investigador. Tras la comprobación de los resultados por parte del tutor del proyecto asignado, los estudiantes proceden al montaje experimental y su verificación en laboratorio, con una disponibilidad de 5 horas.

La última actividad de laboratorio consiste en el desarrollo de una aplicación para computador de adquisición y procesamiento de la señal proveniente del circuito. Para la toma de medidas se emplea la tarjeta de adquisición de datos USB6008 de NI, y cuyo control se lleva a cabo mediante el paquete *nidaqmx.py* de Python [16]. Este paquete dispone de las funciones necesarias para la adquisición de las medidas por las entradas analógicas de las tarjetas de National Instruments, y requiere tener instalado previamente el driver NI-DAQmx, disponible de forma gratuita. Para el procesamiento de los datos adquiridos, los estudiantes emplean el paquete de cálculo científico *scipy.py*, que dispone, entre otras cosas, de las funciones necesarias para el cálculo de la transformada de Fourier de un conjunto de datos y su adecuada ordenación. Esta actividad tiene asignadas también 5 horas.

Tanto para la realización de esta actividad como de la anterior, la verificación en laboratorio del circuito diseñado, los estudiantes disponen de acceso al laboratorio en las mismas franjas horarias que las que tenían asignadas a las prácticas, que en este curso han sido de lunes a jueves, en horario de 9 a 11 h. Además, se han habilitado dos tardes

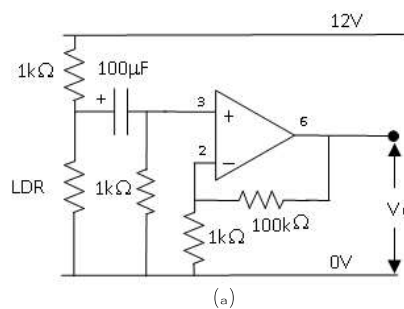
adicionales, jueves y viernes, con turnos de 15 a 17 h y de 17 a 19 h, en los que pueden acceder al laboratorio previa solicitud a través del Moodle de la asignatura, de manera que se garantiza la disponibilidad de laboratorio necesaria.

El resto de tiempo asignado a la actividad, 3 h aproximadamente, se emplea en la elaboración de un entregable evaluable por cada equipo, que incluye una memoria breve con un registro de trabajo incluyendo actividades y tiempos por estudiante, selección de materiales, resultados de simulación, códigos desarrollados y resultados obtenidos, así como una valoración individual de la actividad de cada uno del resto de los estudiantes del grupo a modo de evaluación entre pares.

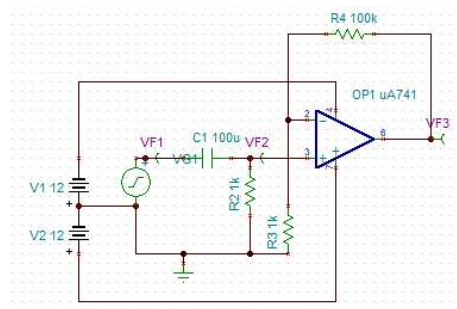
IV. DESARROLLO DEL PROYECTO

Tras la presentación del problema propuesto y sus condiciones de contorno, los estudiantes plantean el circuito básico, basado en un divisor resistivo y etapa amplificadora con operacional (Fig. 3a), cuyo comportamiento es analizado empleando el simulador eléctrico Tina-TI. La señal proveniente del divisor resistivo que incluye el sensor LDR es emulada en el simulador con un modelo de generador de señal proporcionado por el equipo docente, dando lugar en el simulador al circuito de la Fig. 3b. Las señales en el divisor resistivo, entrada no inversora del Opamp y salida del amplificador se muestran en la Fig. 4 (VF1, VF2 y VF3, respectivamente, ver Fig. 3).

Como se aprecia en la Fig. 4, la tensión en el divisor resistivo consta de un nivel de continua de valor elevado sobre el que se superpone una señal de pequeña amplitud y frecuencia de aproximadamente 1 Hz. Tras el circuito RC conectado a la entrada no inversora del Opamp, la señal resultante se encuentra filtrada y centrada sobre 0 V, lo que permite amplificarla sin saturar la salida, donde se observa una señal de mayor amplitud. Si bien la forma de señal es alterada por el circuito, debemos recordar que el objeto del proyecto no es determinar la forma de la señal sino sólo su frecuencia, cuya integridad es mantenida.



(a)



(b)

Fig. 3. (a) Esquemático del circuito de adaptación de la señal del sensor; (b) modelo eléctrico en el simulador

Dado que el objetivo del trabajo es comprobar la utilidad de trabajar en el dominio de la frecuencia en determinadas condiciones de trabajo, los estudiantes realizan no sólo la simulación transitoria del circuito (que da origen a la Fig. 4), sino también el análisis de Fourier de la señal de entrada y de salida, para comprobar efecto del procesado realizado por el circuito. La Fig. 5a muestra el espectro de la tensión en el divisor resistivo (señal VF1), mientras, que se puede comparar con la obtenida en la salida de la etapa (Fig. 5b, señal VF3). Puede observarse cómo en el primer caso prácticamente la componente de DC oculta la señal de pulso, mientras que en la salida el espectro muestra con nitidez los primeros armónicos de la señal bajo estudio, de forma que el armónico principal (aproximadamente a 1 Hz), contiene la información del pulso.

Tras obtener los resultados de simulación del circuito propuesto, los estudiantes verifican experimentalmente su funcionamiento empleando los componentes electrónicos

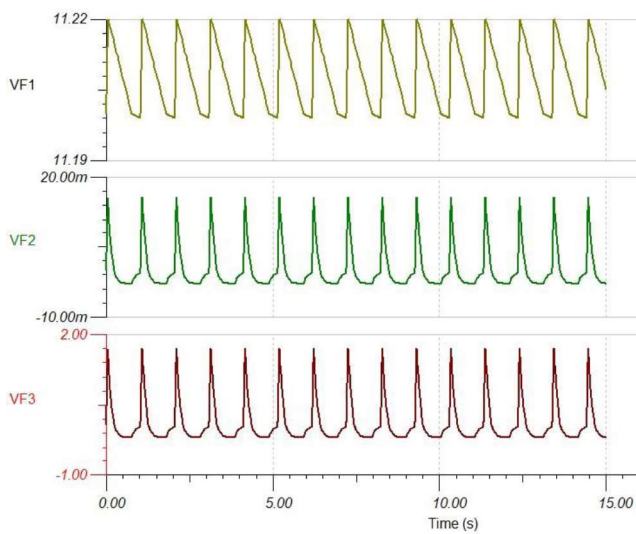
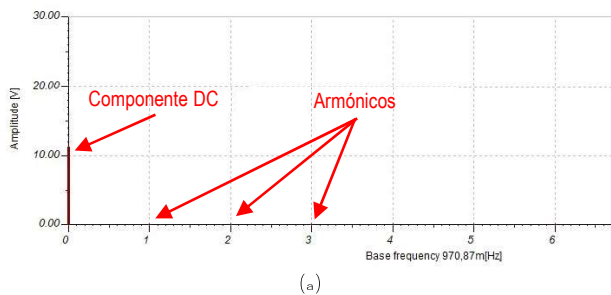
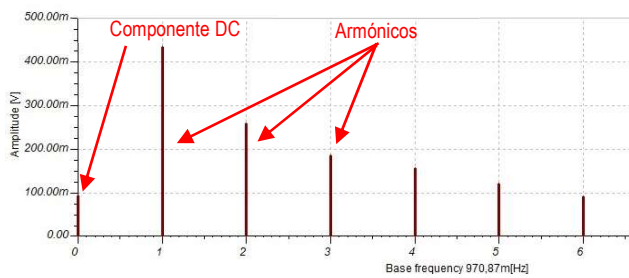


Fig. 4. Señales simuladas en Tina: Salida del sensor (VF1), tras el condensador de acoplo (VF2) y salida del amplificador (VF3)



(a)

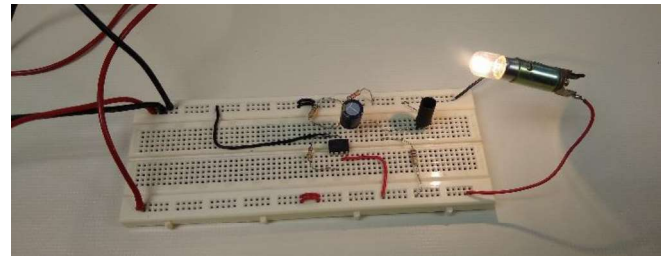


(b)

Fig. 5. Análisis espectral (simulación) de la señal de (a) entrada y (b) salida del circuito de acondicionado

disponibles (Fig. 6a), y comprobando con el osciloscopio la presencia de señal variable de frecuencia compatible con el pulso del estudiante. En este estadio del trabajo, los estudiantes deben comprobar el funcionamiento del circuito, comparando la señal procedente del divisor resistivo (con la entrada del osciloscopio en modo de corriente alterna, AC), con la señal en la salida del circuito (Fig. 7).

La selección de un sensor de luz de muy baja selectividad como es una LDR permite observar el efecto de las interferencias en un proceso de medida. Para mantener su efecto limitado, el sensor es rodeado por un cilindro de material termo retráctil negro que limita la incidencia de luz a su parte superior (Fig. 6b). A diferencia de las experiencias docentes de laboratorio usuales, en las que las condiciones de trabajo se establecen cuidadosamente para evitar la intervención de señales externas a la que se quiere medir, en este proyecto el estudiante puede llegar a observar la intervención de señales ajenas al proceso de medida, causadas, principalmente en nuestro caso, por el parpadeo de las luces del laboratorio, a una frecuencia de 100 Hz (Fig. 8). Esta situación es aprovechada para que los estudiantes reflexionen sobre este fenómeno y propongan diferentes opciones para minimizar su efecto.



(a)



(b)

Fig. 6. (a) Montaje experimental para la medida del pulso cardiaco y (b) detalle de la LDR. La entrada de luz se limita mediante una pieza de material termo retráctil



Fig. 7. Señal de pulso en el divisor resistivo (verde) y a la salida de la etapa amplificadora (amarillo)

Además, permite analizar la importancia de seleccionar una adecuada frecuencia de muestreo en la digitalización de la señal que se procesa. En este sentido, se sugiere a los alumnos que configuren la última etapa experimental del trabajo (la adquisición de las señales mediante una DAQ) con una frecuencia que sub-muestree la señal, de forma que no sólo filtre la interferencia de 100 Hz existente, sino que recupere sólo las primeras componentes de frecuencia de la señal bajo estudio, que contienen la información que se pretende recuperar, reduciendo las exigencias de la electrónica implicada en el proceso.

Finalmente, los estudiantes configuran desde el PC el sistema de adquisición (Fig. 9) para realizar una toma de medidas de entre 20 y 40 segundos, que represente en tiempo real el espectro en frecuencia de la señal mediante la obtención de su transformada de Fourier. Las Fig. 10 y Fig. 11 muestran los resultados obtenidos en dos muestreos de 20 s y 40 s, respectivamente, en dos equipos diferentes de estudiantes. En ambos casos (Fig. 10b y Fig. 11b) puede observarse un pico en frecuencia próxima a 1 Hz, correspondientes a las pulsaciones del individuo monitorizado.

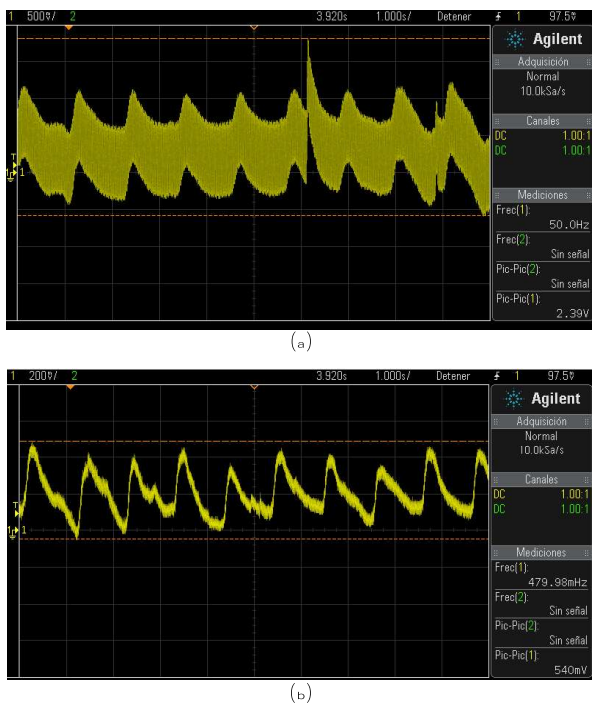


Fig. 8. Ejemplo de señales observadas a la salida de la etapa de acondicionado: (a) afectadas por la interferencia de 100 Hz de parpadeo de las lámparas fluorescentes y (b) reduciendo su efecto eliminando la iluminación en el puesto de medida

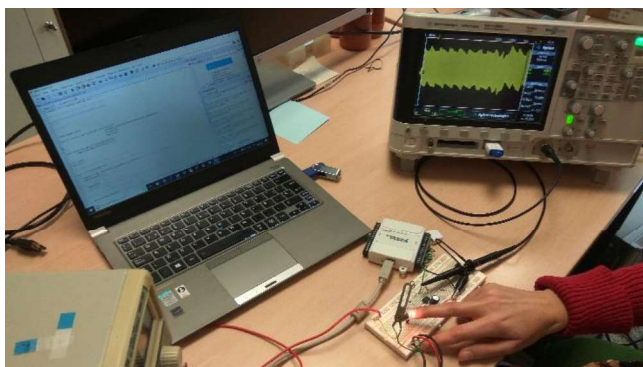


Fig. 9. Ejemplo de medida experimental automatizada del pulso cardiaco

V. RESULTADOS

Esta experiencia fue llevada a cabo por 74 estudiantes agrupados en 37 equipos. Todos ellos alcanzaron el nivel previsto de consecución de objetivos.

Cada grupo ha elaborado un breve portfolio, que recoge la documentación específica del trabajo desarrollado para cada actividad (diseño, simulación eléctrica, caracterización experimental) recogiendo los análisis, instrumentación y resultados más relevantes, además de los códigos desarrollados. Al elaborar el portfolio, los estudiantes deben reflexionar sobre los resultados obtenidos para justificarlos convenientemente. Así, por ejemplo, diversos grupos constataron la presencia de un segundo pico en el espectro de la señal adquirida, en ocasiones incluso mayor que el correspondiente a la frecuencia del pulso, alrededor de los 0 Hz (tensión continua, Fig. 11b). Tras analizar en detalle el comportamiento del circuito, se propuso la hipótesis de que se puede producir una variación lenta del nivel de continua en la señal del sensor, asociada a pequeños cambios en la posición relativa del grupo formado por emisor de luz, dedo y receptor, motivado por la falta de una estructura que los mantenga fijos. Esas variaciones no son filtradas por el condensador de acoplo, (Fig. 3), trasladándose a lo largo de toda la cadena de medida. Para comprobar la hipótesis, los estudiantes simularon de nuevo el circuito, añadiendo a las variaciones asociadas al sensor una segunda señal senoidal de baja frecuencia y amplitud (100 mHz y 5 mV, respectivamente) que reprodujese el efecto. Los resultados en los tres puntos de simulación, VF1, VF2 y VF3 se muestran en la Fig. 12. Un

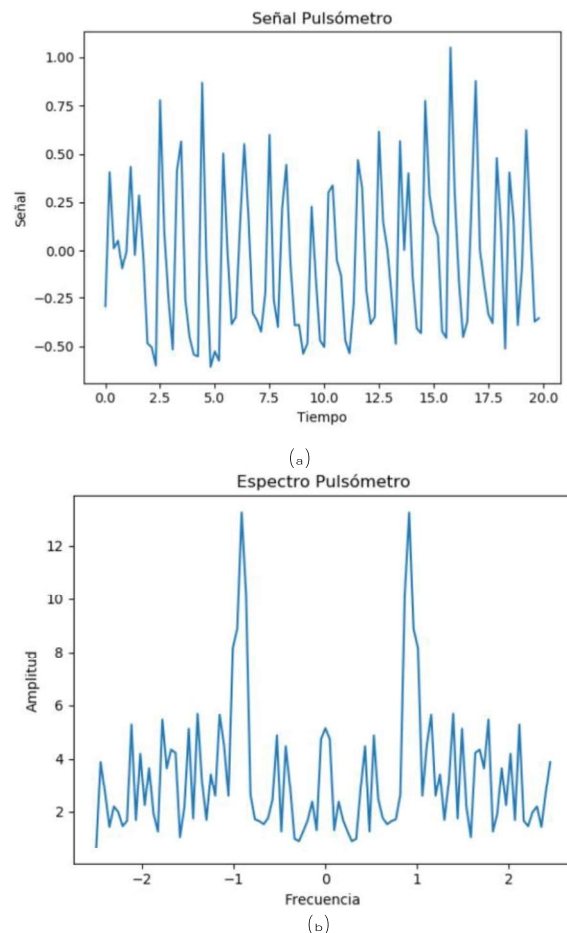


Fig. 10. Estimación de la frecuencia de pulso con 20 segundos de toma de datos: (a) señal temporal y (b) espectro final

análisis espectral de los resultados de simulación (Fig. 13), muestran el pico asociado al nivel de DC mucho mayor que

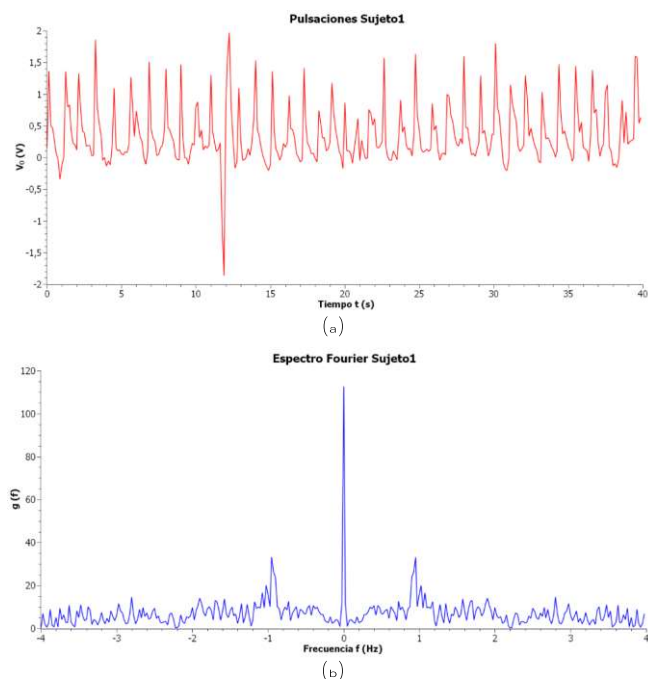


Fig. 11. Estimación de la frecuencia de pulso con 40 segundos de toma de datos: (a) señal temporal y (b) espectro final

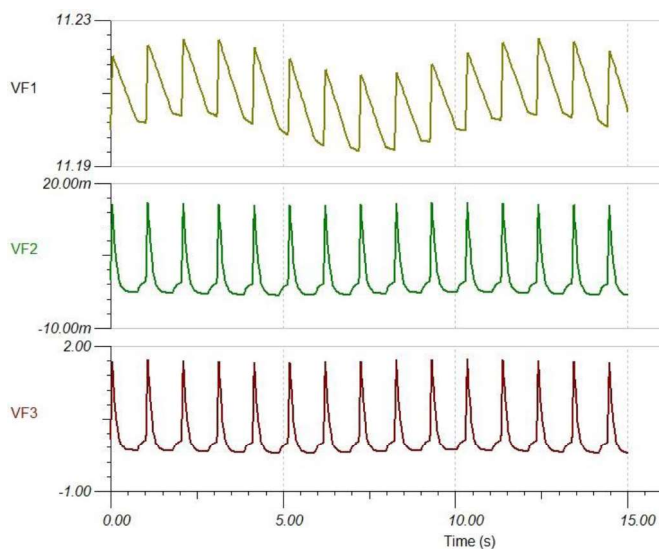


Fig. 12. Simulación en Tina de las señales obtenida en los puntos VF1, VF2 y VF3 para una señal con nivel de DC lentamente variable superpuesta a la señal de pulso

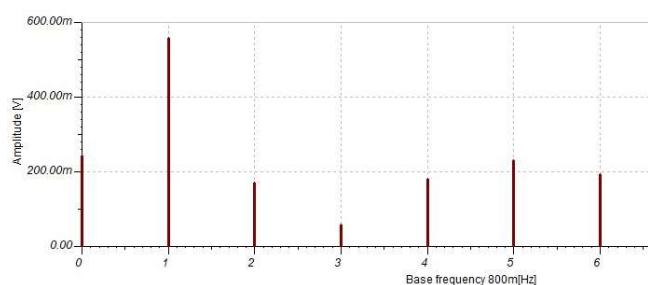


Fig. 13. Espectro de la señal de salida para el caso mostrado en la Fig. 12. Se aprecia el aumento de intensidad relativa del nivel de DC respecto del armónico asociado al pulso en la salida el circuito respecto al obtenido inicialmente (Fig. 5b)

en el caso inicial, que justifica perfectamente los resultados experimentales obtenidos.

Por otra parte, destacar que en varios grupos los propios estudiantes propusieron extender el estudio con la modificación de la topología para su compatibilidad con una tensión de alimentación de 5 V, de forma que sea posible obtener un sistema portátil alimentado directamente desde el PC de control a través del puerto USB. Creemos que esto pone de manifiesto la motivación e interés que ha suscitado la experiencia propuesta.

La encuesta realizada para establecer el grado de satisfacción alcanzado con la experiencia arroja como resultado una valoración positiva: de los 74 estudiantes implicados en la asignatura respondieron a la encuesta 62, con una valoración de 4.2 sobre 5, y destacaron: i) la elección del sistema de medida de parámetros biométricos al considerarlo un ejemplo completo real y actual, en comparación con la mayoría de las experiencias de laboratorio del grado; ii) la metodología seguida, desde el planteamiento hasta simulación y el montaje final con automatización de medidas, haciendo uso de diferentes herramientas que además son de uso gratuito de forma que facilitan una distribución óptima del tiempo para cada estudiante.

VI. CONCLUSIONES

El proyecto presentado favorece la integración de conocimientos teóricos y prácticos en una actividad completa contextualizada y real cuyo desarrollo pretende mantener un cierto grado de autonomía de los alumnos, a través de una tutoría inspirada en el refuerzo, de forma que sean los alumnos los que ejecuten todos los pasos tendentes a resolver el problema propuesto: planteamiento, búsqueda y aplicación de recursos disponibles, obtención de resultados y conclusiones, elaboración de un informe, dentro de un calendario preestablecido, poniendo en valor los conocimientos y habilidades adquiridas, siguiendo los pasos del método científico de forma similar a como se trabaja en tanto en el mundo académico como en la empresa, de forma que globalmente consideremos supone una experiencia de gran interés formativo, que dota a los alumnos no solo de competencias específicas sino también transversales.

Por otra parte, el empleo de herramientas TIC resulta fundamental. Además, el hecho de emplear software no comercial, permite a los estudiantes disponer de los recursos informáticos en sus ordenadores, y con ello cierta independencia respecto de la disponibilidad del laboratorio, así como la posibilidad de trabajar de forma asincrónica, de acuerdo con su propio calendario. En este sentido, la migración de Matlab—utilizado en el proyecto anterior [11] a Python confiere una mayor flexibilidad, al ser un lenguaje de programación empleado en otras asignaturas y Departamentos de la Sección de Física, en la que se encuadra el Grado objeto de este proyecto, así como en empresas con base tecnológica (diseño y caracterización de sistemas microelectrónicos y programables, Deep Learning e inteligencia artificial, minería de datos o modelado de procesos complejos).

REFERENCIAS

- [1] https://estudios.unizar.es/estudio/asignaturas?anyo_academico=2019&estudio_id=20190124¢ro_id=100&plan_id_nk=447&sort=cursos
- [2] G. Solomon, "Project-Based Learning: a Primer," *Technology and Learning*, vol. 23, no. 6, pp. 20-30, Jan. 2003

- [3] A. Fernández-March, "Metodologías Activas para la Formación de Competencias," *Educatio siglo XXI*, no. 24, pp. 35–56, 2006.
- [4] B. Warin, O. Talbi, C. Kolski and F. Hoogstoel, "Multi-Role Project (MRP): A New Project-Based Learning Method for STEM," *IEEE Transactions on Education*, vol. 59, no. 2, pp. 137-146, May 2016.
- [5] F. Martínez, L.C. Herrero and S. de Pablo, "Project-Based Learning and Rubrics in the Teaching of Power Supplies and Photovoltaic Electricity," *IEEE Transactions on Education*, vol. 54, no. 1, pp. 87-96, Feb. 2011.
- [6] Z. Zhang, C.T. Hansen and M.A.E. Andersen, "Teaching Power Electronics With a Design-Oriented, Project-Based Learning Method at the Technical University of Denmark," *IEEE Transactions on Education*, vol. 59, no. 1, pp. 32-38, Feb. 2016.
- [7] I. Osuna-Galán and A.M. Rosas-Mendoza, "Aprendizaje Basado en Proyectos y modelos matemáticos para estudiantes de Ingeniería en Mecatrónica," *Latin American Journal of Physics Education*, vol. 11, no. 4, pp. 4309-1-7, Dec. 2017.
- [8] O. Esteban, R. Vergaz, X. Quintana and M. Caño-García, "A Spectrophotometer implementation as project-based learning in Photonics Engineering," *Óptica Pura y Aplicada*, vol. 52, no. 4, pp. 1-10, Nov. 2019.
- [9] A. Arguilles. Formación basada en competencias laborales. Ed. Limusa (1997)
- [10] D. P. Ausubel, J. D. Novak, H. Hanesian, *Psicología Educativa, un punto de vista cognoscitivo*, Editorial Trilla, Mexico, 2009.
- [11] A. Márquez, J. Pérez-Bailón, B. Calvo, N. Medrano, S. Celma, 'Diseño y Caracterización Automatizada de un Ecuilizador como ABP en el Grado en Física', *Actas del Congreso de Tecnología, Aprendizaje y Enseñanza de la Electrónica TAEÉ 2016*, Sevilla, 2016.
- [12] Agilent Technologies, *Agilent InfiniiVision 2000-X Series Oscilloscopes User's Guide*, 2011.
- [13] National Instruments, *NI USB-6008/6009 Bus-Powered Multifunction DAQ USB Device*, 2015.
- [14] <http://www.ti.com/tool/tina-ti>
- [15] M: Lutz, *Learning Python*, Ed. O'Reilly, 2013.
- [16] National Instruments, *NI-DAQmx Python API Documentation*, 2017.