

Facultad de
Ciencias

VNIVERSIDAD
D SALAMANCA

Informe final Proyecto de Innovación Docente ID2022/217

“Creación de hardware y software propios para la extensión de las capacidades de laboratorios portátiles unipersonales”

Participantes: Raúl Rengel Estévez (coordinador)
Ignacio Íñiguez de la Torre

Departamento de Física Aplicada
Facultad de Ciencias

Datos del proyecto de innovación docente

TÍTULO: Creación de hardware y software propios para la extensión de las capacidades de laboratorios portátiles unipersonales

REFERENCIA: ID2022/217

PDI RESPONSABLE:

RAÚL RENGEL ESTÉVEZ

CENTROS EN LOS QUE SE HA LLEVADO A CABO EL PROYECTO:

FACULTAD DE CIENCIAS

MIEMBROS DEL EQUIPO:

RAÚL RENGEL ESTÉVEZ

IGNACIO ÍÑIGUEZ DE LA TORRE MULAS

DURACIÓN:

CURSO ACADÉMICO 22/23

SUBVENCIÓN CONCEDIDA: 750 €

Objetivos

El principal objetivo del proyecto era consolidar la acción innovadora iniciado en el proyecto de innovación y mejora docente ID2021/083, ampliando las capacidades del laboratorio portátil de electrónica, mediante la creación de placas de expansión y su software asociado.

De manera más específica los objetivos particulares eran:

- Diseñar placas de circuito impreso y el software de control asociado para el laboratorio portátil.
- Continuar el plan piloto de prácticas con laboratorio remoto en grupo reducido del grado en ingeniería informática, para obtener más datos y disponer de evidencias adecuadas para la publicación de resultados.
- Utilizar las placas de expansión con el grupo de trabajo remoto del primer curso de ingeniería informática para mejorar el procedimiento de toma de medidas de dispositivos.
- Realizar una nueva práctica en el grado en física mediante las placas de expansión y nuevos sistemas hardware, evaluando la mejora en el conocimiento y medida de dispositivos semiconductores a través de la determinación de parámetros físicos.
- Realizar avances punteros en la utilización de equipos de adquisición de datos para la docencia mediante el desarrollo de recursos propios no dependientes de terceros.

Actuaciones realizadas

Debido a la fecha de resolución de la convocatoria (transcurrida ya la mitad del cuatrimestre) tuvimos que abordar el proyecto de innovación y mejora docente con modificaciones respecto a los planes iniciales. Para ello, los dos profesores involucrados en el presente proyecto discutimos las diferentes posibilidades y establecimos un plan de trabajo rectificado respecto al planteamiento inicial. Por una parte, continuamos con el plan piloto de prácticas con laboratorio remoto en un grupo reducido de la asignatura “Fundamentos Físicos” del primer curso del grado en ingeniería informática. Se tomó como base el trabajo realizado en el curso anterior, pero mejorando dos aspectos relevantes. Contando con la financiación proporcionada por el Departamento de Física Aplicada, en primer lugar, mediante el software EDA *Eagle* se diseñaron unas placas de circuito impreso que facilitase a los estudiantes la tarea de conectar las entradas y salidas del sistema myDAQ y pudiesen incorporar al mismo tiempo una *protoboard*, de modo que se ganase en comodidad, fiabilidad de las conexiones y estabilidad de los montajes (ver Figura 1). Estas placas son complementarias de las posteriormente desarrolladas con cargo al presente proyecto de innovación docente, que serán empleadas en el próximo curso, y cuyo diseño y fabricación se pospusieron al segundo cuatrimestre.

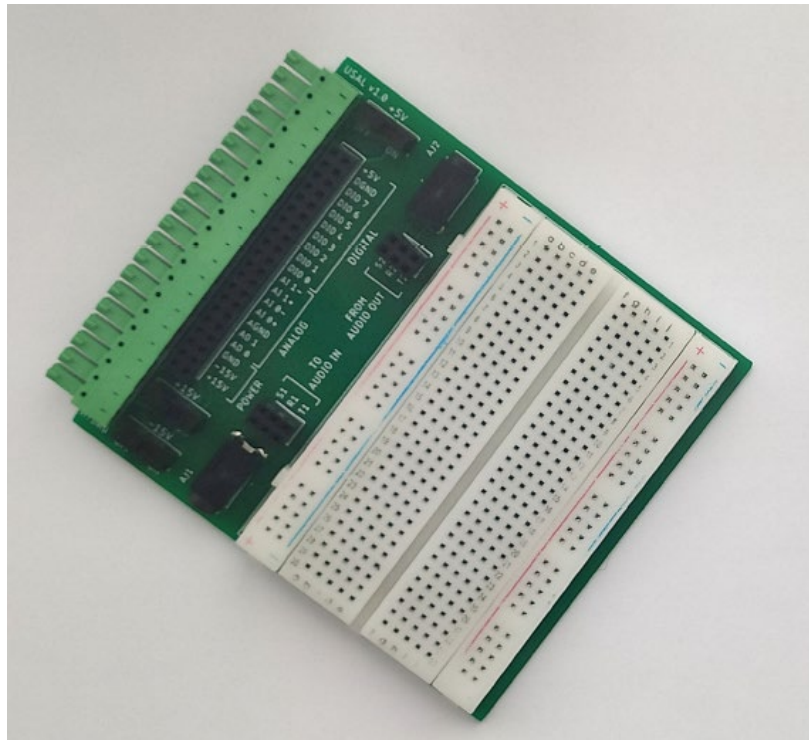


Figura 1. Primera placa diseñada para facilitar la conexión de componentes al sistema myDAQ y el montaje de circuitos.

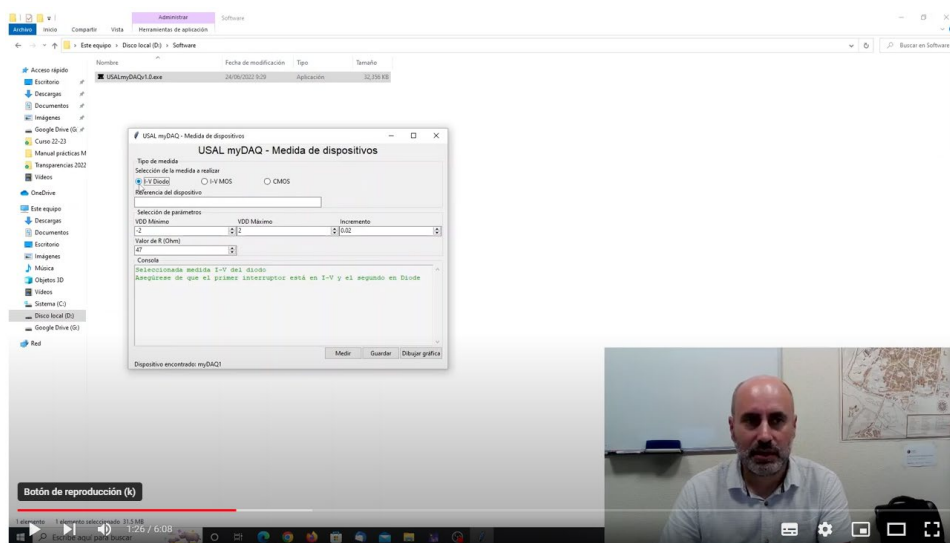


Figura 2. Fotograma del vídeo-tutorial sobre el funcionamiento del software desarrollado para el proyecto (<https://www.youtube.com/watch?v=blhEEUaNA7M>).

Asimismo, iniciamos el desarrollo del software para facilitar la medida de las curvas características de dispositivos. Para ello, empleamos el lenguaje de programación Python, haciendo uso de la biblioteca *Tkinter*, que es una adaptación de *Tcl/Tk* para este lenguaje. Se considera la biblioteca estándar para el desarrollo de interfaces gráficas de usuario en Python.

La aplicación se ha diseñado con un estilo minimalista y limpio, con los elementos imprescindibles para su funcionamiento, con el fin de que su uso sea directo e intuitivo. En todo caso, grabamos un vídeo explicativo sobre el funcionamiento de esta primera versión inicial del software con el fin de que los estudiantes pudieran trabajar de manera completamente autónoma (véase la Figura 2). Este tutorial para los estudiantes está accesible en la siguiente dirección: <https://www.youtube.com/watch?v=blhEEUaNA7M>

Con este software y con las primeras placas desarrolladas costeadas por el Departamento de Física Aplicada se ha podido abordar de manera sencilla la medida de curvas corriente-voltaje de diodos y transistores MOSFET, así como las curvas de transferencia de voltaje (V_{out} - V_{in}) de etapas CMOS. Ello ha sido de gran utilidad tanto en las prácticas de la asignatura “Fundamentos Físicos” del primer curso del grado en ingeniería informática como en la asignatura “Laboratorio de Electrónica” del cuarto curso del grado en física. Se modificó el manual de laboratorio específico para los estudiantes que cursaron la modalidad de prácticas con laboratorio portátil, incluyendo la información sobre las nuevas placas y el software asociado. Debido al final de todas las restricciones relacionadas con la pandemia en comparación con el curso previo 21-22, en el presente curso se consideró un formato completamente presencial desde el primer día, por lo que hubo que readaptar el contenido de las prácticas del grupo de trabajo estándar (control), y se modificó el manual y contenido de las prácticas con el laboratorio portátil (myDAQ) para que fueran completamente análogas, de modo que se evitase cualquier posible diferencia no deseada en cuanto al desarrollo efectivo de las prácticas.

En el caso de la asignatura del cuarto curso del grado en física (Laboratorio de Electrónica), diseñamos una nueva práctica cuyo contenido principal es analizar el comportamiento DC de un diodo de unión y de un transistor MOSFET tipo n (nMOS) y tipo p (pMOS). La primera parte de la práctica consiste en obtener las curvas corriente-voltaje y entender cómo afectan las configuraciones del montaje experimental en la resolución de los valores de corriente (véase la Figura 3, que forma parte de la documentación proporcionada a los estudiantes). Por otra parte, se hizo hincapié en la importancia de describir el origen de las limitaciones de los valores máximos que se pueden registrar, ya que las propias características del equipo de medida imponen unos valores límite a los voltajes/corrientes aplicados/medidos. El segundo paso consistió en realizar un modelo teórico ajustando los valores de los parámetros para replicar los datos experimentales de las curvas. Se han obtenido los parámetros físicos de la corriente inversa de saturación y el coeficiente de idealidad de un diodo y los de potencial umbral, transconductancia y movilidad para el MOSFET. Mediante medias y modelos más avanzados se ha estudiado también el efecto de la degradación de la movilidad y la longitud

efectiva del canal. Todo ello configura una práctica de extraordinario interés para los estudiantes del grado en física, que complementa de manera significativa a los contenidos teóricos vistos en otras asignaturas (por ejemplo, Electrónica Física).

Montaje experimental con myDAQ: curva de salida y de transferencia

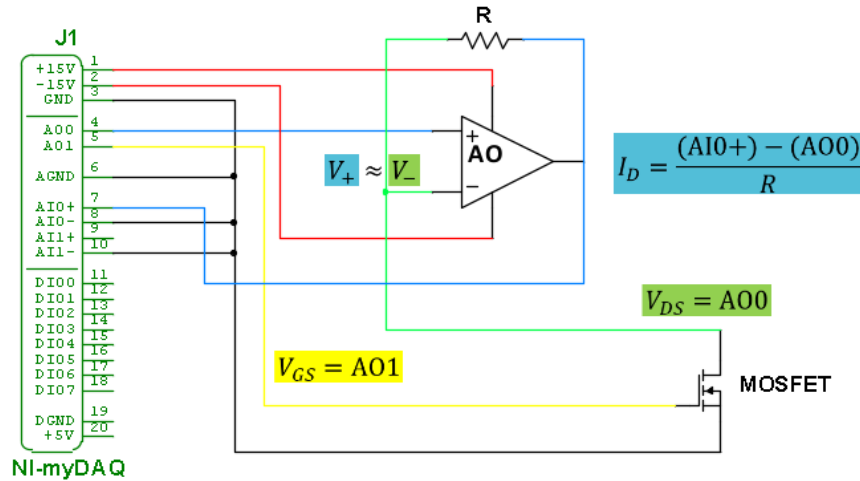


Figura 3. Esquema circuital diseñado para la caracterización de un transistor MOSFET, empleado en la práctica con los alumnos del grado en física.

Es importante destacar que para esta práctica fue necesario realizar algunas modificaciones respecto a la primera versión del software, ya que era necesario incorporar la posibilidad de medir curvas I_D - V_{GS} (corriente de drenador frente a voltaje de puerta, para valores de voltaje de puerta constantes). El próximo curso se empleará el sistema desarrollado junto con el uso del Analog Discovery 2, lo que permitirá a los estudiantes comparar las diferencias entre ambos sistemas y obtener las conclusiones oportunas, fomentando la visión crítica e informada respecto a las especificaciones particulares de cada dispositivo, así como el análisis de soluciones alternativas para paliar las limitaciones.

Como señalamos con anterioridad, la fecha de resolución efectiva del proyecto (21 de octubre de 2022) implicó que ciertas actividades tuviesen que modificarse respecto al calendario previsto, ya que al iniciar las clases se desconocía si dispondríamos de la financiación necesaria para poder realizar dichas actividades. Por ello, se pospuso al segundo cuatrimestre la realización de placas específicas para la medida de curvas corriente-voltaje que no requiriesen montaje por parte de los alumnos, así como la adquisición del sistema Analog Discovery 2, su puesta en funcionamiento y comparación de medidas previamente a su uso en el laboratorio docente.

Para el diseño de las placas específicas para la medida de curvas corriente-voltaje hemos tenido en cuenta algunas consideraciones. En primer lugar, la experiencia adquirida en el primer

cuatrimestre tanto en el desarrollo del software como en el diseño de los circuitos para la caracterización de transistores y diodos usados con los estudiantes del grado en física (mejorados respecto al diseño inicial empleado con los estudiantes del grado en ingeniería informática). En las figuras 4 y 5 se muestran tanto el esquemático del circuito como el diseño de la placa de circuito impreso.

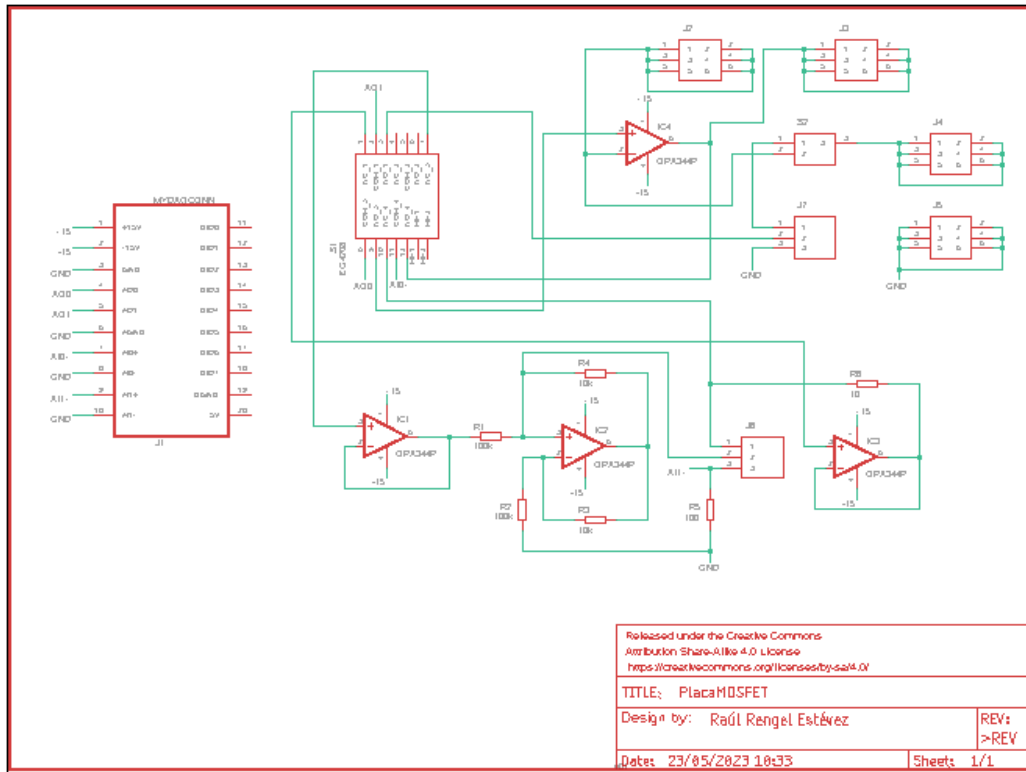


Figura 4. Diseño circuital de la placa para la medida de dispositivos

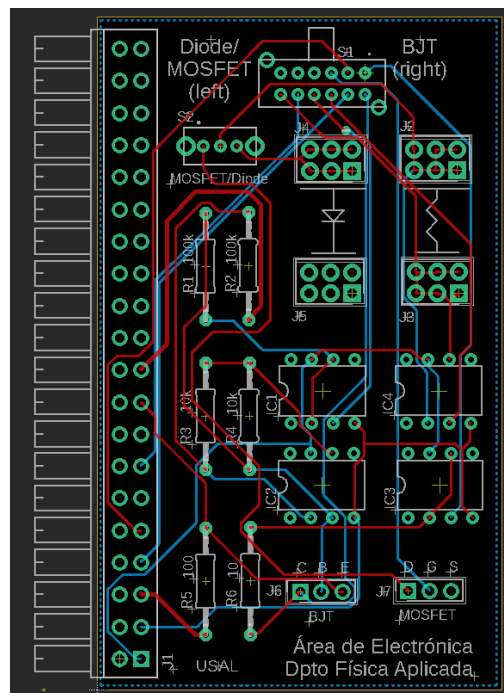


Figura 5. Diseño de la placa de circuito impreso

El trabajo de verificación de la placa ha ido acompañado del desarrollo de una nueva versión del software (que hemos denominado USALmyDAQ), que permita extraer el máximo de funcionalidad de la placa asegurando su uso adecuado por parte de los alumnos en diversas situaciones que se puedan plantear. Algunos requisitos tenidos en cuenta y decididos por parte del equipo docente han sido los siguientes:

- Incorporación de cuatro tipos de medidas: I-V para diodos, curvas de salida de transistor MOSFET, curvas de transferencia de transistor MOSFET, y curvas de salida de transistor BJT.
- Utilización de un sistema sencillo para ser operado por parte del estudiante y que minimizase el coste de las placas. En el diseño se han incorporado cuatro conmutadores para cuya operación se descartó el uso de relés (por su elevado consumo de potencia y por su coste), siendo implementados mediante el uso de dos interruptores de deslizamiento (uno de tipo 4PDT y otro de tipo SPDT). El sistema debe recordar por pantalla cuál es la configuración adecuada para cada tipo de medida.
- Uso de resistencias de alta precisión para minimizar el uso de resistencias externas. Se optó por dejar únicamente una resistencia que pudieran modificar los estudiantes, debido las posibilidades didácticas que ello ofrece. Para el caso de la medida de curvas en un transistor BJT, por su propia naturaleza se optó por un diseño cerrado con las resistencias soldadas en la placa, por lo que en ese caso el software no debe permitir modificar su valor para los cálculos.
- El software debe controlar que no se proporcionen como resultado valores que queden fuera de las especificaciones de potencia y voltaje del sistema myDAQ. Para ello se evalúa dinámicamente y en tiempo real si las medidas superan en algún momento la potencia máxima, y a partir de ese momento se finaliza la medida, ya que, aunque existe un cierto margen de tolerancia mayor de lo especificado por el fabricante, pueden darse valores claramente erróneos si se excede ese límite.
- Debe permitirse también que en las medidas multicurva los estudiantes puedan medir una única curva si lo consideran oportuno, sin que el software dé errores.

Con todo ello, desarrollamos la nueva versión del software, que ha sido puesta a disposición del público general en la dirección <https://github.com/raurenest/USALmyDAQ>. Una captura de pantalla del programa puede verse en la Figura 8.

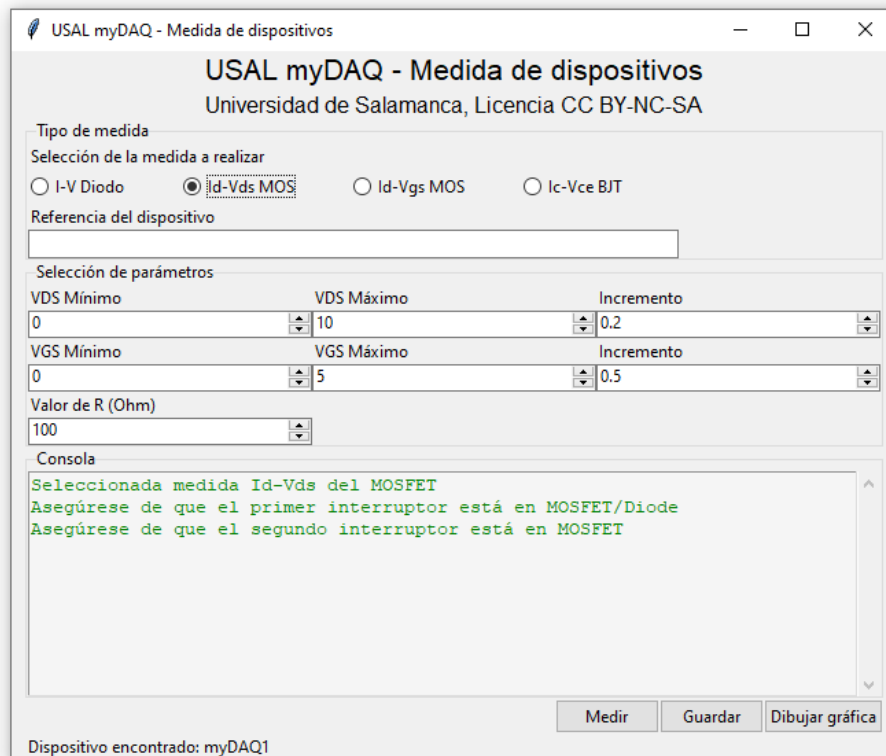


Figura 8. Software desarrollado en el contexto de este proyecto para la medida de curvas corriente-voltaje por parte de los estudiantes.

Resultados y discusión

Respecto a los resultados obtenidos, se han cumplido de manera completamente satisfactoria los objetivos planteados inicialmente en el proyecto, aunque se hayan debido realizar ajustes respecto al plan de trabajo inicial. De manera más concreta, podemos centrarnos en dos aspectos. Por una parte, como estaba previsto, se ha continuado con el plan piloto de prácticas con laboratorio remoto, cuyos resultados de este año comentaremos seguidamente. Por otra parte, se han desarrollado unas nuevas placas que permiten ampliar notablemente las posibilidades del laboratorio portátil. Además, hemos realizado una comparación de los resultados de las medidas de estas placas y sus posibilidades de trabajo en comparación con el sistema Analog Discovery 2.

En cuanto al desarrollo de las prácticas, al igual que el año pasado, ofertamos la posibilidad de utilizar el laboratorio portátil a los estudiantes que así lo quisiesen de manera voluntaria. Sorprendentemente, nos encontramos con que a pesar de la excelente acogida que tuvo esta modalidad de prácticas el curso pasado y el alto grado de satisfacción que manifestaron los alumnos, este año el número de solicitudes no alcanzó el total de las plazas

ofertadas para esta modalidad (10). Mientras que el año pasado tuvimos 23 solicitudes, este año únicamente fueron 7. Creemos que dos factores han contribuido de manera decisiva a ello. Por una parte, el retorno a las actividades de presencialidad plena y el hecho de que la pandemia se haya dado por finalizada a nivel social han influido en la percepción que tienen los alumnos acerca de las actividades remotas realizadas de manera individual. Quizá la no preferencia por reducir el contacto social (entendible en alumnos de primer curso), una vez pasada la pandemia, han podido influir en esta poca demanda. Otro factor puede haber sido también relevante: mientras que el curso pasado las actividades prácticas comenzaron transcurridas varias semanas del comienzo del curso, lo que daba tiempo a los estudiantes para conocer al profesorado y hacerse una idea sobre el contenido de las prácticas, este curso, con el retorno al programa completo de prácticas y junto a un calendario que no daba mayor margen, debimos comenzar antes, lo que implicaba que la selección de estudiantes para este programa piloto debía hacerse en la segunda semana, con los alumnos recién llegados a la universidad. La combinación de ambos factores, por tanto, ha incidido desfavorablemente en la selección del grupo, ya que en todo momento hemos querido mantener el carácter voluntario a la hora de elegir esta modalidad. Por ello, consideramos que los resultados obtenidos deben tomarse con precaución, ya que el número de estudiantes de este curso es escaso y además varios de ellos eran repetidores, que probablemente eligieron esta opción para poder compatibilizar mejor la realización de las prácticas, al hacerlas en modalidad remota asíncrona, con la asistencia a otras asignaturas de segundo curso o superiores.

Curso	Nota media de prácticas
2017-2018	7.43
2018-2019	6.8
2019-2020	7.13
2020-2021*	5.64
2021-2022 (myDAQ)	7.84
2021-2022* (resto)	5.72
2022-2023 (myDAQ)	5.94
2022-2023 (resto)	5.62

*Tabla 1. Calificaciones en la parte práctica de la asignatura en diferentes cursos. El * indica que en esos casos las prácticas se realizaron en un formato híbrido (parte presencial y parte online) debido a la pandemia.*

Como puede verse en la Tabla I, los resultados del grupo experimental han sido superiores a los del grupo de control, si bien no se observa la gran diferencia que se apreció el curso pasado. Por tanto, sería necesario realizar más cursos este programa para conocer si verdaderamente se traduce en una mejora notable del rendimiento, como parecían sugerir los resultados del curso 21-22, o si es una mejora marginal, como parecen sugerir los resultados del presente curso. Si bien es cierto que realizamos algunas pequeñas modificaciones en cuanto al desarrollo de las prácticas, estas no son significativas ni relevantes como para justificar las diferencias obtenidas, que, en nuestra opinión, son más atribuibles al perfil específico de los alumnos que optaron este curso por esta modalidad, pues de los siete, dos no realizaron más que una o dos de las seis prácticas planificadas. Si descartásemos los resultados de esos dos estudiantes, que por sí solos reducen significativamente el promedio, **la nota obtenida por los cinco estudiantes que sí realizaron las prácticas completas sería de un 7.42, cifra cercana a la obtenida en el curso 21-22** por los estudiantes de esta modalidad. Sin embargo, consideramos que no es estadísticamente significativo el considerar únicamente a 5 estudiantes para obtener conclusiones definitivas. Por ello, tampoco realizamos una encuesta al concluir el cuatrimestre, sino que recabamos de manera verbal algunas de sus opiniones. Los estudiantes con los que contrastamos impresiones manifestaron su satisfacción general con el sistema empleado, incidiendo en algunas de las conclusiones extraídas el curso pasado (se trata de una modalidad en la que los estudiantes aprenden haciendo, lo cual es satisfactorio, y además a su ritmo), aunque en algún caso nos manifestaron que la carga de trabajo asociada la segunda práctica era un poco elevada, lo que se tendrá en cuenta para futuras acciones.

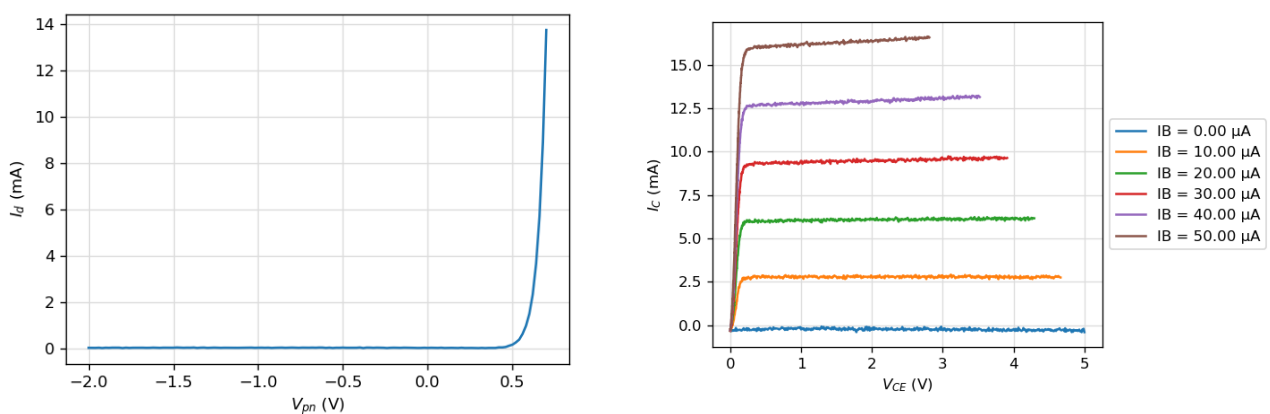


Figura 9. Medida obtenida para la curva corriente de voltaje de un diodo, así como las curvas I_c - V_{CE} de un transistor BJT, con el sistema (placa+software) desarrollado.

En cuanto al diseño de las nuevas placas de expansión, el resultado ha sido muy satisfactorio. Hemos realizado una combinación de hardware y software que facilita enormemente a los alumnos el procedimiento de medida de curvas (véase la Figura 9), que no está disponible con el equipo myDAQ que se vende comercialmente. El sistema desarrollado en este proyecto permite centrarse en otros aspectos más relacionados con las propiedades de los dispositivos, su caracterización y la explicación de la física que gobierna su funcionamiento.

Por otra parte, también hemos podido evaluar las posibilidades del sistema Analog Discovery 2 para realizar estas mismas operaciones. En primer lugar, es de justicia señalar que no son sistemas equivalentes, ya que el Analog Discovery 2 constituye en la práctica un dispositivo multiinstrumento, capaz de actuar con mayor versatilidad y con un software profesional con múltiples aplicaciones. Sin embargo, es fundamental señalar una serie de aspectos que son de alta relevancia en el contexto docente de la electrónica:

- Hemos demostrado que es posible desarrollar placas de muy bajo coste que tienen un rendimiento comparable al de sistemas comerciales mucho más caros. Por ejemplo, en el caso del Analog Discovery, la placa de expansión para la medida de transistores tiene un coste final superior a los 50€ (siendo además el equipo base el doble de caro que el myDAQ). Cada una de las placas desarrolladas por nosotros tiene un coste aproximado de unos 20€.
- Mientras que el sistema comercial del Analog Discovery 2 tiene una limitación importante, como es que no se pueden medir curvas de salida tomando como referencia valores de corriente de base de transistores BJT, sino voltajes, lo que no es útil ni desde el punto de vista experimental ni desde el académico, nuestro sistema sí lo permite.
- El Analog Discovery 2 permite trabajar con valores mayores de potencia consumida, realizando una gestión más eficiente que en el caso del sistema desarrollado en combinación con el myDAQ.
- Las medidas realizadas son muy similares con los dos sistemas (véase la Figura 10), lo que confirma la calidad de nuestro sistema en comparación con un equipo que, si bien está también pensado para un uso docente, tiene un coste mucho mayor.
- El sistema Analog Discovery 2 parece especialmente adecuado para demostraciones magistrales, en las que el profesor aproveche la mayor gama de posibilidades que ofrece a la hora de representar magnitudes, controlar parámetros como cantidad de muestras, tiempo de adquisición, etc.
-

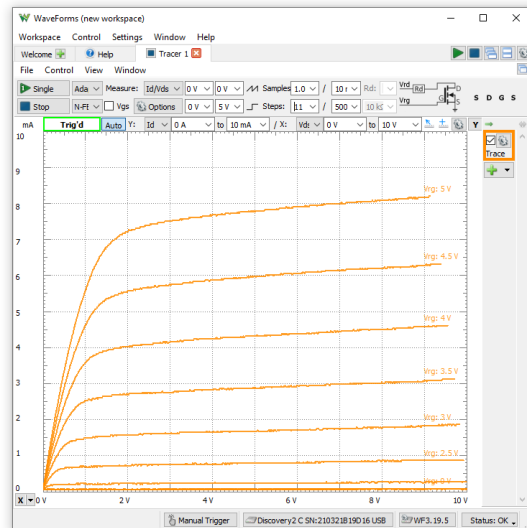
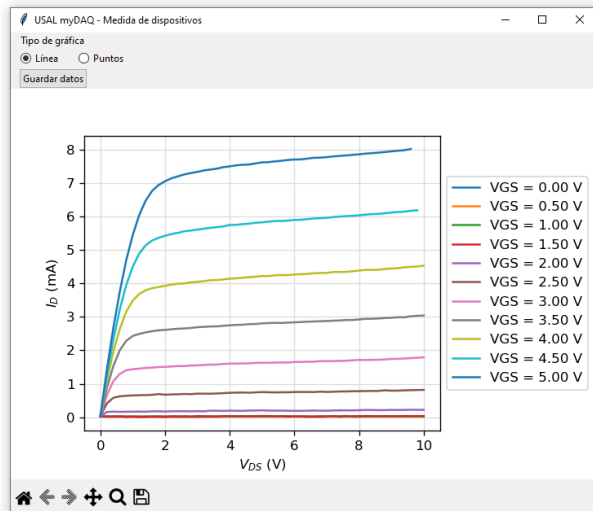


Figura 10. Medidas para un transistor MOSFET realizadas con el sistema desarrollado en el presente proyecto (izda) y realizadas con el sistema Analog Discovery 2 (dcha).

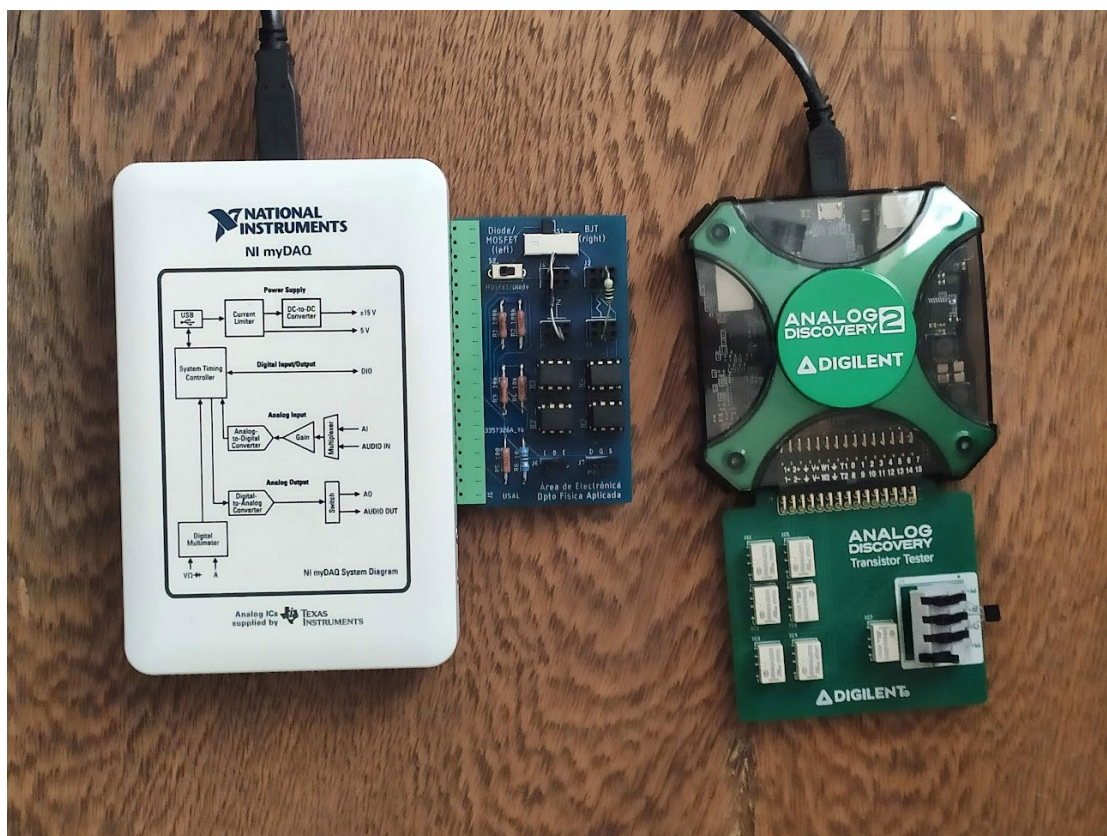


Figura 11. Sistema de medida desarrollado utilizando myDAQ (izda) y sistema Analog Discovery 2 con la placa de medida de curvas de transistores (dcha).

Justificación económica

La subvención concedida para el presente proyecto de innovación se ha empleado íntegramente para la fabricación de las placas de expansión descritas en esta memoria, la adquisición de sus componentes, y la adquisición del sistema Analog Discovery 2. El Departamento de Física Aplicada ha contribuido costeando una versión complementaria de las placas de expansión (las que incorporan una *protoboard*) así como una placa comercial de expansión del sistema Analog Discovery 2 para la medida de transistores.

Conclusiones y perspectivas futuras

Consideramos que las conclusiones del proyecto deben responder al ejercicio de autoevaluación que planteamos en el momento de la solicitud.

- ¿Se ha confirmado la mejora en el rendimiento de los estudiantes que formaban parte del grupo experimental? ¿Si no es así, cuáles han sido los motivos?

Si bien los resultados obtenidos apuntan a una respuesta afirmativa a la primera pregunta, no es posible establecer una conclusión científica sólida debido al bajo número de alumnos que optaron por esta modalidad, por los motivos explicados con anterioridad. Creemos en todo caso que sí existe una mejora de la calidad de los conocimientos adquiridos empleando este tipo de laboratorios portátiles, ya que los alumnos pueden adaptar sus propios ritmos de aprendizaje al desarrollo de las prácticas.

- ¿El hardware y software desarrollados han cumplido los objetivos inicialmente planteados?

La respuesta debe ser un rotundo sí, ya que, de hecho, hemos ampliado y mejorado nuestras perspectivas iniciales. Disponemos ahora de un número adecuado de equipos con sus correspondientes placas y software de expansión a los que podemos dar un uso extraordinariamente versátil, ya que pueden servir tanto para realizar una modalidad de prácticas completas de manera remota desde casa, como para ser utilizados de manera puntual en algunas prácticas, desarrollar prácticas magistrales, o para realizar demostraciones educativas en aquellas situaciones en las que no es posible desplazar varios equipos de laboratorio.

- ¿Es viable incorporar en cursos futuros nuevas versiones que recojan las aportaciones y sugerencias finales de los alumnos?

Sí, las sugerencias recibidas por parte de los alumnos se centran en una reducción menor de la carga de trabajo de alguna de las prácticas, por lo que su replanteamiento es plenamente factible y así será tenido en cuenta.

- ¿Qué resultados son susceptibles de ser publicados o dados a conocer a la comunidad educativa universitaria?

Creemos que nuestros resultados confirman de una manera informal que un laboratorio portátil de uso individual proporciona iguales o mejores resultados que el trabajo presencial en el laboratorio tradicional, si bien, con los condicionantes anteriormente expuestos, pensamos que es necesario recoger más evidencias para poder publicar este resultado.

En cuanto a las perspectivas futuras y acciones de mejora previstas, planteamos principalmente realizar el próximo curso de manera más completa (empleando también el Analog Discovery 2) la práctica específica con los alumnos del grado en física para la medida y análisis de las propiedades físicas de los dispositivos. Para ello, sería necesario realizar una labor exhaustiva de identificación y selección de componentes comerciales que puedan ser caracterizados y, considerando la información proporcionada por las curvas medidas con el sistema desarrollado, junto con la información ofertada por los fabricantes en las hojas de especificaciones, plantear trabajos individualizados a los alumnos para el análisis de las características físicas de los dispositivos.

Por otra parte, es posible, realizando unos ajustes menores, proseguir con el plan piloto de uso de laboratorio portátil. Si bien no prevemos necesidades relevantes relacionadas con la adquisición o desarrollo de nuevos equipos, sí sería necesario realizar un replanteamiento de cómo se realiza la oferta y la selección de los estudiantes para asegurar una representatividad estadística adecuada que permita confirmar sin lugar a duda las ventajas que implican los laboratorios remotos individuales.

Finalmente, plantearemos el uso de los equipos de laboratorio portátil en asignaturas de otros grados, como puede ser el grado en ingeniería mecánica, ya que por sus características y por los contenidos tratados en ellas pueden ser directamente utilizable con una adaptación menor de los contenidos de los manuales de prácticas ya desarrollados en este proyecto de innovación y el inmediatamente anterior. Ello puede ser interesante para ampliar el perfil de estudiantes y extraer conclusiones más generales sobre los beneficios de la utilización de estos equipos para el aprendizaje de la electrónica.